

На правах рукописи



МЕДВЕДЕВА ЕКАТЕРИНА МИХАЙЛОВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ПРОИЗВОДСТВА АРМАТУРНЫХ КАНАТОВ НА ОСНОВЕ
ОЦЕНКИ НДС ПРОВОЛОКИ МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 2.6.4. Обработка металлов давлением

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Научный руководитель – Голубчик Эдуард Михайлович,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Трофимов Виктор Николаевич,
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», профессор кафедры динамики и прочности машин (г. Пермь);

Даненко Владимир Филиппович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», заместитель заведующего кафедрой технологии материалов (г. Волгоград).

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (г. Красноярск).

Защита состоится 22 марта 2022 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.324.01 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина 38, малый актовй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте <http://www.magtu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Мезин Игорь Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На сегодняшний день промышленное и гражданское строительство широко использует строительные материалы на основе железобетонных конструкций. Ключевой тенденцией в данной области является повышение надежности и долговечности железобетонных изделий при снижении затрат на производство их одного из главных ценообразующих объектов – арматурных канатов. При этом повторное использование арматурных канатов в данной области крайне затруднительно. В связи с чем возникает потребность в увеличении жизненного цикла так называемого «невозобновляемого» конструкционного элемента.

Затраты на производство арматурных канатов напрямую определяют стоимость 1 м² жилой площади, которая в 2020-2021 годах кратно возросла. Известен общемировой тренд на снижение металлоёмкости конструкций и увеличение эффективности технологий производства сырьевых компонентов, в том числе за счет рационализации технологических режимов (гибкого управления параметрами технологий, снижения процента брака и т.д.). При этом одной из проблем является то, что традиционно оцениваемые конечные механические свойства арматурных канатов (предел прочности, релаксационная стойкость, степень сцепления с бетоном и др.) формируются не только сложно наследуемыми в ходе технологии производства параметрами микроструктуры, но и в том числе величиной внутренних напряжений (остаточных напряжений при волочении и свивочных напряжений при свивке).

В данном случае актуальной теоретической проблемой является то, что исследование изменения микроструктуры трудоемко, а изучение внутренних напряжений – предельно затруднено. В качестве рационального выхода видится использование современных методов компьютерного моделирования, учитывающих как микромеханику деформирования стали на этапе производства проволоки, так и поэтапное изменение внутренних напряжений проволок и произведенного из них каната на каждой технологической операции промышленного производства. Это позволит с высокой степенью достоверности результатов анализировать действующие режимы и совершенствовать технологию в целом за счет высокоточного прогноза уровня свойств конечного изделия и реализации наукоемкого потенциала технологии с минимальными трудовыми и финансовыми затратами на сложно реализуемые промышленные и лабораторные эксперименты, что позитивно скажется на конкурентоспособности итоговой продукции. Такая задача является актуальной для всех процессов обработки металлов давлением.

В представленной работе **объектом** исследования является технология производства высокопрочных стабилизированных арматурных канатов диаметром 12,5 мм конструкции К7 из стали марки 80, а **предметом** – исследование изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) металла в многооперационном процессе производства стабилизированных арматурных канатов на основе современных методов конечно-элементного моделирования.

Цель работы заключается в совершенствовании технологии производства высокопрочных стабилизированных арматурных канатов за счет учёта микро-механики деформирования стали и изменения внутренних напряжений патентированной катанки в ходе термодформационных воздействий на неё на основе компьютерного моделирования.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Провести компьютерное моделирование технологического процесса производства стабилизированных арматурных канатов для исследования изменения микроструктуры и остаточных напряжений в проволоках на каждом этапе производства каната.

2. Реализовать промышленный эксперимент и последующие лабораторные исследования для верификации результатов моделирования и оценки прогнозирующей способности разработанных моделей.

3. Разработать научно-обоснованные рекомендации по совершенствованию технологии производства стабилизированных арматурных канатов на основе оценки их внутренней напряженности.

Научная новизна работы

1. Разработан комплекс мультимасштабных компьютерных моделей процесса волочения патентированной катанки, что позволило впервые оценить распределение параметров напряженно-деформированного состояния проволок арматурного каната на макро- и микроуровне, определяющее формирование эксплуатационных свойств готового изделия.

2. Определены закономерности изменения распределения остаточных и свивочных напряжений в проволоках высокопрочного стабилизированного арматурного каната, позволяющие однозначно оценивать и учитывать влияние термодформационных воздействий на напряженность готового изделия.

3. Определены возможности калибрующего пластического обжатия для минимизации неблагоприятной технологической наследственности высокопрочного арматурного каната, что может способствовать повышению эффективности процесса производства стабилизированных арматурных канатов на 3%.

