

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
Голубчик Эдуард Михайлович,
доктор технических наук, доцент

Магнитогорск
2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВА АРМАТУРНЫХ КАНАТОВ.....	10
1.1. Анализ требований мировых стандартов, предъявляемых к арматурным канатам.....	10
1.2. Анализ действующих технологий производства арматурных канатов..	18
1.3. Остаточные напряжения, как свойствообразующий фактор, и способы их исследования.....	30
Выводы по главе 1.....	37
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ АРМАТУРНЫХ КАНАТОВ	39
2.1. Исследование процесса волочения проволоки.....	39
2.2. Исследование процесса свивки проволок и стабилизации арматурного каната.....	63
Выводы по главе 2.....	71
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБРАЗЦОВ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ АРМАТУРНЫХ КАНАТОВ.....	74
3.1. Исследование проволоки после процесса волочения	75
3.2. Исследование стабилизированного арматурного каната	82
3.2.1. Исследование влияния параметров процесса стабилизации на механические свойства экспериментальных образцов арматурных канатов.....	82
3.2.2. Исследование влияния параметров процесса стабилизации на остаточные напряжения экспериментальных образцов стабилизированных арматурных канатов.....	85

Выводы по главе 3.....	90
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ АРМАТУРНЫХ КАНАТОВ.....	92
4.1. Влияние калибрующего пластического обжатия на НДС арматурного каната.....	92
4.2. Апробация предложенных режимов пластического обжатия.....	102
Выводы по главе 4.....	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	113
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Акт использования результатов диссертационного исследования на ОАО «ММК-Метиз».....	131
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Акт использования результатов диссертационного исследования в образовательном процессе.....	132

ВВЕДЕНИЕ

Современное промышленное и гражданское строительство широко использует материалы на основе железобетонных конструкций. Известно, что строительство является материалоемкой отраслью: удельный вес материалов в себестоимости готовой строительной продукции составляет около 70% [1]. В России в стоимости одного квадратного метра жилой площади может быть заложено до 20 % стоимости затрат на производство арматурного элемента. На сегодняшний день рынок строительного производства является наиболее быстроразвивающимся и перспективным, о чем свидетельствуют растущие из года в год объемы работ по данной отрасли [2]. При этом стоимость отдельных элементов железобетонных конструкций также неуклонно растет. Соответственно, в качестве одной из ключевых тенденций в данной области можно выделить снижение затрат на производство армирующих элементов, в том числе высокопрочных арматурных канатов, и повышение надежности и долговечности железобетонных изделий, область применения которых является социально значимой.

Высокопрочные арматурные канаты, производимые по требованиям ГОСТ 13840-68 и ГОСТ Р 53772-2010, являются одним из самых надёжных видов арматурной стали для постнапряжения и наиболее подходящими для работ по предварительному напряжению железобетонных конструкций любого уровня сложности (при строительстве атомных электростанций, мостов, аэропортов, транспортной инфраструктуры, жилых домов и т.д.). В производственной практике широкое распространение получили канаты конструкции $1 \times 7 (1+6)$, которые представляют собой семипроволочную прядь, состоящую из одной центральной проволоки и шести проволок наружного слоя, свитых по спирали [3]. Данный канат может быть представлен в стабилизированном виде, то есть нераскручивающимся, прямолинейным и обладающим высокими релаксационными свойствами. Кроме этого, указанный канат должен иметь высокую прочность (1770-1860 МПа) и высокую степень сцепления с бетоном.

Такие важные эксплуатационные характеристики, как прочность, пластичность и релаксационная стойкость, определяются, помимо всего прочего, сформированной микроструктурой и уровнем внутренних напряжений в канате. Влияние остаточных

напряжений при эксплуатации арматурных канатов может привести к дефектам в виде расслоения, образования «фонарей», выхода и вспучивания пряди и к другим нарушениям структурной плотности. И если оценка изменения микроструктуры стали в процессе производства высокопрочного арматурного каната считается достаточно трудоемким процессом, то контролирование напряженности каната в промышленных условиях (*in situ* (с лат. — «на месте»)) практически невозможно, а оценка в лабораторных условиях (*in vitro* (с лат. — «в стекле/пробирке»)) довольно затруднительна даже при наличии специализированного оборудования. И поскольку сам канат и каждая его проволока является продуктом многостадийной технологии с многооперационными этапами, то методы компьютерного моделирования являются одним из рациональных инструментов для исследования поэтапного формирования и оценки внутренних напряжений каната в сквозной технологии его производства. За счет применения таких наукоёмких методов исследования становится актуальным решение вопросов о гибкости действующих технологий, оперативности проектирования новых технологий производства длинномерных изделий и о снижении затрат на трудоёмкие эксперименты.

На сегодняшний день традиционные методики проектирования технологических процессов производства высокопрочных арматурных канатов не позволяют учитывать напряженно-деформированное состояние (НДС) металла, а используемые на текущий момент времени стандарты по производству арматурных канатов не регламентируют уровень внутренних напряжений каната. При этом в литературе широко освещены особенности влияния внутренних напряжений металла на показатели качества готового изделия, в том числе арматурного каната.

Степень разработанности темы исследования

Весомый вклад в области изучения влияния внутренних напряжений металла на конечные свойства металлических изделий внесли Козлов В.Т., Колмогоров Г.Л., Кудрявцев И.В. Исследование конструктивных особенностей и формирование свойств стальных канатов проводили Туленков Ф.К., Глушко М.Ф., Гончаренко Н.К., Веселовский В.А., Манин В.П., Харитонов В.А. и другие ученые ведущих российских научных школ. Вопросами моделирования технологических операций обработки каната и их влияния на напряженное состояние металла занимались как отечественные

исследователи - Трофимов В.Н., Трусов П.В., так и зарубежные - Buhler H., Melander A., Atienza J.M., Elices M. Тем не менее вопрос о характере распределения комплекса внутренних напряжений в длинномерных конструкционно сложных изделиях (стальных арматурных канатах) и о возможности управления данным распределением остаётся не раскрытым.

Цель данной работы заключается в оценке поэтапного формирования и изменения внутренних напряжений высокопрочных арматурных канатов в сквозной технологии производства с использованием методов компьютерного моделирования, что позволит усовершенствовать технологию производства высокопрочных стабилизированных арматурных канатов диаметром 12,5 мм конструкции 1×7 (1+6) из стали марки 80 и повысит её эффективность.

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

1. Провести компьютерное моделирование технологического процесса производства высокопрочных 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 высокопрочных стабилизированных арматурных канатов на основе оценки их внутренней напряженности.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Разработан комплекс мультимасштабных компьютерных моделей процесса волочения патентованной 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 термомодеформационных 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 работы:

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 трудозатрат при проектировании технологического процесса производства высокопрочных стабилизированных арматурных канатов в условиях ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод» (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».

Методология и методы исследования

Теоретическая часть работы выполнена с использованием современного, общедоступного и высоко востребованного среди инженеров программного комплекса Abaqus. Лабораторные исследования были проведены с применением специализированного оборудования в ресурсном центре НИИ Наносталей на образцах высокопрочных стабилизированных арматурных канатов, полученных в результате промышленного эксперимента в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ».

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 результатов исследований подтверждается лабораторными исследованиями свыше 90 образцов проволок и канатов, полученных в результате промышленного эксперимента. Средняя сходимость результатов лабораторных и компьютерных исследований составляет более 70%. Исследования механических свойств и микроструктуры образцов проводились с использованием регламентируемых методик по ГОСТ 12004-81, 7372-79, 8233-56.

Основные результаты работы прошли **апробацию** в виде устных докладов автора на научно-технических конференциях: XX Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество» (15-16 ноября 2017 г., г. Новокузнецк); III, IV, V международная молодежная научная конференция «Magnitogorsk Rolling Practice» (2017 - 2020 гг., г. Магнитогорск); XСIII Международная научно-практическая конференция «Инновационные подходы в рамках естественных и технических наук: современные реалии и перспективы развития» (26 февраля 2021 года, 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-я и 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 наименований. Общий объем диссертации 132 страниц машинописного текста, включающий 74 рисунка, 15 таблиц и 2 приложения.

Глава 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВА АРМАТУРНЫХ КАНАТОВ

1.1 Анализ требований мировых стандартов, предъявляемых к арматурным канатам

Стальной арматурный канат – это наиболее эффективная напрягаемая арматура, состоящая из группы проволок, свитых таким образом, чтобы было исключено их раскручивание [4]. В середине 50-х годов прошлого века в СССР были разработаны нормативные документы на проволоку и арматурные пряди, в частности ГОСТ 7348-55, ГОСТ 8480-57, ЧМТУ 426-61 и др. Сегодня арматурные канаты в основном изготавливают согласно ГОСТ 13840-68 и ГОСТ Р 53772-2010 из углеродистой стали с содержанием углерода более 0,7 %. Далее в главе приведен обзор основных требований, предъявляемых к современным арматурным канатам, а также анализ отечественных и зарубежных технологических линий по производству высокопрочных арматурных канатов. На основе специфики влияния внутренних напряжений на свойства высокопрочных арматурных канатов произведена оценка существующих методов исследования напряженности канатов и осуществлен выбор рациональных инструментов для проведения дальнейших исследований.

Стальные канаты представляют собой гибкие изделия, состоящие из стальных проволок круглого или фасонного сечения, навитых вокруг органического или металлического сечения. Эволюция конструкций стальных канатов и технологий их изготовления обусловлена постоянным стремлением к повышению прочности, долговечности и надежности. В конструктивном плане это поиск компромисса между максимальным заполнением поперечного сечения металлом, улучшением условий контакта проволок между собой и блоком и гибкостью каната. Эффективность использования канатов в значительной степени определяется правильностью их выбора, расчета и эксплуатации [5, 6]. Конструкции прядей развивались в следующей последовательности:

- простейшие: (2 – 4)-проволочные пряди;
- однослойные пряди, например конструкции 1+6;
- пряди из двух и более слоев с точечным касанием (ТК) между проволоками разных слоев;

- пряди с линейным касанием (ЛК) проволок разных слоев;
- пряди с полосовым касанием (ПК) проволок.

Параллельно шло усложнение конструкций канатов от (2 – 4)-прядных к самому массовому 6-прядному канату и далее к многопрядным и многослойным конструкциям. Наряду с круглопрядными канатами развивались конструкции с трехгранными, овальными или плоскими прядями [7, 8].

В некоторых зарубежных странах тенденция к специализации конструкций канатов к определенным группам машин или даже конкретному оборудованию привела к существенному расширению номенклатуры конструкций, что было закреплено в европейском стандарте EN 12385:2002 «Стальные проволочные канаты». Согласно данному стандарту канаты подразделяют на следующие типы:

– подвижные канаты (Laufende Seile), которые огибают блоки, шкивы и барабаны и при этом принимают их кривизну. К этому виду относятся подъемные, стреловые и тяговые канаты кранов и экскаваторов, тяговые канаты подвесных канатных дорог, подъемные шахтные канаты и т.п.;

– неподвижные канаты (Stehende Seile), которые не огибают блоки, а их концы жестко закреплены. К ним относятся растяжки мачт и стрел, ванты, арматурные канаты, направляющие канаты в шахтах и т.п.;

– несущие канаты (Tragseile), по которым перемещаются ролики транспортных средств, при чем радиус кривизны несущего каната значительно больше, чем радиус ролика. В основном это несущие канаты, канаты подвесных канатных дорог и кабельных кранов;

– такелажные канаты (Anschlagseile), служащие для подвески или подвязки груза (стропы, петли и т.п.) [5].

Традиционно в России и странах СНГ повышение производительности канатных заводов осуществляется посредством поиска «унифицированных» режимов оборудования, позволяющих проводить работу без долгосрочных и дорогостоящих перенастроек производственного оборудования. Однако при выборе каната для конкретных условий эксплуатации важно знать, какие свойства каната могут обеспечить оптимальные эксплуатационные характеристики. Разнообразие областей применения стальных канатов и адаптация их конструкций под конкретные условия эксплуатации привели к формированию огромного сортамента канатов, большинство из

которых в отдельности производятся весьма незначительными тиражами, а некоторые – штучно, под уникальную единицу оборудования. Так, например, среди различных видов предварительно напряженной арматуры, арматурные канаты с гладкой или профилированной поверхностью, упрочненной холодной деформацией или термической обработкой, занимают особое место, что вызвано недостижимым для других видов арматуры сочетанием свойств.

В связи с этим рынок арматурных канатов растет темпами, опережающими темпы роста рынка стали в целом и арматурной стали в частности. По состоянию на 2020-й год в мире было произведено и применено чуть менее 6 миллионов тонн арматурных канатов, из которых более половины объема производства и чуть менее трети рынка сбыта приходится на Китайскую Народную Республику. Для сравнения – в 2000-м году мировой объем производства и потребления арматурных канатов составлял порядка 1 миллиона тонн.

Список основных производителей арматурных канатов, являющихся либо крупнейшими производителями стран/регионов, либо активными экспортерами, либо технологическими лидерами, приведен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Мировые производители арматурных канатов

Компания	Страна, регион	Примерный объем производства, т/год	Примечания
Tianjin Chunpeng	КНР, Тяньцзинь	220 000	Крупнейший производитель арматурных канатов в мире канатов
Yinlong (Silver Dragon)	КНР, Тяньцзинь и восточное побережье	150 000	Крупнейший производитель высокопрочной холоднодеформированной арматуры в мире
Weihai Yinxing Prestressed Wire Products	КНР, Вэйхай	150 000	Крупнейший производитель КНР вне Тяньцзиня
Insteel Wire Industries	США, Флорида, Техас, Теннесси	90 000	Крупнейший производитель всех видов арматуры, включая канаты, в США
Strand-Tech Martin	США, Южная Каролина	40 000	Лидер в производстве особо-высокопрочных канатов

Окончание таблицы 1.1

Компания	Страна, регион	Примерный объем производства, т/год	Примечания
Bridon International	Великобритания, Германия, США, Китай, Новая Зеландия, Индонезия	-	Мировой лидер по общему объему производства стальных канатов
WireCo World Group	США, Германия, Индия, Франция, Нидерланды, Польша, Греция, Португалия, Бразилия, Мексика	-	Мировой лидер по общему объему производства канатов, включая стальные, органические и синтетические
Bekaert	Бельгия (штаб-квартира) и свыше 40 стран на всех континентах	-	Локальный лидер на рынках Бразилии (Belgo Bekaert) и Австралии (OneSteel LR Strand and Wire), один из крупнейших мировых производителей стальных канатов с учетом металлокорда
Usha Martin	Индия, Великобритания, Нидерланды, Таиланд	-	Крупнейший производитель Индии, активно экспортирующий продукцию по всему миру
Kiswire	Южная Корея, Малайзия		Один из крупнейших производителей стальных канатов всех видов в мире
FNsteel	Финляндия, Нидерланды		Бывшее предприятие Ovako, имеющее репутацию производителя с очень высоким качеством продукции
Fapricela	Португалия	100 000	Крупнейший производитель Европы
Strongwill Wire Industries	Пакистан	24 000	Крупнейший производитель Пакистана, превосходящий российских производителей
Maklada	Тунис	40 000	Крупнейший производитель Северной Африки

В виду широкой востребованности арматурных канатов во всем мире в настоящее время существует целый ряд практически идентичных стандартов на арматурные канаты, регламентирующих геометрические параметры и механические характеристики арматурных канатов [3, 9–16]. В большинстве стран мира выпускаются практически идентичные по геометрическим параметрам и механическим свойствам 2-проволочные, 3-проволочные, 7-проволочные (1+6) и 19-проволочные (1+6+12 и 1+9+9) спиральные канаты. Стоит отметить, что при этом используемые стандарты никак не регламентируют уровень остаточных напряжений, возникающих в канате в процессе его многостадийного производства.

В таблице 1.2 представлены результаты сравнительного анализа требований отечественных и зарубежных стандартов к характеристикам высокопрочных арматурных канатов различных диаметров 9,3–15,7 мм с временным сопротивлением не менее 1860 Н/мм².

Таблица 1.2 – Технические требования к высокопрочным арматурным канатам различных диаметров

Наименование НД	Разрывное усилие, кН, не менее	Максимально допустимое разрывное усилие, кН	Нагрузка при условном пределе текучести $\sigma_{0,1}$, кН, не менее	Условный предел текучести $\sigma_{0,1}$, Н/мм ² , не менее	Полное относительное удлинение при максимальной нагрузке δ_{max} , %, не менее	Релаксация при начальной нагрузке 0,7 после 1000 ч выдержки при 20 ± 1 °С, % не более
Арматурный канат диаметром 9,3 мм						
ГОСТ Р 53772-2010	96,7	114,0	85,1	1650	3,5	2,5
prEN 10138-3:2006	96,7	114,0	85,1		3,5	2,5
BS 5896-2:1980	97,0		82,0		3,5	2,5
Арматурный канат диаметром 9,6 мм						
ГОСТ Р 53772-2010	102,0	120,0	90,8	1650	3,5	2,5
prEN 10138-3:2006	102,0	120,0	89,8		3,5	2,5
BS 5896-2:1980	102,0		87,0		3,5	2,5
ASTM A416 (9,53мм)	102,3		92,1 при $\sigma_{1,0}$		3,5	2,5
GB/T5224-2003 (9,5мм)	102,0		91,8 при $\sigma_{1,0}$	1670	3,5	1,0 - 2,5

Продолжение таблицы 1.2

Наименование НД	Разрывное усилие, кН, не менее	Максимально допустимое разрывное усилие, кН	Нагрузка при условном пределе текучести $\sigma_{0,1}$, кН, не менее	Условный предел текучести $\sigma_{0,1}$, Н/мм ² , не менее	Полное относительное удлинение при максимальной нагрузке δ_{\max} , %, не менее	Релаксация при начальной нагрузке 0,7 после 1000 ч выдержки при $20 \pm 1^\circ\text{C}$, % не более
JIS G 3536	102,0		86,8		3,5	3,0
JG161-2004 (9,5мм)	102,0		91,8 при $\sigma_{0,2}$		3,5	2,5
AS4672 (9,5мм)	102,0		83,6		3,5	3,5 при нагрузке 0,8
AS1311 (9,5мм)	102,0		86,7 при $\sigma_{0,2}$		3,5	2,5
ABNT NBR7483:2008 (9,5мм)	104,0		94,0 при $\sigma_{1,0}$		3,5	3,5 при нагрузке 0,8
IS-6006 (9,5мм)	102,3		87,0 при $\sigma_{0,2}$		3,5	5,0
IS-14268 (9,5мм)	102,3		92,1 при $\sigma_{1,0}$		3,5	2,5
ISO 6934-4:1991 (9,5мм)	102,0		83,6		3,5	2,5
Арматурный канат диаметром 12,5 мм						
ГОСТ Р 53772-2010	173,0	204,0	152,0	1650	3,5	2,5
prEN 10138-3:2006	173,0	204,0	152,0		3,5	2,5
BS 5896-2:1980	173,0		147,0		3,5	2,5
Арматурный канат диаметром 12,7 мм						
ГОСТ Р 53772-2010	184,0	216,0	162,0	1650	3,5	2,5
ASTM A416	183,7		165,3 при $\sigma_{1,0}$		3,5	2,5
GB/T5224-2003	184,0		166,0 при $\sigma_{1,0}$	1670	3,5	1,0 - 2,5
JIS G 3536	183,0		156,0		3,5	3,0
JG161-2004	184,0		166,0 при $\sigma_{0,2}$		3,5	2,5
AS4672	184,0		151,0		3,5	3,5 при нагрузке 0,8
AS1311	184,0		156,4 при $\sigma_{0,2}$		3,5	2,5
ABNT NBR7483:2008	187,0		169,0 при $\sigma_{1,0}$		3,5	3,5 при нагрузке 0,8

Продолжение таблицы 1.2

Наименование НД	Разрывное усилие, кН, не менее	Максимально допустимое разрывное усилие, кН	Нагрузка при условном пределе текучести $\sigma_{0,1}$, кН, не менее	Условный предел текучести $\sigma_{0,1}$, Н/мм ² , не менее	Полное относительное удлинение при максимальной нагрузке δ_{\max} , %, не менее	Релаксация при начальной нагрузке 0,7 после 1000 ч выдержки при $20 \pm 1^\circ\text{C}$, % не более
IS-6006	183,7		156,2 при $\sigma_{0,2}$		3,5	5,0
IS-14268	183,7		165,3 при $\sigma_{0,2}$		3,5	2,5
ISO 6934-4:1991	184,0		151,0		3,5	2,5
Арматурный канат диаметром 15,2 мм						
ГОСТ P 53772-2010	259,0	306,0	228,0	1650	3,5	2,5
prEN 10138-3:2006	259,0	306,0	228,0		3,5	2,5
BS 5896-2:1980	259,0		220,0		3,5	2,5
ASTM A416 (15,24мм)	260,7		234,6 при $\sigma_{1,0}$		3,5	2,5
GB/T5224-2003	260,0		234,0 при $\sigma_{1,0}$	1670	3,5	1,0 - 2,5
JIS G 3536	261,0		222,0		3,5	3,0
JG161-2004	260,0		234,0 при $\sigma_{0,2}$		3,5	2,5
AS4672	261,0		214,0		3,5	3,5 при нагрузке 0,8
AS1311	250,0		212,5 при $\sigma_{0,2}$		3,5	2,5
ABNT NBR7483:2008	266,0		239,0 при $\sigma_{1,0}$		3,5	3,5 при нагрузке 0,8
IS-6006	261,4		222,2 при $\sigma_{0,2}$		3,5	5,0
IS-14268	260,7		234,5 при $\sigma_{1,0}$		3,5	2,5
ISO 6934-4:1991	259,0		212,0		3,5	2,5
Арматурный канат диаметром 15,7 мм						
ГОСТ P 53772-2010	279,0	329,0	246,0	1650	3,5	2,5
prEN 10138-3:2006	279,0	329,0	246,0		3,5	2,5
BS 5896-2:1980	279,0		237,0		3,5	2,5
GB/T5224-2003	279,0		251,0 при $\sigma_{1,0}$	1670	3,5	1,0 - 2,5

Окончание таблицы 1.2

Наименование НД	Разрывное усилие, кН, не менее	Максимально допустимое разрывное усилие, кН	Нагрузка при условном пределе текучести $\sigma_{0,1}$, кН, не менее	Условный предел текучести $\sigma_{0,1}$, Н/мм ² , не менее	Полное относительное удлинение при максимальной нагрузке δ_{max} , %, не менее	Релаксация при начальной нагрузке 0,7 после 1000 ч выдержки при $20 \pm 1^\circ\text{C}$, % не более
JG161-2004	279,0		251,0 при $\sigma_{0,2}$		3,5	2,5
ABNT NBR7483:2008	279,0		246,0 при $\sigma_{1,0}$		3,5	3,5 при нагрузке 0,8

Как видно из таблицы 1.2, основные требования, предъявляемые к арматурным канатам, должны обеспечить высокую прочность изделия, низкую релаксацию напряжений, а также качественное сцепление с бетоном. Различающиеся требования к релаксации напряжений и нагрузке, при которых ее измеряют, связаны с тем, что в ряде стран существуют отдельные стандарты на канаты, предназначенные для постнатяжения. Кроме того, помимо требований к самим канатам, в некоторых странах существуют отдельные требования к методикам их испытаний.

Произведя анализ существующих конструкций арматурных канатов, а также требований к их механическим характеристикам, можно сделать вывод, что все они имеют те или иные недостатки, не позволяющие им превзойти по соотношению «цена-качество» высокопрочные стабилизированные арматурные канаты конструкции 1×7 (1+6) диаметром 12,5 мм.

Высокая сходимость технических характеристик, представленных стандартов объясняется как унификацией стандартов разных стран для использования наиболее эффективных технологических разработок в сфере строительства, так и очень близкими параметрами оборудования разных производителей. Далее представлен анализ действующих мировых производств по выпуску высокопрочных стабилизированных арматурных канатов как основы современных эффективных строительных технологий изготовления сборного железобетона с предварительным натяжением.

1.2 Анализ действующих технологий производства арматурных канатов

В России наиболее конкурентоспособными производителями высокопрочных стабилизированных арматурных канатов являются открытое акционерное общество «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ» (группа ПАО «ММК»), доля на рынке метизной продукции более 21 %), открытое акционерное общество «Северсталь-метиз» (группа «Северсталь»), акционерное общество «Белорецкий металлургический комбинат» (группа «Мечел»). В таблице 1.3 приведено описание основных технологических операций и оборудования, используемого вышеуказанными и зарубежными производителями при производстве стабилизированных арматурных канатов. В ходе анализа оборудования и технологических схем производства арматурных канатов, используемых ведущими зарубежными и отечественными предприятиями метизной отрасли, установлено, что современные тенденции развития науки, техники и технологий в области рассматриваемого производства сосредоточены в области поиска оптимального баланса между технологическими воздействиями различной физической природы. При этом целью подобного баланса является достижение наряду с высокопрочным состоянием обрабатываемой стали еще и комплекса спецсвойств, отвечающих потребностям будущей области эксплуатации армирующих изделий для железобетонных конструкций [17-22]. Под высокопрочным состоянием в работе понимается такое состояние структуры изделия, которое достигается с помощью многократных технологических воздействий, за счет которых, в конечном итоге, обеспечиваются высокие показатели эксплуатационных свойств. При этом в мировой практике достижение заданных показателей качества арматурных канатов основано на применении микролегированных сталей, отличающихся высокой стоимостью и сложностью химического состава.

Таблица 1.3 – Описание основных технологических операций и оборудования при производстве арматурных канатов у различных производителей

Наименование операции	Описание процесса	Технологическое оборудование производителя				
		ОАО «ММК-МЕТИЗ» (Россия)	ОАО «Северсталь-метиз» (Россия)	АО «БМК» (Россия)	«NEDRI Spanstaal B.V.» (Нидерланды)	«Arcelor Mittal» (Италия, Франция, Бельгия)
1	2	3	4	5	6	7
Патентирование катанки (при необходимости)	Процесс включает операции: – размотка мотков катанки, – нагрев, – изотермическое охлаждение, – охлаждение в ванне с проточной водой, воздушный обдув, – намотка катанки в мотки	Агрегат патентирования катанки из высокоуглеродистых марок стали диаметром от 6,0 до 18,0 мм	Используют непатентованную сорбитизированную катанку производства «Северсталь». Выбор катанки с определенным химическим составом и качеством	Используют непатентованную сорбитизированную катанку производства Группы «Мечел»	Работают на горячекатаной непатентованной сорбитизированной катанке, которую получают от компаний «Arcelor» и «Ovako»	Используют непатентованную сорбитизированную катанку производства своей компании
Подготовка поверхности катанки к волочению	Производится с целью удаления окалины, жировых и других загрязнений, нанесения подмазочного слоя. Для удаления поверхностного окисления бунты катанки погружаются в кислотный раствор при температуре окружающей среды.	Совмещенный процесс патентирования, травления и подготовки поверхности заготовок. Высокоскоростное химическое травление заготовки в растворе соляной	Линии травления в растворе серной или соляной кислоты, промывочные ванны, ванны для бурирования или фосфатирования, сушила (устройства для сушки)	Линии травления в растворе серной или соляной кислоты, промывочные ванны, ванны для бурирования или фосфатирования, сушила (устройства для сушки)	Линии травления в растворе соляной кислоты, промывочные ванны, ванны для бурирования или фосфатирования, сушила (устройства для сушки)	Линии травления в растворе соляной кислоты, промывочные ванны, ванны для бурирования или фосфатирования, сушила (устройства для сушки)

Наименование операции	Описание процесса	Технологическое оборудование производителя					
		ОАО «ММК-МЕТИЗ» (Россия)	ОАО «Северсталь-метиз» (Россия)	АО «БМК» (Россия)	«NEDRI Spanstaal B.V.» (Нидерланды)	«Arcelor Mittal» (Италия, Франция, Бельгия)	
1	2	3	4	5	6	7	
	Концентрация раствора и время нахождения в нем контролируются во избежание перетрава поверхности подката и охрупчивания из-за поглощения водорода. После очистки поверхности бунт катанки очищается водой под большим давлением для удаления всех остатков кислоты. На поверхность катанки наносится подмазочный слой для обеспечения сцепления металла с волочильной смазкой и стабильности процесса волочения	кислоты. После процесса травления осуществляется промывка заготовки в промывочной ванне с проточной водой					
Волочение проволоки	Волочение – процесс холодной деформации, заключающийся в последовательном уменьшении поперечного сечения катанки до	Высокопроизводительный прямоточный стан многократного волочения проволоки	9-кратные прямоточные волочильные станы (2 шт.) фирмы «MFL» (Италия)	9-кратный волочильный стан фирмы «MFL» (Италия) для производства проволоки	Многократные прямоточные волочильные станы	Многократные прямоточные волочильные станы	

Наименование операции	Описание процесса	Технологическое оборудование производителя				
		ОАО «ММК-МЕТИЗ» (Россия)	ОАО «Северсталь-метиз» (Россия)	АО «БМК» (Россия)	«NEDRI Spanstaal B.V.» (Нидерланды)	«Arcelor Mittal» (Италия, Франция, Бельгия)
1	2	3	4	5	6	7
	<p>необходимого размера, при увеличении прочностных характеристик.</p> <p>В процессе волочения сьем катанки производится разматывающим устройством. Волочение проволоки на современном прямоточном волочильном стане осуществляется без скручивания проволоки вокруг своей оси и с интенсивным охлаждением волок и барабанов, с необходимым количеством протяжек с целью получения заданного диаметра и требуемых физико-механических свойств. Протянутую высокопрочную проволоку наматывают на катушки, которые поступают на последующую технологическую операцию</p>			диаметром 3,0-8,0 мм		

Наименование операции	Описание процесса	Технологическое оборудование производителя				
		ОАО «ММК-МЕТИЗ» (Россия)	ОАО «Северсталь-метиз» (Россия)	АО «БМК» (Россия)	«NEDRI Spanstaal B.V.» (Нидерланды)	«Arcelor Mittal» (Италия, Франция, Бельгия)
1	2	3	4	5	6	7
Свивка каната	Заключается в спиральной свивке стальной проволоки, наматываемой вокруг сердечника, представляющего собой проволоку, большего чем у внешних проволок диаметра. Свивка проволок в канат осуществляется канатовьющей машиной, обычно бугельного типа. Формирование каната происходит в плашках на выходе из машины	Совмещенный процесс свивки и рихтовки каната на канатной машине бугельного типа. Входит в состав линии стабилизации	Канатная машина бугельного типа для свивки канатов конструкции (1+6). Входит в состав линии для производства стабилизированных арматурных канатов	Канатная машина бугельного типа для свивки канатов конструкции (1+6). Входит в состав линии для производства стабилизированных арматурных канатов	Канатная машина бугельного типа для свивки канатов конструкции (1+6). Входит в состав линии для производства арматурных канатов	Канатная машина бугельного типа для свивки канатов конструкции (1+6). Входит в состав линии для производства арматурных канатов
Стабилизация	Используется для повышения условных пределов упругости и текучести, повышения релаксационной стойкости стали. Готовый арматурный канат наматывается на разборную катушку, установленную на специальном намотчике.	Линия стабилизации, включающая низкотемпературный нагрев в пределах 350–400°С под натяжением с последующим управляемым охлаждением и сушкой поверхности	Линия «MFL» (Италия) для изготовления 7-проволочных арматурных стабилизированных прядей диаметрами от 6,0 до 18,0 мм с низкой релаксацией. Состав: канатная	Линия «MFL» (Италия) для изготовления 7-проволочных арматурных стабилизированных прядей диаметрами от 6,0 до 18,0 мм с низкой релаксацией.	Линии «MFL» и «GCR Eurodraw SPA» для изготовления арматурных прядей (несколько шт.). Пряди изготавливаются из 7-ми проволок диаметром	Линии «MFL» для изготовления проволочных арматурных стабилизированных прядей с низкой релаксацией. Пряди изготавливаются

Наименование операции	Описание процесса	Технологическое оборудование производителя				
		ОАО «ММК-МЕТИЗ» (Россия)	ОАО «Северсталь-метиз» (Россия)	АО «БМК» (Россия)	«NEDRI Spanstaal B.V.» (Нидерланды)	«Arcelor Mittal» (Италия, Франция, Бельгия)
1	2	3	4	5	6	7
	Канаты пакуются в бухты с плотной обвязкой стальными лентами		машина, индукционная печь, устройство рядной намотки-размотки, упаковочный агрегат для тороидальной упаковки мотков. В линии дополнительно установлен экструдер для изготовления канатов в пластиковой оболочке	Состав: канатная машина, индукционная печь, устройство рядной намотки-размотки, упаковочный агрегат для тороидальной упаковки мотков	6,9-18 или 3-х проволоч диаметром 5,2-7,5 мм. Имеется экструдер для производства пряжи консистентной смазкой и в оболочке из полиэтилена высокой плотности. Могут производить прядь в оболочке с парафином	из 7-ми проволоч диаметром 6,4-17,8 или 3-х проволоч диаметром 5,2-7,5 мм. Имеется экструдер для производства пряжи консистентной смазкой и в оболочке из полиэтилена высокой плотности

Анализ действующих мировых производств показал высокую схожесть применяемого технологического оборудования при производстве высокопрочных стабилизированных арматурных канатов. В виду этого для повышения спроса на метизную продукцию, выпускаемую ОАО «ММК-МЕТИЗ», актуальной задачей является поиск технологических решений, которые при минимизации затрат на производство позволили бы обеспечить требуемый уровень качества продукции, в том числе качество арматурных канатов, и повысить её конкурентоспособность.

До недавнего времени наиболее распространенным способом повышения механических характеристик арматурных канатов был низкотемпературный отпуск (порядка 400°C). Однако данный способ обработки обеспечивал стойкость к релаксации напряжений лишь на уровне 8% потерь от исходного натяжения 70% усилия разрыва в течение 1000 часов [23]. Поэтому для абсолютного большинства производимых в настоящее время арматурных канатов используется низкотемпературная стабилизация. Неуклонный рост выпуска арматурных канатов с применением операции стабилизации связан с тем, что данная операция резко повышает упругие и прочностные свойства канатов. Так, реологические свойства канатов после операции стабилизации немного выше, чем у отпущенных. Релаксация напряжений через 1000 ч у канатов после стабилизации составляет 2–3%, у отпущенных — 7–10%. Результаты испытаний канатов показали, что условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ у канатов после стабилизации составлял 95-97% от $\sigma_{\text{в}}$; у канатов без стабилизации – 60–70% от $\sigma_{\text{в}}$; релаксация напряжений у стабилизированных канатов была в 6-12 раз меньше, чем у нестабилизированных; удлинение при разрыве и $\sigma_{\text{в}}$ в процессе стабилизации не меняется. В работах [24, 25] были исследованы опытные образцы канатов, произведенные с различными вариантами температуры и нагрузки:

- температуры нагрева: 200, 300, 400, 500°C ;
- нагрузки на канат, равные: 0,2; 0,25; 0,35 от $\sigma_{\text{в}}$.

Результаты испытаний образцов канатов на текучесть показали повышение $\sigma_{\text{т}}$ с увеличением нагрузки на канат и температуры нагрева, причем увеличение температуры выше 400°C нецелесообразно, так как результаты при 500°C ниже полученных при 400°C . В зависимости от режимов обработки $\sigma_{\text{т}}$ увеличивался у канатов после стабилизации до 0,90–0,97 $\sigma_{\text{в}}$.

В Великобритании значительный опыт в производстве стабилизированных канатов для армирования предварительно-напряженных железобетонных конструкций ответственного назначения имеют фирмы “Guest, Keen and Nettlefolds” (GKN Ltd), “Somerset Wire Company” и “Bridon-Bekaert The Ropes Group”. Предприятия фирмы “Somerset Wire Company” выпускают семи- и девятнадцатипроволочные пряди после процесса стабилизации для армирования предварительно-напряженных железобетонных изделий. Кроме стандартных прядей, фирма выпускает семипроволочные пряди повышенной прочности (приблизительно на 10% против стандартной прочности), а также пластически обжатые пряди. Разрушающая нагрузка для пластически обжатой пряди после процесса стабилизации в среднем на 27% выше, чем для необжатой соответствующего диаметра. Значение временного сопротивления пластически обжатой пряди в среднем на 5% выше величины временного сопротивления стандартной пряди с повышенной прочностью.

Принцип действия известных установок для стабилизации арматурных канатов представлен на рисунке 1.1. При этом несколько витков пряди наматывают на два рабочих барабана, после чего прядь поступает на натяжной холостой барабан и оттуда пропускается несколько раз вновь через канавки двух рабочих барабанов. Из-за разницы диаметров канавок рабочих барабанов происходит постепенная вытяжка пряди.

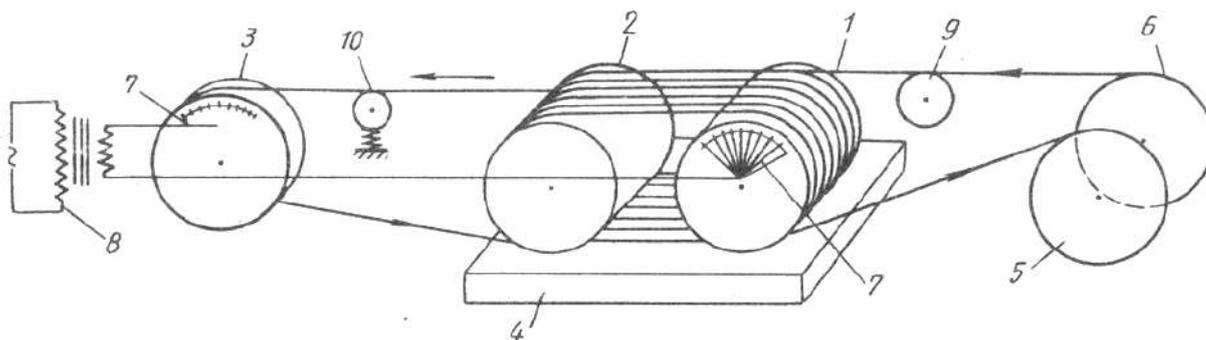


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема установки для стабилизации прядей:

- 1 – первый рабочий (контактный) барабан; 2 – второй рабочий барабан;
- 3 – натяжной (холостой) барабан; 4 – чаша с водой; 5 – размоточное устройство;
- 6 – намоточное устройство; 7 – электроконтакты; 8 – трансформатор;
- 9 – тормозной барабан; 10 – измеритель натяжения

Исследования, проведенные в России и за рубежом, по выявлению влияния технологических факторов на формирование релаксационных свойств канатов при стабилизации показали, что основными являются температура, величина и характер приложенных напряжений, время одновременного воздействия температуры и напряжения [26–34]. Однако нет единого мнения о рациональном температурном интервале. Часть авторов рекомендуют производить механико-термическую обработку в температурном интервале 275–325°C, а другие предпочтение отдают температурному интервалу 350–400°C. Первый температурный диапазон был получен при исследовании нагрузки, которая составляла 0,60–0,65 $\sigma_{\text{в}}$, то есть образец деформировался в упругой области, а второй интервал температур определен при воздействии нагрузки, обеспечивающей удлинение проволоки в процессе механико-термической обработки более 1,0%. Нет единого мнения и о величине прилагаемого напряжения. Одни исследователи считают, что величина напряжения не должна превышать 0,7 $\sigma_{\text{в}}$, то есть образец должен испытывать упругие деформации, другие считают, что деформация при механико-термической обработке должна происходить в пластической области. Установлено, что повышение остаточной деформации до 5% положительно сказывается на релаксационной стойкости [29].

Как известно, работоспособность арматурных канатов определяется свойствами используемой для производства проволоки, параметрами процесса свивки, температурно-силовыми режимами основной обработки. Например, для придания проволокам спиральной формы, которую они получают при процессе свивки, в технологическом процессе существует процесс преформации. Наиболее часто преформация используется не для проволок, а для прядей каната, и совмещается этот процесс с последующей операцией рихтовки или вытяжки [35].

Широкое распространение в канатном производстве получила так называемая операция рихтовки (в англоязычной литературе термин «Post-Forming»), которая заключается в многократном знакопеременном изгибе пряди в роликах. Роликовые устройства для рихтовки штатно устанавливаются на большинстве волочильных станков и практически на всех канатовьющих и прядевьющих машинах. Обычно рихтовка канатов производится после свивки в двухплоскостных 10-роликовых рихтователях, устанавливаемых за обжимными плашками канатных машин. Суть обработки

заключается в радиальном обжатии каната, его изгибе вследствие небольшого заглубления роликов и небольшой вытяжке. Всё это, в свою очередь, приводит к уплотнению конструкции каната и, как следствие, к существенному снижению раскручиваемости из-за перераспределения напряжений. Однако специфика способа и применяемого оборудования не позволяет контролировать свивочные напряжения во всём поперечном и продольном сечении каната, что может непрогнозируемо влиять на его технический ресурс [36-41].

