

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
“Сибирский государственный индустриальный университет”

На правах рукописи



ЧИНОКАЛОВ Евгений Валерьевич

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

специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением”

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук, доцент

А.Р. Фастыковский

Новокузнецк – 2020

Содержание

Введение.....	5
1. Состояние вопроса и постановка цели и задач исследования.....	12
1.1 Анализ состояния вопроса.....	12
1.2 Способы получения винтовых профилей.....	22
1.2.1 Получение винтовых профилей прокаткой в горячем и холодном состоянии.....	22
1.2.2 Волочение винтовых профилей.....	24
1.3 Оборудование для получения винтовых профилей.....	24
1.3.1 Роликовая головка для накатки винтовой поверхности.....	25
1.3.2 Устройство для профилирования винтовых труб.....	27
1.3.3 Изготовление винтовых деталей.....	29
1.4 Теоретические зависимости для определения условий формирования винтовых профилей.....	31
Выводы, постановка цели и задач исследования.....	32
2. Математическое обоснование возможности и энергоэффективности получения винтовых профилей волочением без операции скручивания	35
2.1 Условия реализуемости получения винтовых профилей волочением без операции скручивания.....	35
2.2 Обоснование энергоэффективности волочения винтовых профилей без операции скручивания	52
Выводы.....	60
3. Обсуждение и анализ результатов исследования энергоэффективной технологии получения винтовых профилей волочением без операции скручивания	62
3.1 Изучение влияния параметров инструмента и условий формоизменения на шаг винтовой поверхности профиля,	

полученного волочением без операции скручивания.....	62
3.1.1 Материал для исследования.....	62
3.1.2 Методика экспериментального изучения влияния параметров инструмента и условий формоизменения на шаг винтового профиля при волочении без операции скручивания.....	63
3.1.3 Обсуждение результатов по изучению влияния параметров инструмента и условий формирования на шаг винтовой поверхности при волочении без операции скручивания.....	72
3.2 Факторы влияния на усилие волочения при формировании винтовых профилей без операции скручивания.....	79
3.2.1 Методика исследования силовых параметров при получении винтовых профилей волочением без операции скручивания.....	79
3.2.2 Обсуждение экспериментальных результатов по влиянию параметров инструмента и условий формоизменения на усилие волочения при получении винтовых профилей без операции скручивания.....	84
3.3 Исследование механических свойств винтовых профилей, полученных волочением без операции скручивания.....	88
3.3.1 Характеристика исходного материала.....	88
3.3.2 Методика исследований механических свойств винтовых профилей, полученных волочением без операции скручивания.....	90
3.3.3 Обсуждение результатов исследования механических свойств винтовых профилей, полученных волочением без операции скручивания.....	92
Выводы.....	101

4. Промышленное использование новой технологии получения винтовых профилей волочением без операции скручивания.....	103
4.1 Краткая характеристика процесса производства проволоки и холоднодеформированной арматуры в условиях метизного производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК».....	103
4.2 Разработка конструкции волоки, формирующей винтовой профиль без скручивания применительно к условиям АО «ЕВРАЗ ЗСМК».....	108
4.3 Новая технология получения винтовых профилей, используемых в качестве арматуры и для производства винтовых гвоздей.....	113
4.4 Обоснование экономического эффекта от внедрения технологии производства винтовых профилей в условиях метизного производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК».....	118
Выводы.....	123
Заключение.....	124
Список использованных источников.....	126
Приложения.....	142

Введение

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 вин-

товых 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, 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 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 наиболее эффективного использования предлагаемого способа получения 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 Lloyd 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.

1 Состояние вопроса и постановка задач исследования

1.1 Анализ состояния вопроса

С началом XXI века мировая черная металлургия развивается в контексте с потребностями экономики. После ценового спада на мировом рынке стальной продукции в 2001 г. последующие семь лет была относительно благоприятная для производителей конъюнктура. Несмотря на имевшие место периодические колебания цен, в том числе и в меньшую сторону, в целом преобладала тенденция увеличения уровня спроса и стоимости металлопроката, удорожания сырьевых материалов [1].

Устойчивый спрос на прокат черных металлов стимулировал развитие мощностей по его производству. В 2007 г. мировой объем выплавки стали был на 59,5% выше, чем в 2000 г. [2]. Внешнеторговые цены на прокат в странах СНГ к концу I полугодия 2008 г. выросли по отношению к 2001 г. более чем в пять раз и в июне находились в диапазоне 1025–1127 долл./т FOB [3]. Стало очевидным, что абсолютный уровень цен на данном этапе развития мировой экономики достиг своего максимума, за которым последует очередной глубокий спад. Однако время начала такого спада на мировом металлургическом рынке было неочевидным, хотя и поступали косвенные сигналы в виде финансового кризиса банковской системы США.

В итоге, во второй половине 2008 г., на фоне резкого замедления темпов роста мировой экономики, сокращения финансовых ресурсов и доступности кредитов спрос на металл резко упал, и сталелитейная индустрия во всем мире вступила в фазу очередного системного кризиса [4]. Крупнейшие мировые металлургические компании вынуждены были значительно снизить объемы производства и цены на свою продукцию. Так, по данным всемирной ассоциации производителей (WSA), учитывающей выплавку стали в 63 странах (98% мирового производства), уже в сентябре 2008 г. мировое производство стали сократилось по сравнению с августом на 4%, а в октябре по отно-

шению к сентябрю – на 7% [1].

Наибольший относительный спад производства стали, из-за неразвитости внутренних рынков, произошел в содружестве независимых государств (СНГ). В октябре, по отношению к сентябрю, объем выплавки стали в нем сократился на 24%, при этом в европейском союзе (ЕС) – на 8%, в Китае – на 9%, в США – на 10%. Экспортные цены на продукцию СНГ в ноябре, по сравнению с июнем, снизились от 40 до 70% в зависимости от вида продукции.

Сегодня Россия занимает в мире пятое место по выплавке стали и третье – по производству стальных труб и экспорту металлопродукции. Причем большую долю продукции дают современные металлургические холдинги, которые объединяют всю технологическую цепочку, имеют собственные сервисные службы по металлообработке и торговле готовой продукцией [5, 6].

К сожалению, неблагоприятная конъюнктура мировых цен на металлопродукцию усугубляется действием в ряде стран защитных мер в отношении российской металлопродукции и ожидаемым сокращением спроса на продукцию внутри страны. Негативно влияет на положение дел сокращение экспорта и часто недобросовестная конкуренция со стороны других стран [7-9].

Другой глобальной проблемой, стоящей перед отечественной металлургией, является перепроизводство продукции и низкая эффективность. Сегодня в стране активно развиваются металлургическая отрасль [10-14], но при этом до 10% металла остается невостребованным.

После вступления в 2012 г. России во Всемирную торговую организацию (ВТО) прошло немного времени для выводов, однако у некоторых потребителей черных металлов положение дел ухудшилось, что негативно сказывается и на производителях. Альтернативой расширению закупок на внешних рынках в условиях членства в ВТО должно стать расширение ассортимента, повышение качества и снижение энергозатрат за счет внедрения иннова-

ционных технических и технологических решений при производстве собственной металлопродукции [15, 16].

Применительно к обработке металлов давлением одним из наукоемких инновационных направлений является разработка профилей с высокими эксплуатационными характеристиками. Перспективными в этом плане являются винтовые профили, которые по праву относят к изделиям нового поколения. В настоящее время винтовые профили используют при изготовлении шнеков, завихрителей, роторов, бурильных труб, винтовой арматуры, гвоздей и т.д. Отличительным признаком их является наличие развитого спирального ребрения или винтовой поверхности, винтовое расположение волокон металла. В нашей стране и за рубежом, особенно в Японии, США и Китае, производству винтовых профилей уделяется все большее внимание.

Применение винтовых профилей дает существенный экономический эффект: увеличивается мощность и производительность теплообменных и холодильных установок, прочность и жесткость конструкций машин, уменьшаются их габариты и металлоемкость. Конструкции поперечных сечений типовых винтовых профилей и труб, взятые из патентной и научно-технической литературы [17], приведены на рисунке 1.1.

Термин «винтовые профили и трубы» употребляется в данном случае применительно к сплошным (а-г) и полым (д-р) полуфабрикатам, выполненным с винтовыми волокнами (а, д), винтовой поверхностью (б, в, ж, з, к), винтовыми наружными и внутренними ребрами (е, и, л-р) разных конфигураций и направлений закрутки (правой, левой). Во многих случаях наиболее рационально использование винтовых многоканальных труб (с – ф) сборных конструкций, осуществляемых посадкой с натягом круглой оболочки на винтовой сердечник-вставку. Винтовой сердечник может быть выполнен в виде спиральной полосы (сечение в), трубы с наружными винтовыми ребрами (т), звездообразного сечения (г).

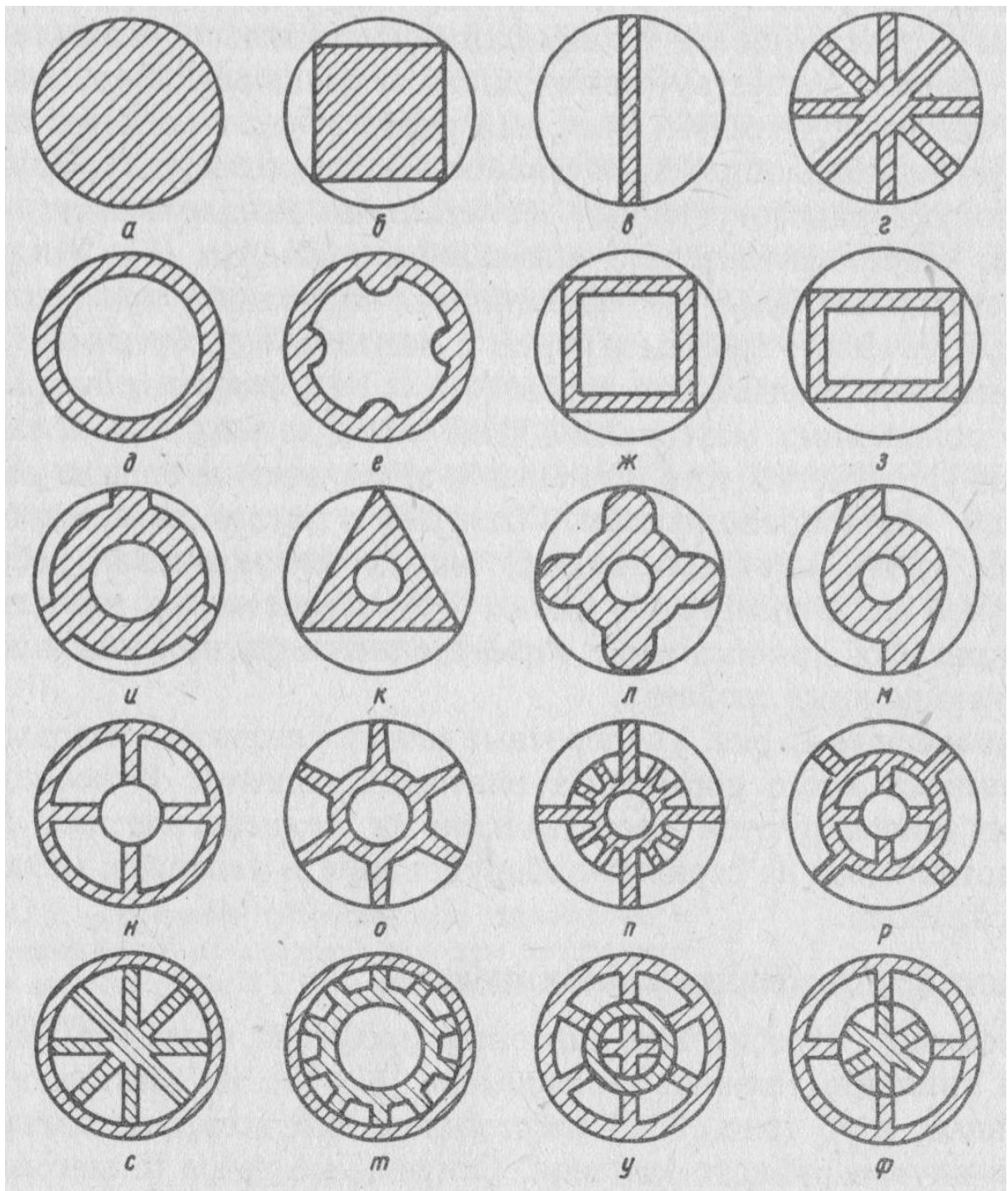


Рисунок 1.1 - Сортамент поперечных сечений винтовых профилей и труб

В ряде случаев целесообразна круглая оболочка с внутренними винтовыми ребрами (у, ф). В конструкциях (у, ф) спиральные ребра оболочки и сердечника могут быть закручены в разных направлениях. Отличительные особенности этих изделий: большое разнообразие размеров и форм поперечных сечений, наличие развитого спирального оребрения, винтовой поверхно-

сти или винтовых волокон металла с углами подъема от 0 до 60^0 , высокая жесткость на кручение, размеры поперечных сечений, вписывающиеся в окружность диаметром от 13 до 200 мм, длинномерность, сложность и ажурность сечений. Приведенные на рисунке 1.1 поперечные сечения являются типовыми и не исчерпывают всего сортамента винтовых изделий.

Основным потребителем винтовых профилей в настоящее время является техника теплообмена [18-20]. Из винтовых многоканальных труб (рисунок 1.1с) изготавливают высокоэффективные испарители. Применение винтовых многоканальных труб в теплообменных и холодильных аппаратах позволяет сократить на 200-600 кг расход в каждом аппарате дорогостоящего хладагента, уменьшить на 30-35% габариты аппаратов, увеличить их долговечность.

Двухстенные винтовые трубы (рисунок 1.1т) требуются при изготовлении регенеративных теплообменников типа труба в трубе [21-23], а трубы с сечением “ф” (рисунок 1.1) – для форсированного теплообмена в энергосиловых и теплоэнергетических установках [24, 25]. Трубы с развитым наружным винтовым оребрением (рисунок 1.1п) могут использоваться в холодильниках для поршневых компрессоров с целью охлаждения и сепарирования газов [26-27], с двухсторонним винтовым оребрением (рисунок 1.1р) – для охлаждения водной эмульсии прессы на насосно-аккумуляторных станциях металлургических заводов [28-30]. Ленточный турбулизатор – полоса, скрученная винтом в гладкой трубе, создает при движении по ней хладагента макровихри и значительно повышает теплопередачу [31-32].

Винтовые изделия, как самостоятельные элементы конструкций машин, используются в виде витых штанг (рисунок 1.1м), колонн для бурения шпуров, карданных валов (рисунок 1а, б), режущего инструмента с повышенными эксплуатационными характеристиками (сверл, метчиков, разверток и т.п.) [33-36].

С точки зрения перспективности развития особого внимания заслуживают винтовые профили, используемые в качестве арматуры. Стальные арма-

турные профили являются наиболее востребованным видом прокатной продукции. По данным исследований [37] производство и потребление на мировом рынке сортового проката достаточно устойчиво растет. С 2000 г. по 2010 г. прирост производства в среднем составлял 8% в год. В общей структуре мирового производства сортовых профилей арматурная сталь составляет 35-40 %.

В России на протяжении последних лет также наблюдается постоянный рост объемов производства и потребления сортового проката, в том числе арматурных профилей. Поставки готового сортового проката на внутренний рынок за последние шесть лет увеличивались ежегодно в среднем почти на 2 млн. т [37].

Как отмечается в работе [37], из всего производимого сортового проката 55% составляют профили с массой погонного метра до 6-8 кг, прокатываемые на мелкосортных и мелкосортно-проволочных станах (мелкосортный прокат). Причем основная доля мелкосортного проката - это арматура и профили, используемые в строительстве. При этом потребление арматурных профилей превышает, и по прогнозу будет превышать их производство, что приводит к необходимости их импорта. Это объясняется большими инвестициями в строительный сектор экономики в связи с выполнением национального проекта по строительству.

Приведенные выше данные позволяют сформулировать актуальную для России задачу: сократить дефицит сортопрокатной продукции строительного назначения, и в частности арматурных периодических профилей, повысить их конкурентоспособность, снизить металлоемкость, улучшить потребительские качества за счет разработки принципиально новых технических и технологических решений.

Арматурные профили постоянно совершенствуются, чему во многом способствуют возрастающие требования потребителей [38, 39]. Изменение формы арматуры в основном связано с удовлетворением следующих основных требований: увеличение прочности при снижении веса, хорошее сцепле-

ние (анкерные свойства), технологичность производства. С точки зрения выполнения двух первых требований наилучшие результаты можно достичь, используя профиль в виде многозаходной резьбы. Оптимальность такого профиля заключается в том, что с одной стороны многозаходная винтовая поверхность имеет постоянное сечение по длине, способствующее снижению веса при равной прочности по сравнению с классической формой, с другой стороны практически вся поверхность работает на увеличение сцепления.

Еще одно преимущество винтового профиля заключается в возможности механического соединения арматуры в конструкциях при помощи муфт, накладок и т.д. Однако не смотря на все очевидные преимущества, в настоящее время винтовые арматурные профили не получили широкого распространения, что связано с отсутствием технических и технологических решений, позволяющих организовать производство данного профиля в больших масштабах в горячем и особенно в холодном состоянии.

Попытки получения винтовой арматуры в горячем состоянии были предприняты в России, Украине, Китае. Наилучшие результаты достигнуты в России на АО «ЕВРАЗ ЗСМК», где удалось освоить прокатку однозаходного винтового профиля, и в Китае, где прокаткой получили многозаходный винтовой арматурный профиль (рисунок 1.2).

Как отмечено выше, еще больший интерес представляет производство холоднодеформируемых винтовых профилей, которые можно использовать в качестве арматуры, стержней для биметаллической проволоки, из такого профиля можно делать винтовые гвозди и т.д.

Широкое распространение холоднодеформированная бунтовая арматура диаметром 4-14 мм получила в европейских странах (Германия, Италия, Австрия и другие), где для этого были созданы благоприятные условия: качественное сырье, современное оборудование, нормативы использования [40-42].



Рисунок 1.2 - Многозаходная винтовая арматура произведенная горячей прокаткой (Китай)

Постоянное совершенствование производства по всему металлургическому переделу [43-46] позволило европейским государствам на протяжении последних десятилетий производить и использовать по всему размерному ряду единый унифицированный класс строительного арматурного проката из низкоуглеродистой свариваемой стали с пределом текучести не менее 500 Н/мм² [47-49]. В соответствии с европейскими нормами EN 10080 [50] он классифицируется как B500B для горячекатаной и B500A для холоднодеформированной арматуры [51-53].

Производство и применение именно такого проката является, на сегодняшний день, наиболее эффективным способом снижения расхода стали в железобетонных конструкциях без предварительного напряжения арматуры и обеспечивает повышенную безопасность и долговечность их эксплуатации [54-57].

Важным преимуществом технологии производства и применения холоднодеформированной арматуры является практическое отсутствие отходов, так как каждый моток этой арматуры в процессе правки и резки полностью перерабатывается. На этом, в общей сложности, то есть в производстве и переработке, выигрывается, по сравнению со стержневой арматурой, 3-5% стали [58-62].

Производство холоднодеформированной арматуры диаметром 4-12 мм очень гармонично сочетается с изготовлением из нее готовых арматурных элементов, так как этот процесс непрерывный и без промежуточных переделов. В результате достигается значительная экономия электроэнергии, трудозатрат и стоимости [63-66].

Другим преимуществом холоднодеформированной арматуры является возможность производства и применения арматуры любого размера, так как переналадка оборудования здесь существенно проще, чем на металлургическом заводе. Поэтому выпуск арматуры с шагом диаметра 1 или 0,5 мм или даже 0,2 мм, то есть, например, 6,0; 6,2; 6,4 мм и т.п., вполне реален [67].

Строительные организации в России постоянно испытывают дефицит с получением арматуры диаметром 6-12 мм и особенно 6 и 8 мм [68-70]. Реальным решением этой проблемы является расширение производства и применение холоднодеформированной арматуры класса B500C в этом сортаменте [71-74].

Применение холоднодеформированной арматуры класса B500C в монолитном железобетоне, как правило, осуществляется в виде готовых сеток каркасов и двухслойных ковров, что существенно сокращает трудозатраты на армирование и позволяет снизить стоимость и ускорить строительство [75, 55].

Преимущества холоднодеформированной арматуры очевидны и бесспорны, однако одно обстоятельство портит всю картину. Деформирование в холодном состоянии существенно усложняет формирование профиля, обеспечивающего анкерные свойства. При деформировании в холодном состоя-

нии за счет явления наклепа прочность заготовки приближается к прочности инструмента, что существенно затрудняет, а в некоторых случаях делает невозможным получение классического профиля арматуры [76-78]. С целью обеспечения технологичности процесса на поверхности формируются роликами периодические впадины (рисунок 1.3). Такое решение весьма половинчато, так как при незначительном улучшении сцепления приводит к существенному уменьшению площади поперечного сечения и соответственно прочности.

Наилучшим образом эта проблема могла бы быть решена при формировании винтового многозаходного профиля, но на настоящий момент отсутствует как теоретическое обоснование этого процесса, так и технические и технологические решения для его реализации. Перспективность получения холоднодеформированных винтовых профилей подтверждается тем, что кроме арматуры таким способом можно получать винтовые гвозди, стержни для биметаллической проволоки и т.д.

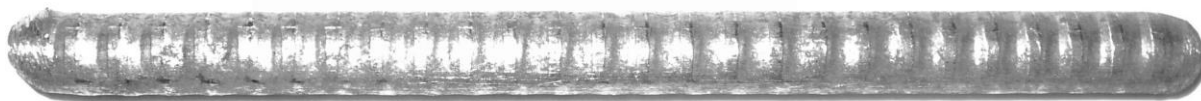


Рисунок 1.3 – Арматура, полученная холодным волочением
по ГОСТ 6727-80

1.2 Способы получения винтовых профилей

Многообразие винтовых профилей обусловило и многообразие способов их производства. Основные из них: сварка, литье, кручение, прокатка, прессование, волочение, накатывание [17]. Широко применяется при получении винтовых профилей сочетание волочения с кручением. Выбор способа производства зависит от конфигурации профиля, угла подъема винтовой поверхности, пластичности обрабатываемого материала и других факторов.

Большая часть профилей с винтовой поверхностью в настоящее время производится способами прокатки и волочения. Рассмотрим подробнее производство способом прокатки.

Профили, винтовая поверхность которых формируется прокаткой, условно можно разделить на две группы:

- прокатываемые в горячем состоянии (после предварительного нагрева заготовки);
- прокатываемые в холодном состоянии.

1.2.1 Получение винтовых профилей прокаткой в горячем и холодном состоянии

Горячей прокаткой, в качестве готовых изделий, производятся в основном арматурные профили с однозаходной винтовой поверхностью и шары [79-83].

Производство винтовой арматуры диаметром 18-36 мм разных классов прочности способом горячей прокатки осваивал ряд металлургических предприятий: Макеевский и Криворожский на Украине, Северсталь и ЕВРАЗ ЗСМК в России. Винтовую арматуру предполагалось поставлять в комплекте с гайками и муфтами, в связи с чем было предпринято несколько попыток создания оригинальной технологии производства дешевых крепежных элементов (с изготовлением внутренней резьбы методом горячего деформирования). Такая технология была разработана в 1989 году Днепропетровским металлургическим институтом. Опытно-промышленная партия гаек и муфт, совместно с винтовой арматурой диаметром 36 мм класса А-V производства Северстали, использовалась для грунтовых анкеров при строительстве второй очереди здания Министерства иностранных дел на Смоленской площади в Москве. Использование «стены в грунте» с анкерным креплением по технологии фирмы Bauer (ФРГ) с применением винтовой арматуры сделало воз-

можным сооружение грандиозного котлована в условиях плотной городской застройки центра Москвы [84, 85].

В настоящее время из всех перечисленных предприятий только АО «ЕВРАЗ ЗСМК» сохранил производство винтовой арматуры [86]. Комбинат поставляет термомеханически упрочненную арматуру с винтовым профилем класса Ав400 по ТУ 14-1-5254-2006 (рисунок 1.4), а также класса Ав600 по локальным техническим условиям для рынка Казахстана.



Рисунок 1.4 – Арматурный прокат с винтовым профилем производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Наряду с очевидными преимуществами винтового профиля арматура, производимая горячей прокаткой, имеет следующие недостатки:

- из-за ограничения возможностей способа горячей прокатки очень трудно получить многозаходный винтовой профиль, поэтому обычно ограничиваются однозаходной поверхностью;
- возникает повышенная концентрация напряжений в месте перехода ребра в тело стержня, что иногда приводит к трещинам и разрывам арматуры при испытаниях на изгиб.

Указанные недостатки, связанные с технологией производства горячей-катаной винтовой арматуры, делают очевидной потребность в освоении нового вида продукции – арматуры с винтовым профилем, сформированным в холодном состоянии методом волочения.

Сегодня холодная прокатка используется, в основном, при производстве бесшовных труб из сплошной заготовки с целью уменьшения толщины стенки, снижения разностенности, многократного увеличения длины труб,

калибровки по диаметру и т.д. [87-91] При винтовой прокатке волокна закручивают на угол 18-38 градусов относительно оси трубы [17, 28].

1.2.2 Волочение винтовых профилей

Волочение – высокоэффективный технологический метод формообразующей и отделочно-упрочняющей обработки сплошных, полых и многослойных профилей различной формы поперечного сечения и размеров [92, 93].

Если производство винтовых труб достаточно хорошо изучено [94-97, 17, 36], то вопросом получения винтовых стержней, применяемых в качестве арматуры для железобетона, анкеров для шахтной крепи, крепежных метизов и усиления грунтовых откосов только начали заниматься.

Имеющаяся в настоящее время технология получения холоднодеформированных винтовых стержней заключается в двухэтапной обработке круглой заготовки. На первом этапе формируется многогранный профиль, из которого на втором этапе продольным скручиванием получают винтовую поверхность. Такой подход в получении винтовых стержней имеет несколько существенных недостатков, затрудняющих, а в некоторых случаях делающих невозможным их промышленное производство. К основным недостаткам можно отнести: сложность синхронизации двух операций в одном процессе, необходимость приложения больших крутящих моментов при получении крупных профилей, сложность работы с бунтовым материалом. В связи с этим волочение винтовых профилей сегодня используется, в основном, при производстве различных винтовых труб.

1.3 Оборудование для получения винтовых профилей

Различные варианты конструкций оборудования для получения винтовых профилей представлены преимущественно в патентах и полезных моделях, что говорит об ограниченном применении подобных инструментов в промышленности. Рассмотрим наиболее интересные конструкции подробнее.

1.3.1 Роликовая головка для накатки винтовой поверхности

Роликовая головка используется для накатки винтовой поверхности на круглой заготовке [98]. Это устройство может использоваться при изготовлении фасонной заготовки для производства специальных гвоздей.

Способ изготовления винтового профиля на волочильных станах основан на протягивании зафиксированной от поворота круглой заготовки через принудительно вращаемый фасонный калибр, при этом в очаг деформации поступает заготовка круглого сечения. Так как фасонный калибр непрерывно обкатывается вокруг передвигающейся заготовки, то из очага деформации выходит профиль с накатанной винтовой поверхностью. Изменяя скорость принудительного вращения калибра или скорость протягивания заготовки, можно изменять шаг винтовой поверхности, а при отсутствии вращения из калибра будет выходить фасонный профиль без винтовой поверхности.

Следует отметить, что при принудительном вращении фасонного калибра вокруг оси заготовки возникают значительные касательные силы, которые стремятся вращать и обрабатываемую заготовку, и если на участке накатки заготовку не зафиксировать от поворота вокруг оси, то винтообразный профиль не будет получен. Это обстоятельство ограничивает нижний предел диаметра заготовки значением в 12–14 мм. Кроме этого, принудительное вращение фасонного калибра приводит к возникновению неодинаковых осевых усилий на боковые стенки калибра, что приводит к неравномерному износу подшипников и стенок калибра. Поэтому в известных устройствах для изготовления винтовых профилей основным узлом, который определяет производительность стана, является стойкость роликподшипникового узла накатной головки с фасонным калибром.

Общий вид устройства представлен на рисунке 1.5.

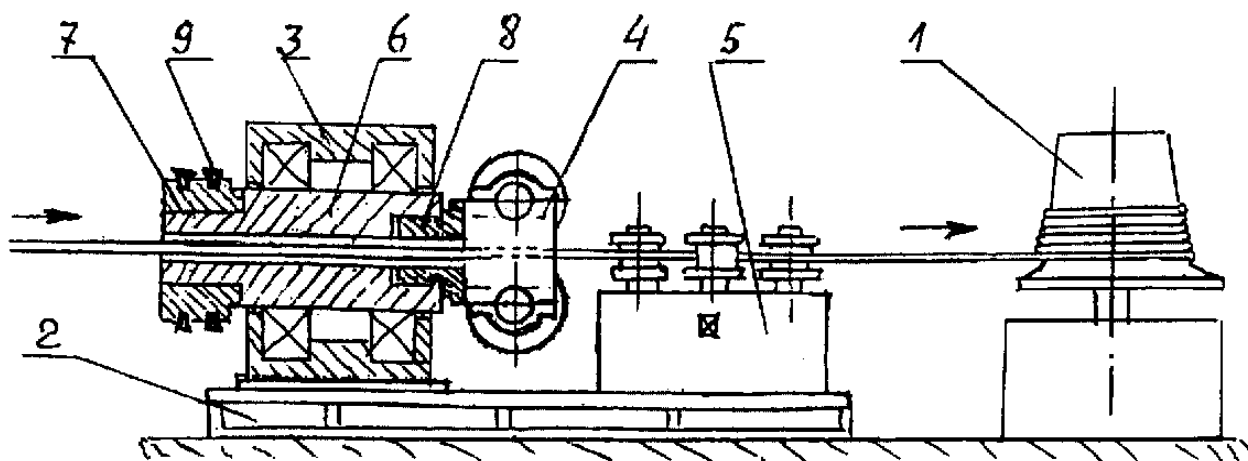


Рисунок 1.5 - Устройство для накатки винтовой поверхности на круглой заготовке

Устройство для накатки винтовой поверхности на круглой заготовке устанавливается перед последним барабаном 1 волочильного стана и содержит раму 2, на которой смонтированы корпус механизма вращения 3 с роликовой накатной головкой 4 и пятироликовое гибочное устройство 5. Механизм вращения 3 представляет собой корпус, в котором на подшипниках качения смонтирован полый вал 6, на одном конце которого закреплен шкив 7, а на другом закреплен посредством резьбовой цапфы 8 корпус накатной головки 4. Шкив 7 приводится во вращение от электродвигателя с помощью клиновых ремней 9.

Рассмотренная конструкция, как отмечено выше, требует фиксации заготовки в районе действия роликовой головки, что значительно усложняет процесс волочения в бунтах. Крутящий момент, приложенный к головке, передается к заготовке, стремясь к ее скручиванию, что делает невозможным работу с заготовками небольших сечений (менее 12-14 мм). Конструктивные особенности роликовой головки ограничивают число заходов винтовой поверхности (можно получать только двухзаходную винтовую поверхность). Для обеспечения стабильного шага винтовой поверхности необходима точная синхронизация поступательного движения заготовки и скорости враще-

ния роликовой головки. Выполнить это условие практически не возможно в момент запуска системы, когда скорость волочения не постоянна.

1.3.2 Устройство для профилирования винтовых труб

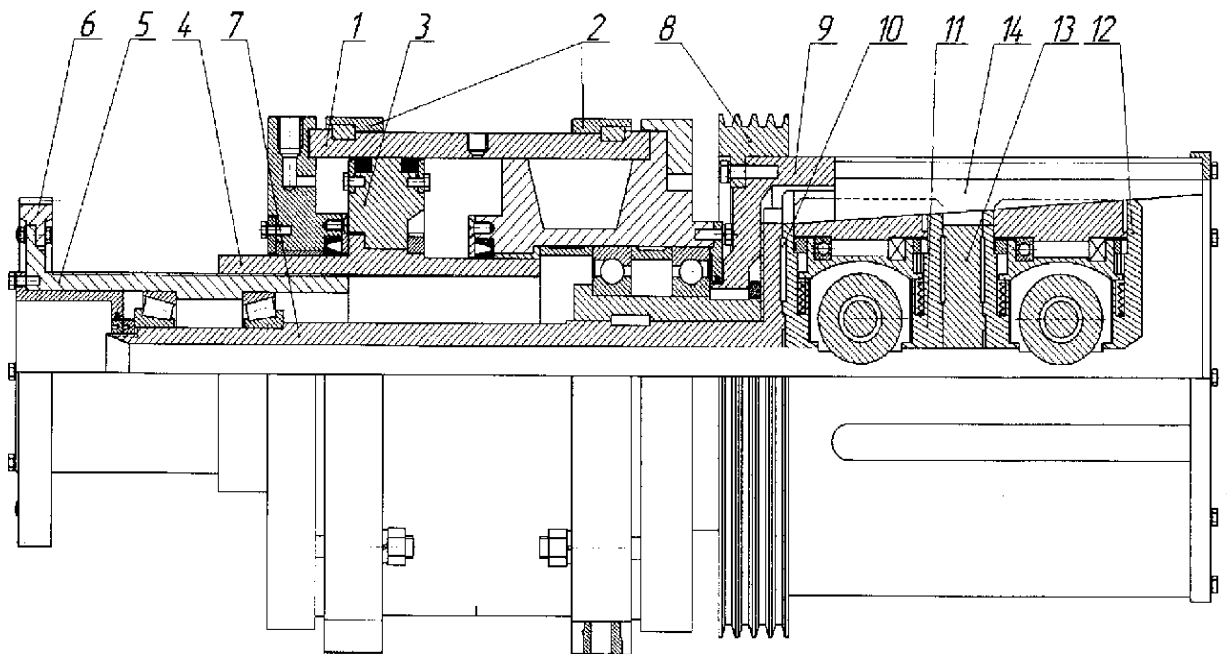
Устройство для профилирования многозаходных винтовых труб, описанное в патентах [99, 100] является развитием рассмотренной выше конструкции.

Ставилась задача создания устройства, обеспечивающего получение трубного профиля с числом заходов более трех, плавного регулирования глубины профилирования, в том числе и во время операции профилирования, а также обеспечение таких требований к теплообменным трубам, как получение гладких концевых участков для заделки в трубную доску теплообменника при сборке.

Решением задачи стало создание устройства (рисунок 1.6) для получения спирально-профилированных труб из трубных заготовок. Новым в устройстве является то, что формующие ролики с роликодержателями выполнены в виде двух трехроликовых профилирующих блоков и размещены в упомянутом клиновом нажимном механизме, а между ними установлена сменная шайба, регулировочная втулка выполнена с установленным на ней цилиндрическим зубчатым колесом и соединенным с ним регулировочным приводом.

Такое техническое решение позволяет получать многозаходный профиль с числом заходов от 3 до 6. Имеется возможность плавно регулировать глубину профилирования, в том числе и непосредственно во время профилирования. Имеется возможность накатки профиля с любым сечением канавки (плоским (цилиндрическим) роликом, роликом с торообразной катающей поверхностью). Установка позволяет также получить гладкие непрофилированные концы для заделки в трубную доску, т.к. используется отдельный скоростной пневматический привод сведения и разведения роликов. Конструк-

ция позволяет получать большой диапазон углов подъема трубного профиля, вплоть до обкатки трубы с минимальными, близкими к 0° углами подъема, т.е. получать трубы с наружным кольцевым оребрением.



1 – цилиндрический полый корпус; 2 – опоры; 3 – поршень; 4 – регулировочная гайка; 5 – регулировочная втулка; 6 – зубчатое колесо; 7 – шпиндель; 8 – клиноременный шкив; 9 – барабан; 10 – торцевые шпонки; 11, 12 – блоки роликов; 13 – сменная шайба; 14 – клиновой нажимной механизм

Рисунок 1.6 - Устройство для профилирования многозаходных винтовых труб

Рассмотренное устройство имеет узкую специализацию ограниченную трубами, несколько расширяются возможности по увеличению числа заходов до 6. Однако устройство значительно сложнее конструктивно, что в свою очередь снижает надежность и не решает основные проблемы рассмотренные выше.

1.3.3 Изготовление винтовых деталей

В работе [101] предлагается способ изготовления винтовых деталей и устройство для его осуществления. Данное изобретение может быть исполь-

зовано при изготовлении винтов для винтовых насосов, выполняемых из тонкостенных труб из нержавеющей и труднообрабатываемых сталей, применяемых в нефтегазодобывающей промышленности. Предлагаемый способ обработки представлен на рисунке 1.7, устройство для реализации способа - на рисунке 1.8.

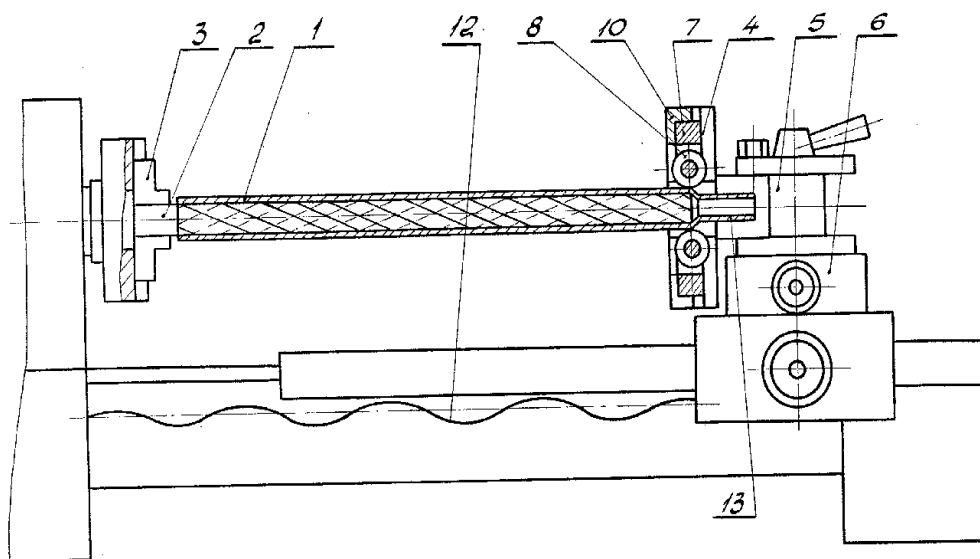


Рисунок 1.7 - Предлагаемый способ обработки

Способ изготовления винтовых деталей (рисунок 1.7) заключается в формообразовании на трубной заготовке при помощи оправки, винтового профиля, причем формообразование винтового профиля осуществляют путем последовательной пластической деформации, при совместном постоянном скручивании трубной заготовки с закрепленной внутри нее n-заходной винтовой оправкой, и взаимосвязанном поступательном перемещении формообразующих элементов, в виде тел качения, вдоль оси обрабатываемой детали.

