

05.23.01
М916

КОНТРОЛЬНЫЙ
ЭКЗЕМПЛЯР
На правах рукописи

В.Мусихин

МУСИХИН ВЛАДИМИР АРКАДЬЕВИЧ

**РАСЧЁТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ
СПИРАЛЬНЫХ КАНАТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЁННОЙ АРМАТУРЫ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность 05.23.01 – "Строительные конструкции, здания и сооружения"

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Работа выполнена на кафедре "Строительные конструкции и инженерные сооружения" Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – кандидат технических наук,
профессор Максимов Ю.В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Матвеев В.Г.;
кандидат технических наук,
доцент Шматков С.Б.

Ведущая организация – Научно-исследовательский институт бетона
и железобетона (НИИЖБ), г. Москва.

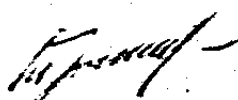
Защита состоится 27 ноября 2003 г., в 15 часов, на заседании диссертационного совета ДМ 212.298.08 в Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, главный корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Просим Вас принять участие в защите и направить Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, главный корпус, ауд. 224, Учёный совет.

Автореферат разослан " _____ " октября 2003 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук
профессор



Трофимов Б.Я.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Основными направлениями развития железобетона являются использование высокоэффективных видов арматуры и применение высокопрочных бетонов. Наиболее высокоэффективным видом арматуры для большепролётных предварительно напряжённых железобетонных конструкций являются арматурные канаты. Использование арматурных канатов даёт возможность при армировании конструкции исключить операцию сварки напрягаемой арматуры, так как длина арматурных канатов, поставляемых на заводы строительных конструкций в бухтах, не ограничена. Максимальная длина стержневой арматуры составляет 12 метров, следовательно, при армировании большепролётной железобетонной конструкции стержневой арматурой необходимо многократно производить сложную операцию сварки напрягаемой арматуры, что приводит к дополнительным трудозатратам при производстве. Также наличие сварных соединений предварительно напрягаемой арматуры приводит к увеличению размеров поперечного сечения конструкции и, таким образом, к увеличению собственного веса железобетонной конструкции.

Существующие нормативные документы, как в нашей стране, так и за рубежом дают различные границы максимально допустимых напряжений в проволоках стального каната. Всестороннее исследование свойств стальных канатов, используемых в качестве предварительно напряжённой арматуры железобетонных конструкций, и, в частности, уточнение методики назначения максимально допустимой величины предварительного напряжения в проволоках стального каната с учётом его составной конструкции позволит вычислить реально необходимое количество канатной арматуры и, таким образом, снизить расход дорогостоящей высокопрочной арматурной стали.

Цель диссертации: теоретическое исследование напряжённо-деформированного состояния (далее НДС) стальных спиральных канатов с линейным касанием проволок, используемых в качестве предварительно напряжённой арматуры железобетонных конструкций, и оценка конструктивных параметров стальных спиральных канатов с линейным касанием проволок, влияющих на их совместную работу с бетоном и коррозионную стойкость.

Объект исследования: стальные спиральные канаты с линейным касанием проволок, используемые в качестве напрягаемой арматуры предварительно напряжённых железобетонных конструкций.

Предмет исследования: НДС элементов стального спирального каната с линейным касанием проволок в процессе его предварительного растяжения при изготовлении предварительно напряжённой железобетонной конструкции и взаимодействие стального спирального каната с линейным касанием проволок с бетоном после операции отпуска преднапрягающей силы.

Научная новизна работы:

— на основании дифференциальных уравнений Кирхгофа для тонкого криволинейного стержня разработана обобщённая математическая модель стального спирального каната с линейным касанием проволок, которая позволяет определять сложное НДС элементов каната с учётом его геометрических характеристик и механических свойств стали;

– на основе теории пластического течения Прандтля-Рейсса получены обобщённые математические зависимости, учитывающие изменения НДС элементов стального каната в упругопластической стадии работы стали;

– теоретически обоснована оптимальная конструкция стального спирального каната с линейным касанием проволок по критерию максимального использования прочностных свойств стали;

– произведено статистическое исследование влияния шага расстановки канатов К-7 и прочности бетона на характеристики преднапряжённой железобетонной конструкции.

Практическое значение и реализация результатов работы:

– получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 990501 "Определение напряжённо-деформированного состояния элементов арматурного каната К-7 в упругой стадии работы стали";

– исследовано влияние силовых и конструктивных факторов на работоспособность гибких многослойных композиционных изделий с винтовой анизотропией свойств (Отчёты о НИР – № Гос. Регистр. 01.980006115, Инв. № 02.99.0003669 и Инв. № 02.20.0002754), данные научно-исследовательские работы финансировались из средств федерального бюджета по единому заказ-наряду (ЕЗН) на 1998-99 гг.;

– новый арматурный канат класса К-6 (1+5), имеющий теоретически обоснованную оптимальную конструкцию, может быть использован вместо арматурного каната класса К-7 (1+6) при изготовлении большепролётных предварительно напряжённых железобетонных конструкций.

На защиту выносятся:

– обобщённая математическая модель стального спирального каната с линейным касанием проволок, разработанная на основании дифференциальных уравнений Кирхгофа для тонкого криволинейного стержня, которая позволяет определять сложное НДС элементов каната с учётом его геометрических характеристик (диаметр проволок, угол свивки повивочных проволок) и механических свойств стали (модули упругости и сдвига);

– программа для ЭВМ на языке Си для определения действительного НДС элементов стального арматурного каната класса К-7 (1+6) в упругой стадии работы стали;

– программа для ЭВМ на языке Си для определения действительного НДС элементов стального арматурного каната класса К-19 (1+9+9) в упругой стадии работы стали;

– обобщённые математические зависимости, полученные на основе теории пластического течения Прандтля-Рейсса, которые позволяют учитывать влияние физико-механических свойств стали в упругопластической стадии работы на НДС элементов стального каната;

– программа для ЭВМ на языке Си для определения уточнённого НДС элементов стального арматурного каната класса К-7 (1+6) в упругопластической стадии работы стали;

– разработанный дедуктивным методом научного анализа новый стальной спиральный канат класса К-6 (1+5) с линейным касанием проволок, имеющий

теоретически обоснованную оптимальную конструкцию по критерию максимального использования прочностных свойств стали;

– программа для ЭВМ на языке Си для определения действительного НДС элементов нового стального арматурного каната класса К-6 (1+5) в упругой стадии работы стали;

– результаты статистического исследования влияния шага расстановки канатов К-7 и прочности бетона на характеристики преднапряжённой железобетонной конструкции;

– сравнительный анализ коррозионной стойкости стальных спиральных канатов класса К-7 (1+6), класса К-19 (1+9+9) и класса К-6 (1+5);

– сравнительный анализ параметров сцепления с бетоном стальных спиральных канатов класса К-7 (1+6), класса К-19 (1+9+9) и класса К-6 (1+5).

Апробация работы. Основные результаты выполненной работы докладывались и получили одобрение:

– на 6-й, 7-й и 8-й Сибирских (международных) конференциях по железобетону, состоявшихся в г. Новосибирске в 1996, 1998 и 2000 гг.;

– на XV...XX Российских школах по проблемам проектирования неоднородных конструкций, состоявшихся в г. Миассе в 1996...2000 гг.;

– на 7-й конференции Межрегиональной Ассоциации "Железобетон" "Состояние и перспективы развития преднапряжённых железобетонных конструкций", состоявшейся в г. Москве, 21–23 июня 2000 г.;

– на 48...54 научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета (Челябинского государственного технического университета) в 1996...2002 гг.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 17 научных статьях.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов по результатам работы, списка литературы и приложения. Диссертация изложена на 206 страницах текста и содержит 24 таблицы и 22 рисунка. Список литературы включает 152 библиографических источника, из них 4 на английском языке.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Состояние вопроса и задачи исследования.