4. Установлен характер микромеханики деформирования стали перлитного класса при волочении, позволяющий определить динамику процесса реориентации перлитной структуры относительно оси волочения и количественно оценивать уровень механических свойств готового изделия.

Практическая значимость

1. На основе анализа влияния температурно-силовых режимов стабилизации на сохранение геометрии и формирование благоприятного напряженного состояния каната предложен комплекс рациональных режимов технологического воздействия при производстве высокопрочных стабилизированных арматурных канатов диаметром 12,5 мм конструкции 1×7 (1+6).

2. Усовершенствована технология производства высокопрочных стабилизированных арматурных канатов диаметром 12,5 мм конструкции 1×7 (1+6), позволяющая повысить конкурентоспособность готового изделия за счет применения операции калибрующего пластического обжатия со степенью деформации 6%.

3. Обеспечена возможность снижения сроков (до одной недели) и затрат при проектировании технологического процесса производства высокопрочных стабилизированных арматурных канатов в условиях ОАО «ММК-Метиз» за счет дополнительного использования мультимасштабного компьютерного моделирования и уменьшения объемов сложно воспроизводимых промышленных экспериментов.

4. Результаты исследований использованы в процессе реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства с участием высшего образовательного учреждения (Договор с Минобрнауки России № 02.G25.31.0178 от 01 декабря 2015 г.).

5. Полученные результаты диссертационного исследования применены в учебном процессе ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» при подготовке обучающихся по направлению 22.03.02 «Металлургия», профиль подготовки «Обработка металлов и сплавов давлением (метизное производство)» и 22.04.02 «Металлургия», профиль подготовки «Инжиниринг инновационных технологий в обработке материалов давлением».

Положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности изменения внутренних напряжений металла и характер микромеханики деформирования стали перлитного класса, полученные в ходе моделирования процесса волочения проволоки, а также в процессе свивки и стабилизации арматурного каната.

2. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния металла на микроуровне, полученные в ходе моделирования процесса волочения патентованной катанки.

3. Технологические рекомендации по минимизации негативной технологической наследственности (в отношении внутренних напряжений) в сквозной технологии производства высокопрочных стабилизированных арматурных канатов в условиях ОАО «ММК-Метиз».

Степень достоверности

Достоверность полученных результатов обеспечена экспериментальными исследованиями микроструктуры и механических свойств металла по стандартизованным методикам с применением современного аттестованного оборудования, а также подтверждается согласованностью теоретических исследований с имеющейся информацией в научно-технической литературе и промышленным экспериментом по производству большого объема опытных образцов проволоки.

Апробация результатов исследований

Основные положения диссертационной работы изложены и обсуждены на научно-технических конференциях: XX Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество» (15-16 ноября 2017 г., г. Новокузнецк); III, IV, V международные молодежные научные конференции «Magnitogorsk Rolling Practice» (2017-2020 гг., г. Магнитогорск); ХСIII Международная научно-практическая конференция «Инновационные подходы в рамках естественных и технических наук: современные реалии и перспективы развития» (26 февраля 2021 г., г. Казань); 11-я Всероссийская

национальная научно-техническая конференция с международным участием «Современные инновации в науке и технике» (15-16 апреля 2021 г., г. Курск); Всероссийская научно-техническая конференция «Вопросы металловедения и термической обработки в машиностроении» (15-16 апреля 2021 г., г. Москва); 77 – 79-я Международные научно-технические конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (2019-2021 гг., г. Магнитогорск); 29 - 30-я Международные конференции по металлургии и материалам «METAL» (2020-2021 гг., г. Брно, Чешская республика).

Публикации

Основные материалы диссертации изложены в 10-ти научных публикациях, 3 из которых опубликованы в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ и 2 статьи – в журналах, индексируемых в международной наукометрической базе Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 150-ти наименований. Общий объем диссертации 132 страниц машинописного текста, включающий 74 рисунков, 15 таблиц и 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность области исследования, степень разработанности темы исследований, цель и задачи работы, обозначена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе описаны современные тенденции в области производства арматурных канатов. Анализ существующих конструкций арматурных канатов, требований мировых стандартов к их качеству и технологических возможностей отечественного и зарубежного канатного производства позволил определить высокопрочный стабилизированный арматурный канат конструкции 1×7 (1+6) как наиболее удачное соотношение по критериям «технологичность-цена-качество». Исследования проводились на примере действующего производства высокопрочных стабилизированных арматурных канатов диаметром 12,5 мм конструкции 1×7 (1+6) из стали марки 80, поскольку для ОАО «ММК-Метиз» данный канат является одним из широко востребованных у потребителя.

