



КАЗАРЯН ВАГАН АРАМОВИЧ

**ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ СЖАТЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТОЕК С
ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОЙ
РАБОЧЕЙ АРМАТУРОЙ**

**Специальность: 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и
сооружения**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Акционерном Обществе «Научно-исследовательский центр «Строительство», Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева (АО «НИЦ «Строительство» - НИИЖБ им. А.А. Гвоздева).

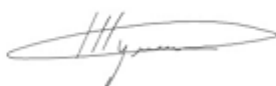
Научный руководитель	Доктор технических наук Тихонов Игорь Николаевич
Официальные оппоненты	Трекин Николай Николаевич доктор технических наук, профессор, Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений» (АО «ЦНИИПромзданий»), начальник отдела конструктивных систем Мордовский Сергей Сергеевич кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО СамГТУ), ассистент кафедры «Строительные конструкции»
Ведущая организация	Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт экспериментального проектирования» (АО «ЦНИИЭП жилища»)

Защита состоится «__» _____ 2018 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д 303.020.02., созданного на базе АО «НИЦ «Строительство», по адресу: 109428, г. Москва, 2-ая Институтская ул., д.6, корпус 5 (конференц-зал НИИЖБ им. А.А. Гвоздева).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6 и на сайте www.cstroy.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2018г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Шулятьев Станислав Олегович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Холоднодеформированная арматура с периодическим профилем разных классов прочности и способов изготовления находит широкое применение в железобетонных конструкциях. Рациональное применение такой арматуры в железобетоне позволяет получить значительную экономию стали и снизить трудоемкость арматурных работ.

В настоящее время в соответствии с отечественными и международными европейскими нормами проектирования железобетонных конструкций диаграммы состояния (деформирования) горячекатаной и термомеханически упрочненной арматуры при растяжении и сжатии принимают одинаковыми.

В своде правил СП 63.13330.2012, который является актуализированной редакцией СНиП 52-01-2003, для холоднодеформированной арматуры класса В500 и Вр500, значения сопротивления сжатию приняты с понижающим коэффициентом условий работы.

В Евроноормах EN 1992-1-1:2004 для арматуры классов прочности $400 \div 600 \text{ Н/мм}^2$ независимо от способов её производства нет различия в нормируемых прочностных характеристиках при растяжении и сжатии.

Учитывая последнее, а также то, что практически отсутствует доступная информация об испытаниях холоднодеформированной арматуры на сжатие как вне бетона, так и в составе железобетонного элемента проведение специальных экспериментально-теоретических исследований по данному вопросу является актуальным.

Степень разработанности темы. Холоднодеформированная арматура изготавливается по разным технологиям и, в результате этого, её механические свойства могут значительно отличаться.

Особенно это касается сопротивления холоднодеформированной арматуры сжатию на величину которого, определяемую опытным путем, может повлиять не только технология изготовления, во многом определяющая проявление эффекта Баушингера, но и несовершенство методики испытаний.

Отсутствие специально поставленных опытов не позволяет сделать объективную оценку величины расчетного сопротивления и характера деформирования холоднодеформированной арматуры при сжатии, а, следовательно, дать предложения по расчету сжатых железобетонных стоек с её применением.

Объектом данных исследований являются холоднодеформированная арматура класса В500С, изготовленная по различным технологиям упрочнения, и сжатые железобетонные стойки с горячекатаной и холоднодеформированной рабочей арматурой.

Предметом исследования являются прочностные и деформационные характеристики при растяжении и сжатии холоднодеформированной арматуры класса В500С, а также прочность и деформативность сжатых железобетонных стоек с горячекатаной и холоднодеформированной рабочей арматурой.

Целью диссертационной работы является повышение надежности и экономической эффективности сжатых железобетонных стоек с холоднодеформированной рабочей арматурой.

Задачи диссертационной работы.

В задачи диссертационной работы входит:

- разработка методики и приспособлений для испытаний натурных образцов арматуры малых диаметров при сжатии;
- определение механических свойств при растяжении и сжатии горячекатаной арматуры периодического профиля класса А400 с номинальным диаметром 16 мм в исходном состоянии и после холодного деформирования осевой вытяжкой на разные величины остаточной деформации (1%; 5%; 9%);
- определение механических свойств при растяжении и сжатии холоднодеформированной арматуры с периодическим профилем класса В500С в исходном состоянии и после предварительной вытяжки до 1% остаточной деформации, из партий, изготовленных разными отечественными производителями;
- экспериментальная оценка прочности и деформативности центрально сжатых железобетонных стоек с холоднодеформированной арматурой в сопоставлении с аналогичными данными для стоек, армированных горячекатаной арматурой в состоянии поставки и после деформационного упрочнения вытяжкой;
- разработка рекомендаций по применению в железобетонных конструкциях холоднодеформированной арматуры, а также предложения по уточнению её расчетных характеристик в расчетных формулах СП 63.13330.2012.

Научную новизну работы составляют:

- характеристики механических свойств при сжатии горячекатаной арматуры с периодическим профилем класса А400 в исходном состоянии и после осевой вытяжки

на разную величину остаточной относительной деформации;

- характеристики механических свойств при сжатии холоднодеформированной волочением арматуры с периодическим профилем класса В500С разных партий отечественного производства;

- экспериментальные данные при сжатии по прочности и деформативности железобетонных стоек с холоднодеформированной рабочей арматурой, изготовленной по разным технологиям.

Практическая значимость полученных результатов состоит в:

- результатах исследований характеристик механических свойств при растяжении и сжатии холоднодеформированной арматуры, изготовленной по разным технологиям;

- расширении области применения холоднодеформированной арматуры.

Теоретическая значимость полученных результатов. Разработаны предложения по расчету и проектированию сжатых железобетонных стоек в части уточнения расчетных значений сопротивления и диаграмм деформирования при сжатии холоднодеформированной арматуры разных технологий изготовления.

Методология и методы исследования. При выполнении настоящей работы использовали общепринятые и авторские методы экспериментальных исследований, а также статистические методы обработки опытных данных.

Личное участие автора в получении результатов работы заключается в:

- проведении анализа материалов исследований по теме диссертации;
- разработке оригинальной методики и приспособлений для испытаний натурных образцов арматуры малых диаметров на сжатие;

- выполнении экспериментальной части работы и получении опытных данных для зависимостей напряжения-деформации, а также описывающих их формул для арматуры классов В500С и А400;

- обработке результатов экспериментальных исследований;

- разработке методики для выполнения осевой вытяжки на разные величины остаточной деформации (1%; 5%; 9%) с помощью электронного экстензометра вместе с испытательной машиной Instron 5984;

- разработке предложений по расчетным характеристикам арматуры класса В500 и расчету сжатых элементов с ее применением для СП 63.13330.2012.