Исследования свойств стальных спиральных канатов с линейным касанием проволок, используемых либо в качестве напрягаемой арматуры предварительно напряжённых железобетонных конструкций, либо в качестве подъёмных канатов, произведённые ранее различными исследователями, имеют свои характерные особенности.

1 особенность. Все исследования в области арматурных канатов носили экспериментальный характер.

Основная цель исследований заключалась в получении механических прочностных характеристик стальных канатов. Механические свойства стальных проволок и канатов в агрегатном состоянии исследовали в своих работах В. К. Алёхин, Н. Я. Брискин, М. А. Букштейн, Ю. А. Гурьянов, С. А. Мадатян,

Ю. В. Максимов, В. М. Митасов, В. В. Михайлов, К. В. Михайлов, Г. И. Пирожков, Я. Ф. Погребной, Ю. М. Редько, А. И. Семёнов, И. А. Юхвец и другие.

Все исследователи стальных канатов, используемых в качестве напрягаемой арматуры предварительно напряжённых железобетонных конструкций, проводили эмпирические исследования и получали эмпирические формулы. Исследователи испытывали стальные канаты, состоящие из различного числа элементов (семипроволочные, девятнадцатипроволочные и т.д.), имеющие различные конструкции (двухпрядные, трёхпрядные и т.д.), геометрические характеристики (диаметр проволок, угол свивки повивочных проволок в прядь и прядей в канат) и механические свойства стали (модули упругости и сдвига).

Не было никаких исследований по построению теоретически обоснованной методики определения сложного НДС элементов стального каната при его растяжении, основывающейся на обобщённых математических зависимостях теории прочности стержневых конструкций.

Комплексные экспериментальные и теоретические исследования сцепления канатной арматуры с бетоном проводили В. В. Габрусенко, И. С. Гаклин, В. Г. Диаковский, Ю. В. Максимов, К. В. Михайлов, А. А. Оатул, Л. В. Руф, А. И. Семёнов, Ю. А. Тевелев, И. А. Федорков, М. М. Холмянский и другие.

2 особенность. Все исследования в области подъёмных канатов были направлены на изучение их долговечности и имели своей целью увеличение длительной работоспособности (выносливости) этих канатов.

Фундаментальные теоретические и комплексные эмпирические исследования подъёмных канатов проводили М. А. Букштейн, М. Ф. Глушко, Ю. А. Гурьянов, Г. И. Иозеф, В. Д. Королёв, Г. Н. Савин, С. Т. Сергеев и другие.

Производство стальных канатов развивалось параллельно с теоретическими и экспериментальными исследованиями, направленными на совершенствование их конструкций и методик расчёта. Стальные канаты, используемые либо в качестве напрягаемой арматуры предварительно напряжённых железобетонных конструкций, либо в качестве самостоятельных несущих элементов строительных металлических конструкций (висячих покрытий зданий и сооружений, вантовых мостов, оттяжек антенно-мачтовых конструкций), изучались во многих проектных и научно-исследовательских организациях.

Основные проектные и научно-исследовательские организации, в которых были проведены исследования стальных канатов, используемых в качестве несущих элементов строительных конструкций: НИИЖБ, ВНИИЖелезобетон, НИИСК, ЦНИИПроектстальконструкция, ЦНИИЧМ, СГУПС, ЮУрГУ, Ростовский Промстройниипроект, УралНИИИстромпроект, НГАСУ.

Основные предприятия чёрной металлургии, на которых были проведены исследования технологии изготовления стальных канатов: Белорецкий металлургический комбинат (БМК); Орловский, Череповецкий и Ленинградский сталепрокатные заводы (ОСПЗ, ЧСПЗ и ЛСПЗ); Волгоградский, Одесский и Харцызский сталепроволочно-канатные заводы (ВСПКЗ, ОСПКЗ и ХСПКЗ); Магнитогорский калибровочный завод (МКЗ).

Общая координация работ по постоянному совершенствованию технологии изготовления высокопрочной канатной проволоки и стальных канатов на

всех металлургических и метизных заводах стран бывшего СССР проводилась Всесоюзным научно-исследовательским институтом метизной промышленности (ВНИИметиз), г. Магнитогорск, Челябинская область, Россия.

В настоящее время имеются обширные экспериментальные исследования по проблемам изготовления и практического использования стальных канатов, но при этом многие вопросы расчёта и конструирования стальных канатов нуждаются в дальнейших комплексных теоретических исследованиях.

Стальной канат представляет собой гибкую композитную конструкцию с продольной винтовой анизотропией свойств. Но в настоящее время практически все строительные нормы проектирования, по которым определяют величину напряжения в стальном канате, рассматривают его как целый монолитный стержень, не учитывая его неоднородную составную конструкцию.

В таблице 1 приведены результаты сопоставимых подсчётов предварительного напряжения на основе рекомендаций и формул различных законодательных нормативных документов. Рекомендации и формулы этих документов установлены гипотетически на основе большого объёма эмпирических данных о работе стальных канатов в различных условиях и экспериментальных исследований прочности стальных канатов. Согласно этим рекомендациям максимальный уровень предварительного напряжения σ_{sp} в стальном канате изменяется в широких пределах (от 0.42 до 0.86 временного сопротивления каната σ_u).

Таблица 1

Величина предварительного напряжения в стальном канате

Наименование нормативного документа	Уровень σ_{sp} к величине σ_u
СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции.	$\sigma_{sp} \leq 0.762 \sigma_u$
СНиП 2.05.03-84. Мосты и трубы.	$\sigma_{sp} \leq 0.598 \sigma_u$
Нормы ФРГ. → Ф. Леонгард	$\sigma_{sp} \leq 0.7 \sigma_u$
Рекомендации по расчёту прочности стальных канатов, применяемых в строительных металлических конструкциях.	$\sigma_{sp} \leq (0.42 \div 0.70) \sigma_u$
Руководство по применению стальных канатов и анкерных устройств в конструкциях зданий и сооружений.	$\sigma_{sp} \leq (0.43 \div 0.86) \sigma_u$
Рекомендации по применению 19-проволочных арматурных канатов в преднапряжённых железобетонных конструкциях.	$0.248 \sigma_u \leq \sigma_{sp} \leq 0.76 \sigma_u$
ВСН 71-70. Технические указания по применению стальных канатов в предварительно напряжённых железобетонных конструкциях мостов.	$\sigma_{sp} \leq 0.64 \sigma_u$

Очевидно, что все вышеупомянутые нормативные документы определяют приближённое значение величины эффективного предварительного напряжения. Основная задача данного исследования состоит в том, чтобы разработать научно обоснованную методику определения величины эффективного предварительного напряжения стального каната.

Глава 2. Построение обобщённой математической модели стального спирального каната с линейным касанием проволок.

При построении обобщённой математической модели стального спирального каната с линейным касанием проволок автор диссертации использовал различные научные работы многих исследователей. Основой обобщённой математической модели послужили работы по механике деформируемого тела и дифференциальной геометрии Густава Роберта Кирхгофа (Kirchhoffa). Также автором были использованы работы по теории аналитического конструирования, т.е. геометрического построения, и прочностного расчёта стальных подъёмных канатов М. Ф. Глушко и С. Т. Сергеева, работы по теории винтовых пружин С. Д. Пономарёва. Кроме того, были применены различные общеизвестные аксиомы и теоремы из евклидовой геометрии, тригонометрии, алгебры, дифференциальной геометрии, теоретической механики и других наук.

Обобщённая математическая модель стального спирального каната с линейным касанием проволок состоит из двух частей: геометрической (описание пространственной конструкции спирального каната с линейным касанием проволок) и статической (определение НДС элементов стального каната).

