

На правах рукописи



**ЧИНОКАЛОВ ЕВГЕНИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ПОЛУЧЕНИЯ ВИНТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ ВОЛОЧЕНИЕМ**

Специальность 05.16.05 - Обработка металлов давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новокузнецк – 2020

Диссертационная работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

**Научный руководитель**

**Фастыковский Андрей Ростиславович**  
доктор технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:**

**Сидельников Сергей Борисович**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Обработка  
металлов давлением» ФГАОУ ВО  
«Сибирский федеральный университет»

**Харитонов Вениамин Александрович**  
кандидат технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Технологий  
обработки материалов» ФГБОУ ВО  
«Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова»

**Ведущая организация:**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный  
университет им. первого Президента  
России Б.Н. Ельцина»

Защита состоится «23» марта 2021 г. в 10<sup>00</sup> часов в ауд. 3П, на заседании диссертационного совета Д 212.252.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу: 654007, г. Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, д. 42, СибГИУ.

Факс: 8(3843) 46-57-92.

E-mail: [ds21225201@sibsiu.ru](mailto:ds21225201@sibsiu.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» [www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru).

Автореферат разослан « » 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.т.н., профессор



О.И. Нохрина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы работы и степень ее разработанности

Металлургическая промышленность является базовой отраслью, обеспечивающей металлом такие флагманы экономики, как машиностроение, строительство, транспорт, добычу и переработку полезных ископаемых и т.д. Сегодня на первое место по потреблению металлургической продукции третьего и четвертого передела выходит строительная индустрия, что связано с увеличением темпов строительства и внедрению новых технологий возведения высотных сейсмостойких зданий и сооружений, использующих в больших объемах металл и железобетонные конструкции. Все большее распространение в строительстве получают многозаходные винтовые профили, которые используются в качестве свай, для армирования железобетонных конструкций, для скрепления деревянных деталей и т.д.

Наиболее используемым в строительстве профилем является арматура. Существует два основных вида арматурных профилей: периодический и винтовой. Арматура с винтовым профилем, разработанная относительно недавно, существенно превосходит по технологическим параметрам обычную периодическую. Она имеет постоянное сечение по длине, по сравнению с периодической при одинаковой прочности меньше весит и имеет большую площадь сцепления с бетоном. Однако, нерешенные технические и технологические проблемы, особенно при производстве многозаходных винтовых профилей волочением, серьезно затрудняют массовое производство этой продукции для строительной отрасли. Поиск новых эффективных технологий производства холоднодеформированных многозаходных винтовых профилей для строительной отрасли является актуальной задачей, решение которой позволит снизить металлоемкость и увеличить прочность бетонных конструкций, уменьшить затраты на строительство зданий и сооружений.

Большой вклад в развитие теории и практики волочения внесли труды Губкина С.И., Перлина И.Л., Аркулиса Г.Э., Колмогорова Г.Л., Жилкина В.З., Зибеля Е., Брижмена П.У., Райта Р.Н., Каргина В.Р., Логинов Ю.Н., Паршина С.В., Харитонов В.А. и других. Заложенные ими основы позволили приступить к созданию технологии получения винтовых профилей волочением.

Работа выполнена в соответствии с государственной программой Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности до 2020 года» (подпрограмма 10 «Металлургия»).

**Цель работы:** Разработка новой энергоэффективной технологии получения винтовых профилей волочением без операции скручивания и создание комплекса технических и технологических решений для практической реализации на производстве.

**Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:**

1. Разработать математическую модель формирования многозаходной винтовой поверхности волочением без скручивания, определить область осуществимости данного процесса и факторы на него влияющие.

2. Оценить энергопотребление при формировании многозаходных винтовых профилей волочением без скручивания в сравнении с известными технологиями и выявить оптимальные условия ведения процесса.

3. Исследовать влияние основных факторов при волочении многозаходного винтового профиля по новой технологии без операции скручивания на шаг винтовой поверхности и усилие волочения с целью определения рациональных режимов формоизменения.

4. Исследовать механические свойства многозаходных винтовых профилей при использовании их в качестве арматуры и сопоставить со свойствами арматуры Вр-1 с целью оценки перспективности данного вида продукции.

5. Разработать комплекс технических и технологических решений для внедрения в производство новой технологии получения многозаходных винтовых профилей волочением без операции скручивания, а также использовать новые знания в учебном процессе.

#### **Научная новизна.**

1. Впервые научно обоснована возможность формирования винтовых профилей волочением без операции скручивания. Получены зависимости для оценки области осуществимости данного процесса.

2. Разработаны отсутствующие в литературе математические модели, позволяющие с учетом размеров заготовки и инструмента, числа заходов винтовой поверхности, величины деформации, положения деформирующих роликов относительно оси заготовки определить шаг винтовой поверхности при волочении без скручивания и оценить затраты энергии.

3. Экспериментально установлено влияние размеров деформирующих роликов и их расположение относительно оси заготовки, величины обжатия, а также числа заходов винтовой поверхности на усилие волочения.

4. Получены новые количественные данные по эксплуатационным параметрам винтовых профилей, полученных волочением по новой технологии при использовании их в качестве арматуры.

#### **Практическая значимость.**

1. Разработан новый способ и устройство для получения волочением без скручивания длинномерных винтовых профилей, новизна решений защищена патентами (патент РФ на полезную модель №143099, МПК В21С 3/08, бюллетень №19 от 10.07.2014; патент РФ на изобретение №2553728, МПК В21С 1/22, бюллетень №17 от 20.06.2015).

2. Установлены наиболее значимые факторы, влияющие на формирование винтовых профилей волочением и на основании этого выработаны рекомендации по выбору оптимальных режимов формоизменения.

3. Разработана технология получения винтовой арматуры и винтовых гвоздей волочением без скручивания.

4. С использованием разработанной методики оценки энергозатрат определены условия эффективного использования предлагаемого способа получения длинномерных винтовых профилей.

### **Реализация результатов работы.**

1. Разработана новая конструкция инструмента для получения винтовых профилей волочением без скручивания, адаптированная к условиям метизного производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

2. Разработана и опробована в промышленных условиях метизного производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» технология получения новых видов продукции: винтовой арматуры и винтовых гвоздей. Ожидаемый экономический эффект составляет 11,6 млн. руб. в год.

3. Результаты диссертационной работы внедрены в учебном процессе ФГБОУ ВО Сибирский государственный индустриальный университет и используются при обучении бакалавров по направлению подготовки 22.03.02 Металлургия.

### **Методы исследования.**

При исследованиях использовались методы тензометрии с элементами сбора и обработки информации на компьютере по программе входящей в комплект USB самописца BM8020. Микротвердость исследовалась методом восстановленного отпечатка на приборе ПМТ-3. Механические свойства определялись по стандартным методикам на разрывной машине Lloid LR 50K.