Положения, выносимые на защиту:

На защиту выносятся:

- результаты экспериментальных исследований механических свойств при растяжении и сжатии холоднодеформированной арматуры, изготовленной по разным технологиям;
- результаты экспериментальных исследований железобетонных стоек с холоднодеформированной рабочей арматурой при сжатии, близком к центральному;
- рекомендации по применению в железобетонных конструкциях холоднодеформированной рабочей арматуры разных технологий изготовления;
- предложения по расчету и проектированию сжатых железобетонных стоек в части уточнения расчетных значений сопротивления и диаграмм деформирования при сжатии холоднодеформированной арматуры разных технологий изготовления;
- методика испытаний арматурных образцов на сжатие.

Достоверность результатов подтверждается:

- проведением исследований с применением современного компьютеризованного измерительного оборудования при испытании стоек и современной испытательной машины Instron 5984 при испытании арматуры;
- повторяемостью полученных результатов;
- использованием общепринятых и авторских методик экспериментальных исследований, а также статистических методик обработки опытных данных.

Апробация работы:

Основные положения проведенных исследований докладывались и обсуждались на конференциях и выставках.

1. Международная конференция «Рынки сортового проката и метизов 2012 г.», г. Алушта, Крым, 2012.

2. Международная научно-практическая конференция, посвященная 85-летию кафедры железобетонных и каменных конструкций МГСУ и 100-летию со дня рождения Н.Н. Попова, Москва, 19-20 апреля 2016 год.

3. Конференции и круглые столы, проводимые в рамках ежегодных Международных промышленных выставок «Металл-Экспо» в 2013, 2015 и 2017 гг. Москва, ВДНХ.

Внедрения результатов работы.

Результаты настоящей работы, полученные в процессе исследований

сопротивлений холоднодеформированной арматуры класса В500С осевому растяжению и осевому сжатию были учтены при:

- разработке таблицы 6.14. свода правил СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения»;

- переработке 26-ти типовых серий железобетонных конструкций в НИИЖБ им. А.А.Гвоздева по заданию ООО «ЕВРАЗХолдинг» для применения эффективной арматуры классов А500СП и В500С производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» г. Новокузнецк;

- разработке Технических условий для производства и Рекомендаций по применению, а также использованы при отработке технологии производства холоднодеформированной арматуры класса В500С на предприятиях: ОАО «Белорецкий металлургический комбинат» (г.Белорецк), АО «Центрметалл» (г. Ижевск), «ДиПос» (г.Москва), «ЕВРАЗ Металл Инпром» (г.Москва), «Ленстройдеталь» (г.Санкт-Петербург), «Мечел-Сервис» (г.Москва), «Хромбур» (г.Москва).

Публикации по тематике диссертации. Основные результаты работы изложены в 4-х научных статьях, из которых 2 опубликованы в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК. Общее число печатных листов: 2,66, в том числе авторских печатных листов 0,886.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав основной части, общих выводов, списка использованной литературы из 82 источников. Работа изложена на 149 страницах, содержит 19 таблиц и 40 рисунков.

Диссертационная работа выполнена под руководством доктора технических наук И.Н. Тихонова в НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», экспериментальная часть – в Сертификационном центре АО «НИЦ «Строительство».

Автор выражает признательность за ценную консультационную поддержку, практические рекомендации, замечания, и помощь в проведении испытаний, способствовавшие выполнению работы, научному руководителю д.т.н. Тихонову И.Н., д.т.н. профессору Звездову А.И., д.т.н. профессору Римшину В.И., д.т.н. профессору Тамразяну А.Г., к.т.н. Блажко В.П., к.т.н. Гуменюку В.С., к.т.н. Кузеванову Д.В., к.т.н. Мешкову В.З., к.т.н. Саврасову И.П., к.т.н. Харитонову В.А.,

инж. Вострову М.С., инж. Гладышевой Л.А., инж. Сурикову И.Н., технику Рыкову Ю.В. и др.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и объект исследования, отмечены методология и методы проведения исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе представлен обзор работ отечественных и зарубежных авторов по различным направлениям научных исследований, отраженных в диссертации.

Исследованиям механических свойств различных видов арматуры при растяжении и сжатии, а также технологии изготовления холоднодеформированной арматуры посвящены работы: Губкина С.И., Гуменюка В.С., Мадатьяна С.А., Мешкова В.З., Тарасова А.А., Тимошенко С.П., Тимощука Л.Т., Тихонова И.Н., Харитонов В.А., Michael Klemm, Gerhard Wagenfuhrer, Bernhard Wagner, Porter M.L., Ekberg C.E. и других.

Прочность и деформативность сжатых железобетонных стоек с различными видами арматуры, в том числе при центральном сжатии, исследовалась в работах: Кодыша Э.Н., Кришана А.Л., Мордовского С.С., Расторгуева Б.С., Рискинда Б.Я., Римшина В.И., Никитина Г.П., Смирнова Н.В., Тарасова А.А., Тихонова И.Н., Трекина Н.Н., Чистякова В.А. и многих других.

В результате анализа выполненных исследований установлено:

- применяемые технологии холодного деформирования арматуры для повышения её сопротивления при растяжении могут сопровождаться понижением условного предела текучести при сжатии из-за проявления эффекта Баушингера;
- из-за крайней ограниченности данных по свойствам при сжатии холоднодеформированной арматуры класса В500С, особенности её работы в сжатом железобетоне практически не исследованы.

На основании анализа состояния вопроса поставлены следующие задачи исследований:

- разработать методику испытания натурных образцов арматуры малых диаметров на сжатие;
- определить механические свойства при растяжении и сжатии горячекатаной арматуры периодического профиля класса А400 номинальным диаметром 16 мм в

исходном состоянии и после осевой вытяжки на разные величины остаточной деформации (1%; 5%; 9%);

- определить механические свойства при растяжении и сжатии холоднодеформированной арматуры с периодическим профилем класса В500С в исходном состоянии и после предварительной вытяжки на величину 1% остаточной деформации, из партий, изготовленных разными отечественными производителями;

- оценить экспериментально прочность и деформативность центрально сжатых железобетонных стоек с холоднодеформированной арматурой, изготовленной по разным технологиям, в сопоставлении с аналогичными данными для стоек, армированных горячекатаной арматурой в состоянии поставки и после деформационного упрочнения вытяжкой;

- разработать предложения по уточнению расчетных характеристик и диаграмм состояния при сжатии холоднодеформированной арматуры для СП 63.13330.2012.

