

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права
УДК 621.778.073

МАРТЬЯНОВ
Юрий Вадимович

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО МЕТАЛЛОКОРДА
ВОЛОЧЕНИЕМ И СВИВКОЙ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ ИЗГИБОМ
И НАТЯЖЕНИЕМ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.16.05 – обработка металлов давлением

Минск, 2024

Работа выполнена в учреждении образования «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого».

Научный руководитель

БОБАРИКИН Юрий Леонидович,
кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Металлургия и технологии обработки
материалов» учреждения образования
«ГГТУ им. П. О. Сухого»

Официальные оппоненты:

ТОМИЛО Вячеслав Анатольевич,
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой «Машины и технология обра-
ботки металлов давлением им. С. И. Губкина»;

ПИЛИПЕНКО Станислав Владимирович,
кандидат технических наук, доцент кафедры
автомобильного транспорта учреждения образо-
вания «Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой»

Оппонирующая
организация

Государственное научное учреждение «Физико-
технический институт Национальной академии
наук Беларуси»

Защита состоится 7 мая 2024 года в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 в Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202, тел. ученого секретаря: +375 17 331 30 58, e-mail: plazteh@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «__» апреля 2024 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
доктор технических наук, профессор



О. Г. Девойно

© Мартьянов Ю. В., 2024
© Белорусский национальный
технический университет, 2024

ВВЕДЕНИЕ

В современном мировом метизном производстве удельная доля белорусского металлокорда для шинной автомобильной промышленности составляет около 14 %. Самым востребованным является высокопрочный металлокорд класса прочности НТ (*High Tensile* – высокопрочный) с пределом прочности около 3000 МПа. В Республике Беларусь в год в среднем производится 4500 тонн металлокорда класса прочности НТ. Металлокорд представляет собой витое изделие из проволоки диаметром от 0,1 до 1 мм, которое используется в качестве армирующего элемента автомобильных шин и резиновых полотен. Наиболее распространенный класс прочности металлокорда НТ изготавливается из стали 80. Известные методы получения высокопрочного металлокорда (волочение проволоки на волочильных станах, свивка металлокорда из проволоки на канатных машинах) не в полной мере обеспечивают низкий показатель отклонения от прямолинейности металлокорда (менее 80 мм на длине 600 мм). Это сдерживает процессы автоматизации производства автомобильных шин, так как автоматические линии производства шин переводятся в ручной режим, что значительно снижает производительность. Основной причиной отклонения от прямолинейности металлокорда являются остаточные напряжения, возникающие в металле в процессе волочения проволоки и свивки металлокорда из проволоки.

Для достижения низкого показателя отклонения от прямолинейности металлокорда в современном производстве используются технические и технологические способы, основанные на изгибе и натяжении при волочении проволоки и изгибе металлокорда при свивке. Известные способы не позволяют снизить отклонение от прямолинейности металлокорда до низкого показателя в связи с отсутствием учета неравномерности распределения остаточных напряжений по сечению проволоки и металлокорда, отсутствием учета суммарных напряжений и макроперемещений проволок в конструкции металлокорда.

Производство металлокорда с низким показателем отклонения от прямолинейности носит актуальный и важный характер, так как данное требование современных компаний-потребителей является основным и обязательным. При несоответствии металлокорда поставленным требованиям возникают рекламации и возврат металлокорда с последующей его заменой или исправлением, что накладывает дополнительную нагрузку на предприятие-производитель металлокорда.

С учетом представленного актуальной является задача разработки технологии производства высокопрочного металлокорда с низким показателем отклонения от прямолинейности с использованием контролируемого натяжения и изгиба.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами, темами

Диссертационная работа выполнена в учреждении образования «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого», тема диссертационного исследования соответствует перечню приоритетных направлений

фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015, 2016–2020, 2021–2025 гг.

Исследования по теме диссертации выполнялись в рамках научно-исследовательских работ «Разработка технологических основ снижения отклонения от прямолинейности и снижения обрывности металлокорда из высокоуглеродистой стальной латунированной проволоки» (проект ГБ 51/14, № гос. рег. 20141914, 2014–2015 г.), задания 2.4.04, подпрограммы «Металлургия», ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия»: «Влияние свойств катанки и грубого волочения на обрывность» (проект ГБ 51/16 № гос. рег. 20162396, 2016–2018 г.), гранта Министерства Образования Республики Беларусь на выполнение научно-исследовательских работ аспирантами «Снижение отклонения от прямолинейности металлокорда с использованием оценки остаточных напряжений в тонкой проволоке» (проект ГБ 51/19, 2019 г.)

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью работы является разработка технологии производства высокопрочного металлокорда волочением и свивкой с контролируемым изгибом и натяжением.

Для достижения поставленной *цели* необходимо решить следующие *задачи*:

- провести анализ современных технологий уменьшения отклонения от прямолинейности металлокорда;
- исследовать влияние скорости тонкого волочения тонкой проволоки на волочильном стане на величину и равномерность остаточных напряжений;
- исследовать влияние дополнительного натяжения тонкой проволоки в узле намотки волочильного стана на величину и равномерность остаточных напряжений;
- исследовать влияние дополнительного изгиба металлокорда в канатной машине на отклонение от прямолинейности металлокорда;
- исследовать влияние величины натяжения металлокорда в узле намотки канатной машины на отклонение от прямолинейности металлокорда;
- разработать и внедрить технологию производства высокопрочного металлокорда волочением и свивкой с контролируемым изгибом и натяжением.

Объектом исследования являются тонкая стальная высокоуглеродистая латунированная проволока и металлокорд, свитый из этой проволоки. Предметом исследования в диссертации является отклонение от прямолинейности металлокорда, а область исследований включает формообразование заготовок и полуфабрикатов методами волочения и свивки, а также процессы деформирования и свойства продукции, получаемой из металлов.

Научная новизна

1. Установлена зависимость величины остаточных напряжений на поверхности стальной высокоуглеродистой латунированной проволоки от скорости волочения с помощью разработанной численной модели волочения, учитывающей механические свойства проволоки. Установлена скорость волочения 11–12 м/с для высокоуглеродистой проволоки 0,30НТ, обеспечивающая минимальные остаточные напряжения в поперечном сечении проволоки за счет изменения условий контактного взаимодействия проволоки и инструмента.

2. Установлено влияние на отклонение от прямолинейности металлокорда дополнительного натяжения проволоки в потоке волочильного стана в узле намотки проволоки на приемную катушку. Установлено оптимальное значение величины дополнительного натяжения проволоки класса прочности НТ (сталь 80), соответствующее величине 65–70 % от предела прочности проволоки, которое повышает равномерность распределения остаточных напряжений в поперечном сечении проволоки.

3. Сформулировано условие уменьшения отклонения от прямолинейности металлокорда, учитывающее диаметры роликов канатной машины и угол охвата роликами проволоки и металлокорда, заключающаяся в максимальном приближении суммарной кривизны роликов канатной машины к нулю, позволяющее рассчитать количество и диаметры дополнительных роликов. Определено, что для металлокорда 2x0,30 НТ при использовании направляющего деформирующего ролика $R_{\text{дон}}$ диаметром 84 мм, а деформирующего ролика R_n диаметром 44 мм суммарная кривизна с учетом угла охвата роликов составляет $0,0415 \text{ мм}^{-1}$, что на 10–11 % ближе к нулю, чем без использования дополнительных роликов.

4. Установлено влияние дополнительного натяжения металлокорда в узле намотки канатной машины на отклонение от прямолинейности металлокорда. Установлено, что дополнительное натяжение металлокорда в узле намотки канатной машины 25 Н для простых конструкций высокопрочного металлокорда позволяет дополнительно снизить отклонение от прямолинейности металлокорда на 30–32 % за счет ограничения величины смещения точек контакта проволок в металлокорде.

5. Установлено влияние суммарных эквивалентных напряжений, смещений точек контакта проволок в конструкции металлокорда, диаметра деформирующего ролика при изгибе металлокорда с дополнительным натяжением на отклонение от прямолинейности металлокорда.

Положения, выносимые на защиту

1. Теоретически и экспериментально полученные зависимости влияния скорости волочения тонкой стальной высокоуглеродистой проволоки на величину и распределение остаточных напряжений по поперечному сечению проволоки, позволившие определить диапазон скоростных режимов волочения, уменьшающий абсолютную величину и обеспечивающий максимальную равномерность распределения остаточных напряжений в поперечном сечении тонкой стальной высокоуглеродистой проволоки, что, в свою очередь, обеспечивает уменьшение отклонения от прямолинейности проволоки.