При построении математической модели были приняты допущения:

1. рассматриваем идеальный канат, в котором нет неоднородности прочностных свойств проволоки по длине самой проволоки и в каждом поперечном сечении каната проволоки с одинаковыми геометрическими характеристиками имеют одинаковые прочностные характеристики;

2. упругие деформации и перемещения стального каната подчиняются гипотезе плоских поперечных сечений и неискривления радиусов;

3. силы трения не учитываем, так как при растяжении и кручении стального каната относительные смещения элементов каната незначительны, и работа внутренних сил трения очень мала по сравнению с работой упругих сил;

4. проволоки стального каната полагаются абсолютно недеформируемыми в поперечном направлении (при наличии продольных деформаций проволок каната их диаметр остаётся постоянным).

Геометрическая часть обобщённой математической модели.

С целью нахождения аналитического выражения для условия линейного касания проволок спирального каната была решена пространственная геометрическая задача описания взаиморасположения двух круглых проволок, свитых в канат и непрерывно соприкасающихся друг с другом по линии контакта.

В результате решения этой задачи автором диссертации получены теоретически обоснованные общие принципы построения линейного касания проволок. Разработан комплекс обобщённых синтезирующих уравнений линейного касания проволок, который предназначен для построения (синтеза) конструкций спиральных канатов с линейным касанием проволок.

Геометрическое описание пространственной конструкции стального спирального каната с линейным касанием проволок является первым и необходимым этапом в построении его обобщённой математической модели.

Статическая часть обобщённой математической модели.

Для исследования силового взаимодействия элементов стального каната

разработаны обобщённые уравнения статики, которые представляются в виде двух систем статических уравнений. Первая система уравнений отражает условия равновесия каждого отдельного элемента каната с учётом их взаимодействия. Это внутренние уравнения статики элемента каната. Вторая система уравнений, отвлекаясь от сложной композитной конструкции стального каната, отражает условия равновесия каната в целом под действием внешней нагрузки. Это внешние, или агрегатные, уравнения статики всего каната.

Каждый элемент стального спирального каната представляет собой тонкий естественно изогнутый стержень, поперечные размеры которого пренебрежимо малы как по сравнению с его длиной, так и по сравнению с его радиусом естественной кривизны. Для математического моделирования НДС винтового элемента стального спирального каната применены известные дифференциальные уравнения Кирхгофа для тонкого изогнутого стержня. Уравнения Кирхгофа описывают взаимодействие внутренних сил в элементе каната.

Для определения коэффициентов исходных уравнений статики были использованы некоторые положения дифференциальной геометрии, в частности, принцип кинематической аналогии. Получены уравнения кинематической аналогии, скоррелированные применительно к винтовому элементу каната.

Автором диссертации разработаны геометрические уравнения деформаций, которые связывают деформации упругой линии винтового элемента каната с его линейными и угловыми смещениями в канате.

Для определения равномерно распределённой нормальной контактной нагрузки, действующей на винтовой элемент каната, использован энергетический метод, основанный на теореме Кастилиано, и найдено решение этой задачи в упруго-линейной постановке. В результате работы получены канонические уравнения для отдельной проволоки в стальном спиральном канате с линейным касанием проволок.

Для внутренних усилий в проволоке каната получены формулы:

$$N_1 = N_x \cos \alpha + r f_n; N_2 = N_x \sin \alpha - r f_n \operatorname{ctg} \alpha;$$

$$M_1 = N_x r \sin \alpha + M_x \cos \alpha - 2 r^2 f_n \operatorname{ctg} \alpha; M_2 = -N_x r \cos \alpha + M_x \sin \alpha + r^2 f_n (\operatorname{ctg}^2 \alpha - 1);$$

где: N_1 , N_2 , M_1 и M_2 – соответственно осевая растягивающая сила, поперечная сила, крутящий момент и изгибающий момент в отдельной проволоке каната;

N_x и M_x – осевая растягивающая сила и крутящий момент в канате;

f_n – нормальная контактная нагрузка на отдельную проволоку каната;

α и r – угол свивки проволоки в канат и полярный радиус оси проволоки.

Статическая часть обобщённой математической модели представляет собой обобщённые уравнения статики стального спирального каната с линейным касанием проволок, которые дают полную картину его агрегатных механических свойств при совместном растяжении и кручении.

Автором построена обобщённая математическая модель стального спирального каната с линейным касанием проволок, разработанная на основании дифференциальных уравнений Кирхгофа для тонкого криволинейного стержня, которая позволяет определять сложное НДС элементов каната с учётом его геометрических характеристик (диаметр проволок, угол свивки повивочных проволок) и механических свойств стали (модули упругости и сдвига).

Глава 3. Исследование напряжённо-деформированного состояния арматурных канатов класса К-7 и класса К-19.

Стальной арматурный канат класса К-7 (1+6), изготавливаемый по ГОСТ 13840-68, является частным случаем стального спирального каната с линейным контактом проволок. Семипроволочный канат К-7 (1+6) состоит из сердечника, т.е. центральной прямолинейной проволоки, и шести повивочных проволок, спирально уложенных вокруг сердечника.

Канат класса К-7 (1+6) выбран для исследования, так как этот арматурный канат является наиболее распространённым типом высокопрочной витой проволочной арматуры, применяемой при изготовлении преднапряжённых железобетонных конструкций, как в нашей стране, так и за рубежом.

Автором на основе имеющейся математической модели написана программа для ЭВМ на языке Си "Определение напряжённо-деформированного состояния элементов арматурного каната К-7 в упругой стадии работы стали". Программа определяет сложное НДС в проволоках каната К-7 (1+6) при заданном внешнем растягивающем усилии для случая чистого растяжения каната (канат растягивается осевой силой N_x , и при этом его концы закреплены от вращения, т.е. угол поворота каната на опорах $\theta = 0$).

Стальной арматурный канат класса К-19 (1+9+9), изготавливаемый по техническим условиям ТУ 14-4-22-71, является частным случаем стального спирального каната с линейным контактом проволок. Девятнадцатипроволочный канат К-19 (1+9+9) с линейным касанием проволок (ЛК-0) состоит из сердечника, т.е. центральной проволоки, девяти повивочных проволок первого слоя, спирально уложенных вокруг сердечника, и девяти повивочных проволок второго слоя, спирально уложенных на повивочные проволоки первого слоя.

Канат класса К-19 (1+9+9) выбран для исследования, так как этот арматурный канат указан в СНиП 2.03.01-84 наряду с канатом класса К-7 (1+6).

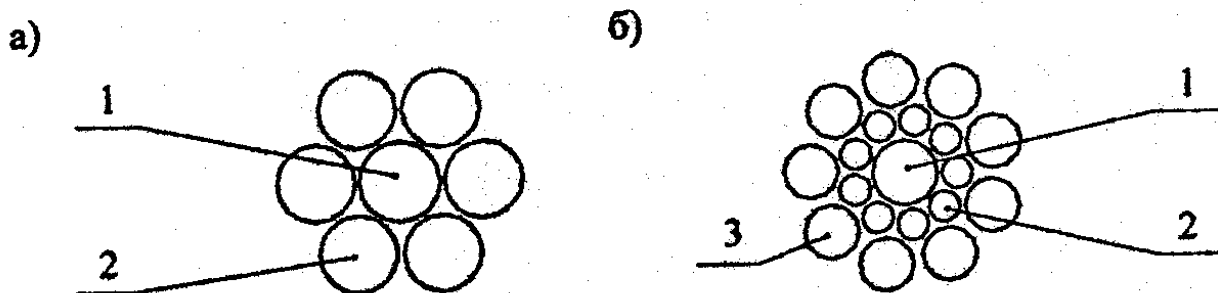


Рис. 1. Поперечные сечения стальных арматурных канатов: а) К-7, б) К-19,

1 – центральная прямолинейная проволока (сердечник),

2 – повивочная проволока первого слоя,

3 – повивочная проволока второго слоя.