В задачи **главы 2** входил сравнительный анализ диаграмм деформирования при растяжении и сжатии натурных образцов арматуры с оценкой основных прочностных и деформационных характеристик, таких как физический или условный предел текучести, модуль упругости, сопротивление малым пластическим деформациям холоднодеформированной арматуры разных видов.

Программа настоящей работы включала оценку влияния следующих способов холодного упрочнения арматурной стали:

- осевое растяжение горячекатаной арматуры класса А400 с разным уровнем (1%; 5%; 9%) остаточной деформации;

- осевое растяжение арматуры класса В500С до уровня остаточной деформации (вытяжки) $\varepsilon_{ост} \approx 1\%$.

В процессе работы была разработана оригинальная методика и приспособления для проведения статических испытаний на сжатие при нормальной температуре натурных образцов арматуры с периодическим профилем (рисунок 1).

Образцы арматуры испытывали на растяжение до разрыва в соответствии с ГОСТ 12004-81. Особенность выполненных испытаний образцов на растяжение заключалась в применении электронного экстензометра для измерения продольных деформаций на базе 12,5 мм и бесступенчатое непрерывное повышение нагрузки с одинаковой скоростью нарастания относительных деформаций (рисунок 2).

При сжатии образцов, как и в случае испытания арматуры на растяжение, электронная система экстензометра и динамометрического датчика обеспечивала непрерывное построение диаграммы деформирования и определение упруго-пластических ($\sigma_{0,2}^c$; $\sigma_{0,02}^c$; $\sigma_{0,05}^c$) и деформационных (E_s^c ; ε_s^c) характеристик механических свойств арматуры (рисунок 3).



Рисунок 1 – Образец арматуры для испытания на сжатие и элементы оснастки

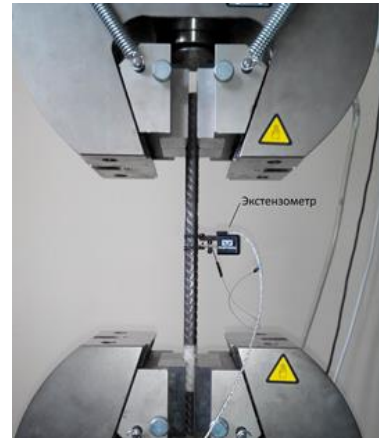


Рисунок 2 – Испытание арматуры на растяжение

На растяжение и сжатие испытывали не менее пяти образцов-близнецов.



Рисунок 3 – Испытание на сжатие

Данные испытаний при сжатии и растяжении горячекатаной арматуры периодического профиля класса А400 по ГОСТ 5781-82 (сталь марки 25Г2С) диаметром 16 мм в состоянии поставки (исходное состояние) и после холодной деформации растяжением до заданных величин относительной остаточной деформации (вытяжки) $\varepsilon_{ост}=1\%$; 5%; 9%, представлены на рисунке 4.

Диаграммы деформирования при сжатии и растяжении холоднодеформированной арматуры периодического профиля класса В500С диаметром 12 мм по ГОСТ Р 52544 в состоянии поставки (исходное состояние) и после холодной деформации растяжением до величины относительной остаточной деформации (вытяжки) $\varepsilon_{ост}=1\%$, представлены на рисунке 5. Образцы для испытаний

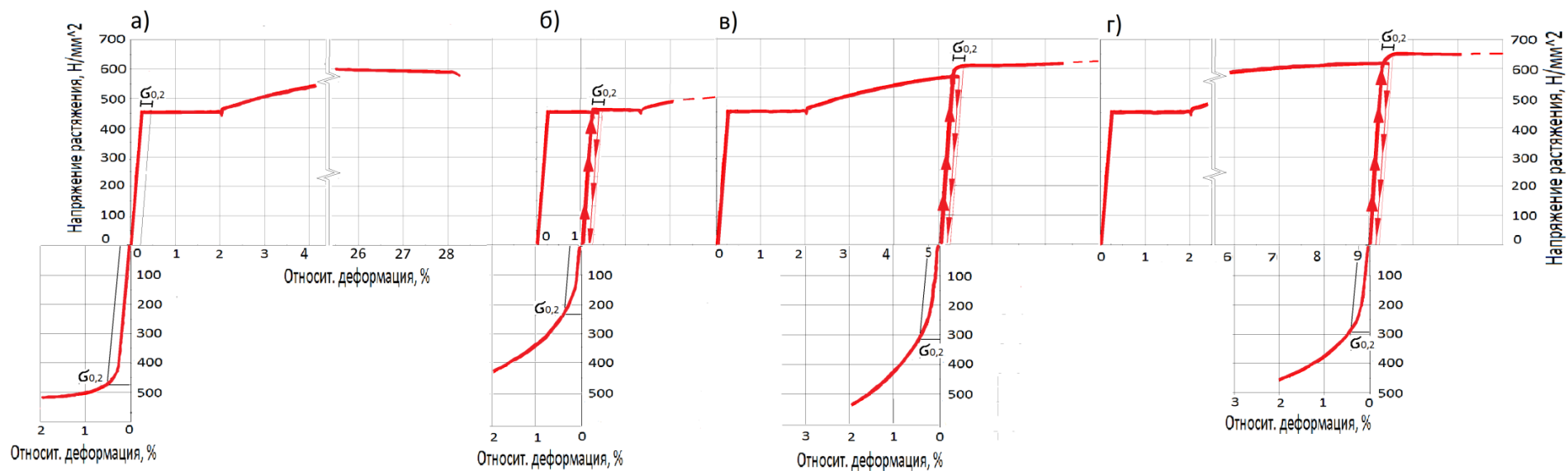


Рисунок 4 – Диаграммы деформирования при растяжении и сжатии арматуры класса А400
(марка стали 25Г2С) диаметром 16 мм:

- а - в исходном состоянии;
- б – после вытяжки с остаточной деформацией 1%;
- в - после вытяжки с остаточной деформацией 5%;
- г - после вытяжки с остаточной деформацией 9%;