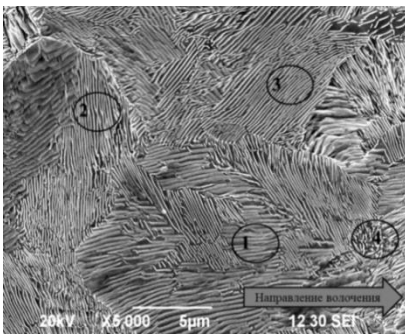
Анализ действующих отечественных и зарубежных технологических схем производства канатной продукции показал, что традиционная технология производства стабилизированных арматурных канатов включает в себя следующие основные операции: подготовка структуры и поверхности катанки, многократное волочение проволоки (с опциональным профилированием после волочения), свивка проволок в канат и стабилизация каната. При этом в мировой практике выявлено применение дополнительных операций обработки каната, способствующих повышению механических свойств и улучшению геометрии каната. В качестве одного из таких способов рассмотрено калибрующее пластическое обжатие, которое было проанализировано с точки зрения влияния на напряженность каната в сквозной технологии его производства.

Обзор научных исследований, которые отражают влияние напряженного состояния на конечные свойства длинномерной продукции, позволил выдвинуть гипотезу о необходимости учета внутренних напряжений при проектировании рассматриваемой технологии производства высокопрочных стабилизированных арматурных канатов. При этом анализ способов обработки высокопрочных стабилизированных арматурных канатов определил метод калибрующего пластического обжатия как потенциально благоприятно влияющий на свойства каната посредством совершенствования его геометрии и напряженности.

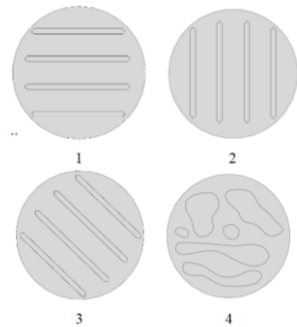
Вторая глава посвящена компьютерному моделированию процессов производства проволоки, свивки проволок в канат и стабилизации арматурного каната. На этапе моделирования процесса волочения патентированной катанки была учтена микромеханика деформирования стали, в результате чего была получена информация об эволюции микроструктуры и поэтапном формировании внутренних напряжений проволоки в ходе девятикратного действующего маршрута волочения:

$12,00^{24.6} 10,42^{23.6} 9,11^{22.5} 8,02^{21.6} 7,10^{20.0} 6,35^{20.8} 5,65^{19.8} 5,06^{19.1} 4,55^{18.8} 4,10$.

В качестве исходных данных для первого этапа моделирования процесса волочения были приняты свойства и микроструктура патентированной катанки из стали марки 80. Анализ микроструктуры катанки в продольном направлении показал, что микроструктура исходной заготовки перед волочением имеет ряд характерных колоний (рисунок 1, а). Таким образом, для реализации второго этапа моделирования процесса волочения были подготовлены репрезентативные объемы указанных перлитных колоний (рисунок 1, б).



а



б

Рисунок 1 – Исходная микроструктура патентированной катанки перед волочением (а) и общий вид репрезентативных объемов (б):

1 – цементитные пластины параллельны оси волочения; 2 - цементитные пластины перпендикулярны оси волочения; 3 – цементитные пластины под углом 45° к оси волочения; 4 – цементитные участки в виде мелкодисперсных включений и искривленных пластин

Учет микромеханики деформирования перлитной стали при мультимасштабном компьютерном моделировании процесса волочения позволил устано-

вить, что цементитные пластины, имеющие параллельную ориентацию относительно оси процесса, имели наглядную тенденцию к интенсивному утонению. При этом цементитные пластины, изначально находившиеся в перпендикулярном направлении относительно оси процесса, практически не изменяли межпластинчатое расстояние, но наиболее стремительно подвергались деформации и разрушению. Цементитные пластины, находящиеся в исходной микроструктуре под углом к оси процесса, испытывали в ходе процесса волочения реориентацию, осуществляя поворот до параллели с направлением волочения. Подобное формирование текстуры деформации позволяло данным пластинам испытывать в 1,7-1,9 раза большие степени деформации, а при достижении степеней деформации свыше 70% подвергаться фрагментации (в т.ч. посредством полос сброса).

Кроме того, моделирование позволило оценить распределение наиболее важных (с технологической и эксплуатационной точек зрения) остаточных продольных напряжений в сечении проволоки после каждого прохода волочения по исследуемому маршруту. В процессе волочения до степени деформации 80% в центральных слоях проволоки генерируются сжимающие остаточные напряжения уровня 1100-1200 МПа, что соизмеримо с 68% от итогового временного сопротивления проволоки. При этом на поверхности проволоки остаточные напряжения носят растягивающий характер и численно равны 450-500 МПа, что составляет 25% от итогового временного сопротивления проволоки исследуемого каната. При достижении степеней деформации 82% и выше остаточные растягивающие напряжения снижаются на поверхности до уровня 250-300 МПа, а сжимающие остаточные напряжения в центре – до 450-500 МПа.