Автором на основе имеющейся математической модели написана программа для ЭВМ на языке Си "Определение напряжённо-деформированного состояния элементов арматурного каната К-19 в упругой стадии работы стали". Программа определяет сложное НДС в проволоках каната К-19 (1+9+9) при заданном внешнем растягивающем усилии для случая чистого растяжения каната.



Рис. 2. Блок-схема программы для ЭВМ

"Определение напряжённо-деформированного состояния элементов арматурного каната К-7 в упругой стадии работы стали"

В таблице 2 представлены результаты расчёта НДС элементов стального спирального каната с линейным касанием проволок класса К-7 (1+6) [ГОСТ 13840-68] в упругой стадии работы стали при различной кратности свивки повивочных проволок. Условный диаметр каната равен 15.0 мм, номинальный диаметр каната равен 15.2 мм, диаметр сердечника (центральной проволоки каната) равен 5.2 мм и диаметр повивочной (наружной) проволоки каната равен 5.0 мм. Согласно ГОСТ 13840-68 кратность свивки повивочных проволок этого каната может варьироваться в пределах от 12 до 16.

Таблица 2

Расчёт НДС каната К-7 при различной кратности свивки

Тип каната	k, [ед]	Слой проволок	min d ₀ , мм	f _н , 10 ³ $\frac{H}{M}$	Напряжения, МПа					Δ _{нв} , %	СНиП	Δ _с , %
					Посчитанные по программе							
Усилие N _x , 10 ⁵ Н					σ _н	σ _м	τ _т	σ _т	σ _{эжв}		σ _т = σ _н	
К-7 15.2мм (5.2 + + 6*5.0)	12	0	5.144		1420.0			1420.0				
		1		158.5	1377.5	20.2	1.2	1397.7	1397.7	1.60	1366.5	3.9
	13	0	5.133		1412.1			1412.1				
		1		135.5	1375.9	17.3	0.9	1393.2	1393.2	1.36	1366.5	3.3
N _x =1.9	14	0	5.124		1405.8			1405.8				
		1		117.2	1374.6	14.9	0.8	1389.6	1389.6	1.16	1366.5	2.9
	15	0	5.116		1400.7			1400.7				
		1		102.3	1373.6	13.0	0.6	1386.6	1386.6	1.02	1366.5	2.5
16	0	5.110		1396.6			1396.6					
	1		90.1	1372.8	11.5	0.5	1384.2	1384.2	0.90	1366.5	2.2	

Таблица 3

Расчёт НДС каната К-19 при различной кратности свивки

Тип каната	k ₁ , [ед]	Слой проволок	min d ₀ , мм	f _н , 10 ³ $\frac{H}{M}$	Напряжения, МПа					Δ _{нв} , %	СНиП	Δ _с , %
					Посчитанные по программе							
Усилие N _x , 10 ⁵ Н	k ₂ , [ед]		max d ₂ , мм		σ _н	σ _м	τ _т	σ _т	σ _{эжв}		σ _т = σ _н	
К-19 14.2мм (4.2 + + 9*2.0 + + 9*3.5)	14.0	0	4.059		1621.3			1621.3				
		1		44.7	1576.0	14.2	0.8	1590.2	1590.2	2.0	1476.1	9.8
	7.98	2	3.649	214.1	1489.2	39.0	3.9	1528.2	1528.2	6.1		
N _x =1.9	15.0	0	4.053		1602.7			1602.7				
		1		38.7	1563.5	12.3	0.7	1575.9	1575.9	1.7	1476.1	8.6
	8.55	2	3.674	188.4	1487.7	34.3	3.2	1522.0	1522.1	5.3		
16.0	0	4.050		1587.5			1587.5					
	1		33.9	1553.3	10.8	0.5	1564.1	1564.1	1.5	1476.1	7.5	
9.12	2	3.695	166.9	1486.5	30.4	2.6	1516.9	1516.9	4.7			

В таблице 3 представлены результаты расчёта НДС элементов стального спирального каната с линейным касанием проволок класса К-19 (1+9+9) [ТУ 14-4-22-71] в упругой стадии работы стали при различной кратности свивки по-

вивочных проволок. Условный диаметр каната равен 14.0 мм, номинальный диаметр каната равен 14.2 мм, диаметр сердечника (центральной проволоки каната) равен 4.2 мм, диаметр повивочной проволоки первого (внутреннего) слоя повива равен 2.0 мм и диаметр повивочной проволоки второго (наружного) слоя повива равен 3.5 мм. Согласно ТУ 14-4-22-71 в этом канате кратность свивки повивочных проволок первого (внутреннего) слоя повива и второго (наружного) слоя повива может варьироваться в пределах от 8 до 16.

В расчётах принимали модуль упругости стали $E_s = 1.8 \cdot 10^5$ МПа согласно таблице 29 [СНиП 2.03.01-84]. Модуль сдвига стали G_s принимали равным $E_s/3$ (как для несжимаемого материала). Эти значения используются также во всех нижеприведённых расчётах.

В таблицах введены следующие обозначения:

N_x – внешняя осевая растягивающая сила; k – кратность свивки повивочных проволок (у каната К-7); k_1, k_2 – кратность свивки повивочных проволок первого (внутреннего) и второго (наружного) слоя повива (у каната К-19);
 слою проволок: 0 – центральная проволока (сердечник); 1 – повивочная проволока первого слоя повива; 2 – повивочная проволока второго слоя повива;
 f_n – нормальная контактная нагрузка на отдельную проволоку каната, т.е. равнодействующая всей контактной нагрузки на отдельную проволоку каната;
 σ_n – нормальные напряжения от осевого растяжения; σ_m – нормальные напряжения от изгиба; τ_t – касательные напряжения от кручения; σ_1 – максимальные нормальные напряжения; $\sigma_{экв}$ – эквивалентные напряжения в проволоке;
 Δ_n – расхождение вычисленных по программе напряжений в повивочной проволоке и сердечнике; Δ_c – расхождение напряжений в сердечнике, вычисленных по программе, и напряжений в канате, посчитанных по СНиП 2.03.01-84;
 $\min d_0$ – минимально допустимый диаметр сердечника каната; $\max d_2$ – максимально допустимый диаметр повивочной проволоки второго слоя повива.

Величина $\min d_0$ определяется из условия плотного прилегания повивочных проволок к сердечнику и друг к другу, т.е. из условия нормального контакта повивочных проволок с центральной проволокой и из условия собственного тангенциального контакта между повивочными проволоками. Программа для каната К-7 (1+6) определяет $\min d_0$ по внешнему диаметру каната и кратности свивки повивочных проволок. Программа для каната К-19 (1+9+9) определяет $\min d_0$ по внешнему диаметру первого слоя повивочных проволок и кратности свивки повивочных проволок первого слоя.

Величины k_1 и k_2 взаимозависимы. В программе для каната К-19 (1+9+9) проектировщик сначала задаёт k_1 , а затем из условия смежного линейного контакта между слоями повивочных проволок программа определяет k_2 .

Величина $\max d_2$ определяется из условия плотного прилегания повивочных проволок второго слоя к повивочным проволокам первого слоя и друг к другу, т.е. из условия смежного линейного контакта между проволоками первого и второго слоёв повива и из условия собственного тангенциального контакта между повивочными проволоками второго слоя повива. Программа для каната К-19 (1+9+9) определяет $\max d_2$ по диаметру повивочных проволок первого слоя повива и кратности свивки повивочных проволок первого слоя.

Из таблицы 2 видно, что в зависимости от кратности свивки повивочных проволок напряжения в проволоках каната класса К-7 (1+6), посчитанные по авторской программе, т.е. с учётом геометрических характеристик каната и механических свойств стали, превышают напряжения, посчитанные по СНиП 2.03.01-84, на 1.3÷2.3 % в повивочных проволоках и на 2.2÷3.9 % в сердечнике. Напряжения в сердечнике превышают напряжения в повивочных проволоках на 0.9÷1.6 % в зависимости от кратности свивки повивочных проволок.