Реализация предлагаемого способа заключается в следующем (рисунки 1.7, 1.8). Заготовка в виде тонкостенной трубы 1, внутри которой размещена профильная оправка 2, закреплена в 3-кулачковом патроне токарно-винторезного станка 3. Обкатная головка 4 закреплена в резцедержателе 5 суппорта 6. В радиальных пазах корпуса обкатной головки размещены колodки 7 с профилированными роликами 8, кулачки 9 изготовлены вместе с

вращающейся крышкой 10 обкатной головки. Ролики 8 вращаются на опорных штифтах 11. Обкатную головку 4 перемещают вдоль оси обрабатываемой детали по направляющим станка от ходового винта 12.

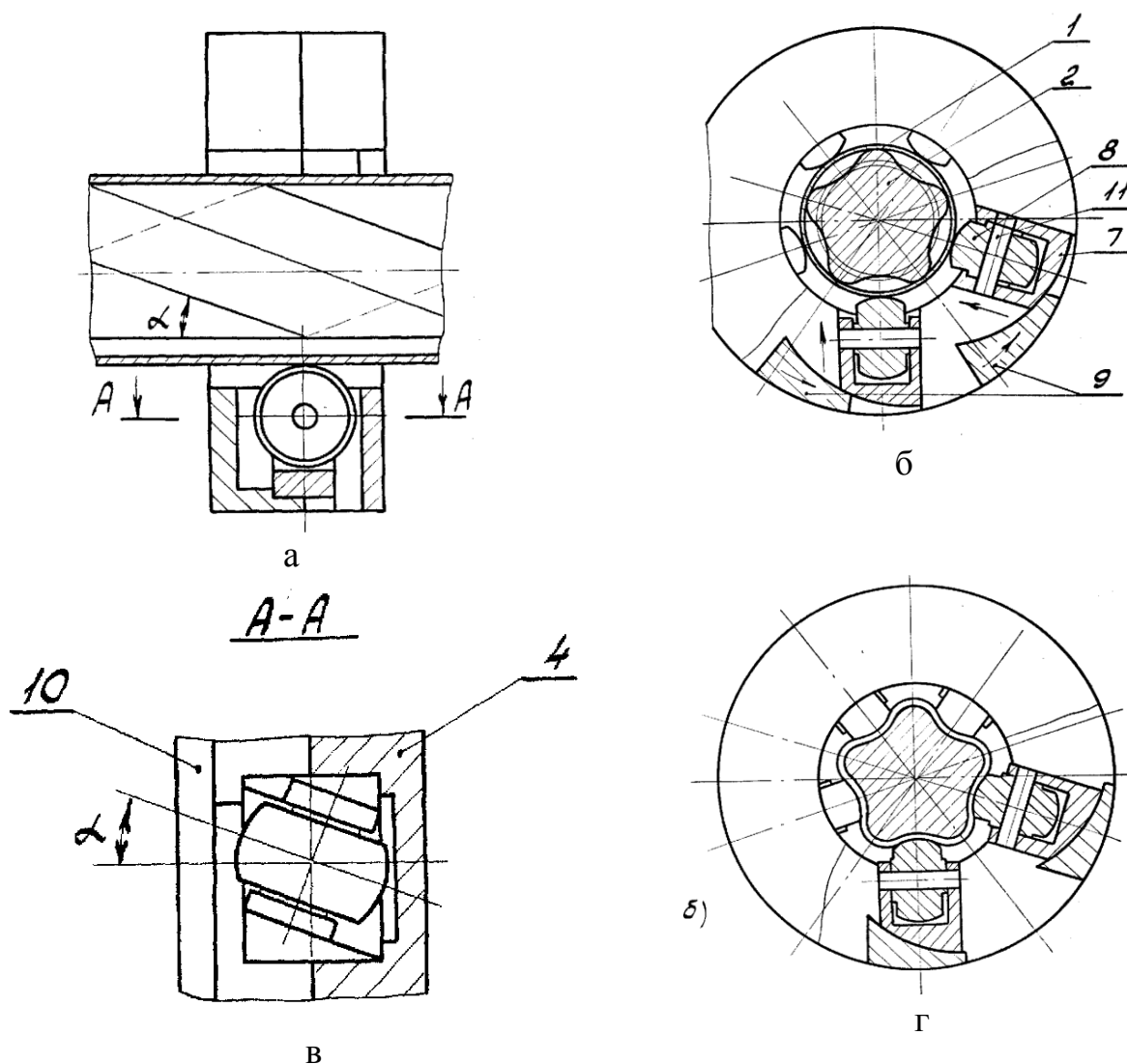


Рисунок 1.8 - Устройство для реализации способа

Данное устройство имеет ограниченную область применения (только для труб), не позволяет получать винтовые профили большой длины, имеет низкую производительность.

Из наиболее интересных конструкций для получения винтовых профилей, разработанных за рубежом, следует упомянуть способ изготовления винтов с головкой [102]. По данному способу головку и тело винта изготавливают из материалов с различной деформируемостью. Затем головка, изго-

товленная из материала с большей деформируемостью, напрессовывается на тело винта и осуществляется пластическое замыкание головки с телом винта. После чего поперечной прокаткой формируется окончательный профиль резьбы на теле винта. Таким образом, для получения винтовых профилей данным способом используется и прессование, и холодная прокатка.

1.4 Теоретические зависимости для определения условий формирования винтовых профилей

Попытка теоретического обоснования получения винтовых профилей была сделана в работе [17]. Рассмотрен наиболее распространенный способ волочения с последующим кручением. При этом шаг винтовой поверхности задается скручиванием на определенный угол при одновременном приложении продольной нагрузки. Рассмотрены вопросы определения напряженного состояния в теле заготовки в виде тонкостенной трубы при формировании винтовой поверхности, получены зависимости для определения величины необходимого момента скручивания ($M_{кр.к}$) и усилия (P) в виде:

$$M_{кр.к} = 2\pi R^2 t \tau_{кр} ; \quad (1.1)$$

$$P = 2\pi R t \sigma_s , \quad (1.2)$$

где R – радиус заготовки; $\tau_{кр}$ – сопротивление кручению; t – шаг скручивания; σ_s – сопротивление деформации.

При получении винтовых профилей скручиванием после снятия крутящего момента имеет место упругое раскручивание, которое изменяет шаг винтовой поверхности. Для учета данного обстоятельства предложена зависимость, позволяющая определить угол раскручивания (γ) при формировании винтовой поверхности на круглых заготовках:

$$\gamma = \tau_{кр} / (G_{1-2} R) , \quad (1.3)$$

где G_{1-2} – модуль сдвига в области изотропии.

При формировании винтовой поверхности на заготовках сечение которых отличается от круглого рекомендовано пользоваться зависимостями вида:

$$M = M_{кр.к} J_p / (J_p)_{кр.к} ; \quad (1.4)$$

$$\gamma = M_{кр.к} / \left[G_{1-2} (J_p)_{кр.к} \right], \quad (1.5)$$

где $M_{кр.к}$ и $(J_p)_{кр.к}$ – момент кручения и момент инерции для круглого профиля, имеющего ту же площадь, что и поперечное сечение скручиваемого профиля; J_p – полярный момент инерции скручиваемого профиля.

Имеющиеся в литературе теоретические зависимости, как было отмечено выше, касаются только способа волочения с кручением. Определение условий реализации других известных вариантов получения винтовых профилей осуществляется в основном опытным путем. Отсутствие теоретического обоснования формирования профилей с винтовой поверхностью затрудняет проектирование оборудования, поиск оптимальных, с точки зрения энергозатрат, режимов деформирования.

Выводы, постановка цели и задач исследования

Изучение состояния вопроса производства многозаходных винтовых профилей позволило сделать ряд важных выводов, поставить цель и задачи исследований.

Выводы

1. Развитие машиностроения, строительной отрасли требует создания инновационных, наукоемких видов продукции, к которым относятся многозаходные винтовые профили. Разработка новых технических и технологических схем, направленных на решение данной задачи, является актуальным и своевременным трендом.

2. В настоящее время освоены технологии получения труб со спиральной поверхностью и горячекатаной винтовой арматуры. Отсутствуют техни-

ческие и технологические решения, позволяющие получить винтовые профили деформированием в холодном состоянии способом волочения.

3. Известные теоретические работы в основном посвящены формированию винтовой поверхности на трубах накаткой в холодном состоянии. Теоретическое обоснование возможности получения волочением многозаходных винтовых профилей в литературе отсутствует.

4. Все известные способы получения винтовых профилей можно разделить на две группы: в первом случае заготовка движется поступательно, а принудительно вращающийся инструмент формирует винтовую поверхность, во втором случае неподвижный инструмент формирует многогранное сечение заготовки, которое в последствии скручивается на определенный угол. Оба подхода при получении винтовых профилей требуют синхронизации поступательного движения заготовки с вращением инструмента при формировании винтовой поверхности, что существенно усложняет конструкцию оборудования и затрудняет, а в некоторых случаях делает невозможным формирование в холодном состоянии многозаходных винтовых профилей.

В соответствии с полученными выводами сформулирована цель диссертационной 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 указанной цели необходимо решить следующие задачи:

Основные задачи

1. Разработать математическую модель формирования многозаходной винтовой поверхности волочением без скручивания и 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 так же использовать новые знания в учебном процессе.

2 Математическое обоснование возможности и энергоэффективности получения винтовых профилей волочением без операции скручивания

2.1 Условия реализуемости получения винтовых профилей волочением без операции скручивания

Согласно результатам, полученным при обзоре литературных источников, наиболее востребованным и мало изученным является способ получения многозаходных винтовых профилей в холодном состоянии. Данный вид продукции имеет хорошие перспективы на рынке. Известные методы формирования винтовых профилей реализуются при одновременном приложении к заготовке и инструменту продольной силы и крутящего момента. Такая схема вызывает необходимость в дополнительном приводе, что существенно усложняет конструкцию оборудования и требует дополнительных затрат энергии. Отсутствие математических моделей условий формирования многозаходных винтовых профилей не позволяет определить границы стабильной реализации и энергоэффективные режимы ведения процесса. Указанные выше обстоятельства сдерживают промышленное производство многозаходных винтовых профилей.

В диссертации предлагается формировать винтовой профиль за счет изменения распределения сил в очаге деформации при реализации процесса волочения в роликовых волоках [103]. Обычно в роликовых волоках оси роликов расположены под углом 90^0 к оси заготовки и винтовой профиль получается в два этапа: на первом формируется многогранное сечение (число граней соответствует числу заходов винтовой поверхности), на втором этапе посредством скручивания на определенный угол обеспечивается нужный шаг винтовой поверхности. Предлагается установить ролики под углом φ ($0^0 < \varphi < 90^0$) к оси заготовки, за счет этого в очаге деформации меняется рас-

пределение сил и появляется составляющая, обеспечивающая момент вращения инструмента вокруг оси заготовки. Наклонное положение роликов по отношению к заготовке приводит к возникновению момента, вращающего тело волокна при протягивании через нее заготовки, как видно из рисунка 2.1, на котором показано распределение сил, действующих на тело волокна, где P_1 – усилие волочения; P_2 – усилие, действующее вдоль оси ролика; P_3 – усилие, перпендикулярное оси ролика; P_4 – усилие, создающее крутящий момент волокна; φ – угол наклона ролика к оси заготовки.

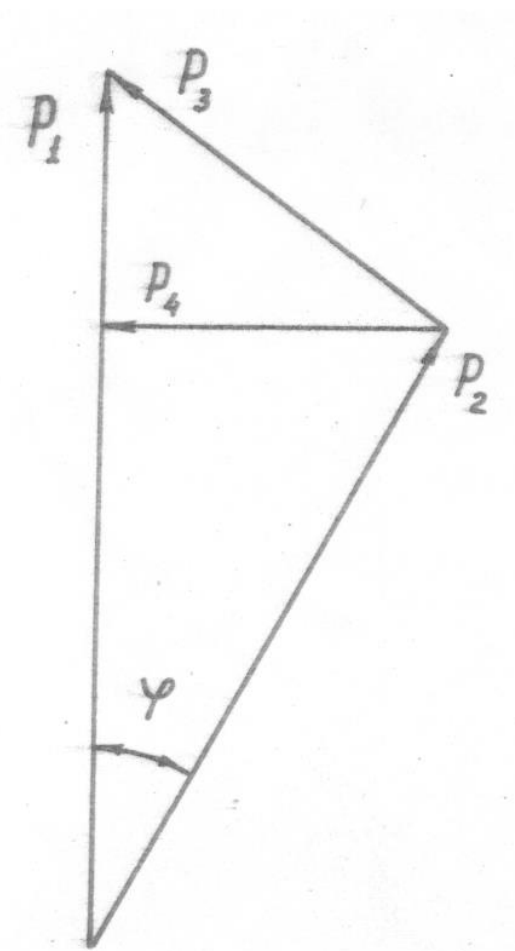


Рисунок 2.1 - Распределение сил при формировании винтовой поверхности в неприводной вращающейся волокна

Необходимо отметить, что возможны два пути деформирования заготовки: вдоль направления действия силы P_2 , при котором на заготовке обра-

зуется винтовая поверхность и вдоль направления действия силы P_1 , что приведет к образованию продольных бороздок.

Определим условия, при которых будет образовываться винтовой профиль.

Начальные условия:

$$t = t_0, \quad \forall M \in V, \quad \sigma_{ij}^0(M) = 0, \quad v_i^0(M) = 0, \quad T_0(M) = Const.$$

Граничные условия, отображающие взаимодействие деформируемого тела с окружающей средой сводятся к следующим допущениям:

- рассматривается установившаяся стадия процесса волочения;
- деформация по сечению равномерна;
- действует закон постоянства секундных объемов;
- на контактной поверхности действуют средние нормальные и касательные напряжения;
- в процессе деформирования соблюдается закон постоянства объемов;
- изменение температуры в процессе волочения не учитывается;
- упрочнение в процессе холодной деформации не учитывается.

Очевидно, что пластическая деформация будет идти в направлении, при котором мощность, затрачиваемая барабаном волочильного стана, для ее осуществления будет наименьшей. При слишком малых или очень больших углах наклона роликов по отношению к заготовке мощность, необходимая для образования винтовой поверхности и преодоления сил трения в подшипниках, может оказаться больше мощности, затрачиваемой на образование продольных бороздок N_1 . Следовательно, винтовой профиль будет образовываться при выполнении следующего условия:

$$\frac{N_2 + N_T}{N_1} \leq 1. \quad (2.1)$$

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.

Умножив числитель и знаменатель на промежуток времени Δt в течение, которого осуществляется деформирование заготовки, получим:

$$\frac{A_2 + A_T}{A_1} \approx 1, \quad (2.2)$$

где A_1 – работа, затрачиваемая на получение продольных бороздок; A_2 – работа, необходимая на пластическую деформацию при получении винтовой поверхности; A_T – работа, затрачиваемая на преодоление сил трения при вращении роликовой волоки.

Работы, входящие в зависимость (2.2) можно определить по формулам:

$$A_1 = V p_{cp1} \ln \frac{l_1}{l_0}; \quad (2.3)$$

$$A_2 = V p_{cp2} \ln \frac{l_2}{l_0}; \quad (2.4)$$

$$A_T = P_1 R_n f \omega, \quad (2.5)$$

где V – объем деформируемой заготовки; l_1 и l_2 – соответственно длины после деформации с образованием продольных бороздок и винтовой поверхности; l_0 – начальная длина заготовки; p_{cp1} , p_{cp2} – среднее давление при деформировании по каждому из указанных путей; R_n и f – радиус и коэффициент трения подшипника; ω – угол поворота тела волоки при образовании винтового профиля по всей длине заготовки.

Поскольку при пластической деформации выполняется условие постоянства объема, выражения (2.3) и (2.4) можно записать:

$$A_1 = V p_{cp1} \ln \frac{S_0}{S_1}; \quad (2.6)$$

$$A_2 = V p_{cp2} \ln \frac{S_0}{S_2}, \quad (2.7)$$

где $S_0 = \pi R_s^2$ – исходная площадь поперечного сечения заготовки; S_1 – площадь поперечного сечения изделия с продольными бороздками; S_2 – площадь поперечного сечения винтового профиля.

Установим величину угла ω . Работу A_2 можно определить, используя соотношение:

$$A_2 = M_{\kappa} \omega, \quad (2.8)$$

где M_{κ} – момент кручения тела волокна.

$$M_{\kappa} = P_4 (R_3 - \Delta h / 2); \quad (2.9)$$

$$P_4 = P_1 \sin \varphi \cos \varphi, \quad (2.10)$$

где R_3 – радиус заготовки; Δh – обжатие роликом.

Тогда

$$A_2 = P_1 (R_3 - \Delta h / 2) \omega \sin \varphi \cos \varphi. \quad (2.11)$$

Приравняв выражения (2.4) и (2.11), получаем:

$$\omega = \frac{V p_{cp2} \ln \frac{S_0}{S_2}}{P_1 (R_3 - \Delta h / 2) \sin \varphi \cos \varphi}. \quad (2.12)$$

С учетом зависимостей (2.5 – 2.7), (2.12) и (2.2) окончательно получим условие, при выполнении которого будет получаться винтовой профиль.

$$\frac{p_{cp2} \ln \frac{S_0}{S_2} \left(1 + \frac{R_n f}{(R_3 - \Delta h / 2) \sin \varphi \cos \varphi} \right)}{p_{cp1} \ln \frac{S_0}{S_1}} \geq 1. \quad (2.13)$$

Давления p_{cp1} и p_{cp2} устанавливаются по справочным данным и зависят от материала заготовки и степени ее деформации ε_1 и ε_2 , которые находятся:

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{S_0}{S_1}; \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{S_0}{S_2}. \quad (2.15)$$

Шаг винтового профиля определяется:

$$t = \frac{2\pi l_2}{\omega n}, \quad (2.16)$$

где n – количество роликов.

Из условия постоянства объема при пластической деформации следует:

$$l_2 = \frac{V}{S_2}. \quad (2.17)$$

Используя зависимости (2.12), (2.16 – 2.17), получаем:

$$t = \frac{2\pi P_1 (R_3 - \Delta h / 2) \sin \varphi \cos \varphi}{p_{cp2} n S_2 \ln \frac{S_0}{S_2}}. \quad (2.18)$$

Рассмотрим волочение заготовки через калибр, образованный наклонными роликами, имеющими цилиндрическую форму.

Величины S_1 и S_2 определяются:

$$S_1 = S_0 - S'_1 n; \quad (2.19)$$

$$S_2 = S_0 - S'_2 n, \quad (2.20)$$

где S'_1 и S'_2 - площади, на которые уменьшится сечение заготовки в результате деформирования одним роликом с образованием соответственно продольной бороздки и винтовой поверхности.

Следовательно, необходимо установить величины S'_1 и S'_2 . Схема, поясняющая нахождение S'_1 , приведена на рисунке 2.2. Здесь вставка и образец расположены под углом 90° друг к другу.

Площадь овала определяется:

$$S_{ов1} = \frac{2}{3} b_{ов1} h_{ов1}, \quad (2.21)$$

где $b_{ов1}$ – ширина овала; $h_{ов1}$ – высота овала.

$$h_{ов1} = 2\Delta h. \quad (2.22)$$

Фигура ABCD представляет собой полуовал. Следовательно, ее площадь:

$$S_{ABCD} = \frac{1}{2} S_{ов1} = \frac{2}{3} b_{ов1} \Delta h; \quad (2.23)$$

$$b_{ов1} = 2\sqrt{R_3^2 - (R_3 - \Delta h)^2} = 2\sqrt{\Delta h(2R_3 - \Delta h)}. \quad (2.24)$$

Тогда

$$S_{ABCD} = \frac{4}{3} \Delta h \sqrt{\Delta h (2R_3 - \Delta h)} . \quad (2.25)$$

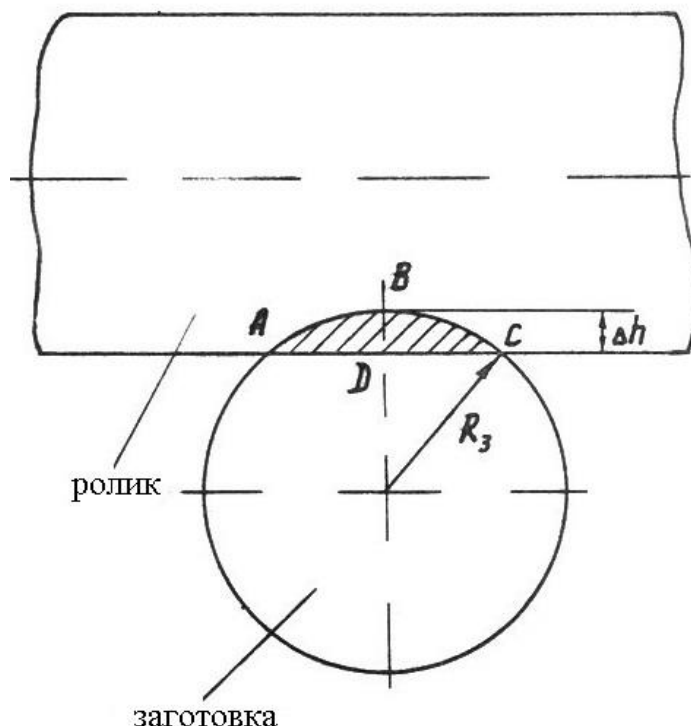


Рисунок 2.2 – Схема для определения площади поперечного сечения (S'_1) при образовании продольных бороздок

При углах φ отличных от 90° уменьшение площади поперечного сечения при деформировании одним роликом будет таким же, как и при угле $\varphi=90^\circ$. Некоторые различия будут наблюдаться при углах близких к нулю, т.е. когда направление осей заготовки и ролика практически совпадают. Для простоты расчетов примем, что $S'_1 = S_{ABCD}$ во всем диапазоне изменений углов φ , т.е.

$$S'_1 = \frac{4}{3} \Delta h \sqrt{\Delta h (2R_3 - \Delta h)} . \quad (2.26)$$

На рисунке 2.3 приведена схема, поясняющая определение площади. При этом направлении осей ролика и заготовки совпадают:

$$S_{ов2} = S_{KLMG} = \frac{2}{3} b_{ов2} \Delta h . \quad (2.27)$$

Находим ширину овала:

$$b_{ог2} = 2\sqrt{R_6^2 - (R_6 - \Delta h_1)^2}, \quad (2.28)$$

где R_6 – радиус ролика.

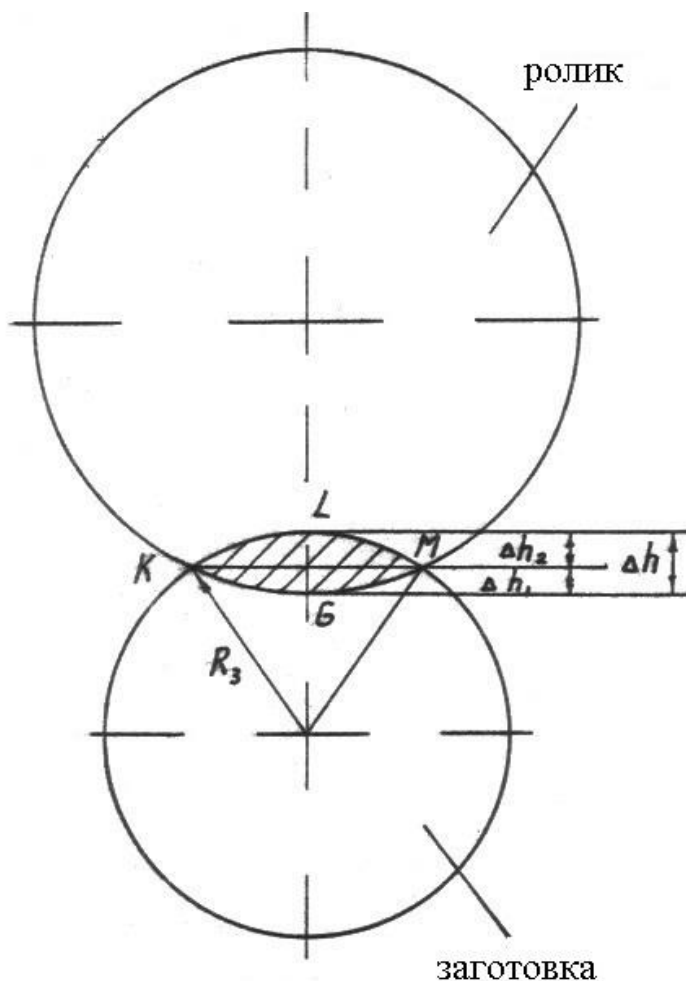


Рисунок 2.3 – Схема для определения площади поперечного сечения (S_2') при образовании винтовой поверхности

В общем случае, когда радиус ролика не равен радиусу заготовки, Δh_1 и Δh_2 также неравны друг другу. Установим величину Δh_1 .

Ширину овала можно найти и по зависимости:

$$b_{ог2} = 2\sqrt{R_3^2 - (R_3 - \Delta h_2)^2} = 2\sqrt{R_3^2 - (R_3 - \Delta h + \Delta h_1)^2}. \quad (2.29)$$

Приравняв (3.28) и (3.29) определяем

$$\Delta h_1 = \frac{\Delta h(2R_3 - \Delta h)}{2(R_6 + R_3 - \Delta h)}. \quad (2.30)$$

После подстановки Δh_1 в зависимость (2.28) получим:

$$b_{ов2} = \frac{\sqrt{\Delta h(2R_3 - \Delta h) \left[4R_6(R_6 + R_3 - \Delta h) - \Delta h(2R_3 - \Delta h) \right]}}{R_6 + R_3 - \Delta h}. \quad (2.31)$$

Отсюда

$$S_{ов2} = \frac{2\Delta h \sqrt{\Delta h(2R_3 - \Delta h) \left[4R_6(R_6 + R_3 - \Delta h) - \Delta h(2R_3 - \Delta h) \right]}}{3(R_6 + R_3 - \Delta h)}. \quad (2.32)$$

Поскольку ролики располагаются к оси заготовки под углом отличным от нуля, то сечение ролика будет представлять собой не круг, а эллипс. Для упрощения расчетов примем, что большой радиус эллипса определяется из выражения $R_в/\cos\varphi$. Тогда выражение (2.32) примет вид:

$$S'_2 = \frac{2\Delta h \sqrt{\Delta h(2R_3 - \Delta h) \left[\frac{4R_6}{\cos\varphi} \left(\frac{R_6}{\cos\varphi} + R_3 - \Delta h \right) - \Delta h(2R_3 - \Delta h) \right]}}{3 \left(\frac{R_6}{\cos\varphi} + R_3 - \Delta h \right)}. \quad (2.33)$$

Более точное значения S'_2 можно получить геометрическим построением.

Для проверки точности зависимости (2.33) были построены в масштабе площади поперечного сечения винтовых профилей с разным углом наклона роликов. Сопоставление расчетных данных с результатами графического построения показали небольшое отличие результатов не превышающее 4%.

Для установления шага винтового профиля по уравнению (3.18), введем обозначение:

$$S_к n = \frac{P_1}{P_{cp2}}, \quad (2.34)$$

где $S_к$ – контактная площадь заготовки с одним деформирующим роликом.

Определим контактную площадь $S_к$, используя рисунки 2.4 и 2.5. Контактная площадка имеет форму вогнутого полуовала с площадью

$$S_{овк} = \frac{2}{3} l_к b_к, \quad (2.35)$$

где l_k – длина дуги контакта; b_k – ширина контакта.

$$l_k = R_\kappa \alpha, \quad (2.36)$$

где α – угол контакта.

$$\cos \alpha = \frac{R_\epsilon - \Delta h}{R_\epsilon}. \quad (2.37)$$

Отсюда

$$\alpha = \arccos \left(1 - \frac{\Delta h}{R_\epsilon} \right); \quad (2.38)$$

$$l_k = R_\epsilon \arccos \left(1 - \frac{\Delta h}{R_\epsilon} \right). \quad (2.39)$$

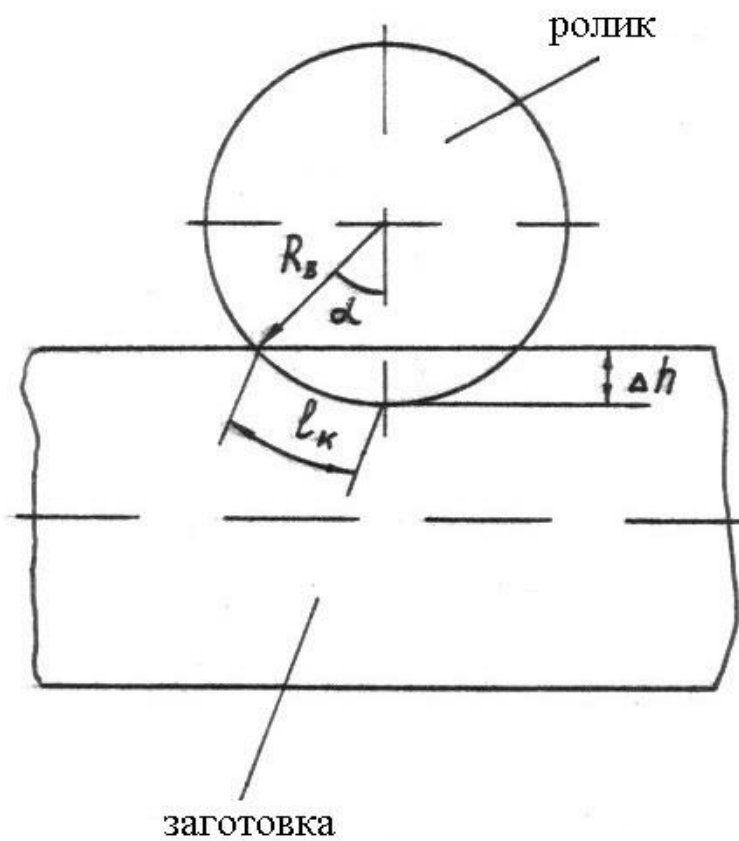


Рисунок 2.4 – Схема для определения длины дуги захвата

Находим b_k :

$$b_{\kappa} = 2\sqrt{R_3^2 - (R_3 - \Delta h)^2} = 2\sqrt{\Delta h(2R_3 - \Delta h)}. \quad (2.40)$$

Тогда

$$S_{\text{овк}} = \frac{4}{3} R_6 \arccos\left(1 - \frac{\Delta h}{R_6}\right) \sqrt{\Delta h(2R_3 - \Delta h)}. \quad (2.41)$$

Поскольку ролик расположен к оси заготовки под углом $\varphi < 90^\circ$, ширина полуовала, а значит и площадь $S_{\text{овк}}$ увеличится в $1/\sin\varphi$ раз, т.е.

$$S_{\kappa} = \frac{4R_6}{3\sin\varphi} \arccos\left(1 - \frac{\Delta h}{R_6}\right) \sqrt{\Delta h(2R_3 - \Delta h)}. \quad (2.42)$$

Используя зависимости (2.34) и (2.42) определим величину $P_1/p_{\text{ср2}}$:

$$\frac{P_1}{p_{\text{ср2}}} = \frac{4R_6 n}{3\sin\varphi} \arccos\left(1 - \frac{\Delta h}{R_6}\right) \sqrt{\Delta h(2R_3 - \Delta h)}. \quad (2.43)$$

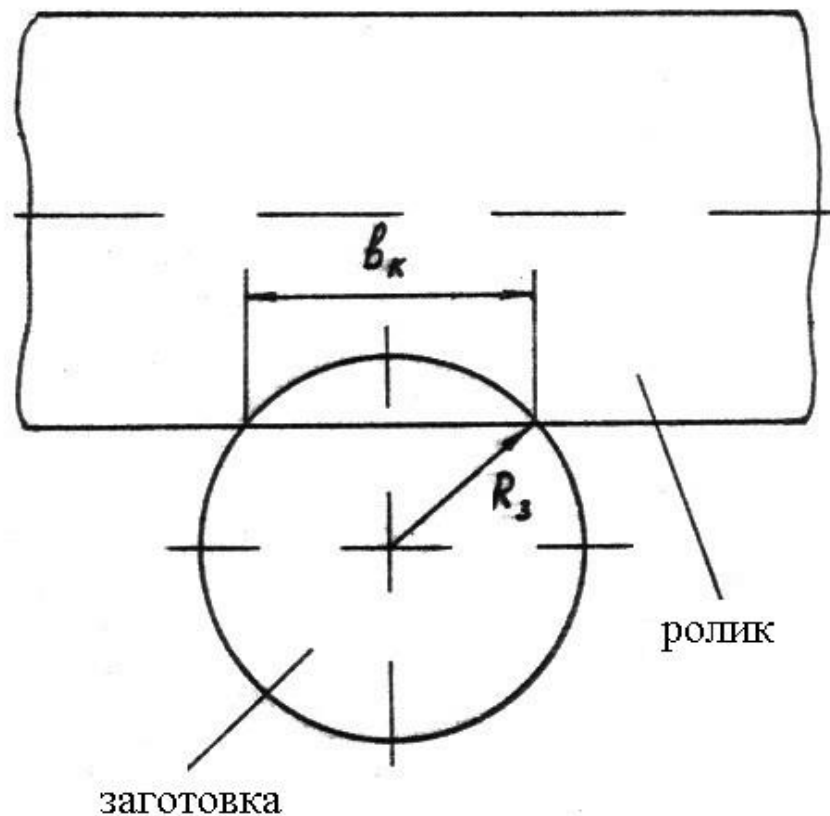


Рисунок 2.5 – Схема для определения ширины контакта

Преобразуем зависимость (2.43) приняв $R_6 \arccos\left(1 - \frac{\Delta h}{R_6}\right) \approx \sqrt{\Delta h R_6}$

такое допущение вносит ошибку не более 5%.

$$\frac{P_1}{P_{cp2}} = \frac{4n}{3 \sin \varphi} \sqrt{\Delta h R_6} \sqrt{\Delta h (2R_3 - \Delta h)} = \frac{4n\Delta h}{3 \sin \varphi} \sqrt{R_6 (2R_3 - \Delta h)} . \quad (2.44)$$

Подставляя (3.44) в (3.18) получим:

$$t = \frac{4\pi \cos \varphi \Delta h \sqrt{R_6 (2R_3 - \Delta h)^3}}{3S_2 \ln \frac{S_0}{S_2}} . \quad (2.45)$$

Используя полученные зависимости (2.13, 2.19, 2.20, 2.26, 2.33) определим область осуществимости получения винтовых профилей волочением по новой технологии не предусматривающей скручивание. В качестве примера рассмотрим волочение стальной проволоки из заготовки диаметром 6,5 мм в волоке, формирующей 3^x заходную винтовую поверхность. Изучим влияние на осуществимость процесса получения винтовых профилей изменения угла установки ролика относительно оси заготовки, который будем варьировать от 1⁰ до 88⁰, изменение диаметра роликов рассмотрим в пределах от 4 мм до 16 мм. Наиболее действенными факторами, влияющими на область осуществимости изучаемого процесса, являются угол установки роликов относительно оси заготовки и диаметр роликов. График влияния диаметра и угла установки ролика относительно оси заготовки приведен на рисунке 2.6, где под обозначениями 1 - 5 предполагаются диаметры роликов соответственно 4 мм, 6 мм, 8 мм, 11 мм, 13 мм, 16 мм, величина обжатия одним роликом 0,5 мм. Из приведенных на рисунке 2.6 результатов видно влияние угла установки роликов на возможность реализации изучаемого процесса: чем величина отношения мощности для формирования продольных бороздок к мощности для образования винтовой поверхности меньше, тем стабильней процесс. Наименьшее значение отношения мощностей находится в районе угла установки роликов к оси заготовки 10⁰. Увеличение диаметра ролика

приводит к увеличению отношения мощностей и сужению области осуществимости процесса получения винтовых профилей волочением без применения скручивания. В рассматриваемых условиях, при диаметре ролика 16 мм, процесс неосуществим.

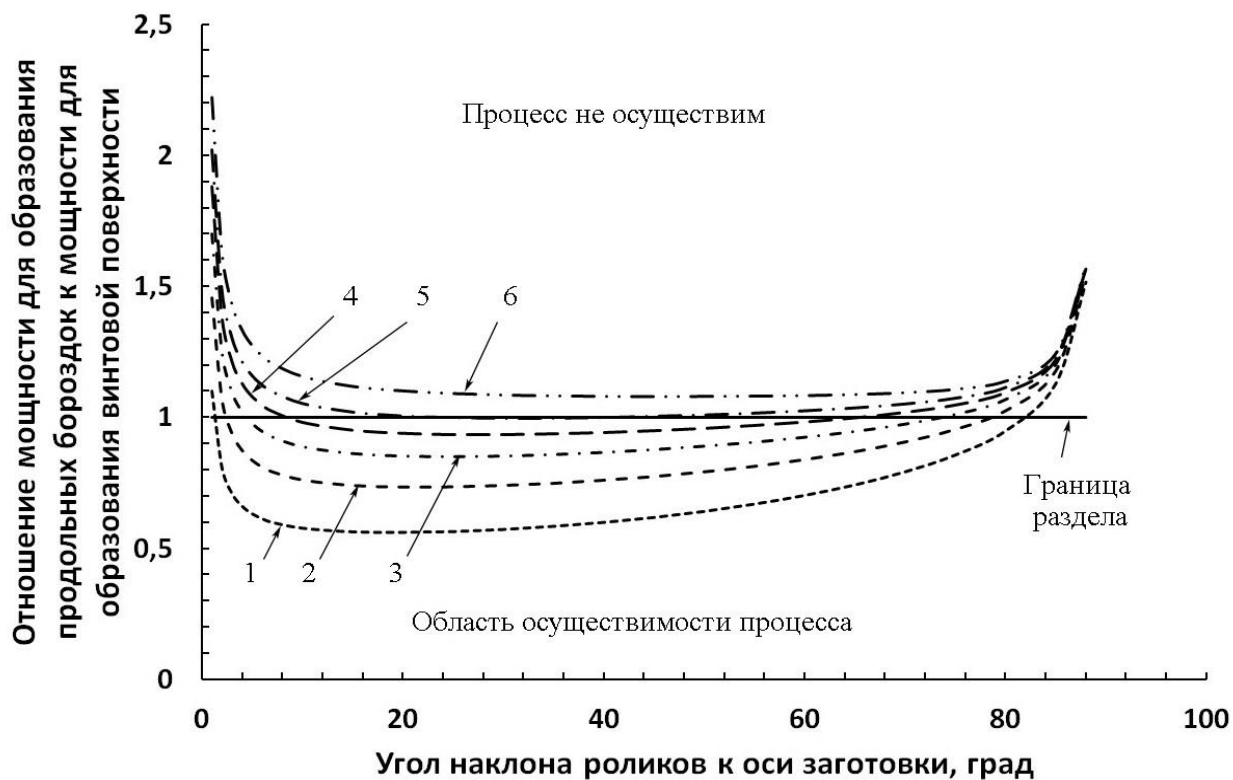


Рисунок 2.6 - Область осуществимости изучаемого процесса при волочении заготовки диаметром 6,5 мм

Рассмотрим еще один график, приведенный на рисунке 2.7, который построен для заготовки 10 мм при тех же условиях и обозначениях, что график на рисунке 2.6. Из сопоставления графиков видно, что с увеличением диаметра заготовки при прочих равных условиях область осуществимости изучаемого процесса расширяется. То есть, для улучшения условий реализации процесса формирования винтовых профилей, отношение диаметра заготовки к диаметру роликов необходимо принимать максимальным.