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

1. Экспериментально проверенные математические модели, описывающие процесс формирования винтового профиля волочением без скручивания и позволяющие оценить область осуществимости новой технологии.

2. Результаты аналитических и экспериментальных исследований влияния геометрических параметров инструмента и режимов деформирования на формирование многозаходных винтовых профилей волочением без скручивания.

3. Обоснование энергоэффективности предлагаемых решений при получении винтовых профилей волочением и данные по влиянию условий деформирования и параметров инструмента на усилие волочения при формировании винтового профиля.

4. Результаты исследований эксплуатационных свойств многозаходной винтовой арматуры.

5. Возможность использования новой технологии и инструмента для получения винтовой арматуры и винтовых гвоздей в условиях действующего производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

**Достоверность и обоснованность полученных результатов, выводов и рекомендаций** подтверждаются большим объемом экспериментального материала, полученного в лабораторных и промышленных условиях с применением современных методик, корректным использованием современных математических методов; согласованным сравнительным анализом аналитических и экспериментальных результатов и зависимостей; адекватностью разработанных математических моделей; применением современных методов статистической обработки результатов; сопоставлением полученных результатов с данными других исследователей; эффективностью предложенных

технических и технологических решений, подтвержденных результатами промышленных испытаний и внедрением в производство. Достоверность и новизна технических решений подтверждена патентами.

**Основные результаты проведенных исследований** докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и семинарах: VII международной конференции «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений» (г. Тамбов: ТГУ им. Г.Р. Державина, 2013 г.); IV международной научно-технической конференции «Организационно-экономические проблемы повышения эффективности металлургического производства (г. Новокузнецк: СибГИУ, 2013 г.); международной научно-практической конференции «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте 2013» (г. Одесса, 2013 г.); III международной конференции «Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных материалов и сплавов» (г. Оренбург, 2014 г.); международном симпозиуме «Перспективные материалы и технологии» (г. Витебск, 2017 г.); XI международном конгрессе прокатчиков (г. Магнитогорск, 2017 г.); XXI международной научно-практической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» (г. Новокузнецк, 2019 г.).

**Публикации.** Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 16 печатных работах, в том числе в 6 журналах, входящих в перечень ВАК, 3 в базах цитирования Scopus и Web of Science, один патент на полезную модель и один патент на изобретение.

**Личный вклад автора** состоит в научной постановке задач исследования, анализе литературных данных, теоретическом обосновании возможности формирования винтовой поверхности волочением, исследовании процесса формирования винтовой поверхности волочением, изучении механических свойств полученных профилей, статистической обработке и анализе полученных результатов, рекомендациях по внедрению технологий в производство.

#### **Соответствие паспорту специальности.**

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует паспорту специальности 05.16.05 «Обработка металлов давлением» в следующих областях исследований:

- исследование и расчет деформационных, скоростных, силовых, температурных и других параметров разнообразных процессов обработки металлов, сплавов и композитов давлением;
- математическое описание процессов пластической деформации металлов, сплавов и композитов с целью создания математических моделей, способов, процессов и технологий;
- разработка способов, процессов и технологий для производства металлопродукции, обеспечивающих экологическую безопасность, экономию материальных и энергетических ресурсов, повышающих качество и расширяющих сортамент изделий.

### **Структура и объем работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы и приложений. Изложена на 144 страницах, содержит 12 таблиц, 61 рисунок. Список литературных данных составляет 141 наименование.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** дано обоснование актуальности темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлена структура диссертации. Приведены основные положения, выносимые на защиту и указан личный вклад автора в исследования, проведенные по теме диссертации.

В **первой главе** выполнен анализ имеющихся в информационных источниках материалов по получению винтовых профилей волочением.

В результате проведенного анализа литературных и патентных материалов установлено следующее:

- в настоящее время у нас в стране и за рубежом активно разрабатываются методы получения винтовых профилей. Наиболее известны работы Каргина В.Р., Паршина С.В., в которых заложены основы новых технологий;
- аналитический обзор состояния работ позволил классифицировать известные способы получения винтовых профилей и выявить наиболее перспективные направления исследований. Перспективность исследования и развития способов получения винтовых профилей обусловлена, с одной стороны, широкими возможностями применения и высоким ожидаемым эффектом, с другой стороны малой изученностью вопроса в практическом и теоретическом плане;
- обзор способов получения винтовых профилей показал, что они находятся на начальном этапе разработки и далеко не все возможности в техническом и технологическом плане исследованы и применены на практике;
- анализ литературы позволил установить, что большие перспективы имеет способ получения винтовых профилей волочением, но промышленное использование его сдерживается малой изученностью в теоретическом плане и большими техническими сложностями при волочении в бунтах.

Выводы литературного анализа позволили определить основные направления исследований и сформулировать цель и задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** выполнено математическое обоснование возможности и энергоэффективности получения винтовых профилей волочением без операции скручивания.

Выполнено теоретическое обоснование возможности формирования винтовой поверхности волочением без скручивания. Сформулировано условие, при котором формируется винтовая поверхность вида:

$$\frac{N_2 + N_T}{N_1} < 1. \quad (1)$$

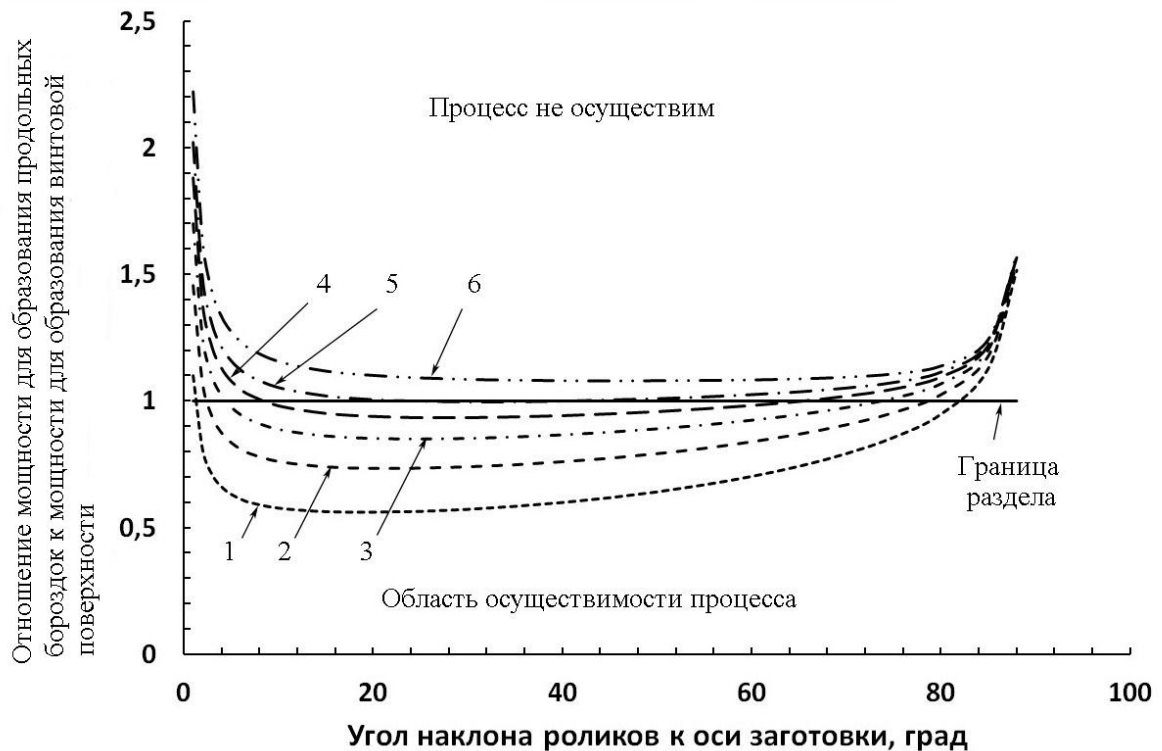
где  $N_1$  – мощность, необходимая для образования продольных бороздок;  $N_2$  – мощность, необходимая для образования винтовой поверхности;  $N_T$  – мощность сил трения при вращении роликовой волоки.