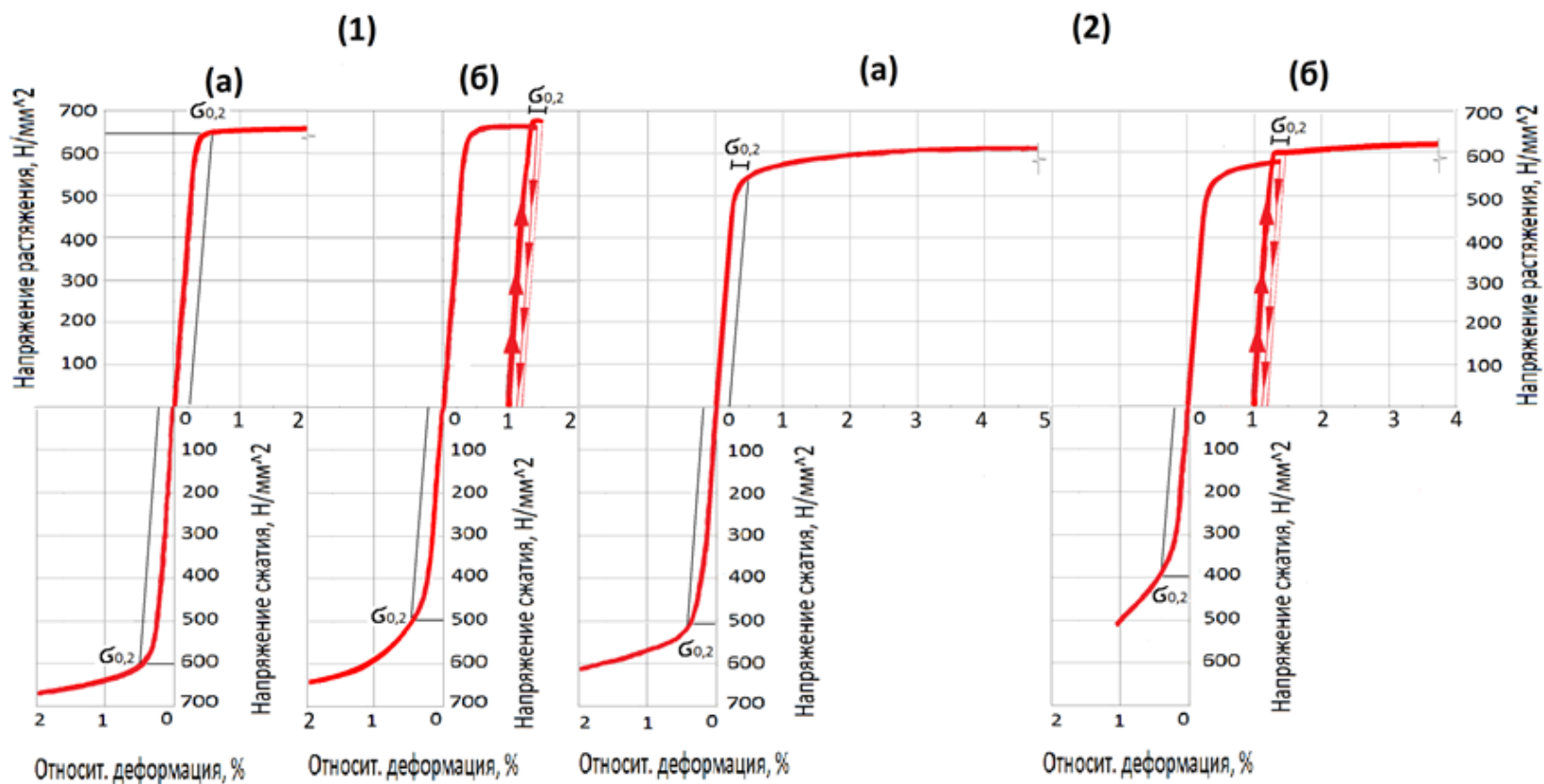


Рисунок 5 – Диаграмма деформирования при растяжении и сжатии арматуры класса B500C

в исходном состоянии и после вытяжки

1 – предприятие (партия №1): а - в исходном состоянии; б – после вытяжки с остаточной деформацией, равной 1%;

2 – предприятие (партия) №2: а - в исходном состоянии; б – после вытяжки с остаточной деформацией, равной 1%

отбирали на двух отечественных предприятиях (обозначены соответственно предприятие или партия №1, №2).

По результатам испытаний установлено:

- в состоянии поставки прочностные и деформационные характеристики горячекатаной арматуры класса А400 и холоднодеформированной арматуры класса В500С при растяжении и сжатии отличаются незначительно, в пределах до 10%, при уменьшении сопротивления при сжатии;

- предварительная холодная вытяжка горячекатаной арматуры класса А400 до 1%, 5% и 9% относительных остаточных деформаций ($\varepsilon_{s,ост}$) приводит к уменьшению, по сравнению с исходным состоянием на 50% и более величин условных пределов текучести ($\sigma_{0,2}^c$) и упругости ($\sigma_{0,02}^c$ и $\sigma_{0,05}$) при сжатии, что обусловлено проявлением эффекта Баушингера;

- при одинаковых с горячекатаной арматурой значениях относительных остаточных деформаций ($\varepsilon_{s,ост} = 1\%$) после предварительного растяжения у холоднодеформированной арматуры класса В500С, условный предел текучести при сжатии уменьшился на 21%, что значительно меньше, чем у горячекатаной арматуры класса А400 ($\geq 50\%$);

В третьей главе изложены методика и результаты экспериментальных исследований железобетонных стоек при кратковременном статическом осевом сжатии (рисунок 6). Изготовлены и испытаны до разрушения четыре серии опытных образцов размером 160x160x650 мм по 3 образца-близнеца в каждой серии.



Рисунок 6 – Испытание стойки

Образцы - стойки опытных серий различались рабочим армированием (таблица 1). В ходе испытаний опытных стоек поэтапно определяли: деформации бетона боковых граней стойки на базе 400 мм индикаторами часового типа; местные относительные деформации бетона и стержней рабочей арматуры в середине высоты тензорезисторами.

В результате применения компьютеризованного измерительного оборудования (ТДС-530, Япония) при испытании стоек на сжатие по общепринятой методике со ступенчатым подъемом нагрузки удалось время испытания одной стойки сократить до 1 часа, что практически исключило влияние реологических факторов. Результаты испытаний одного из образцов 1-ой серии стоек приведены на рисунках 7, 8.