Из таблицы 3 видно, что в зависимости от кратности свивки повивочных проволок напряжения в проволоках каната класса К-19 (1+9+9), посчитанные по авторской программе, т.е. с учётом геометрических характеристик каната и механических свойств стали, превышают напряжения, посчитанные по СНиП 2.03.01-84, на 2.8÷3.5 % в повивочных проволоках второго (наружного) слоя повива, на 6.0÷7.7 % в повивочных проволоках первого (внутреннего) слоя повива и на 7.5÷9.8 % в сердечнике. Напряжения в сердечнике превышают напряжения в повивочных проволоках первого слоя на 1.5÷2.0 % и в повивочных проволоках второго слоя на 4.7÷6.1 % в зависимости от кратности свивки повивочных проволок.

Существует два пути увеличения эффективности использования прочностных свойств стали в проволоках арматурного каната.

Первый путь: дальнейшее развитие теории расчёта НДС элементов стальных спиральных канатов с учётом упругопластических свойств стали.

Второй путь: определить оптимальную конструкцию стального спирального каната с линейным касанием проволок (подробно об этом в главе 4).

В главе 2 разработана методика расчёта сложного НДС элементов стального спирального каната с линейным касанием проволок в упругой стадии работы стали. В данной главе эта методика усовершенствована с учётом упругопластических свойств стали. Новая методика определяет сложное НДС элементов стального каната и в том случае, если часть сечения каната находится в упругопластической стадии работы стали, т.е. напряжения в отдельных точках сечения элемента стального каната превышают условный предел текучести.

Новая обобщённая математическая модель учитывает изменение физико-механических свойств стали в упругопластической стадии нагружения и определяет приращения деформаций элемента каната, обусловленные пластическими свойствами стали (дополнительные приращения к упругим деформациям).

При математическом моделировании была использована теория пластического течения Прандтля-Рейсса. При сложном нагружении материала момент достижения результирующими напряжениями в отдельных точках сечения элемента стального каната величины условного предела текучести, т.е. момент возникновения в сечении элемента стального каната зоны пластических деформаций, определяется выполнением условия текучести Мизеса.

Автором на основе описанной выше математической модели написана программа для ЭВМ на языке Си, которая определяет сложное НДС в проволоках стального каната К-7 (1+6) при заданном внешнем осевом растягивающем усилии для случая чистого растяжения каната. Программа определяет сложное НДС элементов каната К-7 (1+6) в упругопластической стадии работы стали.

В таблице 4 представлены результаты расчёта НДС элементов стального спирального каната с линейным касанием проволок класса К-7 (1+6) [ГОСТ 13840-68] в упругопластической стадии работы стали при различных усилиях натяжения. В таблице 4 все обозначения те же, что и в таблице 2.

Таблица 4

Расчёт НДС каната К-7 при различных усилиях натяжения

Тип каната k, [ед]	Усилие $N_x, 10^5 \text{Н}$	Слой проволок	$\min d_0,$ мм	$f_m,$ $10^3 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$	Напряжения, посчитанные по программе, МПа					$\Delta_n,$ %
					σ_n	σ_{in}	τ_t	σ_t	$\sigma_{эжв}$	
К-7 15.2мм (5.2 + + 6*5.0)	1.85	0	5.144		1382.6			1382.6		1.59
		1		154.3	1341.2	19.7	1.15	1360.9	1360.9	
	1.90	0	5.144		1419.6			1419.6		1.56
		1		158.5	1377.6	20.2	1.18	1397.8	1397.8	
k = 12	1.95	0	5.144		1456.7			1456.7		1.51
		1		162.7	1414.3	20.7	1.22	1435.0	1435.0	
	2.00	0	5.144		1493.7			1493.7		1.44
		1		166.8	1451.3	21.2	1.25	1472.5	1472.5	
2.05	0	5.144		1530.7			1530.7		1.35	
	1		171.0	1488.6	21.7	1.28	1510.3	1510.3		

Как видно из таблицы 23 [СНиП 2.03.01-84] при изменении диаметра высокопрочной арматурной проволоки на 10 %, прочность проволоки изменяется примерно на 3 %. В канате К-7 (1+6) сердечник имеет диаметр 5.2 мм, а повивочные проволоки 5.0 мм. В расчётах, представленных в таблице 4, принимали для сердечника каната величину временного сопротивления стали (σ_u) равную 1750 МПа (условный предел текучести $\sigma_{0.2} = 0.8 \sigma_u = 1400$ МПа), а для повивочных проволок каната величину временного сопротивления стали (σ_u) принимали равной 1780 МПа (условный предел текучести $\sigma_{0.2} = 0.8 \sigma_u = 1424$ МПа).

Из таблицы 4 видно, что при увеличенных напряжениях в сердечнике, превышающих условный предел текучести на 4.05 % ($N_x = 1.95 \cdot 10^5 \text{Н}$), расхождение напряжений в сердечнике и в повивочной проволоке стального каната, т.е. Δ_n , уменьшается на 0.08 % по сравнению с упругой стадией работы стали ($N_x = 1.85 \cdot 10^5 \text{Н}$). При увеличенных напряжениях в сердечнике, превышающих условный предел текучести на 9.34 % ($N_x = 2.05 \cdot 10^5 \text{Н}$), расхождение напряжений в сердечнике и в повивочной проволоке стального каната, т.е. Δ_n , уменьшается на 0.24 % по сравнению с упругой стадией работы стали ($N_x = 1.85 \cdot 10^5 \text{Н}$).

Незначительное уменьшение величины Δ_n объясняется тем, что в канате К-7 (1+6) сердечник один, а повивочных проволок шесть. Усилия, переходящие с сердечника на повивочные проволоки, становятся меньше в шесть раз и не оказывают значительного влияния на НДС повивочной проволоки.

Исследование показало, что использование упругопластических свойств стали в проволоках стального арматурного каната класса К-7 (1+6) практически не увеличивает эффективность использования прочностных свойств стали.

Глава 4. Теоретическое обоснование оптимальной конструкции стального спирального каната по критерию максимального использования прочностных свойств стали.

Основным нормативным документом, регламентирующим геометрические характеристики проволок стального спирального каната класса К-7 (1+6) является **ГОСТ 13840-68 Канаты стальные арматурные 1х7.**

В таблице 5 представлены геометрические характеристики стальных спиральных канатов с линейным касанием проволок класса К-7 (1+6), взятые из ГОСТов 13840-68 различных редакций. ГОСТ 13840-68 имеет четыре редакции: 1968 г. (исходная редакция), 1979 г., 1988 г. и 1995 г. Четвёртая (последняя) редакция не имеет ограничения срока действия.

При расчётах величины минимально допустимого диаметра сердечника взята минимально допустимая кратность свивки повивочных проволок, так как при уменьшении кратности свивки повивочных проволок величина минимально возможного диаметра сердечника увеличивается. Согласно ГОСТ 13840-68 1968-79 гг. минимальная величина кратности свивки повивочных проволок может быть равна 10, а согласно ГОСТ 13840-68 1988-95 гг. минимальная величина кратности свивки повивочных проволок может быть равна 12. Таким образом, в таблице 5 величина $\min d_0$ является максимальной величиной минимально допустимого диаметра сердечника каната К-7 (1+6) при разрешённых в ГОСТ 13840-68 1968-79 гг. и ГОСТ 13840-68 1988-95 гг. границах изменения кратности свивки повивочных проволок.