2. Теоретически и экспериментально полученные зависимости отклонения от прямолинейности проволоки от величины дополнительного натяжения тонкой стальной высокоуглеродистой проволоки в потоке волочильного стана и изменения величины остаточных напряжений во времени, что позволило установить величину дополнительного натяжения проволоки в потоке волочильного стана для уменьшения отклонения от прямолинейности проволоки и металлокорда.

3. Теоретически и экспериментально установленная взаимосвязь суммарной кривизны роликов канатной машины, зависящая от диаметров роликов канатной машины и углов охвата роликов канатной машины металлокорда, с отклонением от

прямолинейности металлокорда, что позволило сформулировать условие минимизации отклонения от прямолинейности металлокорда, за счет оптимизации диаметров дополнительных роликов канатной машины.

4. Построенная компьютерная модель изгиба металлокорда на ролике, учитывающая условие уменьшения отклонения от прямолинейности металлокорда конструкцию металлокорда, диаметры деформирующих роликов в узле намотки канатной машины, величину эффективных напряжений в металлокорде, величину смещений точек контакта в конструкции металлокорда при его изгибе, величину дополнительного натяжения металлокорда в узле намотки канатной машины, позволившая разработать критерий оценки прямолинейности металлокорда $Sg(R)$, основанный на контроле значений относительных разниц эффективных напряжений и смещений точек контакта в конструкции металлокорда, позволяющий качественно сравнивать отклонение от прямолинейности различных режимов получения металлокорда.

Личный вклад соискателя ученой степени

Все основные результаты, представленные в диссертации, получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии, в том числе, составляющие научную новизну и определяющие научную значимость работы и представленные в основных положениях, выносимых на защиту.

Работа выполнена под руководством кандидата технических наук, доцента Бобарикина Ю. Л., который определил тему, цели и задачи диссертации, а также оказывал всеобъемлющую консультационную и практическую помощь на всех этапах выполнения диссертационной работы.

Соавторы научных публикаций, результаты которых вошли в диссертацию, принимали участие в обсуждении результатов исследований и выборе методик (доктор технических наук, профессор Верещагин М. Н., старший преподаватель Авсейков С. В.), а также при проведении экспериментальных исследований (кандидат технических наук Веденеев А. В., инженер Ходосовская О. Ю.).

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований доложены и обсуждены на XIV–XIX Международных научно-технических конференциях (МНТК) «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления» (г. Гомель 2014–2022); 30-й Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия» (г. Минск, 2022); Научно-практической конференции «Пластична деформация металів» (г. Днепр, 2017); Республиканском форуме молодых ученых учреждения высшего образования (г. Витебск, 2022); 5th International Youth Scientific and Technical Conference «Magnitogorsk Rolling Practice 2020» (г. Магнитогорск, 2020); XI–XIV МНТК «Машиноведение» (г. Гомель, 2016–2022); XIX International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, production engineering and physics» (г. Ченстохова, 2018); VIII МНТК «Беларусь в современном мире» (г. Гомель, 2015);

Результаты диссертации успешно апробированы в лабораторных и промышленных условиях, а также внедрены в производственный процесс получения высокопрочного металлокорда на ОАО «Белорусский металлургический

завод – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания» и в учебный процесс кафедры «Металлургия и технологии обработки материалов» УО «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого». Разработана и внедрена в учебный процесс кафедры «Металлургия и технологии обработки материалов» УО «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого» типовая технология производства высокопрочного металлокорда из проволоки диаметром 0,30–0,35 мм с низким показателем отклонения от прямолинейности.

Опубликование результатов диссертации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 36 изданиях, в том числе в 11 изданиях, входящих в перечень ВАК РБ, 5 изданиях, не включенных в перечень ВАК, 1 монографии, 17 материалах конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка литературы из 96 наименований и 8 приложений, содержит 70 рисунков, 51 таблиц и изложена на 152 страницах машинописного текста.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первая глава посвящена анализу современного состояния и перспектив развития технологии производства высокопрочного металлокорда. Производство высокопрочного металлокорда относится к метизному производству (четвертый металлургический передел). Основной заготовкой для производства металлокорда является катанка диаметром 5,5 мм. Для производства высокопрочного металлокорда катанка подвергается очистке, промывке, нанесению подмазочного слоя, грубому волочению (грубо-среднему волочению) до диаметра 1–1,5 мм, патентированию–латунированию (термообработка и нанесение латунного слоя химико-термическим способом), тонкому (мокрому) волочению на волочильных станах со скольжением до предельного диаметра 0,1 мм, свивке на канатных машинах.

Окончательный комплекс механических свойств формируется на этапе тонкого волочения. На этапе тонкого волочения производится тонкая проволока к тонкой проволоке относится проволока диаметром от 0,1 мм до 1 мм. Наиболее распространенным диаметром является 0,3 мм. Удельная доля производства такой проволоки в Республике Беларусь составляет около 80 %. Высокопрочная проволока класса прочности НТ (*High Tensile*) имеет предел прочности около 3000 МПа. Такой уровень прочности достигается за счет большой вытяжки на волочильном стане со скольжением и упрочнении проволоки за счет деформации.

Все этапы производства металлокорда влияют на технологические свойства металлокорда, включая показатель отклонения от прямолинейности. Для повышения равномерности распределения внутренних напряжений в проволоке используется способ натяжения проволоки в потоке волочильного стана после обработки в волоках. Но, известное решение не используется для влияния на прямолинейность металлокорда. Для решения проблемы повышения

прямолинейности металлокорда используются рихтовки. Но, использование рихтовок не позволяет решить проблему отклонения металлокорда от прямолинейности в необходимых диапазонах. Показаны преимущества и недостатки известных способов снижения отклонения от прямолинейности металлокорда.

Во второй главе приводится описание используемых методов исследования. Для определения механических характеристик тонкой проволоки использован метод разрыва (ГОСТ 1497-84) с использованием разрывной машины *INSTRON* 5969. Для определения остаточных напряжений в проволоках металлокорда использован метод замера прогибов с использованием азотной кислоты для снятия материала и компьютерных средств для обработки высоты прогиба проволоки. Для подтверждения результатов моделирования распределения остаточных напряжений по сечению тонкой проволоки использован метод измерения микротвердости по ГОСТ 9450-76. Для имитации свивки металлокорда на канатной машине использован лабораторный стенд для свивки с подвижной кареткой и шаблоном. В соответствии с ГОСТ 14311-85 к проволоке и металлокорду предъявляются требования по отклонению от прямолинейности. Для определения отклонения от прямолинейности проволоки и металлокорда использован метод измерения высоты дуги прогиба на специальной линейке длиной 600 мм (ТУ 615-2012). При измерении отклонения от прямолинейности проволоки и металлокорда использовалась выдержка на катушке диаметром 80 мм.

В третьей главе произведены теоретические исследования волочения тонкой проволоки с различными скоростями и натяжением, а также обратного изгиба металлокорда на ролике в узле намотки канатной машины, исследовано влияние натяжения металлокорда в узле намотки канатной машины на внутренние напряжения, предложен инструмент анализа компьютерной модели для определения оптимального диаметра деформирующего ролика, обеспечивающего минимальное отклонение от прямолинейности металлокорда, предложен подход к аналитическому решению поставленной задачи.

Для построения модели волочения были приняты следующие допущения:

1. Проволока принимается сплошным цилиндрическим телом без поверхностных дефектов.

2. Рабочая поверхность волюки принимается гладкой и без дефектов.

3. Коэффициент трения принимается постоянным на всем промежутке исследования.

4. Задача осесимметричная.

5. Процесс безынерционный.

Проволока протягивается с помощью вспомогательного тянущего инструмента в виде цилиндра диаметром меньше конечного диаметра проволоки. Протяжка осуществляется через все зоны волюки с постоянной скоростью в диапазоне 1–14 м/с. Для замера остаточных напряжений длина проволоки ограничена 100 мм. Моделирование считается законченным, когда вся длина образца проволоки пройдет через волюку.

После моделирования получено цветокодированное изображение распределения остаточных напряжений в проволоке. Максимальные остаточные напряжения после волочения преобладают в сечении $0,5R$. В соответствии с принятым классом

прочности проволоки максимальные остаточные напряжения составляют 15–17 % от предела прочности тонкой проволоки.