После решения уравнения (1) условие осуществимости процесса формирования винтового профиля волочением без скручивания примет вид:

$$\frac{\ln \frac{S_0}{S_2} \left( 1 + \frac{R_n f}{(R_3 - \Delta h / 2) \sin \varphi \cos \varphi} \right)}{\ln \frac{S_0}{S_1}} < 1, \quad (2)$$

где  $S_0$  – исходная площадь поперечного сечения заготовки;  $S_1$  – площадь поперечного сечения изделия с продольными бороздками;  $S_2$  – площадь поперечного сечения винтового профиля;  $R_n$  – радиус подшипника;  $R_3$  – радиус заготовки;  $f$  – коэффициент трения в подшипнике;  $\Delta h$  – обжатие роликом;  $\varphi$  – угол наклона деформирующих роликов.

Используя зависимость (2), область осуществимости получения винтового профиля волочением без скручивания из заготовки диаметром 6,5 мм будет иметь вид, приведенный на рисунке 1.



диаметры рабочих роликов: 1 – 4 мм; 2 – 6 мм; 3 – 8 мм; 4 – 11 мм; 5 – 13 мм; 6 – 16 мм  
Рисунок 1 – Область осуществимости процесса получения винтового профиля из заготовки 6,5 мм

Получена зависимость для определения шага винтовой поверхности ( $t$ ).

$$t = \frac{4\pi \cos \varphi \Delta h \sqrt{R_g (2R_3 - \Delta h)^3}}{3S_2 \ln \frac{S_0}{S_2}}, \quad (3)$$

где  $R_g$  – радиус ролика.

С использованием зависимости (3) получен трехмерный график влияния угла наклона роликов к оси заготовки и диаметра заготовки на шаг трехзаходного винтового профиля (рисунок 2).

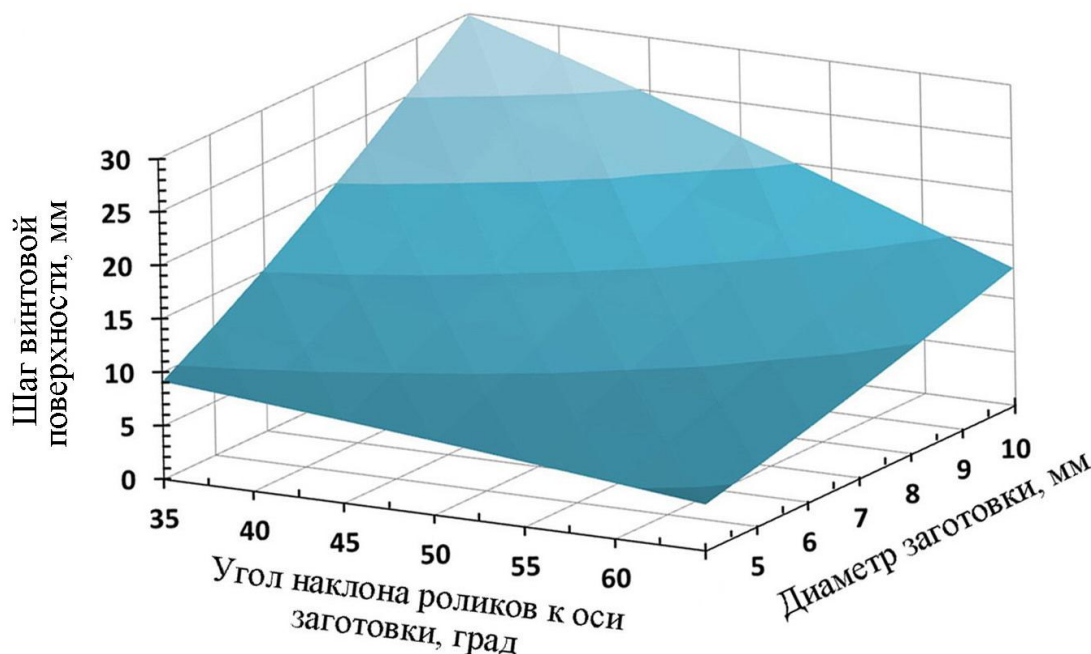


Рисунок 2 - Зависимость шага винтовой поверхности от диаметра заготовки и угла наклона роликов к оси заготовки

Обоснована энергоэффективность использования волочения без скручивания при получении винтовых профилей по сравнению с другими способами, предусматривающими скручивание для формирования винтового профиля.

Определена разница между затратами энергии при использовании предлагаемого решения и при комбинированном способе волочения с последующим скручиванием ( $\Delta N$ ). Для количественного определения разницы затраченной мощности ( $\Delta N$ ) получена зависимость вида:

$$\Delta N = \frac{0,754v \cdot D_3^2 \sigma_T}{t \cdot n} (D_3 - \pi d_{\text{подш}} f), \quad (4)$$

где  $D_3$  – диаметр заготовки;  $d_{\text{подш}}$  – диаметр подшипника;  $v$  – скорость волочения.