Предварительная вытяжка в основном применяется для канатов двойной свивки, закрытых подъемных и арматурных канатов. Режим вытяжки определяется типом, конструкцией и размером каната. Данная обработка заключается в упругопластическом растяжении каната после его свивки под нагрузкой, значительно превышающей эксплуатационную и составляющую до 50% агрегатного разрывного усилия каната. Оставшиеся после свивки зазоры устраняются под действием натяжения повивочных проволок, так как происходит их «прижатие» к центральной, в результате чего расширяются контактные площадки и, соответственно, уменьшаются контактные напряжения при последующем (рабочем) натяжении. Участки сечения, в которых присутствуют наиболее высокие остаточные растягивающие напряжения, переходят в состояние пластического растяжения, в результате чего после снятия внешнего растягивающего усилия и соответствующей разгрузки в данных участках возникают остаточные напряжения обратного знака – сжимающие. Таким образом, предварительная вытяжка способствует равномерному снижению напряжений и деформаций как по длине, так и по поперечному сечению каната, уменьшению изгибающего момента в сечениях проволок и крутящего момента в сечении каната [42]. Данный процесс был подробно исследован Маниным В.П. и Адамчуком С.В. при отработке новых конструкций и технологий производства арматурных канатов [43, 44]. В настоящее время предварительная вытяжка не используется при производстве высокопрочных арматурных канатов. Считается доказанным фактом, что предварительная вытяжка без сочетания с термическим воздействием не может обеспечить стандартные требования по релаксационной стойкости каната, а также не обеспечивает уплотнение, требующееся для обеспечения минимально приемлемого для арматурных канатов модуля упругости.

Наряду с преформацией, рихтовкой, вытяжкой и стабилизацией эффективным способом обработки является пластическое обжатие [5, 45–47]. Пластическое обжатие арматурных канатов увеличивает плотность свивки, снижает потери от релаксации напряжений, обеспечивает высокую точность геометрических размеров каната. Несмотря на то, что исследования данного способа обработки [48–52] начались во второй половине 1962 г. в Одесском научно-исследовательском отделе стальных канатов (ОНИСК ВНИИМетиз) и на Белорецком металлургическом комбинате, на данный момент пластическое обжатие арматурных канатов малоизучено с позиции эффективности применения на производстве и влияния на напряженное состояние каната.

На сегодняшний день известно, что для обжатия каната применяются разные виды деформирующего инструмента: монолитные волокна [53–67], вращающиеся [68–70], роликовые [71–73] и прокатные клетки [47, 74–81]. На основе сравнительного анализа указанных методов пластического обжатия из работы [47], а также патентов [82–84] и исследований работ Малиновского В.А. установлено, что применение сдвоенных роликовых волокон со схемой деформации «круг-круг» на высокопроизводительных прядевьющих сигарных машинах и машинах двойной скрутки позволяют упростить конструкцию роликовой волокни, осуществить малое обжатие за один проход роликов и, соответственно, уменьшить габариты и стоимость инструмента. При этом калибрующее пластическое обжатие каната способствует формированию уплотненной гибкой пряди и качественной поверхности, а также повышает долговечность канатов и точность по диаметру [85–88].

Операция пластического обжатия при одновременном создании развитого рельефа поверхности (нанесение профиля на канат) обладает рядом преимуществ. В сравнении со свивкой предварительно профилированных повивочных проволок каната способ пластического обжатия с одновременным нанесением периодического профиля имеет технологические плюсы по целому ряду параметров:

- а) процесс осуществляется на скорости до 2 м/с при профилировании проволоки на волочильных станах;
- б) на проволоку наносится один элемент периодического профиля вместо трех;

в) элемент периодического профиля наносится в процессе обжата, при котором возникает сплющивание и удлинение деформируемого участка – это может обеспечить более благоприятный характер напряженно-деформированного состояния по сравнению со свивкой из профилированных проволок, при которой ранее сформированный концентратор напряжений подвергается нагружению на растяжение в процессах свивки и рихтовки;

г) растягивающие и скручивающие нагрузки в процессах прохождения ротора и свивки прикладываются к проволоке, еще не имеющей каких-либо концентраторов напряжений, растягивающие нагрузки на концентраторы напряжений при рихтовке могут быть исключены из технологического процесса;

д) обеспечивается возможность исключения операции рихтовки;

е) исключается операция профилирования свивочных проволок каната. Это обеспечивает повышение производительности, снижает затраты, повышает качество проволоки;

ж) при свивке каната исключаются проблемы, имеющие место при использовании повивочных проволок периодического профиля: обрывность проволоки, вытягивание проволоки в обжимных плашках и при рихтовке, дополнительное изнашивание проводок канатной машины и ниппелей распределительного шаблона.

Совокупность вышеперечисленных факторов позволяет производить арматурный канат, обладающий повышенным сцеплением с бетоном при меньшем риске повреждения заготовки при переработке, а также с меньшими издержками на расход профилирующего инструмента и направляющих фильер.

Кроме того, потребители пластически обжатых канатов могут повысить свои технико-экономические показатели за счет снижения потерь от релаксации напряжений, снижения массы погонного метра каната, а также возможности повышения коэффициента использования прочности каната при изготовлении железобетонных конструкций. Это обеспечивается за счет формирования более развитой поверхности каната, уменьшения или полного исключения сдвига проволок обжатого каната при натяжении за счет увеличения контактных поверхностей, а также повышенных свойств проволок и каната в целом.

Влияние всех вышеуказанных операций на перераспределение остаточных напряжений каната в том или ином виде известно, а влияние калибрующего пластического обжатия освещено в литературе не в полной мере. Поэтому одна из задач проводимых исследований направлена на установление влияния калибрующего пластического обжатия на внутренние напряжения каната.

Исходя из схожести технологических линий отечественных и мировых производителей арматурных канатов, а также обзора дополнительных операций, влияющих на качество готового изделия, проведенные исследования в диссертационной работе базировались на примере действующего в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» производства высокопрочных стабилизированных арматурных канатов диаметром 12,5 мм конструкции 1×7 (1+6) из стали марки 80 с целью повышения конкурентоспособности выпускаемого изделия. Возможность совершенствования действующей технологии рассмотрена с точки зрения оценки потенциала внедрения операции калибрующего пластического обжатия как одного из перспективного способа обработки канатов, а также через призму оценки сквозной технологии производства высокопрочных стабилизированных арматурных канатов на предмет формирования и изменения внутренних напряжений изделия на каждом этапе его производства.

1.3. Остаточные напряжения как свойствообразующий фактор и способы их исследования

Поскольку арматурный канат должен сочетать в себе комплекс свойств, состоящий из высокой прочности, релаксационной стойкости, повышенным сцеплением с бетоном, а также коррозионной стойкости и других параметров, то справедливо будет отметить те факторы, которые непосредственно влияют и формируют данный комплекс. Одним из таких важных факторов являются внутренние напряжения, которые возникают на каждом этапе многооперационного процесса производства и которые являются некой «неосязаемой субструктурой», наследуемой от операции к операции.

В данной работе под внутренними напряжениями арматурного каната понимается комплекс из остаточных напряжений, которые остаются в металле после прекращения действия нагрузки (после операции волочения), и временных (свивочных)

напряжений, которые возникают в ходе процесса обработки металла и в значительной степени исчезают после снятия нагрузки (после процесса свивки проволок в канат).

Влияние остаточных напряжений на конечные свойства проволоки достаточно широко описаны в литературе [89–96]. Согласно Биргеру И.А., остаточные напряжения условно подразделяют на макронапряжения и микронапряжения. Как правило, макронапряжения возникают от внешних нагрузок и изменяются несущественно в пределах зерна материала. Микронапряжения же испытывают резкие изменения в пределах зерна и связаны с наличием различных фаз, ориентацией кристаллографических плоскостей и т.д. Главным отличием микронапряжений от макронапряжений является не только масштабный уровень их проявления, но и среды, в которых потенциально они могут развиваться. Макронапряжения могут возникать в любой сплошной однородной изотропной среде. Микронапряжения в таком материале существовать не могут, они могут возникать вследствие существенной неоднородности кристаллического материала и его анизотропных свойств.

Общепринятая классификация напряжений выделяет напряжения 1-го рода (макронапряжения), напряжения 2-го рода (микронапряжения) и напряжения 3-го рода (субмикроскопические) [96].

Величина напряжений 1-го рода определяется плотностью дислокаций, а знак зависит от характера расположения однородных дислокаций по отношению к поверхности металлоизделия. Сжимающие остаточные напряжения возникают в случае преобладающего расположения у поверхности множества положительных дислокаций на параллельных плоскостях скольжения, а в случае расположения у поверхности отрицательных дислокаций возникают остаточные напряжения растяжения.

Основной причиной возникновения остаточных напряжений в проволоке в процессе волочения является неоднородность пластической деформации металла, которая возникает вследствие неоднородного холодного деформирования по сечению, неравномерного распределения температур при нагреве или охлаждении, неравномерности фазовых превращений в изделии. Одни слои материала растягиваются в большей степени, а другие – в меньшей, вследствие этого после разгрузки в них возникают соответственно остаточные напряжения сжатия и растяжения. Известно [96], что одним лишь перераспределением остаточных напряжений можно значительно

повысить усталостную прочность готового изделия. Как правило, любая обработка поверхности изделий приводит к возникновению и росту поверхностных сжимающих напряжений [97, 98]. В теории обработки металлов давлением принято считать, что растягивающие напряжения оказывают отрицательное, а сжимающие напряжения – положительное воздействие, и поэтому теоретически ставится и решается задача минимизации доли растягивающих напряжений и снижения их величины. Однако такие задачи трудно решаемые теоретически и часто их невозможно решить в условиях действующих технологических операций изготовления проволоки и свивки ее в канат.

Канаты большинства конструкций производятся посредством свивки проволок, полученных на предыдущей операции волочения с высокими степенями деформации (до 88–90%). Формирование каната из отдельных проволок придаёт ему повышенную прочность и малую изгибную жесткость, то есть возможность изгиба на относительно малом радиусе в пределах упругих деформаций материала проволоки. Напряжения, возникающие в проволоках при свивке, создают значительные моменты упругой отдачи в слоях этих проволок, что может привести к технологической неуравновешенности каната, нарушению его структурной плотности и неблагоприятному перераспределению напряжений. Это значительно снижает срок службы канатов, а также создает дополнительные трудности при их эксплуатации. Кроме того, после свивки проволок в канат в области их соприкосновения возникают местные контактные напряжения [42, 99–101].

Упругопластические деформации, которые испытывают проволоки каната при свивке, вызывают в поперечном сечении проволок нормальные напряжения изгиба, растяжения, а также касательные напряжения кручения. Из всех стадий получения каната при свивке формируется основная картина напряженного состояния [35].

Многочисленными исследователями [93, 102–104] установлено, что рационально управляя величиной и характером распределения внутренних напряжений в канате можно создавать такое распределение остаточных напряжений, которое обеспечит в сочетании с другими факторами достижение необходимого комплекса свойств конечной продукции. К примеру, благоприятное распределение напряжений повышает усталостную и вибрационную прочность. Кроме того, скорость релаксации и, следовательно, потери от релаксации напряжений зависят от величины растягивающих

напряжений и градиента локализации их распределения по сечению изделия. Чем выше величина и больше градиент локализации напряжений, тем выше при прочих равных условиях потери от релаксации. Часто уже на стадии складского хранения металлоизделий может происходить перераспределение остаточных напряжений, нарушение равновесия которых вследствие релаксации приводит к искажению формы или размеров изделия. В данных случаях требуются дополнительные производственные меры либо по устранению остаточных напряжений, либо по благоприятному их перераспределению. При этом учитывают исходный количественный уровень этих напряжений и генерируемую ими схему нагружения, так как от этого напрямую зависит скорость их релаксации. Причем на основании ряда экспериментов отмечается, что релаксация идет тем быстрее, чем выше был исходный уровень напряжений [105–107]. Релаксация внутренних напряжений в различных участках тела приводит к постоянному перераспределению этих напряжений и установлению новых уравновешенных состояний. Следовательно, неоднородность исходного напряженного состояния в отдельных случаях может выступать главным определяющим фактором коробления изделия.

Традиционно технологии производства металлоизделий оптимизируются с позиции полного устранения остаточных напряжений по причине того, что они могут стать первопричиной не только коробления, но и критически серьезного снижения механических свойств (понижение предела упругости материала, изменение предела усталости и т.д.) и последующего хрупкого разрушения. Особое внимание уделяется поверхностным слоям метизов, работающим при знакопеременной нагрузке. В данном случае наличие растягивающих остаточных напряжений может инициировать процесс усталостного разрушения. Устранение растягивающих остаточных напряжений, как правило, осуществляется любой обработкой, в ходе которой на поверхности формируются сжимающие остаточные напряжения. Для снижения остаточных напряжений в провивочных проволоках (исходных и возникающих при свивке) возможно применение рихтующих роликов, что в среднем увеличивает работоспособность каната на 33% [99]. Однако режим рихтования должен быть научно обоснован, так как при определенных условиях эффект такой обработки может быть обратным [26].

Анализ существующих методов [108–117] исследования остаточных напряжений позволил обозначить проблему изучения напряжений длинномерных изделий в непрерывной технологии производства. Существующие методики определения остаточных напряжений носят в основном экспериментальный характер, не обладают универсальностью, применение их зачастую затруднено и приводит к значительным погрешностям. Практически все известные механические методы исследования напряжений являются разрушающими, так как подразумевают снятие некоторой части металлического изделия и замер деформаций. В основе этих методов лежит принцип уравниваемости остаточных напряжений внутри тела, поэтому при разрезании тела в исследуемой части возникают упругие деформации, которые должны обратить в ноль равнодействующую силу и момент остаточных напряжений, создавая тем самым новое равновесие напряжений в теле. Измеряя возникшие деформации, можно в каждом конкретном случае определить величину остаточных напряжений, действующих в удаленной части тела.

Рентгеновские методы обладают преимуществом перед механическими методами в виду сохранения целостности объекта исследования, а также из-за возможности измерения напряжений в каждой точке поверхности при любом распределении напряжений. Например, в центре высокотехнологичных машиностроительных производств Пермского национального исследовательского политехнического университета для исследования влияния различных режимов технологических процессов на формирование остаточных напряжений в деталях используется роботизированный анализатор остаточных напряжений XSTRESS 3000, который работает с магнитными датчиками и датчиками рентгеновского излучения [115].

Конкретные условия исследований определяют выбор того или иного метода. Для определения остаточных напряжений в проволоке получили распространение следующие методы: одностороннее спиливание образца на определенной длине; снятие концентрических слоев сечения; термический и рентгеновский.

Практически все вышеописанные методы исследования напряжений предполагают их изучение после снятия всех нагрузок (то есть постфактум) и ни один из методов, вероятнее всего, не способен показать распределение или численное значение внутренних напряжений в момент обработки металла (в очаге деформации).

Кроме того, остановка многооперационной технологии производства проволоки для проведения замеров остаточных напряжений после очередного прохода подразумевает значительные временные и трудозатраты, что негативно сказывается на итоговой стоимости готовой продукции. Во избежание удорожания готового изделия и для оперативного определения уровня остаточных напряжений рационально использовать методы прогнозирования напряженности изделия на этапе проектирования технологии его производства.

При этом при проектировании технологии производства металлоизделий усилия должны направляться не на борьбу с остаточными напряжениями, а на оптимальное управление ими, то есть на поиск таких режимов обработки, которые создавали бы распределения данных напряжений, гарантированно улучшающих эксплуатационные свойства изделий [118–120]. Без сомнения, такая оптимизация технологий трудна из-за многообразия причин порождения остаточных напряжений и сложности механизмов их измерения при неоднородных полях деформаций и температур, при фазовых превращениях и структурных перестройках металла. Поскольку проблема перераспределения остаточных напряжений на протяжении долгого времени является актуальной, технологи вынуждены изменять режимы пластической и термической обработок канатов, либо вводить дополнительные операции. Известно, что в качестве эффективных технологических воздействий для перераспределения остаточных напряжений применяется термическая обработка, механическое воздействие или механотермическая обработка.

Следует учитывать тот факт, что любая термическая обработка с последующим охлаждением будет генерировать новые схемы распределения остаточных напряжений. Поэтому новое распределение остаточных напряжений может быть в равной степени как положительным, так и отрицательным для итогового уровня свойств конечного изделия. Так, например, вследствие термообработки может создаться такая комбинация напряжений в разупрочненном металле, что новое распределение напряжений будет являться неблагоприятным даже при снижении их абсолютных значений или знака.

Применение операции отжига ограничивается в виду нежелательных структурных и фазовых превращений, которые могут произойти при нагреве проволоки [22]. Поэтому актуальной оптимизационной задачей становится поиск

сбалансированного решения между снятием остаточных напряжений и потенциальным ухудшением механических и других свойств.

В большинстве случаев патентованная стальная проволока подвергается отпуску. Уже в процессе волочения за счет теплоты пластической деформации и контактного трения может происходить частичный отпуск проволоки, температура и продолжительность которого зависит от условий волочения и охлаждения [96].

Также в качестве метода снижения или перераспределения остаточных напряжений может использоваться циклическая нагрузка. Например, знакопеременная нагрузка может вызывать пластические деформации, что приводит к изменению остаточных напряжений в металле. Однако если внутренние напряжения металла не достигают величины предела упругости материала, то остаточные напряжения практически не изменятся при действии вышеупомянутой обработки.

Вибрационный метод применим для тех заготовок, которые нельзя подвергать термической обработке для снятия остаточных напряжений. Изменения геометрических параметров заготовки при воздействии вибрации не происходит, она приводит только к релаксации напряжений. Также вибрация не оказывает никакого воздействия на предел текучести и прочности материала [96, 121, 122].

Наилучшим потенциалом по управлению остаточными напряжениями обладают методы, сочетающие в себе воздействие различной физической природы, а именно температуры и механической обработки. Известно, что пластическое деформирование и термическая обработка меняют свойства металлов. Объединение этих операций, максимальное их сближение и создание единого процесса механотермической обработки (стабилизации) обеспечивают заметное повышение механических характеристик [24, 25, 123–126], что позволяет экономить до 15–40% металла и более или увеличить долговечность изделий.

Зарубежная практика применения операции стабилизации показывает её способность повышения релаксационной стойкости изделий. Причем исследователи утверждают, что одним из решающих механизмов повышения релаксационной стойкости является снижение уровня остаточных напряжений и выравнивание их по сечению. При этом релаксационная стойкость канатов может возрасти до 4-5 раз выше, чем после обычной термической обработки [33].

На сегодняшний момент выполнено достаточное количество исследований по различным проблемам остаточных напряжений (методы определения остаточных напряжений, их влияние на механические свойства изделий и т.д.), но в литературе редко встречаются данные по изучению пооперационного наследования остаточных напряжений в процессе производства сложносоставных длинномерных изделий, подобных высокопрочным арматурным канатам. Поскольку известные методы исследования внутренних напряжений не позволяют точно определить и увидеть картину распределения напряжений внутри изделия, одним из рациональных способов для подобного рода исследований является компьютерное моделирование. Благодаря его современным методам [127–135] становится возможен учет влияния остаточных напряжений, полученных на предшествующих технологических операциях при производстве арматурного каната, а также способствует оперативному воздействию на их перераспределение для прогнозирования и получения высоких показателей эксплуатационных свойств каната и сохранения его геометрии.

Выводы по главе 1

Анализ технических требований, предъявляемых к арматурным канатам, позволил определить высокопрочный стабилизированный арматурный канат диаметром 12,5 мм конструкции 1×7 (1+6) из стали марки 80 как один из широко востребованных при производстве предварительно напряженных железобетонных конструкций. Поскольку область применения указанного каната является социально-ответственной, а комплекс эксплуатационных свойств исследуемого каната, помимо всего прочего, формируется из напряженно-деформированного состояния металла, что на сегодняшний момент не регламентируется стандартами, то поиск способа улучшения конкурентоспособности стабилизированного арматурного каната является актуальным.

На основе анализа производственных мощностей основных производителей стабилизированных арматурных канатов было выявлено сходство применяемого оборудования. В связи с чем для одного из крупнейших российских производителей стабилизированных арматурных канатов (ОАО «ММК-МЕТИЗ») актуально повышение спроса на производимую продукцию. Достичь этого возможно за счет внедрения

дополнительных операций обработки арматурных канатов, в том числе и применения операции калибрующего пластического обжатия.

Важным аспектом при этом является учет изменения напряженно-деформированного состояния металла на каждом этапе сквозной технологии производства стабилизированного арматурного каната. Одним из рациональных способов учета напряженности каната являются методы конечно-элементного моделирования, позволяющие учитывать как микромеханику деформирования стали, так и изменение внутренних напряжений каната. И поскольку на сегодняшний момент проектирование технологий производства стабилизированных арматурных канатов ведется на основе традиционных методов с легко поддаваемыми физическому измерению критериями оценки, то внедрение наукоемкого метода исследования в качестве дополнительного также позволит сократить затраты на трудновоспроизводимые и длительные промышленные эксперименты.

Решение обозначенных задач осуществляется на примере действующего производства высокопрочных стабилизированных арматурных канатов (**объект исследования**) в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ». Полученные результаты позволят инженеру-технологу формировать стратегию гибкого управления технологическими параметрами процесса производства на основе компьютерного моделирования технологических воздействий, способствующих управлению внутренними напряжениями каната. **Предметом** исследования является напряженно-деформированное состояние (НДС) металла и его изменение в многооперационном процессе производства стабилизированного арматурного каната, изучаемое на основе современных методов конечно-элементного моделирования.

Глава 2 РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ АРМАТУРНЫХ КАНАТОВ

Для реализации одной из задач диссертационного исследования – изучения влияния процесса волочения проволоки, последующей свивки проволок в канат и операции стабилизации на формирование и распределение внутренних напряжений каната – было выполнено компьютерное моделирование указанных процессов в программном комплексе Abaqus. Выбранное программное обеспечение является современным средством, которое позволяет проводить многодисциплинарный статический и динамический анализ в рамках единого алгоритма. Abaqus тесно интегрирован практически со всеми САД-системами, имеет собственный мощный современный препостпроцессор Abaqus/CAE и доступен на всех стандартных платформах.

Как было указано ранее, здесь и далее в работе под совокупностью внутренних напряжений понимается комплекс напряжений, состоящий из остаточных напряжений, полученных в процессе многопроходного волочения проволоки, и свивочных напряжений, сформированных при свивке проволок в канат.

2.1 Исследование процесса волочения проволоки

В качестве исходной заготовки для исследования влияния процесса волочения проволоки на распределение внутренних напряжений стабилизированного арматурного каната выбрана патентованная катанка диаметром 12,0 мм из перлитной стали марки 80, используемой в действующей технологии в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ». Химический состав стали представлен в таблице 2.1. Полученная в ходе лабораторного исследования микроструктура образца заготовки в поперечном и продольном сечении изображена на рисунке 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав стали исходной заготовки для волочения

Марка стали	Химический состав, %								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Cu	Al
80	0,83	0,29	0,45	0,02	0,03	не более 0,025	не более 0,025	не более 0,20	не более 0,005

Микроструктура в центральной области поперечного сечения образца заготовки диаметром 12,00 мм состоит из ферритокарбидной смеси со средним межпластинчатым расстоянием 0,152 мкм (рисунок 2.1, а, таблица 2.2). Такую структуру в соответствии с [136] по среднему межпластинчатому расстоянию можно охарактеризовать как перлит сорбитообразный (балл №1). На поверхности образца присутствует обезуглероженный слой протяженностью в среднем около 100 мкм.

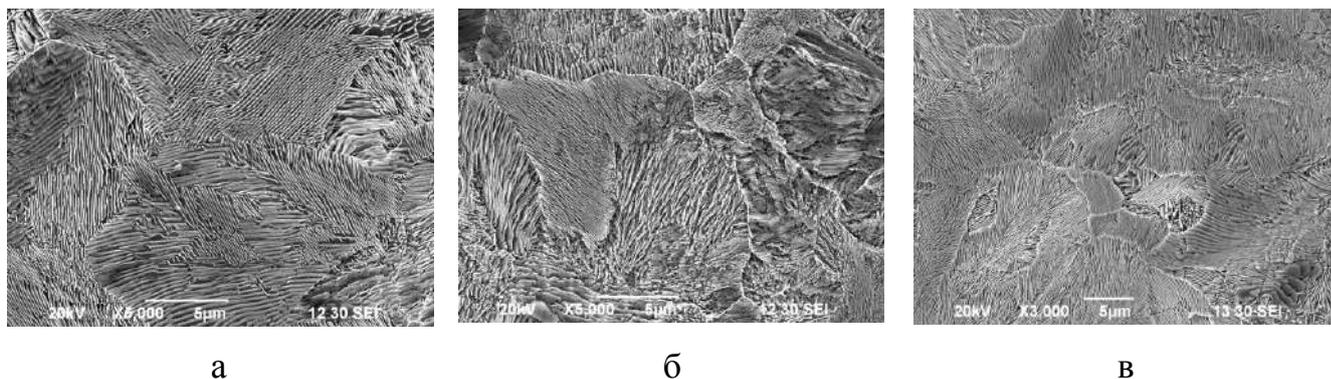


Рисунок 2.1 – Микроструктура в поперечном (а, б) и продольном (в) сечении образца исходной заготовки диаметром 12,0 мм (а – в центральной области, б – на поверхности)

Таблица 2.2 – Толщина цементитных и ферритных пластин и межпластинчатое расстояние ФКС перед волочением

Диаметр заготовки, мм	Толщина цементитных пластин, мкм			Толщина ферритных пластин, мкм			Межпластинчатое расстояние l_0 , мкм		
	max	min	среднее значение	max	min	среднее значение	max	min	среднее значение
12,00	0,18	0,02	0,073	0,21	0,02	0,080	0,26	0,07	0,152

Механические свойства исходной заготовки диаметром 12,00 мм представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Механические свойства исходной заготовки для волочения

Диаметр заготовки, мм	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Относительное равномерное удлинение δ_r , %	Относительное сужение ψ , %
12,00	1158,49	7,27	30,56

С учетом особенностей перлитной микроструктуры патентованной катанки для исследования изменения микроструктуры в процессе её обработки была применена методика мультимасштабного компьютерного моделирования согласно работам Константинова Д.В. [137, 138]. В качестве исследуемого маршрута волочения был принят действующий девятикратный маршрут волочения с убывающим распределением единичных обжатий, реализующий стратегию максимального использования пластичности исходного материала на первых проходах волочения за счет повышенных единичных обжатий в начале процесса:

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

Принятые общие допущения при построении макромоделей процесса волочения заготовки с вышеописанной исходной микроструктурой представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Общие допущения при построении макромоделей

Тип модели деформируемого тела	Упругопластический
Тип модели инструмента	Абсолютно жесткий
Геометрические параметры волокна	ГОСТ 9453-75
Скорость волочения	2000 мм/с
Угол волокна	12°
Закон трения	Закон Амонтона-Кулона
Коэффициент трения	0.05
Длина модели исходной заготовки	100 мм

Разработка макромоделей в программном комплексе Abaqus представляет собой типовое построение модели процессов ОМД с изотропным описанием материала. При этом следует отметить, что используемая в работе методика построения компьютерных моделей может быть апробирована в любом современном вычислительном ПО с методом конечных элементов.

На основании ранее полученных исходных данных о моделируемом процессе (свойства материала, геометрия инструмента, условия трения и т.д.) воссоздаются геометрии заготовки и волок в осесимметричном варианте. Модели волок имеют атрибут Type: Discrete rigid, а модель проволоки Type: Deformable. Общий вид представлен на рисунке 2.2.

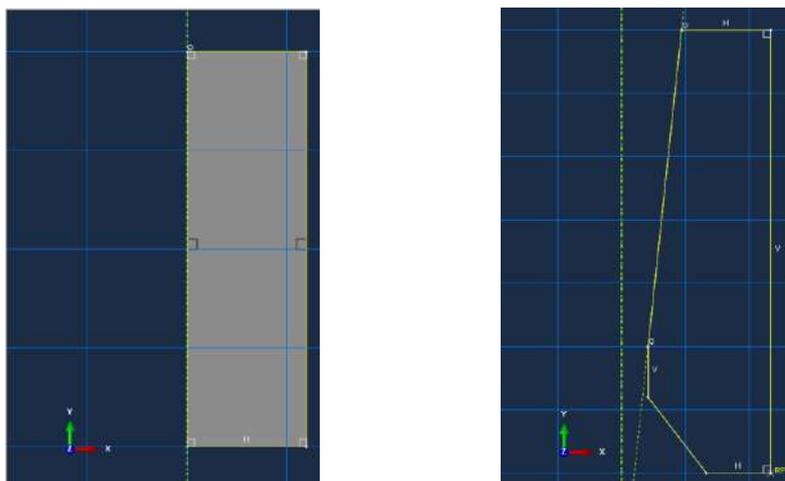


Рисунок 2.2 – Общий вид геометрической модели образца исходной заготовки
и волокна

Далее при помощи функции Partition face создаются места, в которых будут располагаться так называемые «окна плотности» сетки. Эти же места должны совпадать с локализациями репрезентативных объемов, посредством которых будет осуществляться микро моделирование. В нашем случае поведение микроструктуры будет изучаться на поверхности проволоки и в её центре. Размеры сечений $0,2 \times 0,2$ мм (рисунок 2.3).

Во вкладке Materials описывается материал исходной заготовки: в нашем случае это патентованная сталь 80. В качестве обязательно описываемых свойств материала: плотность, упругие и пластические свойства. Далее посредством функции Sections всему геометрическому объему заготовки придаются свойства ранее описанного материала.

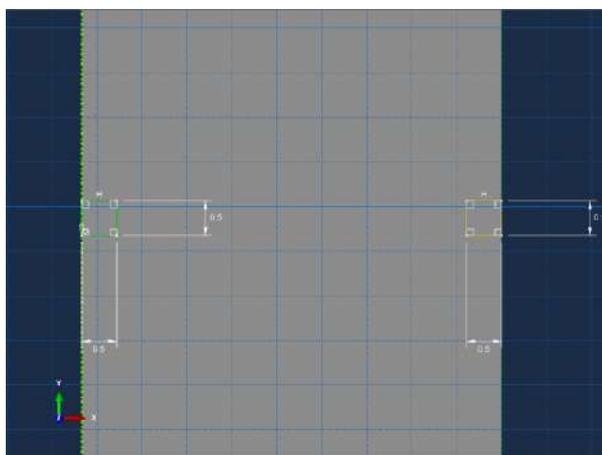


Рисунок 2.3 – Дополнительные сечения в местах исследования НДС на микроуровне

В модуле создания расчётной сетки Mesh модель исходной заготовки засеивается сеткой из 80000 элементов, а дополнительные сечения, созданные для будущих репрезентативных объемов, засеиваются квадратной сеткой с типом элементов CAX4R (a 4-node bilinear axisymmetric quadrilateral, reduced integration, hourglass control) (рисунок 2.4). Данное «окно плотности» необходимо для повышения точности передачи данных о напряженно-деформированном состоянии между уровнями субмоделями. То есть увеличение количества элементов в ограниченном локальном объеме увеличит точность градиента напряжений и деформаций в данном месте, что позитивно скажется на прогнозирующей способности репрезентативного элемента микроструктуры.

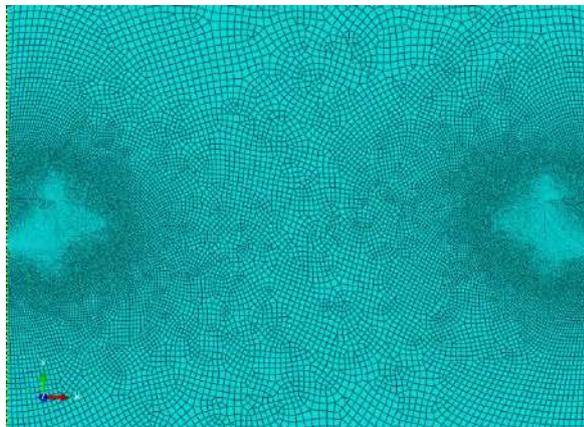


Рисунок 2.4 – Конечно-элементная сетка в «окнах плотности»

В модуле Assembly созданные модели исходной заготовки и волокна позиционируются следующим образом (рисунок 2.5).

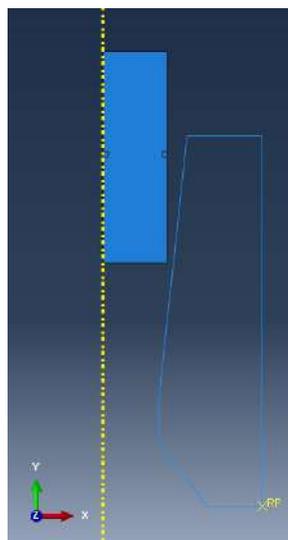


Рисунок 2.5 – Общий вид сборки исходной заготовки и волокна

В модуле Interactions создается контакт, соответствующий формулировке трения по закону Амонтона-Кулона (Surface-to-Surface, Mechanical: Normal Behavior/Tangential Behavior) с коэффициентом трения 0,05. Финальным этапом построения макромодели является задание граничных условий во вкладке Boundaries Conditions. В частности, переднему концу заготовки посредством параметра Speed/Velocity задается движение со стабильной скоростью, а нулевым значением этого параметра волокна фиксируется в пространстве; затем в разделе Symmetry/Antisymmetry/Encastre выбирается ось симметрии, после чего полученная макромодель готова к расчету.

На третьем этапе создания модели репрезентативного объема полученное фотоизображение микроструктуры исходной заготовки подвергается предварительной обработке в любом графическом редакторе [137]. Исходя из микроструктурного анализа исходной заготовки, не подвергнутой волочению, были выделены некоторые характерные участки, изображенные на рисунке 2.6:

- 1) микроструктура с цементитными пластинами, параллельными к оси волочения;
- 2) микроструктура с цементитными пластинами, перпендикулярными к оси волочения;
- 3) микроструктура с цементитными пластинами, располагающимися под углом к оси волочения;
- 4) микроструктура с незначительными мелкодисперсными включениями.

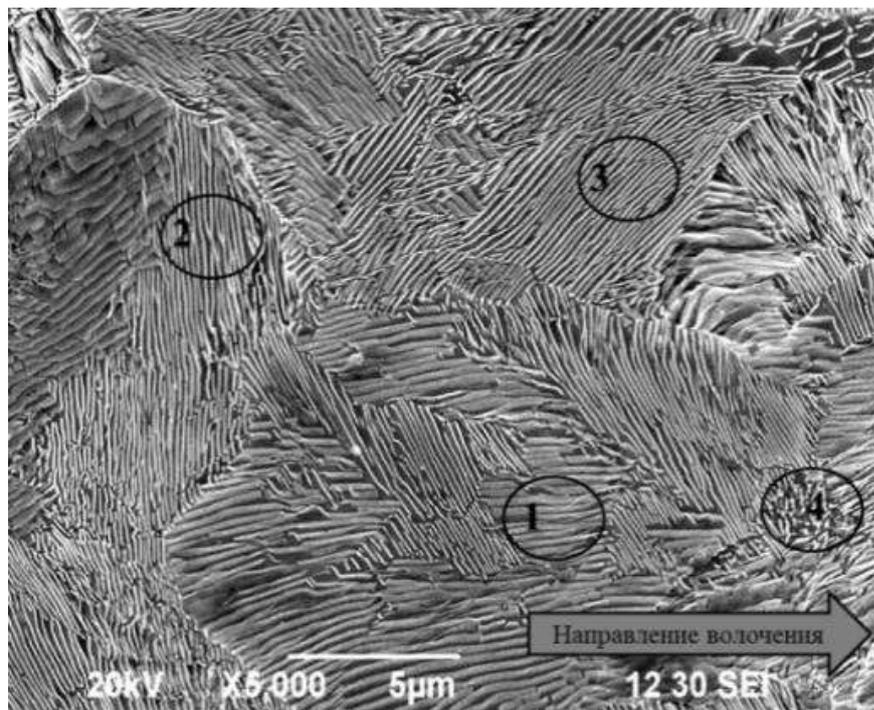


Рисунок 2.6 – Микроструктура исходной заготовки (перед волочением)
с выделением характерных участков

Для дальнейшего моделирования были созданы соответствующие репрезентативные объемы указанных перлитных колоний (рисунок 2.7).

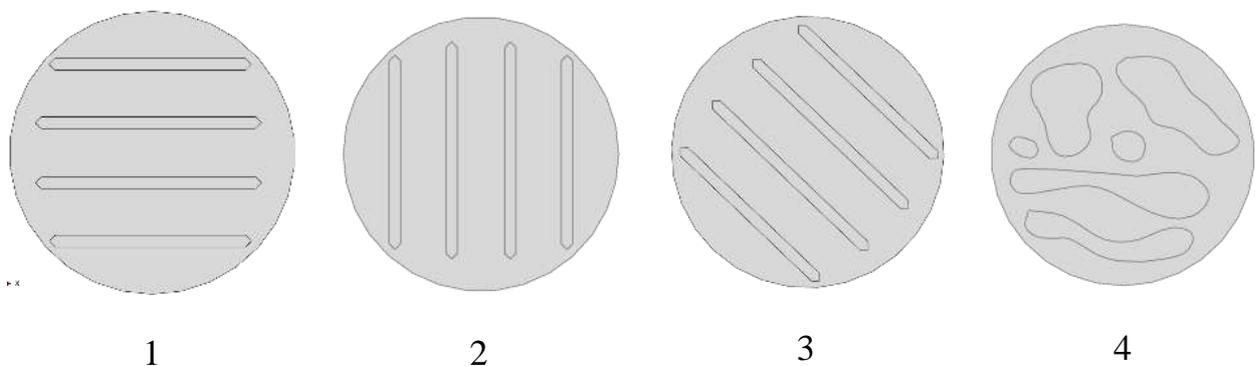


Рисунок 2.7 – Общий вид репрезентативных объемов:

- 1 – цементитные пластины параллельны оси волочения;
- 2 – цементитные пластины перпендикулярны оси волочения;
- 3 – цементитные пластины под углом к оси волочения;
- 4 – участки в виде искривленных пластин (мелкодисперсные включения)

Для распределения свойств микроструктурных составляющих были сформированы следующие наборы конечных элементов сетки (раздел Sets модуля

Parts): группа элементов цементита (рисунок 2.8, а), группа элементов феррита (рисунок 2.8, б).

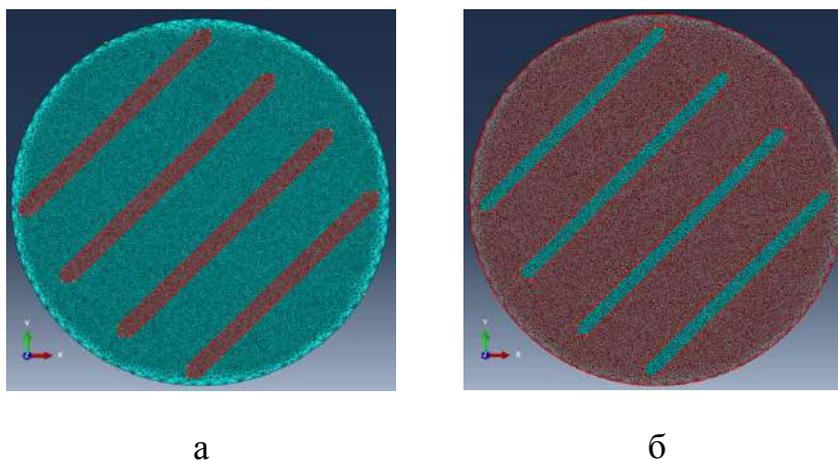


Рисунок 2.8 – Группы элементов сетки, соответствующие:
а – цементиту; б – ферриту

На основании результатов работы [139] в программу были заложены реологические свойства указанных структурных составляющих (рисунок 2.9).

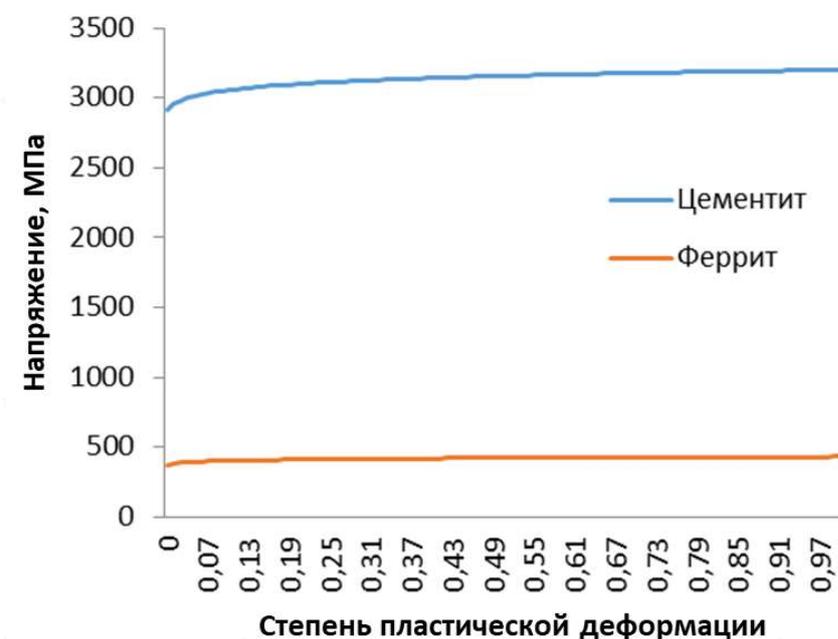


Рисунок 2.9 – Реологические свойства микроструктурных составляющих

После расчета макромодели в субмодели с репрезентативным объемом микроструктуры необходимо соотнести НДС в «окна уплотнения» до начала ее расчета. Перед непосредственным запуском расчета микромодели необходимо задать граничные

условия субмоделирования для узлов сетки на границах репрезентативных объемов микроструктуры.

Результаты распределения параметров напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при волочении исходной заготовки по исследуемому маршруту волочения, полученные посредством традиционной (с изотропным деформируемым материалом) и мультимасштабной методик, представлены на рисунках 2.10 – 2.14.