Экспериментально установлено:

- в принятых условиях испытания разрушение стоек происходило при наличии случайного эксцентриситета, величина которого не была постоянной;
- применение рабочей арматуры класса В500С в стойках серии II увеличило их несущую способность на 6,9% по сравнению со стойками серии III с рабочей арматурой класса А400 при близких значениях в сравниваемых сериях коэффициента армирования μ нормальных сечений;
- стойки серий I и III с разными параметрами армирования нормальных сечений имели практически одинаковую несущую способность;
- применение в стойках серии IV рабочей арматуры класса А400, подвергнутой предварительной вытяжке до $\varepsilon_{s,ост}=1\%$, уменьшило их несущую способность по сравнению со стойками серии I с арматурой В500С, в среднем, на 8,9%;
- перед разрушением стоек всех серий, кроме серии IV, лишь в части стержней рабочей арматуры были достигнуты напряжения, равные R_{sc} , примененных видов арматуры по СП 63.13330.2012, в стойках серии IV перед разрушением напряжения практически во всех стержнях класса А400 не достигли опытных значений сопротивления сжатию ($\sigma_{0,2}^c=236,4 \text{ Н/мм}^2$) (таблицы 1 и 2).

Перед разрушением местные продольные относительные деформации сжатия бетона в стойках I-1; II-1; III-1; IV-1 достигали или превышали значение $\varepsilon_{b2}=350 \cdot 10^{-5}$.

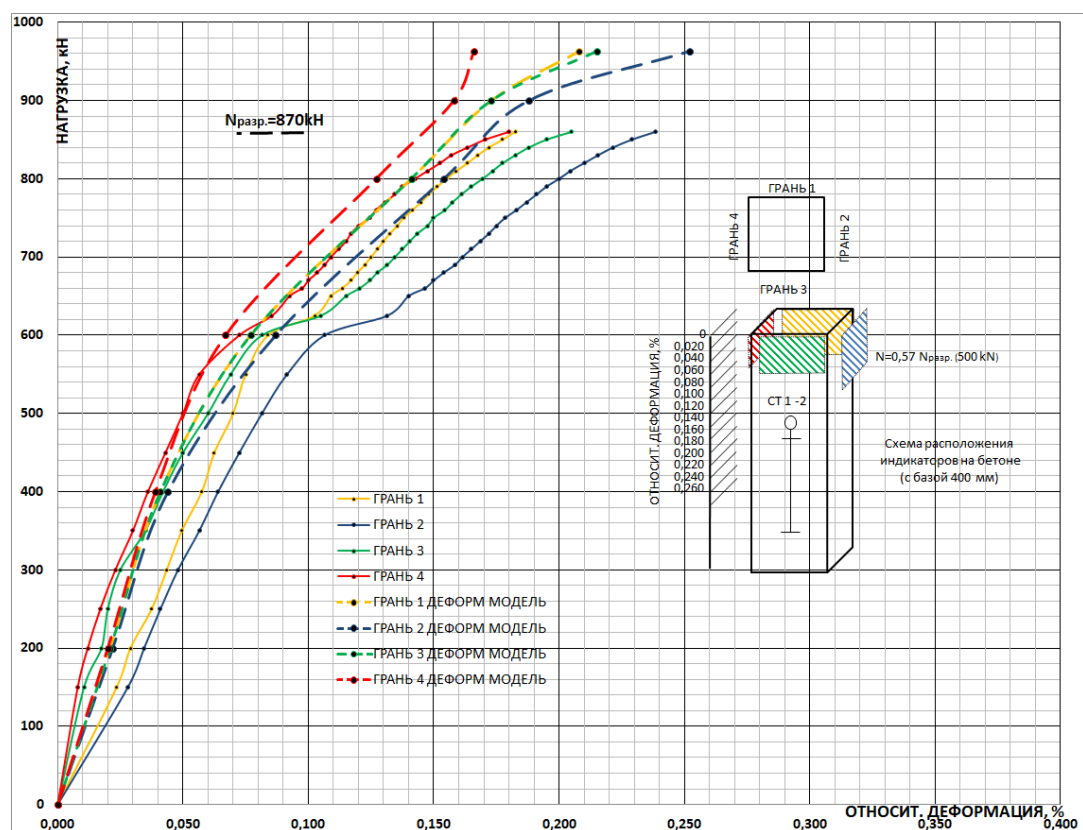


Рисунок 7 – Серия I стойка 3. Показания индикаторов на бетоне по опытным данным и деформации бетона полученные из расчета с использованием диаграммы Прандтля по деформационной модели.

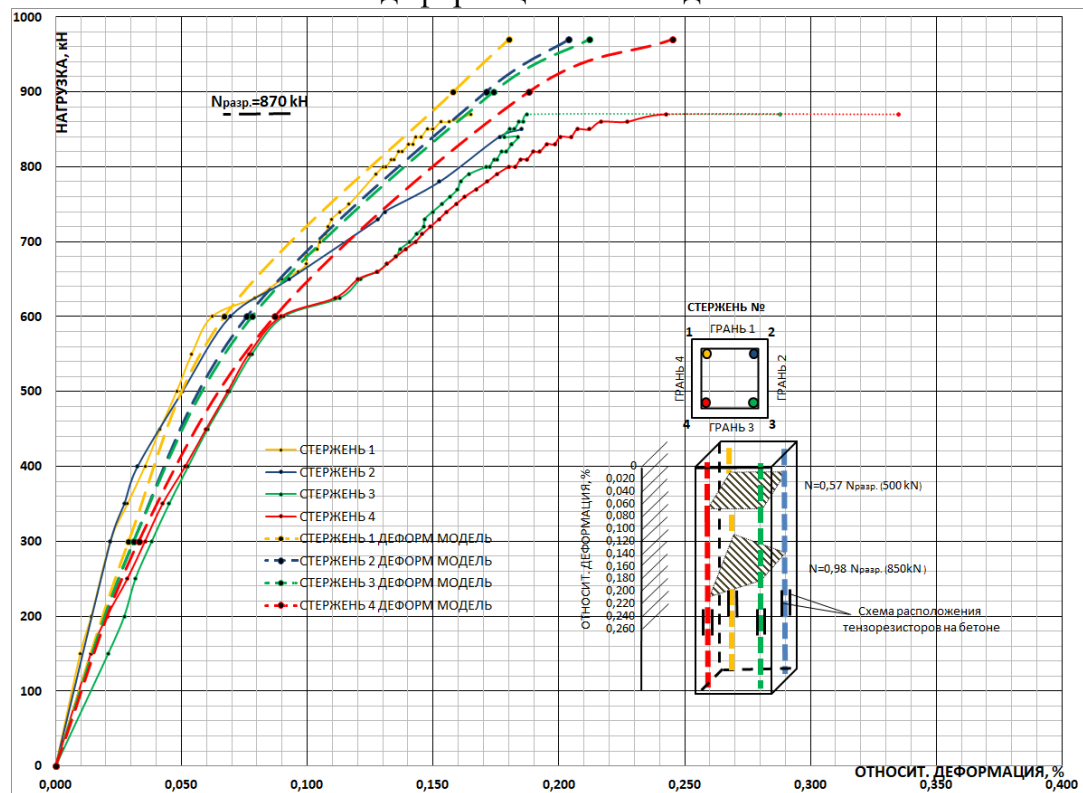


Рисунок 8 – Серия I стойка 3. Показания тензорезисторов на арматуре по опытным данным и деформации арматуры полученные из расчета по деформационной модели с использованием фактической диаграммы.