Аналогичным способом определим область осуществимости волочением без операции скручивания для получения винтовых профилей диаметром 4 и 5 мм, приведенным на рисунках 2.8 и 2.9.

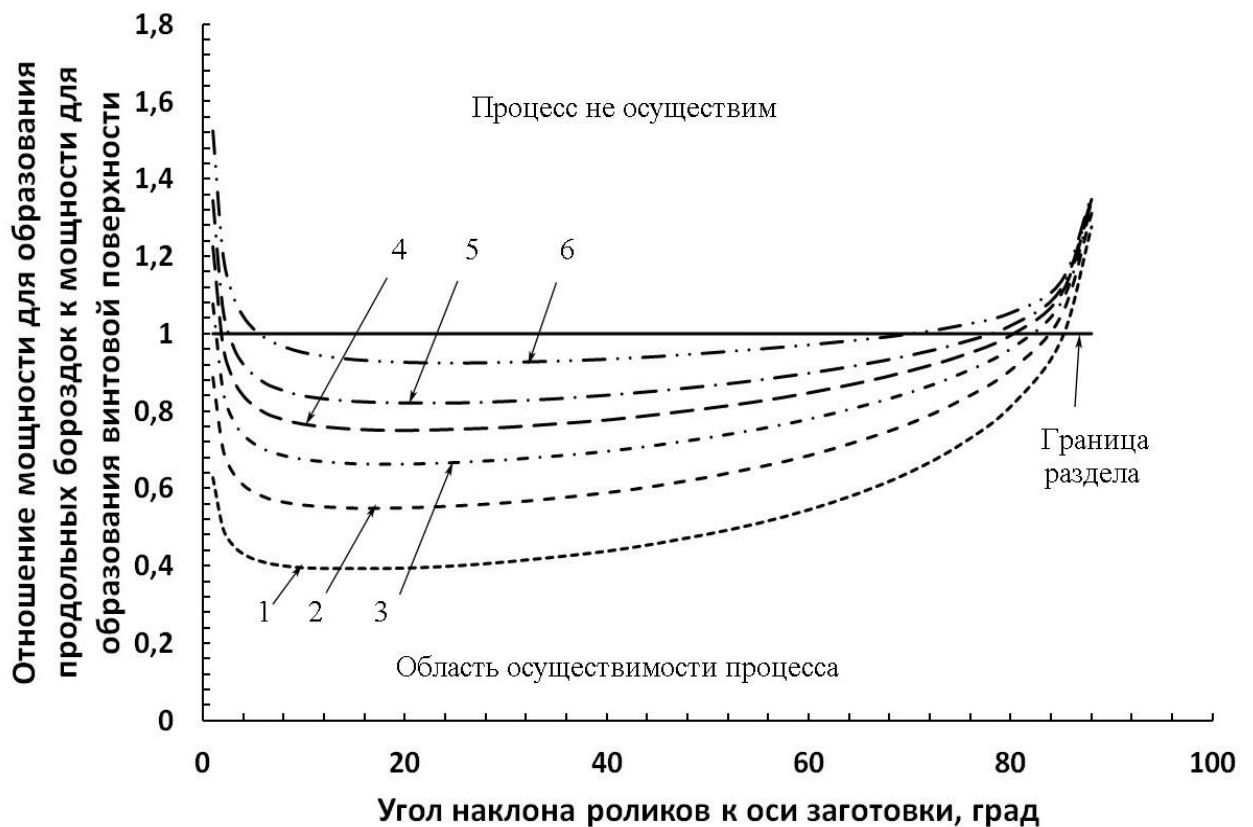


Рисунок 2.7 - Область осуществимости изучаемого процесса при волочении заготовки диаметром 10 мм

Проанализируем влияние отношения диаметра заготовки к диаметру ролика на осуществимость процесса. Воспользуемся формулой (2.13) и найдем границу осуществимости процесса получения винтовых профилей из заготовок диаметром от 4 до 10 мм в зависимости от диаметра формирующего ролика. Полученные результаты приведены на рисунке 2.8, из которого видно, что формирование винтового профиля возможно при отношении диаметра заготовки к диаметру ролика не более 0,5...0,6. При больших значениях соотношения диаметров на поверхности заготовки будут формироваться только продольные бороздки. Чем меньше соотношение диаметров по сравнению с предельными значениями, тем процесс получения винтовых профилей устойчивей, а область осуществимости шире (рисунок 2.6, 2.7, 2.8, 2.9).

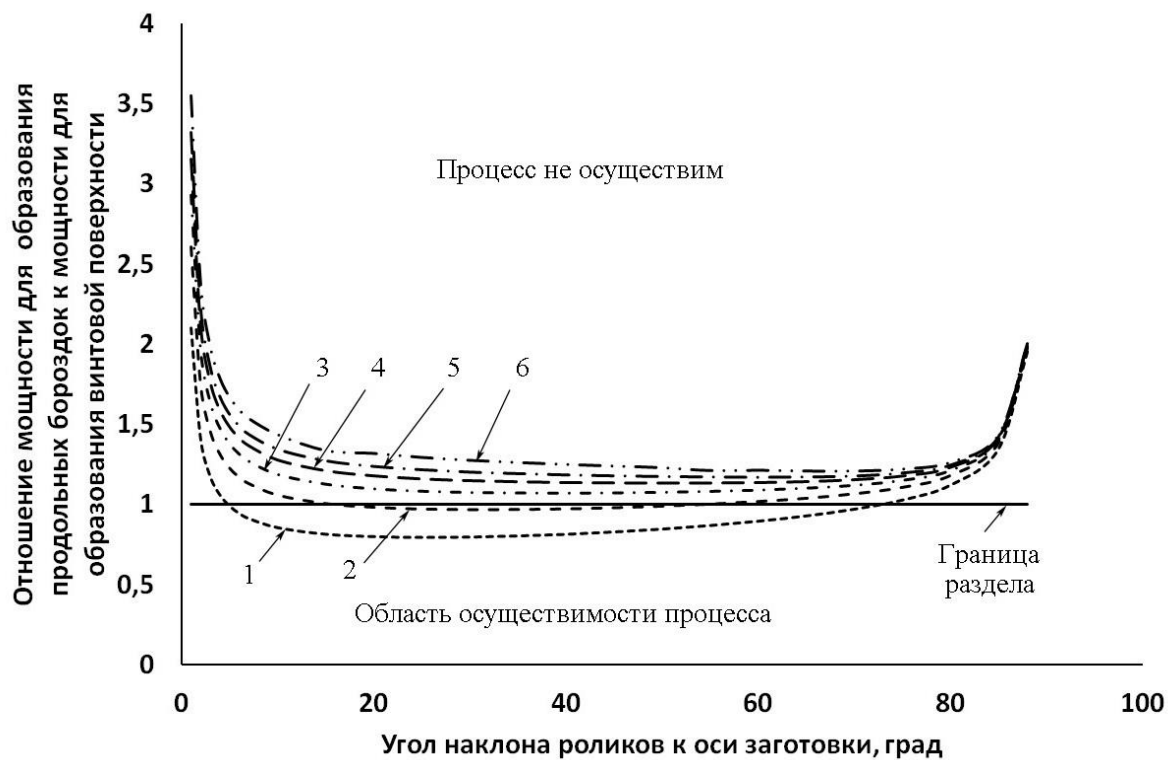


Рисунок 2.8 - Область осуществимости изучаемого процесса при волочении заготовки диаметром 4 мм

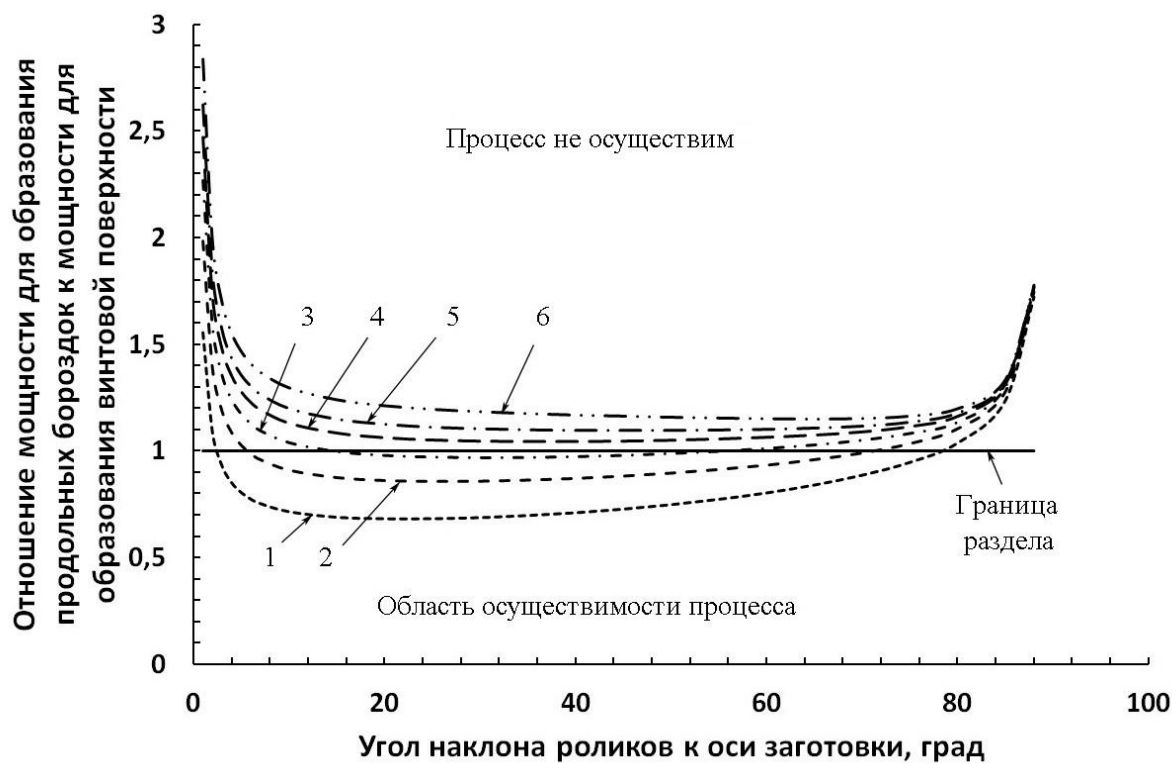


Рисунок 2.9 - Область осуществимости изучаемого процесса при волочении заготовки диаметром 5 мм

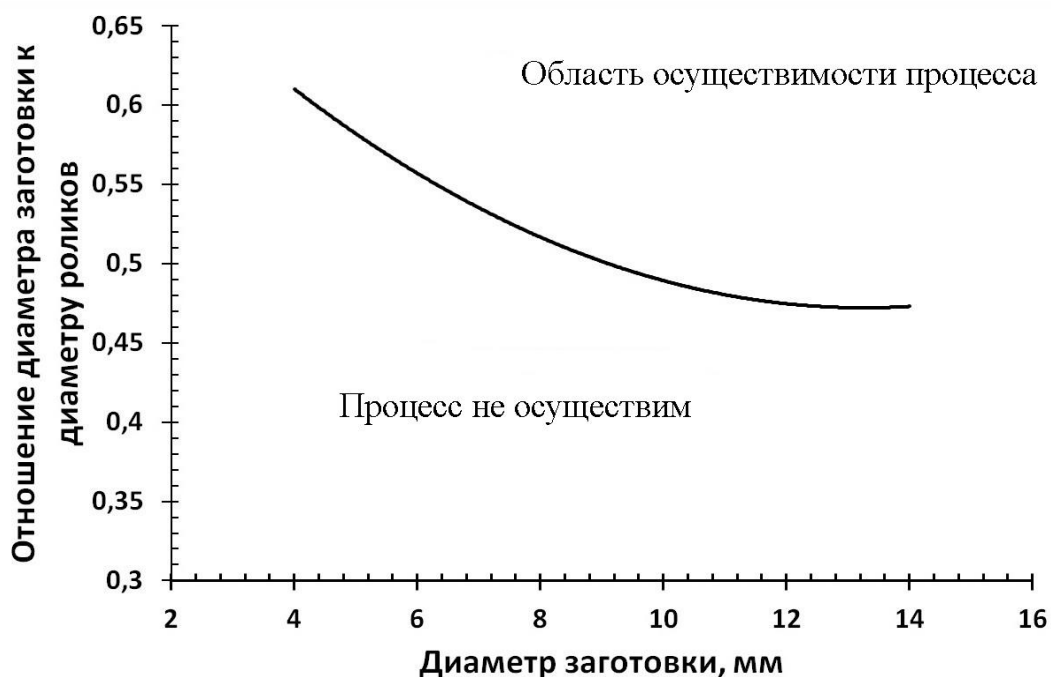


Рисунок 2.10 - Влияние диаметра заготовки на положение границы осуществимости процесса получения винтовых профилей волочением без скручивания.

Для того чтобы оценить реализуемость процесса формирования винтовых профилей при конкретных условиях, рассчитать оптимальное соотношение размеров заготовки и инструмента необходимо воспользоваться зависимостями (2.13, 2.19, 2.20, 2.26, 2.33) и графиками, приведенными на рисунках 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10. Следующим этапом необходимо определить условия формирования винтовой поверхности с заданным шагом, для этого потребуется зависимость (2.45). Рассмотрим влияние на шаг трехзаходной винтовой поверхности, сформированной роликами диаметром 5 мм, угле наклона роликов к оси заготовки в интервале от 35° до 65° и диаметре заготовки от 4 до 10 мм. Выбранные условия соответствуют области осуществимости процесса в рассматриваемых пределах изучаемых факторов. Полученные результаты в виде трехкоординатного графика показаны на рисунке 2.11. Из рисунка 2.11 видно, что с увеличением угла установки роликов относительно оси заготовки шаг винтовой поверхности уменьшается. Данное обстоятельство можно объяснить изменением распределения сил (рисунок 2.1) в пользу увеличения

силы P_4 , которая создает крутящий момент соответственно увеличивая работу на формирование винтовых канавок. Особо выражено влияние угла установки роликов на шаг винтовой поверхности при увеличении диаметра заготовок. Так, на заготовках диаметром 4 мм, увеличение угла установки роликов с 35° до 65° уменьшает шаг винтовой поверхности на 52%, а при тех же условиях на заготовках диаметром 10 мм шаг винтовой поверхности уменьшается на 58%. На шаг винтовой поверхности также оказывает влияние диаметр заготовки. С увеличением диаметра заготовки с 4 до 10 мм шаг винтовой поверхности увеличивается в среднем в три раза. Таким образом, для получения винтовой поверхности с небольшим шагом угол установки роликов целесообразно брать в пределах $45^\circ - 65^\circ$, с учетом диаметра заготовки.

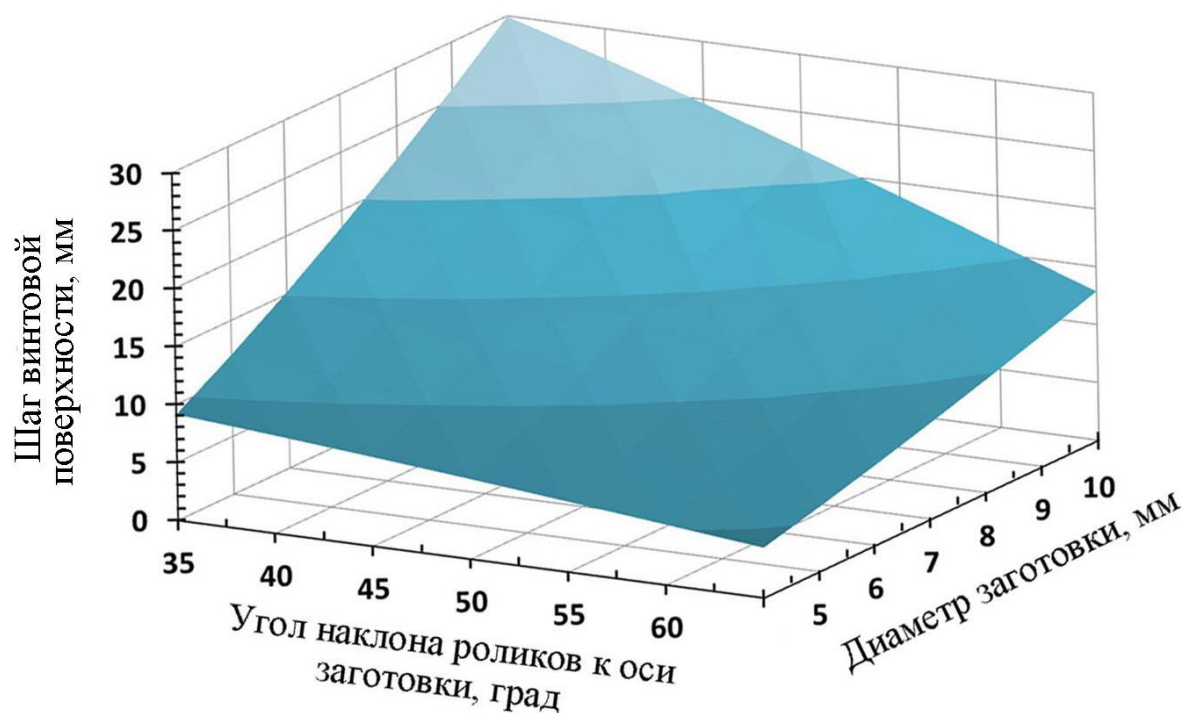


Рисунок 2.11 - Зависимость шага винтовой поверхности от диаметра заготовки и угла наклона роликов к оси заготовки

Приведенные в разделе формулы и графики позволяют определить область осуществимости, размеры и конструктивные особенности инструмента для формирования винтовых профилей.

2.2 Обоснование энергоэффективности волочения винтовых профилей без операции скручивания

Определим мощность, необходимую для получения винтовых профилей волочением с последующим скручиванием профиля на определенный угол.

Начальные условия:

$$t = t_0, \quad \forall M \in V, \quad \sigma_{ij}^0(M) = 0, \quad v_i^0(M) = 0, \quad T_0(M) = \text{Const}.$$

Граничные условия, отображающие взаимодействие деформируемого тела с окружающей средой, сводятся к следующим допущениям:

- рассматривается установившаяся стадия процесса волочения;
- деформация по сечению равномерна;
- действует закон постоянства секундных объемов;
- на контактной поверхности действуют средние нормальные и касательные напряжения;
- в процессе деформирования выполняется закон постоянства объемов;
- изменение температуры в процессе волочения не учитывается;
- упрочнение в процессе холодной деформации не учитывается.

Для скручивания используется дополнительное оборудование и дополнительные затраты энергии. Полную мощность (N_{Σ}) при волочении со скручиванием можно определить по формуле:

$$N_{\Sigma 1} = N_{\text{деф}1} + N_{\text{скр}} , \quad (2.46)$$

где $N_{\text{деф}1}$ – мощность, затраченная на формирование продольных канавок; $N_{\text{скр}}$ – мощность, затраченная на скручивание.

Использование новой технологии формирования винтовых профилей волочением без скручивания приводит к затратам мощности на формирование винтовых канавок ($N_{\text{деф}2}$) и на вращение подшипников под нагрузкой:

$$N_{\Sigma 2} = N_{\text{деф}2} + N_{\text{вращ}} , \quad (2.47)$$

Мощность на формирование продольных канавок ($N_{\text{деф1}}$), при всех прочих равных условиях, отличается в меньшую сторону от мощности для формирования винтовой поверхности ($N_{\text{деф2}}$) за счет того, что протяженность винтовых канавок больше чем продольных и имеет место неравенство:

$$N_{\text{деф1}} \leq N_{\text{деф2}}, \quad (2.48)$$

Разность мощностей будет пропорциональна отношению длин продольных ($l_{\text{пр}}$) и винтовых ($l_{\text{винт}}$) канавок. Таким образом (2.48) можно представить в виде:

$$N_{\text{деф2}} = \frac{l_{\text{винт}}}{l_{\text{пр}}} N_{\text{деф1}}, \quad (2.49)$$

Длину винтовой канавки можно найти, зная угол подъема винтовой поверхности (ψ), который в свою очередь определяется по формуле:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{h_x}{\pi d_{\text{ср}}}, \quad (2.50)$$

где h_x – ход винтовой поверхности (величина относительного перемещения исходной точки по винтовой линии на угол 360°); $d_{\text{ср}}$ – средний диаметр винтового профиля.

$$h_x = t \cdot n, \quad (2.51)$$

$$l_{\text{винт}} = \frac{l_{\text{пр}}}{\sin \psi}, \quad (2.52)$$

$$N_{\text{деф2}} = \frac{N_{\text{деф1}}}{\sin \psi}, \quad (2.53)$$

С учетом (2.46), (2.47) и (2.53) можно определить разницу между затратами энергии при получении винтового профиля по новой технологии, включающей операцию скручивания и при комбинированном способе волочения с последующим скручиванием (ΔN):

$$\Delta N = N_{\text{деф1}} \left(1 - \frac{1}{\sin \psi} \right) + N_{\text{скр}} - N_{\text{вращ}}, \quad (2.54)$$

Многозаходные винтовые профили, которые формируются волочением по предлагаемой технологии, имеют большой шаг винтовой поверхности, а следовательно угол подъема винтовой поверхности, что обуславливает не большую разницу между $l_{пр}$ и $l_{винт}$. В большинстве случаев разница не превышает 10%, что дает основание упростить (2.54) до вида:

$$\Delta N = N_{скр} - N_{вращ}, \quad (2.55)$$

Определим граничные условия, при которых расхождение зависимостей (2.54) и (2.55) не превышает 10% при 3-х, 4-х и 5-ти заходных винтовых поверхностях. Критерием оценки будет шаг винтовой поверхности (h). При равных значениях $N_{скр}$ и $N_{вращ}$ ошибку будет вносить множитель $\left(1 - \frac{1}{\sin \psi}\right)$.

Исходя из этого и ограничив ошибку 10%, можно записать:

$$0,1 = \frac{1 - \sin \psi}{\sin \psi}, \quad (2.56)$$

Находим допустимое значение $\sin \psi$, при котором применима формула (2.55):

$$\sin \psi = 0,909;$$

$$\psi = \arcsin(0,909) = 65^{\circ}30'.$$

Определенный угол подъема винтовой поверхности (ψ) не должен быть меньше значения $65^{\circ}30'$, что гарантирует при использовании формулы (2.55) ошибку не более 10%. Применяя зависимость (2.50) найдем минимально допустимый шаг винтовой поверхности:

$$t = \frac{6,89d_{cp}}{n}, \quad (2.57)$$

Заменим величину d_{cp} на диаметр заготовки, что несколько увеличит значение t и уменьшит ошибку допущения $N_{деф1} \approx N_{деф2}$.

$$t = \frac{6,89D_3}{n}, \quad (2.58)$$

где D_3 – диаметр заготовки.

Используя приведенные выше зависимости, определим область применимости формул (2.54) и (2.55). Результаты вычислений приведены на рисунке 2.12, согласно которому при значениях шага винтовой поверхности расположенной выше расчетной плоскости применима формула (2.55), в противном случае необходимо пользоваться формулой (2.54).

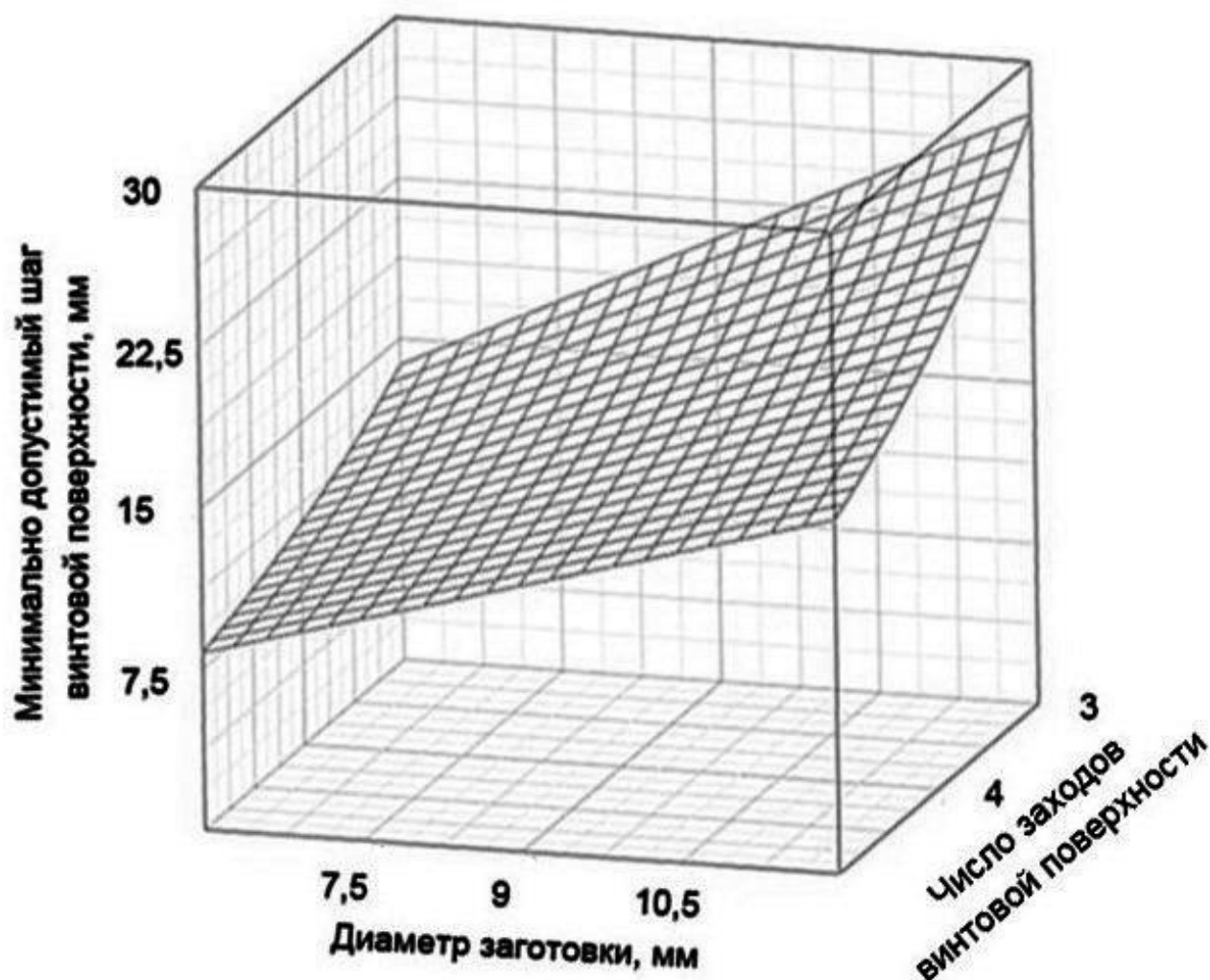


Рисунок 2.12 - График для определения области применимости зависимостей (2.54) и (2.55)

Рассмотрим условия применимости формулы (2.55), которые в основном имеют место при получении винтовых профилей по новой технологии, исключаяющей скручивание. Для использования формулы (2.55) необходимо

определить мощность для скручивания профиля ($N_{скр}$) и мощность для преодоления трения в подшипниках самовращающейся волоки:

$$N_{скр} = M_{кр} \omega, \quad (2.59)$$

где $M_{кр}$ – момент кручения; ω – угловая скорость.

$$M_{кр} = \tau_{кр} W_p, \quad (2.60)$$

где $\tau_{кр}$ – предел текучести при кручении (для стали $\tau_{кр}=(0,55...0,6)\sigma_T$); W_p – момент сопротивления сечения.

Для заготовки круглого сечения [104]:

$$W_p = 0,2D_3^3, \quad (2.61)$$

Угловую скорость определим по известной формуле:

$$\omega = \frac{\pi k}{30}, \quad (2.62)$$

где k – число оборотов при вращении неприводной вращающейся волоки. Число оборотов в минуту можно определить как функцию от скорости волочения и величины хода (h_x).

$$n = \frac{60v}{h_x}; \quad (2.63)$$

$$\omega = \frac{6,28v}{t \cdot n}, \quad (2.64)$$

где v – скорость волочения.

Подставляя в (2.59) зависимости (2.50), (2.60), (2.61), (2.62) и (2.64) после преобразований получим:

$$N_{скр} = \frac{6,28\tau_{кр}vD_3^3}{t \cdot n}, \quad (2.65)$$

Мощность, необходимую для вращения в подшипниках неприводной вращающейся волоки, можно найти по известным формулам:

$$N_{вращ} = M_{вращ} \omega, \quad (2.66)$$

$$M_{\text{вращ}} = P_1 d_{\text{подш}} f, \quad (2.67)$$

где $M_{\text{вращ}}$ – момент необходимый для вращения; $d_{\text{подш}}$ – диаметр подшипника; f – коэффициент трения в подшипнике; P_1 – усилие волочения.

При использовании формулы (2.67) необходимо знать усилие волочения, которое изменяется в широких пределах и для каждого конкретного условия имеет вполне определенное значение [105]. Усилие волочения меняется от 0 до P_{max} . Максимальное значение усилия волочения (P_{max}) обусловлено прочностью конца, находящегося в захватах, который обычно имеет диаметр после острения $0,8 D_3$.

$$P_{\text{max}} = 0,628 \cdot D_3^2 [\sigma_T], \quad (2.68)$$

где $[\sigma_T]$ – допустимый предел текучести.

Обычно при деформировании, связанным с натяжением, допустимое значение предела текучести, гарантирующее отсутствие обрывов и потери устойчивости профиля, принимается $0,5 \dots 0,7 \sigma_T$.

Запишем (2.55) с учетом (2.59), (2.60), (2.64), (2.66) и (2.67) в виде:

$$\Delta N = M_{\text{кр}} \omega - M_{\text{вращ}} \omega = \frac{0,754 \nu \cdot D_3^2 \sigma_T}{t \cdot n} (D_3 - \pi d_{\text{подш}} f), \quad (2.69)$$

Пользуясь полученными зависимостями, сопоставим энергозатраты при получении винтовых профилей из заготовок диаметром от 6 до 14 мм способом волочения с последующим скручиванием и при волочении по новой технологии. Исходные данные для расчетов: скорость волочения 1,5 м/с, сопротивление деформации материала заготовки 550 МПа, число заходов винтовой поверхности 3, 4 и 5, диаметр упорного подшипника качения 50 мм, шаг винтовой поверхности 30 мм. Допущения: глубина и размеры винтовых канавок во всех случаях постоянны, усилие волочения постоянно, так как глубина и размеры винтовых канавок неизменны и соответствует максимальному значению из условия прочности для заготовки диаметром 6 мм. Пользуясь исходными данными и принятыми допущениями, расчетным путем построен трехмерный график, приведенный на рисунке 2.13.

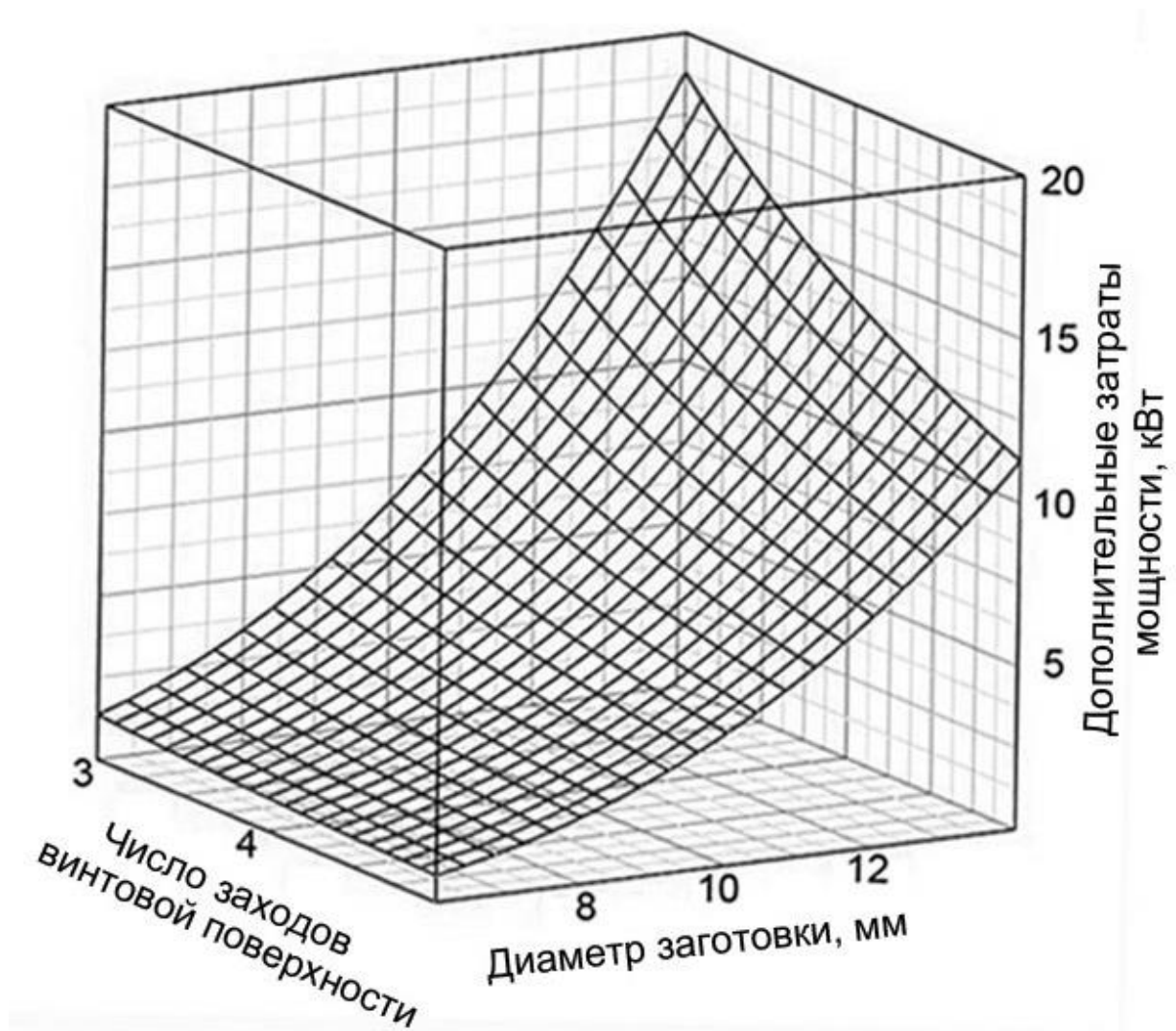


Рисунок 2.13 – Зависимость необходимой для волочения с последующим скручиванием дополнительной мощности от числа заходов винтовой поверхности и диаметра заготовки

Из полученных данных видно, что даже при относительно небольших скоростях волочения дополнительные затраты мощности (ΔN) в абсолютных значениях колеблются в пределах от 1 до 20 кВт. Дополнительные затраты мощности в удельных значениях (кВт ч/т) можно найти по следующим зависимостям [106]:

$$e = \frac{\Delta N \cdot t}{3600 \cdot G} , \quad (2.70)$$

где e – удельные затраты энергии; t – время волочения; G – масса заготовки.

Используя технологические параметры, применительно к волочению в условиях АО “ЕВРАЗ ЗСМК”, определим удельные затраты энергии. Полученные результаты приведены на рисунке 2.14.