Таблица 5

Математический анализ диаметров сердечников канатов К-7

D_{yc}	ГОСТ 13840-68. – 1968 г., 1979 г.			Программа, $k = 10$	ГОСТ 13840-68. – 1988 г., 1995 г.			Программа, $k = 12$
	D_n	d_{nn}	d_c	$\min d_0$	D_n	d_{nn}	d_c	$\min d_0$
4.5	4.65	1.5	1.65	1.5841	Нет			
6.0	6.20	2.0	2.20	2.1121	6.20	2.05	2.10	2.0982
7.5	7.75	2.5	2.75	2.6401	Нет			
9.0	9.30	3.0	3.30	3.1682	9.35	3.10	3.15	3.1642
12.0	12.40	4.0	4.40	4.2243	12.40	4.10	4.20	4.1964
15.0	15.50	5.0	5.50	5.2803	15.20	5.00	5.20	5.1440

В таблице 5 введены следующие обозначения:

D_{yc} – условный диаметр каната, мм; D_n – номинальный диаметр каната, мм;
 d_{nn} – номинальный диаметр наружной (повивочной) проволоки каната, мм;
 d_c – номинальный диаметр центральной проволоки (сердечника) каната, мм;
 $\min d_0$ – величина минимально возможного (допустимого) диаметра сердечника семипроволочного каната, посчитанная по программе для заданного номинального диаметра каната D_n при кратности свивки k , мм;
 k – кратность свивки повивочных проволок, [ед].

Как показала обработка многочисленных эмпирических данных, произведённая Ю. А. Гурьяновым, в стальных канатах разница между длинами структурных элементов, составляющих канат, является основной причиной того, что

фактическая (агрегатная) прочность стальных канатов всегда ниже теоретической прочности на 5.0÷22.5 % в зависимости от конструкции каната. Это явление получило название межструктурного сдвига.

В таблице 6 представлены некоторые данные из таблицы 2, дополненные данными по разнице между длинами структурных элементов, составляющих канат К-7 (1+6).

Таблица 6

Δ_n каната К-7			
Канат	k , [ед]	$\Delta_{шт}$, %	$\Delta L_{пс}$, мм
$N_x, 10^5 Н$			
К-7	12	1.6	2.79
(1+6)	13	1.4	2.58
15.2 мм	14	1.2	2.40
$N_x = 1.9$	15	1.0	2.24
	16	0.9	2.10

В таблице 6 введены обозначения:

N_x, k, Δ_n – то же, что в таблице 2;

$\Delta L_{пс}$ – разница длин сердечника и повивочной проволоки на участке длины каната равном одному шагу свивки повивочных проволок; $\Delta L_{пс} = k d_{вн} (\sec \alpha - 1)$, где:

$d_{вн}$ – внешний диаметр каната, $d_{вн} = D_n$, мм;

α – угол свивки повивочных проволок.

На рис. 3 представлен график зависимости расхождения напряжений в повивочной проволоке и сердечнике каната К-7, т.е. Δ_n , от разницы длин сердечника и повивочной проволоки на участке длины каната равном одному шагу свивки повивочных проволок, т.е. $\Delta L_{пс}$.



Рис. 3. График зависимости расхождения напряжений в структурных элементах стальных канатов К-7 и К-6 от разницы длин этих элементов

Из графика на рис. 3 видно, что по мере увеличения разницы длин сердечника и повивочной проволоки на участке длины каната равном одному шагу свивки повивочных проволок расхождение напряжений в сердечнике и повивочной проволоке каната К-7 также увеличивается.

В канате класса К-7 (1+6) максимальные напряжения возникают в центральной проволоке (сердечнике), которая имеет наибольший диаметр и, следовательно, наименьшую прочностную характеристику. Таким образом, проч-

ность всего каната класса К-7 (1+6) определяется прочностью составляющей проволоки, имеющей наименьшую прочностную характеристику.

Для уменьшения неравномерности распределения напряжений между различными проволоками стального каната и для устранения явления наличия максимальных напряжений в проволоке каната, имеющей наименьшую прочностную характеристику, необходимо принципиально изменить саму конструкцию стального спирального каната с линейным касанием проволок. То есть необходимо разработать оптимальную конструкцию стального спирального каната, предназначенного для использования в качестве напрягаемой арматуры предварительно напряжённых железобетонных конструкций.

Детерминирующим критерием оптимизации для конструкции стального арматурного каната является максимальное использование прочностных свойств стальных проволок, составляющих канат. Необходимо разработать такую конструкцию стального спирального каната с линейным касанием проволок, в которой выполнялись бы два условия оптимизации.

1 условие оптимизации. Расхождение напряжений в сердечнике и повивочной проволоке стального каната, т.е. $\Delta_{\text{п}}$, должно быть минимальным.

2 условие оптимизации. Максимально нагруженная проволока стального каната должна иметь наибольшую прочностную характеристику.

Автором данного исследования на основе дедуктивного метода научного анализа разработан новый стальной спиральный канат класса К-6 (1+5) с линейным касанием проволок, имеющий теоретически обоснованную оптимальную конструкцию по критерию максимального использования прочностных свойств стали в проволоках каната.

Стальной арматурный канат класса К-6 (1+5), разработанный автором, является частным случаем стального спирального каната с линейным контактом проволок. Шестипроволочный канат К-6 (1+5) состоит из центральной прямолинейной проволоки (сердечника) и пяти повивочных проволок, спирально уложенных вокруг сердечника.

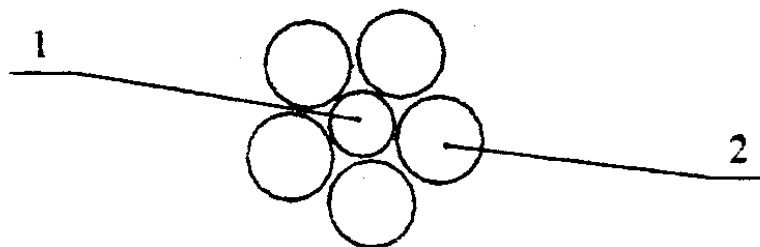


Рис. 4. Поперечное сечение стального арматурного каната К-6,
1 – центральная прямолинейная проволока, 2 – повивочная проволока.

Автором на основе имеющейся математической модели написана программа для ЭВМ на языке Си "Определение напряжённо-деформированного состояния элементов арматурного каната К-6 в упругой стадии работы стали". Программа определяет сложное НДС в проволоках каната К-6 (1+5) при заданном внешнем растягивающем усилии для случая чистого растяжения каната.

В таблице 7 представлены результаты расчёта НДС элементов стального спирального каната с линейным касанием проволок класса К-6 (1+5) в упругой стадии работы стали при различной кратнос.и свивки повивочных проволок. Условный диаметр каната равен 15.0 мм, номинальный диаметр каната равен 15.4 мм, диаметр сердечника (центральной проволоки каната) равен 4.2 мм и диаметр повивочной (наружной) проволоки каната равен 5.6 мм. Кратность свивки повивочных проволок этого каната принимаем в пределах от 12 до 16 по аналогии с канатом класса К-7 (1+6) [ГОСТ 13840-68].

Таблица 7

Расчёт НДС каната К-6 при различной кратности свивки

Тип каната	k, [ед]	Слой проволок	min d ₀ , мм	f _n , 10 ³ $\frac{H}{M}$	Напряжения, МПа					Δ _{пв} , %	СНиП σ _t = σ _n	Δ _с , %
					Посчитанные по программе							
					σ _n	σ _m	τ _t	σ _t	σ _{экв}			
К-6 15.4мм (4.2 + + 5*5.6)	12	0	4.062		1438.8			1438.8		1.22	1386.8	3.7
		1		189.6	1399.9	21.6	1.2	1421.5	1421.5			
	13	0	4.053		1431.1			1431.1		1.01	1386.8	3.2
		1		162.0	1398.0	18.5	0.9	1416.5	1416.5			
N _x =1.9	14	0	4.045		1425.0			1425.0		0.89	1386.8	2.8
		1		140.1	1396.5	15.9	0.8	1412.4	1412.4			
	15	0	4.039		1420.1			1420.1		0.77	1386.8	2.4
		1		122.2	1395.3	13.9	0.6	1409.2	1409.2			
16	0	4.034		1416.0			1416.0		0.68	1386.8	2.1	
	1		107.6	1394.3	12.2	0.5	1406.5	1406.5				

В таблице 7 все обозначения аналогичны обозначениям в таблице 2.