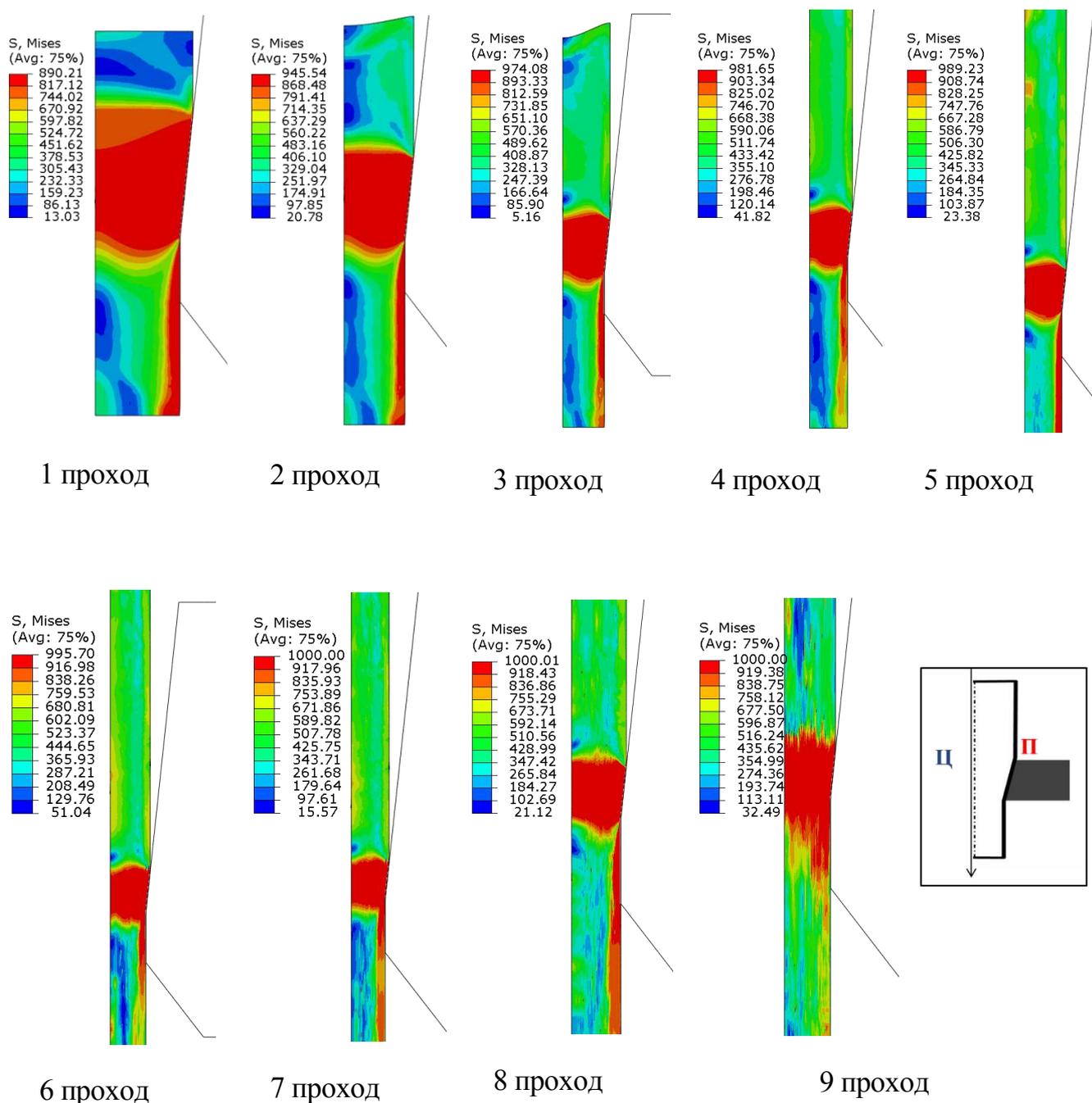


Рисунок 2.10 – Распределение напряжений Мизеса по проходам исследуемого маршрута волочения

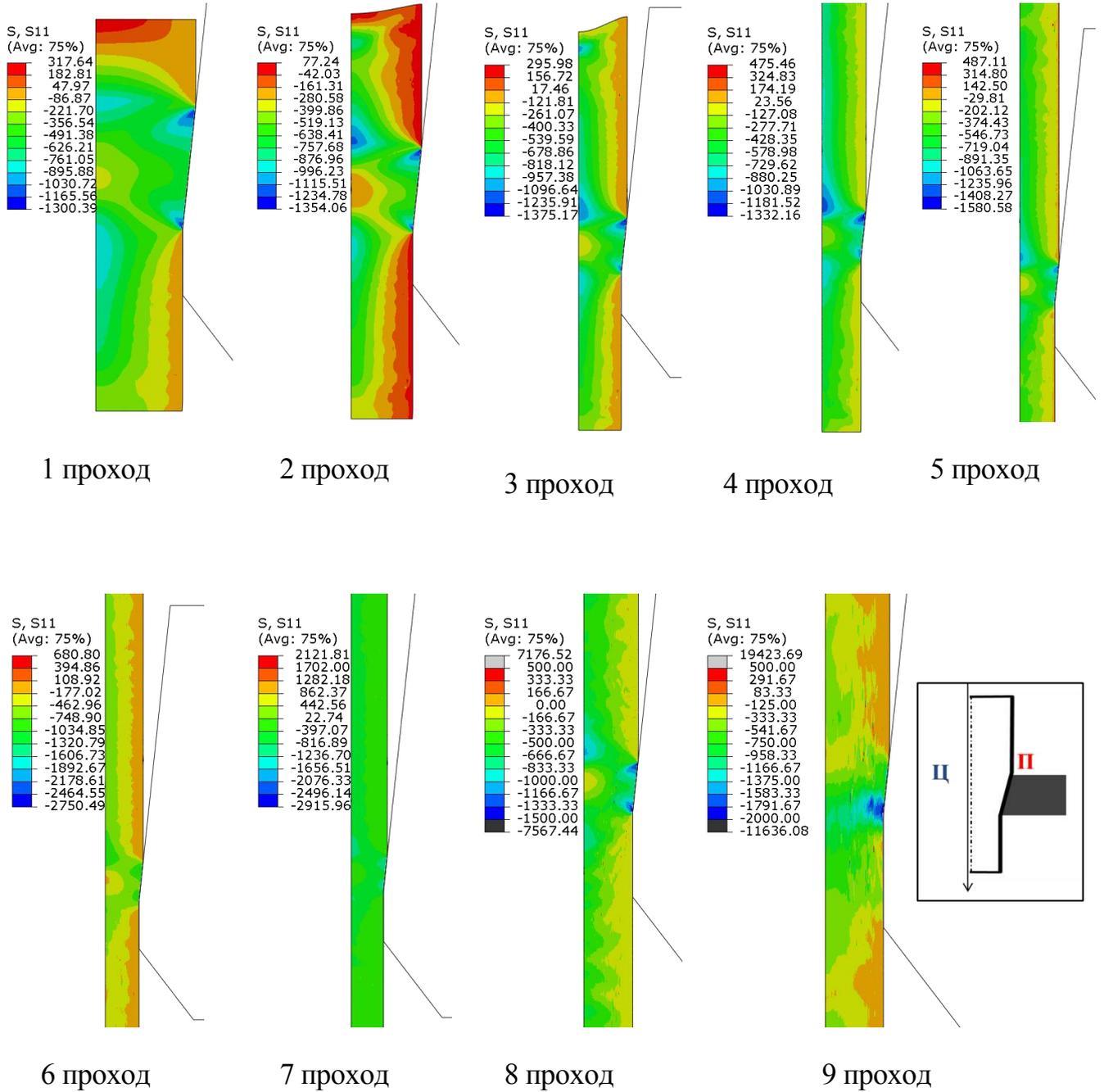


Рисунок 2.11 – Распределение радиальных напряжений по проходам исследуемого маршрута волочения

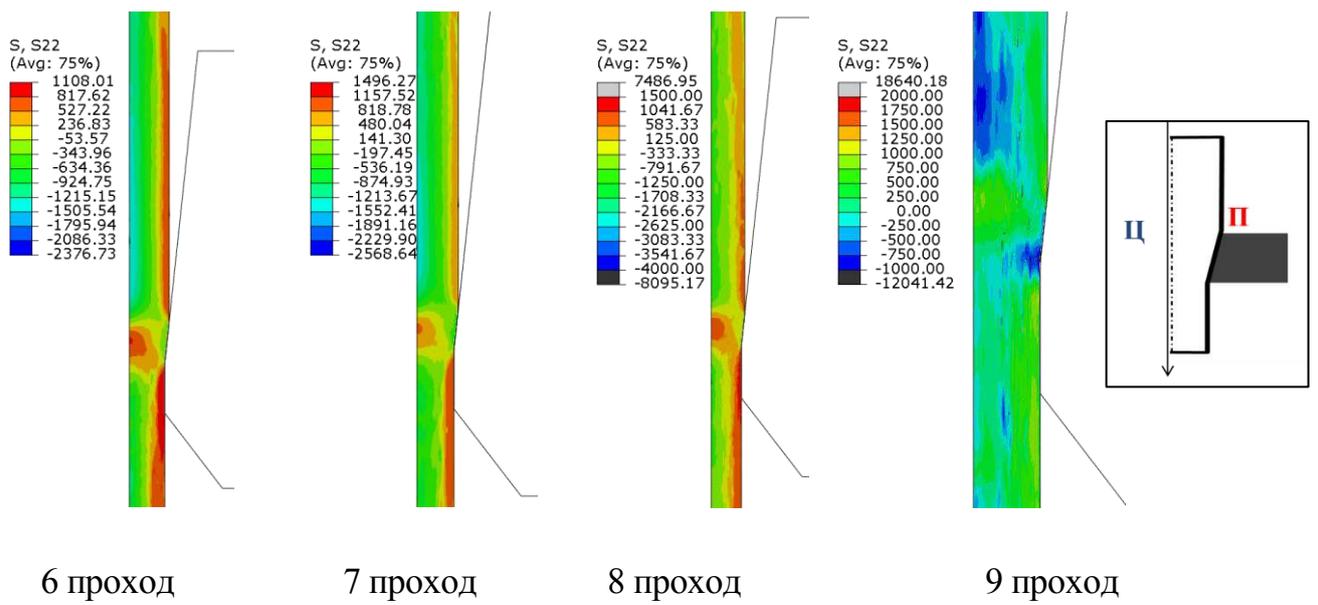
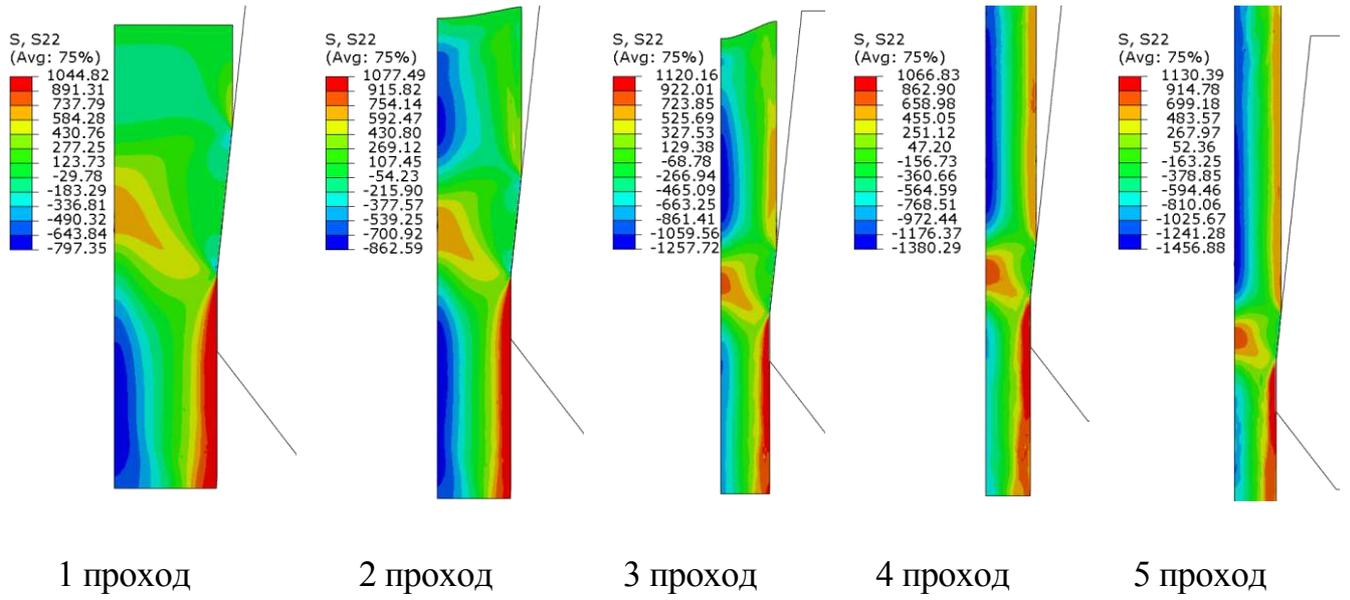


Рисунок 2.12 – Распределение продольных напряжений по проходам исследуемого маршрута волочения

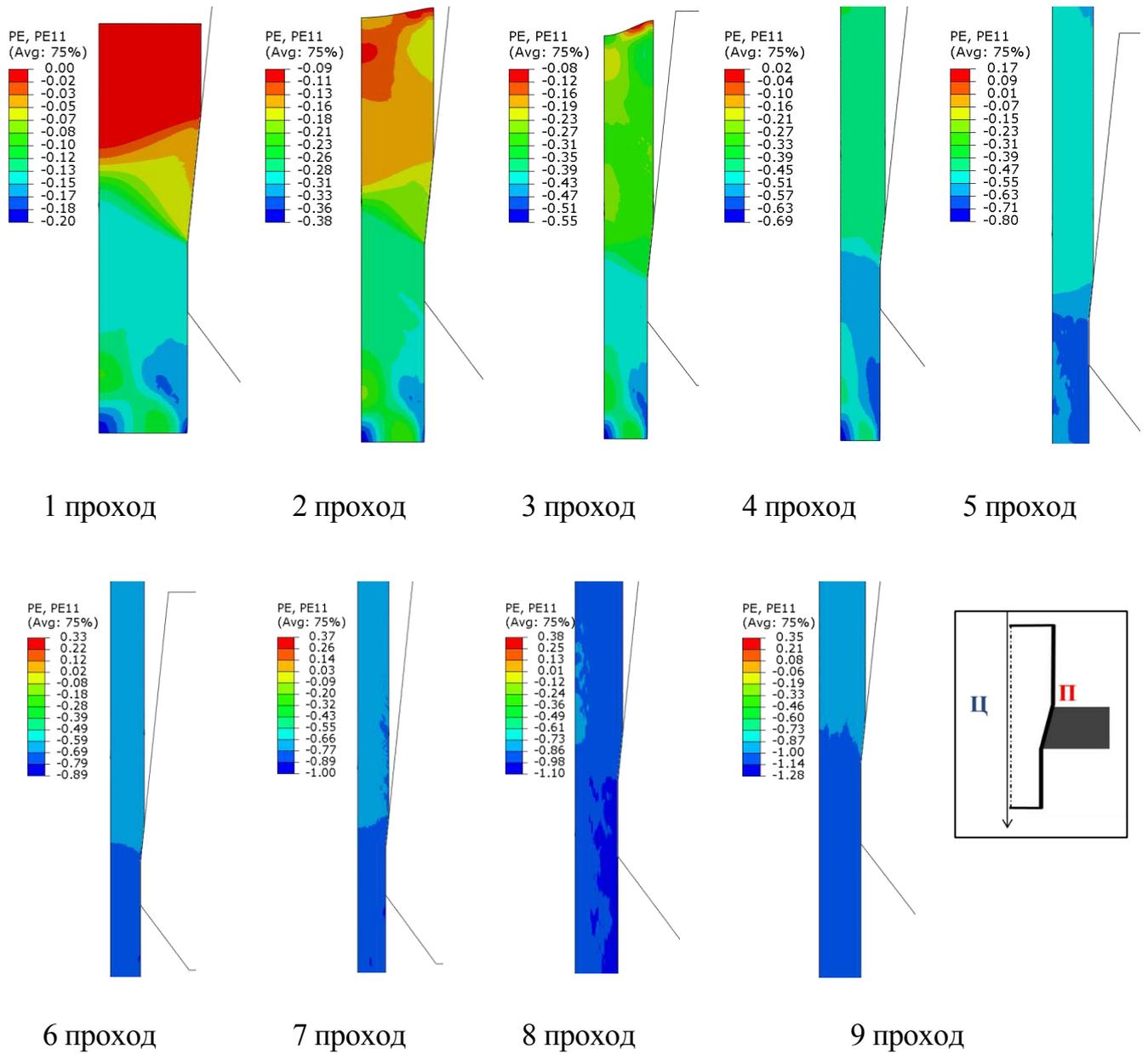


Рисунок 2.13 – Распределение радиальных деформаций по проходам исследуемого маршрута волочения

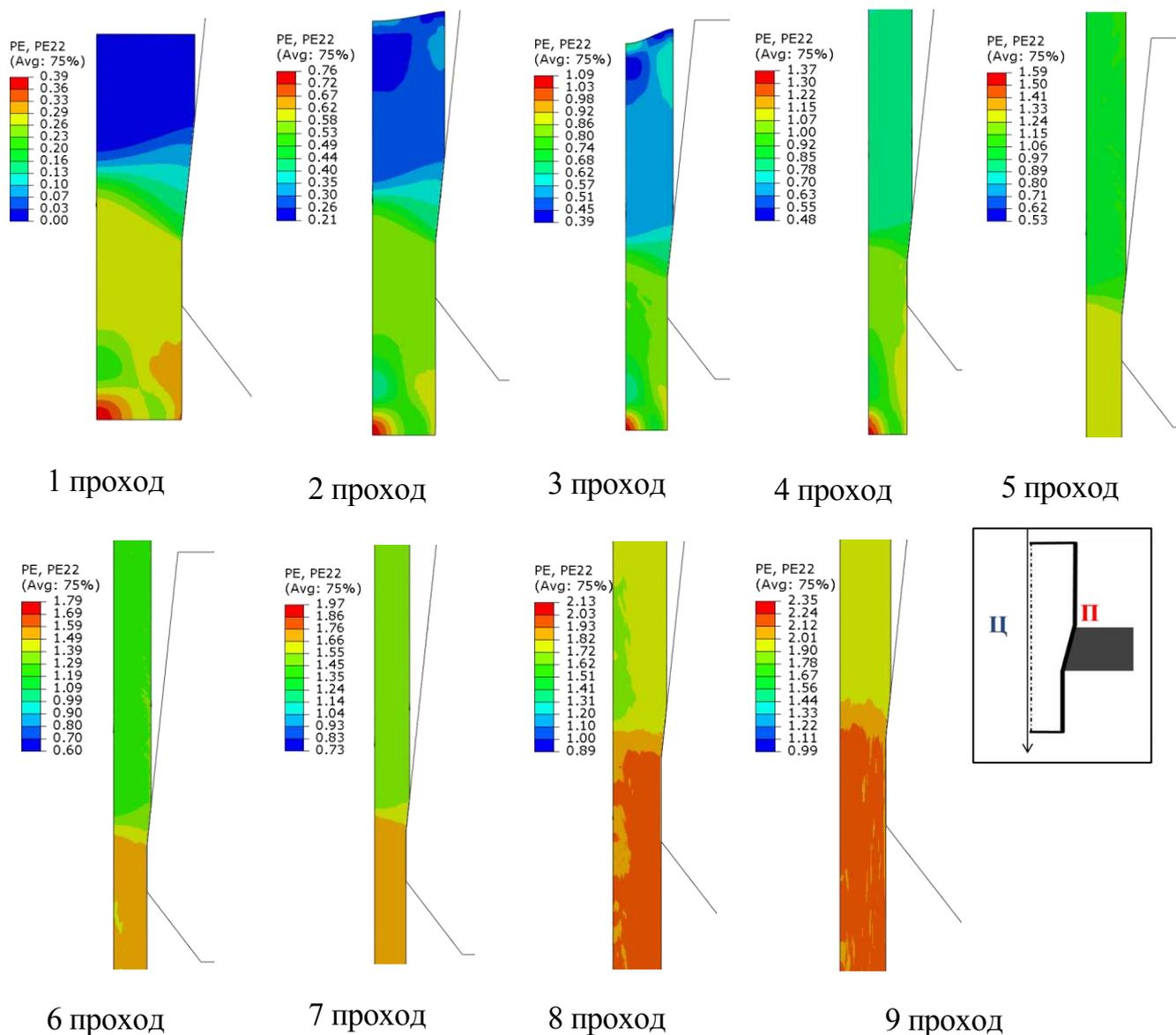


Рисунок 2.14 – Распределение продольных деформаций по проходам исследуемого маршрута волочения

Анализ численных значений напряжений Мизеса в очаге деформации показал их рост с 850 до 970 МПа, при этом распределение данных значений по очагу деформации было равномерным. Радиальные напряжения были преимущественно сжимающими по всему сечению очага деформации. Абсолютные значения радиальных напряжений уменьшались от контактной поверхности к оси волочения и от входного сечения очага деформации к выходному. При этом сжимающие радиальные напряжения в центре очага деформации с первого прохода имеют значения на уровне 150 МПа и постоянно растут в каждом последующем проходе. Это объясняется повышенными единичными обжатиями

в начале процесса волочения, что позволяет сформировать более равномерное напряженное состояние на протяжении всего процесса.

Далее согласно концепции мультимасштабного моделирования [137] полученные напряжения на макроуровне исследуемого маршрута волочения (рисунок 2.15) и деформации были приложены к микроструктурным составляющим проволоки.

На рисунке 2.16 приведены результаты расчета напряжений Мизеса в перлитных колониях, имеющие параллельную ориентацию относительно оси процесса. Значения напряжений Мизеса в данных перлитных пластинах сохраняются одинаковыми (на уровне 3200 МПа) на протяжении всего процесса волочения. Уровень напряжений в феррите также остается постоянным 380–430 МПа.

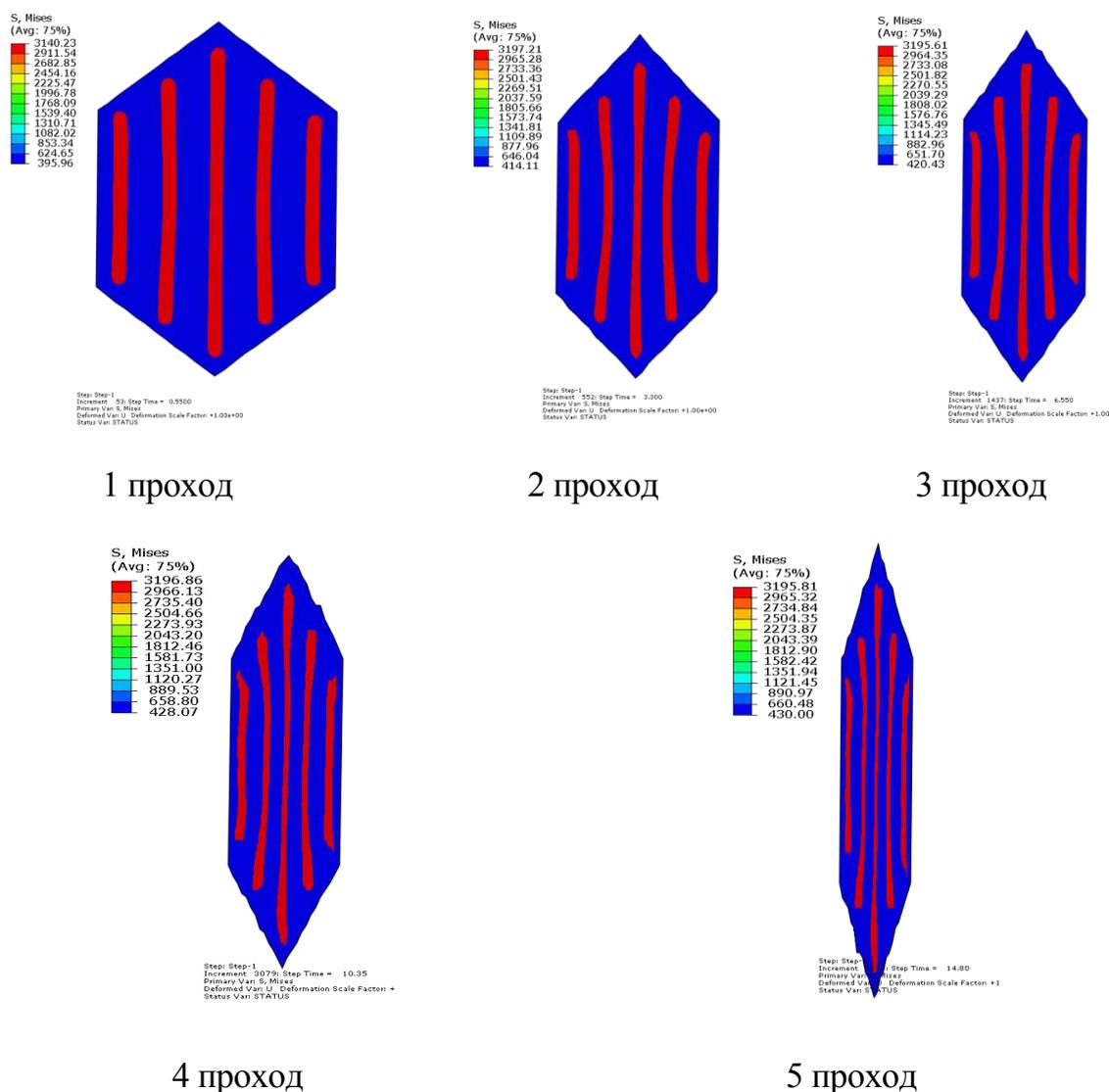


Рисунок 2.16 — Распределение напряжений Мизеса в перлитных колониях, имеющих параллельную ориентацию относительно оси волочения

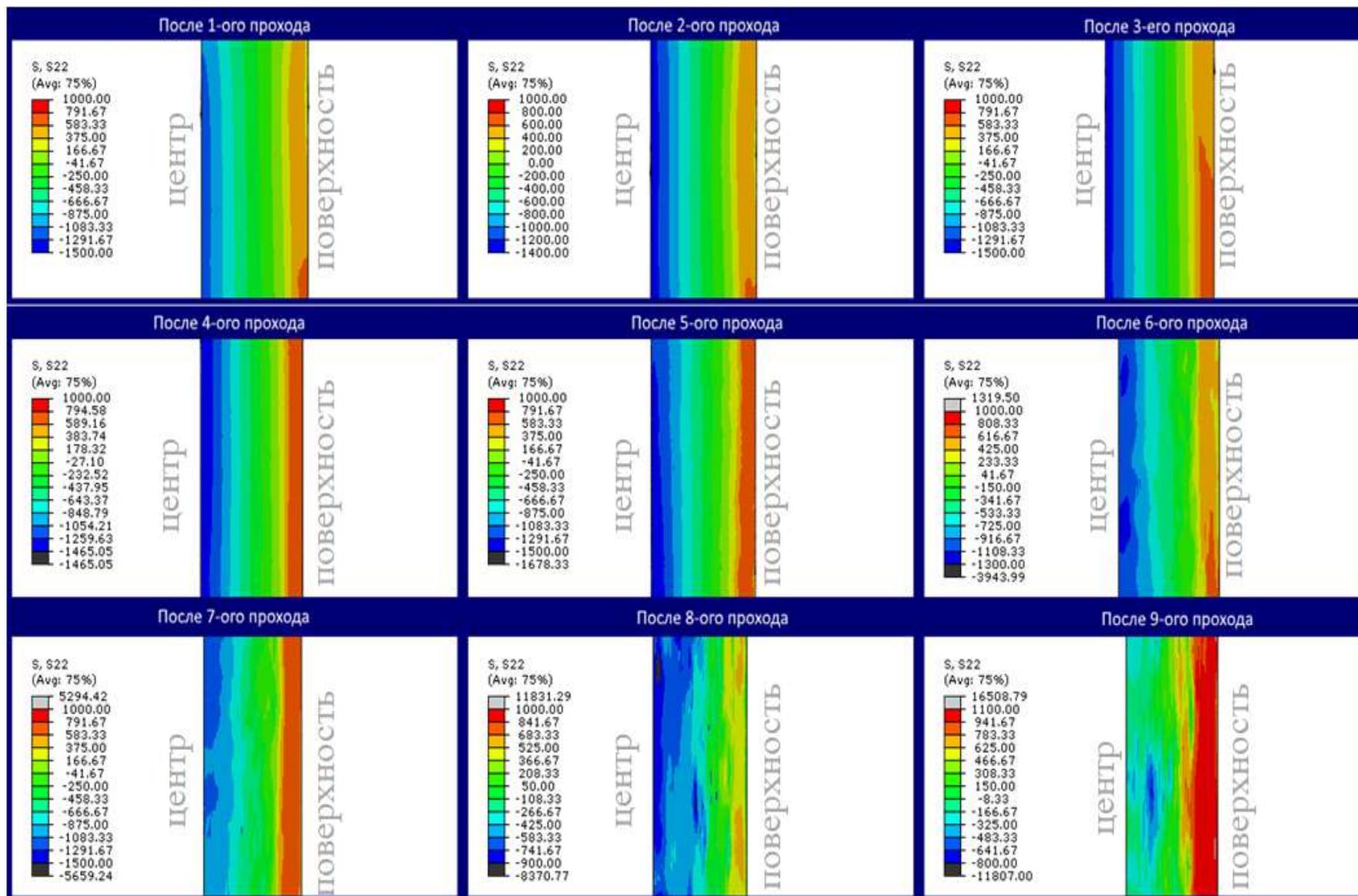


Рисунок 2.15 – Распределение продольных остаточных напряжений в сечении проволоки после каждого прохода волочения

Анализ микромоделей перлитных колоний, имеющих параллельную ориентацию относительно оси процесса волочения, показал, что указанные пластины имели наглядно выраженную тенденцию к интенсивному утонению и максимальному вытягиванию вдоль оси волочения. При этом утонение таких пластин происходило относительно неравномерно и с формированием характерной «шейки» (рисунок 2.17). После моделирования пятого прохода волочения на исследуемом участке наблюдались первичные признаки дробления отдельных пластин.

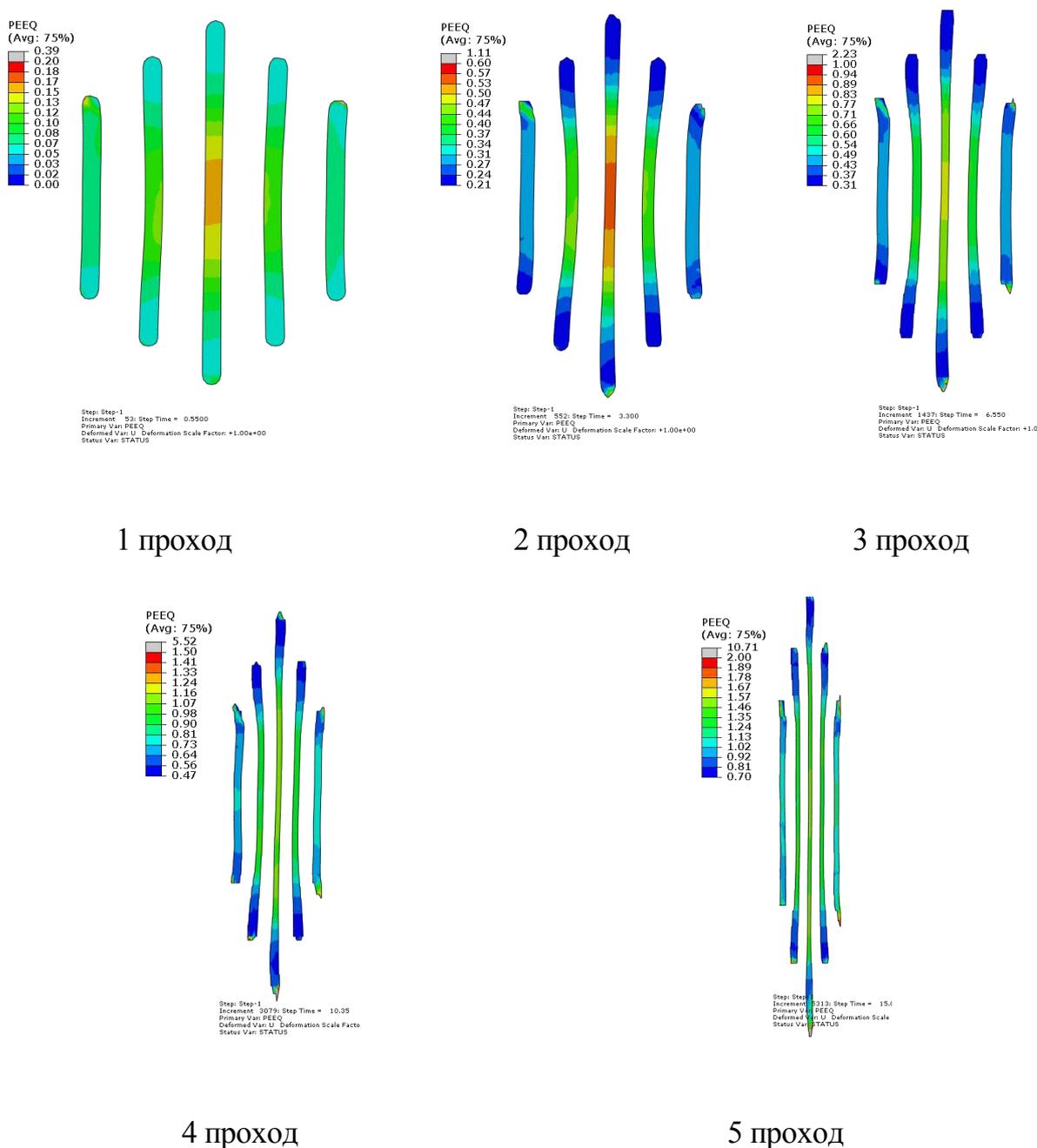


Рисунок 2.17 – Распределение эквивалентных деформаций в перлитных колониях, имеющих параллельную ориентацию относительно процесса волочения

Абсолютные значения напряжений Мизеса и эквивалентных деформаций в центре и на поверхности проволоки были соизмеримо одинаковыми: максимальное значение – 3100 МПа, минимальное – 1500 МПа. Однако распределение параметров напряженно-деформированного состояния в перлитных колониях в центре проволоки было более неравномерным.

При двукратном уменьшении межпластинчатого расстояния напряженно-деформированное состояние цементитных пластин стало более равномерным (рисунок 2.18). НДС перлитной колонии с большим межпластинчатым расстоянием характеризуется множеством локализаций напряжений Мизеса 3000–3200 МПа, при среднем значении напряжений 2000–2200 МПа. При уменьшении межпластинчатого расстояния также уменьшаются и локализации напряжений и деформаций в феррите (в 1,3-1,5 раз), поэтому перлитная колония стремится деформироваться как единое целое.

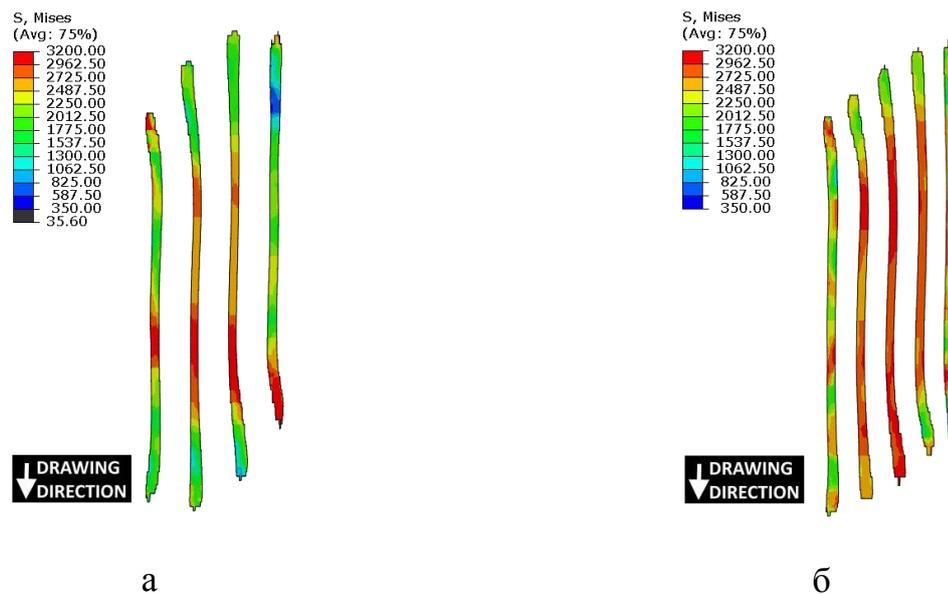


Рисунок 2.18 – Сравнение распределения напряжений Мизеса в перлитных колониях с различным межпластинчатым расстоянием: а – 100%; б – 50%

На рисунке 2.19 приведены эквивалентные деформации, локализованные в феррите, при различном значении межпластинчатого расстояния.

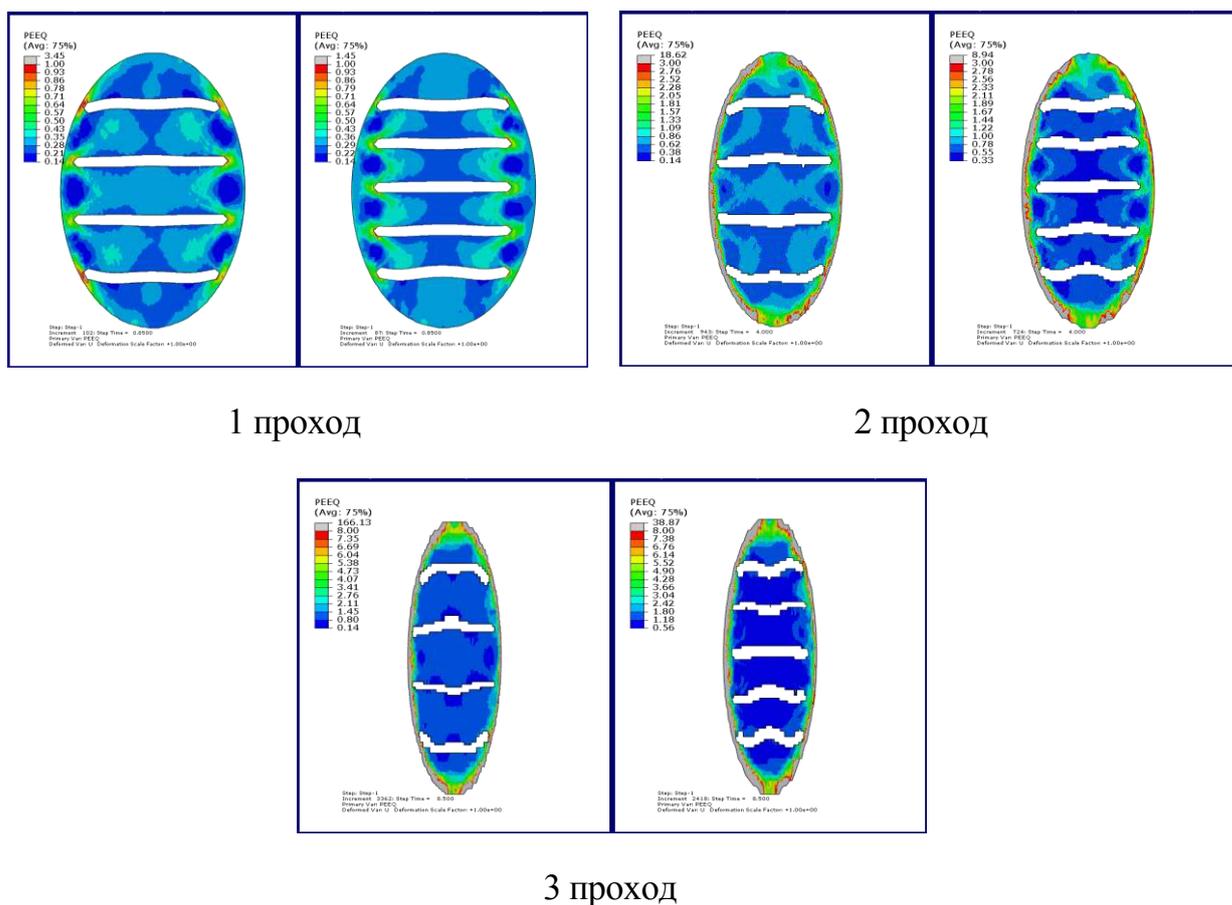


Рисунок 2.19 — Сравнение распределения эквивалентных деформаций в феррите в перлитных колониях с различным межпластинчатом расстоянием

Моделирование позволило установить, что при уменьшении межпластинчатого расстояния в 2 раза (с 0,180 до 0,09 мкм) снижается локализация деформаций в феррите. Снижение абсолютных значений локализаций деформаций достигает 30%. Однако моделирование также показало, что дальнейшее уменьшение межпластинчатого расстояния начинает негативно влиять на формирование локализаций деформаций, снижая равномерность деформации в рамках одной перлитной колонии. Таким образом, можно сделать вывод о том, что рациональным с позиции деформирования в условиях указанного маршрута волочения является межпластинчатое расстояние феррито-карбидной смеси в микроструктуре стали на уровне от 0,150–0,170 до 0,09–0,100 мкм.

Результаты моделирования показали, что перлитные колонии, изначально располагающиеся перпендикулярно оси волочения, в процессе обработки практически не изменяли межпластинчатое расстояние, но наиболее стремительно подвергались деформации и разрушению (рисунок 2.20), что способствует зарождению различного рода микротрещин.