В четвертой главе представлена аналитическая оценка несущей способности опытных железобетонных стоек.

Величина напряжений в рабочей арматуре сжатых стоек и доля воспринимаемой ею нагрузки перед разрушением, определялись по замеренным с помощью наклеенных на стержнях тензорезисторов относительным деформациям. Для этого использовали условную диаграмму работы арматуры при сжатии, которая была построена по средним значениям характеристик механических свойств E_s^c ; $\sigma_{0,02}^c$; $\sigma_{0,05}^c$; $\sigma_{0,2}^c$, полученных ранее из испытаний на сжатие образцов примененных партий арматурного проката. Такой подход, обусловленный напряженно-деформированным состоянием полностью сжатых нормальных сечений при испытании опытных стоек, позволил определить напряжения в арматуре с определенной надежностью.

В таблице 2 представлены зафиксированные относительные деформации и соответствующие им напряжения в стержнях рабочей арматуры, воспринимаемые ими перед разрушением опытных стоек, а также полученные из испытаний значения разрушающих нагрузок. Видно, что перед разрушением напряжения в арматуре отдельных стоек доходили в среднем до напряжений, близких по значению условному пределу упругости $\sigma_{0,02}^c$.

Согласно СП 63.13330.2012, расчет по прочности прямоугольных сечений внецентренно сжатых элементов производили по формулам (1) и (2), (пункт 8.1.14 и 8.1.16 СП), учитывая фактические параметры сечений, условия опирания стоек при испытании, а также установленные сопротивления сжатию бетона и арматуры.

$$N \cdot e \leq R_b \cdot b \cdot h (h_0 - 0,5h) + R_{sc} \cdot A'_s (h_0 - a') ; \quad (1)$$

$$N \leq N_{ult} ; \quad N_{ult} = \varphi \cdot (R_b \cdot A + R_{sc} \cdot A_{s,tot}) . \quad (2)$$

Расчет по формуле (1) осуществляли, приняв в первом приближении за начальный эксцентриситет приложения продольной силы e_0 нормируемое значение случайного эксцентриситета $e_a = 10$ мм, то есть $e_0 = e_a = 10$ мм.

Начальный эксцентриситет продольной силы e_0 , оцененный геометрическим способом для испытанных стоек, составил (от 0,5 до 3 мм). При начальном эксцентриситете продольной силы $e_0 \leq \frac{h}{30}$ (5,3 мм) и гибкости $20 \geq \frac{l_0}{h}$ (3,66 мм), где в скобках приведены значения для рассматриваемых стоек, расчёт прочности сжатых элементов прямоугольного сечения с арматурой, расположенной у противоположных

Таблица 2 – Деформации и напряжения в стержнях перед разрушением стоек, опытные разрушающие нагрузки

№№ стоек	Количество арматуры, класс, диаметр, мм	Коэффициент армирования сечения, μ , %	Разрушающая нагрузка стоек, $N_{ult}^{оп}$, кН		Относительная деформация, $\varepsilon'_s \cdot 10^{-5}$, стержня №				Напряжение σ'_s , Н/мм ² в стержне №				Среднее значение $\bar{\sigma}_s^H$, Н/мм ²	Фактическая призмная прочность бетона σ_b , Н/мм ²
			опытная	средняя	1	2	3	4	1	2	3	4		
I-1	4 B500Ø12	1,76	1070	1000	202	168	221	277	389	324	420	467	400	34,6
I-2			1060		234	256	206	188	432	454	397	362	411,3	34,6
I-3			870		165	174	187	242	318	335	360	442	363,8	30,5
II-1	8 B500Ø12	3,59	1100	1080	177	164	173	192	341	316	333	370	383	33
					217	247	259	203	414	446	453	391		
II-2			1000		162	164	169	174	312	316	325	335	332,9	30,5
					186	179	172	177	358	345	331	341		
II-3			1140		222	240	241	252	421	440	441	450	403,4	33
					175	245	186	174	337	445	358	335		
III-1	4 A400Ø16	3,32	950	1010	228	227	230	194	408	407	410	336	390,3	29
III-2			1070		196	215	212	213	369	394	390	392	386,3	32
III-3			1010		160	198	331	185	313	372	455	356	374,0	30
IV-1	4 A400Ø16 с вытяжкой до $\varepsilon_{ост}=1\%$	3,27	880	920	289	181	225	151	215	179	194	165	188,3	33
IV-2			930		167	184	158	206	175	180	170	188	178,3	33
IV-3			950		165	170	240	208	174	176	199	189	184,5	33

в плоскости изгиба сторон, согласно СП 63.13330.2012 (пункт 8.1.16) допускается производить по формуле (2).

В таблице 3 показана оценка несущей способности опытных железобетонных стоек, которая выполнена путем сравнения опытных и расчетных значений разрушающей нагрузки, полученных методом предельных усилий (по формулам 1, 2) и по деформационной модели расчета.

Для каждой из формул (1) и (2) рассматривали 3 варианта расчета.

1. В расчете использованы фактические значения напряжений в арматуре, определенные по фактическим величинам деформаций стержней арматуры в стойках и среднестатистической диаграмме испытаний на сжатие.

2. В расчете использован условный предел текучести, полученный в результате статистического анализа испытаний арматуры при сжатии ($\sigma_{0,2}^c$ при $p=0,95$).

3. В расчете использовали расчетные сопротивления: $R_{sc}=400$ Н/мм² для холоднодеформированной арматуры класса В500; $R_{sc}=350$ Н/мм² для арматуры класса А400; $R_{sc}=170$ Н/мм² для арматуры класса А400, подвергнутой вытяжке $\varepsilon_{s,ост}=1\%$. Прочность бетона принимали, равную $R_b=(29-34,6)$ МПа, определенную по испытаниям кубиков и призм.