Из таблицы 7 видно, что в зависимости от кратности свивки повивочных проволок напряжения в проволоках каната класса К-6 (1+5), посчитанные по авторской программе, т.е. с учётом геометрических характеристик каната и механических свойств стали, превышают напряжения, посчитанные по СНиП 2.03.01-84, на 1.4÷2.5 % в повивочных проволоках и на 2.1÷3.7 % в сердечнике. Напряжения в сердечнике превышают напряжения в повивочных проволоках на 0.68÷1.22 % в зависимости от кратности свивки повивочных проволок.

В таблице 8 представлены некоторые данные из таблицы 7, дополненные данными по разнице между длинами структурных элементов, составляющих канат К-6 (1+5).

В таблице 8 все обозначения аналогичны обозначениям в таблице 6.

На рис. 3 представлен график зависимости расхождения напряжений в повивочной проволоке и сердечнике каната К-6, т.е. Δ_{пв} от разницы длин сердечника и повивочной проволоки, т.е. ΔL_{пс}.

Таблица 8

Δ _п каната К-6			
Канат	k, [ед]	Δ _{пв} , %	ΔL _{пс} , мм
К-6 (1+5) 15.4 мм	12	1.2	2.55
	13	1.0	2.35
N _x = 1.9	14	0.9	2.19
	15	0.8	2.04
	16	0.7	1.92

Из таблицы 6 и таблицы 8 видно, что в канате класса К-6 (1+5) расхождение напряжений в сердечнике и повивочной проволоке, т.е. Δ_n , меньше, чем в канате класса К-7 (1+6), так как разница деформативных характеристик (длин) сердечника и повивочной проволоки в стальном канате К-6 (1+5) меньше, чем в стальном канате К-7 (1+6). Таким образом, "1 условие оптимизации" для разработанного автором стального каната класса К-6 (1+5) выполняется.

В канате класса К-6 (1+5) центральная проволока (сердечник), в которой возникают максимальные напряжения, имеет наименьший диаметр и, следовательно, наибольшую прочностную характеристику. Таким образом, прочность всего каната класса К-6 (1+5) определяется прочностью составляющей проволоки, имеющей наибольшую прочностную характеристику. Значит, "2 условие оптимизации" для стального каната класса К-6 (1+5) тоже выполняется.

Покажем выполнение "2 условия оптимизации" наглядно с помощью сравнения эпюр максимальных нормальных напряжений (σ_t) в структурных элементах стальных канатов К-7 (1+6) и К-6 (1+5) при их осевом растяжении и эпюр прочностных характеристик (R_s) этих элементов стальных канатов (пп – повивочная проволока, серд – сердечник). Масштаб произвольный.

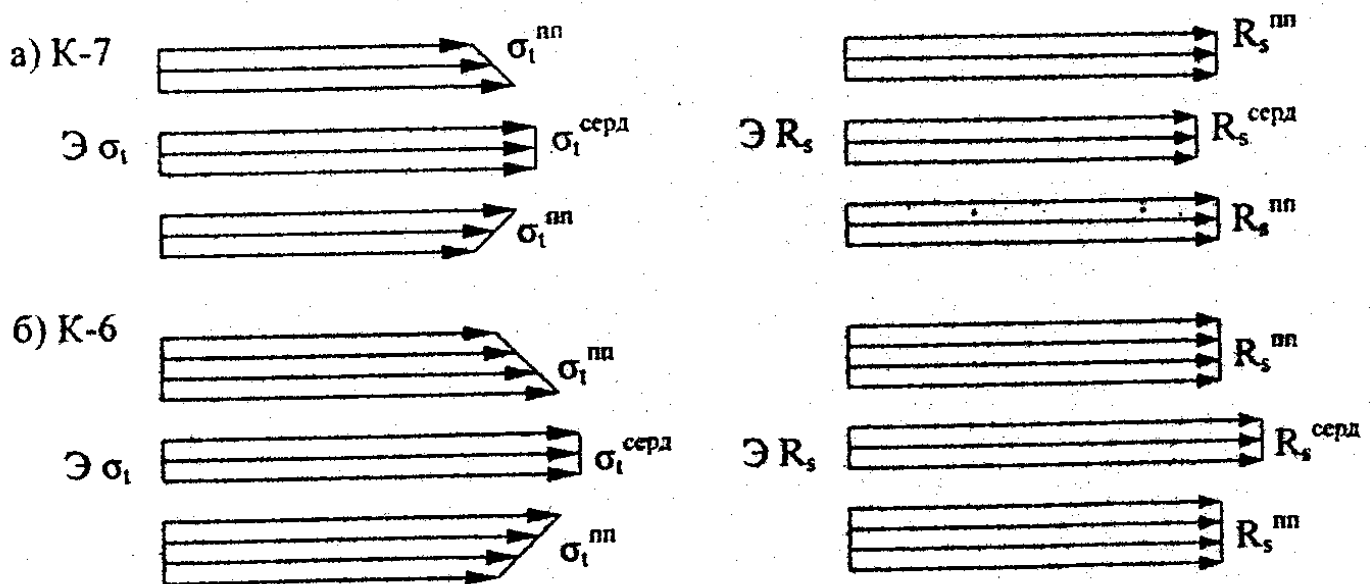


Рис. 5. Соотношение напряжений в элементах стальных канатов К-7 и К-6 и соотношение прочностных характеристик этих элементов канатов

Из рис. 5 видно, что эпюра нормальных напряжений в структурных элементах стального каната К-7 (1+6) абсолютно не конгруэнтна эпюре прочностных характеристик этих элементов, а эпюра нормальных напряжений в структурных элементах стального каната К-6 (1+5) практически конгруэнтна эпюре прочностных характеристик этих элементов. В канате К-6 (1+5) достигается практически полное использование прочностных свойств стальных проволок, т.е. фактическая (агрегатная) прочность каната К-6 (1+5) приближается к теоретической прочности (суммарному разрывному усилию всех проволок в канате).

Вывод: стальной спиральный канат с линейным касанием проволок класса К-6 (1+5) имеет теоретически обоснованную оптимальную конструкцию по критерию максимального использования прочностных свойств стали.

Глава 5. Исследование свойств стальных спиральных канатов при использовании в качестве предварительно напряжённой арматуры железобетонных конструкций.

В США минимальный шаг расстановки арматурных канатов, разрешённый правительственными нормами проектирования "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89)", равен 4 диаметрам каната между осями канатов. В эмпирическом исследовании, описанном в статье "Reduced Strand Spacing in Pretensioned, Prestressed Members," *ACI Structural Journal*, V. 91, No. 3, May-June 1994, предпринята попытка доказать, что этот шаг может быть равен 3.5 диаметра каната между осями канатов.

Автором данной диссертации произведён полный статистический анализ экспериментальных данных, взятых из исследования. Сами исследователи сделали только общие качественные выводы без какой-либо теоретической обработки полученных эмпирических данных. В исследовании изучается влияние шага расстановки арматурных канатов и прочности бетона на зону передачи преднапряжений и предельный изгибающий момент.

Поставленная задача была реализована посредством изготовления и испытания 12 преднапряжённых железобетонных балок таврового сечения, армированных канатами диаметром 0.5" (12.7 мм). Девять арматурных канатов К-7 были установлены в три ряда. Высота балок 22" (55.88 см), ширина ребра 7.0" (17.78 см) и 7.5" (19.05 см) в зависимости от шага расстановки арматурных канатов, ширина полки 20" (50.8 см) и толщина полки 5" (12.7 см). В балках варьировались шаг расстановки арматурных канатов и прочность бетона.