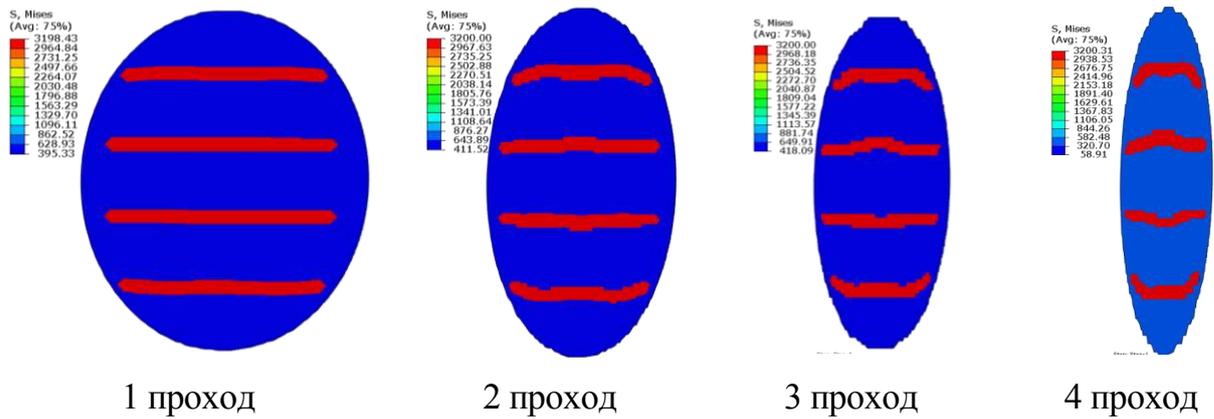


Рисунок 2.20 — Распределение напряжений Мизеса в перлитных колониях, имеющих перпендикулярную ориентацию относительно оси волочения

В результате исследования перлитных колоний, изначально располагающихся под углом к оси волочения, было установлено, что количественные значения параметров напряженно-деформированного состояния при такой ориентации цементитных пластин были одинаковыми на поверхности и в центре проволоки. Однако в качестве отличительной особенности деформации таких колоний наблюдался так называемый процесс реориентации, то есть цементитные пластины поворачивались до параллели с осью волочения (рисунок 2.21). Однако с накоплением степени деформации (более 0,70) начинается дробление или изгиб цементитных пластин. Отдельные части пластин деформируются путем сдвига в местах с локально высокой концентрацией напряжений в феррите.

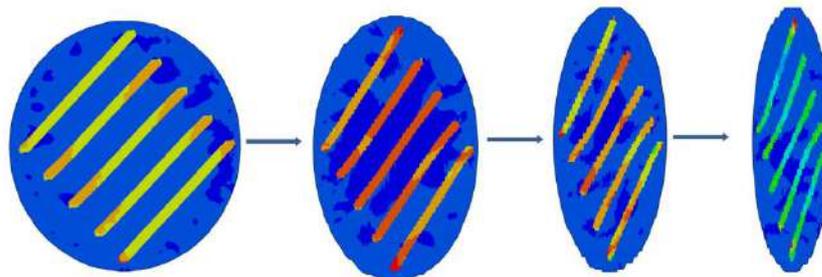
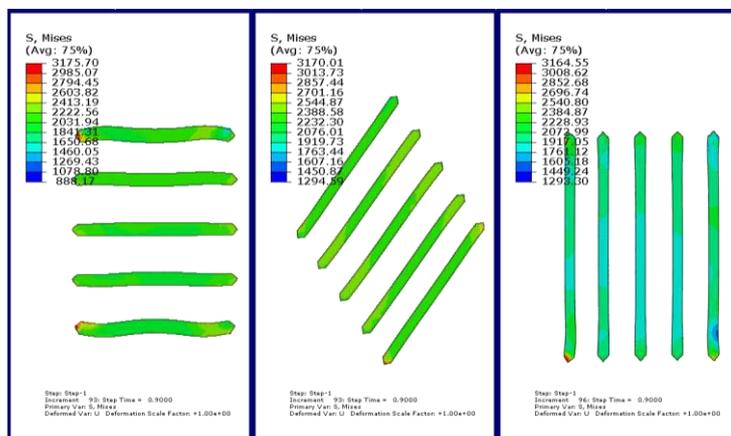


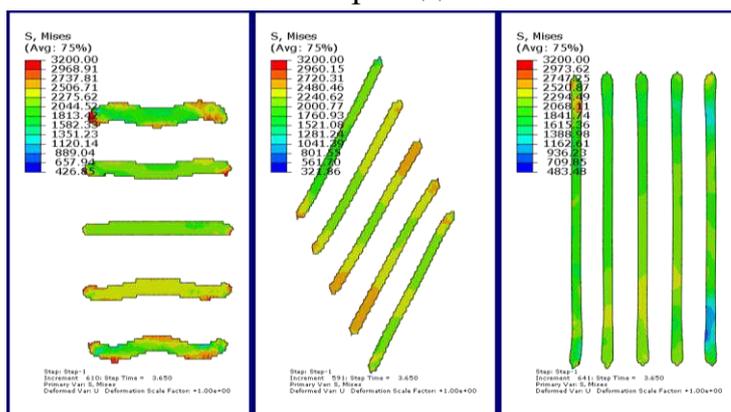
Рисунок 2.21 — Реориентация цементитных пластин в процессе волочения проволоки

Далее на рисунках 2.22–2.27 приведено сравнение распределения эквивалентных напряжений и деформаций в цементитных пластинах и феррите в зависимости от ориентации относительно оси волочения. Результаты моделирования показали, что перлитные колонии с ориентированными под углом 45° относительно оси волочения пластинами могут испытывать в 1,7–1,9 раза бОльшие степени деформации, чем колонии с пластинами, перпендикулярными и параллельными оси волочения. При этом

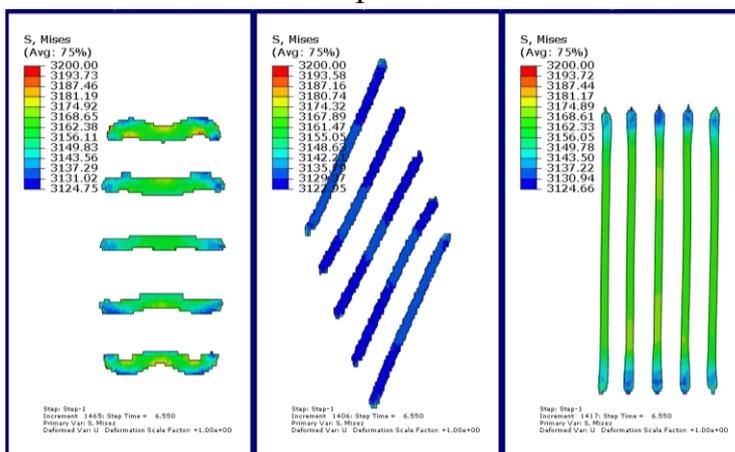
колонии с перпендикулярным и параллельным расположением пластин относительно оси волочения имеют повышенную склонность к фрагментации. Однако в колониях с перпендикулярным расположением пластин относительно оси волочения данная фрагментация может привести к множественным очагам инициализации различного рода микротрещин.



1 проход

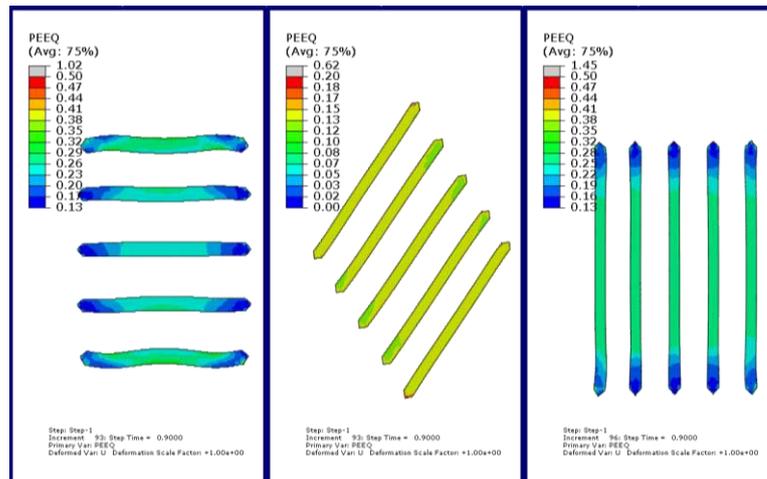


2 проход

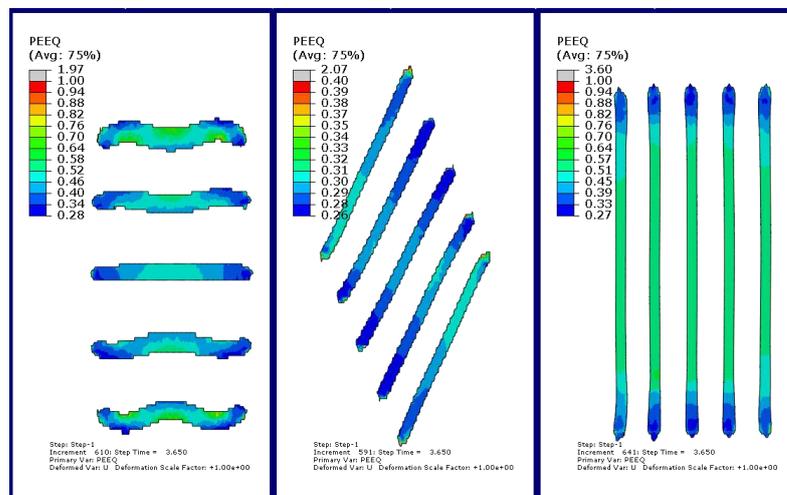


3 проход

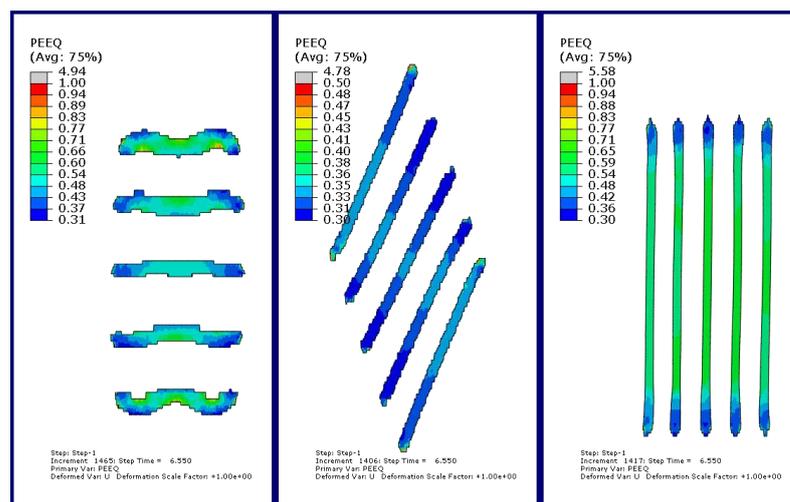
Рисунок 2.22 — Распределение напряжений Мизеса в цементитных пластинах с различной ориентацией относительно оси волочения (центральный слой)



1 проход

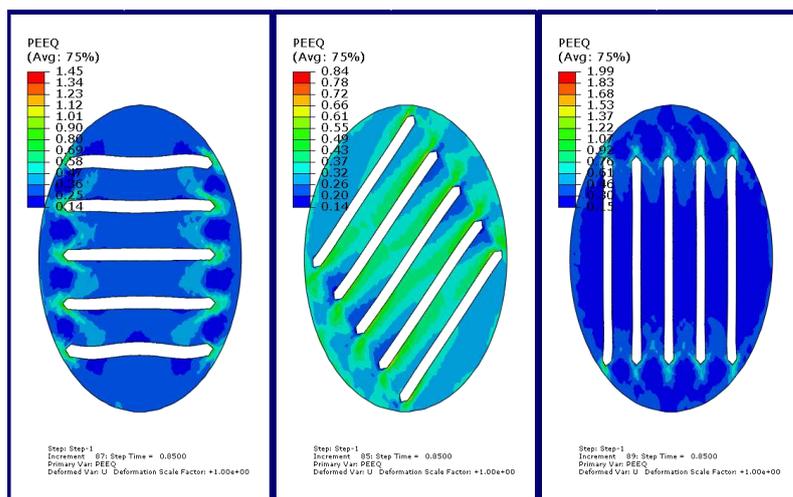


2 проход

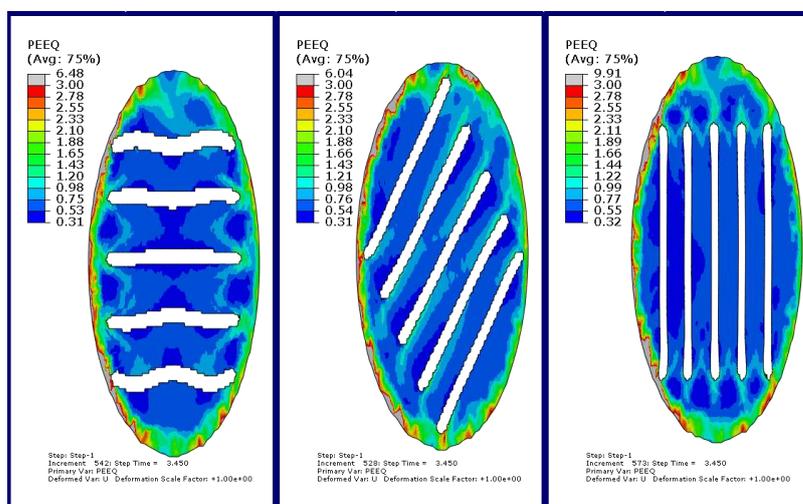


3 проход

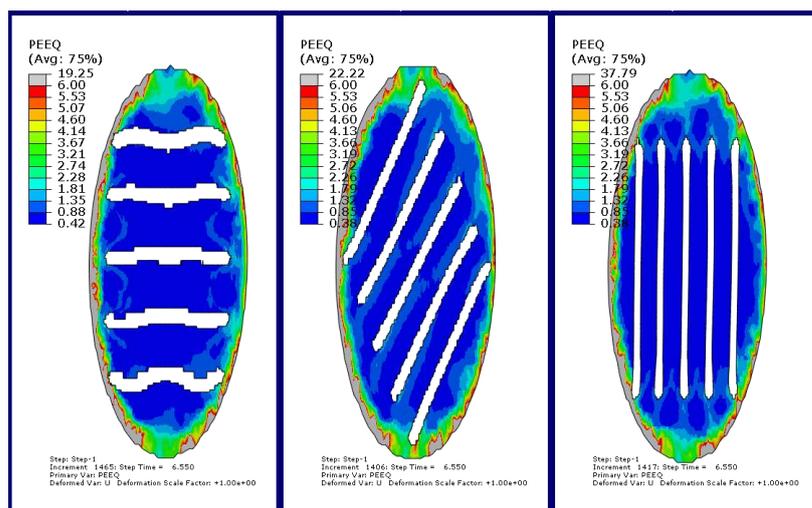
Рисунок 2.23 — Распределение эквивалентных деформаций в цементитных пластинах с различной ориентацией относительно оси волочения (центральный слой)



1 проход



2 проход



3 проход

Рисунок 2.24 — Распределение эквивалентных деформаций в феррите с различной ориентацией относительно оси волочения (центральный слой)

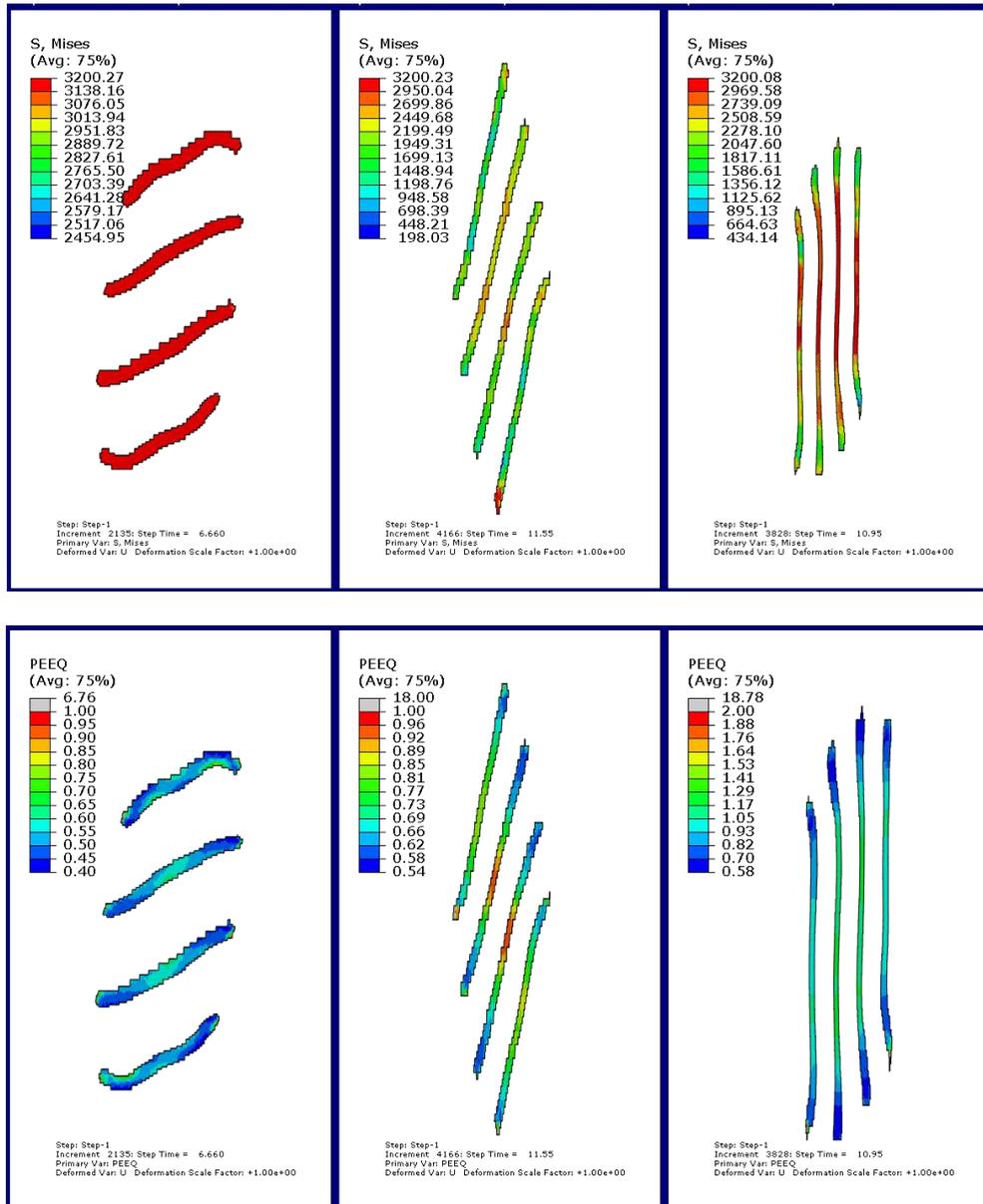


Рисунок 2.25 — Распределение напряжений Мизеса и эквивалентных деформаций в цементитных пластинах с различной ориентацией относительно оси волочения (поверхностный слой)

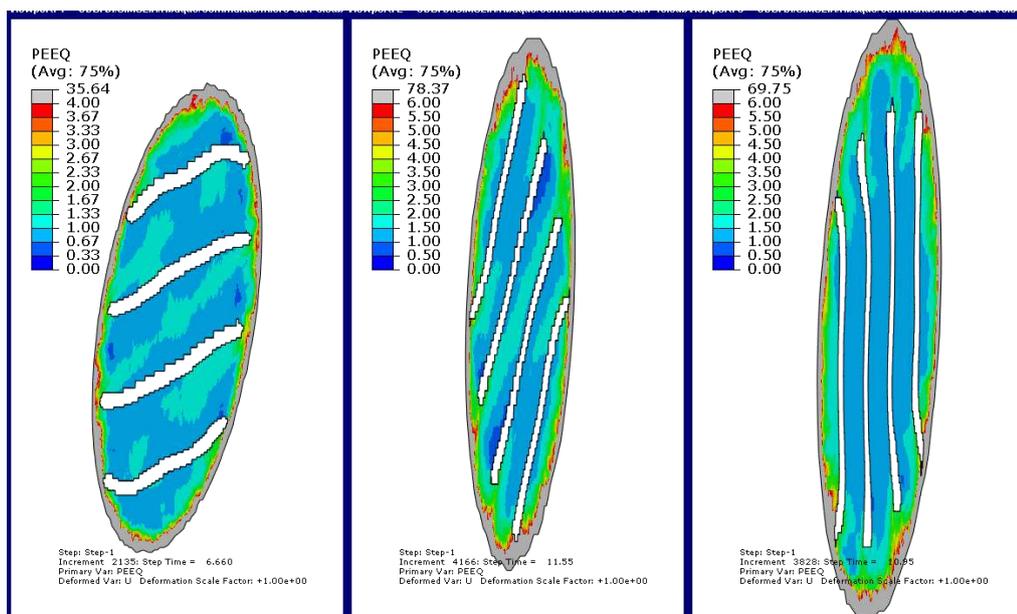


Рисунок 2.26 – Распределение эквивалентных деформаций в феррите с различной ориентацией относительно оси волочения (поверхностный слой)

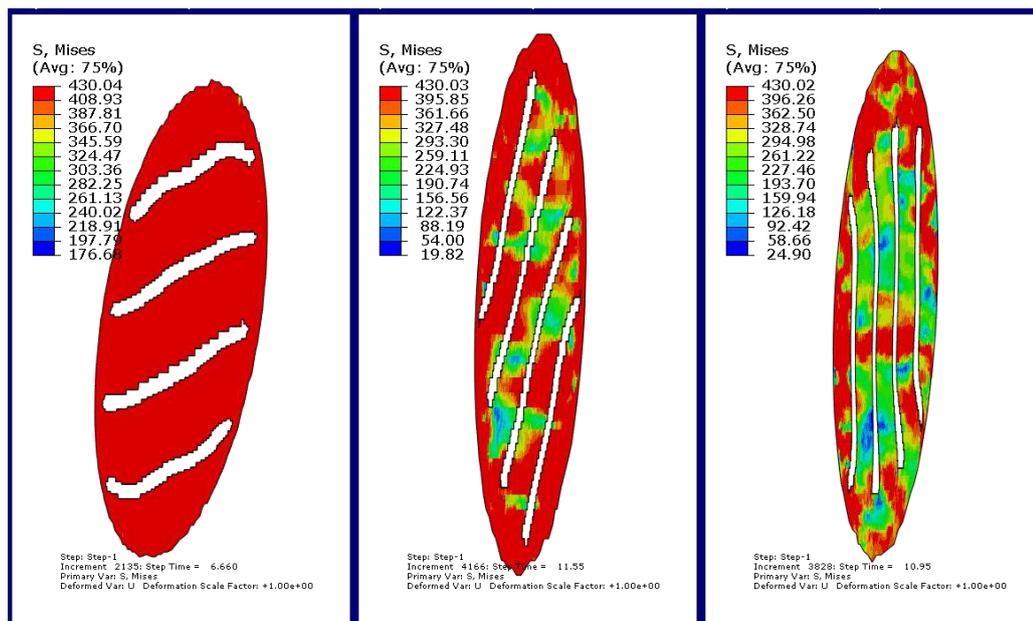


Рисунок 2.27 – Распределение напряжений Мизеса в феррите с различной ориентацией относительно оси волочения (поверхностный слой)

На рисунке 2.28 представлено распределение напряжений Мизеса, полученное после моделирования процесса волочения, в колониях, изначально различно-ориентированных относительно оси процесса. Мелкодисперсные включения преимущественно эллипсоидной формы незначительно изменяют свою форму и размеры (рисунок 2.28, г).

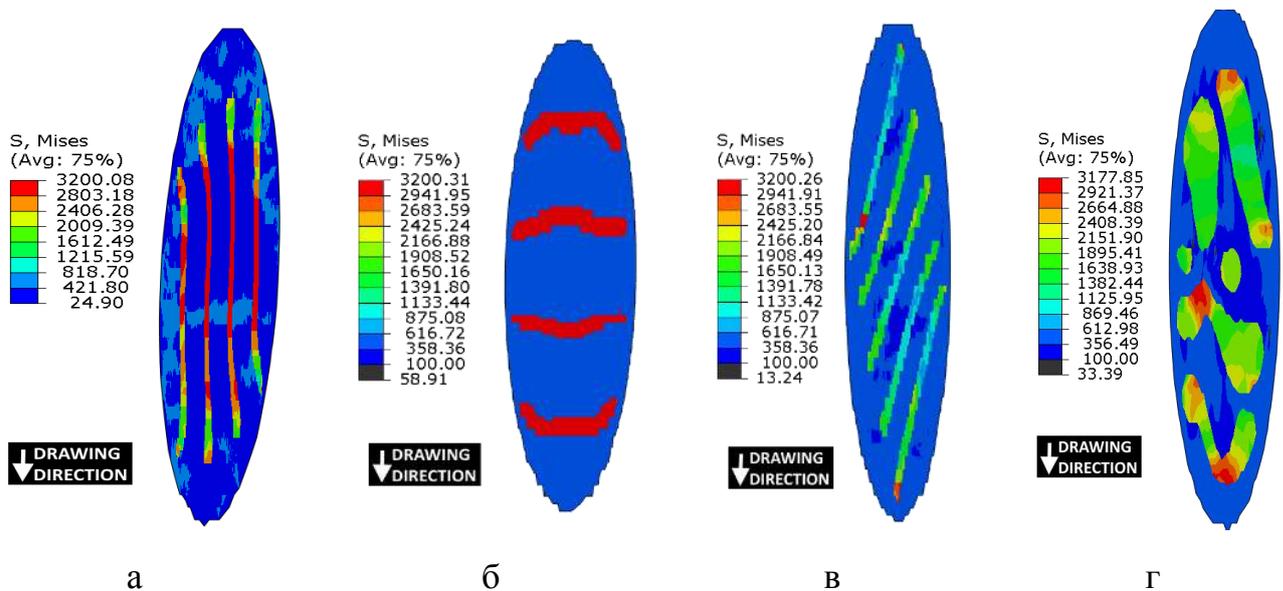


Рисунок 2.28 – Распределение напряжений Мизеса в перлитных колониях с различной ориентацией к направлению оси волочения:

а – параллельные колонии; б – перпендикулярные колонии; в – колонии, расположенные под углом; г – колонии с мелкодисперсными включениями

Таким образом, разработанный комплекс мультимасштабных компьютерных моделей процесса волочения исходной заготовки с перлитной структурой позволил получить распределение наиболее важных с технологической точки зрения параметров напряженно-деформированного состояния и их локализации на макро- и микроуровне.

2.2 Исследование процесса свивки проволок и стабилизации арматурного каната

Для исследования влияния процесса свивки проволок в канат и последующей его стабилизации на перераспределение остаточных напряжений, полученное на предшествующем переделе (при волочении проволоки) было проведено компьютерное исследование указанных процессов. Для этого было произведено исследование исходной микроструктуры проволоки диаметром 4,10 мм, полученной в ходе исследуемого девятикратного процесса волочения (см. п. 2.1).

Микроструктура поперечного и продольного сечения образца проволоки после волочения представлена на рисунке 2.29. В таблице 2.5 представлены результаты замера толщины ферритных и цементитных пластин и межпластинчатого расстояния феррито-карбидной смеси в проволоке после волочения. Механические свойства проволоки для производства арматурного каната представлены в таблице 2.6.

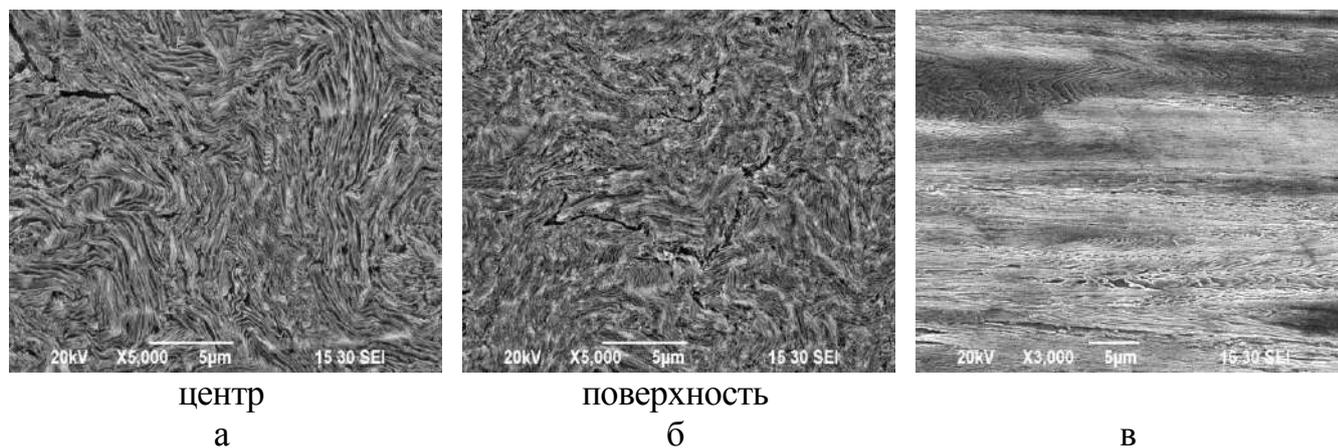


Рисунок 2.29 – Микроструктура образца проволоки диаметром 4,10 мм:
а, б – в поперечном сечении; в – в продольном сечении

Таблица 2.5 – Толщина цементитных и ферритных пластин и межпластинчатого расстояния ФКС после волочения

Диаметр проволоки, мм	Толщина цементитных пластин, мкм			Толщина ферритных пластин, мкм			Межпластинчатое расстояние l_0 , мкм		
	max	min	среднее значение	max	min	среднее значение	max	min	среднее значение
4,10	0,17	0,01	0,047	0,12	0,01	0,046	0,21	0,03	0,093

Таблица 2.6 – Механические свойства проволоки для производства арматурного каната

Диаметр заготовки, мм	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Относительное равномерное удлинение δ_p , %	Относительное сужение ψ , %
4,10	2099,92	2,15	48,40

Для исследования изменений параметров напряженно-деформированного состояния и вызванного его особенностями явления раскручивания каната были разработаны компьютерные модели процесса свивки каната конструкции 1×7 (1+6) и последующей стабилизации при различных температурно-силовых режимах. Как известно, процесс стабилизации предусматривает одновременное воздействие низкотемпературного нагрева каната в индукционной печи и растягивающих напряжений с последующим управляемым охлаждением поверхности, что обеспечивает повышение релаксационной стойкости каната и снятие внутренних напряжений, возникающих в канате в результате процесса волочения и свивки проволок в канат.

Из литературного обзора (см. главу 1) известно, что применяемый диапазон значений температуры при проведении операции стабилизации от 360 до 400°C. С учетом уровня механических свойств проволоки после процесса волочения, геометрических параметров итогового каната и технологических возможностей имеющегося оборудования ОАО «ММК-МЕТИЗ» усилие натяжения при стабилизации варьировалось в диапазоне от 58 до 82 кН. В качестве исходных свойств материала принимались значения механических свойств проволоки после процесса волочения (см. таблицу 2.6).

Компьютерная модель каната представляет собой семипроволочную прядь (рисунок 2.30, а), состоящую из центральной проволоки и шести проволок наружного слоя, свитых по спирали. Шаг свивки каната принимался равным 180-200 мм. Между обозначенными на рисунке 2.30, б поверхностями каната были сформированы общие контактные условия (General Contact).



Рисунок 2.30 – Сечение модели (а) каната конструкции 1×7 (1+6) и области применения контактных условий (б)

Общий вид сборки процесса свивки и стабилизации, также вид конечно-элементной сетки модели представлен на рисунке 2.31.

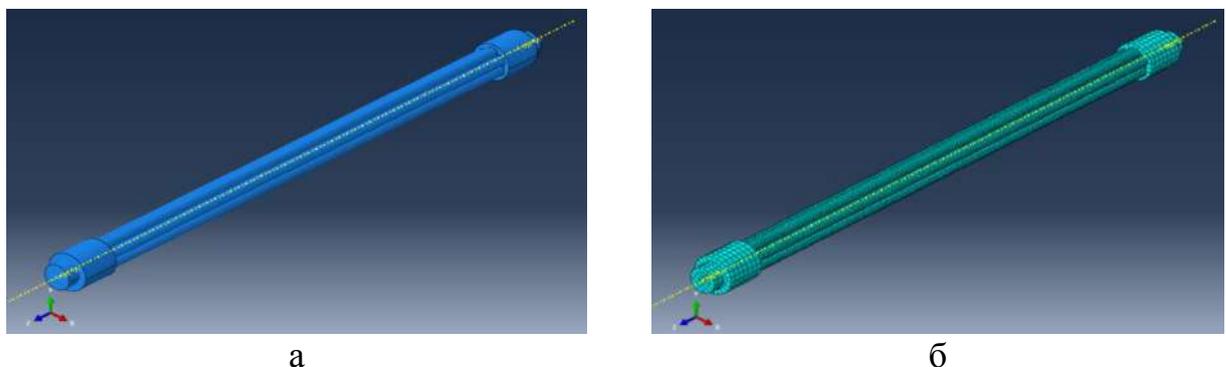


Рисунок 2.31 – Общий вид сборки (а) и конечно-элементной сетки (б) модели свивки и последующей стабилизации каната конструкции 1×7 (1+6)

Представленные на рисунке 2.30 краевые цилиндры были необходимы для поэтапного прикладывания граничных условий, реализующих следующий алгоритм:

1. В исходный момент времени оба цилиндра зафиксированы в пространстве. При этом один цилиндр остается неподвижным в ходе всего процесса моделирования.

2. Дальний цилиндр начинает вращение вокруг оси Z с равномерным ускорением на угол, равный 6,28 радиан, при котором геометрически формируется необходимый для исследуемого каната шаг свивки.

3. При достижении необходимого углового перемещения дальний цилиндр фиксируется, после чего происходит моментальный нагрев свитой пряди до обозначенной температуры (360, 380 или 400°C).

4. После нагрева, приводящего к изменению механических свойств металла, происходит постепенное натяжение дальнего цилиндра с указанными ранее усилиями (58, 70, 82 кН).

5. При достижении пикового усилия оно моментально снималось вместе с температурой, после чего полученная прядь оставалась свободной от приложения каких-либо внешних воздействий до момента полного покоя.

На рисунке 2.32 представлены модели канатов после свивки и различных режимов стабилизации таким образом, чтобы оценить степень нарушения геометрии канатной пряди после снятия нагрузки. В качестве критерия нарушения геометрии каната принимали изменение количества витков на исследуемом шаге свивки и исчезновение контакта между повивочными и центральной проволокой [140]. Как видно из результатов, при минимальном натяжении 58 кН в диапазоне температур 360–380°C модель каната имеет высокую склонность к нарушению геометрии в виду высокого уровня свивочных напряжений, стремящихся её раскрутить. То же самое наблюдается и при минимальной температуре с натяжением 70 кН. Однако, начиная с натяжения 70 кН и температуры выше 380°C, включая «пограничные» режимы при температуре 400°C с минимальным натяжением и при температуре 360°C с максимальным натяжением, процесс стабилизации приводит к значительному снижению уровня свивочных напряжений, что позволяет таким образом сохранить геометрию каната нераспушенной.

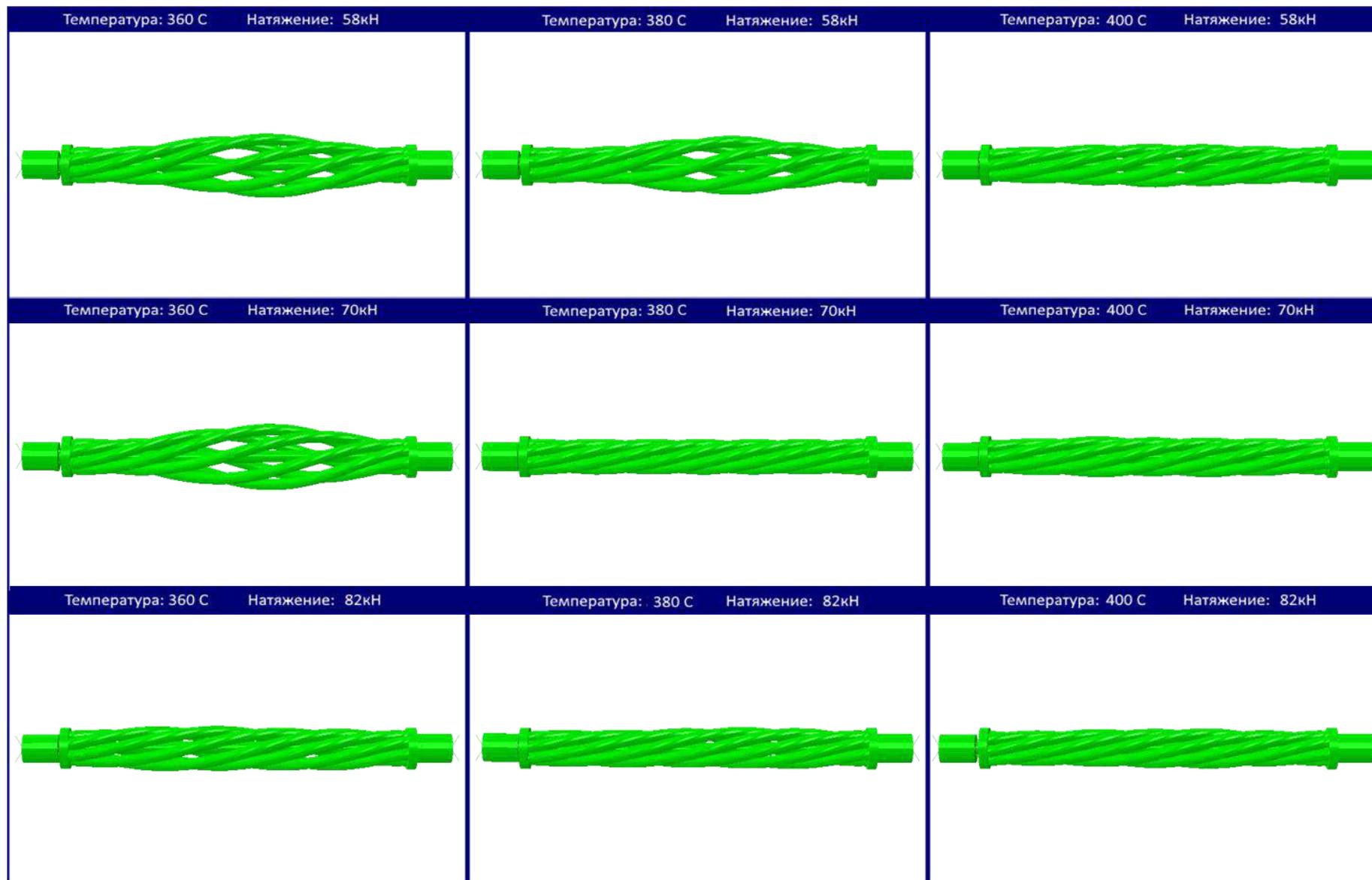


Рисунок 2.32 – Компьютерные модели канатов после свивки и различных режимов стабилизации

Для наглядности на рисунке 2.33 представлена модель свитого арматурного каната в поперечном сечении с сохраненной геометрией (рисунок 2.33, б) и с нарушением целостности по типу «фонарь» (рисунок 2.33, а).

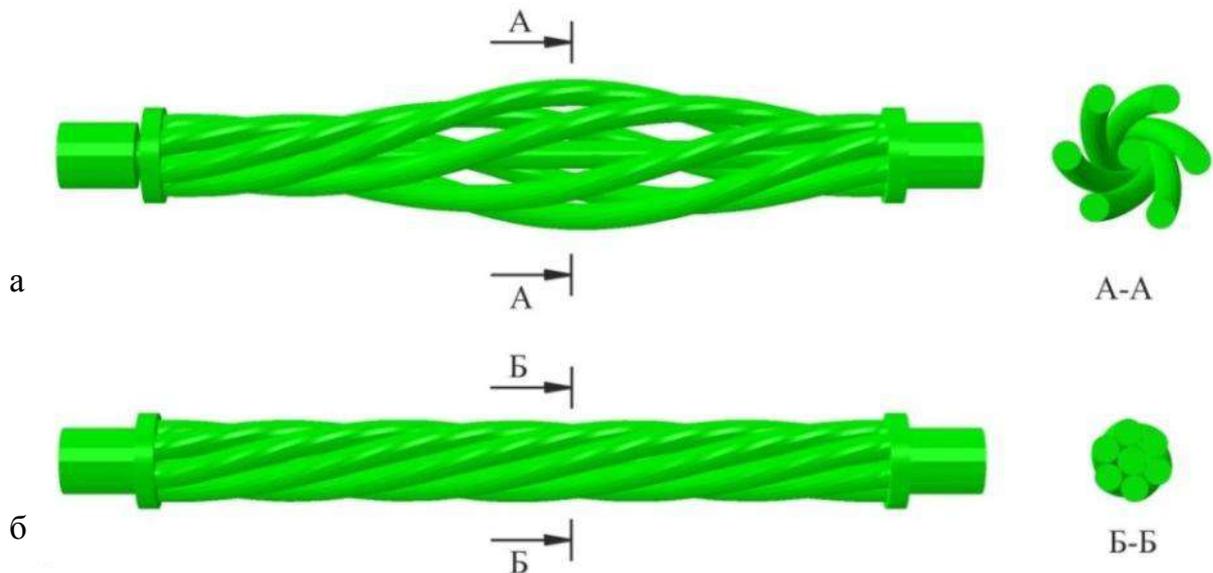


Рисунок 2.33 – Состояния модели каната:

а – канат с нарушенной геометрией; б – свитый канат с корректной геометрией

Для исследования влияния процесса свивки и стабилизации на перераспределение остаточных напряжений в центральной проволоке исследуемого каната, испытывающей в ходе процесса стабилизации принципиально отличное от повивочных проволок нагружение, были разработаны компьютерные модели с использованием полученного ранее распределения продольных остаточных напряжений после процесса волочения (см. рисунок 2.15). Распределение абсолютных значений продольных остаточных напряжений после процесса волочения воссоздавалось в новой модели следующим образом:

1. Модель проволоки разделялась на 4 условных продольных сечения одинакового размера от околоцентральной зоны до приповерхностной (рисунок 2.34).