В расчетах по деформационной модели принимали диаграмму состояния сжатого бетона двухлинейную, $R_b=(29-34,6)$ МПа. Диаграмму состояния сжатой арматуры принимали в двух вариантах: по двухлинейной диаграмме согласно СП 63.13330.2012 и диаграммам, полученным путем построения и описания опытных зависимостей напряжения - деформации при сжатии для арматуры классов В500С и А400.

Принятые в расчетах эмпирические зависимости выражаются в виде комбинации из двух составных частей, отвечающих работе арматуры при сжатии на первом участке, соответствующем упругой работе.

$$\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s, \quad (3)$$

- на втором участке в виде выражения:

$$\sigma_s = a \cdot \varepsilon_s^b + c, \quad (4)$$

где а, b, c - показатели, численные значения которых определены опытным путем для арматуры классов В500С, А400 (таблица 4).

Таблица 3 Фактические и расчетные разрушающие нагрузки стоек

№№ стоек	Разрушающая опытная нагрузка, кН	Расчетные значения разрушающей нагрузки								Значение эксцентриситета e, по осям x/y, мм
		По предельным усилиям				По деформационной модели с использованием				
		По формуле (4.1) эксцент. e=10мм		По формуле (4.2) $\varphi = 0,93$		Диаграммы Прандля для арматуры		Фактической диаграммы арматуры		
		Знач., кН	Отклон. опытно. от расч., %	Знач., кН	Отклон. опытно. от расч., %	Знач, кН	Отклон. опытно. от расч., %	Знач, кН	Отклон. опытно. от расч., %	
		*/**/***	*/**/***	*/**/***	*/**/***					
I-1	1070	880/907/880	21,6/18/21,6	975/1004/975	9,7/6,6/9,7	983	8,9	960	11,5	2,0 / 0,5
I-2	1060	884/907/880	19,9/18/21,6	979/1004/975	8,3/5,6/8,7	983	7,8	970	9,3	2,0 / 0,5
I-3	870	780/820/793	11,5/6,1/9,7	864/908/879	0,7/-4,2/-1	922	-5,6	929	-6,4	1,5 / 0
II-1	1100	970,4/1035/982	13,4/6,3/12	1075/1148/1089	2,3/-4,2/1	1132	-2,8	1142	-3,7	2,5 / 1,0
II-2	1040	881/983,4/931	18/5,8/11,7	975,9/1089/1031	6,6/-4,6/0,9	1086	-4,2	1097	-5,2	1,0 / 1,0
II-3	1140	985/1035/982	15,7/10,1/16	1091/1148/1089	4,5/-0,7/4,7	1140	0	1148	-0,7	2,0 / 0
III-1	950	873/926/845	8,8/2,6/12,4	966/1025 /936	-1,7/-7,3/1,5	993	-4,3	1031	-7,9	1,0 / 1,0
III-2	1070	932/988/907	14,8/8,1/18	1032,5/1094/1005	3,6/2,2/6,5	1069	0,1	1121	-4,5	0,7 / 0,7
III-3	1010	882/947/866	14,5/6,7/16,6	977/1048/959	3,4/-3,6/5,3	1047	-3,5	1107	-8,8	3,0 / 0,7
IV-1	880	815/835,8/804	8/5,3/9,5	903/926/889,5	-2,5/-5/-1,1	-	-	-	-	2,0 / 0,5
IV-2	930	809/835,8/804	15/11,2/15,7	895/926/889,5	3,9/0,4/4,5	-	-	-	-	2,0 / 0,5
IV-3	950	813/835,8/804	16,9/13,6/18	901/926/889,5	5,4/2,6/6,7	-	-	-	-	1,5 / 0
* В расчете использованы фактические значения напряжений в арматуре, определенные по величинам деформаций арматуры в стойках и среднестатистической диаграмме испытаний на сжатие. ** В расчете использованы значения условного предела текучести, полученные в результате статистического анализа испытаний арматуры при сжатии ($\sigma_{0,2}^c$ при p=0,95) ***В расчете использованы $R_{sc} = 400 \text{ Н/мм}^2$ для холоднодеформированной арматуры класса В500; для стоек с арматурой класса А400 $R_{sc} = 350 \text{ Н/мм}^2$; $R_{sc} = 170 \text{ Н/мм}^2$ для арматуры класса А400, подвергнутой вытяжке $\varepsilon_{s,oct}=1\%$.										

Таблица 4 – Значения показателей a, b, c в формуле (4)

Арматура классов	Коэффициенты зависимости		
	a	b	c
B500C	-70	-0.7	600
A400	-70	-0.7	640

При этом в расчетах с использованием двухлинейной диаграммы принимали:

- для стоек с арматурой класса B500C $R_{s,c}=400 \text{ Н/мм}^2$,
- для стоек с арматурой класса A400 $R_{s,c}=350 \text{ Н/мм}^2$.

Расчеты деформаций бетона и арматуры при поэтапном нагружении сжатых стоек

по деформационной модели с использованием для бетона двухлинейной диаграммы и для арматуры диаграмм, описываемых формулами (3) и (4), показали хорошую сходимость с опытом (рисунок 7 и рисунок 8).

Из таблицы 3 видно, что отклонения от опытных данных (в сторону запаса) при расчете по деформационной модели, с использованием:

- двухлинейной диаграммы, составляет от -5,6 до 8,9 %;
- фактической диаграммы арматуры, составляет от -8,8 до 11,5 %.

Отклонение от опытных данных (в сторону запаса) в расчете по предельным усилиям, с использованием:

- формулы 1, с учетом $e=10 \text{ мм}$, вариантов расчета:

- 1- от 8,8 до 21,6 %;
- 2- от 2,6 до 18 %;
- 3- от 9,5 до 21,6 %;

- формулы 2, с учетом $\varphi=0,93$, вариантов расчета:

- 1- от -1,7 до 9,7 %;
- 2- от -7,3 до 6,6 %;
- 3- от -1,1 до 9,7 %;

Заключение

1. Разработана методика и приспособления для проведения статических испытаний на сжатие натуральных образцов арматуры с периодическим профилем.

2. Показано, что в состоянии поставки (исходное состояние) условный предел текучести при сжатии $\sigma_{0,2}^c$ горячекатаной арматуры класса А400 (марка стали 25Г2С) в среднем на 6,9% превышает аналогичный показатель при растяжении $\sigma_{0,2}$, а средние величины модуля упругости E_s и E_s^c и ряда характерных точек диаграмм деформирования ($\sigma_{0,02}$; $\sigma_{0,05}$; $\sigma_{0,02}^c$; $\sigma_{0,05}^c$) при растяжении и сжатии различаются незначительно (в пределах 10%). Это позволяет для практических расчетов считать диаграммы деформирования горячекатаной арматуры при растяжении и сжатии одинаковыми, как это принято в EN1992-1-1:2004 и в СП 63.13330.2012.