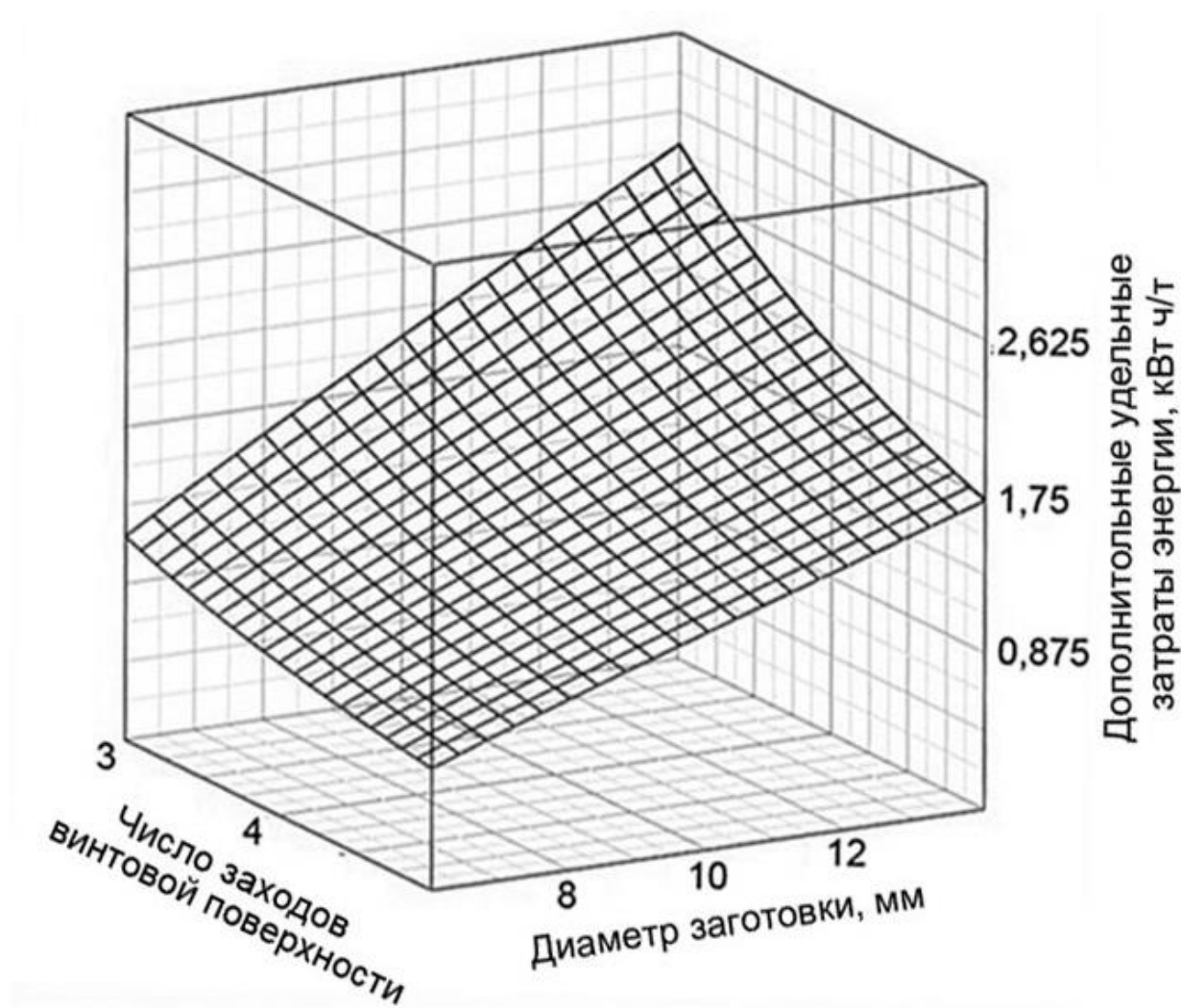


Рисунок 2.14 - Зависимость дополнительных удельных затрат энергии, необходимой для волочения с последующим скручиванием от числа заходов винтовой поверхности и диаметра заготовки

Из рисунков 2.13 и 2.14 видно, что при волочении с последующим скручиванием на небольших скоростях требуются большие затраты дополнительной энергии, увеличивающиеся с увеличением диаметра заготовки. При диаметрах заготовки 14 мм и более дополнительные затраты энергии стано-

вятся 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 увеличению дополнительной мощности, с другой усложняет привод механизма скручивания, который должен обеспечить высокую частоту вращения.

Так, для рассмотренных в примере условий (скорость волочения 1,5 м/с), частота вращения инструмента составляет 1200 об/мин.

Проведенный анализ энергозатрат при получении винтовых профилей волочением с последующим скручиванием и предлагаемым в диссертации способом убедительно доказал преимущества предлагаемого способа, который позволяет снизить энергозатраты в зависимости от диаметра профиля и числа заходов винтовой поверхности от 20 до 50%. Такая особенность новой технологии получения винтовых профилей дает основание считать её энергоэффективной [107-109].

Выводы:

1. Сформулирована постановка и решены задачи по определению условий формирования винтовой поверхности при волочении по новой технологии, исключающей операцию скручивания.

2. Получены отсутствующие в литературе зависимости для определения условий осуществимости получения винтовой поверхности волочением по новой технологии.

3. Установлено, что наибольшее влияние на возможность осуществления процесса получения винтовых профилей оказывают угол установки роликов относительно оси заготовки и отношения диаметра заготовки к диаметру роликов, которое не должно превышать 0,5...0,6.

4. Доказана энергоэффективность волочения винтовых профилей по новой технологии без операции скручивания. Получены зависимости для

оценки энергопотребления предлагаемого способа получения винтовых профилей волочением.

5. Установлено, что при формировании винтовой поверхности волочением без операции скручивания возможно снижение энергозатрат в 1,5 – 2 раза.

3 Обсуждение и анализ результатов исследования энергоэффективной технологии получения винтовых профилей волочением без операции скручивания

3.1 Изучение влияния параметров инструмента и условий формоизменения на шаг винтовой поверхности профиля, полученного волочением без операции скручивания

3.1.1 Материал для исследования

Материалом исследования являлась катанка из стали марки Ст3пс, химический состав которой, в сравнении с требованиями ГОСТ 380-2005 [110], приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Химический состав стали марки Ст3пс

	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	N
плавочный	0,191	0,101	0,542	0,022	0,015	0,027	0,041	0,0016
требования ГОСТ 380	0,14-0,22	0,05-0,15	0,40-0,65	≤0,050	≤0,040	≤0,030	≤0,030	≤0,010

Получен исходный материал следующим образом. Слитки конвертерной стали в обжимном цехе прокатывались по технологии: нагрев слитков до температур ~1240-1300°C → прокатка блюмов сечением 350×350 мм → прокатка заготовок сечением 100×100 мм.

Производство катанки диаметром 6,5 мм в линии непрерывного проволочного стана 250-1 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» вели по технологии: нагрев заготовки сечением 100×100 мм до температур 1180-1200°C → прокатка круга диаметром 6,5 мм → смотка раскатов в бунты массой 850 кг после ускоренного охлаждения до среднемассовых температур 820-840°C.

Для нанесения многозаходного винтового профиля использовали предварительно очищенные от окалины заготовки диаметром 6,5 мм из стали

СтЗпс длиной 1500 мм. Такая длина заготовки позволила обеспечить устойчивость процесса волочения на заданных режимах.

3.1.2 Методика экспериментального изучения влияния параметров инструмента и условий формоизменения на шаг винтового профиля при волочении без операции скручивания

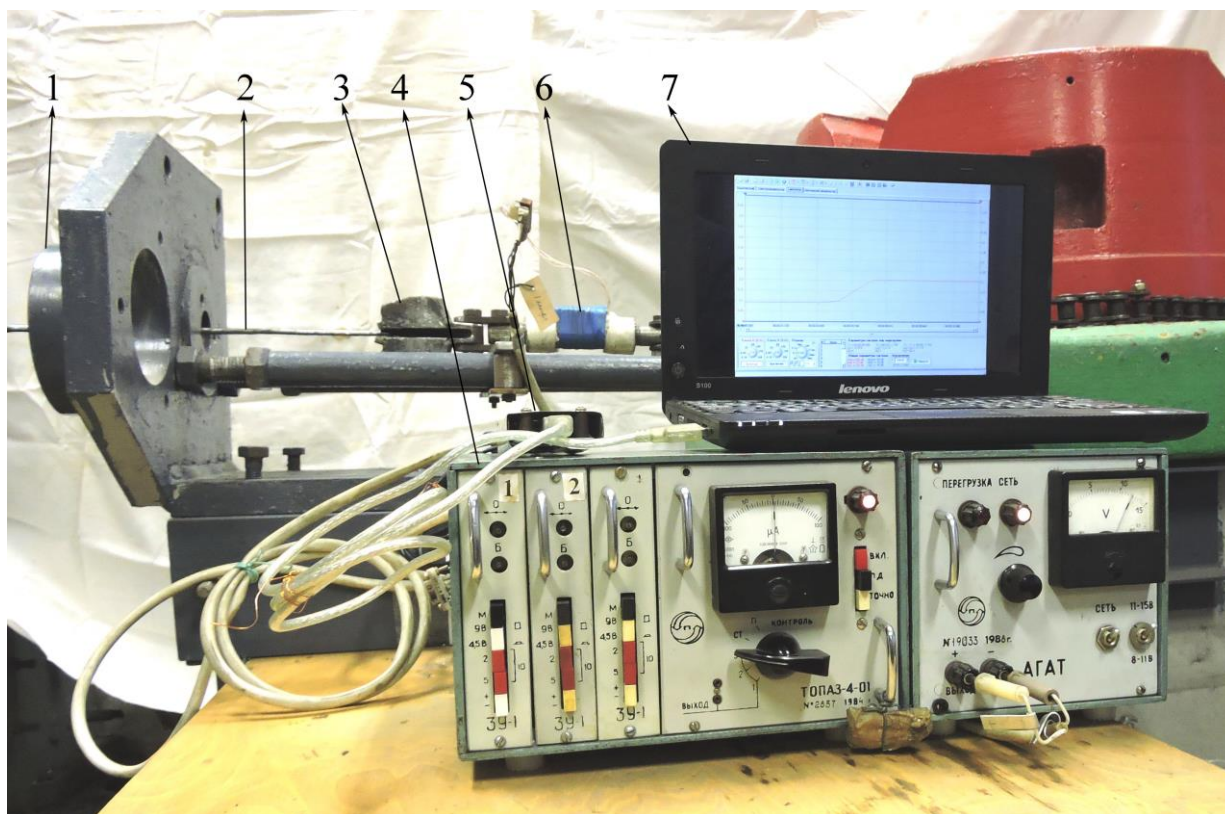
Лабораторные эксперименты по изучению влияния условий деформирования на изменение геометрических параметров заготовки при получении многозаходных винтовых профилей по новой технологии, а также энергосиловые параметры при формоизменении исследовались с использованием промышленного однократного волочильного стана 600 (см. рисунок 3.1). Волочильный стан дополнительно оборудован приспособлениями для установки волок, формирующих винтовой профиль и системой записи энергосиловых параметров (рисунок 3.2). В привод волочильного стана добавлен планетарный редуктор с целью снижения скорости волочения до значений, удобных при проведении экспериментов.



Рисунок 3.1 – Волочильный однократный стан 600

Технические характеристики волочильного стана, на котором проводилась экспериментальная часть работы:

- диаметр барабана – 600 мм;
- скорости волочения – 0,828 м/мин.; 1,182 м/мин.; 1,644 м/мин; 2,280 м/мин;
- диаметр проволоки – от 2 до 9 мм



1 – волока; 2 – проволока; 3 – клещи; 4 – усилитель; 5 – самописец ВМ8020;
6 – мездоза; 7 – нетбук

Рисунок 3.2 - Установка для снятия характеристик процесса волочения
винтовых профилей без скручивания

Для проведения исследований разработана и создана принципиально новая конструкция самовращающейся волоки, формирующей многозаходную винтовую поверхность, защищенная патентом [111]. Разработанная конструкция волоки показана на рисунках 3.3, 3.4.

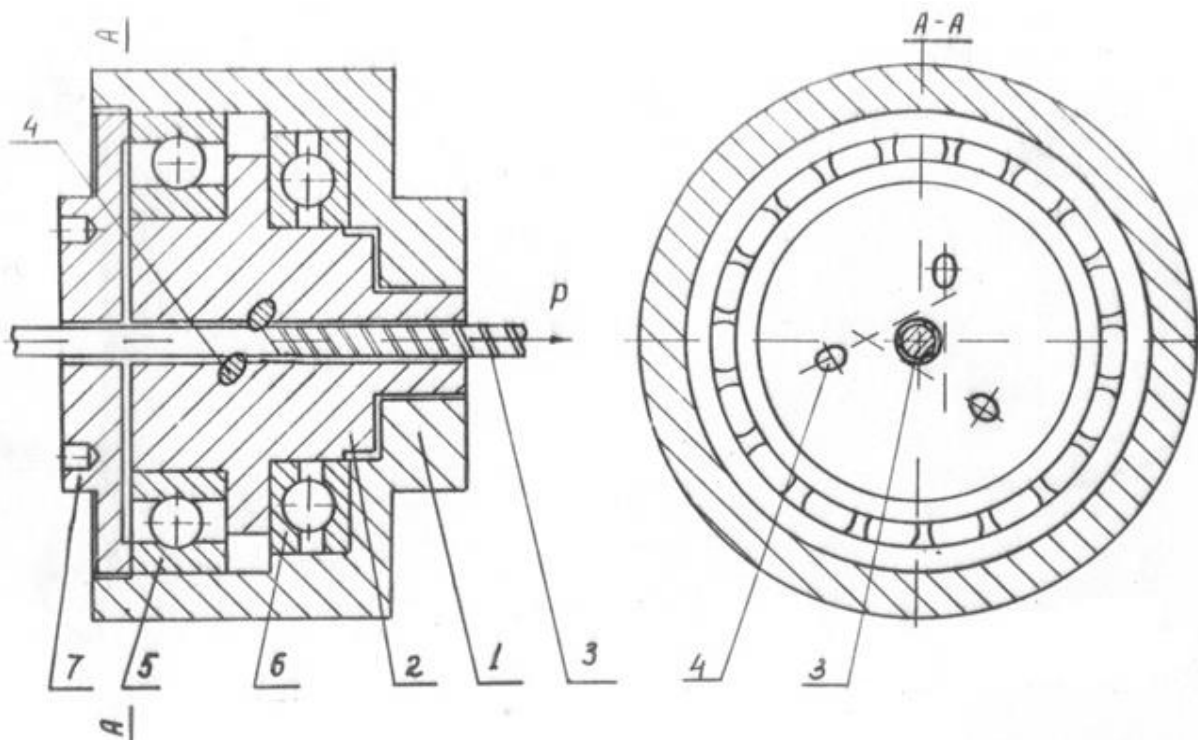
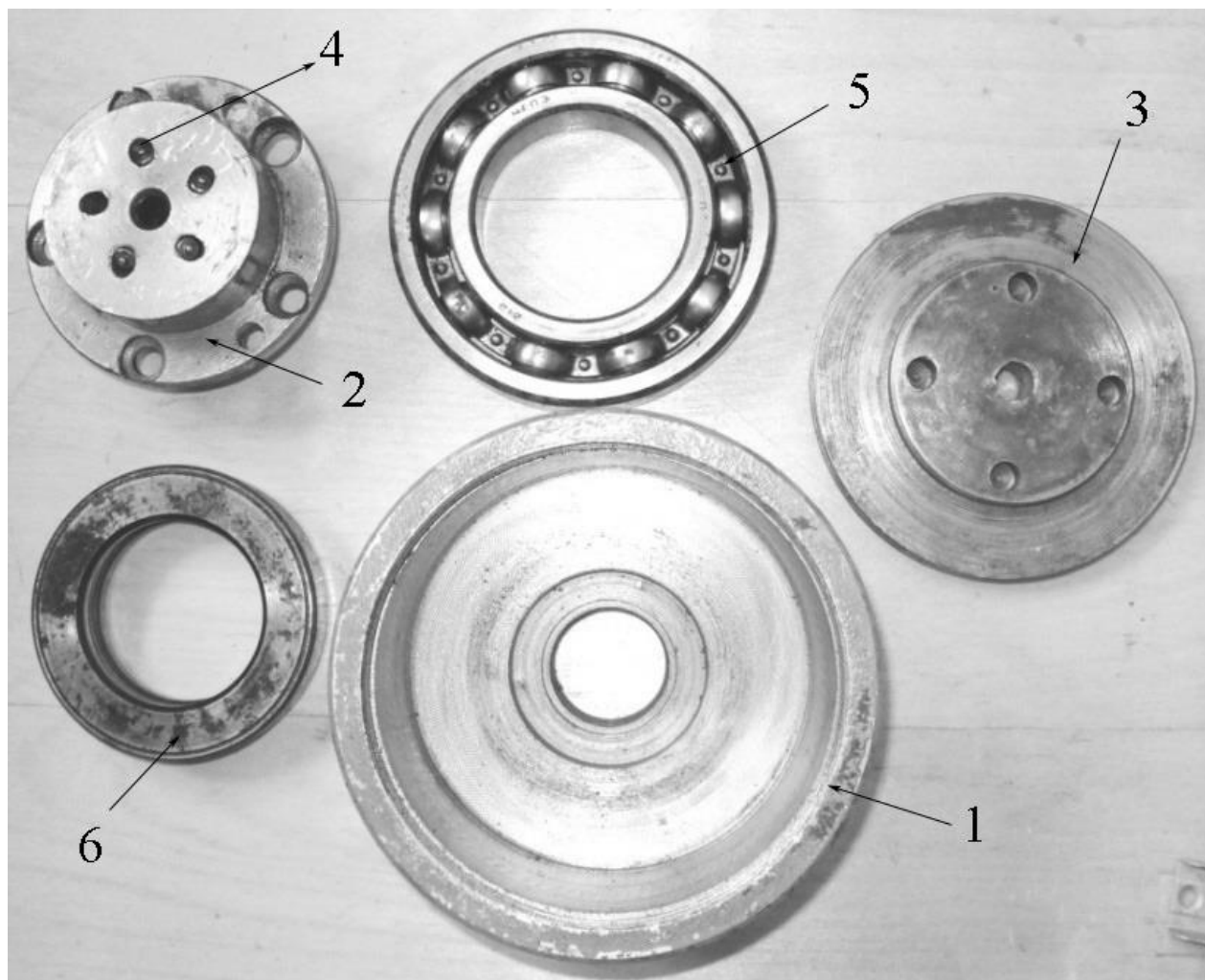


Рисунок 3.3 – Чертеж разработанной конструкции волоки для получения винтовых профилей

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 φ к оси заготовки 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 винтовой поверхности в разработанной конструкции волоки реализуется следующим образом. Под действием продольной силы приложенной к заготовке 3, благодаря расположению роликов под углом φ создается крутящий момент, вращающий тело волоки 2, установленное в подшипниках 5 и 6. При этом ролики 4, помещенные в тело волоки, обкатывают заготовку 3 (рисунок 3.5). Совместное воздействие поступательного и вращательного движений при протягивании заготовки образует на ней вин-

товой профиль с определенным шагом. Количество роликов может меняться, определяя число заходов винтового профиля.



1- корпус волокни; 2 – тело волокни; 3 – крышка; 4 – деформирующий ролик;
5 – радиальный подшипник; 6 – упорный подшипник

Рисунок 3.4 – Детали разработанной конструкции волокни для
получения винтовых профилей

Для проверки разработанной математической модели, установления влияния параметров инструмента, условий деформирования на формирование винтового профиля были проведены серии экспериментов на натуральных образцах из стали марки СтЗпс диаметром 6,5 мм на промышленном волоочильном стане 600 (рисунок 3.2) с использованием разработанной конструкции волокни (рисунок 3.3). Как показали аналитические исследования новой

технологии получения винтовых профилей, основное влияние на формирование винтовой поверхности оказывают такие факторы как число заходов винтовой поверхности, диаметр деформирующих роликов и угол их расположения относительно оси заготовки, величина обжатия. Для изучения перечисленных выше факторов были изготовлены разные сменные части волоки (2). Как показали предварительные эксперименты, получение однозаходного и двухзаходного профиля сопряжено с большими сложностями, связанными с удержанием профиля относительно оси волоки. Поэтому пришли к выводу, что целесообразней получение трехзаходного винтового профиля, где проблема центрирования заготовки относительно оси волоки отсутствует. Исходя из полученного опыта, для исследования были выбраны 3, 4, 5 заходные винтовые профили. Получение винтовой поверхности с числом заходов больше 5 существенно усложняет конструкцию тела волоки 2 и возможно при получении винтовых профилей диаметром более 12 мм. При исследовании влияния диаметра роликов на формирование винтового профиля использовали диаметры 6, 8, 10, 11 мм. Выбор диаметров роликов обусловлен диаметром заготовки, удобством монтажа, возможностью использования отработанных волок в качестве деформирующих роликов. Согласно данным, приведенным на рисунках 2.6, 2.7, увеличение отношения диаметра ролика к диаметру заготовки уменьшает область осуществимости процесса. Для используемых в экспериментах заготовок диаметром 6,5 мм предельное значение диаметра ролика составляет 13 мм. Исходя из этого, верхний предел диаметра ролика приняли 11 мм, что соответствует наружному диаметру победитовых волок с участка тонкого волочения СПрП АО «ЕВРАЗ ЗСМК» и позволяет использовать их вторично, в качестве деформирующих роликов при получении винтовых профилей. Меньшие размеры роликов (6 мм, 8 мм, 10 мм) принимали, исходя из размерного ряда роликов игольчатых подшипников, используемых в экспериментах и производимых прутков из победита.

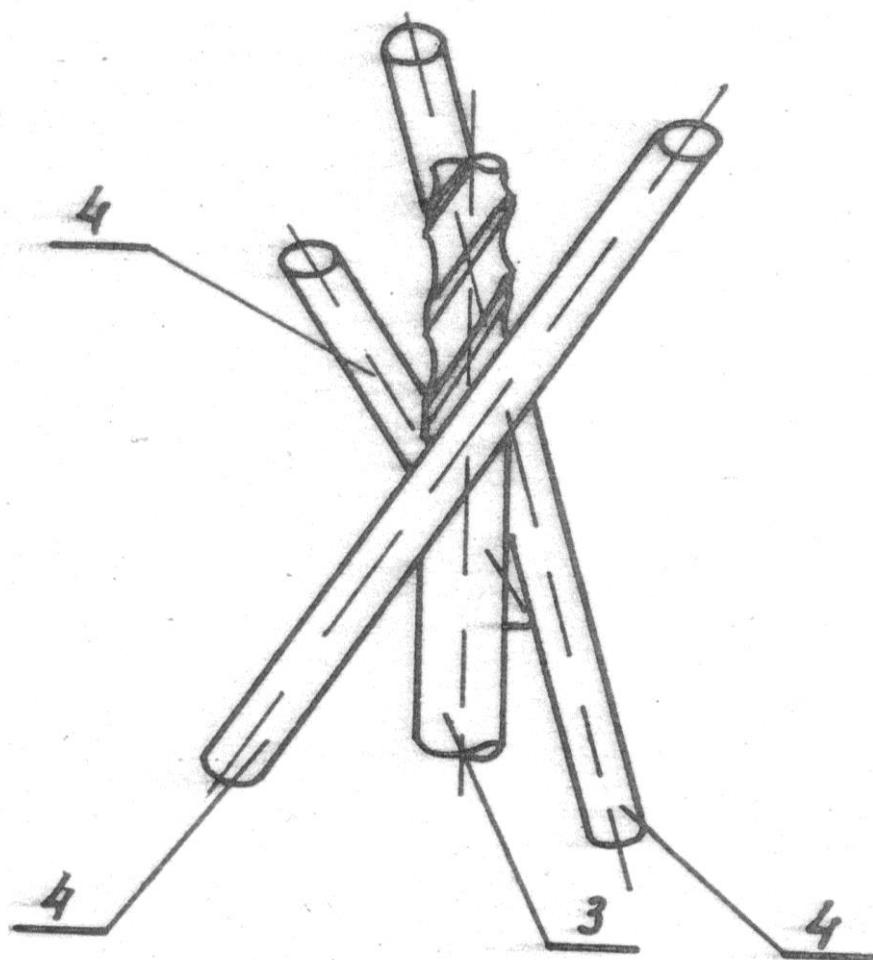


Рисунок 3.5 – Формирование роликами винтовой поверхности

Углы наклона роликов 45° , 50° , 55° , 60° были приняты, исходя из соображений получения винтовых профилей с небольшим шагом, согласно данным приведенным на рисунке 2.9 и руководствуясь графиком осуществимости (рисунок 2.6) для заготовки диаметром 6,5 мм.

Величина обжатия 0,5; 0,42; 0,35; 0,25 принималась, исходя из глубины впадин, получаемых на арматуре Вр-1 по ГОСТ 6727-80 и руководствуясь соображениями увеличения активной площади сцепления арматуры с бетоном.

Некоторые корпуса с роликами, использованные в экспериментах, показаны на рисунке 3.6.

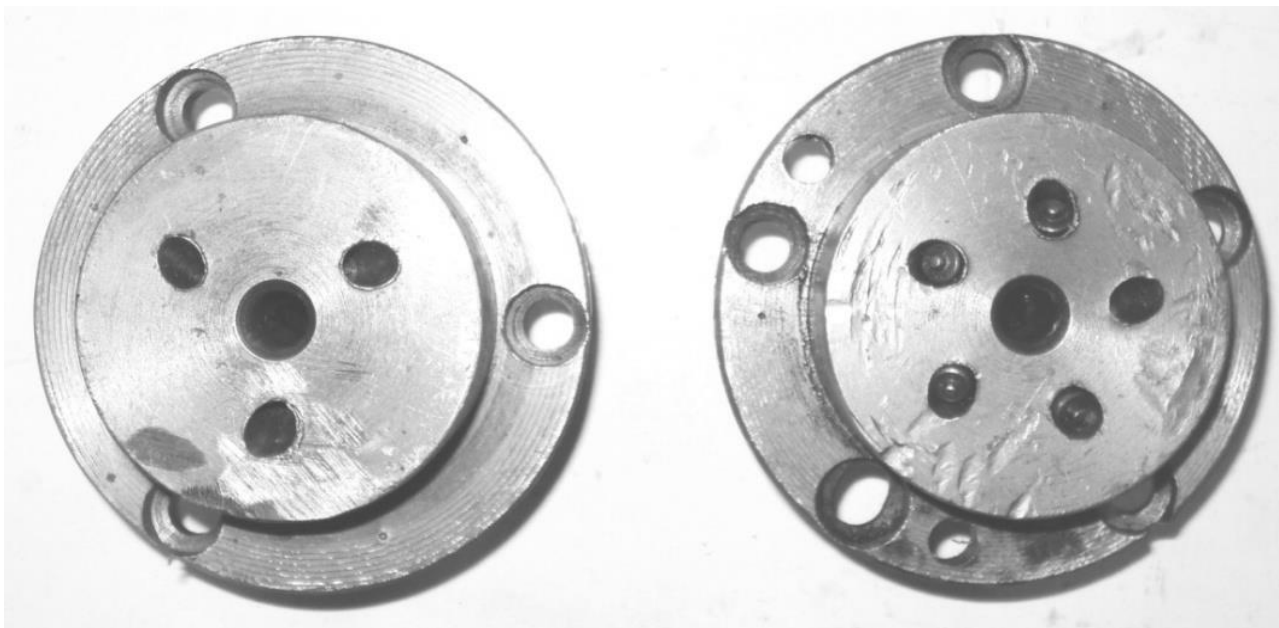


Рисунок 3.6 – Корпуса с роликами, используемые в экспериментах

Экспериментальная часть работы по определению геометрических и энергосиловых параметров при формировании винтовых профилей проводилась в условиях идентичных промышленному производству. Такое заключение позволяет сделать использование промышленного волочильного стана и натуральных образцов для экспериментов.

В лабораторных опытах получение винтовых профилей проводилось с использованием смазки. При волочении черных металлов в монолитных волокнах для обеспечения условий гидродинамического трения обычно используется мыльный порошок, а при волочении цветных металлов используется масло. При волочении в роликовых волокнах, где имеет место трение скольжения, хорошо себя зарекомендовало в качестве смазки масло. Использование масла в роликовых волокнах не только снижает трение в очаге деформации, но и смазывает вращающиеся детали. Разработанная конструкция волокна относится к роликовым волокнам, при формировании винтового профиля в которой имеет место трение скольжения. Соответственно при формировании винтового профиля в качестве смазки лучше всего использовать масло, кото-

рое обеспечивает условие трения скольжения в месте деформирования заготовки, а также способствует вращению рабочих роликов в гнездах корпуса волоки при волочении. Исходя из вышеизложенного, в экспериментах в качестве смазки использовали масло.

При проведении экспериментальных исследований важно правильно оценить число параллельных (дублирующих) опытов. Недостаточное число опытов может привести к неверной трактовке полученных результатов, выдвижению ошибочных гипотез. Переизбыток параллельных опытов приводит к увеличению времени на проведение исследований и необоснованному расходованию средств.

Число параллельных опытов зависит от выбранной вероятностной модели, воспроизводимости результатов, точности используемых приборов и методик. Для оценки необходимого числа параллельных опытов при изучении влияния параметров инструмента и условий формоизменения на шаг винтовой поверхности воспользовались опытными данными, полученными при формировании трехзаходного винтового профиля на заготовке диаметром 6,5 мм роликами диаметром 6 мм, установленными под углом 45^0 к оси заготовки. Данные для расчетов достаточного числа параллельных опытов приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Экспериментальные результаты по определению шага винтовой поверхности

Номер опыта	1	2	3	4	5
Шаг винтовой поверхности, t мм	15,1	15,5	14,8	15	14,7

Величина дисперсии полученных результатов

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{n-1} = 0,018. \quad (3.1)$$

где \bar{y} – среднее арифметическое значение величины; y_i – результаты отдельных измерений; n – количество измерений.

Точность величины математического ожидания δ определяли по формуле:

$$\delta = k_{\alpha,f} \sqrt{\frac{D}{n}}, \quad (3.2)$$

где $k_{\alpha,f}$ – квантиль распределения Стьюдента, зависящий от уровня значимости α и числа степеней свободы f (при $\alpha=0,05$ и $f=5-1=4$ $k_{\alpha,f}=2,78$).

$$\delta = 2,78 \sqrt{\frac{0,018}{5}} = 0,167$$

Минимальное необходимое число параллельных опытов при уровне значимости 0,05 определяли по формуле:

$$N_0 = t_{\alpha} \frac{D}{\delta^2} = 1,96 \frac{0,018}{0,167^2} = 1,4 \approx 2, \quad (3.3)$$

где t_{α} – корень уравнения нормированной функции Лапласа, которая показывает, какова вероятность того, что случайная величина примет значения, принадлежащие заданному интервалу (при уровне значимости $\alpha=0,05$ $t_{\alpha}=1,96$).

Расчеты показали, что минимальное количество параллельных опытов должно быть не менее двух. Для гарантированного получения объективных достоверных данных примем число параллельных опытов равным пяти.

Полученные экспериментальные данные статистически обрабатывались. При расчете ошибок измеряемых величин, полученных в работе, исходили из предположения, что ошибки измерений случайные и распределены по нормальному закону. Для этого случая среднее арифметическое из серии в n измерений является наиболее вероятным значением измеряемой величины:

$$\bar{y} = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} = \frac{\sum_1^n y_i}{n}, \quad (3.4)$$

Для оценки величины случайной ошибки измерения наиболее распространена оценка с помощью среднеквадратичной ошибки по формуле [112]:

$$S_n = \sqrt{\frac{(\bar{y} - y_1)^2 + (\bar{y} - y_2)^2 + \dots + (\bar{y} - y_n)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\bar{y} - y_i)^2}{n-1}}, \quad (3.5)$$

Кроме среднеквадратичной ошибки определяли доверительный интервал (Δ) при доверительной вероятности 0,95 по формуле:

$$\Delta = \pm \frac{tS_n}{\sqrt{n}}, \quad (3.6)$$

где t – критерий Стьюдента.

Адекватность разработанных математических моделей экспериментальным данным оценивалась по величине средней ошибки приближения (ошибки аппроксимации) по формуле [113]:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} 100\%, \quad (3.7)$$

где \hat{y}_i – теоретическое значение для I серии опытов.

3.1.3 Обсуждение результатов по изучению влияния параметров инструмента и условий формирования на шаг винтовой поверхности при волочении без операции скручивания

Экспериментальные исследования влияния параметров инструмента и условий формоизменения на величину шага винтовой поверхности проводили с использованием опытно-промышленной установки описанной выше (рисунок 3.2). В качестве образцов использовали предварительно подвергнутой волочению стальную проволоку диаметром 6,5 мм, полученную в усло-

виях метизного производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК». После волочения и получения винтового профиля мерительным инструментом определяли ход винтовой поверхности (X). Под ходом винтовой поверхности понимается расстояние между средними точками одноименных витков, замеренное в осевой плоскости. Используя величину хода с учетом количества заходов (n) винтовой поверхности находили шаг ($Ш$) по формуле [114]:

$$Ш = \frac{X}{n}, \quad (3.8)$$

Как следует из формулы (3.8), чем больше количество заходов винтовой поверхности, тем меньше шаг. При количестве заходов, равном единице, ход винтовой поверхности и шаг совпадают. Зная величины хода и шага винтовой поверхности, а также скорость волочения, можно определить частоту вращения рабочего элемента волокна, что представляет практический интерес для проектирования оборудования и выбора скоростных режимов волочения [115-117].

На рисунке 3.7 приведены результаты исследования влияния угла наклона роликов на величину шага винтовой поверхности и частоту вращения рабочего элемента волокна.

В экспериментах использована стальная проволока диаметром 6,5 мм, обжатие одним роликом 0,5 мм, углы наклона роликов к оси заготовки 45^0 , 50^0 , 55^0 , 60^0 . Для проверки достоверности полученных математических зависимостей, используя условия при которых проводились эксперименты, были определены расчетные значения шага винтовой поверхности. Полученные результаты приведены на рисунке 3.7. Как следует из полученных результатов, увеличение угла наклона рабочих роликов уменьшает шаг винтовой поверхности, что можно объяснить изменением соотношения сил. Величина силы, создающая крутящий момент (P_4), увеличивается, что позволяет обеспечить большую работу по формированию винтовой поверхности и следовательно получить меньший шаг. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений показывает небольшое расхождение результатов, не превышающее 8%.

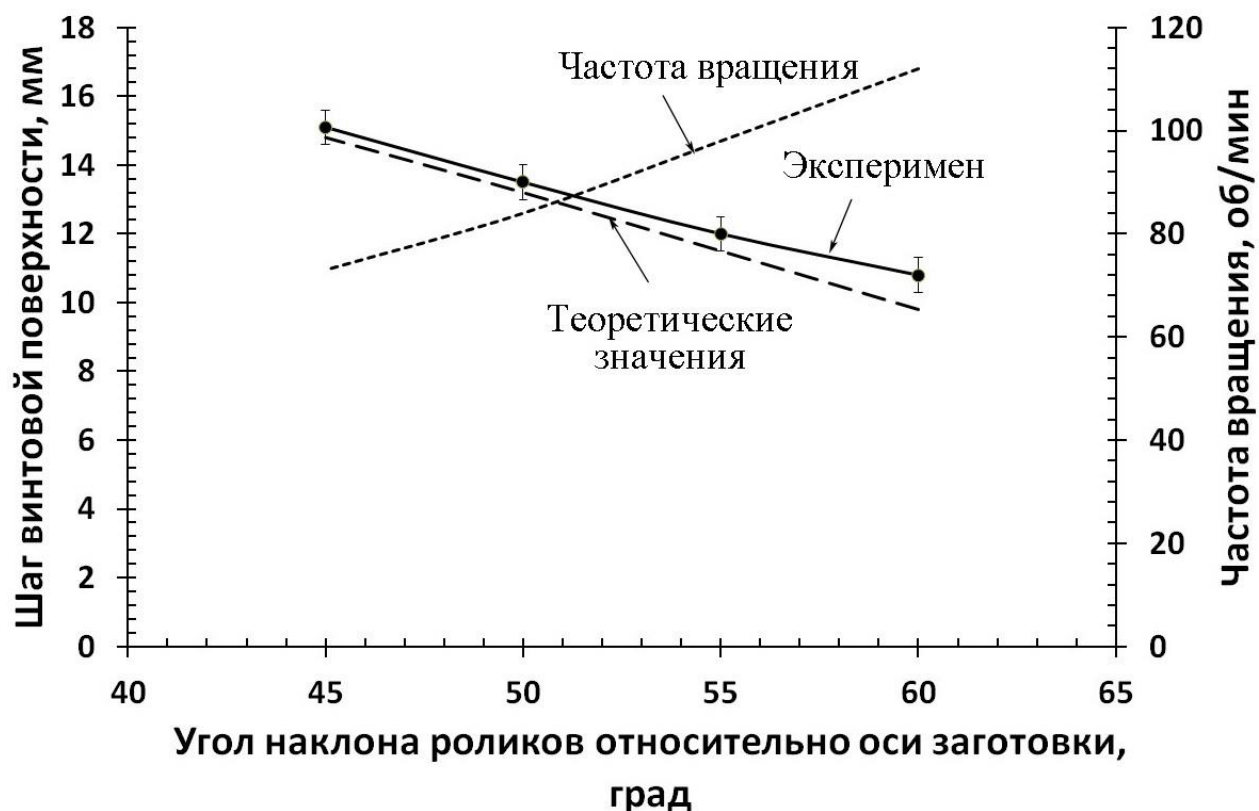


Рисунок 3.7 – Влияние наклона роликов к оси заготовки на шаг винтовой поверхности и частоту вращения рабочей части волоки

Еще одна характеристика, приведенная на рисунке 3.7, это частота вращения, которая обратно пропорциональна шагу винтовой поверхности. При одинаковом количестве роликов, согласно формуле 3.8 шаг в n раз меньше хода винтовой поверхности, а чем меньше ход, тем больше частота вращения при постоянной скорости волочения. Данный факт необходимо учитывать для выбора подшипников при проектировании волоки, формирующей винтовой профиль.

На рисунке 3.8 приведены экспериментальные и теоретические результаты по влиянию числа заходов винтовой поверхности на шаг при прокатке проволоки диаметром 6,5 мм с обжатием роликом 0,5 мм, угол наклона роликов 50^0 . Полученные после волочения образцы с пяти и трехзаходной винтовой поверхностью приведены на рисунке 3.9. Как показали эксперименты,

увеличение числа заходов винтовой поверхности приводит к незначительному увеличению хода в рассматриваемом интервале на 4% и уменьшению частоты вращения рабочей части волокна. Однако, несмотря на увеличение хода, шаг винтовой поверхности с увеличением числа заходов уменьшается. В исследуемом диапазоне с увеличением числа заходов с 3 до 5 шаг винтовой поверхности уменьшилась в 1,54 раза. Такое положение связано, как следует из формулы 3.8, с тем, что увеличение числа заходов винтовой поверхности приводит к уменьшению шага. Сопоставление расчетных значений с экспериментальными показывает хорошую сходимость результатов с ошибкой не превышающей 10%.