Проведенные аналитические исследования с использованием технологических параметров применительно к условиям производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» позволили выявить условия, при которых наиболее эффективно использовать предлагаемый способ получения винтовых профилей. Результаты исследований приведены на рисунке 3, согласно которому разработанный

способ наиболее эффективен при получении крупных профилей с небольшим числом заходов винтовой поверхности. Классическим способом с операцией скручивания получить крупные профили весьма проблематично, так как при этом требуются большие затраты дополнительной энергии, возрастающие с увеличением диаметра заготовки. При диаметрах заготовки 14 мм и более дополнительные затраты энергии становятся сопоставимыми с энергией затрачиваемой на волочение, что ограничивает верхний предел диаметра заготовки. Так же необходимо отметить, что увеличение скорости волочения с одной стороны приводит к возрастанию дополнительной мощности, с другой усложняет привод механизма скручивания, который должен обеспечить высокую частоту вращения.

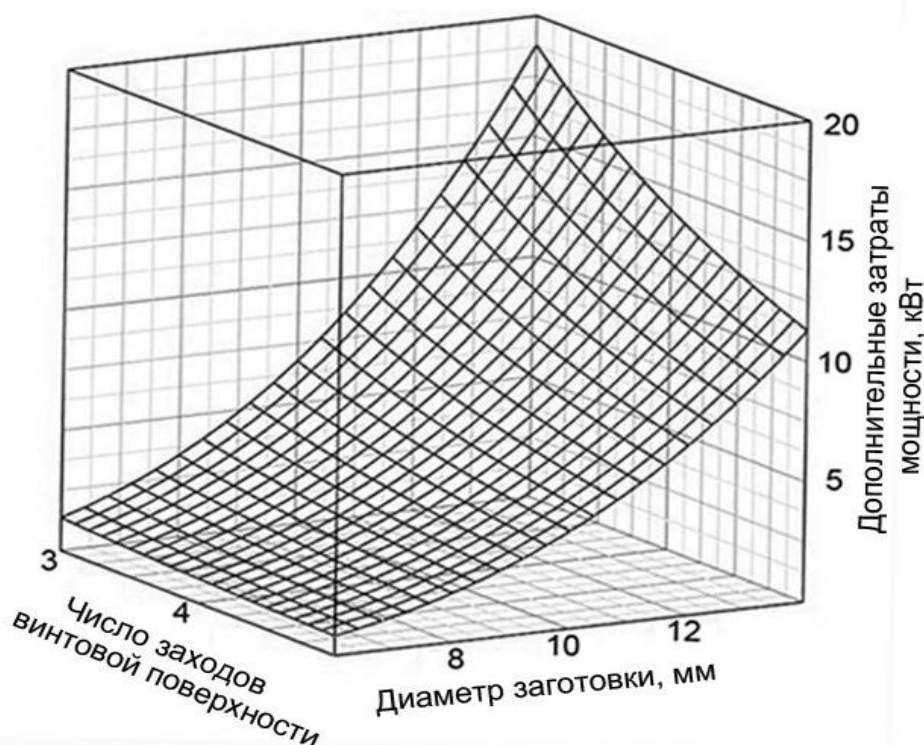
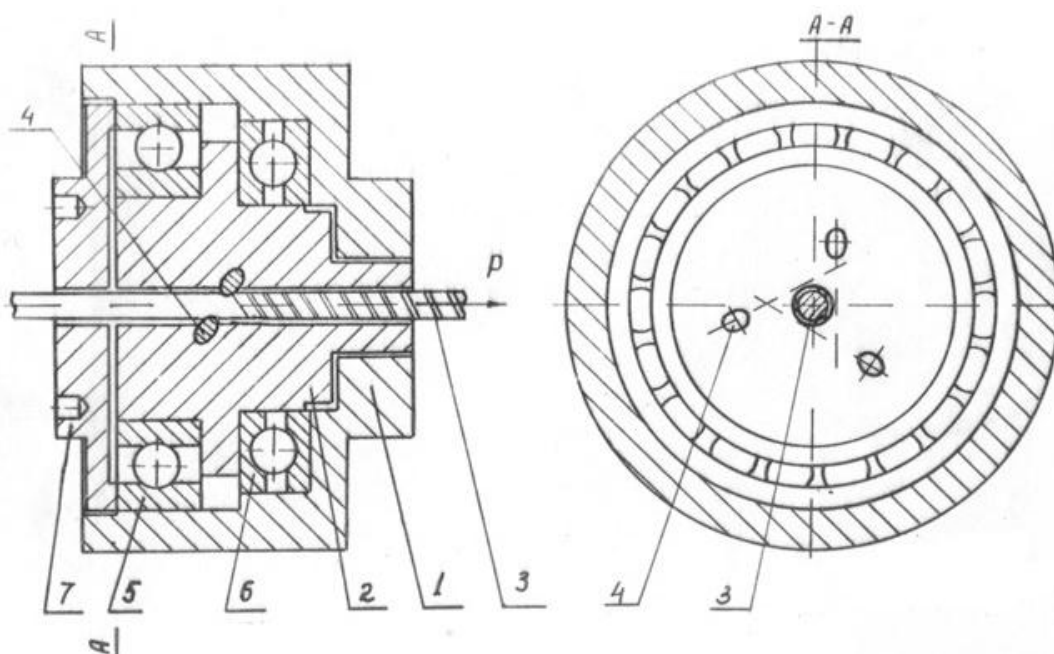


Рисунок 3 – Зависимости необходимой для волочения с последующим скручиванием дополнительной мощности от числа заходов винтового профиля и диаметра заготовки

Выполненные во второй главе исследования позволили выявить наиболее важные факторы, влияющие на формирование винтового профиля – угол установки рабочих роликов относительно оси заготовки, число заходов винтовой поверхности, диаметр рабочих роликов и величину обжатия одним роликом. Определены условия осуществимости процесса формирования винтового профиля, согласно которым с учетом некоторого запаса надежности угол наклона рабочих роликов должен находиться в пределах  $15^{\circ} - 20^{\circ}$ , а с учетом получения небольшого шага винтовой поверхности  $45^{\circ} - 60^{\circ}$ . Отношение диаметра заготовки к диаметру рабочих роликов не должно превышать 0,5...0,6, в противном случае процесс невозможен. С точки зрения снижения энергозатрат наилучшие результаты получаются при волочении трехзаходных винтовых профилей диаметром более 12 мм.

В третьей главе представлены материал и методики исследования, приведен анализ результатов исследования новой технологии получения винтовых профилей волочением без операции скручивания. Материалом исследования являлась холоднотянутая проволока из стали марки СтЗпс, химического состава в соответствии с требованиями ГОСТ 380-2005. Эксперименты по изучению влияния условий деформирования на формирование винтового профиля, а также энергосиловые параметры проводились на промышленном однократном волочильном стане 600.

Для формирования винтового профиля волочением без скручивания разработана и создана принципиально новая конструкция самовращающейся волоки, формирующей многозаходную винтовую поверхность, защищенная патентом (патент РФ на полезную модель №143099, МПК В21С 3/08, бюллетень №19 от 10.07.2014) (рисунок 4).