Произведено расширенное моделирование процесса волочения на скорости 8 м/с с дополнительным натяжением от 50 % от предела прочности проволоки до 90 % от предела прочности проволоки с дискретностью 10 %.

По результатам моделирования видно, что наиболее равномерное распределение внутренних остаточных напряжений наблюдается при дополнительном натяжении тонкой проволоки в процессе волочения с усилием, обеспечивающим 70 % от предела прочности проволоки. Равномерное распределение внутренних остаточных напряжений предположительно должно повысить прямолинейность металлокорда, свитого из такой проволоки.

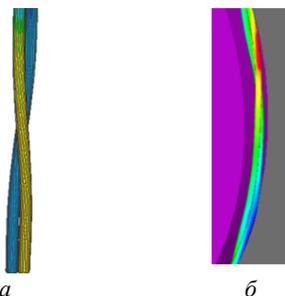
Для исследования свивки металлокорда и обратного изгиба металлокорда на ролике построена и исследована компьютерная модель изгиба металлокорда 2х0,30 НТ на ролике переменного диаметра с варьированием натяжения в диапазоне 9–30 Н.

Для построения модели были приняты следующие допущения:

1. Проволока принимается сплошным цилиндрическим телом без поверхностных дефектов.

2. Коэффициент трения между проволоками принимается постоянным на всем промежутке исследования.

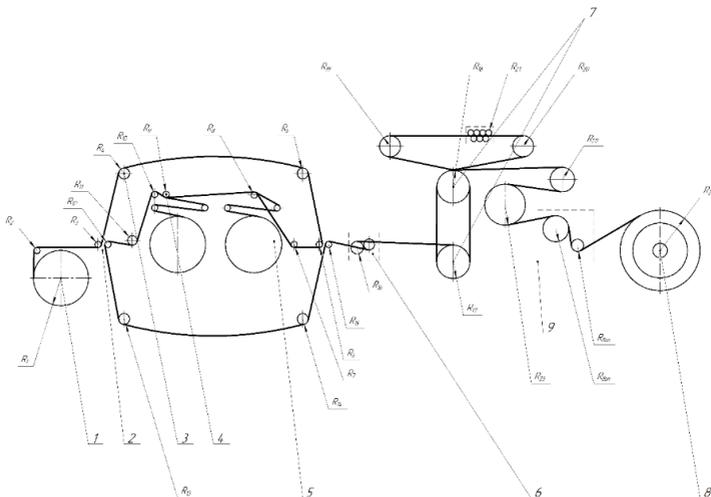
Расчет двухстадийный. Первая стадия включает свивку металлокорда из проволок, вторая стадия имитирует перекрутку в торсионном устройстве. Результаты расчетов по модели представлены на рисунке 1.



**а – результат моделирования свивки;
б – результат моделирования изгиба металлокорда**
Рисунок 1 – Модель свивки металлокорда

На прямолинейность металлокорда влияет изгиб проволоки и металлокорда на ролике канатной машины, через которые проходит проволока в процессе свивки. Предложено принять следующее условие равномерности изгиба проволоки в канатной машине: произведение коэффициента степени проработки металлокорда и суммарной кривизны всех роликов канатной машины равняется нулю. Под кривизной ролика понимается величина, обратная радиусу ролика. Расчет кривизны

производится согласно выражению (2) по схеме канатной машины, представленной на рисунке 2.



R – радиус соответствующего элемента; **1** – выносная катушка питания; **2** – обводные ролики; **3** – обводной блок; **4** – направляющий ролик; **5** – внутренняя катушка; **6** – торсионный блок; **7** – вытяжной кабестан; **8** – приемная катушка; **9** – дополнительные деформирующие ролики
Рисунок 2 – Принципиальная расчетная схема канатной машины

Условие равномерности изгиба проволоки в канатной машине имеет вид:

$$K \cdot \sum \frac{1}{R} = 0, \quad (1)$$

$$\sum \frac{K}{R} = \frac{K_1}{R_1} + \frac{K_2}{R_2} + \frac{K_3}{R_3} + \dots + \frac{K_n}{R_n} + \frac{K_{\text{доп}}}{R_{\text{доп}}} = 0, \quad (2)$$

$$K = \frac{\alpha}{360}, \quad (3)$$

где K – коэффициент степени проработки металлокорда;

$K_{\text{доп}}$ – коэффициент степени проработки металлокорда на дополнительном ролике;

α – угол охвата соответствующего ролика, град;

$1/R$ – кривизна соответствующего ролика, мм^{-1} ;

$R_{\text{доп}}$ – радиус дополнительного деформирующего ролика, мм.

При расчетах по формуле (2) необходимо принять условное направление изгиба проволоки в канатной машине. При проходе по ролику по часовой стрелке принимается положительное значение кривизны, против часовой стрелки принимается отрицательное значение кривизны. Суммарная кривизна должна стремиться или быть равна нулю. Если значение ненулевое, то необходимо добавить ролик, кривизна которого приводило бы значение суммарной кривизны к нулю. В

процессе свивки металлокорда напряженно-деформированное эквивалентное состояние металлокорда неравновесное.

Разработан критерий оценки прямолинейности металлокорда. Основным преимуществом критериальной оценки является возможность комплексного подхода к измерениям, оценке и принятию решения только на основании входных данных системы. На примере производства металлокорда это означает, что можно качественно оценивать показатели готовой продукции до ее производства и выпуска по количественным показателям технологического процесса.

После выполнения моделирования были получены данные по напряжениям при изгибе и по осевому смещению проволок в металлокорде. Относительная разница по значениям напряжений и осевому сдвигу между текущим значением и предыдущим определялась согласно выражениям:

$$\varepsilon\sigma_i = \frac{\sigma_i \cdot \sigma_{i-1}}{\sigma_i}, \quad (4)$$

$$\varepsilon\Delta_i = \frac{\Delta_i \cdot \Delta_{i-1}}{\Delta_i}, \quad (5)$$

где $\varepsilon\sigma_i$ – относительная разница значений напряжений;

$\varepsilon\Delta_i$ – относительная разница значений осевого сдвига;

σ_i – напряжения изгиба, МПа;

Δ_i – осевой сдвиг, мм.

Так как изменения напряжений и смещений связаны, но разнородны, то в мнимом пространстве всех параметров, влияющих на свойства металлокорда, их можно представить как две непараллельные плоскости. В этой связи для обеспечения принципа работы предлагаемого критерия справедливо следующее:

$$\begin{cases} \varepsilon\bar{\sigma}_i \rightarrow 0 \\ \varepsilon\bar{\Delta}_i \rightarrow 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\bar{\nabla}_n = \left(\frac{\partial \varepsilon\sigma}{\partial Sg}; \frac{\partial \varepsilon\Delta}{\partial Sg} \right), \quad (7)$$

$$|\bar{\nabla}_n| \rightarrow \min, \quad (8)$$

$$Sg_i = \sqrt{\varepsilon\sigma_i^2 + \varepsilon\Delta_i^2} \rightarrow 0, \quad (9)$$

где Sg_i – скалярное значение суммы относительных изменений напряжений и перемещений;

$\bar{\nabla}_n$ – градиент изменения относительных разниц напряжений и смещений;

$|\bar{\nabla}_n|$ – модуль градиента.

По методу локальной оптимизации функции при $R = const$ и переменном значении натяжения в выбранной точке расчета модели модуль градиента должен стремиться к минимальным значениям для выполнения принципиального положения критерия. Следовательно, на основании (9) справедливо следующее выражение:

$$Sg \rightarrow \min. \quad (10)$$

Выполнение условия (10) обеспечивает минимальный градиент смещений точек контакта в конструкции металлокорда. Повышается стабильность процесса изменения контактного взаимодействия между проволоками и изменения напряжений, возникающих при изгибе. Под стабильностью понимается явление, при котором значение осевых сдвигов и напряжений сохраняется с изменением диаметра деформирующего ролика. Стабильность осевых смещений проволок обеспечит максимальную равномерность контактных взаимодействий между проволоками в металлокорде. Высокая равномерность контактных взаимодействий в металлокорде способствует снижению уровня релаксации остаточных напряжений и остаточных деформаций, которые и вызывают отклонения металлокорда от прямолинейности. Смещение точек контакта и изменение контактного взаимодействия зависит от осевого сдвига проволок в металлокорде при изгибе.