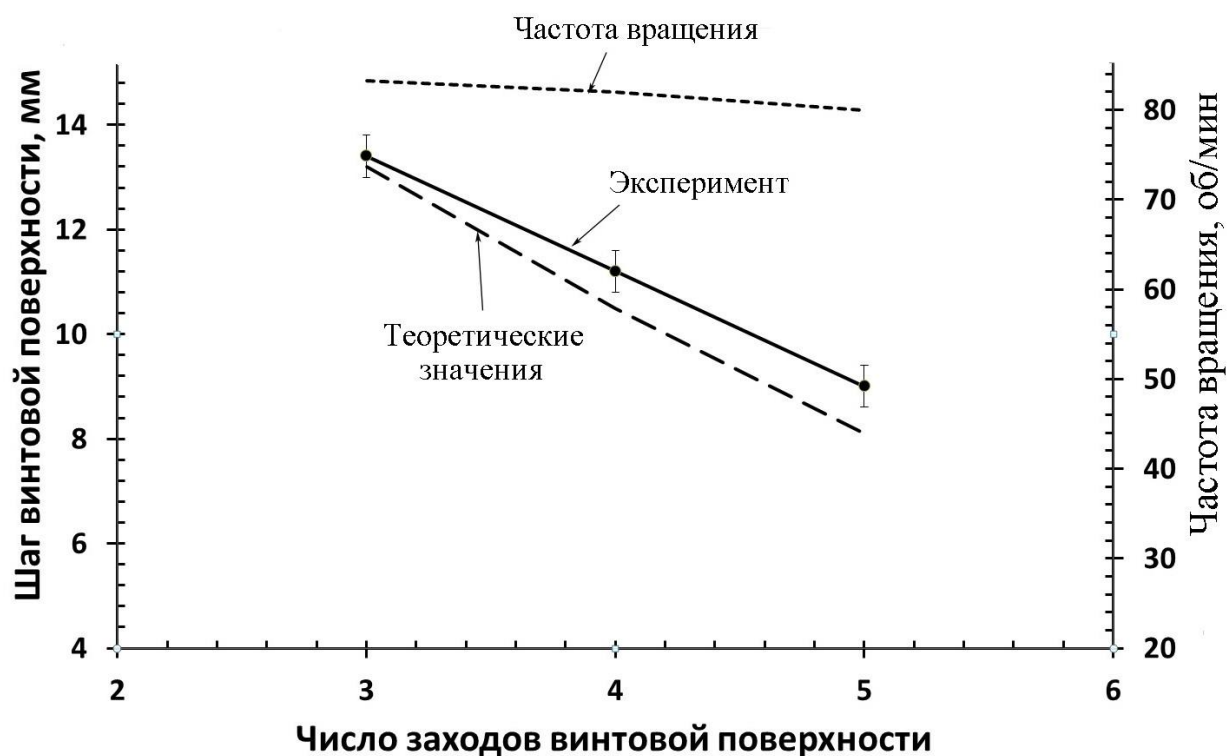


Рисунок 3.8 – Влияние числа заходов винтовой поверхности на шаг и частоту вращения рабочей части волокна

Еще одним фактором, оказывающим влияние на шаг винтовой поверхности, является величина обжатия роликом. Количественные результаты исследования влияния величины обжатия на шаг винтовой поверхности приве-

дены на рисунке 3.10. В эксперименте использовали заготовку диаметром 6,5 мм, на которой наносили трехзаходный профиль роликом диаметром 6 мм при обжати 0,5; 0,42; 0,35; 0,25. Согласно полученным данным, увеличение обжатия приводит к уменьшению шага винтовой поверхности и, как следствие, к увеличению частоты вращения тела волокна. С увеличением обжатия от 0,25 до 0,5 мм шаг винтового профиля уменьшился в 1,32 раза.



а



б

Рисунок 3.9 – Образцы с разным числом заходов винтовой поверхности
а – с пятизаходной винтовой поверхностью; б – с трехзаходной винтовой поверхностью

Данное обстоятельство можно объяснить тем, что с увеличением обжатия увеличивается составляющая P_4 , создающая момент вращения рабочей части тела волокна относительно оси заготовки. Увеличение P_4 позволяет обеспечить большую работу по формированию винтовых канавок и соответственно меньший шаг, большую частоту вращения рабочей части тела волокна. Сопоставление экспериментальных и теоретических данных показывает расхождение результатов не превышающее 9%.

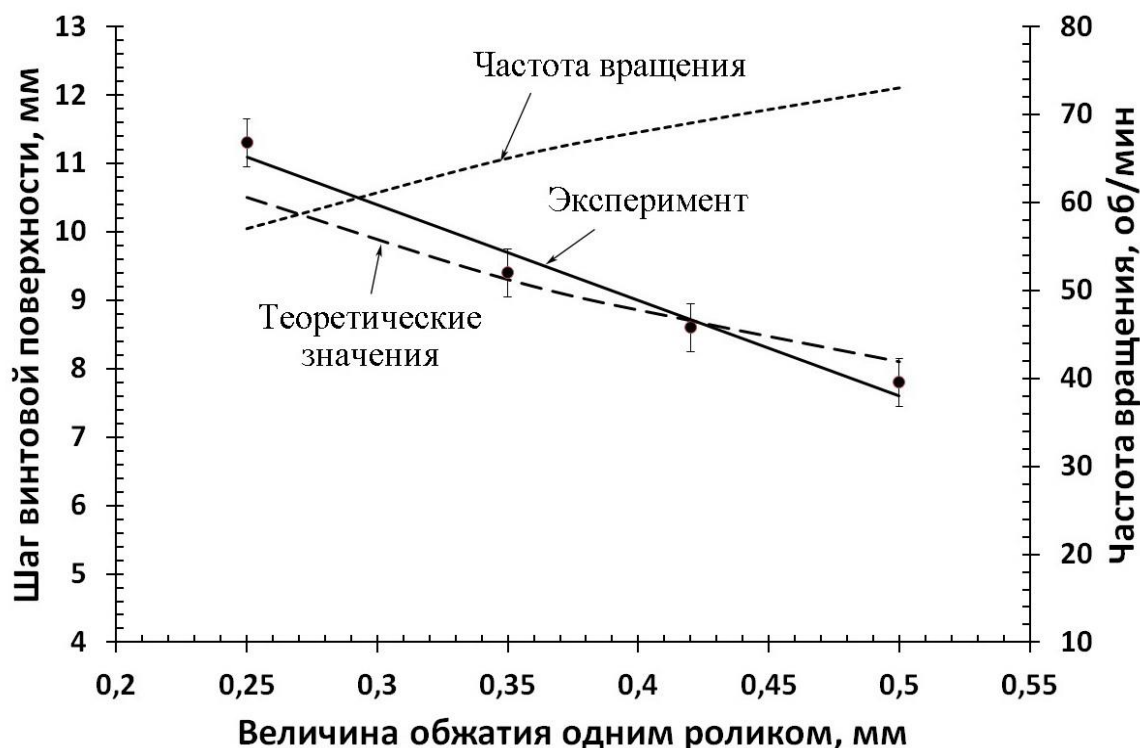


Рисунок 3.10 – Влияние величины обжатия на шаг винтовой поверхности и частоту вращения рабочего элемента волокна

В диссертации изучено влияние диаметра рабочих роликов на величину шага винтовой поверхности и частоту вращения рабочей части тела волокна. Исследования проводили на образцах диаметром 6,5 мм, на которых наносилась трехзаходная винтовая поверхность. Величина обжатия постоянная и равная 0,5 мм. Ролики использовали диаметром 6, 8, 10 мм (из термообработанной стали ШХ15), 11 мм (из победита ВК6).

Как следует из полученных данных (рисунок 3.11), увеличение диаметра деформирующих роликов приводит к увеличению шага винтовой поверхности. В рассматриваемых условиях с увеличением диаметра с 6 до 11 мм шаг винтовой поверхности увеличился на 38%. Такие же результаты показали и расчетные значения. Сравнение теоретических значений шага винтовой поверхности с экспериментальными значениями показали хорошую сходимость результатов, ошибка не превысила 10%.

Изучение влияния конструктивных особенностей устройств для формирования винтовой поверхности, величины деформации позволило выявить закономерности изменения шага винтовой поверхности и частоты вращения тела волокна. Наиболее существенное влияние на шаг винтовой поверхности оказывает угол, под которым расположены ролики к оси заготовки [118-119]. 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 результатов, что позволяет рекомендовать полученную математическую модель для расчета шага винтовой поверхности и выбора скоростных режимов волочения [120-121].

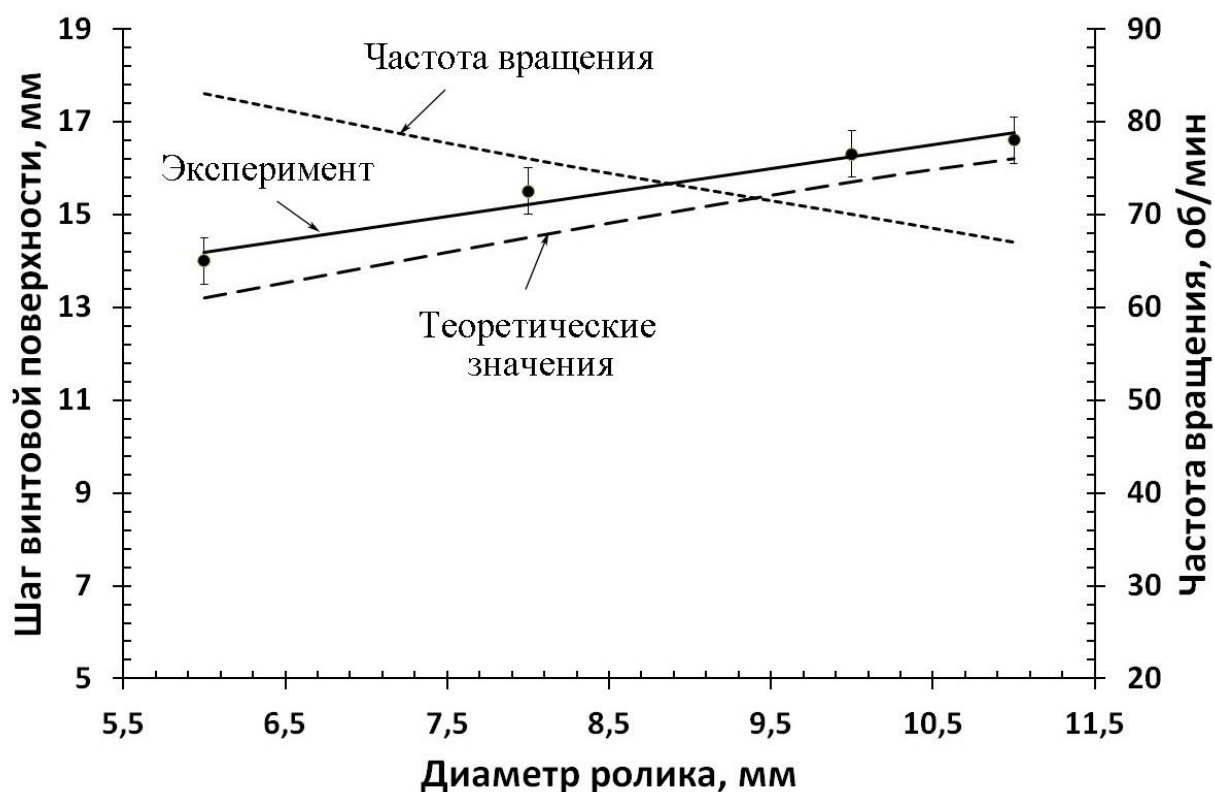


Рисунок 3.11 – Влияние диаметра ролика на шаг винтовой поверхности и частоту вращения рабочего элемента волокна

3.2 Факторы влияния на усилие волочения при формировании винтовых профилей без операции скручивания

3.2.1 Методика исследования силовых параметров при получении винтовых профилей волочением без операции скручивания

Эксперименты проводили на опытно-промышленном стане 600, приведенном на рисунках 3.1, 3.2. Для изучения силовых параметров при волочении винтовых профилей затяжные клещи были оборудованы месдозой. На поверхности месдозы наклеивались клеем БФ2, с последующей термообработкой, четыре проволочных тензометрических датчика сопротивлением 200 Ом с базой 30 мм, соединенные по мостовой схеме. Геометрические размеры месдозы определяли расчетным путем исходя из максимального усилия волочения 20 кН. Расчет проводили по формулам для кольцевых месдоз [122]:

$$d = \sqrt{D^2 - \frac{4P}{\pi[\sigma_T]}}; \quad (3.9)$$

$$h = 2,26 \sqrt{\frac{P}{\pi[\sigma_T]}} + l, \quad (3.10)$$

где h – высота месдозы; D – наружный диаметр кольцевой месдозы; d – внутренний диаметр кольцевой месдозы; P – максимальное расчетное усилие; $[\sigma_T]$ – допустимое значение предела текучести материала месдозы; l – база тензометрических датчиков.

Вид месдозы, подготовленной для исследований, приведен на рисунке 3.12. Затяжные клещи, оборудованные месдозой, показаны на рисунке 3.13.

Усилие волочения регистрировалось следующим образом. Сигнал с мостовой схемы месдозы передавался на трехканальный усилитель “Топаз”. Датчики и усилитель запитывали от стабилизированного источника питания “Агат”. Сигнал с усилителя поступал на аналогово-цифровой преобразова-

тель BM8020 (рисунок 3.14) имеющий режим двухканального самописца с возможностью записи на компьютер или ноутбук. Программа, прилагаемая к BM8020, позволяет хранить и обрабатывать информацию в электронном виде.

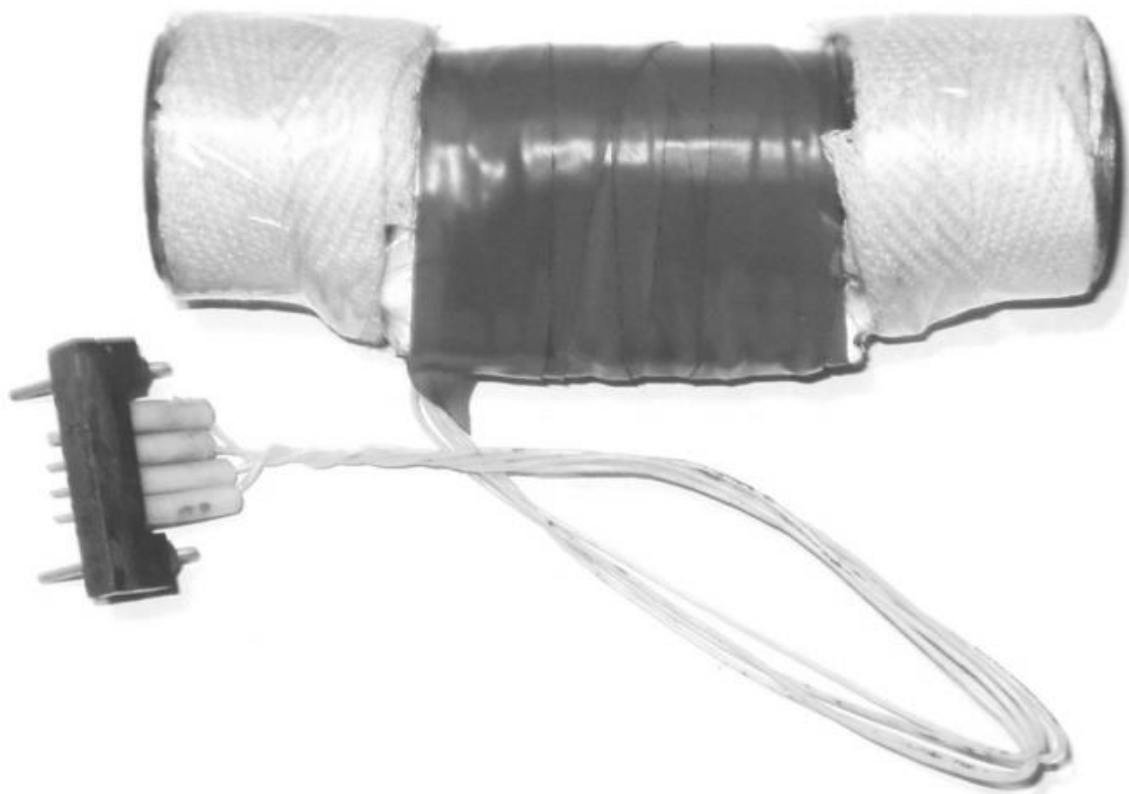


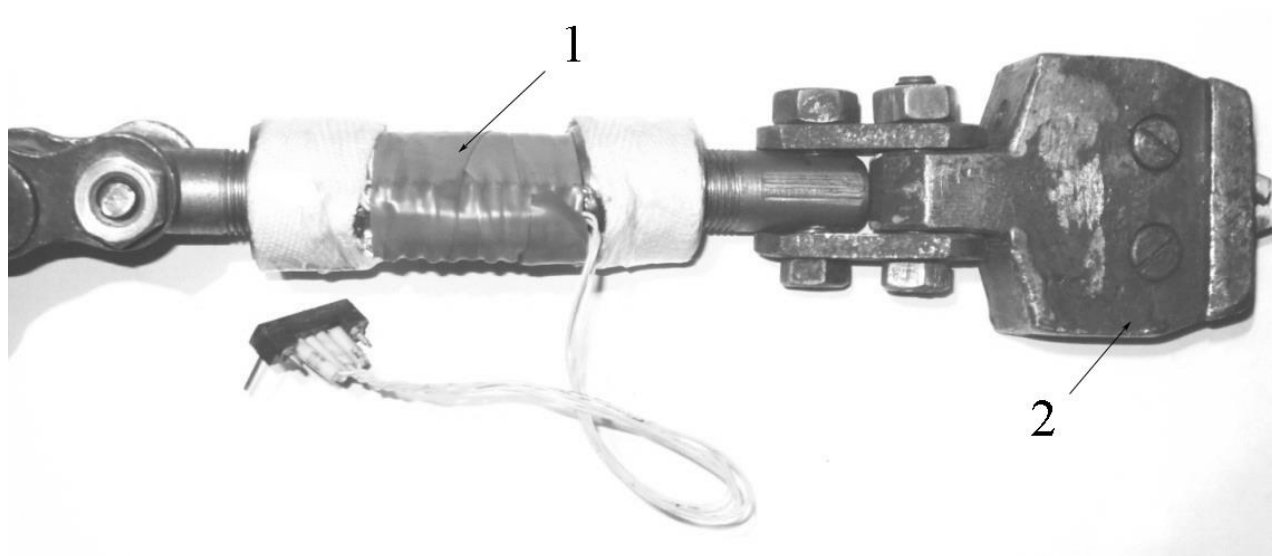
Рисунок 3.12 - Общий вид месдозы

Техническая характеристика BM8020 в режиме АЦП самописца:

- частота дискретизации 0,01 Гц – 200 кГц;
- максимальное время записи 24 часа;
- входное напряжение -20...+20 В (аппаратно 2 поддиапазона);
- разрядность аналого цифрового преобразователя (АЦП) 10 бит.

Перед проведением исследований месдоза и обслуживающие ее приборы тарировали на усилие до 12 кН. Тарировка проводилась на гидравлическом прессе (100 кН) с использованием реверсора и образцового динамомет-

ра ДОСМ-3 с расчетным усилием до 30 кН. Нагрузочная диаграмма приведена на рисунке 3.15.



1 – месдоза; 2 – затяжные клещи

Рисунок 3.13 - Затяжные клещи, оборудованные месдозой

В результате тарировки получена линейная зависимость со стабильным воспроизведением результатов, что говорит о работе месдозы в упругой об-

ласти и правильному подбору ее геометрических размеров. Вид полученной тарировочной зависимости в кН приведен ниже:

$$P_1 = 98,646 \cdot x - 0,0569 , \quad (3.11)$$

$$R^2=0,9996$$

где x – величина сигнала (в)

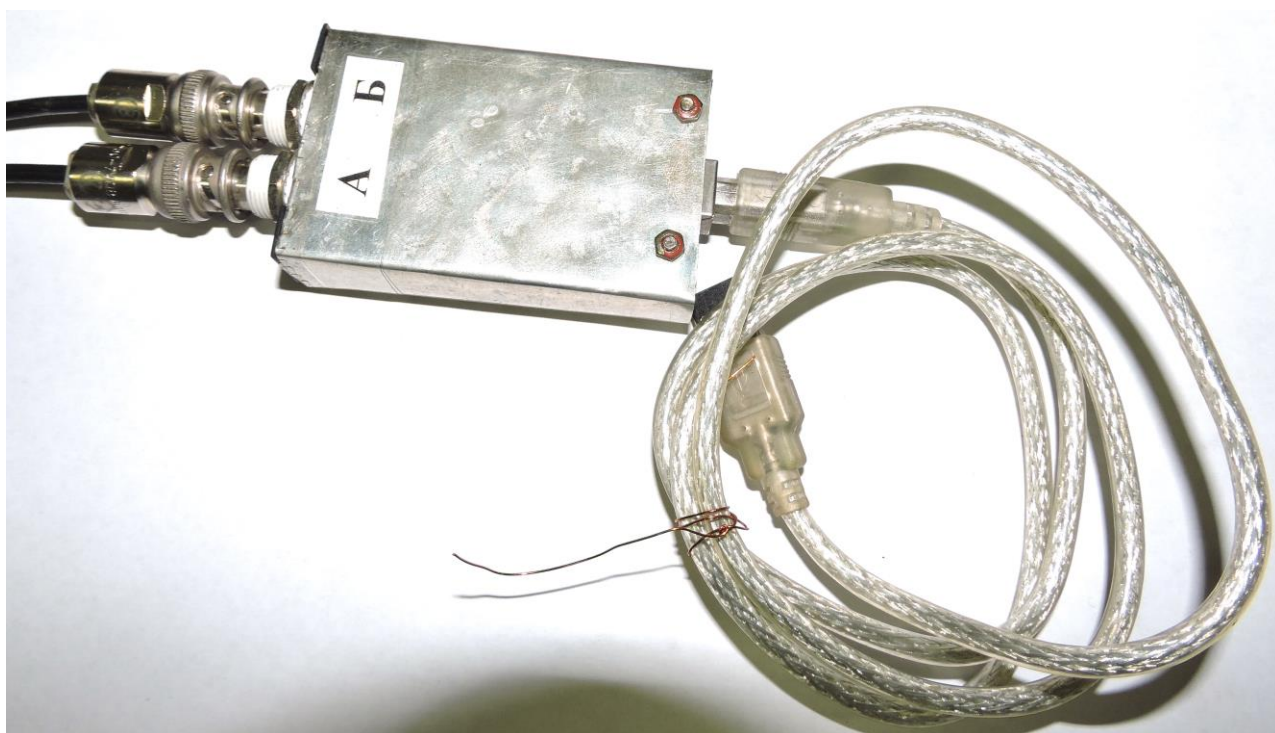


Рисунок 3.14 - Двухканальный АЦП самописец BM8020

При проведении экспериментальных исследований влияния различных факторов на усилие волочения при формировании винтовых профилей было принято решение проводить по 5 параллельных опытов на точку. Для оценки правильности такого решения воспользуемся результатами эксперимента приведенными в таблице 3.3 по определению усилия волочения при формировании трехзаходного винтового профиля. Методика расчетов описана ранее.

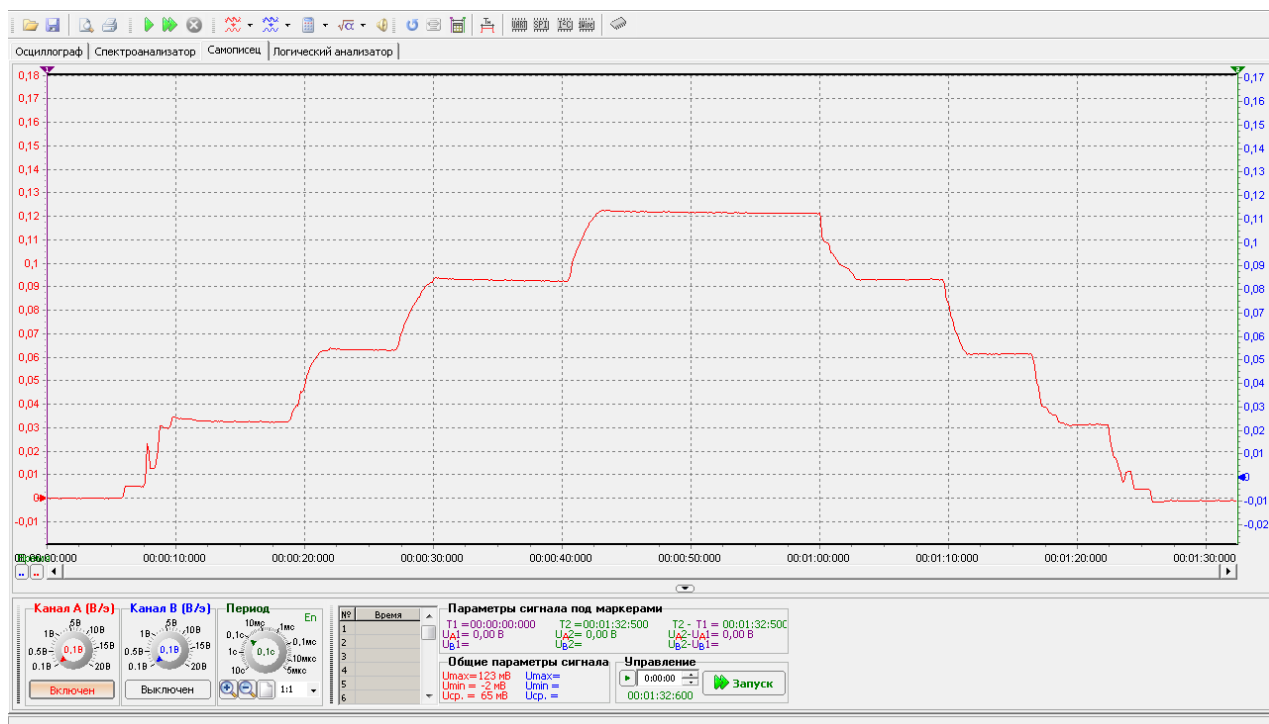


Рисунок 3.15 – Нагрузочная диаграмма

Таблица 3.3 - Экспериментальные результаты по определению усилия волочения

Номер опыта	1	2	3	4	5
Усилие волочения, кН	1,38	1,53	1,35	1,48	1,57

Величина дисперсии опытов

$D=0,009$.

Точность величины математического ожидания

$\delta=0,118$.

Минимальное необходимое число параллельных опытов

$N=1,3$.

Расчеты показали, что минимальное количество параллельных опытов должно быть два, следовательно пять параллельных опытов позволяют говорить об объективности и достоверности полученных экспериментальных

данных. Статистическая обработка результатов исследований проводилась по рассмотренной ранее методике.

3.2.2 Обсуждение экспериментальных результатов по влиянию параметров инструмента и условий формоизменения на усилие волочения при получении винтовых профилей без операции скручивания

Для правильного подбора оборудования, определения энергозатрат необходимо знать такую важную величину, как усилие волочения [123-125]. В литературе отсутствует информация по влиянию различных параметров на усилие волочения при получении волочением винтовых профилей по технологии, не предусматривающей операцию скручивания. Исследование технологических факторов на усилие волочения при получении винтовых профилей проводилось с использованием оборудования и методик, рассмотренных в предыдущем разделе. Образец записи усилия волочения в графическом виде показан на рисунке 3.16. Расшифровка полученных данных проводилась с использованием тарифовочных графиков и возможностей программного обеспечения USB самописца BM8020.

На рисунке 3.17 приведены экспериментальные результаты по влиянию угла наклона роликов к оси заготовки при формировании винтовой поверхности. Исходные условия: диаметр заготовки 6,5 мм, диаметр роликов 6 мм, обжатие одним роликом 0,5 мм, число роликов 3. В исследуемом диапазоне изменения угла установки ролика с 45^0 до 60^0 при прочих равных условиях привело к уменьшению усилия волочения на 10%.

Уменьшение усилия волочения с увеличением угла установки роликов можно объяснить тем, что уменьшение угла приводит к уменьшению площади контакта металла с роликом и соответственно уменьшению смещенного объема.

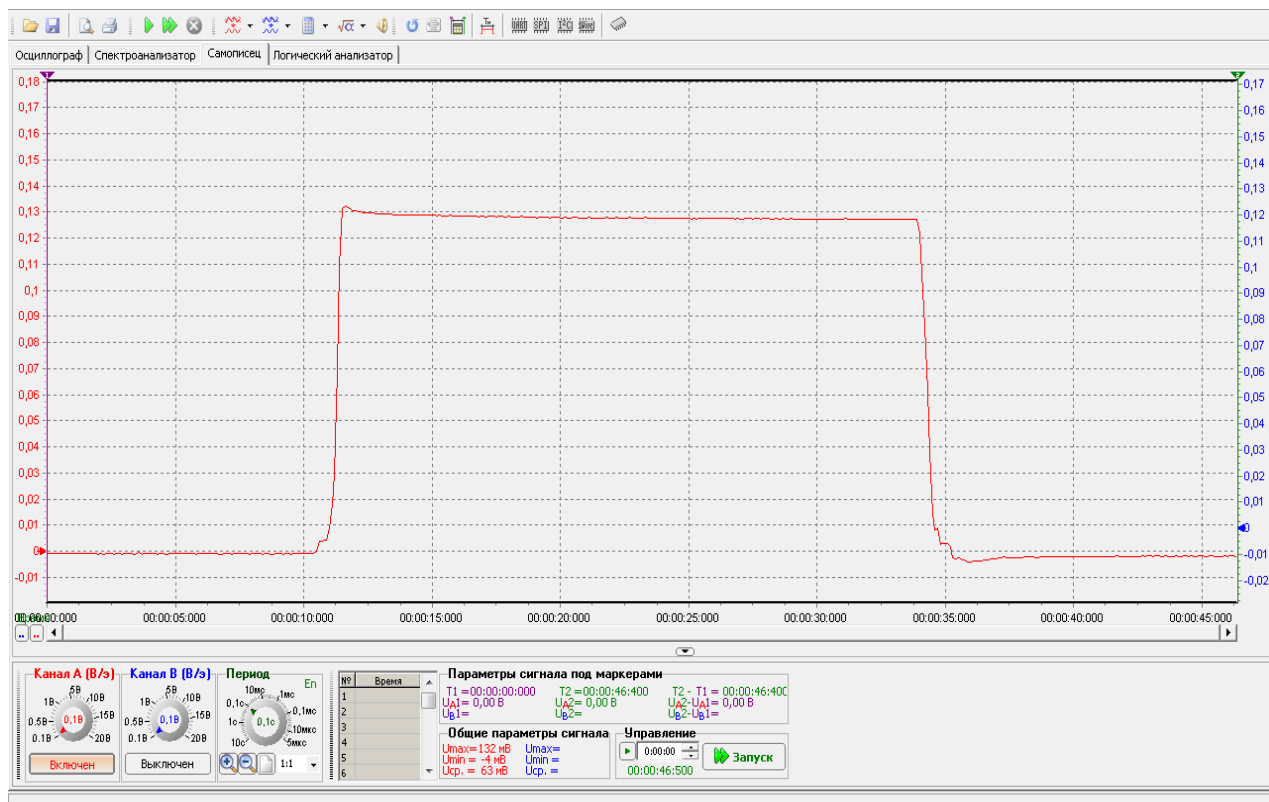


Рисунок 3.16 - Типовая запись усилия волочения, представленная в графическом виде, полученная при помощи USB самописца BM8020

Исследовали влияние числа заходов винтовой поверхности на усилие волочения при условии: диаметр заготовки 6,5 мм, обжатие одним роликом 0,5 мм, диаметр ролика 6 мм, угол наклона роликов 50^0 , число роликов 3, 4, 5. Статистически обработанные экспериментальные результаты приведены на рисунке 3.18. 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.

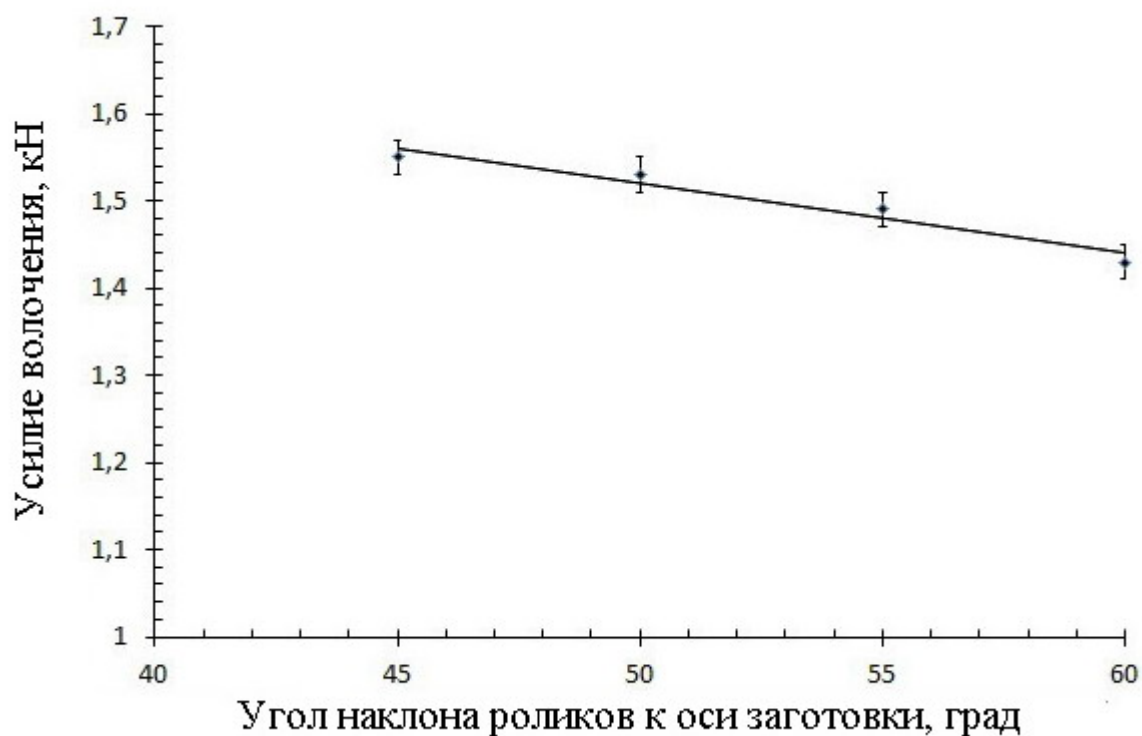


Рисунок 3.17 – График зависимости усилия волочения трехзаходного винтового профиля от угла наклона роликов к оси заготовки

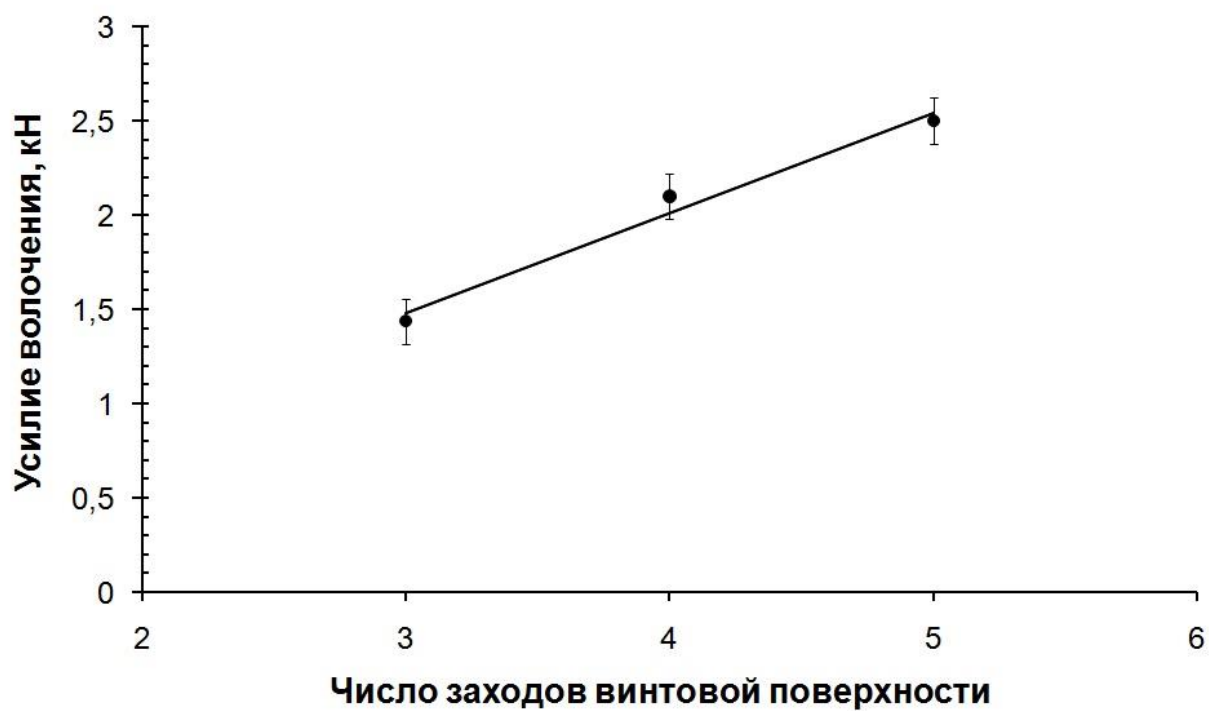


Рисунок 3.18 – Зависимость влияния числа заходов винтовой поверхности на усилие волочения

Изучено влияние величины обжатия рабочим роликом на усилие волочения винтового профиля. Согласно данным эксперимента, приведенным на рисунке 3.19, увеличение обжатия приводит к увеличению усилия волочения. Такие данные объясняются увеличением площади контакта и сопротивления деформации при увеличении обжатия. В условиях проведения эксперимента обжатие изменялось от 0,25 мм до 0,5 мм, что привело к увеличению усилия волочения в 2,7 раза.