1 – корпус; 2 – тело волоки; 3 – заготовка; 4 – деформирующие ролики; 5 – радиальный подшипник; 6 – упорный подшипник; 7 – крышка

Рисунок 4 – Конструкция неприводной вращающейся волоки

Волока состоит из корпуса 1, в котором вращается тело волоки 2, имеющее осевой цилиндрический канал, через который протягивается заготовка 3. Элементами, образующими калибр волоки, являются ролики 4, помещенные в гнезда в теле волоки под углом  $\varphi$  к заготовке 3. Удержание и центровка тела волоки в корпусе осуществляется с помощью радиального 5 и упорного 6 подшипников. Крышка 7 крепится к корпусу 1 при помощи резьбового соединения и обеспечивает устранение попадания грязи в подшипники и ролики.

Формирование винтового профиля в разработанной конструкции волоки реализуется следующим образом. Под действием продольной силы приложенной к заготовке 3, благодаря расположению роликов под углом  $\varphi$  создается крутящий момент, вращающий тело волоки 2 в подшипниках 5 и 6. При этом ролики 4, помещенные в тело волоки, обкатывают заготовку 3.

Совместное воздействие поступательного и вращательного движений при протягивании заготовки образует на ней винтовую поверхность с определенным шагом. Количество роликов может меняться, определяя число заходов винтовой поверхности. Процесс формирования винтового профиля осуществлялся с использованием смазки.

Для изучения силовых параметров при волочении винтовых профилей затяжные клещи были оборудованы месдозой.

Усилие волочения регистрировалось при помощи усилителя “Топаз”, сигнал с усилителя поступал на аналогово-цифровой преобразователь ВМ8020, имеющий режим двухканального самописца и затем на компьютер. Программа, прилагаемая к ВМ8020, позволяет хранить и обрабатывать информацию в электронном виде.

Испытания на микротвердость проводили методом восстановленного отпечатка на приборе ПМТ-3.

Механические свойства определяли при испытаниях проволоки на растяжение стандартными методами по ГОСТ 1497 и ГОСТ 12004 с автоматической записью кривых «напряжение-деформация». Испытания проводили на разрывной машине Lloid LR 50K на образцах длиной 250-300 мм.

При выполнении всех исследований на каждую контрольную точку проводилось по 5 параллельных опытов. Полученные экспериментальные данные статистически обрабатывались. Полученные волочением без скручивания винтовые профили показаны на рисунке 5.



а – пятизаходный; б – трехзаходный

Рисунок 5 – Винтовые профили полученные волочением без скручивания

Изучено влияние числа заходов винтовой поверхности, угла наклона рабочих роликов, диаметра рабочих роликов, величины обжатия рабочим роликом на технологические параметры процесса формирования винтовых профилей, такие как шаг винтовой поверхности профиля и усилие волочения.

Выявлены закономерности изменения шага винтовой поверхности и частоты вращения тела волоки. Наиболее существенное влияние на шаг винтовой поверхности оказывает угол, под которым расположены ролики к оси заготовки (рисунок 6).

Изменяя этот угол в пределах осуществимости процесса, можно изменять шаг винтовой поверхности в большом диапазоне значений. Однако при выборе заданного шага необходимо проводить корректировку значений с учетом числа заходов винтовой поверхности, величины обжатия и диаметра рабочих роликов. Сравнительный анализ экспериментальных результатов с теоретическими значениями показал хорошую воспроизводимость результа-

тов, что позволяет рекомендовать полученные зависимости для расчета шага винтовой поверхности и выбора скоростных режимов волочения.

Установлено, что увеличение диаметра деформирующих роликов изменяет в сторону увеличения шаг винтовой поверхности. Так увеличение диаметров деформирующих роликов с 6 мм до 15,5 мм привело к увеличению шага винтовой поверхности на 38%.

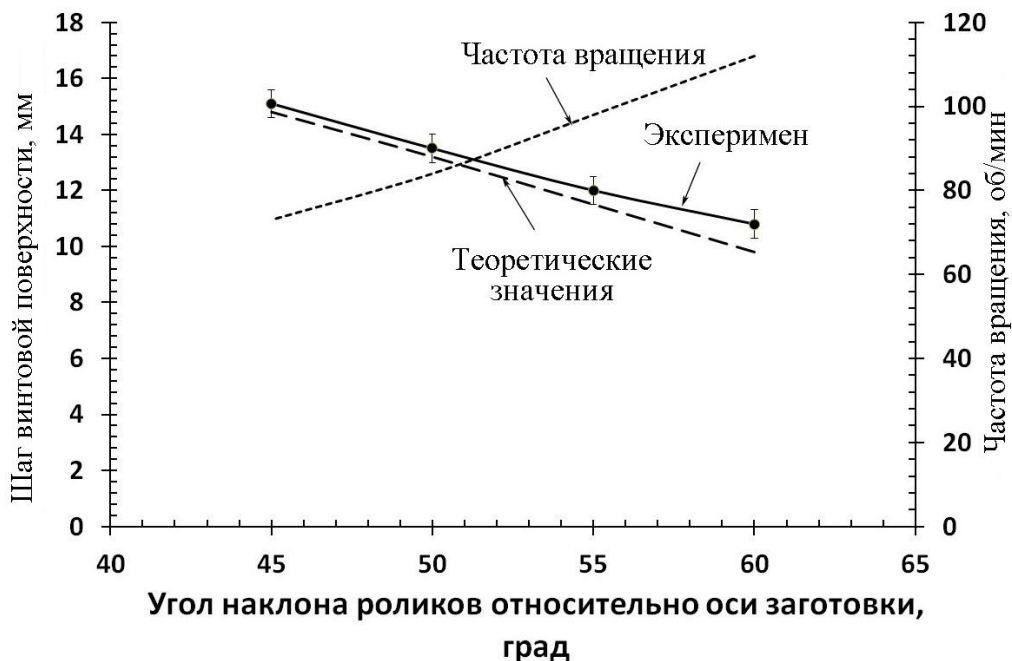


Рисунок 6 – Влияние наклона деформирующего инструмента к оси заготовки на шаг винтовой поверхности и частоту вращения рабочей части волоки при формировании трехзаходного профиля.

Изучено влияние числа заходов винтовой поверхности на шаг. Результаты исследований приведены на рисунке 7 и свидетельствуют об обратной зависимости между числом заходов и шагом винтовой поверхности.