Полученное распределение остаточных напряжений в передельных проволоках было использовано в качестве исходных данных при построении упрощенной компьютерной модели процесса свивки проволок в канат и его дальнейшей стабилизации. Разработанная модель включает следующие этапы:

1 – прядь свивается до нужного регламентируемого шага (длина проволок 180-200 мм, поворот на 6,28 радиан, формирование 6 повивочных витков на исследуемой длине);

2 – свитая прядь нагревается до температуры стабилизации (360, 380 или 400°C);

3 – к концу пряди кратковременно прикладывается натяжение (58, 70 и 82 кН, что составляет от 0,2 до 0,4 от σ_B);

4 – натяжение, температура и фиксация концов пряди одновременно снимаются.

В результате моделирования различных режимов стабилизации было установлено, что при минимальном натяжении и нагреве до любой из температур в диапазоне 360 – 380°C, а также при натяжении 70 кН и минимальной температуре 360°C канатная прядь в виду высокого уровня свивочных напряжений обладает высокой склонностью к нарушению геометрии. Однако, начиная с натяжения 70 кН и температуры выше 380°C, процесс стабилизации позволяет сохранить канатную прядь нераскрученной. При этом в качестве основных кри-

териев оценки целостности геометрии каната рассматривается изменение количества витков на исследуемом шаге свивки и исчезновение контакта между повивочными и центральной проволокой.

При оценке влияния процессов свивки и стабилизации на распределение остаточных напряжений в центральной проволоке было установлено следующее: при минимальном значении натяжения (58 кН) и при повышении температуры процесса стабилизации остаточные напряжения практически не перераспределяются ни в центральных (напряжения сжатия остаются на уровне 450 МПа), ни в поверхностных слоях (напряжения растяжения остаются на уровне 350 МПа). Наиболее результативным с позиции перераспределения остаточных напряжений после волочения являются режимы натяжения 82 кН при любой из исследуемых температур и натяжение в 70 кН при температуре 400°С. Таким образом, были определены рациональные режимы стабилизации для исследуемого типа каната.

В третьей главе описан промышленный эксперимент, проведенный в производственных условиях ОАО «ММК-Метиз», с целью верификации полученных в главе 2 результатов моделирования, а также для оценки прогнозирующей способности полученных моделей. Эксперимент заключался в производстве высокопрочных стабилизированных арматурных канатов диаметром 12,5 мм конструкции 1×7 (1+6) по исследуемым режимам.

На этапе волочения патентированной катанки было отобрано три образца исходной заготовки и по три образца проволоки длиной 1 м, полученной после каждого прохода волочения (всего 30 образцов из одного бунта), при этом в силу специфики эксперимента оборудование работало на заправочных скоростях. Для каждого образца проволоки были проведены исследования механических свойств посредством испытания на растяжение, а также металлографические исследования – после каждого прохода волочения производились замеры межпластинчатого расстояния и толщины цементитных пластин в центре и на поверхности образца в продольном и поперечном сечении проволоки. Исследование остаточных напряжений в проволоке после последнего прохода волочения проводилось с помощью рентгеновского дифрактометра.

На этапе свивки и стабилизации арматурного каната всего было отобрано 39 образцов – по три образца каната для каждого из исследуемых режимов стабилизации, полученных при различных скоростях прохождения каната через индуктор (50 и 65 м/мин), а также три образца в исходном состоянии (т.е. свитый канат, но не стабилизированный). Механические свойства каната исследовались попроволочно и в свитом состоянии методом растяжения на разрыв. Исследование внутренних напряжений центральной и повивочных проволок было произведено с помощью дифрактометра, а исследование релаксации напряжений каната было проведено по экспресс-методике на испытательной машине Shimadzu Servopulser U-type.

Исследование эволюции микроструктуры в процессе волочения проволок подтвердило тенденцию реориентации цементитных пластин, отраженной в результате моделирования (рисунок 2, а), что подтверждает адекватность разрабо-

танных моделей. При этом наглядно установлены все особенности деформации перлитных колоний (рисунок 2, б). Кроме того, результаты промышленного эксперимента показали, что изменение скорости прохождения каната через индуктор не оказывает заметного влияния на перераспределение остаточных напряжений, что в перспективе позволит увеличить производительность стана за счет увеличения скорости в пределах допустимых паспортных значений.