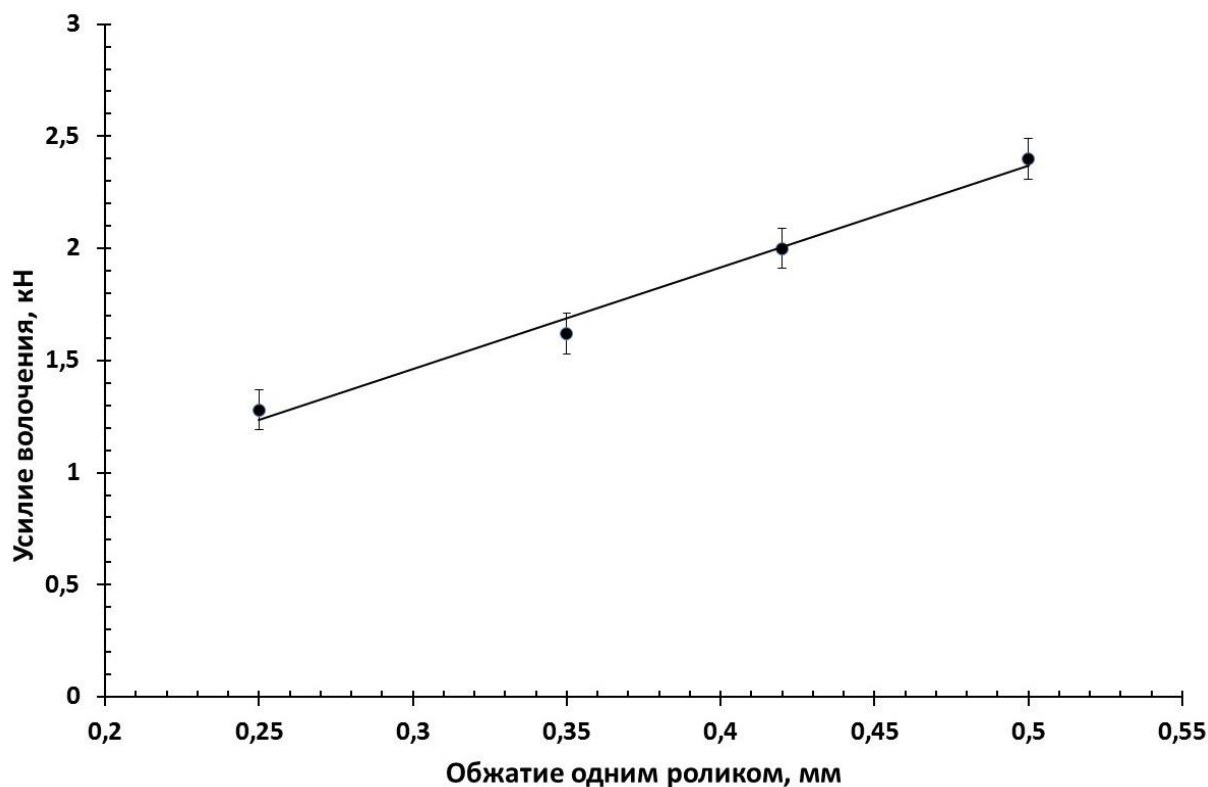


Рисунок 3.19 – График зависимости усилия волочения от величины обжатия одним роликом

Представляет практический интерес зависимость усилия волочения от диаметра рабочих роликов. Статистически обработанные экспериментальные результаты приведены на рисунке 3.20.

Увеличение диаметра рабочих роликов от 6 мм до 11 мм приводит к увеличению усилия волочения на 47%. Увеличение усилия волочения с увеличением диаметра рабочих роликов связано с увеличением контактной площади.

Экспериментальные результаты по влиянию различных факторов на усилие волочения при формировании винтового профиля по предлагаемой технологии, приведенные выше, не противоречат общепризнанным положениям и современному представлению о процессе волочения [126-128].

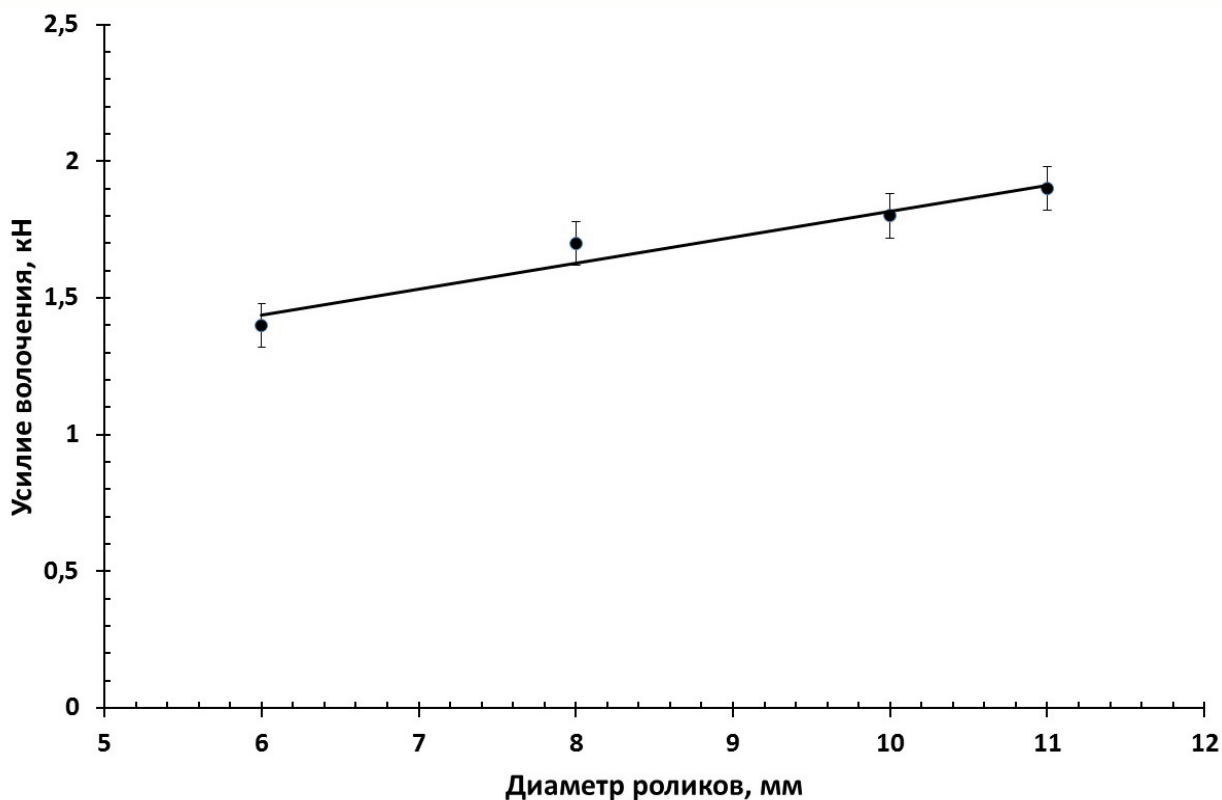


Рисунок 3.20 – Зависимость усилия волочения от диаметра рабочих роликов

3.3 Исследование механических свойств винтовых профилей, полученных волочением без операции скручивания

3.3.1 Характеристика исходного материала

Определение механических свойств винтовых профилей проводили в сопоставлении с аналогичными для арматуры Вр-1 по ГОСТ 6727-80. Арматура Вр-1 изготавливается на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» из катанки диаметром 6,5 мм из стали Ст3пс. Для получения оптимальных механических свойств [129-131] температуру смотки катанки стараются понижать до максимально низ-

кого предела что, как следует из таблицы 3.4, улучшает свойства заготовки для последующего волочения.

Таблица 3.4 - Свойства катанки диаметром 6,5 мм из стали марки СтЗпс с различной температурой смотки

Т _{см} , °С	Временное сопротивление, МПа		Относительное удлинение, %		Относительное сужение, %	
	σ _в	ско*	δ ₅	ско	ψ	ско*
900	354	32,2	31	5,2	61	4,7
850	428	34,2	27	5,4	57	4,9
800	483	33,4	24	5,6	49	5,2

Примечание: ско* - среднеквадратичное отклонение

Образцы для исследований изготавливали следующим образом. После механического удаления окалины знакопеременным изгибом [132] волочение проволоки из стали СтЗпс проводилось по маршруту 6,5→5,6→4,7→4,0 мм. Волочение осуществлялось по действующей на АО “ЕВРАЗ ЗСМК” технологии на стане трехкратного волочения 3/550 SKET. Винтовой профиль формировался на однократном волочильном стане 1/550 АЗТМ. Канавка наносилась глубиной 0,2 мм, как на арматурном профиле Вр-1 диаметром 4 мм. Винтовой профиль формировался четырехзаходный. После каждой протяжки отбирались пробы винтового четырехзаходного профиля и арматуры Вр-1 для проведения сравнительных механических испытаний. Результаты, полученные с использованием винтового профиля и арматуры Вр-1, сопоставлялись для оценки преимуществ предлагаемого винтового профиля.

3.3.2 Методика исследований механических свойств винтовых профилей, полученных волочением без операции скручивания

Для количественной оценки распределения механических характеристик в небольших сечениях использовался метод замера микротвердости. Испытания на микротвердость проводили методом восстановленного отпечатка на приборе ПМТ-3 (рисунок 3.21).



Рисунок 3.21 – Микротвердомер ПМТ-3 и компьютерное изображение отпечатка для расчета микротвердости с помощью системы анализа изображения SIAMS-700

Длину диагонали отпечатка и число микротвердости определяли по системе анализа изображения SIAMS-700, определяя среднее из трех измерений одного отпечатка. Вычисления микротвердости проводили по формуле:

$$H_{\mu}=1854F/d^2, \quad (3.12)$$

где F – нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику (в данной работе нагрузка на индентор $\sim 1\text{Н}$); d – среднее арифметическое длин обеих диагоналей квадратного отпечатка, мм.

Значение микротвердости образцов рассчитывали по результатам измерения диагоналей десяти отпечатков. Точность измерений составила 7%.

Для измерения микротвердости были сделаны темплеты из проволоки диаметром 4 мм и винтового четырехзаходного профиля диаметром 4 мм с глубиной впадин 0,2 мм. Рез осуществлялся поперек оси заготовки. Замеры микротвердости проводили с использованием микротвердомера ПМТ-3 в условиях лаборатории АО “ЕВРАЗ ЗСМК” от поверхности к центру с шагом 0,2 мм. На винтовом профиле микротвердость определялась от вершины выступа к центру и от нижней точки впадины к центру. Для получения объективной информации замеры микротвердости дублировались пять раз.



Рисунок 3.22 – Разрывная машина Lloyd LR 50K для испытания на растяжение

Механические свойства определяли при испытаниях проволоки на растяжение стандартными методами по ГОСТ 1497 и ГОСТ 12004 [133, 134] с автоматической записью кривых «напряжение-деформация». Испытания проводили в условиях лаборатории АО «ЕВРАЗ ЗСМК» на разрывной машине Lloyd LR 50K (рисунок 3.22) на стержнях длиной 250-300 мм, которые вырезали из полученных волочением профилей.

3.3.3 Обсуждение результатов исследования механических свойств винтовых профилей, полученных волочением без операции скручивания

Измерение микротвердости в различных точках по сечению образца дает косвенное представление о механических свойствах в этих точках. Увеличение микротвердости свидетельствует об увеличении прочностных характеристик связанных с наклепом. Целью исследования микротвердости по сечению образцов было определение характера распределения и установления особенностей распределения микротвердости при получении винтовых профилей. Полученные результаты по распределению микротвердости по сечению исследуемых образцов приведены на рисунке 3.23. Приведенные данные показывают степень неоднородности микротвердости на разных участках винтового профиля, а следовательно и механических свойств. Перепад микротвердости составляет для выступов примерно 300 МПа, а для впадин 400 МПа. Такая разность объясняется тем, что твердость на поверхности впадин примерно на 100 МПа выше, что связано с большей величиной деформации металла во впадинах. При формировании винтового профиля в холодном состоянии получается как бы волокнистая структура, переплетенная по винтовой поверхности, что улучшает механические свойства готового профиля.

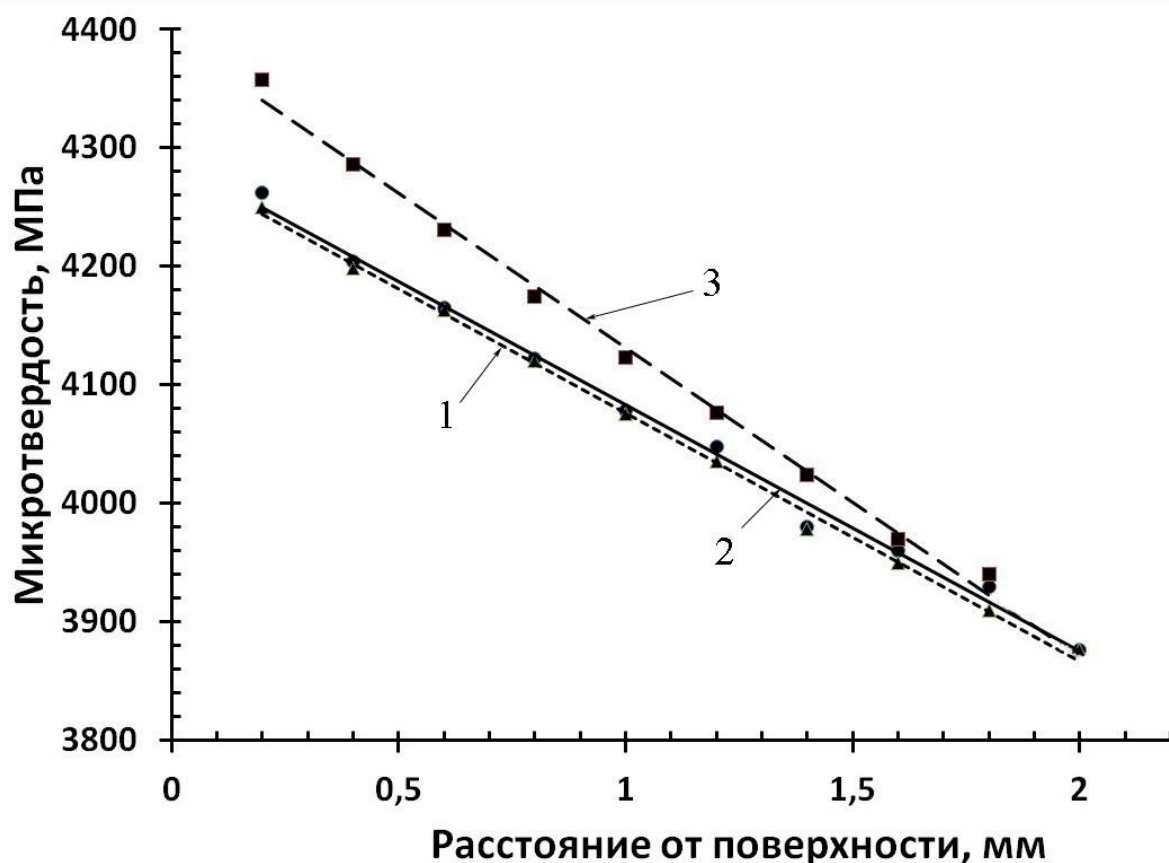


Рисунок 3.23 – Изменение микротвердости по сечению винтового профиля после волочения (1 – контрольный образец диаметром 4 мм; 2 - микротвердость со стороны выступа; 3 - микротвердость со стороны впадины)

Преимущество винтовой арматуры, по сравнению с классической, заключается в том, что классическая форма имеет периодическое сечение по длине с выступами и впадинами. Выступы обеспечивают сцепление арматуры с бетоном и не оказывают влияние на прочность арматуры. Прочность классической арматуры определяется минимальным сечением в месте впадин. Такое разделение функций различных участков арматуры приводит к увеличению веса за счет выступов. Винтовая арматура также имеет выступы и впадины только они расположены не поперек оси, а по винтовой поверхности. Такая особенность винтовой арматуры приводит к тому, что за счет многозаходной винтовой поверхности площадь сцепления выступов с бетоном больше, чем у классической формы арматуры, но при этом по всей длине по-

перечное сечение заготовки постоянно. В винтовой арматуре выступы обеспечивают сцепление с бетоном и увеличивают прочность. Поэтому при одинаковой прочности винтовая арматура обладает меньшей металлоемкостью.

Для исследования преимуществ винтовой арматуры диаметром 4 мм, полученной волочением проводили сравнительные расчеты с классической арматурой Вр-1 такого же диаметра. Данные для анализа брали из ГОСТ 6727-80 на арматуру Вр-1 (рисунок 3.24, таблица 3.5) и используя параметры винтовой четырехзаходной арматуры диаметром 4 мм, экспериментально полученной на оборудовании метизного производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Глубина канавок винтовой арматуры и вмятины Вр-1 одинаковы и равны 0,2 мм. Площадь сечения винтового профиля определяли по формулам (2.20), (2.33). Сечение Вр-1 в месте углублений представляет собой эллипс, большая ось которого равна диаметру арматуры, а малая ось диаметру арматуры за вычетом двойного значения углубления.

В результате проведенных расчетов были получены зависимости площади поперечного сечения после формирования винтового четырехзаходного профиля и арматуры Вр-1, приведенные на рисунке 3.25. Из полученных данных следует, что площадь поперечного сечения винтового профиля с той же глубиной канавок на 4-5% больше чем минимальное сечение арматуры Вр-1, определяющее прочность.

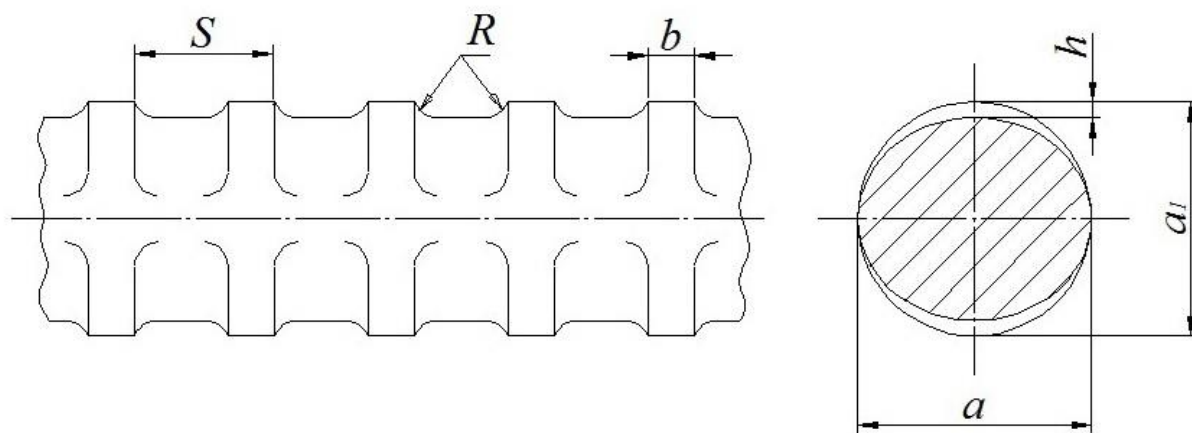


Рисунок 3.24 - Арматура Вр-1 по ГОСТ 6727-80

Таблица 3.5 - Параметры арматуры Вр-1 по ГОСТ 6727-80

Номиналь- ный размер а, мм	Предельное отклонение на размер	Глубина вмятин h, мм	Предельные отклонения до глубины вмятин, мм	Номиналь- ный шаг вмятин s, мм	Длина вы- ступа b, мм
3,0	+0,03 -0,09	0,15	+0,05 -0,02	2,0	0,6
4,0	+0,04 -0,12	0,20		2,5	0,8
5,0	+0,05 -0,15	0,25		3,0	1,0

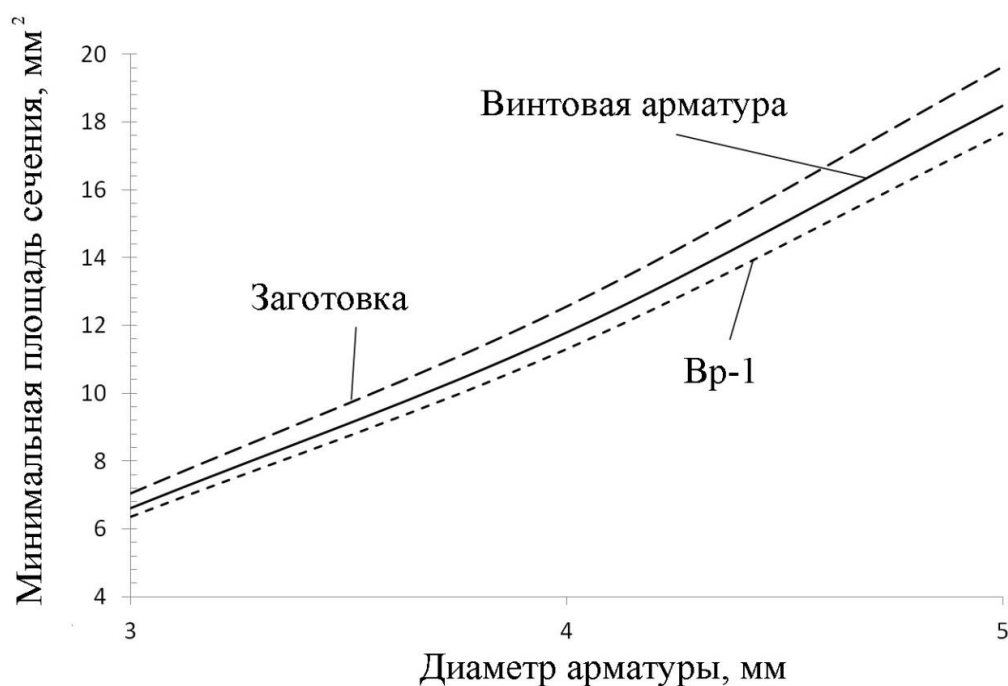


Рисунок 3.25 – Площадь поперечного сечения винтового профиля и арматуры Вр-1 в минимальном сечении

Такая особенность винтовой арматуры связана с тем, что площадь поперечного сечения у нее постоянна по длине. Винтовой профиль одновременно решает две задачи: обеспечивает прочность конструкций и сцепление

с бетоном. Классическая арматура Вр-1 имеет периодическое сечение состоящее из выступов и впадин. Выступы необходимы только для сцепления арматуры с бетоном, а впадины определяют прочностные характеристики. Таким образом, выступы в арматуре Вр-1 на прочность влияние не оказывают, а только увеличивают массу на 3 – 4%. При переходе с арматуры Вр-1 на винтовую арматуру снижается металлоемкость на 3 – 4% без ущерба для прочности и с большей площадью сцепления с бетоном, что важно при многоэтажном высотном строительстве.

Одной из важных эксплуатационных характеристик арматуры наряду с прочностью является площадь сцепления с бетоном, определяющая анкерные свойства арматуры. Для оценки данной характеристики была определена площадь сцепления на участке между выступами арматуры Вр-1 и на таком же участке для винтовой арматуры. Полученные результаты приведены на рисунке 3.26, из которого следует, что винтовая арматура имеет большую площадь сцепления чем Вр-1. Как следует из полученных результатов, с увеличением числа заходов винтового профиля с 3 до 5 площадь сцепления с бетоном винтового профиля по сравнению с арматурой Вр-1 диаметром 4 мм увеличивается на 70%. На рисунке 3.27 приведен пространственный график, иллюстрирующий влияние угла установки роликов относительно оси заготовки на приращение активной площади сцепления винтовой арматуры разных диаметров. Пространственный график построен для четырехзаходного винтового профиля, сформированного роликами диаметром 5 мм. Все значения графика больше единицы, следовательно, во всей исследованной области площадь сцепления винтового профиля с бетоном больше чем у арматуры Вр-1 минимум в 1,5 раза. С уменьшением диаметра винтового профиля эффективность сцепления с бетоном увеличивается в исследуемом диапазоне на 10 - 12%.

Для оценки уровня механических свойств арматуры Вр-1 и винтовой арматуры, образцы изучаемых профилей подвергали испытанию на разрыв и

изгиб в соответствии с требованиями ГОСТ 6727-80. Полученные результаты приведены в таблицах 3.6, 3.7.

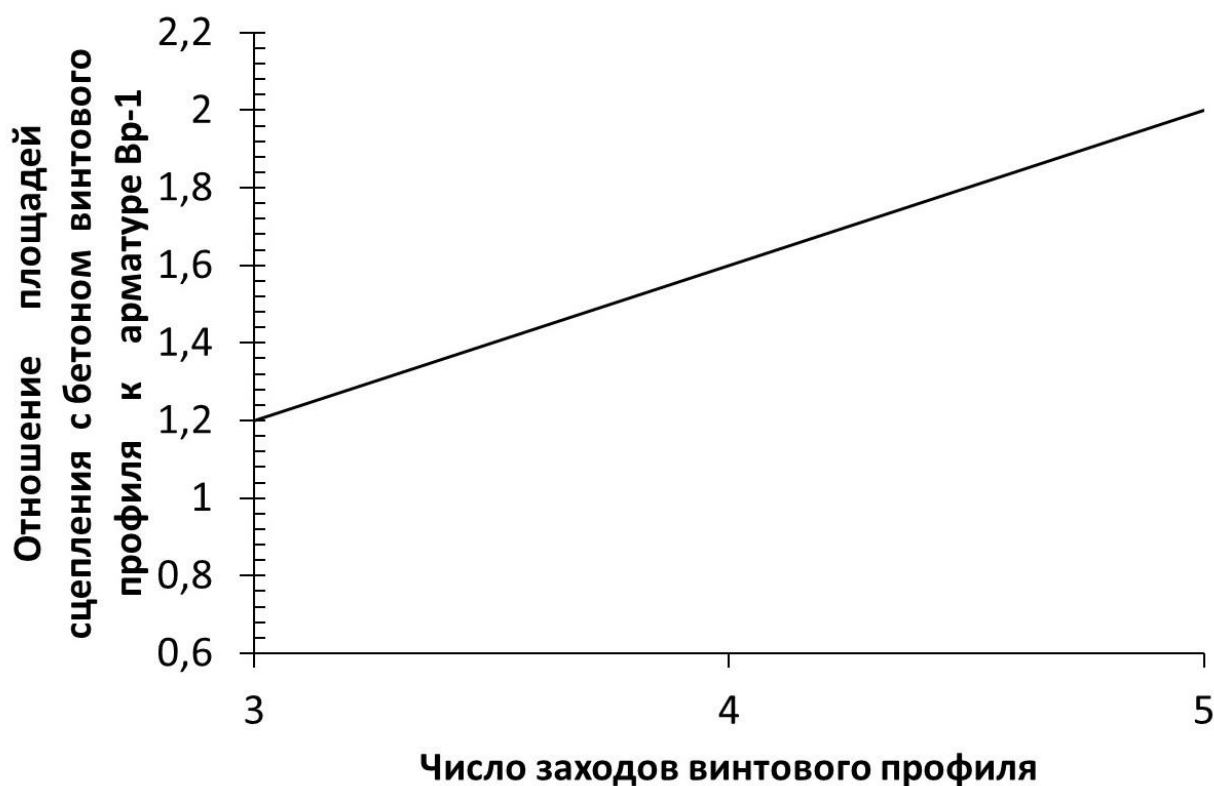


Рисунок 3.26 – Зависимость отношения площади сцепления с бетоном винтового профиля к арматуре Вр-1 от числа заходов винтовой поверхности

В меньшей степени оказывает влияние угол установки роликов к оси заготовки на площадь сцепления с бетоном. С увеличением угла установки роликов площадь сцепления винтового профиля с бетоном увеличивается в изученном диапазоне на 3 – 4%. Полученные результаты убедительно доказывают преимущества винтовой арматуры по сравнению с Вр-1 в плане увеличения площади сцепления с бетоном. Данная характеристика имеет важное технологическое значение в железобетонном строительстве.

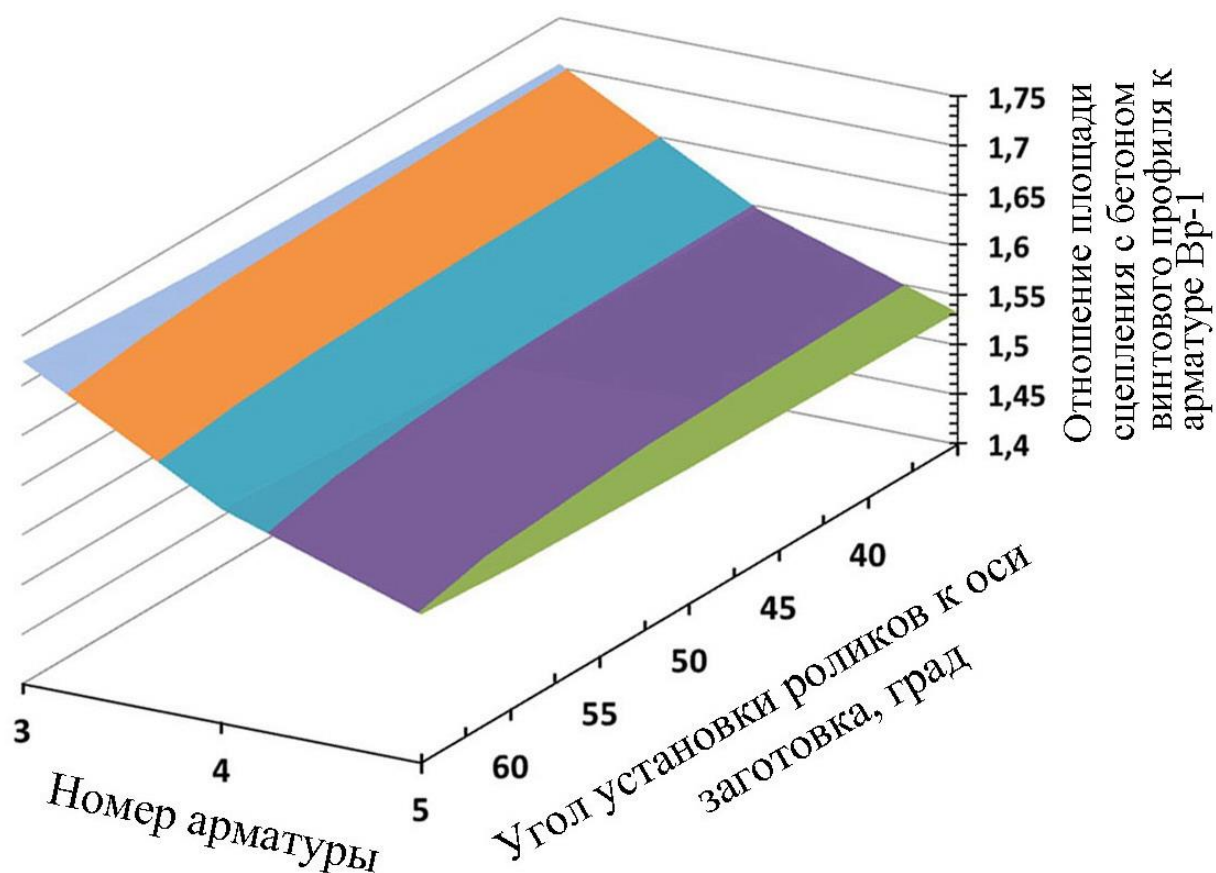


Рисунок 3.27 - Зависимость отношения площади сцепления с бетоном винтового профиля к арматуре Вр-1 от угла установки роликов к оси заготовки и номера арматуры

Таблица 3.6 - Механические свойства исследуемых образцов

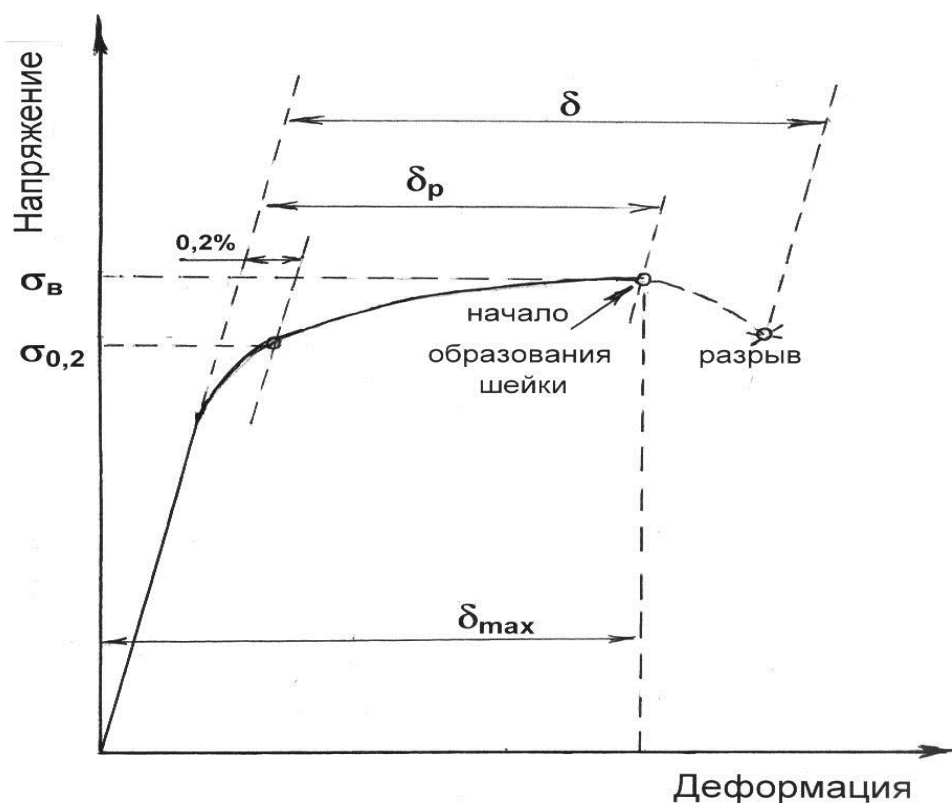
Вид арматуры	Разрывн. утил., кгс		Утил. соотв. условн. пределу текуч., кгс		Кол-во изгибов до разруш., шт		Относит. удлинение, %	
	разбр.	сред	разбр.	сред	разбр.	сред	разбр.	сред
ГОСТ 6727		720		630		4		2,5
Вр-1	706-748	727	611-658	634	4-8	6	2,4-3	2,7
Винтов. арм.	759-808	784	660-697	679	5-10	7	3-3,4	3,2

Таблица 3.7 - Механические свойства, исследуемых образцов

Вид арматуры	Временное сопротивление, Н/мм ²		Условный предел текучести, Н/мм ²		Миним. площ. попер. сечения, мм ²
	разбр.	сред	разбр.	сред	
Вр-1	625- 662	643	541-582	561	11,1
Винтов. арм.	643-685	664	559-591	575	11,8

Согласно приведенным данным винтовая арматура имеет лучшие показатели по механическим свойствам, чем классическая Вр-1. 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. Объяснить полученные преимущества винтовой арматуры можно следующим образом. Временное сопротивление и условный предел текучести (см. таблица 3.7) винтовой арматуры примерно на 4 – 5% выше, чем у Вр-1, что можно объяснить упрочнением металла в канавках, как следует из графика на рисунке 3.23. По уровню прочностных свойств винтовая арматура соответствует классам В500С и В550С [135, 136], которые широко применяются в строительной индустрии. Арматура указанных классов характеризуется плавным переходом от макроупругой к макропластической деформации. Диаграмма деформации, порядок определения условного предела текучести и характеристик пластичности схематично показаны на рисунке 3.28.

Увеличение сопротивления деформации и условного предела текучести при большей поперечной площади винтовой арматуры приводит к увеличению разрывного усилия и усилия соответствующего условному пределу текучести.



$\sigma_{\text{в}}$ – временное сопротивление разрыву, $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести, δ – полное относительное удлинение после разрыва, $\delta_{\text{р}}$ – относительное равномерное удлинение, δ_{max} – полное относительное удлинение при максимальной нагрузке (A_{gt})

Рисунок 3.28 – Диаграмма деформации и нормируемые свойства арматурной проволоки

Большое значение для работоспособности арматуры имеют пластические свойства, которые оцениваются по ГОСТ 6727-80 через относительное удлинение. В действующих сегодня стандартах на арматурный прокат с пределом текучести 500 МПа и выше наблюдается многообразие методов контроля пластических характеристик. ГОСТ 5781 требует определения полного относительного удлинения после разрыва на базе пяти номинальных диаметров (δ_5) и относительного равномерного удлинения вне участка разрыва ($\delta_{\text{р}}$) на базе 50 мм. ГОСТ Р 52544 дополнительно требует определения полного относительного удлинения при максимальной нагрузке (δ_{max}), стандарт DIN

488 (ФРГ) нормирует десятикратное относительное удлинение (δ_{10}), а ASTM A722 (США) - двадцатикратное (δ_{20}). ГОСТ 6727 нормирует определение относительного удлинения на фиксированной базе 100 мм (δ_{100}), а ASTM A615 (США) - на базе 8 дюймов (δ_{80}). Все это затрудняет корректное сопоставление пластических характеристик [137]. В данной работе оценивали пластические свойства по ГОСТ 6727-80, как наиболее подходящему и используемому в России. Полученное увеличение относительного удлинения при испытании винтовой арматуры объясняется тем, что при растяжении она не только растягивается, но и раскручивается поэтому приращение длины увеличивается.

Проведенные сравнительные исследования механических свойств арматуры Вр-1 и винтовой убедительно доказали преимущества винтовой арматуры, изделия из которой имеют меньшую металлоемкость и большую прочность, что очень важно при строительстве высотных зданий и сооружений. Экспертиза нового профиля, проведенная в Центре проектирования и экспертизы НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ Строительство» подтвердила актуальность и достоинства новой инновационной продукции (Приложение 1).

Результаты по исследованию получения винтовых профилей волочением без скручивания используются в учебном процессе, о чем свидетельствует соответствующий акт (Приложение 2)

Выводы:

1. Отработаны методики и подобрано оборудование для изучения влияния параметров инструмента и условий формоизменения на шаг винтовой поверхности, усилие волочения и потребительские свойства при получении винтовых профилей волочением без скручивания.

2. Установлена связь между углом наклона деформирующих роликов, шагом винтовой поверхности и частотой вращения волокна. Доказано, что с увеличением угла наклона роликов шаг винтовой поверхности уменьшается.

3. Определена связь числа заходов винтовой поверхности с частотой вращения рабочей части волокна и шагом винтовой поверхности. Увеличение числа заходов уменьшает шаг винтовой поверхности и практически не влияет на частоту вращения рабочей части волокна.

4. Доказано, что увеличение обжатия и диаметра рабочих роликов приводит к уменьшению шага винтовой поверхности и увеличению частоты вращения рабочей части волокна.

5. Сопоставление экспериментальных результатов и полученных с использованием предложенной математической модели показало, что расхождение данных при определении параметров волочения винтовых профилей не превышает 10%. Это дает основание считать полученные математические модели верными и пригодными для проектирования и прогнозирования процесса получения винтовых профилей волочением без скручивания.

6. Исследовано влияние значимых факторов на усилие волочения винтовых профилей. Установлено, что с увеличением числа заходов винтовой поверхности, обжатия, диаметра рабочих роликов усилие волочения увеличивается. Увеличение угла наклона роликов уменьшает усилие волочения.

7. Установлено, что винтовой профиль имеет постоянную площадь поперечного сечения в отличие от классической арматуры Вр-1. При прочих равных условиях площадь поперечного сечения и площадь сцепления с бетоном у винтовой арматуры на 20-50% больше, чем у Вр-1.

8. Изучение механических свойств показало, что прочностные и пластические свойства винтовой арматуры на 10-18% превышают аналогичные для Вр-1.