В четвертой главе представлены экспериментальные исследования и испытания предлагаемых устройств и способов их использования для повышения прямолинейности металлокорда, проведены экспериментальные исследования по влиянию натяжения тонкой проволоки в потоке волочильного стана на прямолинейность проволоки; по определению остаточных напряжений в проволоке класса прочности НТ (сталь 80) после волочения на разных скоростях. Произведен анализ и сравнение значений остаточных напряжений, полученных в эксперименте и в численном моделировании. Определена погрешность и введен поправочный коэффициент.

Для уменьшения отклонения от прямолинейности металлокорда после свивки предлагается использование натяжения проволок в потоке волочильного стана, обеспечивающего растягивающие напряжения в проволоке 70 % от предела прочности (2100 МПа для проволоки 0,30 НТ). Это перераспределит остаточные напряжения, возникающие в процессе волочения, а также снизит величину относительного удлинения.

Проведено промышленное испытание рычажного устройства в потоке волочильного стана для дополнительного натяжения тонкой проволоки с созданием напряжений 70 % от предела прочности. Для металлокорда 2x0,30 НТ масса груза рычажного устройства составляет 16,65 кг (усилие натяжения 163,20 Н), для металлокорда 2+2x0,30 НТ масса груза рычажного устройства составляет 17 кг (усилие натяжения 167,16 Н), для металлокорда 3+8x0,35 НТ масса груза рычажного устройства составляет 20,95 кг (усилие натяжения 205,31 Н). Схема разболтанного рычажного устройства для дополнительного натяжения проволоки в потоке волочильного стана представлена на рисунке 3.

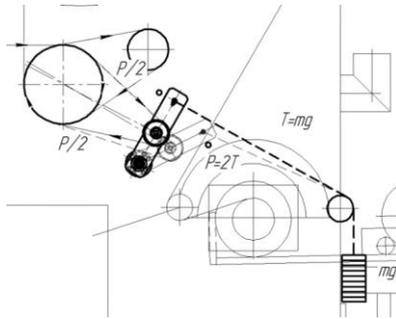
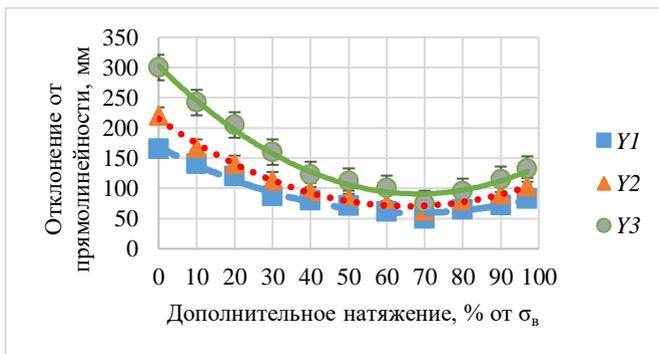


Рисунок 3 – Натяжение проволоки с помощью рычага

Проведено испытание изменения кинематики волочильного стана за счет изменения передаточного отношения тяговых шкивов для обеспечения высокой прямолинейности проволоки. Рекомендуемое передаточное отношение между шкивами, соединяющими последний волочильный конус и чистовой барабан составляет 1,121. Для обеспечения напряжения в проволоке 70 % от предела прочности также необходимо обеспечить наличие двух витков проволоки на чистовом барабане. Таким образом за счет проскальзывания витков проволоки достигается эффект самонастройки скоростного режима волочильного стана.

На рисунке 4 представлены графики изменения прямолинейности проволок, свитых при качественных испытаниях в зависимости от усилия предварительного осевого нагружения и времени выдержки на катушке Y_i .



(Y_1 –1 суток, Y_2 –3 суток, Y_3 –17 суток)

Рисунок 4 – Изменение величины отклонения от прямолинейности (Y_i) свитых проволок на базе $L = 600$ мм в зависимости от степени предварительного осевого нагружения (x_i) проволок

Анализ графиков на рисунке 4 показывает, что экстремум аппроксимирующей функции экспериментальных значений прямолинейности проволок находится в диапазоне нагружения проволоки 0,6–0,7 от разрывного усилия.

Уточняющие повторные испытания подтвердили, что при предварительном осевом нагружении тонкой проволоки после волочения усилием, равным 70 % от разрывного усилия повышается прямолинейность проволок на 28–30 %, при свивке с равным натяжением проволок на 60 % после суточной выдержки на катушке.

Перед экспериментом был произведен отбор образцов проволоки диаметром 0,35 мм. Материал проволоки: сталь 80. Образцы проволок были изготовлены путем порезки тонкой проволоки на мерные длины по 150 мм. Образцы проволоки отобраны для следующих скоростей волочения: 4, 6, 8, 10, 14 м/с. Для каждой скорости волочения отобрано по три образца. Для съема слоя материала был использован водный раствор 5 % HNO_3 . Травление поверхности осуществлялось на половине боковой поверхности проволоки путем полного погружения образца в кислоту. Для защиты от воздействия кислоты нестравливаемая поверхность была обезжирена и покрыта краской по металлу. Первая проба травления образцов осуществлялась в течение одной минуты, однако результаты измерений имели большую погрешность вследствие неточного измерения толщины снятого металла проволоки. В итоге травление осуществлялось в течение 10 минут одновременно для всех образцов.

Для исследования изменения остаточных напряжений в проволоке вследствие релаксации вычисляется разница в значениях остаточных напряжений при повторном замере образцов на следующие сутки и через двое суток в свободном состоянии. Для вторых суток вычисляется разница с предыдущими сутками.

Согласно полученным результатам определено, что существует скорость волочения, обеспечивающая низкий и близкий к нулю уровень остаточных напряжений. Очевидно, что чем меньше уровень остаточных напряжений, тем меньше интенсивность релаксации, что увеличивает прямолинейность металлокорда. По исходному уровню остаточных напряжений наилучшим вариантом для высокоуглеродистой проволоки класса прочности НТ являются скорости 4, 6, 14 м/с. По уровню релаксации наилучшими вариантами являются скорости, при которых график изменения остаточных напряжений пересекает ось абсцисс. Это 5,5 м/с, 8,5 м/с и 13 м/с. Учитывая варианты от двух критериев выбора оптимальной скоростью волочения является 11–12 м/с.

Результатирующий график зависимости изменения величины остаточных напряжений в проволоке от скорости волочения представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – График зависимости изменения величины остаточных напряжений в проволоке от скорости волочения (результатирующий)

Согласно рисунку 5 и в соответствии с технологическими и эксплуатационными свойствами образцов возможно объяснить отклонение в значении релаксации остаточных напряжений для образца проволоки со скоростью волочения 8 м/с. Таким образом, аппроксимирующая функция линии тренда на рисунке 5 имеет вид:

$$\sigma_{\text{рел}} = -0,469^2 + 5,179 + 0,37, \quad (11)$$

где $\sigma_{\text{рел}}$ – напряжения релаксации, МПа;

ϑ – скорость волочения, м/с.

Остаточные напряжения в проволоке, полученные из компьютерной модели, несколько отличаются от значений лабораторных испытаний и немного завышены. При определении остаточных напряжений с помощью компьютерного моделирования необходимо полученный результат умножить на поправочный коэффициент, который рассчитывается по формуле (12).

$$C_{\text{str}} = 1 - \frac{\varepsilon_{\text{ср}}}{100}, \quad (12)$$

где C_{str} – поправочный коэффициент;

$\varepsilon_{\text{ср}}$ – средняя относительная погрешность вычислений, %.

В процессе волочения металл проволоки находится в состоянии натяжения в осевом направлении. При волочении преобладающей деформацией является деформация осевого натяжения, которая направлена вдоль оси проволоки. Действие сжимающих деформаций направлено вдоль радиуса волоки.

Наличие контактного трения в очаге деформации приводит к неравномерному распределению деформаций. Максимальная деформация натяжения расположена в центре, а минимальная на поверхности контакта проволоки с волокой. В расчетах часто принимают усредненное по сечению значения растягивающей деформации.

На этапе свивки используются деформирующие устройства (деформаторы) для снижения величины критерия оценки Sg в свитом металлокорде. Схема деформатора представлена на рисунке 6.

Согласно выражению (9) при использовании направляющего деформирующего ролика $R_{доп}$ диаметром 84 мм, а деформирующего ролика R_n диаметром 44 мм суммарная кривизна с учетом угла охвата роликов на 10–11 % ближе к нулю, чем без использования дополнительных роликов.