2. При помощи функции Predefined fields – Initial Stress каждому сечению задавалось усредненное абсолютное значение остаточных напряжений, полученных в модели процесса волочения.

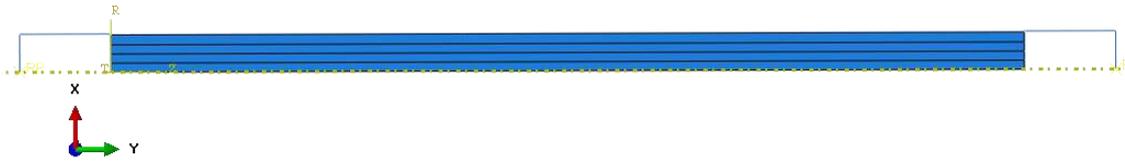


Рисунок 2.34 – Вид модели проволоки, разделенной на продольные сечения

Распределения продольных остаточных напряжений в центральной проволоке после процесса стабилизации в пересчете усилия натяжения на одну проволоку представлены на рисунке 2.35 и с указанием усилия натяжения на целый канат на рисунке 2.36 [141].

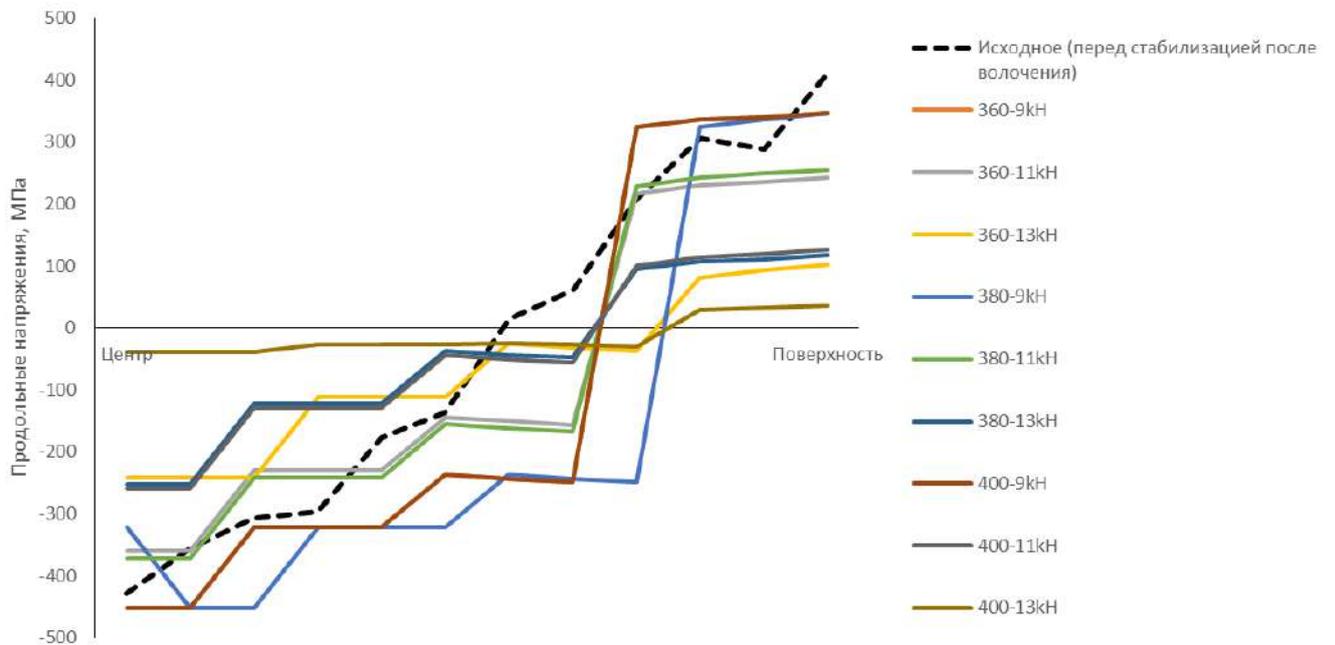


Рисунок 2.35 – Перераспределение продольных остаточных напряжений после различных режимов стабилизации (удельно на одну проволоку)

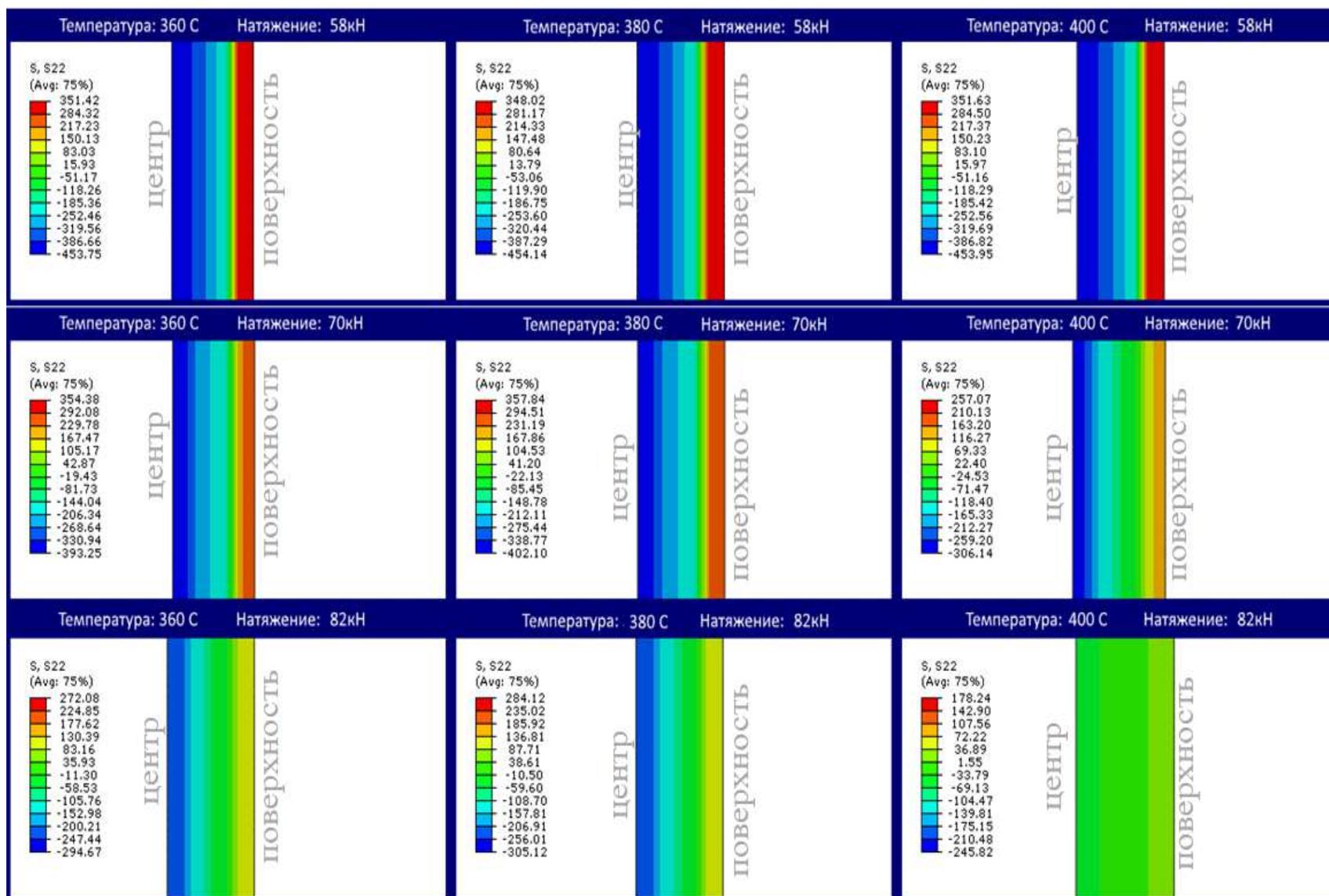


Рисунок 2.36 – Продольные остаточные напряжения в центральной проволоке после различных режимов стабилизации

Как видно из рисунков 2.35, 2.36, для перераспределения продольных остаточных напряжений бóльшую роль имеет величина натяжения. Поэтому при минимальном значении натяжения остаточные напряжения практически не перераспределяются ни в центральных слоях, ни в приповерхностных независимо от температуры процесса стабилизации. При этом при натяжении каната 70 кН при температурах 360 и 380°C создается некоторое «пограничное» состояние центральной проволоки, при достижении которого остаточные напряжения начинают интенсивно перераспределяться. Наиболее результативным с позиции устранения остаточных напряжений после волочения являются режимы натяжения 82 кН при любой из исследуемых температур и натяжение в 70 кН при температуре 400°C. При данных режимах остаточные напряжения в центре и на поверхности проволоки уравниваются или почти полностью устраняются [140-142].

Таким образом, проектировщик сквозных технологий производства стабилизированных арматурных канатов может основываться не только на традиционных методах проектирования, но и может применять наукоёмкий метод анализа с помощью современных средств компьютерного моделирования, что позволит ему учитывать не только изменение микромеханики деформирования стали, но и поэтапное изменение напряженного состояния в процессе производства конечного продукта. Данный факт позволит производителям стабилизированных арматурных канатов повысить конкурентоспособность своей продукции за счет учета важной составляющей (внутренних напряжений) эксплуатационных свойств изделия.

Выводы по главе 2

В результате проведенного компьютерного моделирования процесса производства стабилизированного арматурного каната, начиная с многопроходного волочения проволоки и заканчивая операцией стабилизации каната, была установлена принципиальная необходимость учета формирования и наследования внутренних напряжений каната от операции к операции.

Учет микромеханики деформирования перлитной стали при мультимасштабном компьютерном моделировании процесса волочения позволил установить, 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 бóльшие степени деформации, а при достижении степеней деформации свыше 70% подвергаться фрагментации (в т.ч. посредством полос сброса).

Результаты макро моделирования процесса волочения патентованной катанки по действующему маршруту волочения до степени 80% показали, что 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 является 25% от итогового временного сопротивления проволоки для исследуемого каната. При достижении степеней деформации 82% и выше остаточные напряжения снижаются на поверхности до уровня 250–300 МПа, а в центре – до уровня 450–500 МПа. Полученные в результате моделирования распределения были использованы в качестве исходных данных для моделирования последующей свивки проволок и стабилизации арматурного каната.

Результаты моделирования процессов свивки и стабилизации каната были проанализированы с точки зрения влияния температуры и натяжения на перераспределение продольных остаточных напряжений в канате. Так, было установлено, что сочетание натяжения 82 или 70 кН с диапазоном температур 360–380°C позволяет достичь двукратного снижения остаточных напряжений как в центральных, так и в поверхностных слоях проволоки. При повышении температуры до 400°C при сохранении уровня натяжения становится возможным полное устранение остаточных напряжений. Уменьшение значения натяжения не приводит к каким-либо изменениям в распределении остаточных напряжений.

Свивочные напряжения, высокие значения которых приводят к нарушению шага свивки и геометрии исследуемой пряди, могут в полной мере устраняться исключительно при натяжении 82 или 70 кН в диапазоне температур 380–400°C. В остальных случаях свивочные напряжения приводят к распушению каната [140].

Предложенная схема оценки НДС каната позволяет дополнить существующую методику проектирования технологического процесса производства стабилизированного арматурного каната посредством учета внутренних напряжений на каждом этапе его производства [128].

Глава 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБРАЗЦОВ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ АРМАТУРНЫХ КАНАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В УСЛОВИЯХ ОАО «ММК-МЕТИЗ»

Для верификации полученных в главе 2 результатов компьютерного моделирования процессов волочения патентованной заготовки диаметром 12,0 мм, последующей свивки и стабилизации арматурного каната диаметром 12,5 мм в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» был проведен промышленный эксперимент по производству стабилизированных арматурных канатов по режимам, приведенным в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Режимы работы оборудования при проведении промышленного эксперимента по производству стабилизированных арматурных канатов

9-кратный маршрут волочения проволоки на заправочной скорости:		
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		
Скорость прохождения каната через индуктор, м/мин	Температура стабилизации, °С	Натяжение при стабилизации, кН
Минимальная (холостой ход)	360	58
50	380	70
65	400	82

В результате волочения по действующему маршруту в условиях ОАО «ММК Метиз» было отобрано не менее трех образцов проволоки после каждого прохода волочения. В результате процессов свивки проволок в канат и его последующей стабилизации было отобрано по три образца каната для каждого из исследуемых режимов, полученных при различных скоростях прохождения каната через индуктор, а также три образца в исходном состоянии (т.е. свитый канат, но не стабилизированный). Микроструктура полученных образцов была исследована по ГОСТ 8233-56 на оптическом микроскопе Meiji Techno с применением специальных модулей и инструментов системы компьютерного анализа изображений Thixomet PRO, исследования при увеличениях более 1000 крат проводились на сканирующем электронном микроскопе JSM 6490 LV во вторичных электронах. Механические свойства проволоки определялись методом испытания на растяжение по ГОСТ 10446. Исследование механических свойств промышленных образцов канатов проводилось на

универсальной электромеханической испытательной машине SHIMADZU AG-50kNCD с гидравлическими захватами открытого фронтального типа HWG – 200. Общее количество промышленных образцов проволоки и канатов – свыше 80, что подтверждает выдвинутое ранее предположение о трудозатратах подобного рода исследований.

3.1 Исследование проволоки после процесса волочения

Электронно-микроскопические исследования продольного и поперечного сечения промышленных образцов проволоки подтвердили полученные в результате моделирования изменения микроструктуры в процессе волочения перлитной заготовки. Анализ микроструктуры проволоки в центральных слоях после процесса волочения (рисунок 3.1) подтвердил интенсивное утонение и вытягивание вдоль оси волочения перлитных колоний, которые изначально имели параллельную ориентацию относительно оси процесса. При этом наблюдается интенсивное изменение межпластинчатого расстояния ФКС. Из рисунка 3.1 также виден процесс дробления некоторых цементитных пластин, который инициируется при достижении суммарной степени деформации 0,65.

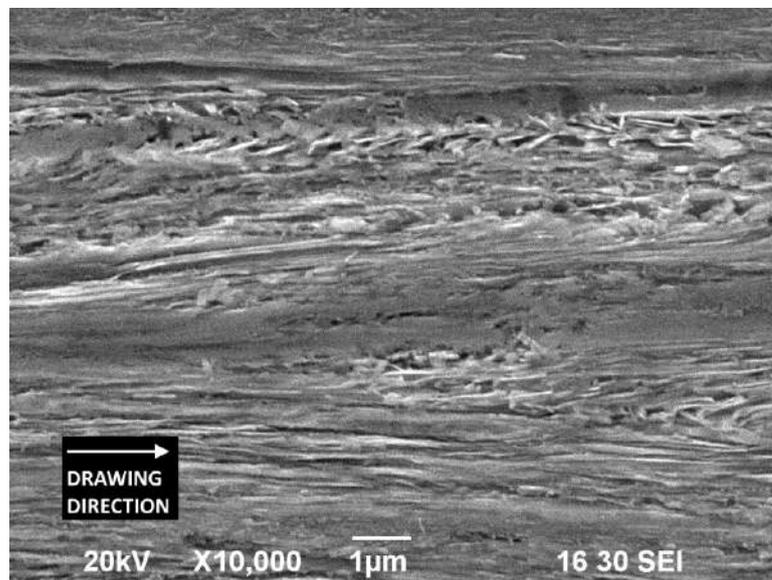


Рисунок 3.1 – Микроструктура после волочения с участками перлитных колоний, расположенных параллельно оси процесса (центральный слой)

Описанные особенности изменения межпластинчатого расстояния наиболее характерно проявляются в поверхностных слоях проволоки. При этом в этих слоях

проволоки цементитные пластины, ориентированные параллельно оси волочения, приобретали дополнительное искривление и теряли параллельность (рисунок 3.2).

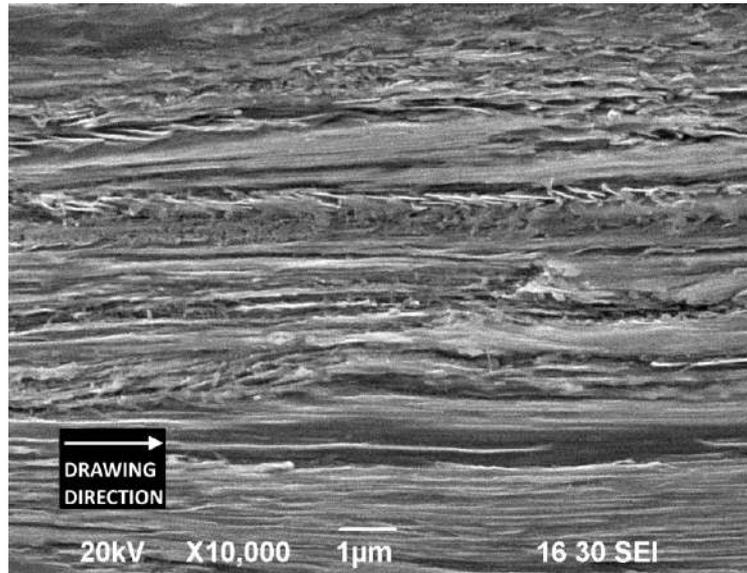


Рисунок 3.2 – Изображение микроструктуры (после волочения) с перлитными колониями, параллельными оси волочения (в поверхностном слое проволоки)

Исследование микроструктуры подтвердило, что межпластинчатое расстояние ФКС в колониях, изначально имеющих перпендикулярное расположение к направлению волочения, меняется незначительно, а дробление данных пластин с формированием субмикроструктурной структуры идет наиболее интенсивно (рисунок 3.3), что влияет на дальнейшее возникновение микротрещин [143].

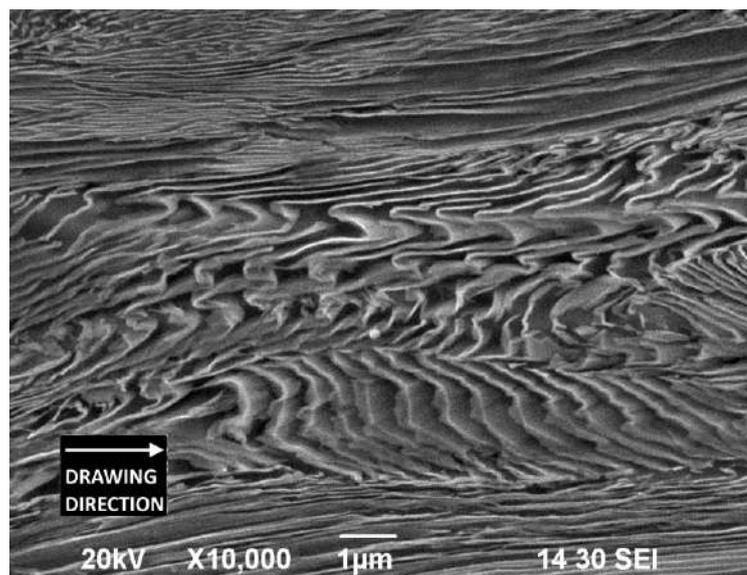


Рисунок 3.3 – Изображение микроструктуры (после волочения) с перлитными колониями, перпендикулярными оси волочения

Металлографические исследования промышленных образцов проволоки подтвердили особенность деформации перлитных колоний, ориентированных под углом к оси волочения. В данном случае с ростом степени деформации цементитные пластины изменяют угол своей ориентации, стремясь к параллели с направлением волочения. Такая исходная ориентация в пространстве относительно оси волочения позволяет в локальных объемах реализовывать гораздо большие степени деформации, чем при параллельной или перпендикулярной ориентации. При накоплении степени деформации более 0,70 начинается дробление или изгиб цементитных пластин с формированием так называемых полос сброса (рисунок 3.4) [143].

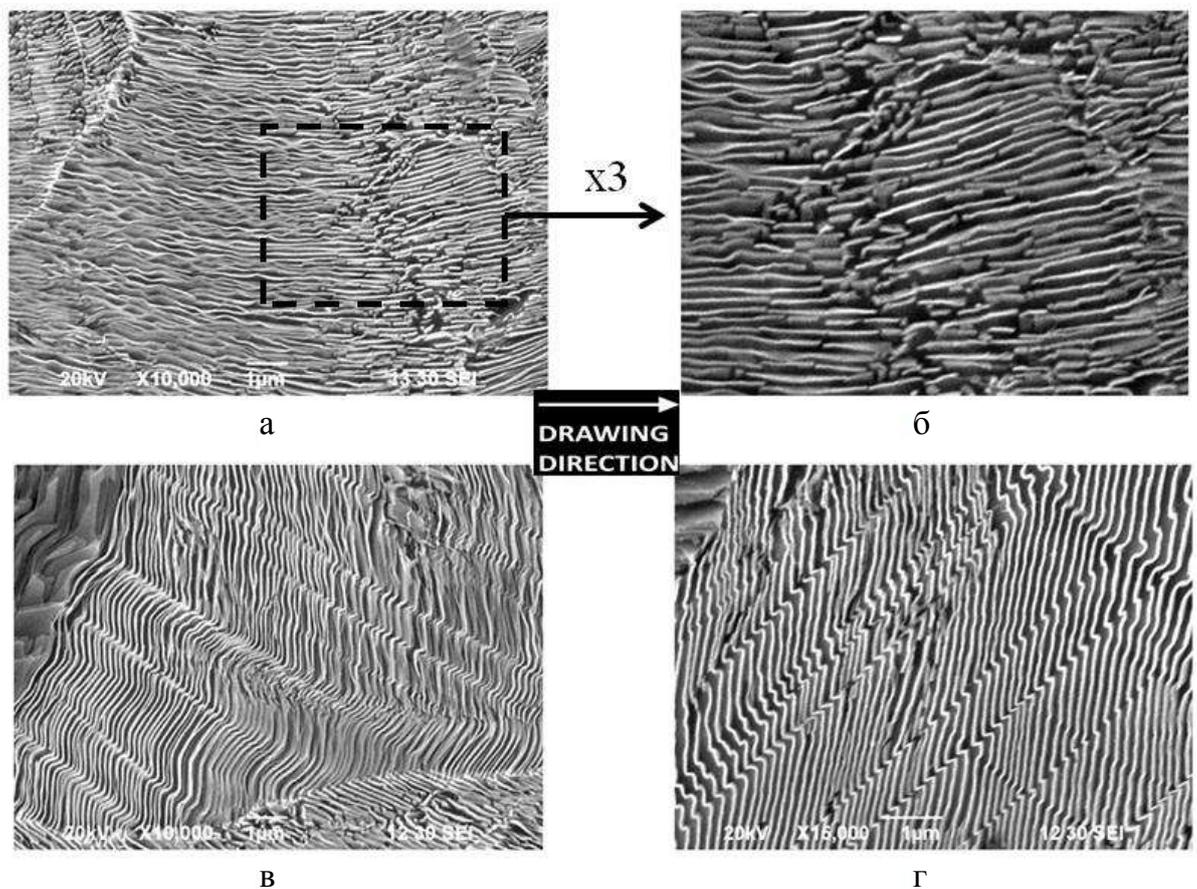


Рисунок 3.4 – Деформация цементитных пластин в перлитных колониях, расположенных под углом к оси волочения:

а, б – поперечное сечение проволоки; в, г – продольное сечение проволоки

Исследование микроструктуры с мелкодисперсными включениями подтвердило, что изначально эллипсоидная форма включений в процессе волочения изменяется незначительно. При этом продолговатые, сильно искривленные в исходном состоянии пластины цементита в областях скопления феррита могут искажаться вплоть до

петлеобразного состояния с равномерной деформацией по всей длине пластины (рисунок 3.5).

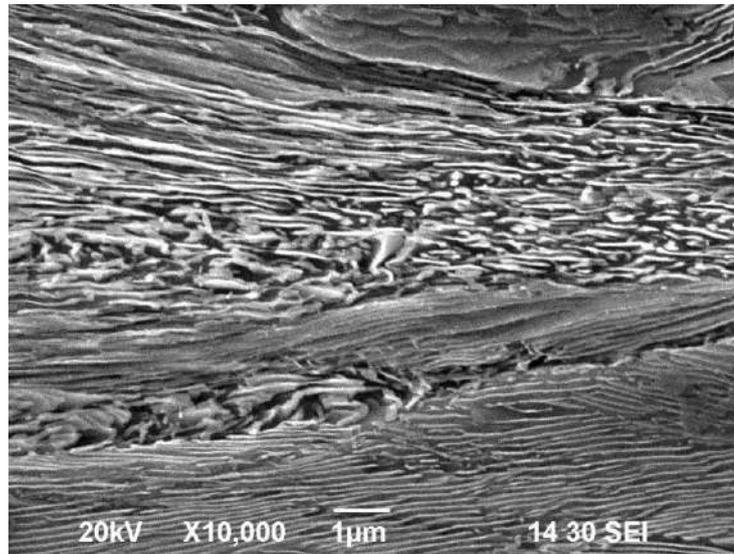


Рисунок 3.5 – Изображение микроструктуры (после волочения) с мелкодисперсными включениями

Результаты испытания механических свойств проволоки представлены в таблице 3.2. Они свидетельствуют, что временное сопротивление разрыву в процессе волочения увеличивается по сравнению с горячекатаным состоянием на 82%. Равномерное удлинение снижается на 70% за первый проход пластической деформации, а затем остается практически неизменным. Относительное сужение при этом возрастает на 58%, что можно объяснить характером деформации цементитных пластин в процессе волочения. Цементитные пластины на первых проходах исследуемого маршрута настолько утоняются, что далее они способны пластически деформироваться без значительного разрушения вплоть до последнего прохода [144].

Таблица 3.2 – Результаты испытания проволоки на растяжение

Диаметр заготовки, мм	Временное сопротивление разрыву σ_b , МПа	Относительное равномерное удлинение δ_p , %	Относительное сужение ψ , %
12,00	1158,49	7,27	30,56
10,42	1298,13	1,77	28,07
9,11	1439,84	1,71	32,61
8,02	1562,88	2,43	39,91

Окончание таблицы 3.2

Диаметр заготовки, мм	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Относительное равномерное удлинение δ_p , %	Относительное сужение ψ , %
7,10	1620,13	2,54	46,58
6,35	1711,44	2,37	51,18
5,65	1798,30	2,36	51,68
5,06	1880,94	2,17	48,87
4,55	1987,04	2,07	49,19
4,10	2099,92	2,15	48,40

Далее согласно зависимости Холла–Петча [145] был проведен сравнительный анализ механических свойств промышленных образцов проволоки и их расчетных значений в соответствии с результатами ранее проведенного моделирования:

$$\sigma_R(i) = \sigma_0 + k' \left(\frac{\bar{s}_0(i)}{\cos \bar{\beta}(i)} \right)^{-1/2}, \quad (3.1)$$

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 межпластинчатое расстояние после i -го прохода волочения, мкм; $\bar{\beta}$ – средний угол наклона перлитных пластин после i -го прохода волочения, град.

Сравнительный анализ (рисунки 3.6–3.8) механических свойств и параметров микроструктуры реальных образцов проволоки и их значений, полученных с помощью компьютерного моделирования, показал сходимость данных выше 70%, что позволяет сделать вывод о высокой прогнозирующей способности компьютерных моделей, представленных в главе 2 настоящей работы. Кроме того, полученные данные коррелируют с результатами исследований испанских ученых [146, 147].

Значительное снижение продольных остаточных напряжений после седьмого прохода волочения может быть объяснено процессами, происходящими с микроструктурными составляющими перлитной проволоки, которые протекают при преодолении степени деформации 82% (рисунок 3.9).

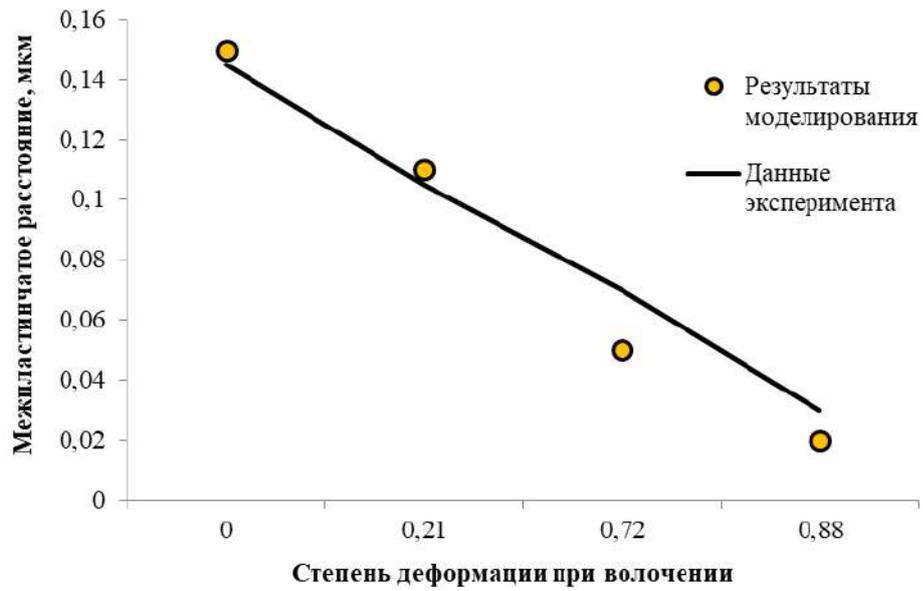


Рисунок 3.6 – Сравнение межпластинчатого расстояния, полученного посредством компьютерной модели и в промышленных образцах

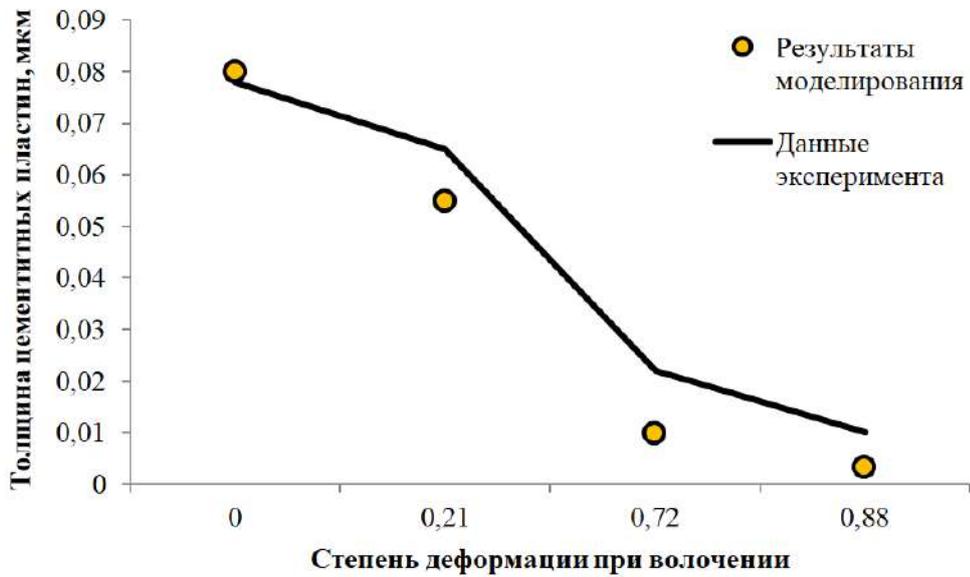


Рисунок 3.7 – Сравнение толщин цементитных пластин, полученных посредством компьютерной модели и в промышленных образцах

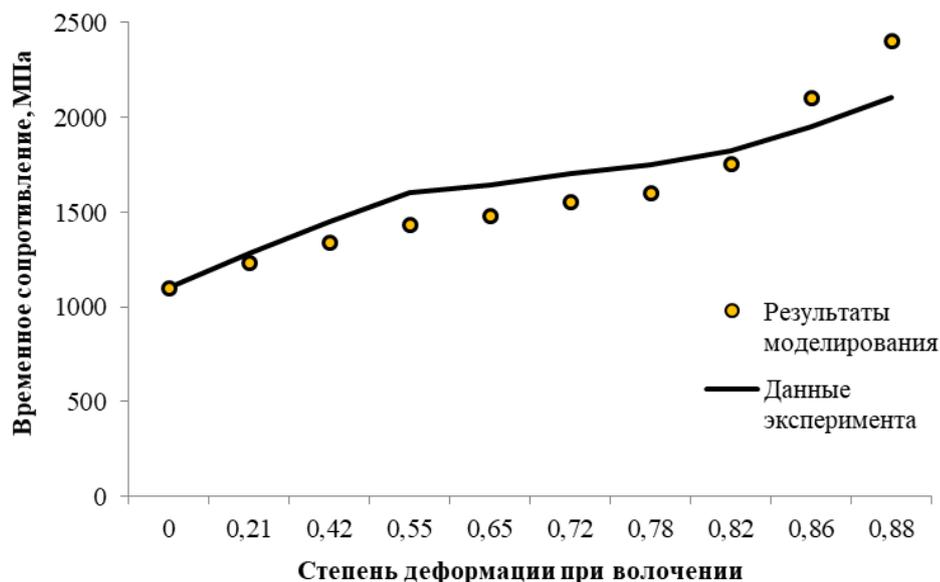


Рисунок 3.8 – Сравнительный анализ механических свойств промышленных образцов проволоки и их расчетных значений

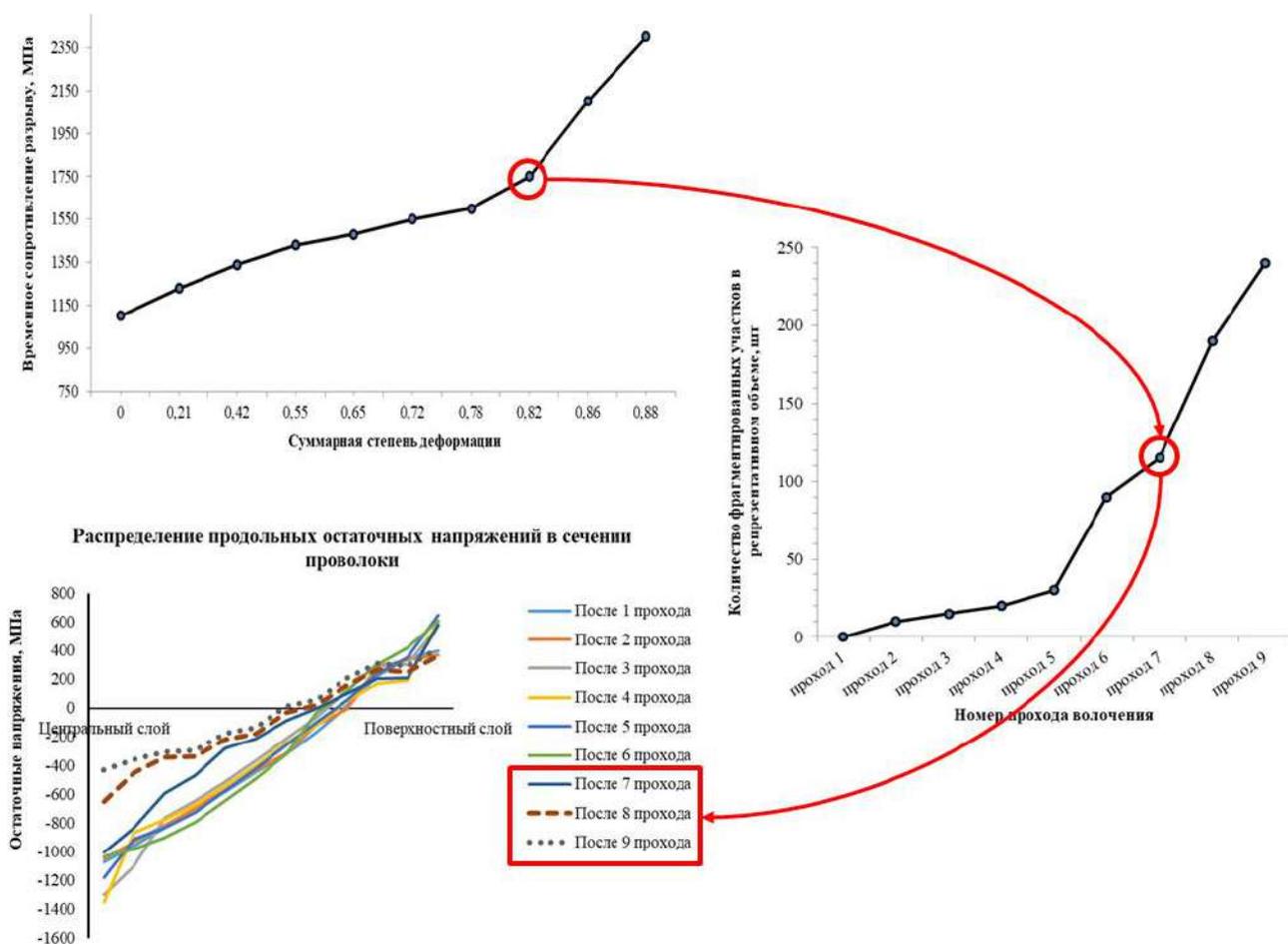


Рисунок 3.9 – Соотнесение механических свойств и размерных параметров микроструктуры с остаточными напряжениями

Далее были исследованы промышленные образцы стабилизированных арматурных канатов, полученных при различных температурно-силовых параметрах процесса стабилизации.

3.2 Исследование стабилизированного арматурного каната

Для верификации результатов моделирования, а также с целью исследования влияния параметров процесса стабилизации арматурных канатов на их эксплуатационные свойства был выполнен промышленный эксперимент. В соответствии с условиями промышленного эксперимента, производимого в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ», был реализован холостой ход оборудования (XX) при отсутствии нагрева стали в индукционной печи (с отключенным индуктором), а также вариация следующих основных параметров процесса:

- температура нагрева каната в индукционной печи в диапазоне 360–400°C с шагом 20°C;
- натяжение каната в диапазоне 58–82 кН с шагом 12 кН;
- скорость процесса стабилизации в диапазоне 50–65 м/мин с шагом 15 м/мин.

Значения указанных параметров процесса выбирались с учетом технических характеристик комплекса технологического оборудования, предназначенного для реализации исследуемого процесса. В качестве исследуемых величин (функций отклика) рассматривались механические свойства и остаточные напряжения как составляющие комплекса эксплуатационных свойств арматурных канатов.

3.2.1 Исследование влияния параметров процесса стабилизации на механические свойства экспериментальных образцов арматурных канатов

Исследование механических свойств экспериментальных образцов арматурных канатов проводилось в ходе испытаний на растяжение по ГОСТ 12004-81 на электромеханической испытательной машине LFM-400. В ходе испытаний применялись штангенциркули в соответствии с требованиями ГОСТ 166 и микрометры в соответствии с требованиями ГОСТ 6507.

Для каждого из исследуемых режимов стабилизации испытание проводилось не менее, чем на трех образцах каната, а также отдельно для центральной и повивочных

проволок каждого из образцов. Результаты испытаний экспериментальных образцов арматурных канатов на растяжение представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Средние значения механических свойств экспериментальных образцов арматурных канатов, полученные при испытании на растяжение

Режим обработки, скорость / температура, (м/мин / °С)	Временное сопротивление, Н/мм ²			Полное относительное удлинение при максимальной нагрузке δ_{\max} , %		
	каната	повивочной проволоки	центральной проволоки	каната	повивочной проволоки	центральной проволоки
Холостой ход	1782	1996	1991	2,00	1,94	1,88
50/360	1883	1900	1924	4,9	5,31	5,1
50/380	1902	1968	1975	4,65	4,96	4,77
50/400	1867	1974	1980	4,74	5,02	5,07
65/360	1893	1988	1976	4,51	4,71	4,65
65/380	1881	1938	1987	4,43	4,89	4,55
65/400	1873	1986	1995	4,5	4,88	4,68

Как следует из данных таблицы 3.3, в результате свивки центральной и повивочных проволок в семипроволочный канат механические свойства конечной продукции снижаются. Однако при всех исследуемых режимах стабилизации (за исключением холостого хода, то есть при отсутствии нагрева) механические свойства соответствуют требуемому уровню временного сопротивления (не менее 1860 Н/мм²) и полного относительного удлинения при максимальной нагрузке (не менее 4,4%). Наилучшее сочетание прочности, пластичности и релаксационной стойкости при снижении доли растягивающих остаточных напряжений в сечении центральной и повивочных проволок образцов арматурных канатов является режим, предусматривающий нагрев стали в индукционной печи до температуры 380°С при скорости процесса 50 м/мин.