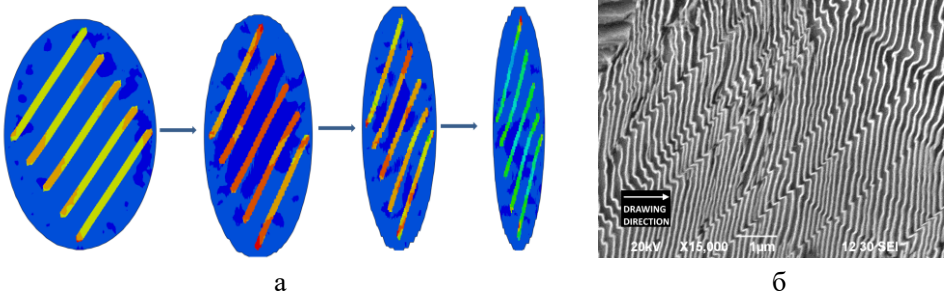


Рисунок 2 – Реориентация цементитных пластин в перлитных колониях, расположенных под 45° к оси волочения проволоки, установленная в результате моделирования (а), и изображение микроструктуры (б)

Далее согласно зависимости Холла—Петча был проведен сравнительный анализ механических свойств промышленных образцов проволоки и их расчетных значений в соответствии с результатами ранее проведенного моделирования:

$$\sigma_R(i) = \sigma_0 + k' \left(\frac{\bar{s}_0(i)}{\cos \bar{\beta}(i)} \right)^{-1/2}, \quad (1)$$

где σ_R – предел прочности после i -го прохода волочения, МПа; σ_0 – предел прочности перед i -м проходом волочения, МПа; k' – коэффициент в зависимости от содержания углерода в стали; \bar{s}_0 – среднее межпластиночное расстояние после i -го прохода волочения, мкм; $\bar{\beta}$ – средний угол наклона перлитных пластин после i -го прохода волочения, град.

Сравнительный анализ результатов лабораторных и компьютерных исследований (рисунок 3) подтвердил высокую прогнозирующую способность разработанных компьютерных моделей (средняя сходимость значений более 70%). Данный факт позволяет при анализе исходной катанки перед волочением оперативно корректировать применяемый маршрут волочения для достижения требуемого уровня механических свойств готовой проволоки, что также способствует повышению результативности производства.

На основании результатов моделирования (глава 2) и данных промышленного эксперимента, а также исходя из технической возможности оборудования был сделан вывод о режимах стабилизации, благоприятных с точки зрения как устранения свивочных напряжений, так и перераспределения остаточных напряжений в проволоках каната (рисунок 4).

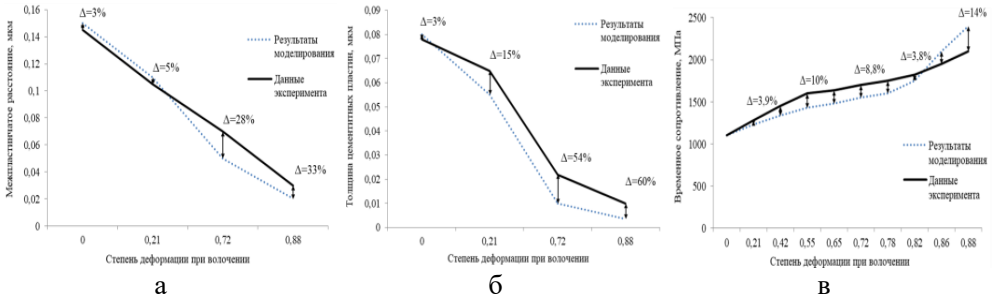


Рисунок 3 – Сравнительный анализ параметров микроструктуры (а, б) и механических свойств (в) промышленных образцов проволоки и их расчетных значений

Наличие пограничных режимов стабилизации, а также широкой номенклатуры выпускаемых канатов требует оперативного повышения эффективности технологий производства, добиться которого возможно за счет внедрения дополнительных технологических операций.

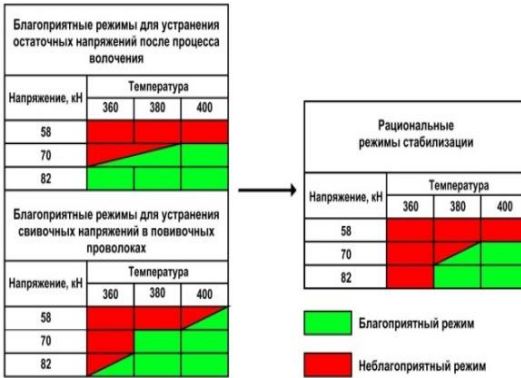


Рисунок 4 – Рациональные режимы стабилизации

Поскольку промышленный эксперимент позволил успешно верифицировать разработанные ранее модели, следовательно, далее они были использованы для оценки влияния процесса калибрующего пластического обжатия (в том числе с нанесением профиля на канат) на напряженно-деформированное состояние каната.