3. Экспериментально установлено, что предварительная холодная вытяжка горячекатаной арматуры до 1%, приводит к уменьшению по сравнению с исходным состоянием в 2 раза и более величин условных пределов текучести ($\sigma_{0,2}^c$) и упругости и ($\sigma_{0,02}^c$ и $\sigma_{0,05}^c$) при сжатии, что, очевидно, обусловлено проявлением эффекта Баушингера. При этом величина модуля E_s^c , уменьшается на 20%. Такой уровень вытяжки практически не оказал влияние на значения аналогичных характеристик механических свойств исследуемой арматуры при растяжении.

4. После вытяжки исследованной горячекатаной арматуры на 5% и 9% относительной остаточной деформации $\varepsilon_{ост}$ средние значения $\sigma_{0,02}^c$; $\sigma_{0,05}^c$; $\sigma_{0,2}^c$ при сжатии и $\sigma_{0,02}$; $\sigma_{0,05}$; $\sigma_{0,2}$; σ_B при растяжении увеличились по сравнению с уровнем аналогичных показателей, определенных после вытяжки с $\varepsilon_{ост} = 1\%$. Если рассматривать эти изменения в сравнении с исходными данными, то уровень показателей механических свойств при растяжении возрос, а при сжатии уменьшился.

5. Испытание на растяжение и на сжатие смежных образцов арматуры класса В500С диаметром 12 мм, отобранных от 2-х промышленных партий, изготовленных на 2-х отечественных предприятиях, выявило различия при исследовании образцов. Различия отмечались, как при сжатии, так и при растяжении арматуры.

6. Диаграмма деформирования арматуры класса В500С при растяжении и сжатии, характеризуется равенством значений модулей упругости и в пределах 10%

снижением средних значений сопротивлений при сжатии ($\sigma_{0,02}^c$; $\sigma_{0,05}^c$; $\sigma_{0,2}^c$) по сравнению с аналогичными характеристиками механических свойств при растяжении.

7. При одинаковом значении относительной остаточной деформации $\varepsilon_{ост} \approx 1\%$ степень изменения характеристик механических свойств у холоднодеформированной арматуры меньше, чем у горячекатаного арматурного проката. Так, условный предел текучести при сжатии $\sigma_{0,2}^c$ в среднем уменьшился на 21% по сравнению с таковым для арматуры класса В500С в исходном состоянии.

8. В результате выполнения испытаний четырех серий опытных железобетонных стоек на сжатие размером 160x160x650 мм (по 3 образца-близнеца в каждой серии), было установлено:

- применение рабочей арматуры класса В500С в стойках увеличило их несущую способность на 6,9% по сравнению со стойками с рабочей арматурой класса А400 при близких значениях коэффициента армирования μ нормальных сечений;
- несущая способность стоек с арматурой А400 и стоек с арматурой В500С, имеющих вдвое меньший коэффициент армирования, была практически одинаковой;
- несущая способность стоек с арматурой А400, подвергнутой предварительной вытяжке до $\varepsilon_{s,ост}=1\%$, была в среднем на 8,9% ниже, чем у стоек с арматурой В500С, имеющих вдвое меньший коэффициент армирования.

9. Отклонения расчетных значений от опытных при расчете по деформационной модели (таблица 3) с использованием:

- двухлинейной диаграммы, от -5,6 до 8,9 %;
- фактической диаграммы арматуры, от -8,8 до 11,5 %.

Отклонение расчетных значений от опытных при расчете по предельным усилиям (таблица 3) с использованием:

- формулы 1 от 2,6 до 21,6%;
- формулы 2, с учетом коэффициента $\varphi=0,93$ от -1,1 до 9,7%.

10. Результаты проведенных экспериментально-теоретических исследований позволили рекомендовать приведенные ниже величины сопротивлений исследованных видов арматуры при сжатии при назначении их расчетных характеристик в действующих нормативных документах:

- 400 Н/мм² - для холоднодеформированной арматуры класса В500,
- 350 Н/мм² - для горячекатаной арматуры класса А400;

170 Н/мм² - для арматуры класса А400, упрочненной вытяжкой до остаточной деформации $\varepsilon_{s,ост}=1\%$.

11. Арматура класса В500 при обеспечении необходимого контроля за технологией её производства может быть эффективно использована для армирования железобетонных конструкций. В случае принятия в нормах расчетных характеристик арматуры класса В500 при растяжении и сжатии как для арматуры класса А500, значительно повысятся объемы её применения, особенно при армировании стен и стоек жилых, общественных и промышленных зданий. Расчеты сжатых железобетонных конструкций с холоднодеформированной арматурой следует производить согласно положениям СП 63 133330.2012 с расчетными сопротивлениями и диаграммами состояния арматуры при сжатии рекомендуемыми выше.

Перспективами дальнейшей разработки темы исследований являются:

1. Сбор данных и статистическая обработка результатов испытаний холоднодеформированной арматуры при растяжении и сжатии, производимый по различным технологиям.
2. Разработка нормативного документа для проведения испытаний и оценки свойств арматуры (прочность, деформативность) при сжатии.
3. Продолжение исследований по совершенствованию методики расчета железобетонных стоек при внецентренном сжатии.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Казарян В.А.** Механические свойства при сжатии горячекатаной арматуры класса А400 после остаточной деформации растяжением /Тихонов И.Н., Гуменюк В.С., Казарян В.А. // Бетон и железобетон. - 2014 - №2. – С. 5-9.

2. **Казарян В.А.** Механические свойства при растяжении и сжатии холоднодеформированной арматуры класса В500С /Тихонов И.Н., Гуменюк В.С., Казарян В.А. // Бетон и железобетон. - 2014 - №2. – С. 9-13.

Публикации в других изданиях:

3. **Казарян В.А.** Проектирование железобетонных конструкций при аварийных воздействиях с учетом свойств арматурного проката. /Тихонов И.Н., Казарян В.А.// Сборник «Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия. Под редакцией А.Г.Тамразяна, Д.Г. Копаницы. – 2016. – С 433-440.

4. **Казарян В.А.** Несущая способность сжатых железобетонных элементов с холоднодеформированной рабочей арматурой класса В500С /Тихонов И.Н., Гуменюк В.С., Казарян В.А. // Жилищное строительство. – 2016. - №10. - С.25-29.