Принципиальная схема простейшего деформатора представлена на рисунке 6.

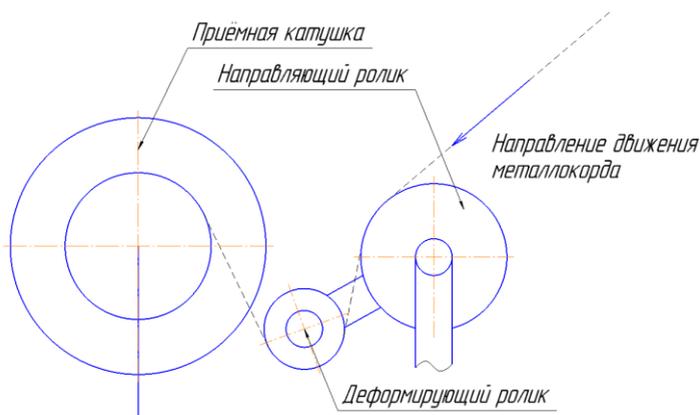


Рисунок 6 – Принципиальная схема простейшего деформатора

Для проведения эксперимента были разработаны схемы проведения испытаний для различных вариантов заправки металлокорда в деформатор, а также для различных вариантов угла охвата металлокордом деформирующих роликов. Угол охвата характеризует степень проработки полезного сечения металлокорда и эффективность перемещений контактных точек проволоки в конструкции металлокорда. В эксперименте были использованы различные варианты заправки металлокорда в деформатор, обеспечивающие 0,46–2 оборота металлокорда вокруг деформирующего ролика.

После проведения лабораторных испытаний деформатора после снятия показателей отклонения от прямолинейности металлокорда были получены результаты, представленные на рисунке 7.

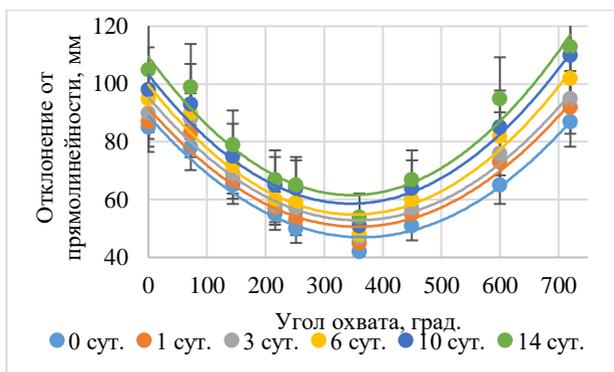


Рисунок 7 – Результаты отклонения от прямолинейности металлокорда 2x0,30 НТ с использованием деформатора

Анализ графиков показывает, что наибольшим эффектом для металлокорда 2x0,30 НТ обладает заправка с 1–1,2 оборотом на деформирующем ролике диаметром 44 мм. Увеличение количества оборотов не дает положительного эффекта. Напротив, при увеличении числа оборотов до двух наблюдается увеличение отклонения от прямолинейности металлокорда при выдержке его на катушке. Это значит, что воздействие на металлокорд должно быть ограничено упругой зоной и не превышать предел текучести металла, т. е. не переходить зону пластичности.

Аналогичные испытания были проведены для металлокорда конструкции 2+2x0,30 SHT с деформирующим роликом диаметром 44 мм. Результаты представлены в виде графиков на рисунке 8.

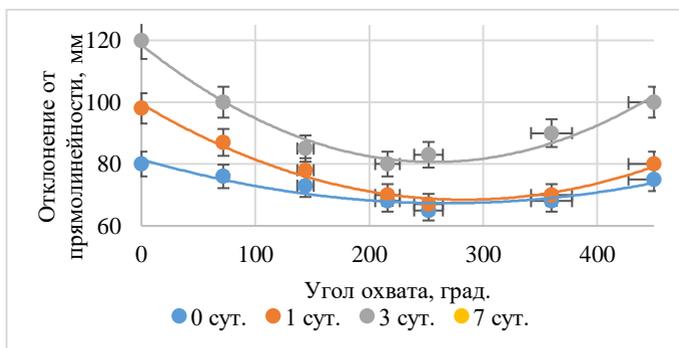


Рисунок 8 – Результаты отклонения от прямолинейности металлокорда 2+2x0,30 SHT с использованием деформатора

Для металлокорда 2+2x0,30 SHT при заправке в деформатор оптимальный угол охвата металлокордом ролика составляет 0,6 оборота. При использовании рекомендуемого ролика, полученного аналитическим расчетом для данного металлокорда, оптимальный угол охвата должен составлять 360° .

Для металлокорда 2x0,30 HT наименьшее отклонение от прямолинейности достигается при заправке металлокорда в деформатор с одним оборотом вокруг деформирующего ролика диаметром 44 мм, что на 36–38 % лучше, чем при варианте свивки без использования деформатора.

После расширенных исследований предложена модифицированная схема деформатора с двумя деформирующими роликами. На соответствующую полезную модель получен патент № u12015 «Устройство повышения прямолинейности металлокорда» от 30.06.2019 г.

Экспериментальным путем проверена и подтверждена методика определения оптимального диаметра деформирующего ролика и выбор благоприятного режима производства металлокорда.

Разработан узел обводного ролика на канатной машине TD 2/401, который позволяет снизить отклонение от прямолинейности металлокорда, снизить уровень относительной обрывности металлокорда, увеличить технологичность производства металлокорда. Данная модернизация приводит к изменению состояния эквивалентной кривизны для металлокорда и приближению значения суммарной кривизны к нулю.

Фото обводного ролика представлена на рисунке 9.



Рисунок 9 – Фото обводного ролика

В результате использования обводного ролика условие равномерности изгиба проволоки в канатной машине в соответствии с выражением (2) на 16–18 % ближе к нулю, в сравнении с вариантом без использования обводного ролика.

В результате свивки проволоки имеют неравномерный контакт друг с другом в конструкции металлокорда. Неравномерность контакта заключается в неравномерном распределении сил взаимодействия между проволоками в конструкции металлокорда. В конструкции металлокорда формируются неравномерно распределенные напряжения. Результатом релаксации этих напряжений в конструкции металлокорда является проявление отклонения от

прямолинейности металлокорда. С течением времени после изготовления это отклонение увеличивается в результате накопления остаточных деформаций, возникающих от остаточных напряжений.

Разработана методика определения оптимального диаметра деформирующего ролика для металлокордов конструкции 2x0,30 НТ, 2+2x0,30 SHT, 2x0,25 УТ при свивке на канатных машинах ТД 2/401.

Для определения оптимального диаметра используется критериальный подход, который позволяет получить функцию одной переменной, и метод локальной оптимизации функции одной переменной.

Разработан алгоритм определения оптимального диаметра деформирующего ролика канатной машины согласно методике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате экспериментальных и теоретических исследований влияния скорости волочения на релаксацию остаточных напряжений на основе численной модели процесса тонкого волочения установлен диапазон скоростей волочения 11–12 м/с высокоуглеродистой проволоки класса прочности НТ ($\sigma_b = 3000$ МПа), обеспечивающий минимальные остаточные напряжения и максимальную равномерность распределения остаточных напряжений в поперечном сечении в поперечном сечении проволоки [6; 10; 11; 31; 32].

2. В результате численного моделирования процесса тонкого волочения с натяжением и экспериментальных исследований натяжения проволоки в потоке волочильного стана установлено, что минимальное отклонение от прямолинейности тонкой проволоки класса прочности НТ реализуется при величине осевого натяжения с усилием, соответствующим 65–70 % от предела прочности тонкой проволоки (1820–2100 МПа) [1; 2; 3; 14; 18; 20; 27].

3. В результате теоретических и экспериментальных исследований установлена взаимосвязь суммарной кривизны роликов канатной машины, зависящая от диаметров роликов канатной машины и углов охвата роликов канатной машины металлокорда, с отклонением от прямолинейности металлокорда, сформулировано условие минимизации отклонения от прямолинейности металлокорда, заключающееся в максимальном приближении суммарной кривизны роликов канатной машины к нулю. Использование условия позволило определить оптимальные диаметры роликов канатной машины: для свивки высокопрочного металлокорда на канатной машине ТД 2/401 условие выполняется при использовании направляющего ролика $R_{\text{дop}}$ диаметром 84 мм, деформирующего ролика R_n диаметром 44 мм [12; 33; 34; 36].