В четвертой главе с целью оценки технологического потенциала внедрения операции калибрующего пластического обжатия (в том числе с нанесением периодического профиля на канат) на основе верифицированных ранее компьютерных моделей производилось моделирование трех режимов обжатия в трехроликовом калибре (рисунок 5, а) со степенями деформации 3, 6 и 9%.

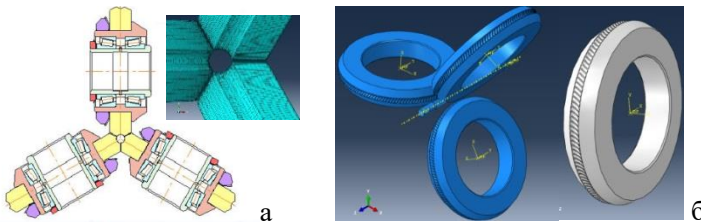


Рисунок 5 – Трехроликовый калибр (а) и вид компьютерной модели профилированных роликов (б)

Результаты моделирования (рисунок 6, а) показали, что обработка с минимальной степенью деформации не устраняет свивочные напряжения, однако при этом остаточные напряжения перераспределяются в сторону увеличения зоны действия сжимающих напряжений. Это, в свою очередь, в рамках включения данного процесса в действующую технологию приведет к использованию более ресурсосберегающих режимов последующих операций. То есть после минимальной степени калибрующего пластического обжатия становится возможным применять режимы стабилизации, которые ранее были обозначены как неблагоприятные, что потенциально делает возможным выявление универсальных режимов стабилизации для смежных размеров канатов в рамках номенклатуры одного производства. При обжатии каната со степенью деформации 6% целостность геометрии каната полностью сохраняется (рисунок 6, б), что свидетельствует о значительном снижении свивочных напряжений. При этом уровень остаточных сжимающих напряжений в центре проволоки достигает значений 300 МПа, растягивающих остаточных на поверхности – 500 МПа, что соизмеримо со значениями напряжений стабилизированного арматурного каната после нагрева до температуры 380-400°С и при натяжении 70 кН. Анализ результатов моделирования 9% калибрующего пластического обжатия каната показал (рисунок 6, в), что при такой обработке полностью устраняются свивочные напряжения. Однако высокая степень деформации приводит к усугублению неблагоприятной технологической наследственности в виде высоких значений остаточных продольных растягивающих напряжений на поверхности повивочных проволок (до уровня 1600 МПа).

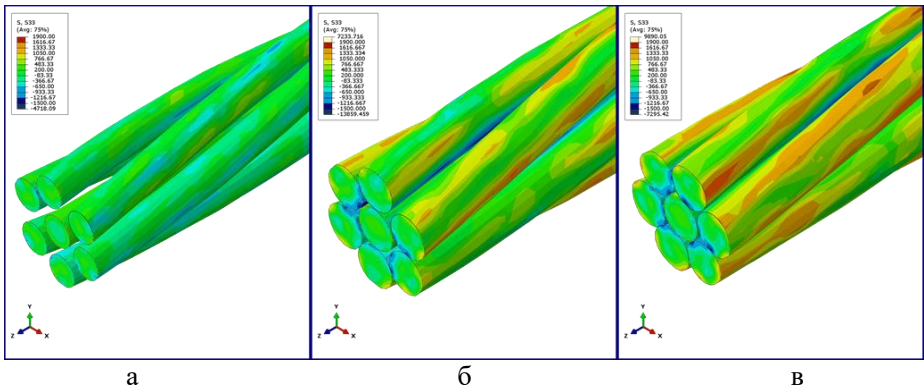


Рисунок 6 – Распределение продольных остаточных напряжений после калибрующего пластического обжатия каната с различной степенью деформации: а – $\epsilon=3\%$; б – $\epsilon=6\%$; в – $\epsilon=9\%$

Обнаруженные закономерности могут объясняться тем, что отличительной особенностью данного процесса является смена типа контакта повивочных и центральной проволоки (линейный контакт меняется на полосовой контакт), а также формирование в центре каната кольца сжимающих остаточных напряжений, что позволяет вовлекать повивочные проволоки в дальнейшую эксплуата-

цию под растяжением. Вследствие чего на все последующие воздействия канат начинает реагировать как единое целое тело, поэтому характер распределения (эпюра) остаточных напряжений каната схож с распределением в одной проволоке.