Как было обозначено ранее, одним из наиболее важных эксплуатационных свойств арматурных канатов, является релаксационная стойкость, регламентируемое значение которой составляет не более 2,5%. Как известно, эффект релаксации напряжений заключается в том, что при зафиксированной деформации (например, в растянутой силой проволоке, неподвижно, закрепленной по концам) с течением

времени напряжения падают. Для определения потерь напряжений при испытании на релаксационную стойкость полученных промышленных образцов каната использовалась испытательная машина Shimadzu Servopulser U-type. Экспресс-испытания проводились в условиях Научно-исследовательского института Наносталей МГТУ им. Г.И.Носова в соответствии с ГОСТ 28334-89 «Проволока и канаты стальные для армирования предварительно-напряженных железобетонных конструкций. Метод испытания на релаксацию при постоянной деформации». Минимальная расчетная длина образца для испытания на релаксацию (часть между губками захватов) составляла 40 диаметров образца каната. Выдержка объекта исследований под напряжением выполнялась при начальной нагрузке 0,7 от фактического разрывного усилия. Результаты исследований релаксации напряжений промышленных образцов каната представлены на рисунке 3.10.

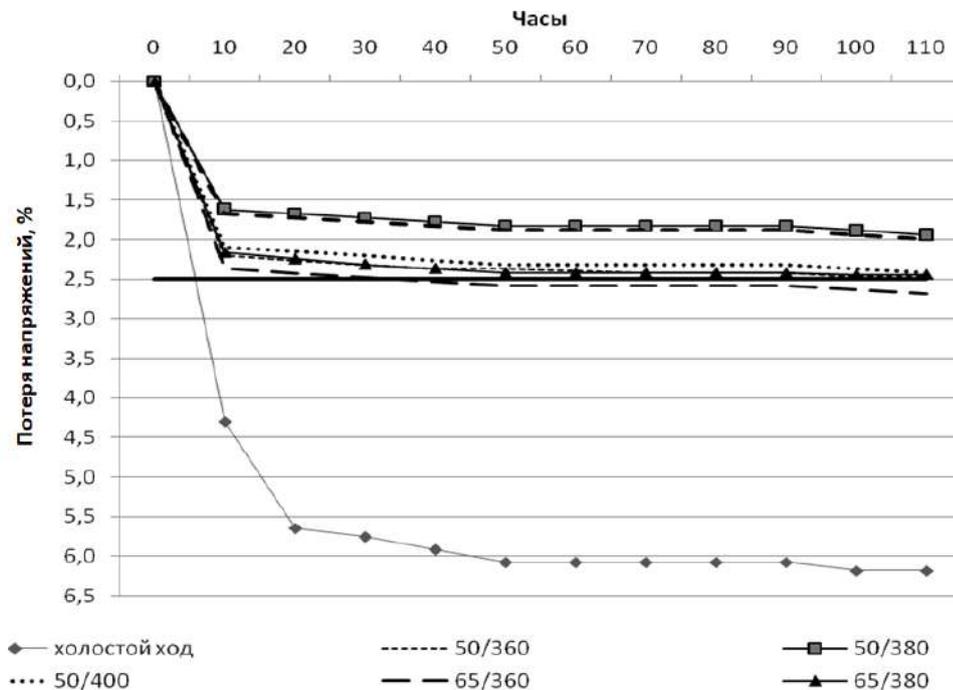


Рисунок 3.10 – Сравнительный анализ потерь напряжений при испытании на релаксацию при постоянной деформации промышленных образцов стабилизированных арматурных канатов

Как видно из рисунка 3.10, отсутствие операции стабилизации кардинально меняет как абсолютные значения релаксации напряжений, так и динамику её изменения. Без операции стабилизации канат теряет недопустимые 6,18% напряжений за первые 100 часов испытаний. Проведение операции стабилизации благоприятным образом влияет на релаксационную стойкость канатов, уменьшая процентные потери

напряжений более чем в 2 раза, по сравнению с образцами, полученными без нагрева (на холостом ходу). После выдержки под напряжением в течение 100 часов минимальное значение потерь напряжений при релаксации наблюдается при температуре нагрева 380°C и скорости стабилизации 50 м/мин.

3.2.2 Исследование влияния параметров процесса стабилизации на остаточные напряжения экспериментальных образцов стабилизированных арматурных канатов

Экспериментальное исследование остаточных напряжений выполнялось с использованием рентгеновского дифрактометра SHIMADZU XRD-7000. Величина макронапряжений определялась по формуле

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E \cdot \operatorname{ctg} \theta_0 (2\theta_0 - 2\theta_{\psi})}{2(1 + \mu) \cdot \sin^2 \psi}, \quad (3.2)$$

где $2\theta_0$ – наблюдаемая величина брэгговского угла при $\psi = 0$, град; $2\theta_{\psi}$ – брегговский угол при наклонной съемке под углом ψ , град; μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости (модуль Юнга).

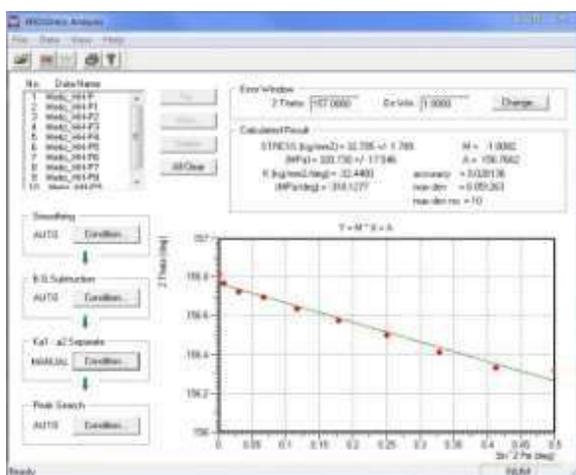
Угол ψ принимался равным от 0 до 45 град с шагом 5. Изменение угла ψ осуществляется с помощью приставки, позволяющей менять угол в диапазоне от 0 до 50 градусов с точностью 0,01 град.

Образцы на рентгеновском дифрактометре устанавливались таким образом, чтобы определять макронапряжения поперек оси центральной и повивочной проволок каната. Для увеличения полезной площади и повышения точности измерений от объекта испытаний отрезалось 14 образцов длиной по 15 мм, которые запрессовывались совместно (рисунок 3.11). Запрессовка производилась с использованием смолы «Transoptic» на автоматическом прессе Simplimet 1000 на линии пробоподготовки фирмы «Buechler». Дальнейшая механическая полировка поверхности образцов осуществлялась на шлифовально-полировальном станке Phoenix 4000 V, а финишная полировка – с помощью установки для электролитического полирования Struers LectroPol-5.



Рисунок 3.11 – Образец, подготовленный к рентгеноструктурному анализу

Микроискажения кристаллической решетки рассчитывались в программном пакете XRD: Stress Analysis, входящим в состав программного обеспечения рентгеновского дифрактометра (рисунок 3.12, а), в котором прописаны коэффициенты пропорциональности (K) между изменениями углов дифракции 2θ и значениями $\sin^2\psi$, используемые для расчета остаточных напряжений (рисунок 3.12, б).



а

Sample	Tube	Plane	Angle	K (kg/mm2/deg)	K (MPa/deg)
a-Fe	CrKa	(211)	156.1	-32.44	-318.13
r-Fe	CrKb	(311)	149.6	-37.35	-366.28
Al	CrKa	(222)	156.7	-9.40	-92.18
Al	CoKa	(420)	162.1	-7.18	-70.41
Al	CoKa	(331)	148.7	-12.78	-125.33
Al	CuKa	(333)	164.0	-6.41	-62.86
Cu	CoKa	(400)	163.5	-12.04	-118.07
Cu	CuKa	(420)	144.7	-26.42	-259.09
WC	CoKa	(211)	165.8	-47.61	-466.89
WC	CuKa	(301)	146.8	-114.10	-1118.94

K (kg/mm2/deg)

б

Рисунок 3.12 – Интерфейс программы (а) и таблица коэффициентов (б) для определения остаточных напряжений

Положение рентгеновского максимума, полуширина пика, а также величина внутренних напряжений определялись автоматически программным комплексом дифрактометра с погрешностью не более 5%.

Определение остаточных напряжений с помощью рентгеновского дифрактометра позволили фиксировать изменения в параметрах кристаллической решетки, в частности в межплоскостных расстояниях. На основании численных изменений межплоскостного расстояния определялись количественные параметры напряжений второго рода и их характер. Результаты исследований остаточных напряжений представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Уровень уравновешенных остаточных напряжений в проволоках экспериментальных образцов стабилизированных арматурных канатов

Режим обработки, скорость / температура, м/мин / °С	Остаточные напряжения, МПа	
	Повивочная проволока	Центральная проволока
XX	327,1	176,42
50/360	-208,8	-98,727
50/380	-51,846	-136,325
50/400	-137,729	-143,91
65/360	-190,2	-88,6
65/380	-48,6	-116,7
65/400	-112,9	-130,1

Соотношение остаточных напряжений в продольном направлении в повивочной и центральной проволоках, а также их изменение в зависимости от исследуемых режимов стабилизации представлено на рисунке 3.13. Как следует из представленных данных, при исследовании напряжений свитого, не подвергнутого нагреву каната в центральной и повивочных проволоках каната сохраняются сформированные на предшествующих технологических операциях неблагоприятные растягивающие продольные напряжения уровня 200–300 МПа, что, в свою очередь, негативно сказывается на прочности и релаксационной стойкости готового изделия. Полученные данные по остаточным напряжениям центральной проволоки каната согласуются с результатами моделирования, полученными в главе 2, где градиент распределения остаточных напряжений (от центра до поверхности) в центральной проволоке перед процессом стабилизации свитого каната представлен в диапазоне от (-400 МПа) до (+420 МПа).

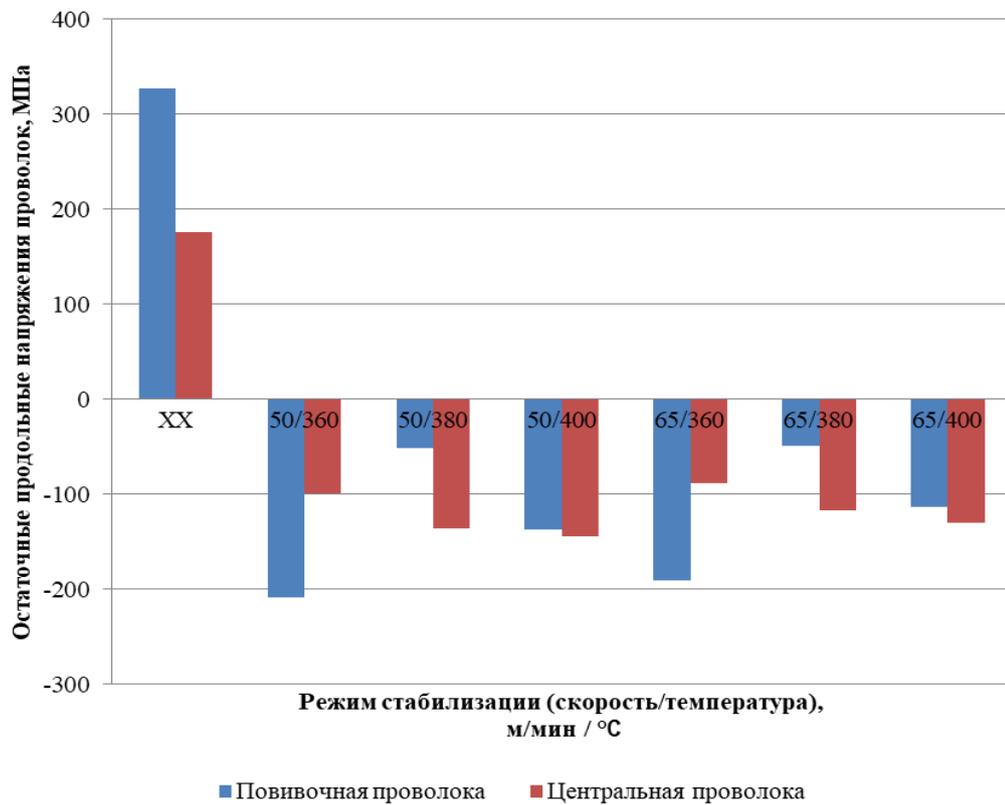


Рисунок 3.13 – Сравнительный анализ остаточных напряжений в продольном направлении в повивочной и центральной проволоках для исследуемых режимов стабилизации

Применение процесса стабилизации, сочетающего воздействия различной физической природы (низкотемпературный нагрев металла в индукционной печи под натяжением), позволяет в широком диапазоне управлять процессом перераспределения остаточных напряжений в металле, сформированных ранее в процессе волочения проволок и последующей свивки в канат. При всех исследуемых режимах процесс стабилизации позволяет перераспределить баланс в пользу благоприятных сжимающих напряжений. Это, в свою очередь, выражается в росте значений временного сопротивления каната и составляющих его проволок. Наиболее благоприятное соотношение абсолютных значений уравновешенных напряжений одновременно в повивочной и центральной проволоках каната достигается при температуре нагрева стали в индукционной печи до 400°C независимо от скорости процесса в исследуемом диапазоне значений.

Кроме того, полученные данные согласуются с результатами моделирования, представленными в главе 2 настоящей работы. Так, например, при температуре 360°C

независимо от скорости процесса стабилизации значения уравновешенных остаточных напряжений в центральной проволоке в два раза меньше уравновешенных значений остаточных напряжений повивочной проволоки, но при увеличении температуры стабилизации на 20°С данное соотношение зеркально меняется, что наблюдается и при максимальной температуре стабилизации 400°С.

Таким образом, соотнеся результаты моделирования и данные по исследованию промышленных образцов каната, а также в результате учета двух категорий напряжений (остаточных после процесса волочения и свивочных напряжений в повивочных проволоках после процесса свивки), были установлены благоприятные режимы стабилизации для арматурного каната диаметром 12,5 мм конструкции К7 (рисунок 3.14).

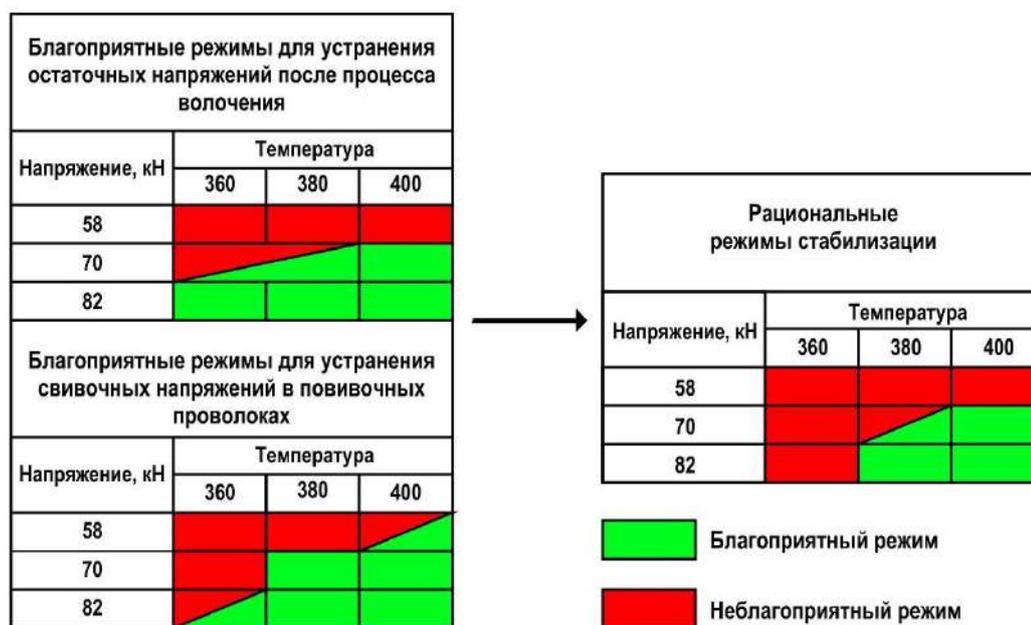


Рисунок 3.14 – Соотношение режимов стабилизации с позиции перераспределения остаточных напряжений после процесса волочения проволоки и свивочных напряжений при свивке каната

Полученные результаты исследований промышленных образцов стабилизированных арматурных канатов диаметром 12,5 мм подтверждают необходимость учета внутренних напряжений, формируемых на каждом этапе его производства. При этом в виду наличия широкой номенклатуры арматурных канатов, выпускаемых ОАО «ММК-МЕТИЗ», а также пограничных режимов стабилизации

(температура 380°C и натяжение 70 кН) может возникнуть необходимость оперативного повышения эффективности технологического процесса производства арматурных канатов. Поскольку разработанные компьютерные модели (глава 2) были успешно верифицированы результатами исследования промышленных образцов (глава 3), далее на их основе целесообразно производить поиск эффективного решения по повышению конкурентоспособности выпускаемой продукции.

Выводы по главе 3

В результате лабораторного исследования микроструктуры промышленных образцов проволоки, отобранных после каждого прохода девятикратного волочения, было подтверждено, что наибольшему изменению межпластинчатого расстояния ферритокарбидной структуры подвержена микроструктура с перлитными колониями, расположенными параллельно оси волочения. Металлографические исследования наглядно показали деформацию перлитных колоний, ориентированных под углом к оси волочения, то есть сдвиг цементитных пластин после 7-го прохода волочения. Результаты измерения межпластинчатого расстояния и толщины цементитных пластин микроструктуры проволоки после каждого прохода волочения продемонстрировали схожую динамику изменения с результатами компьютерной модели.

Исследование механических свойств проволоки показало достижение итогового временного сопротивления разрыву значения 2100 МПа, что на 14% отличается от результатов компьютерного моделирования. Данный факт подтверждает высокую прогнозирующую способность разработанных ранее компьютерных моделей и позволяет их использовать при реализации дальнейших исследований.

Результаты экспериментальных исследований остаточных напряжений с помощью дифрактометра позволили получить точечные значения остаточных напряжений для центральной и повивочных проволок каната, полученного при различных режимах стабилизации. При этом полученные усредненные значения остаточных напряжений коррелируют с результатами компьютерного моделирования, но, в отличие от лабораторного метода исследования напряжений, компьютерное моделирование позволило получить градиент распределения внутренних напряжений каната при каждом режиме стабилизации.

Результаты эксперимента позволили подтвердить благоприятное влияние процесса стабилизации на релаксационную стойкость канатов, которое заключается в уменьшении процентных потерь напряжений более чем в 2 раза.

Учет внутренних напряжений, возникающих в канате при свивке и различных режимах стабилизации, позволил выделить рациональные режимы стабилизации для арматурного каната диаметром 12,5 мм конструкции 1×7 (1+6) с точки зрения влияния на продольные остаточные напряжения в канате. При достижении натяжения 70 кН при температуре 400°C, а также при максимальном натяжении в 82 кН в диапазоне температур 380–400°C наблюдается полное сохранение геометрии каната, а также снижение уровня остаточных напряжений.

Глава 4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ АРМАТУРНЫХ КАНАТОВ В УСЛОВИЯХ ОАО «ММК-МЕТИЗ»

Данная глава диссертационной работы посвящена изучению влияния калибрующего пластического обжатия арматурного каната на изменение его НДС в процессе обработки с целью оценки потенциала внедрения данной операции в действующий технологический процесс производства стабилизированных арматурных канатов в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ». Для достижения данной задачи и на основании ранее разработанных компьютерных моделей было проведено компьютерное моделирование калибрующего пластического обжатия арматурного каната со степенью деформации 3, 6 и 9%. Исследуемый диапазон обжатия обоснован необходимостью соблюдения указанных в [3] и [9] допусков на геометрические размеры стабилизированного арматурного каната, а также конструкцией каната.

4.1 Влияние калибрующего пластического обжатия на НДС арматурного каната

Как было описано в главе 1 настоящей работы, исследуемый процесс калибрующего пластического обжатия арматурного каната технически возможно реализовать путем свивки каната из гладкой круглой проволоки и последующей его прокатки через роликовый инструмент (рисунок 4.1). В ходе данной обработки на поверхностях контакта центральной и повивочных проволок друг с другом формируются уплощенные спиральные площадки, а на обращенной наружу поверхности повивочных проволок наносится периодический профиль.

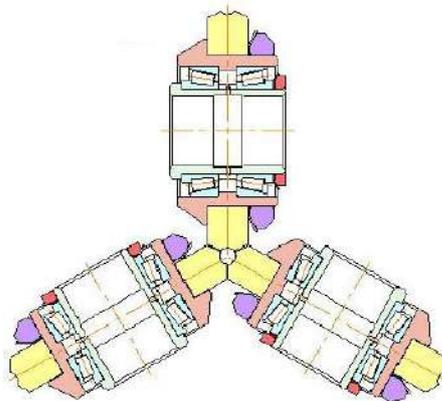


Рисунок 4.1 – Трехроликовый калибр

При этом для исследования влияния степени калибрующего пластического обжатия на изменение НДС арматурного каната согласно формуле (4.1) был определен диапазон значений степени деформации. В данном случае ε , как критерий оценки величины уменьшения каната [46], представляет собой степень единичных обжатий в диапазоне от 3 до 9%. Обжатие с такими степенями деформации позволяет получить арматурный канат с геометрическими размерами, соответствующими [3] (при предельном отклонении от номинального диаметра каната 12,5 мм в диапазоне от -0,2 до +0,4 мм).

$$\varepsilon = \frac{d_0^2 - d^2}{d_0^2}, \quad (4.1)$$

где d_0 – диаметр исходной пряди, мм; d – диаметр обжатой пряди, мм.

Компьютерная модель обжимающего калибра состоит из трех не приводных роликов и представлена на рисунке 4.2. Сведенные ролики образуют круглое сечение различного требуемого диаметра (рисунок 4.3).

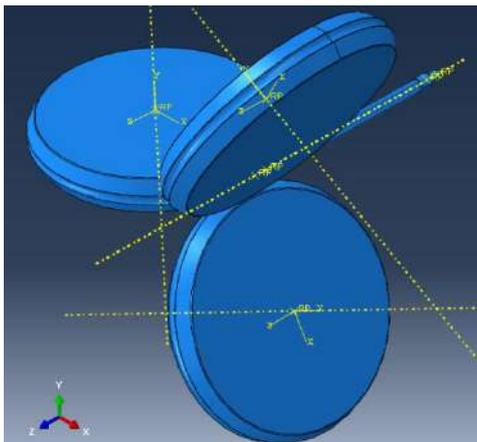


Рисунок 4.2 – Общий вид модели трехролевого калибра

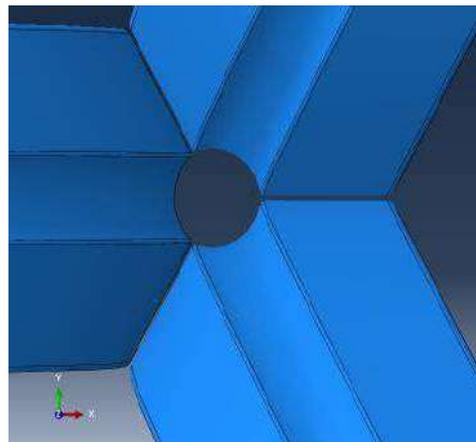


Рисунок 4.3 – Сведенный трехролековый калибр

На основании полученных данных об остаточных напряжениях в продольном направлении центральной и повивочных проволок (глава 2) до операции свивки на поверхности проволоки были определены растягивающие остаточные напряжения, достигающие 300 МПа, а в остальных «слоях» – сжимающие напряжения в диапазоне от 450 до 175 МПа. Распределение продольных напряжений в проволоках приведено на рисунке 4.4, а. Остаточные радиальные напряжения имели меньший диапазон и представлены на рисунке 4.4, б. Данные распределения использовались в качестве исходных напряжений при моделировании процесса калибрующего пластического обжатия.

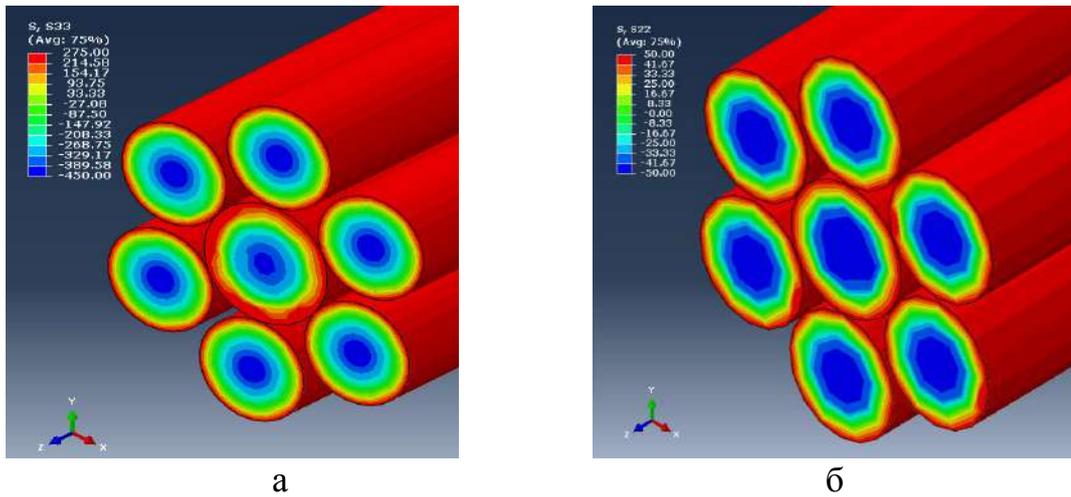


Рисунок 4.4 – Распределение продольных и радиальных напряжений в проволоках каната, накопленных до процесса свивки

Согласно этапам разработанной компьютерной модели после свивки каната была произведена протяжка каната через профилирующие ролики со степенью деформации 3, 6 и 9%. Протяжка через роликовый калибр осуществлялась путем прикладывания усилия 70 кН к переднему концу свитой канатной пряди, при этом к дальнему концу прикладывалось незначительное противонатяжение.

Распределение напряженно-деформированного состояния в очаге деформации (рисунки 4.5, 4.6) и после калибрующего пластического обжатия канатной пряди с различной степенью обжатия представлено на рисунках 4.7, 4.8.

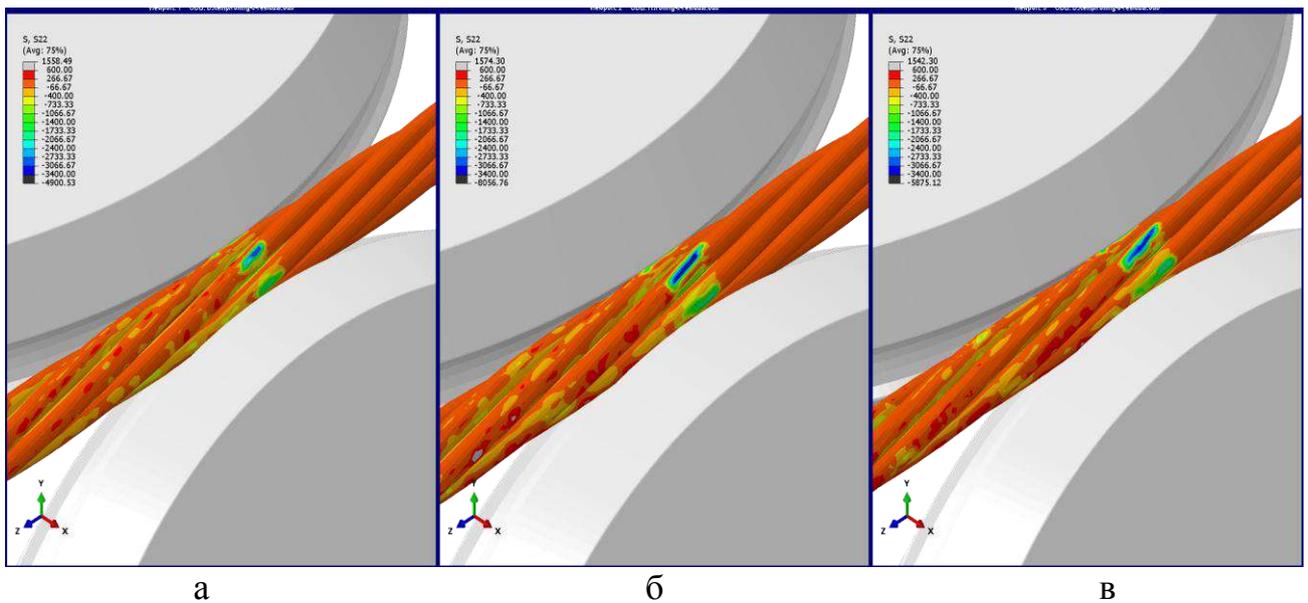
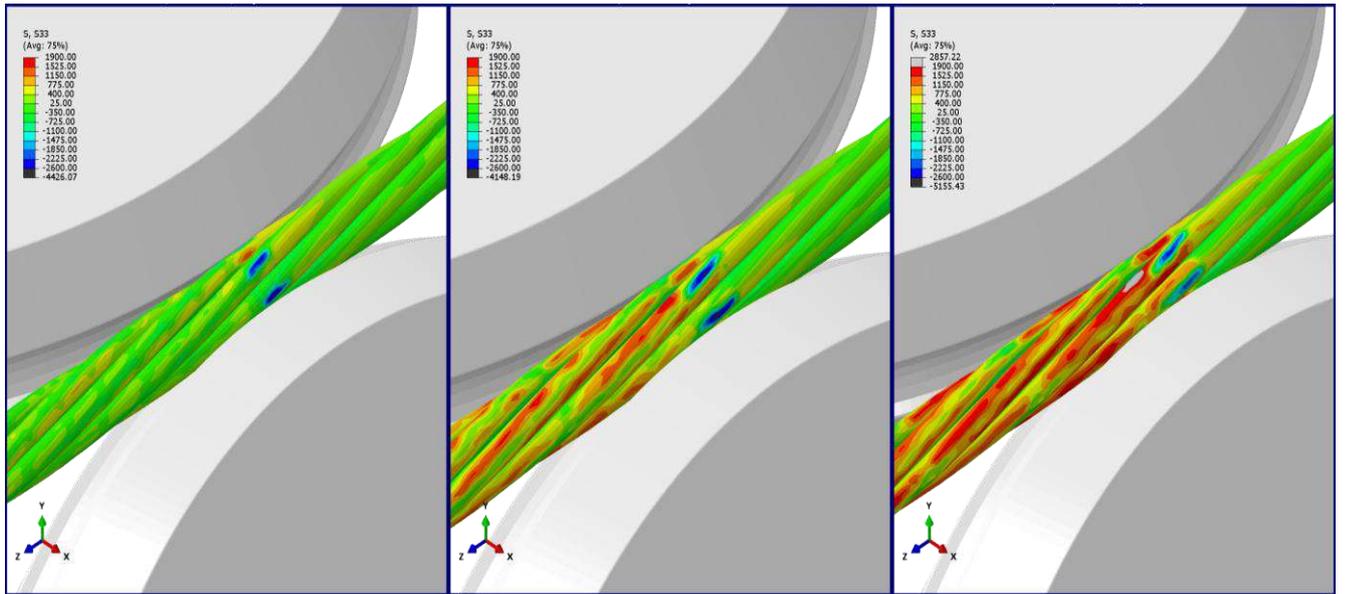


Рисунок 4.5 – Распределение поперечных напряжений в очаге деформации при пластическом обжатии с различной степенью деформации:

а – 3%; б – 6%; в – 9%



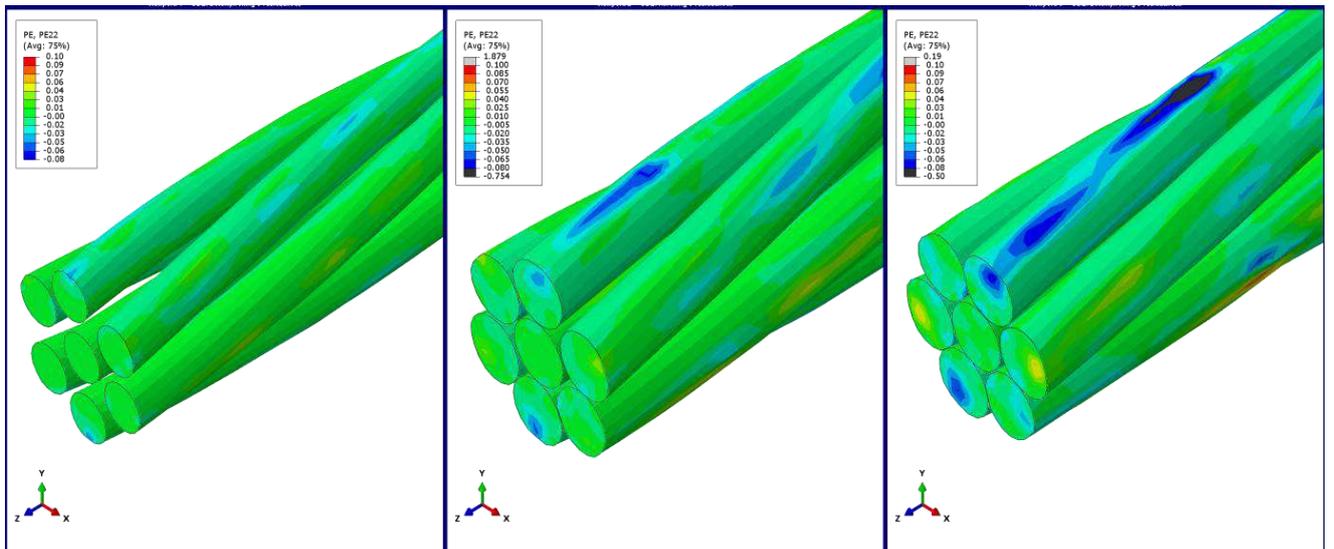
а

б

в

Рисунок 4.6 – Распределение продольных напряжений в очаге деформации при пластическом обжатии с различной степенью деформации:

а – 3%; б – 6%; в – 9%



а

б

в

Рисунок 4.7 – Распределение радиальных деформаций после пластического обжатия с разной степенью деформации:

а – 3%; б – 6%; в – 9%

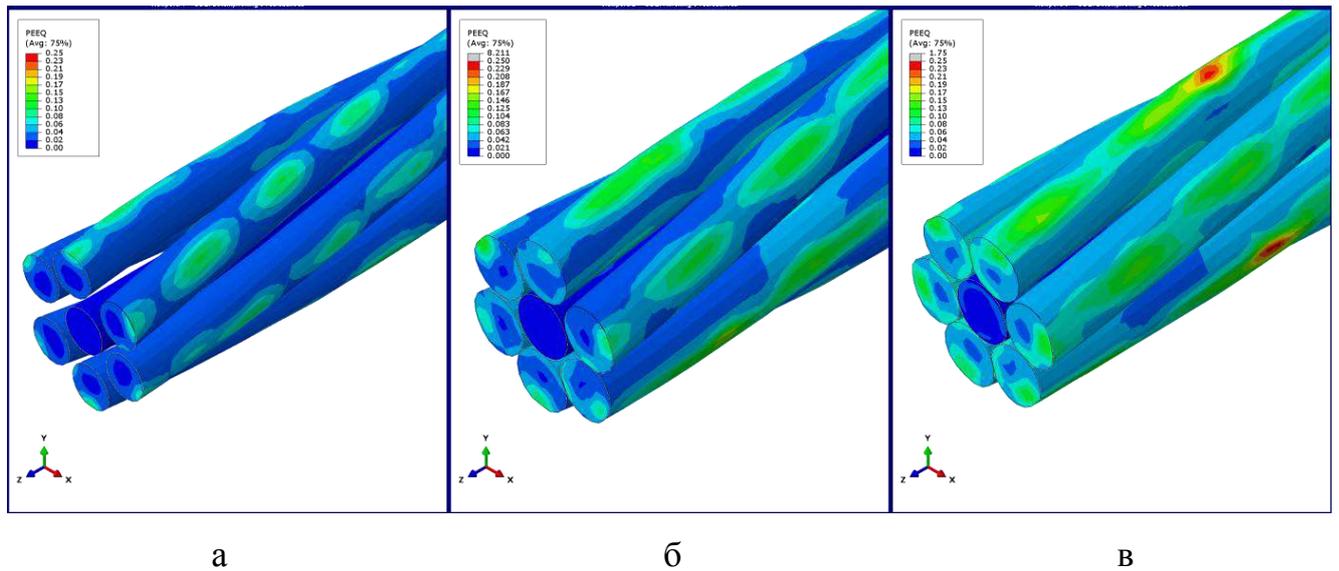


Рисунок 4.8 – Распределение эквивалентных деформаций после пластического обжатия с разной степенью деформации:

а – 3%; б – 6%; в – 9%

Сжимающие поперечные напряжения в очаге деформации достигают значений от 2400 до 3000 в зависимости от увеличения степени деформации. Деформированное состояние пряди после процесса калибрующего пластического обжатия с различными степенями деформации изменяется незначительно. Сжимающие радиальные деформации распределены равномерно по всему сечению канатной пряди при любом из режимов обжатия и достигают значений до 0,05 с отдельными локализациями в местах контакта повивочных проволок с центральной проволокой. Отмечено, что при увеличении степени деформации в процессе пластического обжатия происходит многократное увеличение контактной площади между повивочными и центральной проволоками, что положительно сказывается на эксплуатационных характеристиках каната.

Результаты распределения остаточных напряжений в пластически обжатом канате (рисунок 4.9, а) показали, что прокатка с минимальной степенью деформации 3% не устраняет свивочные напряжения, однако при этом остаточные напряжения перераспределяются в сторону увеличения зоны действия сжимающих напряжений. При обжатии каната со степенью деформации 6% целостность геометрии каната полностью сохраняется (рисунок 4.9, б), что свидетельствует о значительном снижении свивочных напряжений, а уровень остаточных напряжений в центре (-300 МПа) и на поверхности (+500 МПа) проволок соизмеримы со значениями напряжений

стабилизированного арматурного каната после нагрева до температуры 380–400°C и при натяжении 70 кН. При обжатии со степенью деформации 9% полностью устраняются свивочные напряжения (рисунок 4.9, в). Однако высокая степень деформации приводит к усугублению неблагоприятной технологической наследственности в виде высоких значений остаточных продольных напряжений на поверхности повивочных проволок (до уровня 1600 МПа).

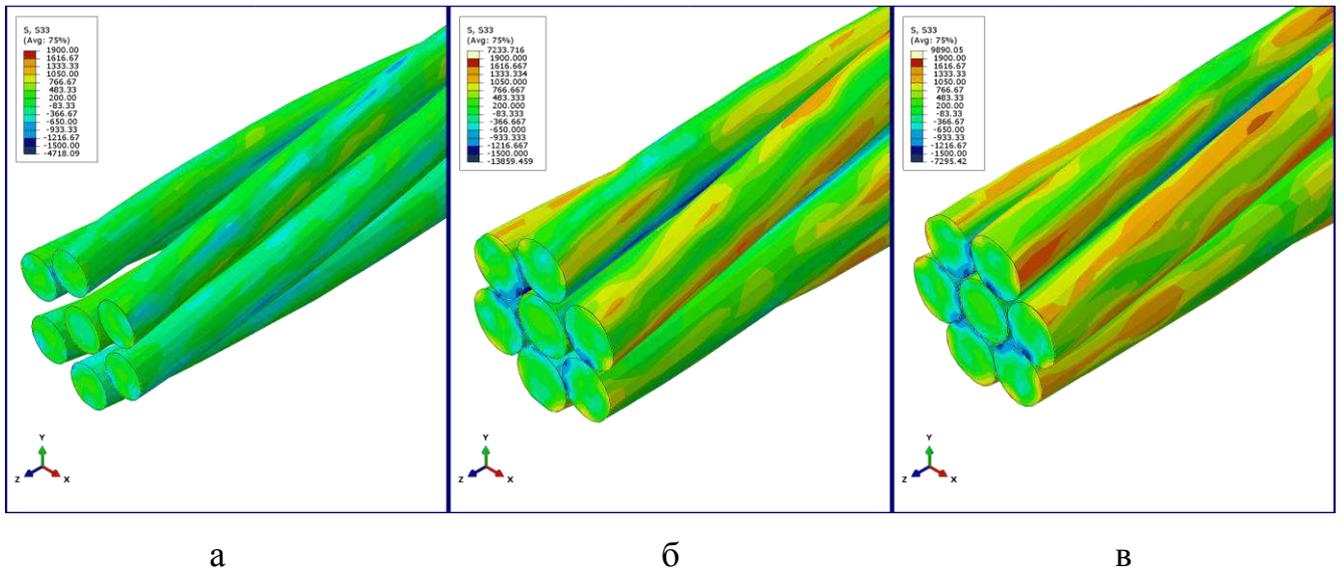


Рисунок 4.9 – Распределение продольных остаточных напряжений после калибрующего пластического обжатия с различной степенью деформации:

а – 3%; б – 6%; в – 9%

На рисунке 4.10 цветом выделены места локализации и перераспределения продольных сжимающих остаточных напряжений при увеличении степени деформации при калибрующем пластическом обжатии. Видно, что действие растягивающих остаточных напряжений максимально при реализации процесса прокатки с максимальной степенью деформации. При этом локализация сжимающих остаточных напряжений наблюдается в местах контакта повивочных проволок с центральной и между собой.

При анализе распределения главных нормальных напряжений (перпендикулярных к поверхности проволоки) в очаге деформации (рисунок 4.11) можно наблюдать равномерное распределение напряжений, зона действия которых с увеличением степени деформации от 3 до 9% также увеличивается.