4. В результате теоретических исследований деформации металлокорда на основе численной модели свивки металлокорда и его изгиба на ролике, учитывающая конструкцию металлокорда, диаметры деформирующих роликов в узле намотки канатной машины, величину эффективных напряжений, величину смещений точек контакта в конструкции металлокорда, натяжение при его изгибе разработан критерий оценки прямолинейности металлокорда $Sg(R)$, который позволяет на основе контроля эквивалентных напряжений и смещений точек контакта проволок в конструкции металлокорда качественно сравнивать отклонение

от прямолинейности высокопрочного металлокорда при различных режимах работы канатной машины и оптимизировать конструктивные решения в канатных машинах: регулировать диаметры дополнительных роликов канатной машины. Использование критерия $Sg(R)$ для машины двойного кручения TD 2/401 позволило уменьшить отклонение от прямолинейности высокопрочного металлокорда конструкций 2x0,30 НТ, 2x0,35 НТ, 2+2x0,30 SHT при свивке на 28–30 % [5; 7–9].

Рекомендации по практическому применению результатов

В результате теоретических и экспериментальных исследований разработана технология производства высокопрочного металлокорда волочением и свивкой с контролируемым изгибом и натяжением, отличающаяся использованием рекомендуемой скорости тонкого волочения, контролируемого натяжения на этапе тонкого волочения и контролируемого натяжения и изгиба на этапе свивки металлокорда, позволившая снизить отклонение от прямолинейности металлокорда на 28–30 % [36]. Разработанная технология внедрена и применяется в учебном процессе кафедры «Металлургия и технологии обработки материалов» УО «ГГТУ им. П. О. Сухого».

В результате теоретических и экспериментальных исследований и с помощью построенных численных моделей свивки металлокорда и изгиба металлокорда на ролике разработана методика определения оптимального диаметра деформирующего ролика для уменьшения отклонения от прямолинейности высокопрочного металлокорда при свивке на канатных машинах двойного кручения, отличающаяся использованием критерия оценки прямолинейности металлокорда при использовании деформаторов, учетом конструкции металлокорда, макроперемещений проволоки в металлокорде, эквивалентных напряжений, диаметра деформирующего ролика и величины натяжения при намотке металлокорда на приемную катушку [4; 5; 7; 9; 13; 15; 16; 17; 19; 21–26; 28; 29; 30; 35]. Разработанная методика внедрена и применяется при совершенствовании существующих технологий производства высокопрочного металлокорда из тонкой стальной латунированной проволоки в условиях ОАО «БМЗ – УКХ «БМК», а также в учебном процессе кафедры «Металлургия и технологии обработки материалов» УО «ГГТУ им. П. О. Сухого».

Все результаты диссертации успешно внедрены в учебный процесс кафедры «Металлургия и технологии обработки материалов» УО «ГГТУ им. П. О. Сухого» и применяются в обучении студентов дневного и заочного отделения по специальностям с металлургическим направлением.



СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Монографии

1. Бобарикин, Ю. Л. Тонкое волочение и свивка в металлокорд стальной латунированной проволоки / Ю. Л. Бобарикин, М. Н. Верещагин, Ю. В. Мартьянов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – 304 с.

Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в РБ

2. Исследование влияния степени осевого растяжения тонкой проволоки на прямолинейность металлокорда / Ю. Л. Бобарикин, М. Н. Верещагин, С. В. Авсейков, Ю. В. Мартьянов // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2016. – № 2. – С. 11–17.

3. Бобарикин, Ю. Л. Способы повышения прямолинейности металлокорда / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. трудов : в 3 кн. / ред.: А. В. Белый (гл. ред) [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2017. – Кн. 3: Обработка металлов давлением. – С. 77–85.

4. Веденеев, А. В. Зависимость прямолинейности металлокорда от параметров деформации перед намоткой на катушку / А. В. Веденеев, Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов ; под ред. В.В. Смильтиной // Центр. науч.-исслед. нн-т инф. и технико-экономич. исследов. черной металлургии. – Москва, 2017. – С. 77–81.

5. Бобарикин, Ю. Л. Исследование влияния изгиба металлокорда перед намотом на его прямолинейность после намота / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов, А. В. Веденеев // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. трудов : в 3 кн. / ред.: А. В. Белый (гл. ред) [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2018. – Кн. 3: Обработка металлов давлением. – С. 90–98.

6. Бобарикин, Ю. Л. Исследование влияния скорости грубого волочения стальной высокоуглеродистой проволоки на распределение напряжений и деформаций по сечению проволоки [Research of the influence of highcarbon steel wire drawing speed on stresses and deformations on wire cross section] / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов // Литье и металлургия. – 2019. – № 1. – С. 73–77.

7. Бобарикин, Ю. Л. Влияние параметров деформации металлокорда перед намоткой на его прямолинейность после намотки / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2019. – № 1. – С. 50–55.

8. Бобарикин, Ю. Л. Влияние натяжения металлокорда при намотке на его прямолинейность / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов, А. В. Веденеев // Черные металлы. – 2019. – № 4. – С. 46–50.

9. Бобарикин, Ю. Л. Исследование влияния натяжения металлокорда перед намоткой на его прямолинейность после намотки / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. трудов : в 3 кн. / ред.: В. Г. Залесский (гл. ред) [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2019. – Кн. 3: Обработка металлов давлением. – С. 322–327.

10. Бобарикин, Ю. Л. Исследование влияния скорости волочения на микротвердость тонкой проволоки / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов,

И. А. Цыганович // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. трудов : в 3 кн. / ред.: В. Г. Залесский (гл. ред) [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2020. – Кн. 3: Обработка металлов давлением. – С. 29–38.

11. Влияние скорости волочения на механические свойства и микротвердость тонкой проволоки / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартянов, Я. И. Радькин, И. А. Цыганович // Черные металлы. – 2021. – № 11. – С. 26–30.

12. Бобарикин, Ю. Л. Новый подход в определении оптимального диаметра деформирующего ролика канатной машины для улучшения технологических свойств металлокорда / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартянов, О. Ю. Ходосовская // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. трудов : в 3 кн. / ред.: В. Г. Залесский (гл. ред) [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2022. – Кн. 3: Обработка металлов давлением. – С. 235–243.

Статьи в рецензируемых изданиях, не включенных в перечень ВАК

13. Определение диаметра ролика обратной деформации для канатной машины в узле намота металлокорда / Ю. Л. Бобарикин, С. В. Авсейков, Ю. В. Мартянов, А. В. Веденеев // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 1 (40). – С. 146–151.

14. Бобарикин, Ю. Л. Способ повышения прямолинейности металлокорда осевым растяжением тонкой проволоки / Ю. Л. Бобарикин, С. В. Авсейков, Ю. В. Мартянов // Механическое оборудование металлургических заводов: междунар. сб. науч. тр. / под ред. А. Г. Корчунова. – Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2014. – Вып. 3. – С. 106–111.

15. Бобарикин, Ю. Л. Определение влияния диаметра ролика деформации металлокорда перед намотом на прямолинейность металлокорда после намота / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартянов, А. В. Веденеев // Пластична деформація металів : Колективна монографія (Сборник статей). – 2017. – С. 236–240.

16. Bobarikin, Yu. L. Effect of deformation parameters of steel cord before lapping on straightness / Yu. L. Bobarikin, Yu. V. Martyanov, A. V. Vedeneev // XVIII International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, production engineering and physics», A collective monograph edited by J. Borica, D. Musial: monograph № 68, Chestohowa (Poland). – 2017. – P. 133–141.

17. Bobarikin, Yu. L. Effect of steel cord tension during the lapping on steel cord straightness after lapping / Yu. L. Bobarikin, Yu. V. Martyanov // XIX International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, production engineering and physics», A collective monograph edited by M. Knapinski, D. Musial: monograph № 78, Chestohowa (Poland). – 2018. – P. 36–45.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

18. Бобарикин, Ю. Л. Разработка способов повышения прямолинейности металлокорда / Ю. Л. Бобарикин, С. В. Авсейков, Ю. В. Мартьянов // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 24–25 апр. 2014 г. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2014. – С. 93–96.

19. Бобарикин, Ю. Л. Определение диаметра ролика обратной деформации для канатной машины в узле намота металлокорда / Ю. Л. Бобарикин, С. В. Авсейков, Ю. В. Мартьянов // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XV Междунар. Науч.-техн. Конф. Студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 23–24 апр. 2015 г. / под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015. – С. 101–104.