Следовательно, рациональный режим калибрующего пластического обжатия со степенью деформации 6% полностью нивелирует всю негативную технологическую наследственность, позволяя для каната диаметром 12,5 мм исследуемой конструкции не использовать энергозатратный нагрев с натяжением при операции стабилизации. Кроме того, процесс калибрующего пластического обжатия возможно производить с одновременным нанесением профиля посредством применения профилирующих роликов (рисунок 7, б), что способствует формированию качественного профиля (рисунок 7, а) для повышения сцепления с бетоном.

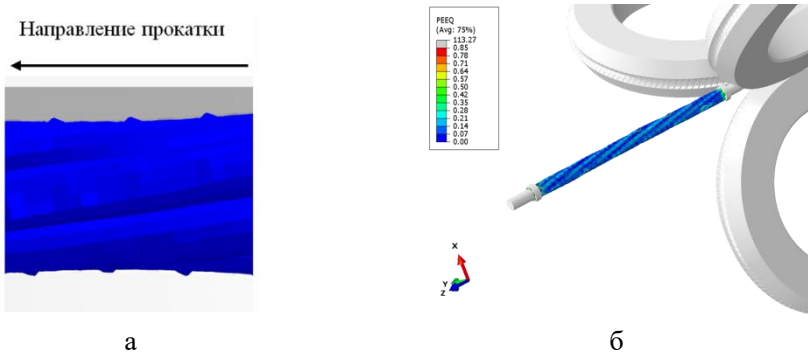


Рисунок 7 – Заполняемость профилеобразующих впадин (а) и распределение эквивалентных деформаций на поверхности (б) профилированного пластически обжатого арматурного каната (степень деформации 6%)

В ходе апробации разработанных рекомендаций по применению калибрующего пластического обжатия была использована роликовая клеть CLF-240 (рисунок 8) для производства обжатого профилированного каната конструкции К7 диаметром 12,5 мм из исходного диаметра 12,9 мм.



Рисунок 8 – Роликовая клеть CLF 240

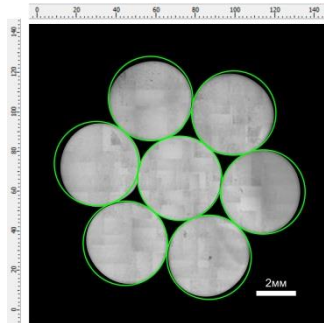


Рисунок 9 – Поперечное сечение пластически обжатого каната с силуэтом исходного поперечного сечения

Для полученных промышленных образцов были проведены исследования микроструктуры, анализ геометрии профиля и пятен контакта проволок, а также механических свойств и степени сцепления с бетоном.

Таким образом, калибрующее пластическое обжатие арматурного каната позволяет получить уплотненную структуру конструкции (рисунок 9), внешнюю поверхность с развитым рельефом на наружном участке повивочных проволок каната, что обеспечивает повышение эксплуатационных свойств каната и повышенное сцепление конструкции с бетоном.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработан комплекс мультимасштабных компьютерных моделей процесса волочения патентированной катанки, который позволил исследовать распределение параметров напряженно-деформированного состояния проволок на макро- и микроуровне. Результаты исследований показали особенности деформирования перлитной структуры проволоки при суммарной степени деформации выше 80%, а также позволили оценить распределение остаточных продольных напряжений в сечении проволоки после каждого прохода волочения для их дальнейшего учета в технологии производства стабилизированного арматурного каната. На основании высокой прогнозирующей способности разработанных моделей предложено их использование при первичной оценке исходной заготовки перед волочением для оперативной корректировки маршрута волочения без существенных трудозатрат.

Результаты моделирования процессов свивки и стабилизации позволили оценить влияние температуры и натяжения на перераспределение продольных остаточных напряжений в канате. Так, было установлено, что сочетание натяжения 70 или 82 кН с диапазоном температур 360–400 °С позволяет достичь двукратного снижения продольных остаточных напряжений как в центральных, так и поверхностных слоях проволоки.

2. Проведенный промышленный эксперимент по производству высокопрочных стабилизированных арматурных канатов диаметром 12,5 мм конструкции 1×7 (1+6) подтвердил гипотезу о высоких трудозатратах подобных исследований. Сравнительный анализ результатов моделирования и результатов исследования промышленных образцов продемонстрировал высокую сходимость значений (более 70%), что позволяет использовать разработанные компьютерные модели при проектировании новых технологий производства высокопрочных стабилизированных арматурных канатов с учетом сложно контролируемого параметра – напряженности металла, а также локально оценивать степень влияния дополнительных операций обработки каната в действующей технологии. На основании сопоставления результатов моделирования и промышленных экспериментов были предложены рациональные режимы стабилизации с позиции как устранения свивочных напряжений, так и перераспределения остаточных напряжений в проволоках каната. Температурно-силовые параметры рационального процесса стабилизации находятся в диапазоне натяжения 70 – 82 кН при температуре в индукторе 380 – 400 °С.