Исследуемые зависимости описаны с помощью двухфакторных уравнений регрессии в виде полиномов второй степени (модель 1 и модель 2):

$$Y_1 = -0.104372 X_1 - 0.799488 X_2 - 0.088044 X_1 X_2 - 0.00001 \text{ — модель 1,}$$

$$Y_2 = 0.211489 X_1 + 0.692925 X_2 + 0.225228 X_1 X_2 - 0.038786 \text{ — модель 2,}$$

Y_1 – зона передачи преднапряжений; Y_2 – предельный изгибающий момент;

X_1 – шаг расстановки арматурных канатов; X_2 – прочность бетона.

Постоянные параметры регрессионных моделей определялись методом наименьших квадратов с использованием статистического пакета Statgraphics.

Основные выводы: уменьшение шага расстановки арматурных канатов с 4 диаметров каната до 3.5 диаметров каната между осями канатов практически не влияет на величину зоны передачи преднапряжений и на предельный изгибающий момент; увеличение прочности бетона значительно сокращает величину зоны передачи преднапряжений и незначительно увеличивает предельный изгибающий момент.

Автором диссертации произведено сравнительное исследование технологических качеств стальных арматурных канатов классов К-7 (1+6), К-19 (1+9+9) и К-6 (1+5) по критерию коррозионной стойкости этих канатов.

Основной характеристикой коррозионной стойкости стального каната является коррозионная активность K_A . Это отношение суммарного периметра проволок каната к суммарной площади поперечного сечения проволок каната. В таблице 9 представлены результаты расчёта K_A стальных канатов.

Конструктивные параметры стальных арматурных канатов

Класс каната	Нормы	$D_{вс}$, мм	$D_{нз}$, мм	A_k , мм ²	K_A , мм ⁻¹	P_0 , мм ⁻¹
К-7 (1+6)	ГОСТ 13840-68	15.0	15.2	138.98	0.795	0.4519
К-19 (1+9+9)	ТУ 14-4-22-71	14.0	14.2	128.65	1.310	0.4698
К-6 (1+5)	Автор работы	15.0	15.4	136.94	0.738	0.4494

В таблице 9 обозначения аналогичны обозначениям в таблице 5.

Чем выше коррозионная активность стального арматурного каната, тем сильнее он подвержен опасности возникновения коррозионного процесса.

Новый стальной канат класса К-6 (1+5), разработанный автором исследования, является более технологичным, чем рекомендованный СНиП 2.03.01-84 стальной канат класса К-7 (1+6) по критерию коррозионной стойкости.

В данной работе произведён сравнительный анализ параметров сцепления с бетоном стальных арматурных канатов классов К-7 (1+6), К-19 (1+9+9) и К-6 (1+5) по критерию трения поверхности этих канатов о бетонную матрицу.

Основной характеристикой трения поверхности стального каната о бетонную матрицу является относительный периметр стального каната по линии соприкосновения с бетоном P_0 . Этот параметр сцепления стального каната с бетоном представляет собой отношение периметра линии соприкосновения каната и бетона в поперечном сечении каната к площади поперечного сечения каната. В таблице 9 представлены результаты расчёта P_0 стальных канатов.

Чем выше относительный периметр стального каната по линии соприкосновения с бетоном, тем больше силы трения поверхности стального каната о бетонную матрицу, т.е. тем лучше сцепление арматурного каната с бетоном.

Новый канат класса К-6 (1+5), разработанный автором исследования, является практически таким же технологичным, как и рекомендованный СНиП 2.03.01-84 канат класса К-7 (1+6) по критерию сцепления с бетоном.

Из таблицы 9 видно, что расхождение площадей поперечных сечений A_k канатов К-6 (1+5) и К-7 (1+6) составляет 2.04 мм² или 1.47 % от площади каната К-7 (1+6). Значит, канат класса К-6 (1+5) номинальным диаметром 15.4 мм и канат класса К-7 (1+6) номинальным диаметром 15.2 мм взаимозаменяемы.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТЫ

1. В зависимости от кратности свивки повивочных проволок напряжения в проволоках стального каната класса К-7 (1+6), посчитанные с учётом геометрических характеристик каната и механических свойств стали, превышают напряжения, посчитанные по СНиП 2.03.01-84, на 1.3÷2.3 % в повивочных проволоках и на 2.2÷3.9 % в сердечнике. Напряжения в сердечнике превышают напряжения в повивочных проволоках на 0.9÷1.6 % в зависимости от кратности свивки повивочных проволок.

2. В зависимости от кратности свивки повивочных проволок напряжения в проволоках стального каната класса К-19 (1+9+9), посчитанные с учётом геометрических характеристик каната и механических свойств стали, превышают напряжения, посчитанные по СНиП 2.03.01-84, на 2.8÷3.5 % в повивочных проволоках второго (наружного) слоя повива, на 6.0÷7.7 % в повивочных проволо-

как первого (внутреннего) слоя повива и на $7.5 \div 9.8$ % в сердечнике. Напряжения в сердечнике превышают напряжения в повивочных проволоках первого слоя на $1.5 \div 2.0$ % и в повивочных проволоках второго слоя на $4.7 \div 6.1$ % в зависимости от кратности свивки повивочных проволок.

3. Исследованы пути повышения эффективности использования прочностных свойств стали в проволоках стального арматурного каната.

4. Произведено всестороннее исследование уточнённого НДС в элементах стального арматурного каната класса К-7 (1+6) в упругопластической стадии работы стали. Исследование показало, что использование упругопластических свойств стали в проволоках стального каната класса К-7 (1+6) практически не увеличивает эффективность использования прочностных свойств стали.

5. Разработан дедуктивным методом научного анализа новый стальной спиральный канат класса К-6 (1+5) с линейным касанием проволок, имеющий теоретически обоснованную оптимальную конструкцию по критерию максимального использования прочностных свойств стали.

6. В зависимости от кратности свивки повивочных проволок напряжения в проволоках стального каната класса К-6 (1+5), посчитанные с учётом геометрических характеристик каната и механических свойств стали, превышают напряжения, посчитанные по СНиП 2.03.01-84, на $1.4 \div 2.5$ % в повивочных проволоках и на $2.1 \div 3.7$ % в сердечнике. Напряжения в сердечнике превышают напряжения в повивочных проволоках на $0.68 \div 1.22$ % в зависимости от кратности свивки повивочных проволок.

7. Применение стального каната класса К-6 (1+5) вместо стального каната класса К-7 (1+6) [ГОСТ 13840-68] в качестве напрягаемой арматуры предварительно напряжённых железобетонных конструкций повышает эффективность использования прочностных свойств арматурной стали.

8. Уменьшение шага расстановки арматурных канатов с 4 диаметров каната до 3.5 диаметров каната между осями канатов практически не влияет на величину зоны передачи преднапряжений и на предельный изгибающий момент. Увеличение прочности бетона значительно сокращает величину зоны передачи преднапряжений и незначительно увеличивает предельный изгибающий момент.

9. Стальной канат класса К-6 (1+5) является более технологичным, чем рекомендованный СНиП 2.03.01-84 стальной канат класса К-7 (1+6) по критерию коррозионной стойкости.

10. Спиральный канат класса К-6 (1+5) является практически таким же технологичным, как и рекомендованный СНиП 2.03.01-84 спиральный канат класса К-7 (1+6) по критерию сцепления с бетоном.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Мусихин В.А., Максимов Ю.В. Учёт технологических и конструктивных факторов, влияющих на величину предварительного напряжения в арматурных канатах. // XV Российская школа по проблемам проектирования неоднородных конструкций. Тезисы докладов. — Миасс: МНУЦ. — 1996. — С. 18-19.