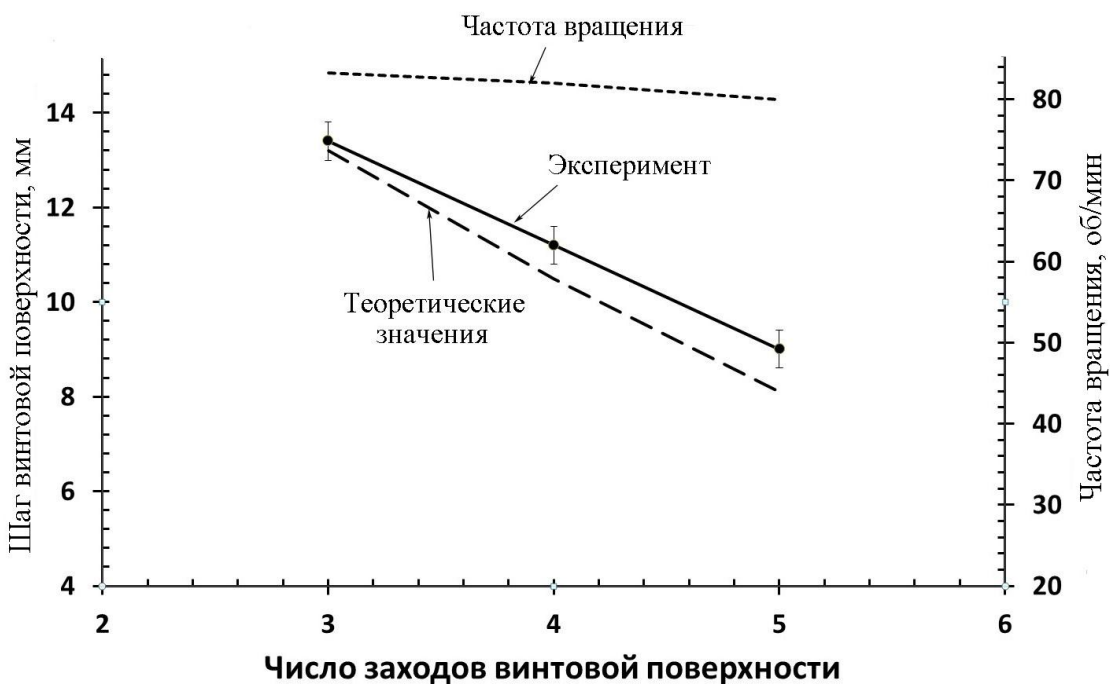


Рисунок 7 – Влияние числа заходов винтовой поверхности на шаг и частоту вращения рабочей части волокна

Экспериментально выявлена связь между величиной обжатия деформирующим инструментом и шагом винтовой поверхности, согласно которой увеличение обжатия уменьшает шаг.

Проведено исследование влияния технологических факторов на усилие волочения профилей с винтовой поверхностью.

Получена экспериментальная зависимость усилия волочения ( $P_1$ ) от угла наклона роликов к оси заготовки ( $\phi$ ). В исследуемом диапазоне изменение угла установки ролика с  $45^\circ$  до  $60^\circ$ , при прочих равных условиях, привело к уменьшению усилия волочения на 10%.

Исследована зависимость влияния числа заходов винтовой поверхности ( $n$ ) на усилие волочения. Увеличение числа заходов винтовой поверхности в рассматриваемом интервале привело к увеличению усилия волочения на 80%. Объяснение данного эффекта связано с увеличением зоны контакта металла с инструментом при переходе с трехзаходной на пятизаходную винтовую поверхность.

Изучено влияние величины обжатия рабочим роликом ( $\Delta h$ ) на усилие волочения винтового профиля. Согласно данным эксперимента увеличение обжатия приводит к увеличению усилия волочения, что не противоречит общеизвестным положениям.

Представляет практический интерес зависимость усилия волочения от диаметра рабочих роликов ( $D$ ). Увеличение диаметра рабочих роликов от 6 мм до 15 мм приводит к увеличению усилия волочения на 67%. Увеличение усилия волочения с увеличением диаметра рабочих роликов связано с увеличением контактной площади.

Экспериментальные результаты по влиянию различных факторов на усилие волочения и шаг винтового профиля не противоречат общепризнанным положениям и современному представлению о процессе волочения. Сопоставление экспериментальных и теоретических данных показало, что расхождение результатов при определении параметров волочения винтовых профилей не превышает 10%. Это дает основание считать полученные теоретические зависимости верными и пригодными для проектирования и прогнозирования процесса получения винтовых профилей волочением.

Проведено исследование механических свойств многозаходных винтовых профилей, полученных волочением без скручивания на предмет использования их в качестве арматуры.

Определено распределение твердости по сечению проволоки с винтовым профилем и установлено, что твердость на поверхности на 300-350 Н/мм<sup>2</sup> больше, чем в осевом сечении. Это связано с неравномерностью деформации по сечению при волочении и нанесении профиля. Общий уровень механических свойств арматурной проволоки с винтовым профилем соответствует классу прочности B500C.

Механические свойства винтовой четырехзаходной арматуры диаметром 4 мм сравнивались с арматурой Вр-1 (по ГОСТ 6727-80) такого же диаметра. Так усилие на разрыв винтовой арматуры на 10% больше чем Вр-1, показатели по количеству изгибов в 1,5 раза лучше, относительное удлинение на 18% больше. Площадь сцепления у четырехзаходной винтовой арматуры диаметром 4 мм на 30% больше чем у арматуры Вр-1 аналогичного диаметра. Объясняется положительный эффект особенностью винтового профиля, у которого площадь поперечного сечения на любом отрезке длины постоянна, в отличие от проволоки Вр-1, у которой площадь поперечного сечения по длине величина переменная. Винтовая арматура, полученная волочением по новой технологии, прошла экспертизу в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ Строительство» и получила положительное заключение, что подтверждено соответствующими документами.