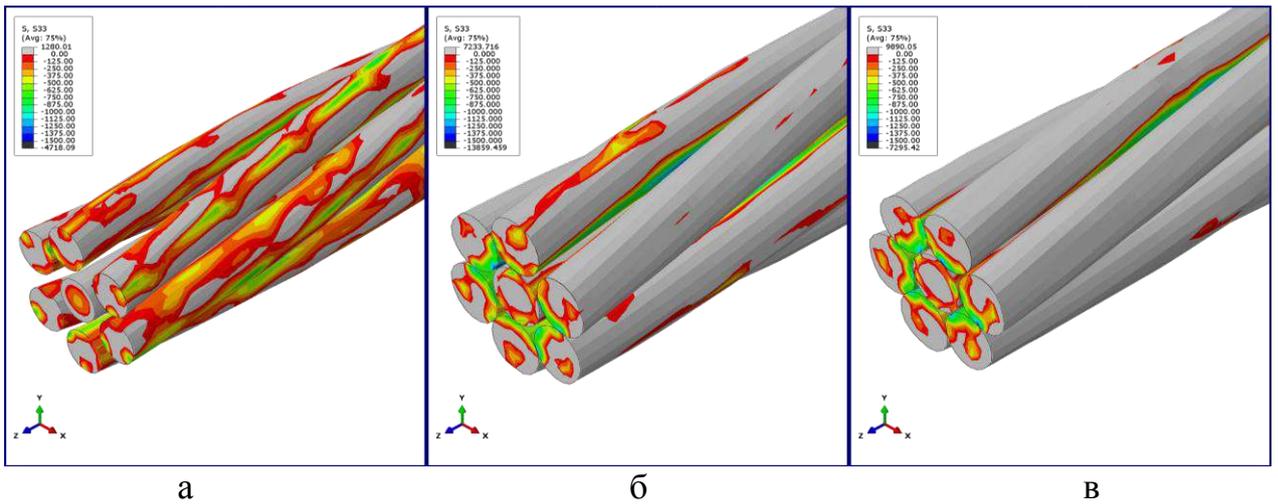


Рисунок 4.10 – Распределение продольных остаточных (сжимающих) напряжений после калибрующего пластического обжатия с различной степенью деформации:

а – 3%; б – 6%; в – 9%

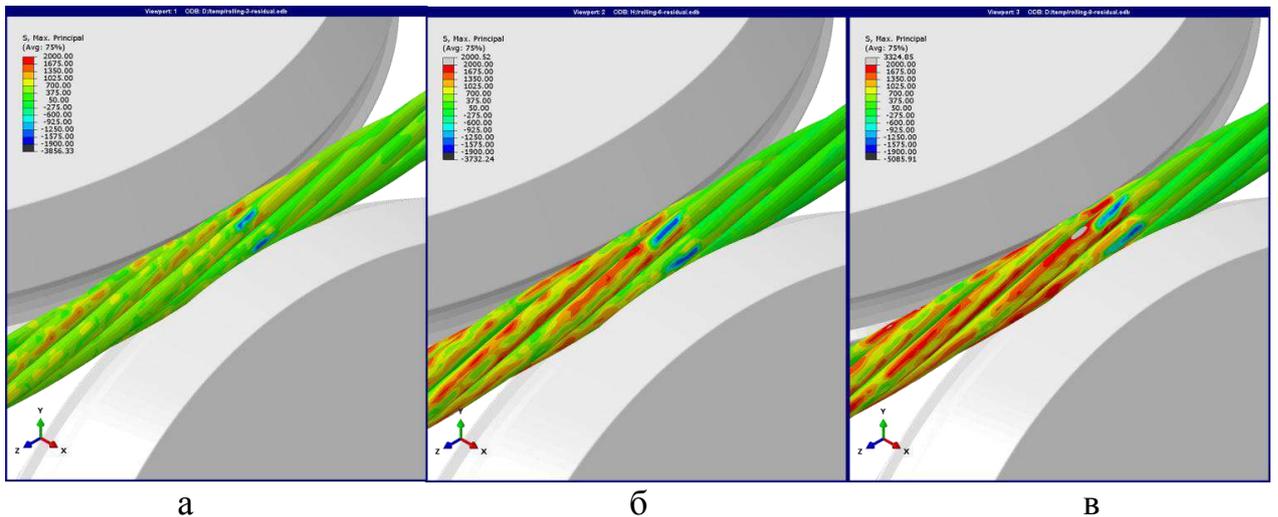


Рисунок 4.11 – Распределение главных напряжений в очаге деформации при различных степенях калибрующего пластического обжатия:

а – 3%; б – 6%; в – 9%

Обнаруженные закономерности распределения остаточных напряжений при различных степенях деформации могут объясняться тем, что отличительной особенностью процесса калибрующего пластического обжатия является смена типа контакта повивочных и центральной проволоки (линейный контакт меняется на полосовой контакт) (рисунок 4.12). Вследствие чего на все последующие воздействия канат, полученный в результате прокатки со степенью деформации 9%, начинает реагировать как единое целое тело, поэтому характер распределения (эпюра) остаточных напряжений каната схож с распределением напряжений в одной проволоке [148].

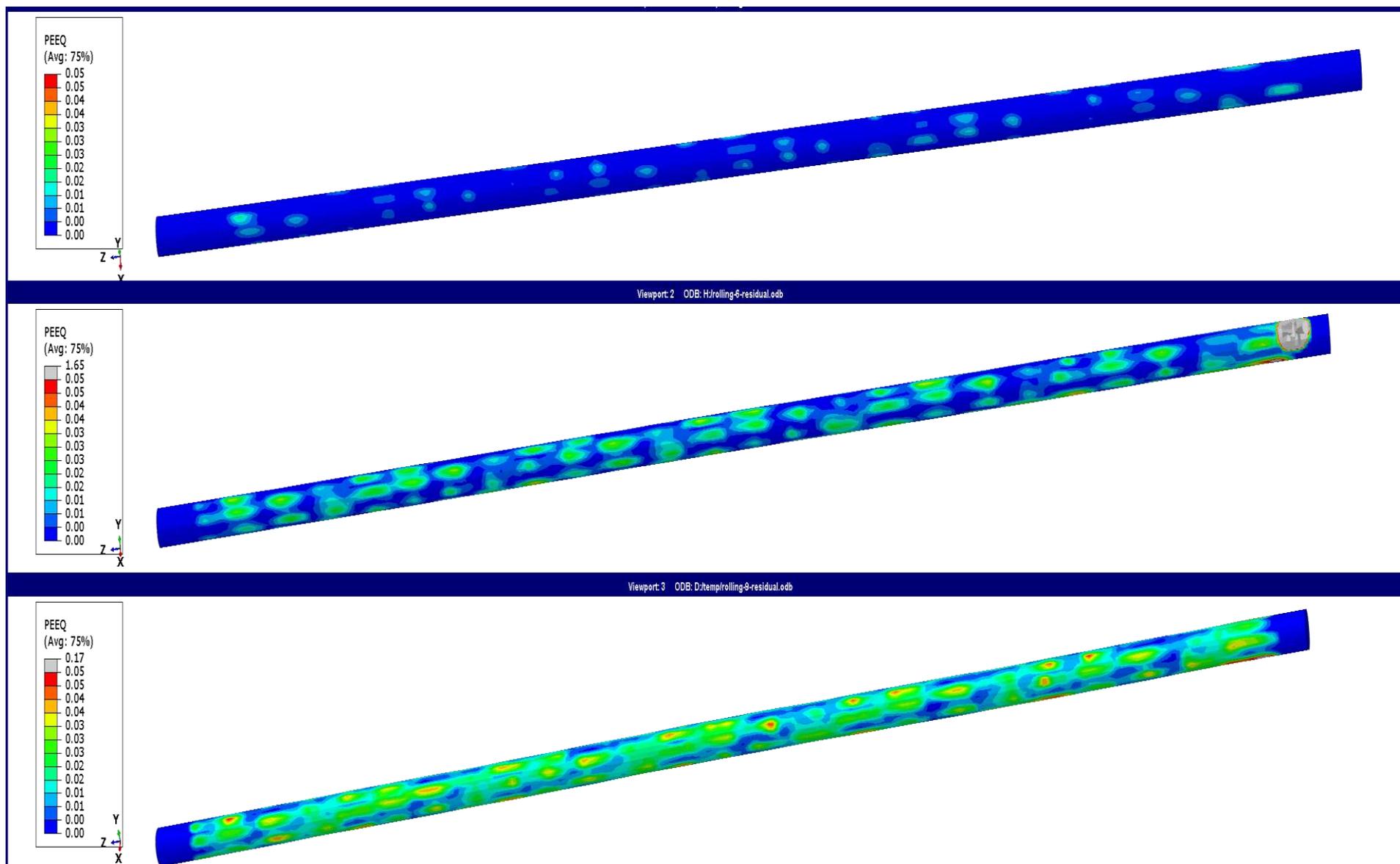


Рисунок 4.12 – Деформация центральной проволоки при увеличении степени калибрующего пластического обжатия каната

На основе разработанных ранее компьютерных моделей процесса калибрующего пластического обжатия арматурного каната было произведено моделирование данного процесса с профилирующими роликами (рисунок 4.13). При этом для корректных и детальных расчетов мелкодетализированного элемента профиля пластически обжатого каната количество элементов сетки повивочной проволоки было принято – 395 289 шт., центральной проволоки – 30 729 шт. Сетка одного прокатного ролика состояла из 161516 элементов.

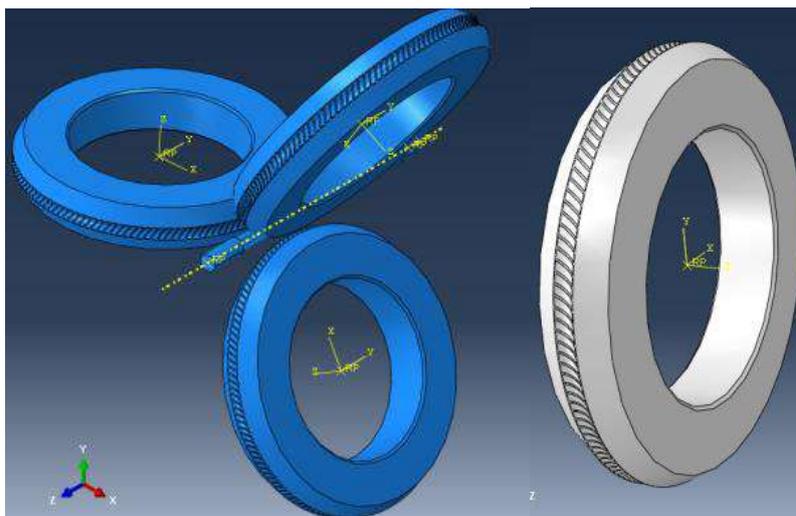


Рисунок 4.13 – Вид компьютерной модели профилированных роликов

Общий вид модели пластически обжатого каната с нанесенным периодическим профилем на выходе из очага деформации представлен на рисунке 4.14. Относительно результатов для гладких роликов НДС каната меняется незначительно и, в основном, только в поверхностных слоях. Нанесение периодического профиля на наружный участок повивочных проволок пряди каната позитивно сказывается на уровне остаточных продольных напряжений, наблюдается снижение их растягивающих значений до 10–15%. Периодический профиль наносится на поверхность канатной пряди равномерно. При этом заполняемость профилеобразующих впадин на роликах является полной.

Стоит отметить тот факт, что нанесение периодического профиля на наружный участок повивочных проволок каната увеличивает не только контактную площадь смежных проволок каната, но и площадь внешней контактной поверхности, что потенциально улучшает эксплуатационные характеристики готового изделия [149, 150].

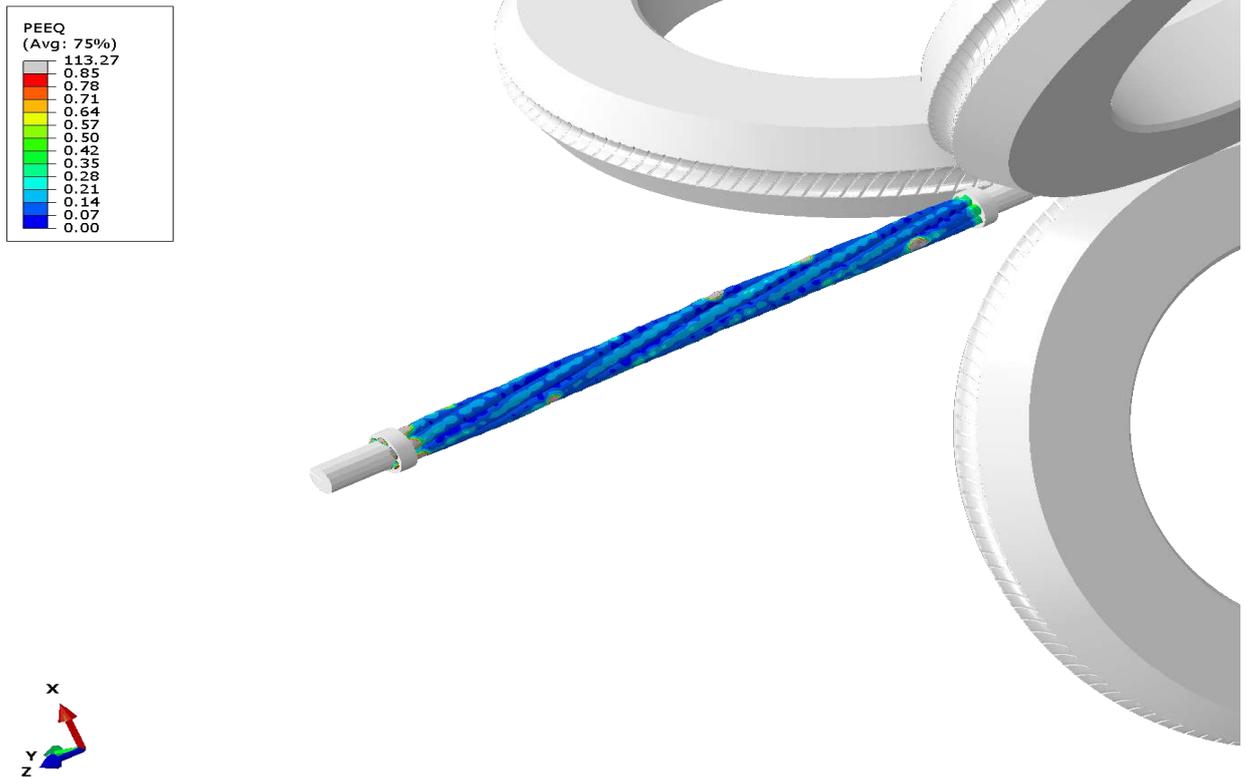


Рисунок 4.14 – Распределение эквивалентных деформации на поверхности каната после процесса калибрующего пластического обжатия с нанесением профиля

Исходя из результатов моделирования, можно сделать вывод, что рациональным режимом калибрующего пластического обжатия каната является режим со степенью деформации 6%, поскольку при этом полностью нивелируется вся негативная технологическая наследственность (в отношении остаточных продольных и свивочных напряжений). Для арматурного каната исследуемой конструкции диаметром 12,5 мм данный способ обработки позволяет не применять энергозатратный нагрев с натяжением в процессе стабилизации. Также данный режим является рациональным не только с позиции изменения НДС каната, но и с позиции адаптации усовершенствованного процесса изготовления пластически обжатых арматурных канатов с периодическим профилем в промышленных условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ», поскольку не способствует усложнению технологии за счет проведения обжатия и профилирования непосредственно на этапе свивки на канатовьющей машине.

4.2 Апробация предложенных рекомендаций по совершенствованию технологического процесса производства арматурных канатов

С целью апробации предложенного рационального режима калибрующего пластического обжатия для получения арматурного каната диаметром 12,5 мм в промышленных условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» был выполнен эксперимент, направленный на получение и исследовательские испытания экспериментальных образцов пластически обжатых арматурных канатов с периодическим профилем.

В соответствии с условиями эксперимента по изготовлению опытных образцов пластически обжатых арматурных канатов с периодическим профилем диаметром 12,5 мм изготовлены центральная и повивочные проволоки диаметром 4,3 мм. В качестве сырья для изготовления проволоки использовали горячекатаную заготовку из стали марки 80 диаметром 12,0 мм. Многократный процесс волочения проволоки осуществлялся по действующим режимам.

Центральная и повивочные проволоки, предназначенные для изготовления пластически обжатых арматурных канатов с периодическим профилем, поставлялись на катушках и клещевым захватом устанавливались в независимый размотчик крутильной машины бугельного типа. Проволока в роторе подавалась по бугелям с помощью направляющих роликов до конуса свивки. При свивке каната все проволоки были равномерно натянуты за счет натяжения, регулируемого тормозами. Замер диаметра каната и шага свивки проводили после выхода каната со второй пары кабестанов. Формирование каната происходило в плашках на выходе из крутильной машины. Диаметр канала плашек соответствовал номинальному диаметру каната – 12,9 мм. Канат по всей длине имел равномерный шаг свивки – 200 мм.

После свивки на наружный участок повивочных проволок каната нанесли периодический профиль путем холодной деформации свитого каната в закрытом круглом роликовом калибре. Одновременно с нанесением периодического профиля на поверхность каната в указанном калибре осуществили пластическое обжатие каната со степенью деформации 6%. Для изготовления использовали роликовую клетку CLF 240 (рисунок 4.15).



Рисунок 4.15 – Роликовая клеть CLF 240

Для полученных промышленных образцов были проведены исследования микроструктуры, анализ геометрии профиля и пятен контакта проволок, а также исследования механических свойств. Особого внимания заслуживают результаты исследования геометрии и микроструктуры пластически обжатого арматурного каната с периодическим профилем. Общий вид поперечного сечения образцов представлен на рисунке 4.16, где зеленым цветом обозначен силуэт исходного поперечного сечения. Калибрующее пластическое обжатие позволяет получить уплотненную структуру конструкции каната, внешнюю поверхность с развитым рельефом на наружном участке повивочных проволок каната, что обеспечивает повышение эксплуатационных свойств каната и повышенное сцепление конструкции с бетоном.

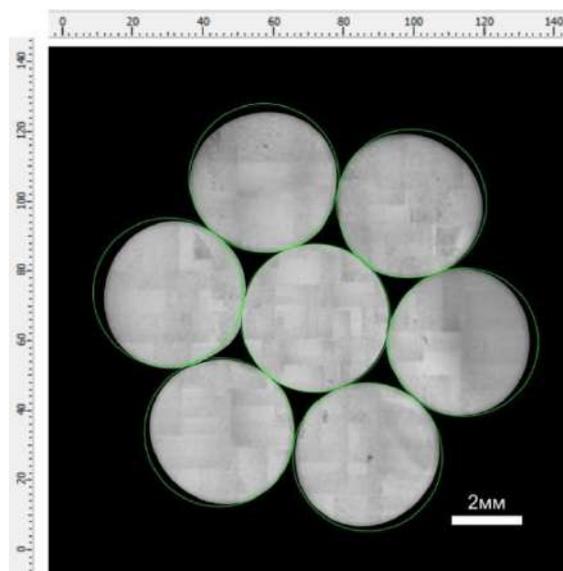


Рисунок 4.16 – Панорамное изображение экспериментального образца пластически обжатого арматурного каната

В поперечном сечении центральная проволока образца арматурного каната диаметром 4,3 мм имеет 6 площадок контакта с повивочными проволоками диаметром 4,3 мм, что выражается искажением округлой формы проволок и образованием плоских площадок контакта.

Для исследования геометрии нанесенного на повивочную проволоку профиля использовался оптический микроскоп Meiji Techno с применением специальных модулей и инструментов системы компьютерного анализа изображений Thixomet PRO. Шаг вмятин c , длина вмятин l , глубина вмятин h измерялись с использованием модуля «Линейный размер», для измерения угла наклона боковой грани ребра к продольной оси проволоки α использовали модуль «Измерение угла» [144]. Схема замеров геометрических параметров представлена на рисунке 4.17.

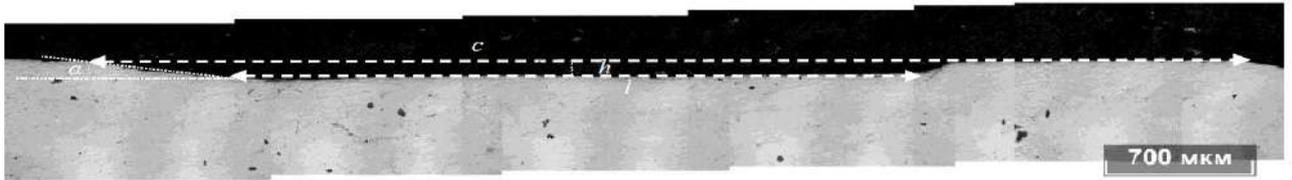
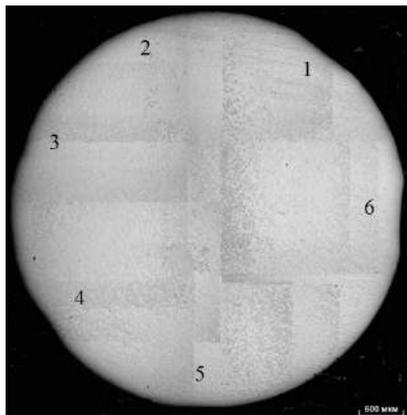
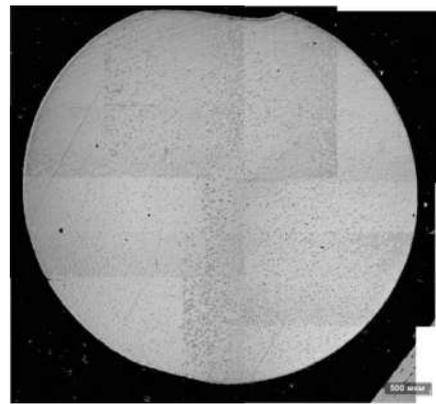


Рисунок 4.17 – Схема замеров геометрических параметров профиля

Общий вид профиля повивочной проволоки в поперечном сечении представлен на рисунке 4.18 и в продольном сечении на рисунке 4.19, а.



а

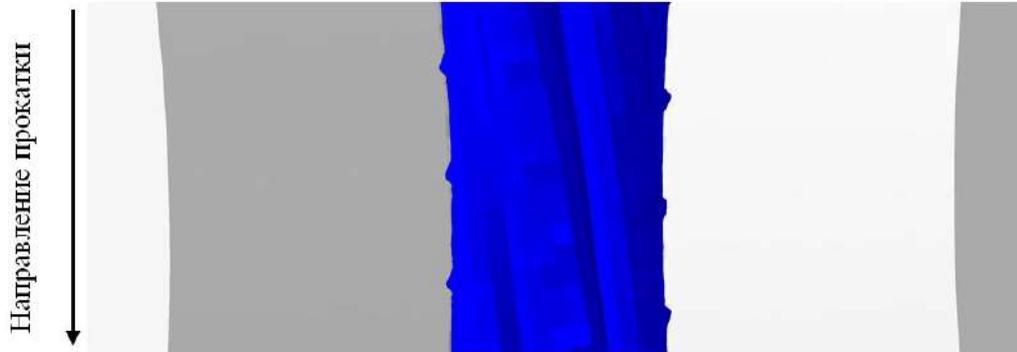


б

Рисунок 4.18 – Панорамное изображение поперечного сечения центральной (а) и повивочной проволок (б) экспериментального образца пластически обжатого арматурного каната с периодическим профилем



а



б

Рисунок 4.19 –Профиль продольного сечения повивочной проволоки (а) и модель результирующего профиля (б)

Результаты замеров геометрических параметров профиля приведены в таблице 4.1. В результате сравнения компьютерной модели результирующего профиля и замеров параметров профиля экспериментальных образцов проволоки пластически обжатого каната установлена сходимость данных с точностью до 95%.

Таблица 4.1 – Геометрические параметры профиля повивочной проволоки

Замеры	Шаг вмятин c , мм	Длина вмятин l , мм	Глубина вмятин h , мм	Угол наклона боковой грани ребра к продольной оси проволоки α , град
1	6,023	3,981	0,066	19,29
2	6,016	4,116	0,067	19,29
3	6,016	4,178	0,057	19,29

Определение микроструктуры экспериментальных образцов пластически обжатых арматурных канатов с периодическим профилем выполнялось в соответствии с [136]. Для проведения исследования были подготовлены шлифы экспериментальных образцов с использованием комплекта специального оборудования: станок отрезной, прецизионный отрезной станок, запрессовочный пресс, шлифовально-полировальный станок. Анализ проводился не менее чем на трех экспериментальных образцах

центральных и повивочных проволок. Исследование микроструктуры экспериментальных образцов осуществлялось на оборудовании, подробно описанном в работе [144]. На каждом этапе испытаний анализировалось по 7-16 изображений, а объем выборки составлял от 600 до 1000 единиц. Относительная погрешность выполненных измерений не превышает 5%.

Микроструктура поверхности в поперечном сечении центральной и повивочной проволок в зоне площадки контакта и вне ее представляет собой ферритокарбидную смесь (рисунок 4.20, а, в и 4.21, а, в), колонии которой отчетливо наблюдаются при больших увеличениях (рисунок 4.20, б, г и 4.21 б, г). При этом характер микроструктуры как в области боковой грани ребра, так и в области вмятины и выступа идентичен (рисунок 4.22). Это свидетельствует о том, что в процессе одновременного обжатия и нанесения периодического профиля дополнительного измельчения структурных составляющих не происходит.

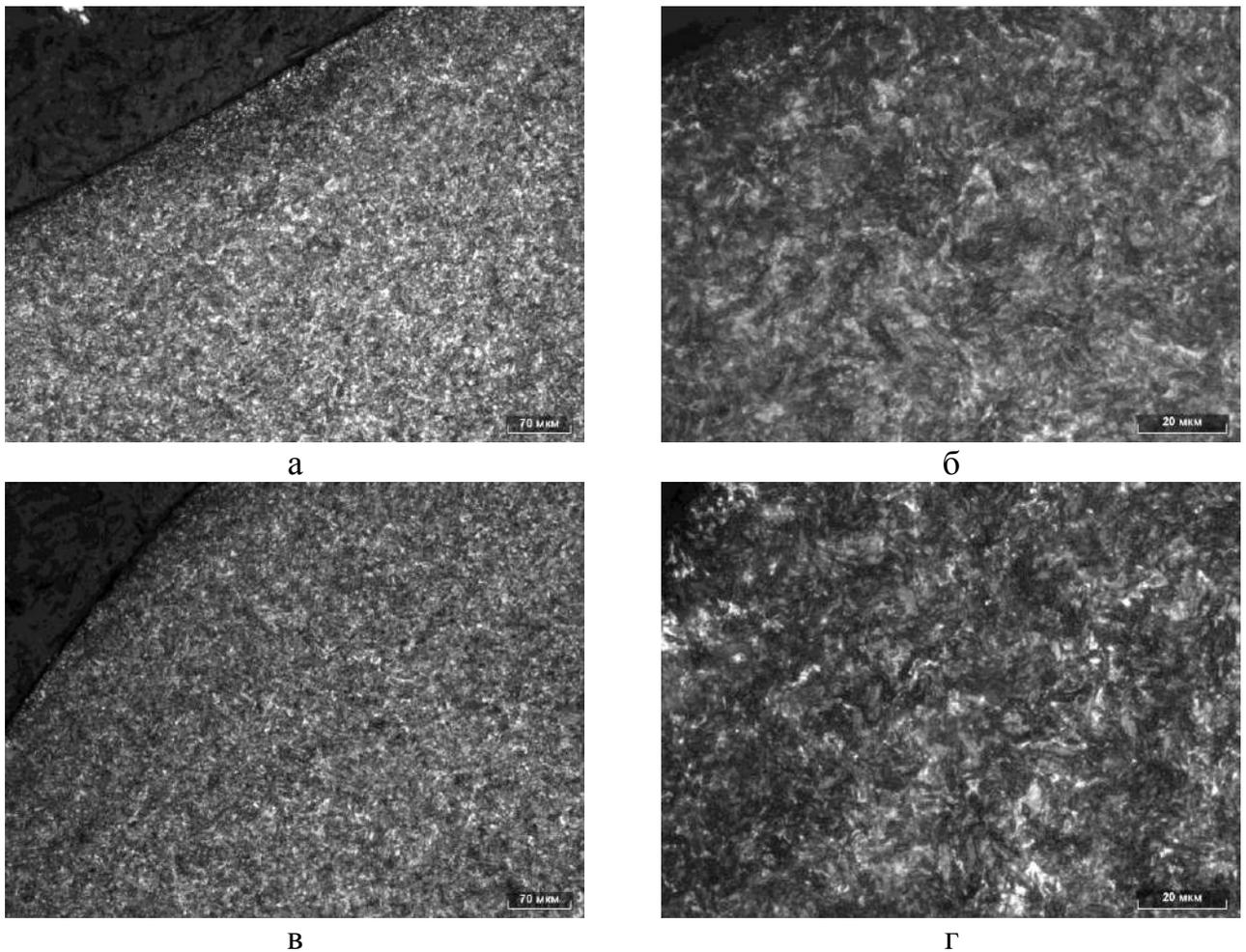
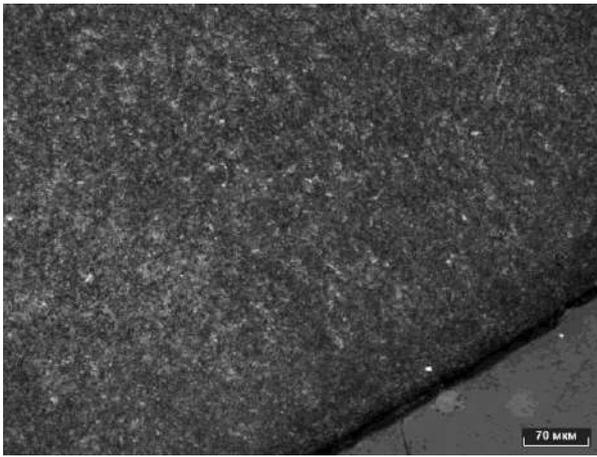
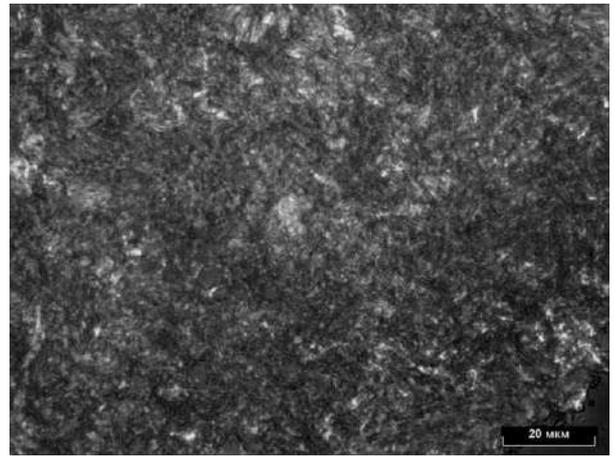


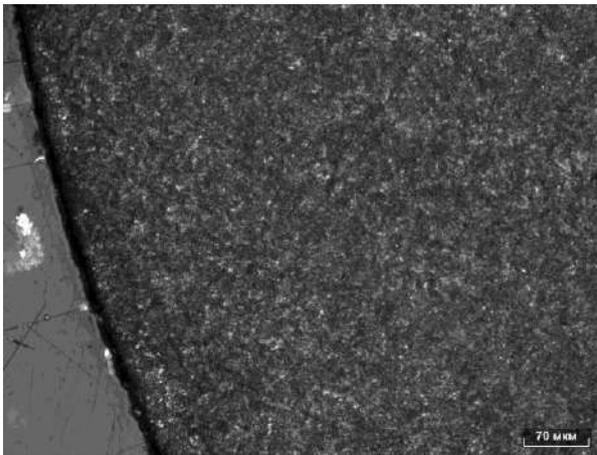
Рисунок 4.20 – Микроструктура на поверхности поперечного сечения центральной проволоки на площадке контакта (а, б) и вне ее (в, г), а, в – $\times 200$; б, г – $\times 1000$



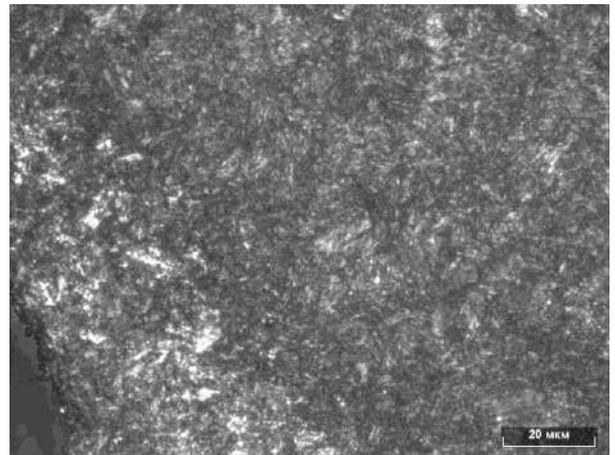
а



б



в



г

Рисунок 4.21 – Микроструктура на поверхности поперечного сечения повивочной проволоки на площадке контакта (а, б) и вне ее (в, г), а, в – $\times 200$; б, г – $\times 1000$

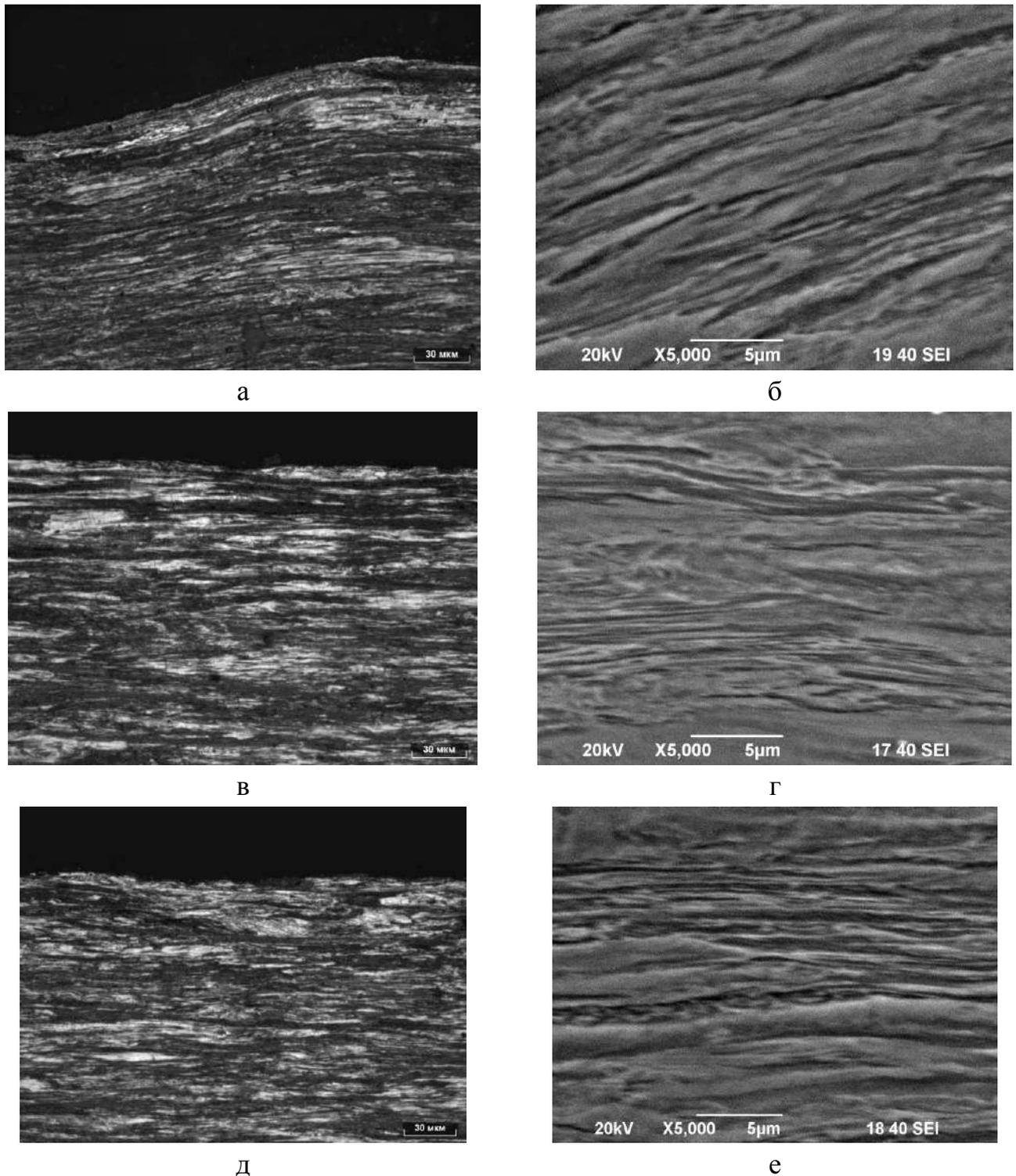


Рисунок 4.22 – Микроструктура на поверхности продольного сечения повивочной проволоки в области боковой грани ребра (а, б), выступа (в, г) и вмятины (д, е)

Микроструктура в центральных областях проволок также представляет собой ферритокарбидную смесь. Электронно-микроскопическое исследование показало, что цементитные пластины как в центральной проволоке, так и в повивочных деформированы (рисунок 4.23, а, в) и частично разрушены (рисунок 4.23, в, г).

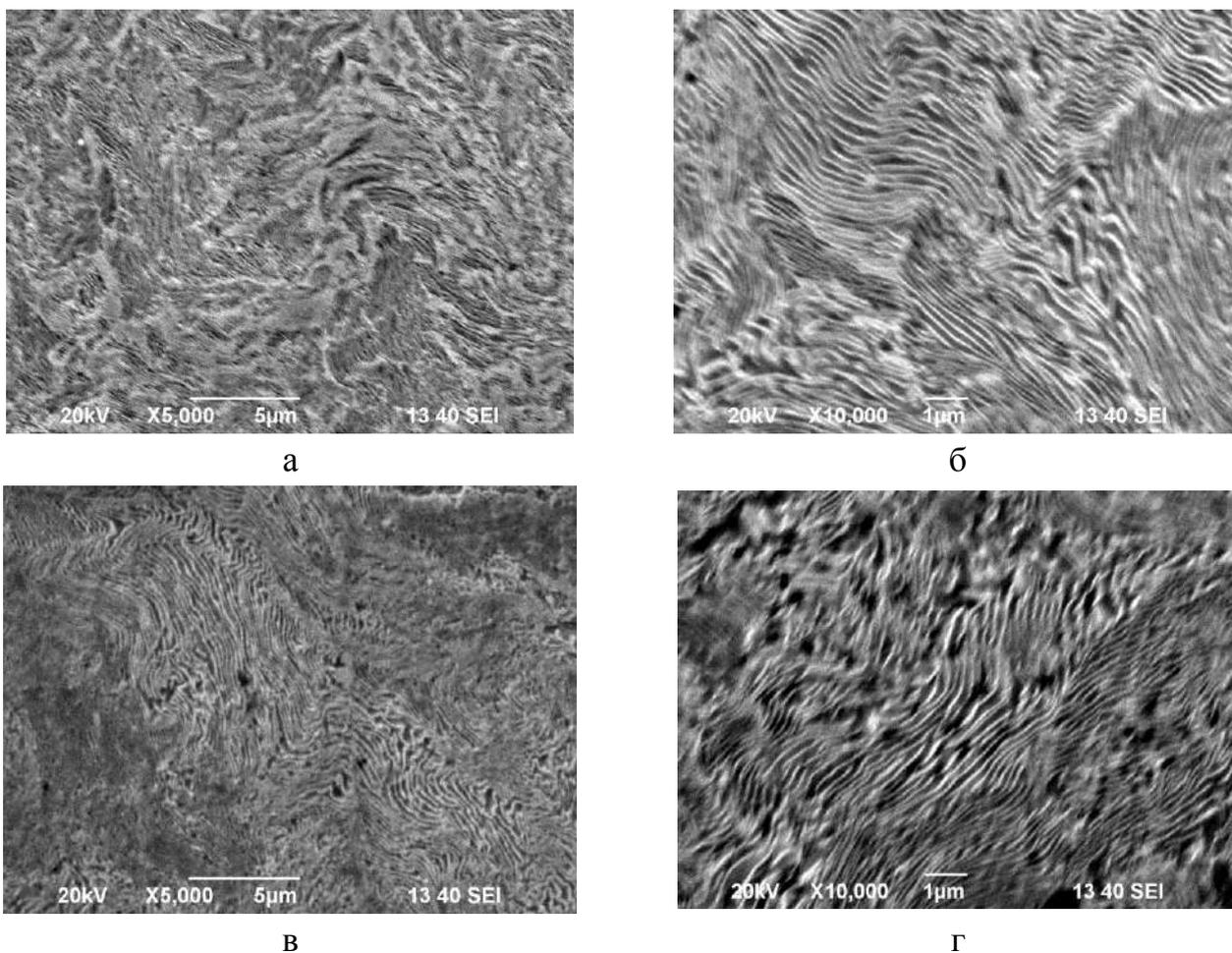


Рисунок 4.23 – Строение перлитных колоний в центральных слоях поперечного сечения центральной (а, б) и повивочной проволоки (в, г) образцов

Таким образом, в ходе исследования особенностей микроструктуры установлено, что, несмотря на введение дополнительной технологической операции пластического обжатия свитого каната с одновременным нанесением периодического профиля, сохраняется сформированная в ходе предшествующих технологических операций мелкодисперсная ферритно-перлитная смесь в микроструктуре стали. И поскольку характер микроструктуры как в области боковой грани ребра, так и в области вмятины и выступа идентичен, это свидетельствует о том, что в процессе одновременного обжатия и нанесения периодического профиля дополнительного измельчения структурных составляющих не происходит.