9. Установлено, что за счет особенностей винтовой арматуры, имеющей постоянное сечение по длине, возможно снижение веса арматуры по сравнению с арматурой Вр-1 на 3 – 4% при неизменных прочностных параметрах.

4 Промышленное использование новой технологии получения винтовых профилей волочением без операции скручивания

4.1 Краткая характеристика процесса производства проволоки и холоднодеформированной арматуры в условиях метизного производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Исходным сырьем для производства проволоки и холоднодеформированной арматуры в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК» является катанка диаметром 6,5-10 мм из углеродистых и низколегированных марок сталей. Катанка формируется в садки из четырех бунтов и с помощью напольного штангового конвейера подается в волочильное отделение.

Производство проволоки и холоднодеформированной арматуры осуществляется на волочильных станах различной кратности (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Станы для волочения проволоки различного диаметра

№ п.п.	Диаметр проволоки, мм	Волочильный стан
1	6,0 – 10,0	1/750 АЗТМ
2	3,0 – 7,0	1/650 АЗТМ
		1/550 АЗТМ
3	4,0 – 5,5	2/550 АЗТМ
4	3.5 – 5.5	3/550 SKET
5	2.4 – 4.0	4/550 SKET
6	2.0 – 4.0	5/550 SKET
7	1.5 – 4.0	6/550 SKET
8	1.0 – 4.0	7/550 SKET

Все станы грубого волочения оборудованы установками для удаления окалины с поверхности катанки (рисунок 4.1), принцип работы которых заключается в следующем. На первом этапе происходит ломка окалины в

двухплоскостных роликовых окалиноломателях, на всех станах осуществляется централизованный сбор осыпавшейся окалины и транспортировка ее виброконвейером. На втором этапе производится двукратная тонкая доочистка поверхности катанки металлической дробью во вращающемся барабане.

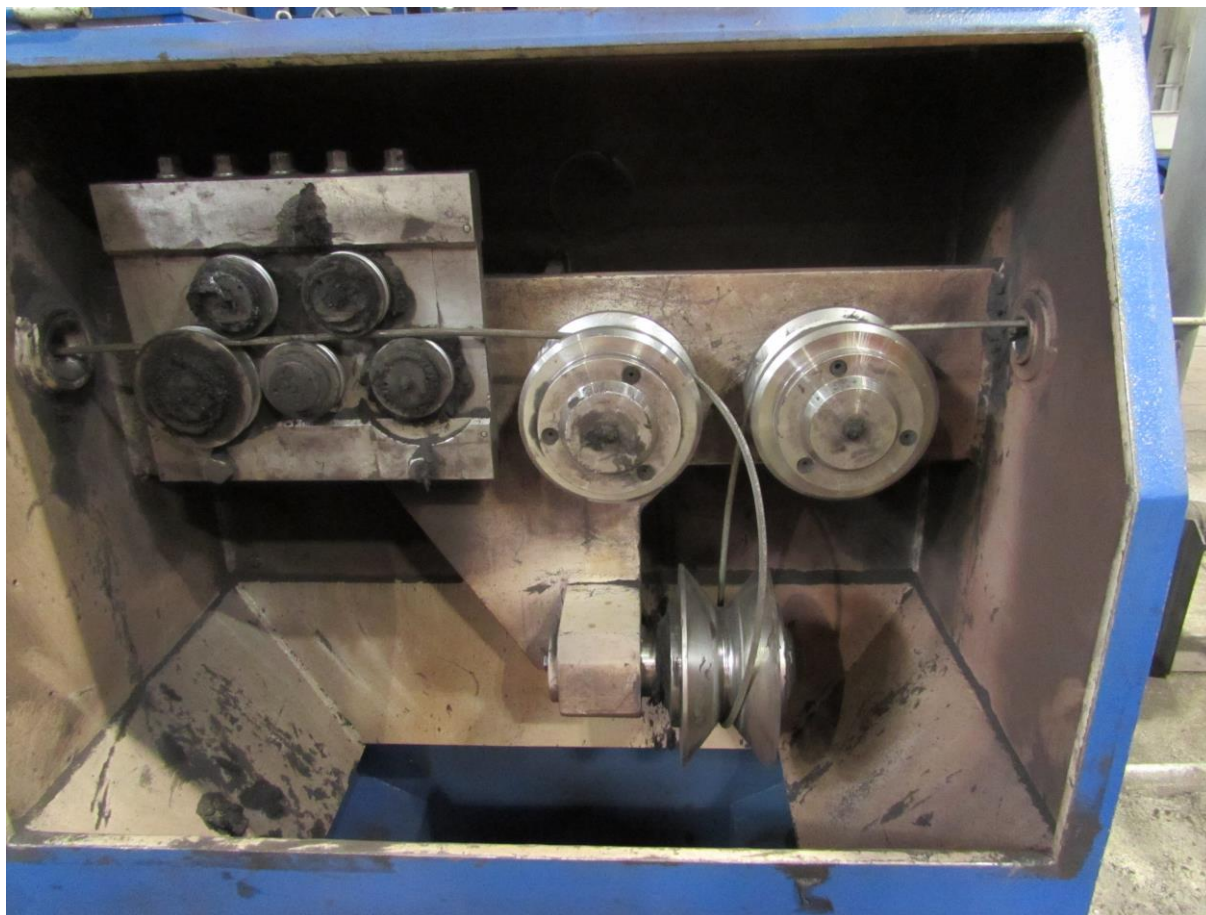


Рисунок 4.1 - Механическое удаление прокатной окалины с поверхности катанки в потоке волочильного стана

Основным технологическим инструментом для волочения проволоки являются волокнистые из твердого сплава ВК-6. Для создания эффекта гидродинамического скольжения волочение производится с использованием технологической смазки в виде сухого мыльного порошка. При производстве холоднодеформированной арматуры по действующей технологии на заключительной стадии обработки производится накатка роликами профиля (рисунок 4.2).

Мотки передельной или готовой проволоки подвергаются светлomu (рекристаллизационному или структурному) отжигу в проходных роликовых печах в атмосфере защитного газа. Нагрев осуществляется за счет сжигания топлива (природный газ) в тупиковых радиационных трубах конструкции «ВНИИпромгаза». После выхода из печи проволока охлаждается в камере струйной обдувки до температуры 300-150°С.

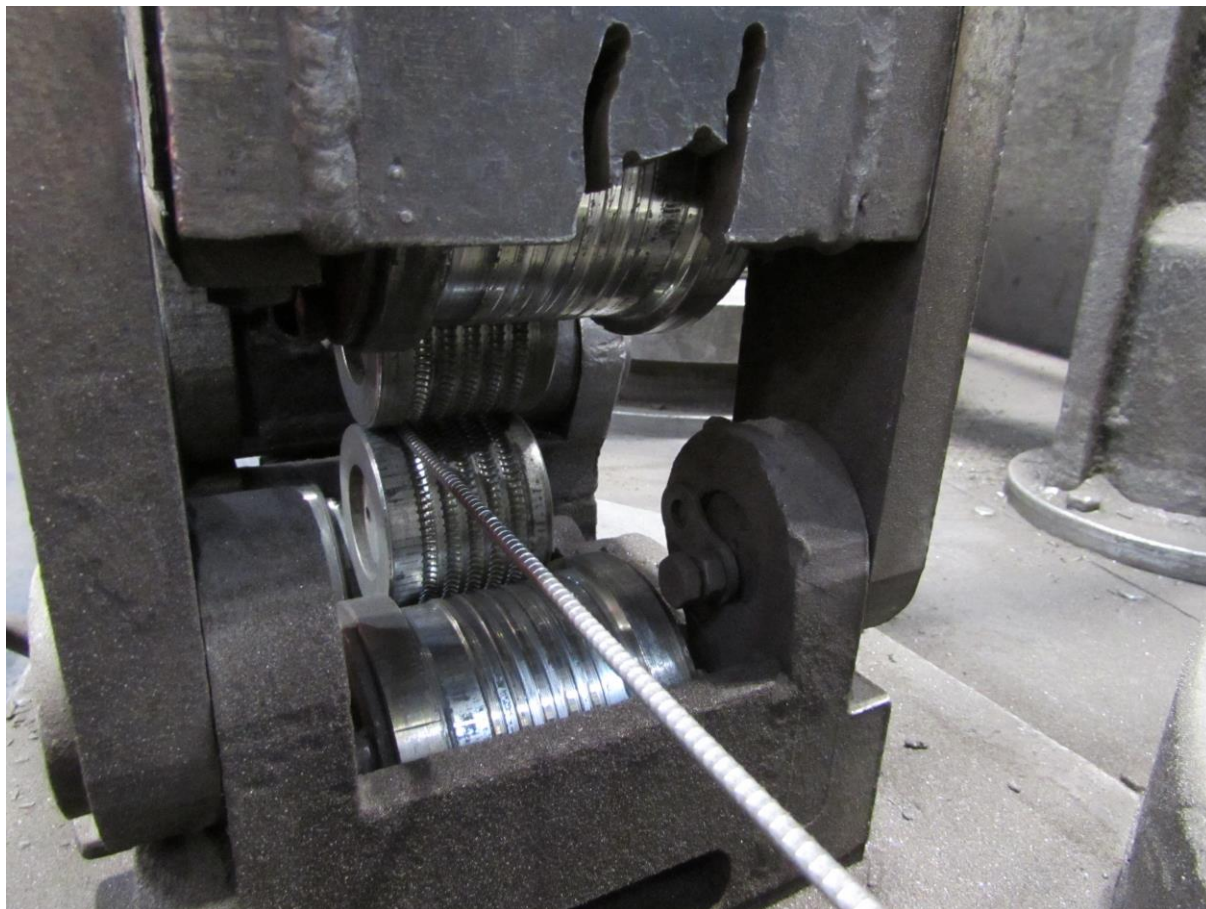


Рисунок 4.2- Накатка периодического профиля Вр-1

Холоднотянутая проволока периодического профиля производится по ГОСТ 6727-80 [138], ТУ 1213-276-05757676-2010 и ТУ 1213-275-05757676-2009 и предназначена для армирования железобетонных конструкций. Исходной заготовкой является катанка диаметром 6,5 и 8,0 мм по ГОСТ 30136-94 [139] из углеродистой стали обыкновенного качества марок Ст1кп, Ст2кп, Ст3кп и Ст3пс по ГОСТ 380-2005. Химический состав сталей должен соответствовать нормам таблицы 4.2.

Таблица 4.2 - Химический состав и механические свойства катанки

Марка стали	Содержание элементов, %			Механические свойства	
	углерода	марганца	кремния	σ_b , Н/мм ²	ψ , %, не менее
Ст1кп	0,06-0,12	0,25-0,50	не более 0,05	не более 420	68
Ст2кп	0,12-0,15	0,25-0,50		370-470	60
Ст3кп	0,16-0,22	0,30-0,60		400-490	60
Ст3пс	0,14-0,22	0,40-0,65	0,05-0,15	Не более 490	60
Примечание. Массовая доля хрома, никеля и меди не более 0,30%, фосфора и серы не более 0,04%.					

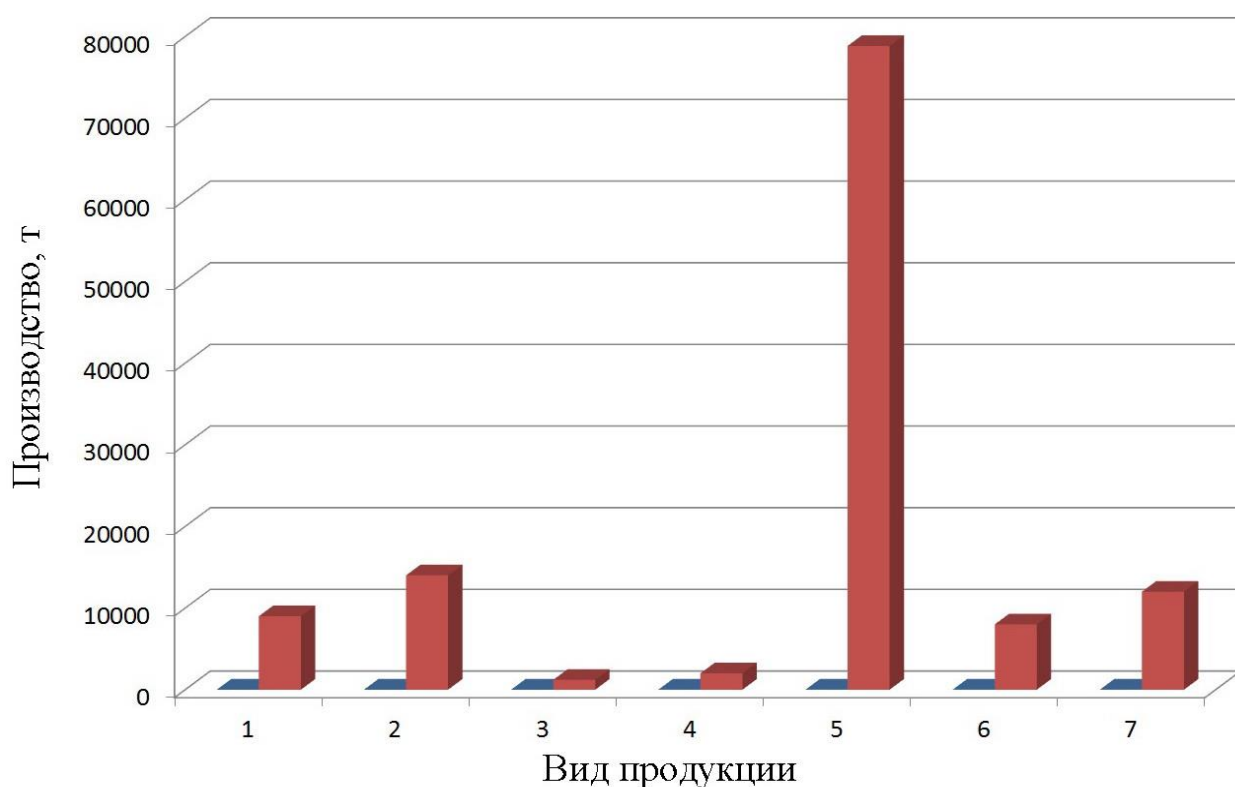
Проволока класса Вр-1 по ГОСТ 6727-80 изготавливается номинальным диаметром от 3,0 до 5,0 мм. Основные параметры профиля должны соответствовать рисункам 3.24, 4.3.



Рисунок 4.3 – Периодический профиль Вр-1

Механические свойства арматуры Вр-1 должны соответствовать таблице 4.3, линейная плотность - таблице 4.4.

Сортамент и объемы производства метизной продукции АО “ЕВРАЗ ЗСМК” показаны на рисунке 4.4. Сортамент представлен гладкими (круглого сечения) и периодическими профилями. К последним относятся холодноотянутая арматура Вр-1 и холоднодеформированный арматурный прокат класса В500С.



- 1 - Проволока обыкновенного качества по ГОСТ 3282 нагартованная;
 2 - Проволока обыкновенного качества по ГОСТ 3282 термообработанная;
 3 - Проволока сварочная 08А по ТУ 14-4-828-77;
 4 - Проволока сварочная легированная 08Г2С по ГОСТ 2246;
 5 – Арматура из низкоуглеродистой стали для армирования железобетонных конструкций класса Вр-1 по ГОСТ 6727;
 - Арматурный прокат холоднодеформированный периодического профиля класса В500С по ТУ-14-1-5627-2012;
 7 - Гвоздь строительный

Рисунок 4.4 – Объем производства готовой продукции за шесть месяцев 2017 г.

Таблица 4.3 – Механические свойства арматуры Вр-1 по ГОСТ 6727-80

Номинальный диаметр арматуры, мм	Разрывное усилие P , гН	Усилие, соответствующее условному пределу текучести $P_{0,2}$, гН	Число перегибов	Относительное удлинение δ_{100} , %
	не менее			
3,0	39	35	4	2,0
4,0	71	62		2,5
5,0	106	97		3,0

Таблица 4.4 – Линейная плотность арматуры Вр-1 по ГОСТ 6727-80

Номинальный диаметр арматуры, мм	Линейная плотность, кг не более
3,0	0,052
4,0	0,092
5,0	0,144

Как следует из приведенного выше материала, наибольший удельный вес в сортаменте продукции составляет арматура, которая пользуется популярностью у потребителей. Разработанные технические и технологические решения по получению винтовых профилей можно использовать для производства нового винтового арматурного профиля, а также строительных винтовых гвоздей. Для реализации такого проекта в промышленных условиях была разработана, применительно к конструкции имеющегося в цехе волочильного оборудования, с учетом предложенных в патентах [103, 111] решений, конструкция волоки, формирующей винтовой профиль и проведено опытно–промышленное опробование.

4.2 Разработка конструкции волоки, формирующей винтовой профиль без скручивания применительно к условиям АО “ЕВРАЗ ЗСМК”

По действующей технологии формирование заданного профиля осуществляется в сборной волоке, установленной на стане. Для лучшей адаптации к действующему производству габаритные размеры предлагаемой волоки приняли соразмерными с посадочным местом на волочильном стане (рисунок 4.5). Детализовка разработанной конструкции волоки для получения винтовых профилей показана на рисунке 4.6. Состоит сборная волока из кор-

пуса 1 с крышкой 2, в котором на двух подшипниках (передний упорный, а задний шариковый 4) установлено тело волокни 5. Тело волокни имеет цилиндрическую форму с осевым углублением, в которое монтируется обойма с рабочими роликами 3. Крышка 6 закрывает и фиксирует обойму с роликами. Ролики в обойме установлены свободно в отверстия (гнезда), просверленные под углом 45° - 60° к оси заготовки, с возможностью вращения в отверстиях. Значение угла установки роликов определяется, исходя из необходимого шага винтовой поверхности. Шаг винтовой поверхности определяется по полученным в работе зависимостям (2.45). Рабочие ролики изготавливаются из победита. В качестве рабочих роликов использованы победитовые стержни разных размеров и отработанные волокни с участка тонкого волочения метизного производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (рисунок 4.7). Сменным элементом разработанной сборной волокни является обойма с роликами, которая легко заменяется при сборке и разборке.



Рисунок 4.5 - Стандартная и разработанная волокни

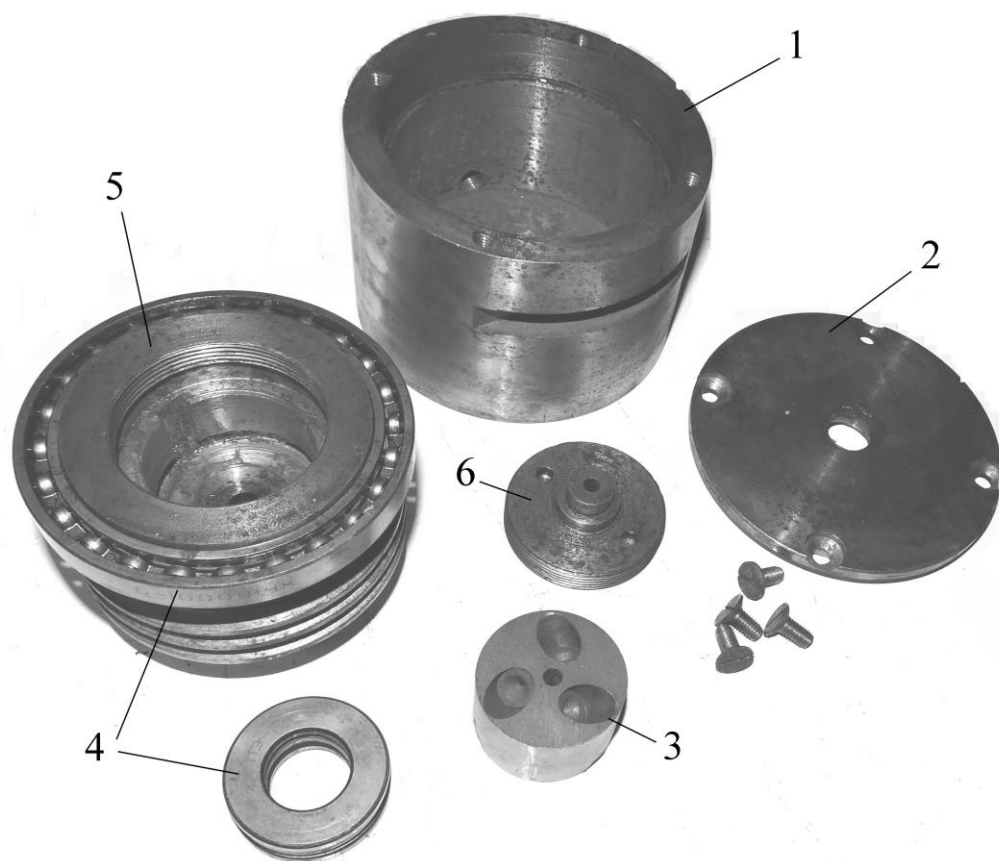


Рисунок 4.6 – Детализовка сборной волоки для получения винтовых профилей

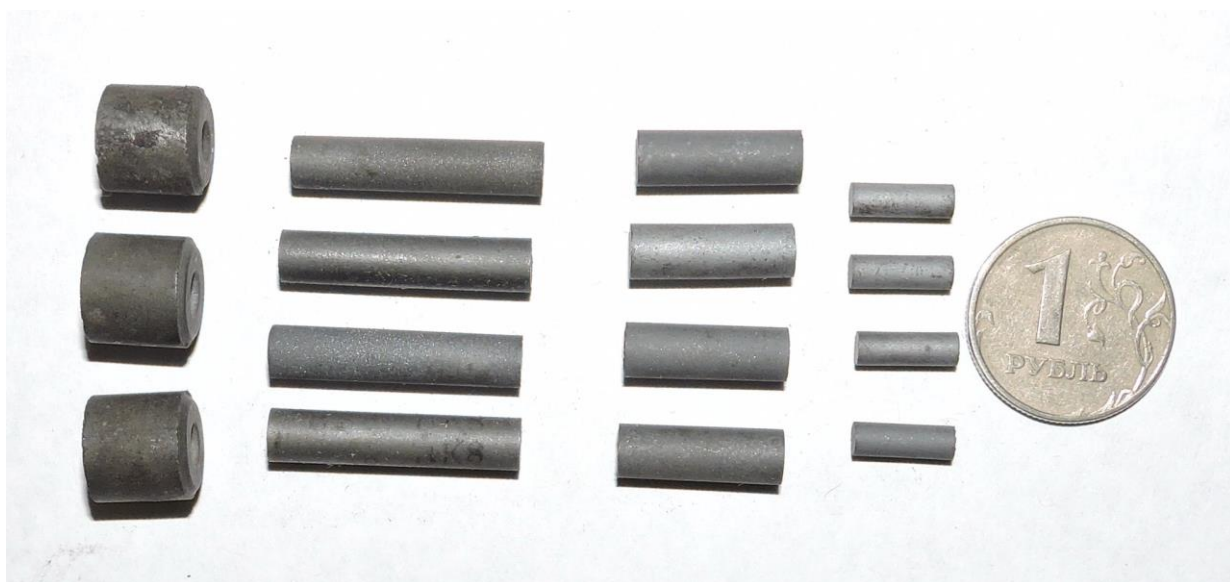


Рисунок 4.7 – Рабочие ролики из победита

При формировании проволоки нужного диаметра в монолитных волокнах для смазки используется мыльный порошок. На заключительном этапе,

при получении винтового профиля в сборной роликовой волоке, в качестве смазки используется масло, которое находится в емкости расположенной на месте мыльницы. Емкость оборудована прижимным роликом и обжимными роликами, что обеспечивает толщину смазочного слоя примерно 0,01 мм. При такой толщине смазочного слоя расход масла составляет от 0,6 до 1 литра на тонну в зависимости от диаметра винтового профиля. Использование в качестве смазки масла не только уменьшает усилие волочения, но и, смазывая рабочие ролики, способствует их вращению в гнездах корпуса волоки.

Винтовой профиль формируется за счет вращения корпуса волоки и поступательного движения заготовки. Так как рабочие ролики расположены к оси заготовки под углом $45^{\circ} - 60^{\circ}$ и свободно вставлены в гнезда корпуса, то поступательное движение заготовки обеспечивает их вращение вокруг оси, увеличивая площадь рабочей поверхности и продлевая срок службы рабочего инструмента.

Процесс формирования винтового профиля во многом схож с обычным процессом волочения. Заостренный конец проволоки пропускается через отверстие в сборной волоке, захватывается и протягивается. При переходе с одного диаметра на другой заменяется обойма с роликами. Обойма с роликами через шпонку соединена с телом волоки, которое в свою очередь вращается в подшипниках. Используются обычные шариковые подшипники. Один радиальный, необходимый только для центрирования тела волоки относительно оси заготовки, второй упорный, помимо центровки тела волоки воспринимающий в качестве нагрузки усилие волочения. При выборе подшипников учитывались размеры, допустимая частота вращения и величина допустимой нагрузки. В качестве радиального подшипника выбран подшипник сверх легкой серии 9 по диаметру, серия 1 по ширине, условное обозначение 1000911+ по ГОСТ 8338. Упорный подшипник выбран особо легкой серии, условное обозначение 8108+ по ГОСТ 6874. Характеристики используемых подшипников [140, 141] приведены в таблице 4.5. Определяющим режим

формирования винтового профиля будет упорный подшипник, частота вращения, которого не должна превышать 5000 об/мин, при этом усилие волочения, с учетом пятикратного запаса прочности, не должно превышать 10 кН. Проведенные эксперименты, описанные в главе 3, показали, что усилие волочения при формировании винтового профиля не превышало 2,5 кН.

Таблица 4.5 - Характеристика используемых в конструкции волокнистых подшипников

Условное обозначение подшипника	Миним. диаметр d, мм	Максим. диаметр D, мм	Ширина B, мм	Допуст. статическая нагрузка Q в кг	Предельн. число обо- ротов в минуту
1000911+	55	80	13	1100	6000
8108+	40	60	13	5100	5000

В процессе работы сборная волока нагревается и необходимо постоянно обеспечивать отвод тепла. Для этой цели в корпусе сделана поперечная проточка, а на наружной поверхности тела волоки нарезана ленточная резьба. Наружный диаметр тела волоки равен внутреннему диаметру корпуса. В качестве охладителя используется смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ), широко применяемая на металлорежущих станках и выполняющая одновременно роль смазки и охлаждения. Охлаждение сборной волоки организовано следующим образом: волока погружается на 10 мм в емкость с СОЖ, которая через отверстие в корпусе попадает к резьбовой части тела волоки. При вращении тело волоки вращается и резьбовая часть работает как винтовой насос, прокачивая СОЖ вдоль тела волоки, затем через боковой штуцер сбрасывается в емкость. Таким образом организована схема циркуляционного охлаждения и смазки сборной волоки и подшипников в процессе работы.

4.3 Новая технология получения винтовых профилей, используемых в качестве арматуры и для производства винтовых гвоздей

При получении винтовых профилей по новой технологии в условиях сталепрокатного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» вначале с поверхности катанки в два этапа удаляется окалина. На первом этапе происходит ломка окалины в двухплоскостных роликовых окалиноломателях, а затем тонкая доочистка поверхности катанки металлической дробью во вращающемся барабане. Подготовленная катанка диаметром 6,5 мм из стали марки СтЗпс поступает на волочильный стан, где по существующей технологии, с использованием в качестве смазки сухого мыльного порошка, протягивается до диаметра арматуры. При диаметре арматуры 5 мм и 4 мм используется волочильный стан 4/550 SKET (рисунок 4.8). Формирование нужного диаметра производится за три прохода по следующим маршрутам волочения 6 – 5,5 – 5,0 и 5,6 – 4,7 – 4,0. В последнем волочильном стане формируется винтовой профиль. Арматура диаметром 3 мм получается на стане 6/550 SKET за пять проходов по маршруту волочения 5,6 - 4,65 – 4 – 3,45 – 3. Последний проход осуществляется в волоке предлагаемой конструкции, формирующей винтовой профиль. При формировании винтового профиля в последнем стане используется новый способ волочения, подробно рассмотренный и изученный в диссертации. Используемый на предприятиях известный метод формирования винтовой поверхности реализуется за два этапа. Вначале в роликовых волоках формируется многогранный профиль, количество граней которого соответствует числу заходов винтовой поверхности. На втором этапе специальным устройством, установленным в непосредственной близости от роликовой волоки и оборудованным приводом, производится принудительное скручивание многогранной заготовки на угол, обеспечивающий нужный шаг винтовой поверхности. Такая технология формирования винтового профиля существенно

усложняет конструкцию используемого оборудования и увеличивает энергозатраты. Предлагаемая новая технология исключает операцию скручивания при формировании винтового профиля. Тем самым снижаются энергозатраты и упрощается конструкция оборудования. Технические и технологические решения, позволяющие на практике реализовать новую технологию, защищены патентами [103, 111].

Используемые на АО “ЕВРАЗ ЗСМК” для получения винтового профиля по новой технологии волочильные станы имеют возможность регулировки скорости волочения от заправочной до установившейся. Скорость волочения выбиралась исходя из величины хода винтового профиля и возможностей подшипников, используемых в конструкции волоки. Исходя из характеристик применяемых подшипников, максимально допустимая скорость волочения при получении винтовой арматуры не должна превышать 480 м/мин, рекомендованная скорость 230 – 320 м/мин. Диапазон рекомендованных скоростей соответствует скоростным характеристикам станов 4/550 SKET и 6/550 SKET, установленных в сталепрокатном цехе АО “ЕВРАЗ ЗСМК”.



Рисунок 4.8 - Волочильный стан, использованный при опытно-промышленном волочении винтовой арматуры

Еще одним важным фактором, влияющим на технологический процесс формирования винтового профиля, является угол расположения деформирующих роликов относительно оси заготовки. Как показали проведенные исследования, с увеличением угла наклона деформирующих роликов к оси заготовки уменьшается шаг винтовых профилей и увеличивается площадь сцепления с бетоном. На площадь поперечного сечения данный фактор влияния не оказывает. Следовательно, исходя из соображений получения максимальной площади сцепления с бетоном и выполнения условия осуществимости процесса (2.13), углы наклона деформирующих роликов следует принимать равными $45 - 60^{\circ}$. При проведении промышленных экспериментов угол наклона деформирующих роликов составлял 50° .

При изготовлении винтового профиля по известной технологии с применением дополнительной операции скручивания, получение готового профиля возможно либо небольшой длины, либо с использованием катушек небольшой емкости, вращающихся в 2-х плоскостях. Использование традиционной намотки невозможно, так как в арматуре будут создаваться большие внутренние напряжения скручивания, приводящие к обрывам при волочении и снижению прочности железобетонных конструкций. Использование для формирования винтового профиля самовращающейся волоки разработанной конструкции не приводит к скручиванию профиля и снимает ограничения по длине получаемого профиля, а также делает возможным сматывание готового профиля на обычную катушку.

Таким образом, новая технология получения винтовой арматуры максимально адаптирована к условиям сталепрокатного цеха АО “ЕВРАЗ ЗСМК” и отличается от получения арматуры Вр-1 операцией и оборудованием для нанесения винтового профиля. Технология нанесения винтового профиля отличается от известной в литературе [33, 36, 99-101] отсутствием операции скручивания в процессе волочения. Полученный четырехзаходный винтовой арматурный профиль диаметром 4 мм показан на рисунке 4.9.



Рисунок 4.9 – Винтовая арматура диаметром 4 мм

Еще одно перспективное направление использования винтовых профилей - это изготовление винтовых гвоздей, являющихся востребованным товаром на рынке строительных материалов. Основным применением винтовых гвоздей стало скрепление различных строительных конструкций и кровли. Их также часто используют при производстве европоддонов, деревянной тары, настилении пола и креплении гнущихся конструкций.

Преимущества винтовых гвоздей по сравнению с гладкими:

1. Практически не повреждает поверхность, в которую ввинчивается, благодаря своей форме и мягкому входу в древесину.
2. Способны выдерживать большие вибрационные и динамические нагрузки.
3. В отличие от гладких прочнее скрепляют отдельные детали.
4. В отличие от саморезов винтовые гвозди в 2 раза дешевле и не требуют дополнительного оборудования.

По известным технологиям винтовые гвозди изготавливают из проволоки с винтовым профилем, полученным волочением со скручиванием или из гладкой проволоки с последующей накаткой винтовой поверхности на отдельно стоящих линиях. Обе технологии получения винтовых гвоздей, помимо волочильного стана, требуют дополнительное оборудование и затраты энергии на скручивание или накатку. Предлагаемая новая технология получения винтовых профилей имеет существенные преимущества по сравнению с известными, о которых подробно рассмотрено выше.

В промышленных условиях сталепрокатного цеха (СПрЦ) АО “ЕВРАЗ ЗСМК” был проведен промышленный эксперимент по производству винтовых гвоздей диаметром 2,5 мм и длиной 50 мм из стали марки Ст3пс. В каче-

стве заготовки использовалась передельная проволока диаметром 4 мм, которая после отжига протягивалась на волочильном стане 7/350 SKET по маршруту 3,7 – 3,4 – 3,15 – 2,9 – 2,7 – 2,5. В последнем проходе формировался трехзаходный винтовой профиль при скорости волочения 338 м/мин и сматывался на катушку. Деформирующие ролики выполнены из победита ВК-6 диаметром 3 мм и устанавливались в тело волоки под углом 50° к оси заготовки.

Из полученного винтового профиля на холодно-высадочном автомате ТНА-80, показанном на рисунке 4.10, были изготовлены гвозди длиной 50 мм и диаметром 2,5 мм. Опытная партия винтовых гвоздей и сами гвозди показаны на рисунке 4.11.



Рисунок 4.10 – Холодно-высадочный автомат ТНА-80



Рисунок 4.11 – Винтовые гвозди

Внедрение разработанных технологий позволяет освоить в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК» новые инновационные виды продукции с большой добавочной стоимостью.

4.4 Обоснование экономического эффекта от внедрения технологии производства винтовых профилей в условиях метизного производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Внедрение производства винтовых профилей с использованием разработанной технологии в условиях метизного производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» позволит повысить эффективность производства за счет новых видов продукции: винтовых арматурных профилей и винтовых гвоздей.

Экономический эффект при производстве винтовых арматурных профилей, достигается за счет снижения расхода металла по сравнению с арматурой класса Вр-1 по ГОСТ 6727-80, составляющей основную долю в сорта-

менте метизного производства. Арматура класса Вр-1 имеет периодическое сечение с чередованием выступов и впадин. Выступы обеспечивают сцепление с бетоном, а впадины определяют прочность арматуры. Таким образом металл, формирующий выступы, не влияет на прочность арматуры, а только обеспечивает сцепление с бетоном и увеличивает вес. Особенность винтовой арматуры заключается в том, что площадь поперечного сечения в любом месте по длине постоянна и обеспечивает одновременно прочность и сцепление с бетоном. Такая особенность винтовой арматуры позволяет уменьшить ее вес, по сравнению с Вр-1, за счет отсутствия периодических выступов. Рассчитаем возможное снижение расхода металла на сортаменте, аналогичном сортаменту проволоки класса Вр-1:

1. Винтовая арматура диаметром 3,0 мм:

Определим объем выступов и впадин на одном погонном метре профиля:

$$V = \left(\frac{\pi D_{\max}^2}{4} - \frac{\pi D_{\min}^2}{4} \right) \times b \times \frac{N}{2} = 0,393 \times (D_{\max}^2 - D_{\min}^2) \times b \times N, \quad (4.1)$$

где D_{\max} – номинальный диаметр, D_{\min} – диаметр за вычетом глубины вмятин, b – длина выступа, N – количество выступов и вмятин на одном метре профиля.

Подставив значения из ГОСТ 6727-80 получим:

$$V = 0,393 \times (3^2 - 2,7^2) \times 0,6 \times 500 = 201,6 \text{ мм}^3$$

Для сравнения найдем номинальный объем метра профиля:

$$V_{\text{ном}} = \frac{M}{\rho}, \quad (4.2)$$

где M – масса метра профиля, ρ – плотность стали.

Подставив значения получим:

$$V_{\text{ном}} = 52 / 0,0078 = 6666,7 \text{ мм}^3$$

Сравнив между собой значения V и $V_{\text{ном}}$, получим экономию металла на погонном метре винтовой арматуры диаметром 3,0 мм равную 3%.

2 Аналогичным образом находим экономию металла на погонном метре винтовой арматуры диаметром 4,0 мм:

$$V = 0,393 \times (4^2 - 3,6^2) \times 0,8 \times 400 = 382,3 \text{ мм}^3$$

$$V_{\text{ном}} = 92 / 0,0078 = 11794,9 \text{ мм}^3$$

Сравнив между собой значения получим экономию 3,2%.

3 Аналогичным образом находим экономию металла на погонном метре винтовой арматуры диаметром 5,0 мм:

$$V = 0,393 \times (5^2 - 4,5^2) \times 1,0 \times 333,3 = 622,2 \text{ мм}^3$$

$$V_{\text{ном}} = 144 / 0,0078 = 18461,5 \text{ мм}^3$$

Сравнив между собой значения получим экономию 3,4%.

4 Определим экономию расхода металла при замене 10% объема выпуска проволоки класса Вр-1 диаметрами 3, 4, 5 мм на винтовые арматурные профили аналогичного диаметра:

- 3,0 мм: годовой выпуск 2870,5 т. При замене 10% на винтовые арматурные профили экономия металла составит 8,61 т.

- 4,0 мм: годовой выпуск 31828,9 т. При замене 10% на винтовые арматурные профили экономия металла составит 101,9 т.

- 5,0 мм: годовой выпуск 44144 т. При замене 10% на винтовые арматурные профили экономия металла составит 150,1 т.

Суммарная экономия металла составит: $8,61 + 101,9 + 150,1 = 260,61$ т.

5 При цене тонны металла 33800 руб. экономический эффект от замены 10% объема выпуска проволоки класса Вр-1 на винтовые арматурные профили составит **8 808 618 руб. (8 млн. 808 тыс. 618 руб.)**

6 Для производства винтовых арматурных профилей в условиях АО “ЕВРАЗ ЗСМК” по предлагаемой технологии не требуется специального оборудования и больших затрат. Стоимость новой конструкции волоки не превысит 7 тыс. рублей.

Стоимость волоки складывается из стоимости корпуса с подшипниками (4 тыс. рублей) и рабочих роликов из твердого сплава (100 рублей ком-

плект, стоимость победита в прутках 1000 руб/кг). Исходя из стойкости роликов (1,5 тонны на комплект), затраты на рабочие ролики составят 5 млн. 200 тыс. рублей в год. Для изготовления 150 сменных корпусов, учитывающих возможность использования переточенных роликов, понадобятся вложения в сумме 600 тыс. рублей. Суммарные годовые затраты составят 5 млн. 800 тыс. рублей в год.