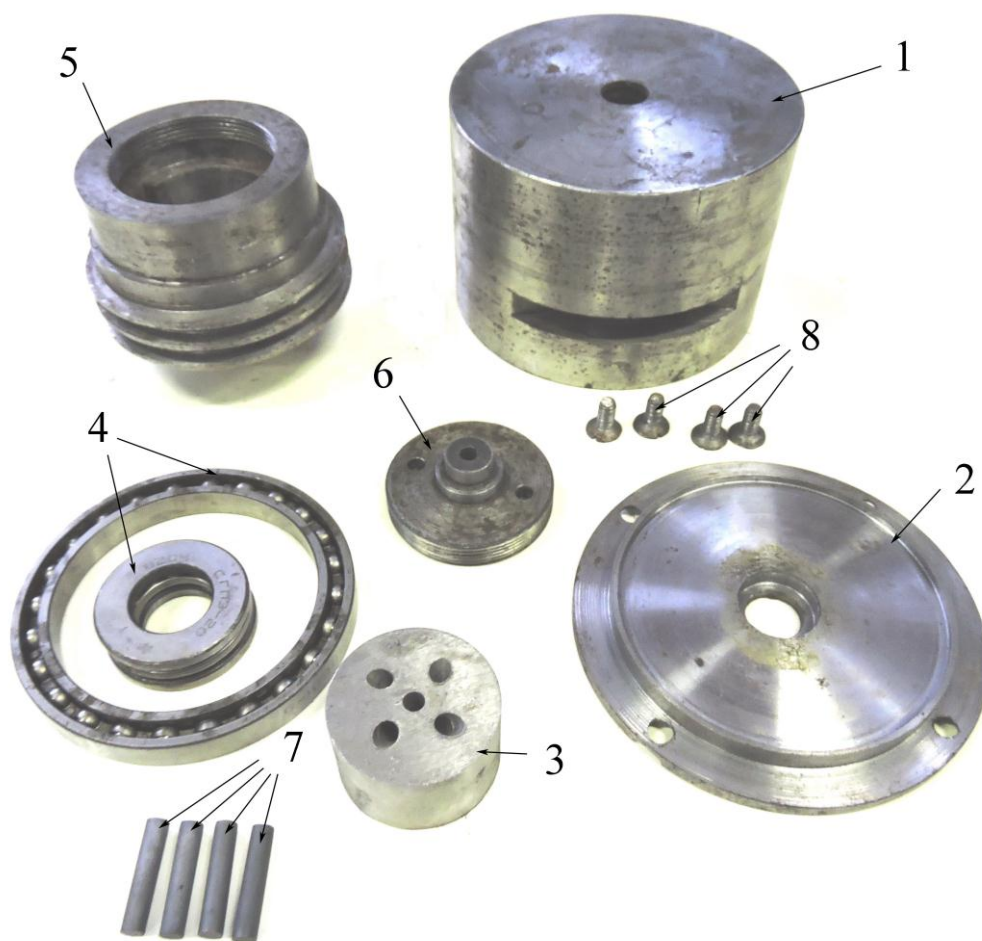
Выполненные исследования позволили сформулировать рекомендации по выбору рациональных условий формирования винтовых профилей волочением без скручивания. Для получения небольшого шага винтовой поверхности необходимо рабочие ролики устанавливать к оси заготовки под углами  $45^{\circ} - 60^{\circ}$ , а диаметр роликов принимать 0,8...1,2 диаметра заготовки. Ввиду особенностей винтового профиля вес винтовой арматуры на 3...4% меньше чем Вр-1. Для получения большей площади сцепления при использовании винтового профиля в качестве арматуры необходимо увеличивать число заходов и уменьшать шаг винтовой поверхности.

**В четвертой главе** описано промышленное использование результатов исследований. Приведена краткая характеристика процесса производства проволоки и арматурного проката в условиях метизного производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Проведен анализ сортамента и выявлены перспективные профили, которые могут быть замещены винтовыми. Это арматура и гвозди, составляющие 74% от всего сортамента.

По действующей технологии формирование заданного профиля осуществляется в сборной волоке, установленной на стане. Для лучшей адаптации к действующему производству габаритные размеры предлагаемой проволоки приняли соразмерными с посадочным местом на волочильном стане. Деталировка разработанной конструкции проволоки для получения винтовых профилей показана на рисунке 8. Ролики в обойме установлены в отверстия, просверленные под углом к оси заготовки. Значение угла установки роликов определяется, исходя из необходимого шага винтовой поверхности согласно полученным в работе зависимостям. Рабочие ролики изготавливаются из победита. В качестве рабочих роликов могут быть использованы победитовые стержни разных размеров и отработанные волокнистые с участка тонкого волочения метизного производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

При получении винтовых профилей производятся подготовительные операции, заключающиеся в удалении с поверхности проволоки окалина. После удаления окалина проволока подвергается волочению по разработанным маршрутам на станах 4/550 SKET и 6/550 SKET и на заключительном этапе вместо рифленых роликов используется разработанная сборная волока.

Полученная таким способом четырехзаходная винтовая арматура диаметром 4 мм показана на рисунке 9.



1 – корпус; 2 – крышка корпуса; 3 – обойма для рабочих валков; 4 - подшипники; 5 – тело волокна; 6 – крышка тела волокна; 7 – победитовые рабочие ролики; 8 – болты для крепления крышки

Рисунок 8 – Детализовка сборной волокна для получения винтовых профилей



Рисунок 9 – Четырехзаходная винтовая арматура диаметром 4 мм

В процессе формирования винтового профиля необходимо предусматривать систему охлаждения волокна и смазку в очаге деформации. Конструкция волокна выполнена так, что при вращении она работает как винтовой насос, обеспечивая циркуляционное охлаждение с использованием смазочно-охлаждающей жидкости. Смазка, подаваемая в очаг деформации, снижает усилие волочения и способствует вращению рабочих роликов в гнездах корпуса. Формирование винтового профиля осуществляется за счет самовращения волокна вокруг оси заготовки и поступательного движения заготовки. Поступательное движение заготовки обеспечивает вращение рабочих роликов в гнездах и соответственно увеличивает их срок службы.

При получении винтовых гвоздей по действующей технологии на стандартном оборудовании формируется нужное сечение проволоки и на заключительной стадии наносится винтовой профиль.

Из полученного винтового профиля диаметром 2,5 мм на холодно-высадочном автомате ТНА-80 были изготовлены гвозди длиной 50 мм и диаметром 2,5 мм. Опытная партия винтовых гвоздей и сами гвозди показаны на рисунке 10.

Проведенные опытно-промышленные испытания новой конструкции волоки при получении винтовой арматуры и винтовых гвоздей показали хорошие результаты.



Рисунок 10 – Винтовые гвозди

Внедрение разработанных новых технологий, защищенных патентами (патент РФ на полезную модель №143099, МПК В21С 3/08, бюллетень №19 от 10.07.2014; патент РФ на изобретение №2553728, МПК В21С 1/22, бюллетень №17 от 20.06.2015) позволяет освоить в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК» инновационные виды продукции с большой добавочной стоимостью.

Ожидаемый экономический эффект, рассчитанный в главе 4 и подтвержденный актом внедрения результатов в производство, составляет 11,6 млн. руб. в год.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Сформулированы и решены задачи по определению условий формирования винтовой поверхности при волочении по новой технологии, исключаяющей операцию скручивания. Получены отсутствующие в литературе зависимости для определения условий осуществимости процесса формирования винтовой поверхности при волочении, учитывающие геометрические параметры инструмента и заготовки, а так же величину деформации. Выявлены

факторы, оказывающие наибольшее влияние на формирование винтовой поверхности при волочении, к которым относятся угол наклона деформирующих роликов к оси заготовки, отношение диаметра заготовки к диаметру деформирующих роликов.