Исследование механических свойств (временного сопротивления и полного относительного удлинения при максимальной нагрузке) проводилось в ходе испытаний на растяжение по ГОСТ 12004-81 на электромеханической испытательной машине LFM-400 Walter+Bai AG (Швейцария). При испытаниях использовали штангенциркули в

соответствии с требованиями ГОСТ 166-89 и микрометры в соответствии с требованиями ГОСТ 6507-90. Исследования проводились не менее чем на трех экспериментальных образцах в агрегатном состоянии, а также отдельно на образцах центральных и повивочных проволок. Результаты исследования механических свойств экспериментальных образцов пластически обжатых канатов представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты механических испытаний пластически обжатых канатов

Исследуемый объект	Временное сопротивление разрыву σ_b , Н/мм ²	Полное относительное удлинение при максимальной нагрузке δ_{max} , %
Канат	1928	4,4
	1920	4,4
	1925	4,5
Центральная проволока	1840	4,5
	1815	4,4
	1895	4,4
Повивочная проволока	1890	4,6
	1858	4,6
	1870	4,7

Результаты исследования механических свойств показали достижение требуемых значений временного сопротивления (не менее 1860 Н/мм²) и полного относительного удлинения при максимальной нагрузке (не менее 3,5%), что соответствует ГОСТ Р 53772-2010 для пластически обжатого каната из круглой гладкой проволоки (тип К70).

Для определения уровня сцепления с бетоном (относительной площади смятия поперечных ребер) экспериментальных образцов пластически обжатых арматурных канатов с периодическим профилем замеры выполнялись по СТО АСЧМ 7-93 «Прокат периодического профиля из арматурной стали. Технические условия». Относительную площадь смятия поперечных ребер вычисляли по формуле

$$f_R = \frac{K \cdot F_R \cdot \sin \alpha}{\pi \cdot d_n \cdot t}, \quad (4.3)$$

где F_R – площадь боковой поверхности одного поперечного ребра, мм²; α – угол наклона поперечного ребра к оси стержня, град.; d_n – номинальный диаметр стержня,

мм; t – расстояние между поперечными ребрами, мм; K – число поперечных ребер по окружности.

Результаты расчетов значений относительной площади смятия поперечных ребер показали значение f_R равным 0,0105. Сравнительный анализ значений $f_R = 0,0038$ для стандартной конструкции каната с периодическим профилем К7Т и $f_R = 0,0105$ для исследуемых экспериментальных образцов пластически обжатого арматурного каната с периодическим профилем показал, что относительная площадь смятия поперечных ребер экспериментальных образцов в 2,8 раз превышает аналогичные значения, полученные по традиционной технологии. Это обеспечивает более высокое механическое сцепление армирующих элементов с бетоном в направлении свививания. Повышение сцепления каната с бетоном позволяет повысить шаг свивки каната, что, в свою очередь, способно обеспечить:

- повышение производительности процесса изготовления каната;
- уменьшение металлоемкости погонного метра каната, а также снижение свивочных напряжений и, как следствие, повышение агрегатного разрывного усилия.

Выводы по главе 4

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». Предложенный рациональный режим прокатки со степенью деформации 6% позволяет устранить свивочные напряжения (т.е. сохранить геометрию каната) и достичь уровня остаточных напряжений, соизмеримых со значениями напряжений стабилизированного арматурного каната. Данный факт может быть использован для производства пластически обжатых канатов согласно ГОСТ Р 53772-2010, но без использования высокотемпературного нагрева и натяжения при стабилизации, достигая при этом эксплуатационных характеристик стабилизированного арматурного каната.

Кроме того, внедрение операции калибрующего пластического обжатия со степенью деформации 3% при котором остаточные напряжения перераспределяются в сторону увеличения зоны действия сжимающих напряжений позволяет совместить его с

последующей операцией стабилизации по «пограничным» режимам (температура 380°C и натяжение 70 кН) и это также позволит производить стабилизированный пластически обжатый канат диаметром 12,5 мм. Данный факт способствует ресурсосбережению и расширению сортамента конкурентоспособной продукции, выпускаемой ОАО «ММК-МЕТИЗ».

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

- сохранение сформированной в ходе предшествующих технологических операций мелкодисперсной ферритно-перлитной смеси в микроструктуре стали;
- достижение требуемого уровня механических свойств (временное сопротивление, полное относительное удлинение при максимальной нагрузке);
- 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). Это позволит увеличить шаг свивки, что, в свою очередь, обеспечит производительность изготовления каната до 3%.

Результаты исследований подтвердили целесообразность и перспективность дальнейшего развития усовершенствованной технологии изготовления высокопрочных арматурных канатов с периодическим профилем, которая в сравнении с действующей технологической схемой производства высокопрочных стабилизированных арматурных канатов позволяет дополнительно повысить эксплуатационные свойства изделий и упростить технологический процесс производства за счет исключения операций профилирования каждой из шести повивочных проволок каната и необходимости включения операции стабилизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований по вопросу совершенствования действующей в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» технологии производства высокопрочных стабилизированных арматурных канатов диаметром 12,5 мм конструкции 1×7 (1+6) из стали марки 80 было установлено следующее:

1. Обоснована необходимость не просто учета остаточных напряжений, возникающих в длинномерных изделиях при многооперационных процессах обработки, но и их «наследование» от операции к операции в процессе производства арматурных канатов, поскольку параметры обработки каната на последующих этапах (операции стабилизации, например) напрямую зависят от уровня остаточных напряжений, полученных на этапе волочения проволоки. Так, например, на последних этапах волочения при достижении степени деформации выше 82% наблюдается снижение сжимающих остаточных напряжений в проволоке с 1200 до 450 МПа, соответственно, параметры дальнейших операций обработки могут оперативно варьироваться.

2. Разработанный комплекс мультимасштабных компьютерных моделей процесса волочения патентованной катанки позволил исследовать распределение параметров напряженно-деформированного состояния 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.

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 82 или 70 кН с диапазоном температур 360–380°C позволяет достичь двукратного снижения остаточных напряжений как в центральных, так и в поверхностных слоях проволоки.

3. На основе исследований микроструктуры и свойств промышленных образцов стабилизированных арматурных канатов диаметром 12,5 мм, произведенных по различным температурно-силовым параметрам, а также сопоставления результатов

компьютерного моделирования, учитывающего внутренние напряжения, возникающие в канате при свивке и различных режимах стабилизации, были определены рациональные режимы стабилизации для каната конструкции К7 исследуемого диаметра. С точки зрения влияния на продольные остаточные напряжения в канате реализация стабилизации при натяжении 70 кН при температуре 400°С, а также при максимальном натяжении 82 кН в диапазоне температур 380-400°С наблюдается полное сохранение геометрии каната, а также снижение уровня остаточных напряжений не менее чем в 2 раза.

4. На основе высокой сходимости данных (более 70%), полученных при расчете компьютерных моделей и при исследованиях промышленных образцов, можно сделать вывод о возможности применения разработанных компьютерных моделей в качестве дополнительного инструмента при проектировании сквозных технологий производства длинномерных изделий. Данный комплекс компьютерных моделей позволяет учитывать и микромеханику деформирования стали и пооперационно оценивать уровень внутренних напряжений, возникающих в металле, что позволит проектировщику оперативно управлять параметрами технологии.

5. 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%, который позволяет устранить свивочные напряжения (то есть сохранить геометрию каната) и достичь уровня остаточных напряжений, соизмеримых со значениями напряжений стабилизированного арматурного каната. 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-перлитной смеси в микроструктуре 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.

Данный процесс способствует повышению производительности процесса изготовления каната в среднем на 3%, а также повышению конкурентоспособности продукции, выпускаемой ОАО «ММК-МЕТИЗ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пешков, А.В. Снижение материалоемкости строительного производства: инновационные решения и адекватные механизмы регулирования / А.В. Пешков // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. - №10 (81). – С. 349-355.
2. Российский статистический ежегодник 2020: статистический сборник // Федеральная служба государственной статистики (Росстат). – М., 2020. – 700 с.
3. ГОСТ Р 53772-2010. Канаты стальные арматурные семипроволочные стабилизированные. – М.: Стандартиформ, 2010. – 23 с.
4. Большая советская энциклопедия: в 30 томах // гл. ред. А. М. Прохоров. – 3-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1972. – Том 11. – 720 с.
5. Кривцов, А.И. Направления повышения работоспособности стальных канатов / А.И. Кривцов, В.А. Харитонов // Обработка сплошных и слоистых материалов. – 2018. – № 1 (47). – С. 25-29.
6. Харитонов, В.А. Стальной канат: конструкция, назначение, применение: методические указания / В.А. Харитонов, Т.А. Лаптева. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. – 10 с.
7. Королев, В.Д. Канатное производство: учебное пособие / В.Д. Королев. – М.: Металлургия, 1980. – 256 с.
8. Малиновский, В.А. Стальные канаты: сб. науч. тр. / В.А. Малиновский. – Одесса: АстроПринт, 2001. – Ч.1. – 188 с.
9. ГОСТ 13840-68. Канаты стальные арматурные 1×7. Технические условия. – М.: государственный комитет СССР по стандартам, 1988. – 12 с.
10. ГОСТ 3241-91. Канаты стальные. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 29 с.
11. DIN 3051-4-72. Steel Wire Ropes - characteristics, technical conditions of delivery. – 1972. – 8 p.
12. BS 302-1-87. Part 1: Stranded steel wire ropes. Specification for general requirements. – British Standards Institution, 1987. – 14 p.

13. RR-W-410F. Federal Specification: wire rope and strand. – General Services Administration, 1984. – 133 p.
14. JSA-JIS G 3525. Wire ropes. – Japanese Standards Association, 2013. – 63 p.
15. ГОСТ EN 12385-1-2015. Стальные проволочные канаты. Общие требования. – Минск: Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2015. – 25 с.
16. prEN 10138-3. Prestressing steels. Part 3: Strand. – European standard, 2006. – 14 p.
17. Мельников, Н. П. Металлические конструкции. Современное состояние и перспективы развития: монография / Н. П. Мельников. – М.: Стройиздат, 1983. – 541 с.
18. Беленя, Е. И. Предварительно напряженные металлические несущие конструкции: монография / Е. И. Беленя. – М.: Госстройиздат, 1963. – 324 с.
19. Гулин, А.Е. Разработка процесса изготовления углеродистой проволоки с повышенными механическими свойствами методом комбинированной пластической деформации: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / А.Е. Гулин. – Магнитогорск, 2014. – 161 с.
20. Проектирование железобетонных конструкций: справочное пособие / А.Б. Голышев, В.Я. Бачинский, А.В. Харченко, И.В. Руденко; под ред. А.Б. Голышева. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Будивэльнык, 1990. – 544 с.
21. Байков, В.Н. Железобетонные конструкции: общий курс: учебник для вузов / В.Н. Байков, Э.Е. Сигалов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1991. – 767 с.
22. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003. – М.: Минстрой России, 2018. – 150 с.
23. Сергеев, Т.А. Исследование эффективности механотермической обработки стальных канатов / Т.А. Сергеев, Е.К. Морозовский, Я.Д. Скороход // Стальные канаты. – М.: Техника, 1973. – Выпуск 10. – С. 294-297.
24. Егоров, В.Д. Технология производства арматурных канатов в стабилизированном исполнении / В.Д. Егоров, В.С. Воронина // Сталь. – 1983. – № 3. – С. 65-66.

25. Егоров, В.Д. Стабилизация арматурных канатов – резерв повышения эффективности технологии производства и качества продукции / В.Д. Егоров, В.С. Воронина, Е.М. Киреев // Эффективные технологические процессы метизного производства: тематический отраслевой сборник. – М.: Metallurgia, 1984. – С. 33-38.
26. Житков, Д.Г., Стальные канаты для подъемно-транспортных машин / Д.Г. Житков, И.Т. Поспехов. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 255 с.
27. Павлов, А.М. Влияние механических свойств канатной проволоки на работоспособность канатов / А.М. Павлов, Р.Г. Трифонова // Труды НИИМетиза. – М.: Metallurgia, 1968. – Сборник № 2. – С. 63–68.
28. Гуменюк, В.С. Релаксация напряжений высокопрочной проволочной арматуры при нормальной и повышенной температурах / В.С. Гуменюк, К.В. Михайлов // Совершенствование арматуры железобетонных конструкций. – М.: НИМБ Госстроя СССР, 1979. – С. 20-28.
29. Киреев, Е.М. Совершенствование производства высокопрочной арматурной проволоки с целью повышения ее релаксационной стойкости: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Е.М. Киреев. – Магнитогорск, 1984. – 217 с.
30. Гончаренко, Н.К. Некоторые вопросы повышения долговечности стальных канатов / Н.К. Гончаренко, В.В. Лебедев. – Севастопольский приборостроительный институт, 1987. – 10 с. – Деп. в УкрНИИНТИ 17.04.87, № 1251.
31. Dieter, G.E. Handbook of workability and process design / G.E. Dieter, H.A. Kuhn, L. Semiatin // ASM International. – 2003 – 414 p.
32. Лозовая, А.В. Исследования и основные направления повышения работоспособности канатов / А.В. Лозовая, В.А. Малиновский // Стальные канаты: сборник научных трудов. – Одесса, 2008. – С. 154-155.
33. Caballero, L., Thermo-mechanical treatment effects on stress relaxation and hydrogen embrittlement of cold-drawn eutectoid steels / L. Caballero, J. M. Atienza, M. Elices // Metals and materials international. – 2011. – Vol. 17. – № 6. – Pp. 899-910.
34. Температурные условия и режимы формирования остаточных напряжений при волочении проволоки / Г.Л. Колмогоров, Н.А. Кошелева, Е.В. Кузнецова, Т.В. Чернова // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2011. – № 3. – С. 23-26.

35. Бреславцева, И.В. Напряженно-деформированное состояние проволок каната при свивке и метод расчета параметров преформаторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05 / И.В. Бреславцева. – Новочеркасск, 2007. – 248 с.
36. Туленков, Ф.К. Об изменении напряженного состояния проволоки в процессе ее рихтовки на промежуточных этапах волочения / Ф.К. Туленков // Стальные канаты. – Киев: Техника, 1965. – Выпуск 2. – С. 364–366.
37. Ветров, А.П. Рихтовка канатов и метод расчета параметров рихтовального устройства / А.П. Ветров, Г.М. Фомин // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Киев: Техника, 1968. – Выпуск 5. – С. 170-174.
38. Ветров, А.П. Проверка работоспособности канатов, рихтованных на вращающемся рихтователе / А.П. Ветров, Г.М. Фомин // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Киев: Техника, 1969. – Выпуск 6. – С. 152-154.
39. Чаругин, В.Н. Рихтовка каната двойной свивки / В.Н. Чаругин // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Киев: Техника, 1969. – Выпуск 6. – С. 149-152.
40. Сергеев, С.Т. Исследование эффективности рихтовки спиральных канатов / С.Т. Сергеев // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Киев: Техника, 1972. – Выпуск 9. – С. 139-143.
41. Харитонов, В.А. Расчет параметров преформации на основе моделирования в программном комплексе DEFORM 3D / В.А. Харитонов, Э.Р. Ямтеева // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2013. – № 10. – С. 47–48.
42. Адамчук, С.В. Ресурсосберегающая технология производства арматурных канатов для предварительно-напряженных железобетонных конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / С.В. Адамчук. – Магнитогорск, 2002. – 165 с.
43. Адамчук, С.В. Исследование технологии производства стабилизированных арматурных канатов / С.В. Адамчук, Е.А. Пудов, В.П. Манин // Труды третьего конгресса прокатчиков. – М.: Черметинформация, 2000. – С. 506–507.
44. Разработка технологии производства стабилизированных арматурных канатов / И.Г. Шубин, В.П. Манин, С.В. Адамчук и др. // Производство конкурентоспособных метизов: сб. науч. тр.; под ред. канд. техн. наук А.Д. Носова. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – Выпуск 1. – С. 147–153.

45. Лаптева, Т.А. Повышение работоспособности подвижных канатов на основе применения калибрующего обжатия прядей: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Т.А. Лаптева. – Магнитогорск, 2014. – 142 с.
46. Харитонов, В.А. Применение калибрующего пластического обжатия при производстве стальных канатов: монография / В.А. Харитонов, А.Б. Иванцов, Т.А. Лаптева. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2016. – 102 с.
47. Ставничук, П.А. Разработка энергосберегающей технологии производства пластически деформированных арматурных канатов прокаткой: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / П.А. Ставничук. – Магнитогорск, 2003. – 20 с.
48. Скалацкий, В.К. Интенсивная силовая обработка в производстве круглопрядных стальных канатов / В.К. Скалацкий // Черная металлургия. – 1962. – №3. – С. 1-23.
49. Глушко, М.Ф. Эволюция и перспективы развития технологии производства стальных канатов / М.Ф. Глушко, В.К. Скалацкий, И.А. Шилин // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Киев: Техника, 1968. – Выпуск 5. – С. 94-101.
50. Вагелюк, В.И. Опыт эксплуатации канатов из круглых обжатых прядей / В.И. Вагелюк, В.К. Скалацкий // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Киев: Техника, 1969. – Выпуск 6. – С. 210-212.
51. Разработка и освоение новых видов силовой обработки при производстве стальных канатов / М.Ф. Глушко, В.К. Скалацкий и др. // Повышение эффективности и качества метизных изделий: сб. науч. тр. – М.: Металлургия, 1981. – С. 37-41.
52. Малиновский, В.А. Продольная жесткость обжатых прядей / В.А. Малиновский, Ю.В. Кобяков // Повышение эффективности и качества метизных изделий. – М.: Металлургия, 1981. – С. 41-43.
53. Скалацкий, В.К. Канаты из обжатых прядей / В.К. Скалацкий // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Киев: Техника, 1964. – Выпуск 1. – С. 152-158.
54. Скалацкий, В.К. Круглые обжатые пряди и особенности их изготовления / В.К. Скалацкий // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Киев: Техника, 1965. – Выпуск 2. – С. 245-253.

55. Скалацкий, В.К. Геометрия деформации проволок при круговом обжати прядей / В.К. Скалацкий // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Киев: Техника, 1965. – Выпуск 2. – С. 254-260 .
56. Скалацкий, В.К. Исследование режимов обжата предварительно свитых стальных прядей / В.К. Скалацкий // Стальные канаты: сб. науч. трудов. – Киев: Техника, 1967. – Выпуск 4. – С. 205-210.
57. Скалацкий, В.К. Повышение технического ресурса канатов из пластически обжатых прядей / В.К. Скалацкий, В.Г. Емельянов // Стальные канаты: сб. науч. тр. Выпуск 9. – Киев: Техника, 1972. – С. 171-179
58. Скалацкий, В.К. Экспериментальные исследования силовых режимов кругового радиального обжата прядей / В.К. Скалацкий, Б.Е. Шкарупин // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Киев: Техника, 1966. – Выпуск 3.– С. 201-205.
59. Pat. 534433 GB, D07B 3/04. Improvements in the method of and apparatus for manufacture of rope / David John Yake. Published 29.07.1953.
60. Pat. 4222935 DE, D07B 5/00. Verfahren und vorrichtung zur herstellung mehradriger seilschlaufen / Tomaszewski Gerhard. Published 13.01.1994.
61. Pat. 1999093089 JP, D07B 1/06. High-tensile wire rope and its production / Yoshida Shigeru. Published 06.04.1999.
62. Пат. 2223354 РФ, D07B 1/06. Способ изготовления проволочного каната / Б.А. Никифоров, В.А. Харитонов, П.А. Ставничук; опубл. 10.02.2004.
63. Pat. 2935690 DE, D07B 3/00. Drahtseil sowie verfahren und vorrichtung zur herstellung des drahtseils / Lauer Bruno. Published 28.10.2015.
64. Pat. 105908547 CN, D07B 3/00. Production device for compacted strand steel wire rope and production method of production device / Zhang Dongmei. Published 31.08.2016.
65. Малиновский, В.А. Канаты типа ПК – опыт изготовления и эксплуатации / В.А. Малиновский, Л.Д. Соломкин // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Одесса: АстроПринт, 2001. – Выпуск 2. – С. 225-230.
66. Соломкин, Л.Д. Исследование процесса пластического обжата прядей в сборной волоке / Л.Д. Соломкин, А.Н. Черенков // Прочность и долговечность стальных канатов: сб. науч. тр. – Киев: Техника, 1975. – С. 161-164.

67. Чукмасов, С.Ф. Силовая калибровка канатов / С.Ф. Чукмасов, А.В. Тушин // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Киев: Техника, 1966. – Выпуск 3. – С. 242-244.
68. Глушко, М.Ф. Волочение прядей во вращающихся волокнах / М.Ф. Глушко, О.Т. Озернюк, В.И. Савков // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Киев: Техника, 1971. – Выпуск 8. – С. 37-45.
69. Озернюк, О.Т. Вращающаяся волокна с фасонным профилем рабочего канала / О.Т. Озернюк // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Киев: Техника, 1973. – Выпуск 10. – С. 120-122.
70. Озернюк, О.Т. Вращательное волочение многослойных прядей непосредственно в процессе их свивки / О.Т. Озернюк // Стальные канаты: сб. науч. трудов. – Киев: Техника, 1972. – Выпуск 9. – С. 179-182.
71. Пластическое обжатие прядей в четырехвалковых калибрах / Б.А. Никифоров, М.Г. Поляков и др. // Стальные канаты: сб. науч. трудов. – Киев: Техника, 1971. – Выпуск 8. – С. 75-80.
72. Экспериментальное исследование энергосиловых параметров прокатки прядей в четырехвалковых калибрах / М.Ф. Глушко, Б.А. Никифоров и др. // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Киев: Техника, 1971. – Выпуск 8. – С. 81-86.
73. Коковихин, Ю.И. Пластическое обжатие проволочных прядей в роликовых волокнах / Ю.И. Коковихин // Бюллетень института «Черметинформация». – 1973. – №8. – С. 43-44.
74. Шилин, И.А. Элементы расчета проката круглых прядей в фасонный профиль / И.А. Шилин, В.П. Балан // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Киев: Техника, 1965. – Выпуск 2. – С. 261-267.
75. Шилин, И.А. Силовые режимы при изготовлении фасоннопрядных канатов методом проката круглых прядей / И.А. Шилин // Теория и практика производства метизов: сб. науч. тр. – Свердловск: Изд-во УПИ им. С.М. Кирова, 1988. – Выпуск 3. — С. 206-212.
76. Глушко, М.Ф. Исследование технологии изготовления трехграннопрядных канатов методом проката круглых прядей / М.Ф. Глушко, И.А. Шилин // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Киев: Техника, 1964. – Выпуск 1. – С. 131-138.

77. Глушко, М.Ф. Поисковые технологические схемы проката круглых прядей в трехгранник при свивке в канат / М.Ф. Глушко, И.А. Шилин // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Киев: Техника, 1965. – Выпуск 2. – С. 239-244.
78. Шилин, И.А. Экспериментальная проверка технологических схем проката прядей / Шилин И.А., Закржевский А.И. // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Киев: Техника, 1967. – Выпуск 4. – С. 202-204.
79. Малиновский, В.А. Обжимное устройство для изготовления фасоннопрядных канатов методом винтовой прокатки / В.А. Малиновский, А.Д. Захрямин // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Одесса: АстроПринт, 1999. – Выпуск 1. – С. 95-99.
80. Коротков, В.Г. Круговое обжатие прядей и канатов путем винтового проката гиперболоидными роликами / В.Г. Коротков, В.М. Вагелюк // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Киев: Техника, 1969. – Выпуск 6. – С. 164-170.
81. Закржевский, А.И. Геометрия роликов для винтового проката прядей в трехгранный профиль / А.И. Закржевский, А.Д. Захрямин // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Киев: Техника, 1971. – Выпуск 8. – С. 89-98.
82. Пат. 2705668 РФ, E04C5/08, D07B1/06. Способ изготовления арматурного каната / В.А. Харитонов, Л.М. Зарецкий, О.П. Ширяев, Д.П. Канаев; опубл. 11.11.2019.
83. Пат. 2371533 РФ, D07B7/02. Устройство для пластического обжатия канатов / А.Д. Носов, Б.А. Никифоров, Е.П. Носков, С.В. Адамчук и др.; опубл. 27.10.2009.
84. Пат. 2431024 РФ, E04C5/03. Арматурный канат и способ его изготовления / Л.М. Зарецкий, В.А. Харитонов; опубл. 10.10.2011.
85. Зарецкий, Л.М. Разработка новых конструкций, способов пластического обжатия арматурных канатов и оборудования для их реализации: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Л.М. Зарецкий. – Магнитогорск, 2007. – 18 с.
86. Haritonov, V.A. Rolling for the production of plastically strained ropes and strands / V.A. Haritonov, L.M. Zaretsky // Eurowire Magazine. – 2004. – №1. – Pp.100-101.
87. Харитонов, В.А. Направления развития производства пластически обжатых канатов / В.А. Харитонов, Л.М. Зарецкий // Моделирование и развитие технологических процессов: сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2004. – С. 98-104.

88. Никифоров, Б.А. Повышение эффективности производства пластически обжатых канатов / Б.А. Никифоров, В.А. Харитонов, Л.М. Зарецкий // Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск, МГТУ, 2005. – С. 57-60.
89. Биргер, И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
90. Красильников, Л.А. Релаксационная стойкость и циклическая прочность холоднотянутой проволоки / Л.А. Красильников, В.Я. Зубов. – М.: Металлургия, 1973. – 264 с.
91. Поздеев, А.А. Остаточные напряжения: теория и приложения / А.А. Поздеев, Ю.И. Няшин, П.В. Трусов. – Наука: Москва, 1982. – 111 с.
92. Колмогоров, В.Л. Разрушение металла от остаточных напряжений после обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров, А.А. Богатов, А.В. Тропотов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1980. – № 12. – С. 45–49.
93. Соколов, И. А. Остаточные напряжения и качество металлопродукции / И. А. Соколов, В. И. Уральский. – М.: Металлургия, 1981. – 96 с.
94. Колмогоров, Г.Л. Формирование остаточных технологических напряжений и прочность анизотропных осесимметричных прутковых металлоизделий / Г.Л. Колмогоров, Е.В. Кузнецова, В.В. Тиунов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2009. – Том 15. – № 3. – С.395-400.
95. Колмогоров, Г.Л. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий: монография / Г.Л. Колмогоров, Е.В. Кузнецова, В.В. Тиунов. – Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2012. – 226 с.
96. Буркин, С.П. Остаточные напряжения в металлопродукции: учебное пособие / С. П. Буркин, Г. В. Шимов, Е. А. Андрюкова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 248 с.
97. Кугультинов, С.Д. Численный анализ влияния условий механической обработки на напряженно-деформированное состояние крупногабаритных тонкостенных деталей сложной формы / С.Д. Кугультинов, А.В. Щенятский, А.С. Жилиев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2018 – Т.16. – № 3. – С. 17-21.

98. Влияние параметров процесса пластической деформации на формирование технологических остаточных напряжений / Е.В. Кузнецова, Г.Л. Колмогоров, В.Н. Трофимов, А.Ю. Вавель // Прикладная математика и вопросы управления. – 2015. – № 1. – С. 26-35.

99. Туленков, К.И. Влияние остаточных напряжений на работоспособность канатов / К.И. Туленков, Б.И. Гайдученко // Сталь. – 1964. – № 3.

100. Харитонов, В.А. Теоретический и экспериментальный анализ напряженного состояния стального каната / В.А. Харитонов, Е.С. Сафонова // Актуальные проблемы современной науки техники и образования: материалы 70-й межрегиональной научно-технической конференции. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2012. – Т. 1. – С. 299-301.

101. Бородина, Е.Н. Управление качеством стальных канатов с применением комплексного показателя действенности технологии волочения и свивки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.23 / Е. Н. Бородина. – Магнитогорск, 2014. – 122 с.

102. Elices, M. Influence of residual stresses in the performance of cold-drawn pearlitic wires / M. Elices // Journal of materials science. – 2004. – Vol. 39. – Pp. 3889 – 3899.

103. Atienza, J.M. Influence of residual stresses in the stress relaxation of cold drawn wires / J. M. Atienza, M. Elices // Materials and Structures (Materiaux et Constructions). – 2004. – Vol. 37. – Pp. 301-304.

104. Nyashin, Y. I. Optimal control of production residual stresses to increase the strength and stability of structures / Y.I. Nyashin, V.Y. Stolbov // International Applied Mechanics. – 1993. – Vol. 29(8). – Pp. 593–601.

105. Колмогоров, Г.Л. Технологические остаточные напряжения после обработки металлов давлением / Г.Л. Колмогоров, Е.В. Кузнецов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. – 2016. – Т. 16. – С. 41-45.

106. Колмогоров, Г.Л. Релаксация остаточных напряжений и точность трубных металлоизделий / Г.Л. Колмогоров, Е.В. Кузнецова, Д.В. Хабарова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2018. – Т. 16. – № 3. – С. 103-108.

107. Веденеев, А.В. Релаксационные явления при изготовлении металлокорда / А.В. Веденеев, В.С. Музыченко // *Сталь*. – 2016. – № 5. – С. 41–46.
108. Козлов, В.Т. К вопросу определения остаточных напряжений после волочения / В.Т. Козлов, В.Д. Высочин // *Стальные канаты*. – Киев: Техника, 1968. – Выпуск 3. – С. 376–380.
109. Ершов, С.В. Точность моделирования процессов обработки металлов давлением методом конечных элементов / С.В. Ершов, М.Н. Штода // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2016. – Т. 59. – № 4. – С. 284–286.
110. Чаюн, И.М. Метод конечных элементов в исследовании деформированного и напряженного состояния канатов / И.М. Чаюн, М.И. Чаюн // *Стальные канаты: сб. науч. тр.* – Одесса: АстроПринит, 2001. – Выпуск 2. – С. 24–34.
111. Residual stress determination in cold drawn steel wire by FEM simulation and X-ray diffraction / S.He, A. Van Bael, S.Y. Li, P. Van Houtte, F. Mei, A. Sarban // *Materials Science and Engineering*, A346. – 2003. – Pp. 101–107.
112. Буркин, С.П. Анализ способов определения и устранения остаточных напряжений в трубных заготовках / С. П. Буркин и др. // *Достижения в теории и практике трубного производства*. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2004. - С. 87–97.
113. Residual stress profiling in the ferrite and cementite phases of cold-drawn steel rods by synchrotron X-ray and neutron diffraction / M.L. Martinez-Perez, F.J. Mompean, J. Ruiz-Hervias, C.R. Borlado, J.M. Atienza, M. Garcia-Hernandez, M. Elices, J. Gil-Sevillano, Ru Lin Peng, T. Buslaps // *Acta Materialia*. – 2004. – № 52. – Pp. 5303–5313.
114. Cold drawn steel wires-processing, residual stresses and ductility – part I: metallography and finite element analyses / A. Phelippeau, S. Pommier, T. Tsakalakos, M. Clavel, C. Prioul // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 2006. – Pp. 243–253.
115. Карманов, В.В. Опыт применения роботизированного комплекса XSTRESS для измерения технологических остаточных напряжений / В.В. Карманов, В.Н. Трофимов, А.С. Нуртдинов, С.Н. Звонов // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2015. – № 1 (49). – С. 55–59.

116. Трофимов, В.Н. Метод калибровки оборудования при измерении остаточных напряжений / В.Н. Трофимов, В.В. Карманов, А.А. Ширяев // Прикладная математика и вопросы управления. – 2016. – № 4. – С. 1269-1276.

117. Способ калибровки приборов для измерения остаточных напряжений методом рентгеновской дифрактометрии / В.Н. Трофимов, В.В. Карманов, А.А. Ширяев, С.Н. Звонов // СТИН. – 2018. – № 10. – С. 37-40.

118. Zheng, W. Experimental research on the mechanical property of prestressing steel wire during and after heating / W. Zheng, Q. Hu, H. Zhang // Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China. – 2007. – №1(2). – Pp. 247–254.

119. Microstructure and texture evolution in fully pearlitic steel during wire drawing / G. Ning, L. Baifeng, W. Bingshu, L. Qing // Science China: Technological Sciences. – 2013. – № 56. – Pp. 1139–1146.

120. Microstructure and mechanical properties of cold-drawn pearlitic wires affect by inherited texture / F. Fang, L. Zhou, X. Hub et al. // Materials and Design. – 2015. – №79. – Pp. 60–67.

121. Мольнар, В.Г. Технологические основы производства стальных канатов / В.Г. Мольнар, Ю.В. Владимиров. – М.: Металлургия, 1975. – 200 с.

122. Казменко, В.Д. Стальной канат. Прочность и ресурс / В.Д. Казменко. – Ленинград: Машиностроение, 1983 – 72 с.

123. Сычков, А.Б. Выбор технологии термомеханической обработки арматурного проката / А.Б. Сычков, С.О. Малашкин // Теория и технология металлургического производства. – 2013. – № 1 (13). – С. 53–54.

124. Совершенствование технологии производства стабилизированных арматурных канатов новой конструкции / И.Г. Шубин, Е.С. Киян, А.С. Каюков, С.В. Адамчук // Материалы 62-й научной конференции по итогам научно-исследовательской работы за 2002-2003 гг. Магнитогорск, 2003. – С. 74-77.

125. Лебедев, В.Н. Повышение результативности технологии производства для обеспечения качества высокопрочной арматуры: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.23 / В.Н. Лебедев. – Магнитогорск, 2011. – 134 с.

126. Семенова, Т.Я. Производство стабилизированных арматурных прядей в пластиковой оболочке: особенности освоения технологии производства / Т.Я. Семенова // Бюллетень «Черная металлургия». – 2015. – №11. – С. 49-52.
127. Емельянов, И.Г. Конечно-элементная модель состояния стального каната / И.Г. Емельянов, Б.Р. Картак, В.Ю. Кузнецов // Сталь. – 2001. – № 10. – С. 50-52.
128. Хромов, В.Г. Компьютерное проектирование технологических процессов изготовления канатов с гарантированными показателями качества / В.Г. Хромов, И.В. Хромов // Стальные канаты: сб. науч. тр. – Одесса: АстроПринит, 2008. – Выпуск 6. – С. 130-138.
129. Воронин, С.В. Компьютерное моделирование реальной структуры металлических материалов при исследовании процессов деформации и разрушения: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / С.В. Воронин. – Самара, 2009. – 163 с.
130. Карамышев, А.П. Моделирование процессов обработки металлов давлением в DEFORM-3D с целью рационального построения технологических процессов / А.П. Карамышев, И.И. Некрасов // Металлург. – 2012. – № 2. – С. 53-54.
131. Бобарикин, Ю.Л. Численное моделирование процесса свивки металлокорда с использованием метода конечных элементов / Ю.Л. Бобарикин, М.Н. Верецагин, С.В. Авсейков // Литье и металл. – 2012. – № 3. – С. 40-44.
132. An automated multi-modal serial sectioning system for characterization of grain-scale microstructures in engineering materials / M. Uchic, M. Groeber, M. Shah, et al. // Materials of 1 International Conference on 3D Materials Science. – 2012. – №1. – Pp. 195–202.
133. Барышников, М.П. Анализ программных комплексов для расчета напряженно-деформируемого состояния композиционных материалов в процессах обработки давлением / М.П. Барышников, М.В. Чукин, А.Б. Бойко // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2012. – № 2. С. 72–74.
134. Groeber, M. Dream 3D: a digital representation environment for the analysis of microstructure in 3D / M. Groeber, M. Jackson // Integrating Materials and Manufacturing Innovation. – 2014. - №3. – Pp. 1-17.

135. Tekkaya, A.E. 60 Excellent Inventions in Metal Forming / A.E. Tekkaya, W. Homberg, A. Brosius . – 2015. – 427 p.
136. ГОСТ 8233-56. Сталь. Эталоны микроструктуры. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1056. – 12 с.
137. Константинов, Д.В. Совершенствование методики мультимасштабного моделирования напряженно-деформированного состояния при волочении калиброванной стали: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Д.В. Константинов. – Магнитогорск, 2015. – 136 с.
138. Константинов, Д.В. Мультимасштабное компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением / Д.В. Константинов, А.Г. Корчунов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2015. – №1. – С. 36-43.
139. Balzani, D. Some basic ideas for the reconstruction of statistically similar microstructures for multiscale simulations / D. Balzani, J. Schroder // Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics. – 2008. – № 8. – Pp. 10533-10534.
140. Корчунов, А.Г. Теоретическое исследование напряженности стального арматурного проката методами компьютерного моделирования / А.Г. Корчунов, Е.М. Медведева, Э.М. Голубчик // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2020. – Т. 76. – № 11. – С. 1139-1148.
141. 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.
142. 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.
143. Исследование макро- и микромеханики деформирования перлитной стали в многостадийных технологиях производства арматурных канатов // Д.В. Константинов, А. Г. Корчунов, М. В. Зайцева, О. П. Ширяев, Д. Г. Емалеева // Сталь. – 2018. – № 7. – С. 44-48.
144. Копцева, Н.В. Деформационное поведение тонкопластинчатого перлита в процессе многократной холодной пластической деформации эвтектоидной стали /

Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, М.В. Чукин // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2019. – № 5. – С. 3-8.

145. Won, J.N. Effect of carbon content on the Hall-Petch parameter in cold drawn pearlitic steel wires / J.N. Won, M.B. Chul, S.L. Chong // *Journal of materials science.* – 2002. - № 37. – Pp. 2243–2249.

146. Ruiz-Hervias, J. Residual stresses in wires: influence of wire length / J. Ruiz-Hervias, J.M. Atienza, M. Elices // *The journal of materials engineering and performance.* – 2003. – № 12. – Pp. 480-489.

147. Atienza, J.M. The role of residual stresses in the performance and durability of prestressing steel wires / J.M. Atienza, J. Ruiz-Hervias, M. Elices // *Experimental Mechanics.* – 2012. - № 52. – Pp. 881–893.

148. 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.

149. Харитонов, В.А. Развитие теории и технологии пластического обжатия витых изделий / В.А. Харитонов, Т.А. Лаптева. – Магнитогорск, 2013. – 47 с. – Деп. в ВИНТИ 14.02.2013, № 6–В2013.

150. Харитонов, В.А. Повышение эффективности производства стальных подвижных канатов применением калибрующего обжатия прядей / В.А. Харитонов, Т.А. Лаптева // *Обработка сплошных и слоистых материалов.* – 2014. – С. 13-19.

УТВЕРЖДАЮ
Начальник управления
перспективного развития
и технического
первооружения
ОАО «ММК-МЕТИЗ»

Д.П.Канаев

« 10 » 2021 г.



АКТ

использования результатов диссертационного исследования
Медведевой Екатерины Михайловны, представляемой на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Медведевой Екатерины Михайловны на тему «Совершенствование технологического процесса производства арматурных канатов на основе оценки НДС проволоки методами компьютерного моделирования», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы на ОАО «ММК-Метиз» в виде рекомендаций при проектировании технологий производства арматурных канатов.

Результаты исследований напряженно-деформированного состояния при волочении передельной проволоки для производства высокопрочного арматурного каната конструкции 1x7 (1+6) диаметром 12,5 мм из перлитной стали марки 80 позволили получить распределение остаточных напряжений после каждого прохода волочения и объяснить особенности изменения микромеханики деформируемой проволоки. Учет полученных распределений НДС способствует оперативной корректировке технологических воздействий на последующих этапах производства арматурных канатов. На основании полученного градиента распределения остаточных напряжений после процесса волочения и свивочных напряжений после процесса свивки для арматурного каната конструкции 1x7 (1+6) диаметром 12,5 мм были предложены и внедрены рациональные режимы стабилизации:

- температура стабилизации в диапазоне 360-400°C;
- натяжение 82 кН.

Медведевой Е.М. предложено внедрение режима пластического обжатия (со степенью деформации 6%) после процесса свивки арматурного каната. Данная операция рекомендована для внедрения в производственный процесс в случае формирования потребительского спроса на пластически обжатый арматурный канат. Данный факт способствует расширению сортамента производства и позволит увеличить число потребителей на рынке сбыта.

Главный специалист по
технологическому развитию и
новым видам продукции, к.т.н.

М.В. Зайцева



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
О.Л. Назарова
« 07 » 09 2021 г.

АКТ

об использовании в учебном процессе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» результатов диссертационной работы
Медведевой Екатерины Михайловны

Материалы диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук Медведевой Екатерины Михайловны внедрены в учебный процесс на основании рекомендации методической комиссии института металлургии, машиностроения и материалобработки.

Материалы диссертационной работы Медведевой Е.М. «Совершенствование технологического процесса производства арматурных канатов на основе оценки НДС проволоки методами компьютерного моделирования» используются в образовательном процессе при подготовке бакалавров по направлению 22.03.02 «Металлургия», профиль подготовки «Обработка металлов и сплавов давлением (метизное производство)» и магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия», профиль подготовки «Инжиниринг инновационных технологий в обработке материалов давлением».

Результаты исследований включены в учебно-методическую базу для чтения лекций и проведения практических занятий по следующим дисциплинам: «Новые технологические решения в процессах ОМД», «Технология производства проволоки», «Методы исследования материалов и процессов», «Инновационные процессы в производстве металлоизделий».

Использование материалов диссертационной работы Медведевой Е.М. позволяет расширить компетенции студентов, ознакомить их с современными тенденциями в области компьютерного моделирования процессов обработки материалов давлением и закрепить знания о прикладном использовании программных комплексов для моделирования. Представленный в работе Медведевой Е.М. принцип учета поперечного формирования напряженно-деформированного состояния каната обучает студентов расширять и дополнять традиционные методы проектирования технологических процессов производства.

Председатель методической комиссии
института металлургии, машиностроения
и материалобработки,
заведующий кафедрой механики,
д-р техн. наук, доцент

А.С. Савинов

Заведующий кафедрой
технологий обработки материалов,
д-р техн. наук, профессор

А.Б. Моллер

Соискатель

Е.М. Медведева