3. На основе оценки влияния калибрующего пластического обжатия на перераспределение внутренних напряжений каната было предложено совершенствование действующей технологии производства высокопрочных арматурных канатов в условиях ОАО «ММК-Метиз». После свивки проволок в канат с учетом накопленных остаточных напряжений в проволоках предложено внедрить рациональный режим калибрующего пластического обжатия со степенью деформации 6%, что позволит устранить свивочные напряжения (т.е. сохранить геометрию каната) и достичь уровня остаточных напряжений, соизмеримых со значениями напряжений стабилизированного арматурного каната. Это, в свою очередь, способствует повышению эффективности процесса изготовления каната в среднем на 3%.

На основе анализа результатов испытаний экспериментальных образцов пластически обжатых арматурных канатов установлено, что дополнительная операция пластического обжатия свитого каната со степенью деформации 6 % с одновременным нанесением периодического профиля на поверхность повивочных проволок каната обеспечивает:

- сохранение сформированной в ходе предшествующих технологических операций мелкодисперсной ферритно-цементитной микроструктуры стали;
- достижение требуемого уровня механических свойств (временное сопротивление не менее 1860 Н/мм^2 , полное относительное удлинение при максимальной нагрузке не менее 3,5%);
- значительное повышение относительной площади смятия поперечных ребер экспериментальных образцов, характеризующей уровень сцепления каната с бетоном (в 2,8 раз в сравнении со стандартным арматурным канатом К7Т с периодическим профилем повивочных проволок), что позволяет обеспечить улучшенное механическое сцепление каната с бетоном в направлении ввинчивания.

Основное содержание диссертационных исследований отражено в следующих работах:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Корчунов, А.Г. Теоретическое исследование напряженности стального арматурного проката методами компьютерного моделирования / А.Г. Корчунов, Е.М. Медведева, Э.М. Голубчик // Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации. – 2020. – Т. 76. – № 11. – С. 1139-1148.
2. Анализ внутренних напряжений арматурного каната посредством компьютерного моделирования / А.Г. Корчунов, Е.М. Медведева, Э.М. Голубчик, Д.В. Константинов // Сталь. – 2020. – № 12. – С. 46-51.
3. Влияние пластического обжатия на напряженно-деформированное состояние арматурного каната / А.Г. Корчунов, Е.М. Медведева, В.А. Харитонов, Д.В. Константинов // Черные металлы. – 2021. – № 11. – С. 50-54.

Статьи в изданиях, входящих в Scopus и Web of Science:

4. FEM study of internal stresses evolution in prestressing strands / A.G. Korchunov, E.M. Medvedeva, P.V. Ivekeeva, D.V. Konstantinov // CIS Iron and Steel Review. – 2020. – Vol. 20. – P. 21–24.

5. FEM research of internal stresses evolution in the prestressing strand production / A.G. Korchunov, E.M. Medvedeva, P.V. Ivekeeva, D.V. Konstantinov // Proceedings 29th International Conference on Metallurgy and Materials. TANGER Ltd. – 2020. – P. 215-221.

Статьи в прочих изданиях:

6. Medvedeva, E.M. Finite-element modeling of stress generation in the prestressing strand production / E.M. Medvedeva, D.V. Konstantinov, E.M. Golubchik // Magnitogorsk Rolling Practice 2020: материалы V молодежной научно-практической конференции под ред. А.Г. Корчунова. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2020. – С. 44 – 45.

7. Медведева, Е.М. Оценка внутренних напряжений арматурного каната при проектировании процесса его производства / Е.М. Медведева, Э.М. Голубчик // Сборник тезисов докладов XVII научно-технической конференции молодых работников ОАО «ММК-МЕТИЗ». – Магнитогорск. – 2021. – С. 31 – 32.

8. Медведева, Е.М. Анализ финишных технологических операций, влияющих на напряженность стабилизированных арматурных канатов / Е.М. Медведева // Вопросы продуктивного взаимодействия в процессе обмена знаниями: сборник научных трудов. – Казань, 2021. – С. 317 – 321.

9. Медведева, Е.М. Совершенствование методики проектирования технологии производства арматурных канатов на основе компьютерного моделирования / Е.М. Медведева, Э.М. Голубчик // Сборник научных трудов 11-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные инновации в науке и технике». – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2021. – С. 179-182.

10. Медведева, Е.М. Анализ влияния процесса стабилизации на внутренние напряжения арматурного каната / Е.М. Медведева, Э.М. Голубчик // Сборник тезисов конференции «Вопросы металловедения и термической обработки в машиностроении». – Москва: изд-во ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им.И.П.Бардина», 2021. – С.56 – 59.