2. Доказана энергоэффективность волочения винтовых профилей по новой технологии без операции скручивания. Получены отсутствующие в литературе зависимости для оценки энергопотребления предлагаемого способа получения винтовых профилей волочением. Установлено, что при формировании винтовой поверхности по новой технологии имеет место снижение энергозатрат 1,5...2 раза, причем эффект снижения энергозатрат увеличивается с увеличением диаметра заготовки и уменьшением числа заходов винтовой поверхности.

3. Исследованиями на промышленном оборудовании с использованием натуральных образцов установлено, что с увеличением угла наклона формирующих роликов к оси заготовки шаг винтовой поверхности, усилие волочения уменьшаются. Оптимальные значения шага для винтовой арматуры можно получить при углах наклона роликов относительно оси заготовки  $45^0$  -  $60^0$ . Экспериментально показано, что увеличение числа заходов винтовой поверхности и обжатия формирующими роликами приводит к уменьшению шага винтовой поверхности и увеличению усилия волочения. Установлено, что с увеличением диаметра формирующих роликов увеличивается шаг винтовой поверхности и усилие волочения и при превышении диаметров формирующих роликов двух диаметров заготовки формирование винтовой поверхности прекращается.

4. Изучены механические свойства нового многозаходного винтового арматурного профиля в сравнении с арматурой класса Вр-1. Установлено увеличение прочностных и пластических свойств винтовой арматуры, полученной по новой технологии волочения без скручивания, на 10...18% по сравнению с арматурой Вр-1, а также увеличение активной площади сцепления с бетоном на 20...50%.

5. Основываясь на полученных знаниях по формированию винтовой поверхности волочением без скручивания, разработана новая технология обеспеченная комплексом технических и технологических решений применительно к условиям метизного производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» для получения винтовой арматуры и винтовых гвоздей. Ожидаемый экономический эффект от производства винтовой арматуры и винтовых гвоздей составит 11,6 млн. руб. Полученные в диссертации результаты внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров по направлению 22.03.02 Metallurgia и магистрантов по направлению 22.04.02 Metallurgia.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ:*

1. Холоднотянутая арматурная проволока с винтовым профилем / А.Р. Фастыковский, Е.В. **Чинокалов**, В.Г. Милованов // *Металлург*. – 2014. - №6. - С. 124-127.
2. Инновационная технология получения длинномерных винтовых профилей / А.Р. Фастыковский, Б.М. Лебошкин, **Е.В. Чинокалов**, В.Д. Кадыхов, Н.В. Мыскова // *Сталь*. – 2014. - №10. - С. 48-50.
3. Фастыковский А.Р. Снижение энергозатрат при производстве длинномерных винтовых профилей / А.Р. Фастыковский, **Е.В. Чинокалов** // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. – 2013. - Том 18, вып. 4. - С. 1753-1754.
4. Фастыковский А.Р. Снижение энергопотребления при получении длинномерных винтовых профилей волочением / А.Р. Фастыковский, **Е.В. Чинокалов** // *Производство проката*. – 2013. - №10. - С. 40-42.
5. Фастыковский А.Р. Особенности получения длинномерных винтовых профилей волочением без скручивания / А.Р. Фастыковский, **Е.В. Чинокалов** // *Черные металлы*. – 2019. - №6. – С. 35-38.
6. Фастыковский А.Р. Разработка инновационной продукции волочильного производства / А.Р. Фастыковский, **Е.В. Чинокалов** // *Сталь*. – 2019. - №7. – С. 50-51.

### *Научные статьи, опубликованные в базах цитирования Scopus и Web of Science:*

7. Cold-drawn reinforcing wire with screw profile / A.R. Fastyskovskii, **E.V. Chinokalov**, A.G. Milovanov, N.V. Myskova, and A.A. Shumkin // *Metallurgist*, 2014, vol. 58, nos. 5–6, pp. 540–544.
8. Fastyskovskii A. R. Long Coiled Reinforcement Produced by Drawing / A. R. Fastyskovskii , **E. V. Chinokalov** // *Steel in Translation*. 2019. Т. 49, №7. с. 481–483.
9. New production technology of screw sections by drawing / A.R. Fastyskovskii, **E. V. Chinokalov**, A. N. Prudnikov, and T. N. Oskolkova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 866. - P. 1-4 (012016).

### *Научные статьи, опубликованные в периодических изданиях и труды научно-практических конференций:*

10. **Чинокалов Е.В.** Пути повышения эффективности и конкурентоспособности обработки металлов давлением / **Е.В. Чинокалов**, А.Р. Фастыковский // *Организационно-экономические проблемы повышения эффективности металлургического производства: Сборник статей IV международной научно-технической конференции*. – 2013. - С. 71-74.

11. Фастыковский А.Р. Энергоэффективный способ получения длинномерных винтовых профилей / А.Р. Фастыковский, **Е.В. Чинокалов** // Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте 2013: Сборник научных трудов SWorld. - 2013. - Том 16, вып. 4. - С. 40-43.

12. Фастыковский А.Р. Новая энергоэффективная технология получения длинномерной винтовой арматуры / А.Р. Фастыковский, **Е.В. Чинокалов** // Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных материалов и сплавов: Сборник докладов III международной конференции. - 2014. - С. 186-189.

13. **Чинокалов Е.В.** Новый перспективный способ производства длинномерных винтовых профилей / **Е.В. Чинокалов**, А.Р. Фастыковский // Перспективные материалы и технологии: Материалы международного симпозиума. – 2017. - Ч.1. – С. 190-192.

14. **Чинокалов Е.В.** Способ получения винтовой поверхности волочением без скручивания / **Е.В. Чинокалов**, А.Р. Фастыковский // Труды XI международного конгресса прокатчиков. – 2017. – Т.2. – С. 262-265.

15. Фастыковский А.Р. Новая технология получения винтовых профилей волочением / А.Р. Фастыковский, **Е.В. Чинокалов** // Металлургия: технологии, инновации, качество: Труды XXI международной научно-практической конференции. – 2019. – Ч.1. – С. 180-184.

***Зарегистрированные патенты:***

16. Пат. 143099 Российская Федерация, МПК В21С 3/08. Роликовая волока / А.Р. Фастыковский, **Е.В. Чинокалов** [и др.]; заявитель и патентообладатель Фастыковский А.Р. - №2014107320/02; заявл. 25.02.2014; опубл. 10.07.2014, Бюл. №19. 2 с., ил.

17. Пат. 2553728 Российская Федерация, МПК В21С 1/22 Способ получения винтовых профилей / А.Р. Фастыковский, **Е.В. Чинокалов** [и др.]; заявитель и патентообладатель Фастыковский А.Р. - №201407325/02; заявл. 25.02.2014; опубл. 20.06.2015, Бюл. №17. 13 с., ил. 3.