Таким образом экономический эффект от замены 10% объема выпуска проволоки класса Вр-1 на винтовые арматурные профили с учетом затрат составит:

$$\mathbf{\mathcal{E}_{\Phi} = 8\,808\,618 - 5\,800\,000 = 3\,008\,618 \text{ руб. (3 млн. 8 тыс. 618 руб.)}}$$

При увеличении доли винтовой арматуры эффект будет возрастать.

Помимо эффекта от производства винтовых арматурных профилей нужно также рассмотреть эффект от производства винтовых гвоздей. Винтовые гвозди в последнее время пользуются большой популярностью у потребителя, несмотря на высокую стоимость. Винтовые гвозди применяются в индивидуальном строительстве, для стяжки досок пола, обивки наружных стен зданий, при проведении кровельных работ. В промышленности они используются при сборке контейнеров, поддонов, ящиков, плавучих средств, устройство настилов и причалов, в конструкциях подверженных изгибу, вибрации. Популярность применения винтовых гвоздей связана со следующими их достоинствами:

1. С течением времени они самопроизвольно не выходят из своих гнезд, их не нужно периодически добивать;
2. Они легко входят в древесину не портят и не раскалывают ее в отличие от гладких;
3. Винтовые гвозди обеспечивают надежность крепления в 4 раза выше, чем обычные гладкие.

Приведенные выше аргументы объясняют желание предприятий освоить производство винтовых гвоздей. Данный продукт представляет интерес и для метизного производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК». В данном случае эффект будет обусловлен большей ценой винтовых гвоздей по сравнению с обычными, производимыми в условиях метизного производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Среднерыночная цена одного килограмма обычных строительных гвоздей – 53,3 руб., а винтовых гвоздей – 61,16 руб. Ожидаемый экономический эффект рассчитаем исходя из 10% объема винтовых гвоздей от общего производства гвоздей. В 2018 году фактическая отгрузка гвоздей составила 12089 тонн. Годовой экономический эффект от производства винтовых профилей в условиях метизного производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» можно найти по следующей зависимости:

$$\mathcal{E}_Г = [(P_o - P_v) \cdot C_o + P_v \cdot C_v] - P_o \cdot C_o, \quad (4.3)$$

где $\mathcal{E}_Г$ – годовой экономический эффект; P_o , P_v – производство обычных и винтовых гвоздей; C_o , C_v – цена обычных и винтовых гвоздей.

Используя приведенную выше зависимость получим годовой экономический эффект от производства винтовых гвоздей.

$$\mathcal{E}_Г = [(12089 - 1208,9)53300 + 1208,9 \cdot 61160] - 12089 \cdot 53300 = 9 \text{ млн. } 502 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты на производство винтовых гвоздей определим аналогично затратам на винтовые арматурный профили (с поправкой на планируемые объемы производства винтовых гвоздей).

Стоимость волоки складывается из стоимости корпуса с подшипниками 4 тыс. рублей и рабочих роликов из твердого сплава 100 рублей комплект. Исходя из стойкости роликов затраты на рабочие ролики составят 290 тыс. рублей в год. Для изготовления 150 сменных корпусов, учитывающих возможность использования переточенных роликов понадобятся вложения в сумме 90 тыс. рублей. Суммарные годовые затраты составят 890 тыс. рублей в год.

Таким образом экономический эффект от производства винтовых гвоздей с учетом затрат составит:

$$\mathbf{\Xi_{\phi} = 9\,502\,000 - 890\,000 = 8\,612\,000 \text{ руб. (8 млн. 612 тыс. руб.)}}$$

Суммарный годовой экономический эффект от внедрения производства винтовых арматурных профилей и винтовых гвоздей с учетом затрат на новое оборудование составит:

$$\mathbf{3\,008\,618 + 8\,612\,000 = 11\,620\,618 \text{ руб. (11 млн. 620 тыс. 618 руб.)}}$$

Выводы

1. Установлено, что в качестве перспективных при производстве винтовых профилей можно считать арматуру и гвозди, удельный вес которых в общем сортаменте метизного производства составляет 72,5 %.

2. Разработана конструкция волоки для получения винтовых профилей применительно к волочильному оборудованию метизного производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК», показавшая свою работоспособность при опытно-промышленных испытаниях.

3. Разработаны и опробованы в промышленных условиях метизного производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» технологии получения новых видов продукции: винтовой арматуры и винтовых гвоздей. Установлено, что для винтовой арматуры диаметром 3, 4, 5 мм наиболее оптимальным является 4^х заходный винтовой профиль сформированный рабочими роликами диаметром 4 мм установленными под углом 50⁰ к оси заготовки. Разработаны маршруты волочения для винтовой арматуры 5, 4 мм на волочильном стане SKET 4/550, для арматуры 3 мм на стане SKET 6/550. Определены допустимые скорости волочения, которые не должны превышать 338 м/мин.

4. Рассчитан возможный экономический эффект от производства винтовых арматурных профилей и винтовых гвоздей, который составит 11,6 млн. руб. в год. Экономический эффект получен за счет экономии до 4% металла при замене арматуры Вр1 на винтовую и благодаря большей на 15-20% цены винтовых гвоздей по сравнению с обычными.

Заключение

1. Сформулированы и решены задачи по определению условий формирования винтовой поверхности при волочении по новой технологии, исключая 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 формирую-

щих 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 Metallurgy и магистрантов по направлению 22.04.02 Metallurgy.

Список использованных источников

1. Петрик С.М. Анализ тенденций рынка и российской внешней торговли черными металлами в 2007-2012 гг. / С.М. Петрик // Сталь. - 2013. - № 7. - С. 89-92.
2. Антипин В.Г. Состояние и некоторые перспективы мировой черной металлургии / В.Г. Антипин // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 2013. - № 3. - С. 2-19.
3. Жигир И. Рынок строительного проката СНГ / И. Жигир // Металлоснабжение и сбыт. - 2012. - № 12. - С. 88-91.
4. Адно Ю.Л. Металлургия на этапе перехода к новому технологическому укладу / Ю.Л. Адно // Черные металлы. - 2013. - № 7. - С. 9-15.
5. Лобада М. Существенного увеличения выпуска металлопродукции не ожидается / М. Лобада // Металлоснабжение и сбыт. - 2013. - № 9. - С. 14-16.
6. Папин С. Ситуация в российской черной металлургии и перспективы развития (Доклад НП "Русская сталь") / С. Папин // Металлы Евразии . - 2013. - № 4. - С. 11-12.
7. Акулов О. Серьезные вызовы для зрелой отрасли / О. Акулов // Металлоснабжение и сбыт. - 2012. - № 9. - С. 10-13.
8. Жигир И. Перспективы российской стальной индустрии: где точка безубыточности / И. Жигир // Металлоснабжение и сбыт. - 2013. - № 2. - С. 10-17.
9. Лобада М., Хазанов Л. 2013: прогнозы экспорта и потребления (Обзор по материалам конференции "Сталь и сырье из СНГ на мировых рынках - 2013") / М. Лобада, Л. Хазанов // Металлоснабжение и сбыт. - 2013. - № 5. - С. 10-17.
10. Игнатенко Т. Рынок металлов под микроскопом (Обзор по материалам 15-й международной конференции "Российский рынок металлов-2012") / Т. Игнатенко // Металлоснабжение и сбыт. - 2012. - № 12. - С. 14-21.

11. Игнатенко Т. На рынке сорта глубокое погружение (Обзор по материалам конференции "Арматурный и фасонный прокат: новая конфигурация российского рынка") / Т. Игнатенко // Металлоснабжение и сбыт. - 2013. - № 5. - С. 32-40.
12. Игнатенко Т., Лобада М. Рынки плоского проката и труб - 2013 (Обзор по материалам конференции "Рынки плоского проката и труб - 2013") / Т. Игнатенко, М. Лобада // Металлоснабжение и сбыт. - 2013. - № 7-8. - С. 62-68.
13. Жигир И. Мировой рынок стройпроката: итоги 2012г. и перспективы потребления в 2013г./ И. Жигир // Металлоснабжение и сбыт. - 2013. - № 1. - С. 12-23.
14. Жигир И. Перспективы стального потребления СНГ/ И. Жигир // Металлоснабжение и сбыт. - 2013. - № 5. - С. 60-68.
15. Гугис Н.Н. Состояние и основные направления развития прокатного производства России в 2010-2012 гг./ Н.Н. Гугис // Черные металлы. - 2013. - № 7. - С. 24-29.
16. Игнатенко Т. На распутье (Обзор по материалам конференции "Рынки сортового проката и метизов-2012") / Т. Игнатенко // Металлоснабжение и сбыт. - 2012. - № 11. - С. 66-68.
17. Каргин В.Р. Процессы получения винтовых профилей и труб / В.Р. Каргин. – М.: Металлургия, 1994. – 96 с.
18. Данилова Г.Н. Теплообменные аппараты холодильных установок / Г.Н. Данилова, С.Н. Богданов, О.П. Иванов [и др.]. Под общей редакцией Г.Н. Даниловой. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1986. – 330 с.
19. Старостин Ю.С. Ребристые трубы из алюминиевых сплавов / Ю.С. Старостин, М.Ф. Головинов, В.Р. Каргин. – М.: Металлургия, 1983. – 134 с.
20. Барановский Н.В. Пластинчатые и спиральные теплообменники / Н.В. Барановский, Л.М. Коваленко, А.Р. Ястребеницкий. – М.: Машиностроение, 1973. – 288 с.

21. Северденко В.Н. Горячее гидродинамическое выдавливание режущего инструмента. / В.Н. Северденко, В.С. Мурас, Э.Ш. Суходрев. – Минск.: Наука и техника, 1974 . – 256 с.
22. Алюминиевые сплавы: свойства, обработка, применение: Справочник: Пер. с нем. / Под ред. М.Е. Дрица и Л.Х. Райтбарга. – М.: Металлургия, 1979. – 678 с.
23. Ковка и штамповка: Справочник в 4 т. Т.4. Листовая штамповка / Под ред. А.Д. Матвеева. – М.: Машиностроение, 1987. – 544 с.
24. Дружинский И.А. Сложные поверхности: Математическое описание и технологическое обеспечение: Справочник / И.А. Дружинский. – Л.: Машиностроение, 1985. – 263 с.
25. Дорохов А.И. Производство труб / А.И. Дорохов, А.А. Павлов. – М.: Металлургия, 1968 (ВИНИТИ), сб. №20. С. 214-217.
26. Ливанов А.Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А.Н. Ливанов [и др.]. – М.: Металлургия, 1976. – 416 с.
27. Шорин А.И. Производство спирального металлорежущего инструмента методом скручивания двух металлов / А.И. Шорин, В.М. Старостин. – М.: Машгиз, 1968. – 142 с.
28. Тетерин П.К. Теория поперечной и винтовой прокатки / П.К. Тетерин. – М.: Металлургия, 1983. – 270 с.
29. Галкин С.П. Траектории движения деформируемого металла как основа управления процессами радиально-сдвиговой прокатки / С.П. Галкин // Сталь.- 2004. - №7. – С. 63-66.
30. Васильчиков М.В. Поперечно-винтовая прокатка изделий с винтовой поверхностью / М.В. Васильчиков, М.М. Волков. – М.: Машиностроение, 1968. – 142 с.
31. Дорохов А.И. Прокатка тонкостенных труб с внутренними спиральными ребрами на стане ХПТР / А.И. Дорохов, А.П. Усенко // Производство бесшовных труб: сборник №3. – М.: Металлургия, 1975. - С. 79-82.

32. Шухат О.М. Прессование винтовых и кольцевых профилей и труб / О.М. Шухат // Кузнечно-штамповочное производство. – 1977. - №6. – С. 25-27.
33. Каргин В.Р. Волочение винтовых труб / В.Р. Каргин // Цветные металлы. – 1989 . - №2. – С. 102-105.
34. Левитин И.Я. Гидравлические многоплунжерные прессы для безоблойной штамповки в разъемных матрицах / И.Я. Левитин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1977. - №6. - С. 5-7.
35. Каргин В.Р. Исследование процесса волочения винтовых многоканальных труб с винтообразными ребрами / В.Р. Каргин // Исследование в области теории, технологии и оборудования штамповочного производства. – Тула: ТулПИ, 1989. – С. 84-92.
36. Каргин В.Р. Напряженно-деформированное состояние при безоправочном волочении тонкостенных труб через вращаемые волокна / В.Р. Каргин [и др.] // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2009. - №2. – С. 45-49.
37. Тахаутдинов Р.С. Мировой рынок проката и перспективы развития сортопрокатного производства / Р.С. Тахаутдинов [и др.] // Производство проката. – 2008. - №5. – С 22-27.
38. Kumar D.S. High-strength rebar production in the new rolling plant at B.S.R.M. in Bangladesh / D.S. Kumar [et al.] // MPT Int. – 2013. – №1. – P. 42-44, 46.
39. Braga S. Start-up of the modernized rebar mill at Ferriera Valsabbia SpA, Italy. 25 percent capacity boost / S. Braga [et al.] // Metals & Mining. – 2009. - №3. – P. 82-83.
40. Кузнецов Н.А. Оборудование, технология и научные исследования в области производства метизной продукции за рубежом / Н.А. Кузнецов. - Москва : Черметинформация, 2005. - 28 с. - (Прил. к журн. "Бюллетень НТИ Черная металлургия". Метизное приложение).

41. Харитонов В.А. Современное состояние и направления развития технологических процессов производства бунтовой арматурной стали повышенной пластичности / В.А. Харитонов // Производство проката. - 2014. - № 1.- С. 28-32.
42. Харитонов В.А. Выбор эффективной технологии изготовления конкурентоспособной арматурной стали / В.А. Харитонов, И.М. Петров // Сталь. - 2015. - № 7. - С. 41-44.
43. Байкушев А. Малогабаритна машина за студено изтегляне и ореб-ряване на арматурна стомана / А. Байкушев, В. Манолов, Я. Лукарски // Ин-женерни науки. – 2012. – №4. – Р. 71-79.
44. Xinxing: Neuer Drahtauslass // Stahl und Eisen. – 2012. - №10. – Р. 26.
45. ArcelorMittalMonlevade: Zweiadrige Drahtstrabe // Stahl und Eisen. – 2010. – №12. – Р. 24.
46. Borisenko A.Ju. Gefuege und eigenschaften von patentierten hoch-gekoehlten draht / A.Ju. Borisenko [et al.] // Литье и металл. – 2011. - №2. – С. 101-105.
47. Dong Shu-feng. Моделирование процесса патентирования проволо-ки из стали 70 с помощью программы ABAQUS / Shu-feng Dong [et al.] // Jinshu rechuli = Heat treat. Metals. – 2011. – №5. – Р. 128-132.
48. Wang Jin. Контроль деформаций резьбовых стальных прутков в процессе индукционной закалки / Jin Wang [et al.] // Jinshu rechuli = Heat treat. Metals. – 2011. - №6. – Р. 97-100.
49. Стоянов Б. Експериментално изследване на охлаждането на дюза за изтегляне на арматурна стомана / Б. Стоянов, В. Манолов // Инженерни науки. – 2011. – №1. – Р. 68-75.
50. EN 10080. Стальные изделия для армирования бетона. Свариваемая стальная арматура. Общие положения. CEN. - Май 2005. - 75 с.

51. Манолов В. Технология за пресуване на дюзи за студено изтегляне на арматурна стомана / В. Манолов, П. Петров [и др.] // Инженерни науки. – 2010. – №4. – Р. 75-83.

52. Манолов В. Технология за спичане на дюзи за студено изтегляне на арматурна стомана / В. Манолов, П. Петров [и др.] // Инженерни науки. – 2011. – №1. – Р. 54-61.

53. Харитонов В.А. Больше чем холоднодеформированный прокат / В. А. Харитонов // Металлоснабжение и сбыт. - 2009. - №9. - с. 52-57.

54. Харитонов В.А. Некоторые проблемы современного метизного производства и применения арматурной стали класса В500С диам 6,0-12,0 мм / В. А. Харитонов // Черная металлургия. Бюллетень НТИ ЧМ. - 2008. - №4. - с. 82-85.

55. Мадатян С.А. Холоднодеформированная арматура класса В500С: Проблемы и достижения производства и применения / С. А. Мадатян // Метизы. - 2008. - №2. - с.20-25.

56. Харитонов В.А. Современные тенденции развития арматурного проката для ненапряженного железобетона: Европа - Россия / В. А. Харитонов // Стройматериалы. - 2011 - №2. - с. 8-20.

57. Харитонов В.А. Новые технологические возможности получения холоднодеформированного арматурного проката класса В500С с использованием роликовых клеток / В. А. Харитонов // Метиз. - 2009 - №7. - с. 16-20.

58. Бондаренко В.И., Пахомов А.В. Холоднодеформированная арматура класса В 500С / В.И. Бондаренко, А.В. Пахомов // Метиз. – 2005. - №7. – С. 22-26.

59. Мадатян С.А. К развитию производства и применения холоднодеформированной арматуры класса В500С / С.А. Мадатян // Технологии бетонов. – 2007. - №3. – С. 58-61.

60. Харитонов В.А. Особенности метизного производства арматурной стали диаметром 5,0-12,0 мм класса прочности 500 / В.А. Харитонов // Метиз. - 2007. - №9. - с. 21-25.
61. Ивченко А.В. Выбор технологии производства холоднодеформированного арматурного проката / А.В. Ивченко, М.Ю. Амбражей // Метиз. - 2005. - №2. - с. 27-30.
62. Мадатян С.А. Арматура железобетонных конструкций / С.А. Мадатян. – М.: Воентехлит, 2000. – 256 с.
63. Носов А. Сталь нового поколения В500С / А. Носов, Б. Коломиец // Металлоснабжение и сбыт. - 2008. - №3. - с. 76-77.
64. Климов Ю.А. Современное состояние и тенденции развития новых видов арматуры для железобетонных конструкций / Ю.А. Климов // Метиз. - 2006. - №2.-с. 23-24.
65. Ивченко А.В. Опробование технологии производства арматурного проката В500С из катанки повышенной прочности / А.В. Ивченко [и др.] // Метиз. - 2006. - №2. - с. 25-28.
66. Ивченко А.В. Производство арматурного проката класса В500С из катанки повышенной прочности / А.В. Ивченко [и др.] // Метизы. - 2006. - №3(13). - с. 40-43.
67. Ивченко А.В. Холоднодеформированный арматурный прокат класса В500С промежуточного состава - перспективы производства / А.В. Ивченко [и др.] // Метиз. - 2007. - №10. - с. 14-17.
68. Производство арматуры класса В500С: Промышленное освоение / Информационно-аналитическое агентство Ассоциации «РосМетиз» // Метизы. - 2008. - №1(17). - с. 49-53.
69. Харитонов В.А. Современное состояние и тенденции метизного производства холоднодеформированной арматурной стали класса прочности 500 диам. 5,0-12,00 мм / В.А. Харитонов // Черная металлургия. Бюллетень НТИ ЧМ. - 2008. - №3. - с. 73-79.

70. Харитонов В.А. Повышение конкурентоспособности холоднодеформированного арматурного проката путем совершенствования технологии и оборудования для его производства / В.А. Харитонов // Черная металлургия. Бюллетень НТИ ЧМ. - 2009. - №6. - с. 15-22.

71. Харитонов В.А. Новые направления в технологии производства высококачественного холоднодеформированного проката класса В500С / В.А. Харитонов, А.В. Харитонов // Черная металлургия. Бюллетень НТИ ЧМ. - 2010. - №1. - с. 63-67.

72. Аникеев В.В. Холоднодеформированный прокат. Кому это нужно? / В.В. Аникеев, В.А. Харитонов // Металлоснабжение и сбыт. - 2010. - №4. - с.54-60.

73. Полторацкий Л.М. Возможности освоения производства холоднодеформированной арматуры В500С / Л.М. Полторацкий [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. - 2010. - №8. - с. 18-19.

74. Белов Е.Г. Производство арматурного проката периодического профиля класса В500С / Е.Г. Белов [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. - 2010. - №12. - с. 42-44.

75. Харитонов В.А. Анализ состояния производства и применения холоднодеформированного арматурного проката класса В500А в Европе / В.А. Харитонов, А.В. Харитонов // Черная металлургия. Бюллетень НТИ ЧМ. - 2011. - №5. - с. 58-65.

76. Гурьянов Г.Н. Зависимость допустимой степени деформации проволоки от трения, запаса прочности и деформационного упрочнения // Сталь. - 2013. - № 4.- С. 49-54.

77. Паршин С.В. Влияние условий волочения и вида обработки заготовки на развитие дефектов поверхности // Сталь. - 2013. - № 8.- С. 50-52.

78. Фетисов В.П. Структурные аспекты снижения пластичности высокопрочной проволоки при больших суммарных обжатиях // Черная металлургия. Бюллетень НТИ ЧМ. - 2013. - № 1.- С. 77-79.

79. Филиппова М.В. Математическое моделирование прокатки шаров / М.В. Филиппова [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. - 2017. - № 7. - С. 516-520.

80. Рубцов В.Ю. Применение переменной скорости вращения валков в поперечно-винтовой прокатке с целью повышения их ресурса / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко // Черная металлургия. Бюллетень НТИ ЧМ. - 2017. - № 11. - С. 72-76.

81. Будников А.С. Определение диаметра валков станов винтовой прокатки / А.С. Будников, Б.А. Романцев, Е.А. Харитонов // Известия вузов. Черная металлургия. - 2018. - № 9. - С. 683-687.

82. Гетманова М.Е. Исследование особенностей деформационного воздействия на структуру металла при продольной и винтовой прокатке / М.Е. Гетманова [и др.] // Проблемы черной металлургии и материаловедения. - 2017. - № 4. - С. 13-24.

83. Рубцов В.Ю. Калибровка шаропрокатных валков с непрерывно меняющимся шагом / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко // Черная металлургия. Бюллетень НТИ ЧМ. - 2018. - № 8. - С. 58-63.

84. Фридлянов Б. Винтовая арматура для строительства / Б. Фридлянов // Металлоснабжение и сбыт. - 2001. - №4. - с. 34-35.

85. Котенок В.И. Прокатка винтовой арматуры класса V и выше. Новые разработки / В.И. Котенок [и др.] // Национальная металлургия. – 2007. – сентябрь. - с. 12-14.

86. Пат. 2425897 Российская Федерация, МПК C21D 8/06. Способ изготовления стержневого проката винтового профиля / А.Б. Юрьев [и др.]; заявитель и патентообладатель Западно-Сиб. металлургический комбинат. – № 2010119177/02 ; заявл. 12.05.2010 ; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 22.

87. Будников, А.С. Исследование разностенности труб в процессе редуцирования на трехвалковом стане винтовой прокатки / А.С. Будников, Е.А. Харитонов, Ф.В. Сорокин // Сталь. - 2017. - № 10. - С. 31-34.

88. Романцев Б.А. Компьютерное моделирование прошивки заготовок в четырехвалковом стане винтовой прокатки / Б.А. Романцев [и др.] // Металлург. - 2017. - № 9. - С. 19-24.
89. Скрипаленко М.М. Прогнозирование разрушения металла при винтовой прокатке в двухвалковом стане / М.М. Скрипаленко [и др.] // Металлург. - 2017. - № 11. - С. 11-18.
90. Романцев Б.А. Исследование процесса винтовой прокатки в четырехвалковой клети методом моделирования / Б.А. Романцев [и др.] // Металлург. - 2018. - № 7. - С. 15-20.
91. Богатов А.А. Компьютерное моделирование процесса прошивки заготовок при винтовой прокатке / А.А. Богатов, Д.Ш. Нухов, В.А. Топоров // Металлург. - 2017. - № 2. - С. 13-17.
92. Щедрин А.В. Перспективные методы комбинированного волочения / А.В. Щедрин [и др.] // Производство проката. – 2007. - №10. – с. 25-28.
93. Фастыковский А.Р. Снижение энергопотребления при получении длинномерных винтовых профилей волочением / А.Р. Фастыковский [и др.] // Производство проката. – 2013. - №10. – с. 40-42.
94. Паршин С.В. Процессы и машины для изготовления профильных труб / С.В. Паршин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 356 с.
95. А. с. 1489885 СССР, МПК В21D 15/04. Устройство для получения спирально-профилированных труб / В.С. Паршин, С.Ю. Беляев [и др.]; Уральский политехнический институт им. С.М. Кирова, Ревдинский завод по обработке цветных металлов. - №4325414; заявл. 06.11.87; опубл. 30.06.89, Бюл. №24.
96. Свидетельство на полезную модель 30104 Российская Федерация, МПК В21Н 7/14. Устройство для получения спирально-профилированных труб из трубных заготовок / С.Ю. Беляев, С.В. Паршин; ГОУ Уральский государственный технический университет. - №2002122827/20; заявл. 26.08.02; опубл. 20.06.03, Бюл. №17.

97. Паршин С.В. Разработка универсальной установки для изготовления спирально-профилированных труб / С.В. Паршин // Производство проката. – 2007. - №12. – с. 27-30.

98. Пат. 2275980 Российская Федерация, МПК В21С 3/08. Роликовая головка для накатки винтовой поверхности на круглой проволоке / В.Д. Есипов; заявитель и патентообладатель Череповецкий сталепрокатный завод. – № 2004129677/02; заявл. 12.10.2004; опубл. 10.05.2006.

99. Пат. 2339478 Российская Федерация, МПК В21D 15/04. Устройство для профилирования многозаходных винтовых труб / С.В. Паршин; заявитель и патентообладатель Уральский государственный технический университет. – № 2007113265/02; заявл. 09.04.2007; опубл. 27.12.2008, Бюл. №36.

100. Пат. 2342209 Российская Федерация, МПК В21D 11/14. Устройство для производства профильных труб / С.В. Паршин; заявитель и патентообладатель Уральский государственный технический университет. – № 2007113292/02; заявл. 09.04.2007; опубл. 27.11.2008, Бюл. №33.

101. Пат. 2121405 Российская Федерация, МПК В21D 15/04. Способ изготовления винтовых деталей и устройство для его осуществления / Р.И. Вильданов [и др.]; заявитель и патентообладатель Лукойл Башкортастан. – № 95121922/02; заявл. 20.12.95; опубл. 10.11.1998.

102. Пат. DE102006057762 A1 Германия, МПК⁸ В23 Р13/02 (2006.01), В21 Н3/02 (2006.01). Способ изготовления винтов с головкой / М. Bohuslav [et al.]; Technische Univ. Chemnitz. - №DE200610057762; заявл. 07.12.2006; опубл. 19.06.2008.

103. 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.

104. Ицкевич Г.М. Сопротивление материалов [Текст] / Г.М. Ицкевич. – М.: Высшая школа, 1986. – 352 с.

105. Фастыковский А.Р., Чинокалов Е.В. 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.

106. Усольцев А. А. Общая электротехника: Учебное пособие / А. А. Усольцев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 301 с.

107. Фастыковский А.Р., Чинокалов Е.В. 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.

108. Фастыковский А.Р., Чинокалов Е.В. 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.

109. Фастыковский А.Р., Чинокалов Е.В. 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.

110. ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. – Взамен ГОСТ 380-94; введ. 2008-01-01. – М.: Стандартинформ, 2007. – 10 с.

111. 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.

112. Иванова В.М. Математическая статистика [Текст] / В.М. Иванова [и др.]. – М.: Высшая школа, 1991. – 367 с.

113. Королев Ю.Г. Метод наименьших квадратов в социально – экономических исследованиях / Ю.Г. Королев. – М.: Статистика, 1980. – 111 с.
114. Никулин А. Н. Винтовая прокатка. Напряжения и деформация / А. Н. Никулин. – М.: Металлургиздат, 2015. – 380 с.
115. Чинокалов Е.В., Фастыковский А.Р. 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.
116. Чинокалов Е.В., Фастыковский А.Р. 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.
117. Чинокалов Е.В., Фастыковский А.Р. Способ получения винтовой поверхности волочением без скручивания / Е.В. Чинокалов, А.Р. Фастыковский // Труды XI международного конгресса прокатчиков. – 2017. – Т.2. – С. 262-265.
118. Фастыковский А.Р., Чинокалов Е.В., Милованов В.Г. Холоднотянутая арматурная проволока с винтовым профилем / А.Р. Фастыковский, Е.В. Чинокалов, В.Г. Милованов // Металлург. – 2014. - №6. - С. 124-127.
119. Фастыковский А.Р., Лебошкин Б.М., Чинокалов Е.В., Кадыков В.Д., Мыскова Н.В. Инновационная технология получения длинномерных винтовых профилей / А.Р. Фастыковский, Б.М. Лебошкин, Е.В. Чинокалов, В.Д. Кадыков, Н.В. Мыскова // Сталь. – 2014. - №10. - С. 48-50.
120. Фастыковский А.Р., Чинокалов Е.В. Особенности получения длинномерных винтовых профилей волочением без скручивания / А.Р. Фастыковский, Е.В. Чинокалов // Черные металлы. – 2019. - №6. – С. 35-38.

121. Фастыковский А.Р., Чинокалов Е.В. Разработка инновационной продукции волочильного производства / А.Р. Фастыковский, Е.В. Чинокалов // Сталь. – 2019. - №7. – С. 50-51.
122. Шевакин Ю.Ф. Технологические измерения и приборы в прокатном производстве / Ю.Ф. Шевакин [и др.]. – М.: Металлургия, 1973. – 367 с.
123. Перлин И.Л., Ерманюк М.З. Теория волочения / И.Л. Перлин, М.З. Ерманюк. 2-е изд. - М.: Металлургия, 1971. - 448 с.
124. Белалов Х. Н. Получение проволоки волочением : учебное пособие для вузов / Х. Н. Белалов [и др.]. - Магнитогорск: МГТУ, 2005. - 210 с.
125. Белалов Х. Н. Производство стальной проволоки : монография / Х. Н. Белалов [и др.]. - Магнитогорск : МГТУ им. Г. И. Носова, 2006. - 544 с.
126. Крымчанский И.И. Производство проволоки из углеродистых марок сталей: Учебное пособие / И.И. Крымчанский, С.А. Терских, С.И. Платов, С.А. Морозов. - Магнитогорск: МГТУ, 1999. - 106 с.
127. Никифоров Б.А., Харитонов В.А., Копьев А.В. Технология волочения проволоки и плющения ленты: Учеб. пособие / Б.А. Никифоров, В.А. Харитонов, А.В. Копьев. - Магнитогорск: МГТУ, 1999. - 354 с.
128. Харитонов В.А., Радионова Л.В. Формирование свойств углеродистой проволоки холодной деформацией: Монография / В.А. Харитонов, Л.В. Радионова. - Магнитогорск: МГТУ, 2001. - 127 с.
129. Луценко В.А. Влияние структуры катанки, подвергнутой термомеханической обработке, на качественные характеристики высокопрочной бортовой проволоки / В.А. Луценко, Г.В. Левченко и др. // Черные металлы. - 2013. - № 10. - С. 52-55.
130. Луценко В.А. Влияние термомеханической обработки в потоке высокоскоростного проволочного стана на качественные характеристики высокоуглеродистой катанки / В.А. Луценко, О.В. Луценко и др. // Metallurgical and Mining Industry. - 2012. - № 2.- С. 60-63.

131. Сычков А.Б., Малашкин С.О. Закономерности формирования структуры и свойств бунтового проката для производства проволоки / А.Б. Сычков, С.О. Малашкин // *Металлург*. - 2016. - № 8. - С. 87-93.

132. Полторацкий Л. М. Бескислотная технология производства проволоки из малоуглеродистой стали / Л. М. Полторацкий [и др.]. - Федер. агентство по образованию, ГОУ ВПО "СибГИУ", ООО "Евразхолдинг", ОАО "ЗСМК". – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2008. - 174 с.

133. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Взамен ГОСТ 1497-73; введ. 1984-07-16. – М.: Стандартинформ, 2008. – 22 с.

134. ГОСТ 12004-81. Сталь арматурная. Методы испытаний на растяжение. – Взамен ГОСТ 12004-66; введ. 1983-07-01. – М.: Стандартинформ, 2008. – 59 с.

135. Технические условия ТУ 14-1-5627-2012 “Прокат арматурный холоднодеформированный периодического профиля класса В500С”. Москва.-ФГУП им. И.П. Бардина, ТК 375, регистрационный №005/026200-4М-00596 от 22.06.2012, 12 с.

136. Технические условия ТУ 14-1-5638-2013 “Прокат арматурный холоднодеформированный периодического профиля класса В550С”. Москва.-ФГУП им. И.П. Бардина, ТК 375, регистрационный №005/026200-4М-00621 от 03.06.2013, 11 с.

137. Ивченко А.В. Совершенствование стандартов и методов испытания арматурного проката на растяжение / А. В. Ивченко, Ю. П. Гуль // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 2014. - №6. - С. 125-128.

138. ГОСТ 6727-80. Проволока из низкоуглеродистой стали холоднотянутая для армирования железобетонных конструкций. – Взамен ГОСТ 6727-53; введ. 1983-01-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 6 с.

139. ГОСТ 30136-94. Катанка из углеродистой стали обыкновенного качества. Технические условия. – Введен впервые; введ. 1998-01-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. – 11 с.

140. Бейзельман Р.Д. Подшипники качения. Справочник /Р.Д. Бейзельман, В.В. Цинкин, Л.Я. Перель. – М.: Машиностроение , 1968. - 563 с.

141. Нарышкин В.Н. Подшипники качения. Справочник / В.Н. Нарышкин, Р.В. Коросташевский. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

Приложение 1

Экспертное заключение НИИЖБ

Разработанная АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» совместно с ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» технология производства длинномерных многозаходных винтовых профилей волочением без скручивания является энергоэкономичным и эффективным способом получения новых видов арматурной проволоки и винтовых гвоздей.

Достоинством получаемой арматурной проволоки с многозаходным винтовым профилем, по сравнению с классическим периодическим профилем арматурной проволоки класса Вр-1 по ГОСТ 6727-80, является одинаковая несущая способность по всему сечению профиля. При использовании в строительстве это позволяет снизить расход металла на 3-3,5% по сравнению с проволокой Вр-1 аналогичного диаметра, что весьма актуально в современных экономических условиях.

Другим достоинством разработанной технологии является возможность получения винтовых гвоздей на оборудовании для производства обычных гвоздей. Благодаря этому снижается себестоимость производства винтовых гвоздей и одновременно повышается маржинальность, так как винтовые гвозди имеют более высокую цену по сравнению с обычными.

Таким образом, разработанная технология будет полезна как для производителей, так и для потребителей арматурной проволоки и винтовых гвоздей.

Начальник отдела инновационных разработок
и конструктивных решений Центра проектирования
и экспертизы НИИЖБ им.А.А.Гвоздева
АО «НИЦ «Строительство, д.т.н.

И.Н. Тихонов



Подпись Тихонова Игорь Николаевич удостоверяю.

Технический специалист по передаче Иван И.Р. Теткин



Приложение 2

Утверждаю:

Проректор по учебной работе

первый проректор

к.т.н., доцент

А.В. Феоктистов



« 26 » декабря 2017 г.

Справка

о внедрении в учебный процесс
результатов диссертационной работы
соискателя Чинокалова Евгения Валерьевича

Результаты диссертационного исследования Е.В. Чинокалова внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» и используются при обучении бакалавров по направлению подготовки 22.03.02 Металлургия, профиль «Обработка металлов давлением». Полученные автором новые научные данные о закономерностях формирования длинномерных винтовых поверхностей волочением, разработанная методика определения условий, обеспечивающих заданный шаг винтовой поверхности, используются при проведении лекционных и практических занятий, а также при выполнении курсовой работы по учебной дисциплине «Технология прессования и волочения». Внедрение в учебный процесс проведено на основании решения кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК», протокол № 4-16 от 30 ноября 2016 г.

Начальник учебно-методического
управления,
к.т.н., доцент

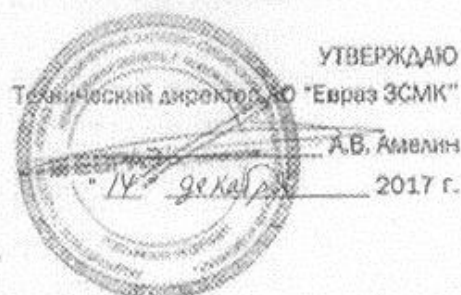
О.Г. Приходько

Заведующий кафедрой
«Обработки металлов давлением
и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК»
д.т.н., профессор

А.Р. Фастыковский

Приложение 3

ЕВРАЗ



использования результатов диссертационной работы Е.В. Чинокалова
"Разработка научных и технологических основ волочения длинномерных
винтовых профилей"

Настоящим актом подтверждается, что проведенные в 2013-2017 гг. в рамках диссертационной работы Чинокалова Е.В. научные и технологические исследования, позволили в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК»:

- рекомендовать энергоэкономичный и технологически эффективный способ формирования винтовых поверхностей при холодном волочении стальных профилей;
- разработать, в соответствии с патентом Российской Федерации №3552738 "Способ производства винтовых профилей", технологические режимы и, в соответствии с патентом Российской Федерации №143099 "Роликовая полоха", волочильный инструмент новой оригинальной конструкции для получения длинномерных винтовых профилей с требуемым геометрическим профилем;
- разработать рекомендации по применению холоднодеформированных винтовых профилей для производства новых видов арматурной проволоки (в т.ч. взамен класса ВР-1 по ГОСТ 6727) и винтовых гвоздей повышенной сцепляемости.

Проведенное опытно-промышленное опробование подтвердило возможность получения винтовых гвоздей. Внедрение технологии не требует специального дорогостоящего оборудования. Стоимость комплекта новой волоки складывается из стоимости корпуса с подшипниками (~3 тыс. рублей) и рабочих роликов из твердого сплава (~4 тыс. рублей), т.е. не превышает 7 тыс. рублей.

Внедрение результатов диссертационной работы Е.В. Чинокалова позволит повысить эффективность работы за счет расширения ассортимента метизной продукции, возможной реализации ее с более высокой стоимостью.

Возможный экономический эффект составит 11,6 млн. руб. в год (расчет прилагается).

И.о. начальника сталепрокатного производства

М.Б. Лебошкин

Акционерное общество «ЕВРАЗ Облудинский Завод» - Сибирский металлургический комбинат