20. Бобарикин, Ю. Л. Проблема отклонения от прямолинейности металлокорда при производстве на промышленных предприятиях Республики Беларусь / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов // Беларусь в современном мире: материалы VIII Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 5 мая 2015 г. / под общ. ред. В. В. Кириенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015. – С. 288–290.

21. Бобарикин, Ю. Л. Влияние диаметра деформирующего ролика на макроперемещения в металлокорде / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. XI междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 20–21 окт. 2016 г. / под общ. ред. С. И. Тимошина. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – С. 117–118.

22. Мартьянов, Ю. В. Моделирование изгиба металлокорда перед намотом в деформирующих устройствах // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики управления: материалы XVII междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 27–28 апр. 2017 г. / под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2017. – С. 93–96.

23. Martyanov, Yu.V. Effect of steel cord tension during the twisting on steel cord straightness after twisting / Yu. V. Martyanov // XIX International scientific conference «New technologies and achievements in metallurgy, production engineering and physics», Chestohowa (Poland) June 7–8. – 2018. – P. 23.

24. Мартьянов, Ю. В. Влияние натяжения металлокорда при свивке на его прямолинейность / Ю. В. Мартьянов // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XVIII междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 26–27 апр. 2018 г. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 119–121.

25. Бобарикин, Ю. Л. Влияние натяжения металлокорда при намотке на его прямолинейность / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов // Современные проблемы машиноведения: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 22–23 нояб. 2018 г. / под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 119–121.

26. Бобарикин, Ю. Л. Оптимизация деформатора для повышения прямолинейности металлокорда / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов // Современные проблемы машиноведения: материалы XII междунар. науч.-техн.

конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 22–23 нояб. 2018 г. / под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 121–122.

27. Бобарикин, Ю. Л. Прогнозирование качественных показателей металлокорда на предприятиях Республики Беларусь / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартъянов // Беларусь в современном мире: материалы XIX междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 16–17 мая 2019 г. / под общ. ред. В. В. Кириенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – С. 292–294.

28. Мартъянов, Ю. В. Влияние натяжения металлокорда и радиуса его изгиба в деформаторе на напряжения и перемещения в металлокорде / Ю. В. Мартъянов; науч. рук. Ю. Л. Бобарикин // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XIX междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2019 г. / под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – С. 94–97.

29. Мартъянов, Ю. В. Влияние напряжений и перемещений в металлокорде на прямолинейность металлокорда после свивки / Ю. В. Мартъянов; науч. рук. Ю. Л. Бобарикин // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2019 г. / под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – С. 97–99.

30. Knapinski, M. Effect of Steel Cord Tension During the Lapping on Steel Cord Straightness After Lapping / M. Knapinski, Yuri L. Bobarikin, Yuri. V. Martyanov // New Trends in Production Engineering. – 2019. – Vol. 2, issue 2, 04.12.19. – P. 36–45.

31. Бобарикин, Ю. Л. Изучение влияния скорости деформации на микротвердость тонкой стальной проволоки / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартъянов, И. А. Цырганович // материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 22 октября 2020 г. / под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – С. 47–49.

32. Мартъянов, Ю. В. Исследование влияния скоростных параметров тонкого волочения на структурные изменения в проволоке / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартъянов, И. А. Цырганович // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XIX междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 22–23 апр. 2021 г. / под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – С. 88–91.

33. Мартъянов, Ю. В. Принцип расчета диаметра ролика дополнительной деформации металлокорда в процессе свивки / Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартъянов // Республиканский форум молодых ученых учреждения высшего образования: сборник материалов форума / редкол.: Е. Я. Аршанский (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 49–50.

34. Разработка способов прогнозирования физико-механических свойств тонкой проволоки с целью повышения технологичности свивки металлокорда / Е. С. Ельцова, Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартъянов, В. А. Петрусевич // Литейное производство и металлургия 2022. Беларусь: труды 30-й международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия 2022. Беларусь», Минск, 16–18 ноября 2022 / под общ. ред. академика Е. И. Маруковича. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 110–114.

Тезисы докладов научных конференций

35. Бобарікін, Ю. Л. Визначення параметрів деформатору для підвищення прямолінійності металокорда / Ю. Л. Бобарікін, Ю. В. Мартянов // Пластична деформація металів : матеріали наук.–практ. конф. : тез. допов., 22–26 травня 2017 р., м. Дніпро. – Дніпро, 2017. – С. 45–46.

Патенты и заявки на изобретения и полезные модели

36. Устройство повышения прямолинейности металлокорда: пат. ВУ 12015 / Ю. Л. Бобарікін, Ю. В. Мартянов. – Оpubл. 30.06.2019.

РЭЗІЮМЭ

Марцьянаў Юрый Вадзімавіч

ТЭХНАЛОГІЯ ВЫТВОРЧАСЦІ ВЫСОКАТРЫВАЛАГА МЕТАЛАКОРДУ ВАЛАЧЭННЕМ І ЗВІЎКАЙ З КАНТРАЛЯВАНЫМ ВЫГІБАМ І НАЦЯЖЭННЕМ

Ключавыя словы: металакорд, дрот, напружанне, рэлаксацыя, мадэляванне, прамалінейнасць, спосаб

Мэта даследавання: распрацоўка тэхналогіі вытворчасці высокатрывалага металакорду валачэннем і звіўкай з кантраляваным выгібам і нацяжэннем.

Метады даследавання і апаратура: эксперыментальны метада адзнакі рэшткавых напруг у дроце металакорду замераў прагінаў, кампутарнае мадэляванне, аналітычны даследаванні, лабараторныя і прамысловыя эксперыменты, статыстычны метада апрацоўкі эксперыментальных дадзеных, шпулька дыяметрам 80 мм, лінейка для вызначэння адхілення ад прамалінейнасці на базе 600 мм, лабараторная ўстаноўка для перацягвання.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: з дапамогай распрацаванай лікавай мадэлі тонкага валачэння, якая ўлічвае цыклічную нагрузку на дрот, і з дапамогай эксперыментальных даследаванняў усталявана залежнасць велічыні рэшткавых напруг на паверхні сталевага высокавугляродзістага латунаванага дроту і хуткасці валачэння. Рэшткавыя напругі на паверхні дроту роўныя нулю пры хуткасцях валачэння 5,5 м/с, 8,5 м/с, 13 м/с – для тонкага дрота дыяметрам 0,30 мм класа трываласці НТ. Устаноўлена хуткасць валачэння для высокавугляродзістага дроту класа трываласці НТ, якая забяспечвае мінімальныя рэшткавыя напругі ў папярочным перасеку дроту, якая складае 11–12 мс.

Тэрэтычна абгрунтаваны і эксперыментальна пацверджаны ўплыў на прамалінейнасць металакорду дадатковага расцяжэння тонкага дроту ў струмені валачыльнага стана ў вузле намотвання дроту на прыёмную шпульку. Устаноўлена аптымальнае значэнне велічыні дадатковага расцяжэння тонкага дроту класа трываласці НТ, якое адпавядае велічыні 0,65–0,70 ад мяжы трываласці.

Эксперыментальна пацверджаны ўплыў на прамалінейнасць металакорду спосабу запраўкі металакорду ў дэфарматар. Вызначана аптымальная запраўка металакорду ў дэфарматар, якая адпавядае 1 абароту металакорду вакол дэфармавальнага роліка, якая дазваляе зменшыць адхіленне ад прамалінейнасці металакорда на 44 % у параўнанні з варыянтам без выкарыстання дэфарматара і на 30 % у параўнанні з варыянтам выкарыстання дэфарматара без рэгулявання абарачэнняў металакорда.

Распрацаваны комплексны крытэрыі якаснай ацэнкі прамалінейнасці металакорду пры выкарыстанні дэфарматараў, які ўлічвае канструкцыю металакорду, махраперамяшчэння, эквівалентныя напругі, дыяметр дэфармуючага роліка і велічыню нацяжэння пры намотванні. З дапамогай распрацаванай лікавай мадэлі выгібу металакорду на дэфармавальным роліку, якая ўлічвае нацяжэнне пры намотванні, і з дапамогай эксперыментальных даследаванняў усталявана залежнасць велічыні эфектыўных напруг металакорда і перамяшчэнняў кропак

кантакту дратоў у канструкцыі металакорда ад дыяметра дэфармавальнага роліка, якія ўплываюць на прамалінейнасць металакорда. Устаноўлена, што для металакорду 2x0,30 НТ аптымальны дыяметр дэфармуючага роліка складае 44 мм, нацяжэнне пры намотванні складае 25 Н, якое забяспечвае зніжэнне адхілення ад прамалінейнасці на 30–35 %.

Ступень выкарыстання: вынікі даследавання выкарыстаны для павышэння прамалінейнасці металакорду.

Вобласць прымянення: вытворчасць металакорду, вытворчасць тонкага дроту.

РЕЗЮМЕ

Мартьянов Юрий Вадимович

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО МЕТАЛЛОКОРДА ВОЛОЧЕНИЕМ И СВИВКОЙ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ ИЗГИБОМ И НАТЯЖЕНИЕМ

Ключевые слова: металлокорд, проволока, напряжения, релаксация, моделирование, прямолинейность, способ

Цель работы: является разработка технологии производства высокопрочного металлокорда волочением и свивкой с контролируемым изгибом и натяжением

Методы исследования и аппаратура: экспериментальный метод оценки остаточных напряжений в проволоке металлокорда замером прогибов, компьютерное моделирование, аналитические исследования, лабораторные и промышленные эксперименты, статистический метод обработки экспериментальных данных, катушка диаметром 80 мм, линейка для определения отклонения от прямолинейности на базе 600 мм, лабораторная перетяжная установка.

Полученные результаты и их новизна: с помощью разработанной численной модели тонкого волочения, учитывающей циклическую нагрузку на проволоку, и с помощью экспериментальных исследований установлена зависимость величины остаточных напряжений на поверхности стальной высокоуглеродистой латунированной проволоки и скорости волочения. Остаточные напряжения на поверхности проволоки равны нулю при скорости волочения 5,5 м/с, 8,5 м/с, 13 м/с – для тонкой проволоки диаметром 0,30 мм класса прочности НТ. Установлена скорость волочения для высокоуглеродистой проволоки класса прочности НТ, обеспечивающая минимальные остаточные напряжения в поперечном сечении проволоки, которая составляет 11–12 м/с.

Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено влияние на прямолинейность металлокорда дополнительного натяжения тонкой проволоки в потоке волочильного стана в узле намотки проволоки на приемную катушку. Установлено оптимальное значение величины дополнительного натяжения тонкой проволоки класса прочности НТ, соответствующее величине 0,65–0,70 от предела прочности.

Экспериментально подтверждено влияние на прямолинейность металлокорда способа заправки металлокорда в деформатор. Определена оптимальная заправка металлокорда в деформатор, соответствующая 1 обороту металлокорда вокруг деформирующего ролика, позволяющая снизить отклонение от прямолинейности металлокорда на 44 % по сравнению с вариантом без использования деформатора и на 30 % по сравнению с вариантом использования деформатора без регулировки оборотов металлокорда вокруг деформирующего ролика.

Разработан комплексный критерий оценки прямолинейности металлокорда при использовании деформаторов, учитывающий конструкцию металлокорда, макроперемещения, эквивалентные напряжения, диаметр деформирующего ролика и величину натяжения при намотке. С помощью разработанной численной модели

изгиба металлокорда на деформирующем ролике, учитывающей натяжение при намотке, и с помощью экспериментальных исследований установлена зависимость величины эффективных напряжений металлокорда и смещений точек контакта проволок в конструкции металлокорда от диаметра деформирующего ролика, влияющие на прямолинейность металлокорда. Установлено, что для металлокорда 2х0,30 НТ оптимальный диаметр деформирующего ролика составляет 44–45 мм, натяжение при намотке составляет 25 Н, обеспечивающее снижение отклонения от прямолинейности на 30–35 %.

Степень использования: результаты исследования использованы для повышения прямолинейности металлокорда.

Область применения: производство металлокорда, производство тонкой проволоки.

SUMMARY

Martyanov Yury Vadimovich

TECHNOLOGY OF HIGH STRENGTH STEEL CORD PRODUCTION BY DRAWING AND TWISTING WITH CONTROLLED BENDING AND TENSION

Keywords: steel cord, wire, stress, relaxation, modeling, straightness, method

Purpose of research: development of technology to produce high-strength steel cord by drawing and twisting with controlled bending and tension.

Research methods and equipment: an experimental method for assessing residual stresses in a steel cord wire by measuring deflections, computer modeling, analytical studies, laboratory and industrial experiments, a statistical method for processing experimental data, a coil with a diameter of 80 mm, a ruler for determining deviation from straightness based on 600 mm, laboratory tensioning device.

The results and their novelty: with developed numerical model of fine drawing, considering the cyclic load on the wire, and with experimental studies, the dependence of the magnitude of residual stresses on the surface of high-carbon brass-plated steel wire and the drawing speed was established. Residual stresses on the wire surface are equal to zero at drawing speeds of 5.5 m/s, 8.5 m/s, 13 m/s – for thin wire with a diameter of 0.30 mm, strength class HT. Drawing speeds for high-carbon wire of strength class HT have been established, providing minimum residual stresses in the cross-section of the wire, which is 11–12 m/s.

Theoretically substantiated and experimentally confirmed the effect on the steel cord straightness additional stretching of a thin wire in the flow of the drawing mill in the unit for winding the wire on the finish reel. The optimal value of the thin wire of strength class HT additional tension, corresponding to the value of 0.65–0.70 of the ultimate strength, has been established.

The influence of the method of filling the steel cord into the deformer on the straightness of the steel cord has been experimentally confirmed. The optimal threading of the steel cord into the deformer has been determined, corresponding to 1 revolution of the steel cord around the deforming roller, which makes it possible to reduce the deviation from the straightness of the steel cord by 44 % compared to the option without using a deformer and by 30 % compared to the option of using a deformer without adjusting the revolutions of the steel cord around the deforming roller.

A complex criterion has been developed for the qualitative assessment of the straightness of the steel cord when using deformers, considering the construction of the steel cord, macro displacements, equivalent stresses, the diameter of the deforming roller and the amount of tension during winding. Using the developed numerical model of the steel cord bending on the deforming roller, considering the tension during winding, and with the experimental studies, the dependence of the value of the steel cord effective stresses and displacements of the points of contact of the wires in the steel cord construction on the diameter of the deforming roller, affecting the steel cord straightness, was established. It was found that for a 2x0.30 HT steel cord, the optimal diameter of the deforming roller is 44–45 mm, the winding tension is 25 N, which reduces the deviation from straightness by 30–35 %.

Degree of use: the research results were used to improve the steel cord straightness.

Application area: steel cord production, fine wire production.

Научное издание

МАРТЬЯНОВ
Юрий Вадимович

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОПРОЧНОГО МЕТАЛЛОКОРДА
ВОЛОЧЕНИЕМ И СВИВКОЙ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ ИЗГИБОМ
И НАТЯЖЕНИЕМ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.16.05 – обработка металлов давлением

Подписано в печать 04.04.2024. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 1,91. Уч.-изд. л. 1,68. Тираж 60. Заказ 213.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск.

ЛИСТ ИСПРАВЛЕНИЙ

в тексте автореферата диссертации Мартьянова Юрия Вадимовича
«Технология производства высокопрочного металлокорда волочением и свивкой
с контролируемым изгибом и натяжением» на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.16.05 – обработка металлов давлением

№ страни-цы	Исходный текст	Исправленный текст
Внутренняя страница обложки	ТОМИЛО Вячеслав Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Машины и технология обработки металлов давлением им. С. И. Губкина»;	ТОМИЛО Вячеслав Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Машины и технология обработки металлов давлением им. С. И. Губкина» <i>Белорусского национального технического университета;</i>
17	ЗАКЛЮЧЕНИЕ 1. В результате экспериментальных...	ЗАКЛЮЧЕНИЕ <i>Основные научные результаты диссертации</i> 1. В результате экспериментальных...
19	4. Веденеев, А.В. ... // Центр. науч.-исслед. ин-т инф. и технико-экономич. исследов. черной металлургии. – Москва ...	4. Веденеев, А.В. ... // <i>Черная металлургия. Бюллетень науч.-техн. и экономич. информации.</i> – Москва ...

Соискатель



Ю. В. Мартьянов

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
доктор технических наук, профессор

О. Г. Девойно

