

И.Г. ЧЕПИЗУБОВ¹, А.А. САФОНОВ², Г.А. МОЙСЕЕНКО¹¹НИИСФ РААСН, г. Москва, Россия²ВНИИЖелезобетон, г. Москва, Россия

СОВМЕСТНАЯ РАБОТА РЕЗЬБОВЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ

Аннотация. При расчете железобетонных конструкций для наиболее точного моделирования их напряженно-деформированного состояния используется диаграммный метод расчета. При расчете по данному методу используются реальные диаграммы деформирования материала под нагрузкой. Использование данного метода для расчета железобетонного элемента в сечениях с механическими стыками арматуры обуславливает необходимость проведения экспериментальных исследований для уточнения особенностей совместной работы бетона с арматурой в местах установки стыков. В частности, необходимо исследовать особенности деформирования механических соединений арматуры совместно с бетоном при циклическом режиме нагружения. Данные вопросы рассматриваются в предлагаемой статье. Приводятся методики и результаты экспериментальных исследований работы арматурного проката класса А500С и механических соединений арматуры на конической резьбе в свободном состоянии и при совместной работе с высокопрочным бетоном класса В60. Исследованы два режима нагружения – статическое растяжение и многоцикловое растяжение. Выявлены особенности работы механических соединений арматуры на резьбе при указанных режимах нагружения с учетом влияния сцепления с бетоном. Полученные результаты экспериментальных исследований являются основой для развития диаграммного метода расчета железобетонных конструкций в сечениях с механическими соединениями арматуры.

Ключевые слова: арматура, бетон, механическое соединение арматуры, циклическое нагружение, диаграммный метод расчета.

I.G. CHEPIZUBOV¹, A.A. SAFONOV², G.A. MOISEENKO¹¹NIISF RAASN, Moscow, Russia²VNIIZhelezobeton, Moscow, Russia

JOINT OPERATION OF THREADED MECHANICAL CONNECTIONS OF REINFORCEMENT WITH CONCRETE

Abstract. The diagrammatic calculation method is used in the calculation of reinforced concrete structures for the most accurate modeling of its stress-strain state. When calculating using this method, real diagrams of material deformation under load are used. The use of this method to calculate a reinforced concrete element in sections with mechanical connections of reinforcement necessitates experimental studies to clarify the features of the joint work of concrete with reinforcement in places where mechanical connections are installed. In particular, it is necessary to study the features of deformation of mechanical connections of reinforcement together with concrete during cyclic loading. These issues are discussed in the proposed article. The methods and results of experimental studies of the operation of rebar rolled products of class A500C and mechanical connections by conical threads in a free state and when working with high-strength concrete of class B60 are presented. Two loading modes have been studied – static stretching and multi-cycle stretching. The peculiarities of the operation of mechanical connections by threads under the specified loading conditions, taking into account the effect of adhesion to concrete, are revealed. The experimental research results obtained are the basis for the development of a diagrammatic calculation method for reinforced concrete structures in sections with mechanical reinforcement connections.

Keywords: reinforcement, concrete, mechanical connection of reinforcement, cyclic loading, diagram calculation method.

© Чепизубов И.Г., Сафонов А.А., Моисеенко Г.А., 2025

Введение

На сегодняшний день наиболее точным методом расчета железобетонных конструкций является диаграммный метод. В основе данного метода лежит использование реальных диаграмм деформирования материала под нагрузкой при моделировании напряженно-деформированного состояния конструкции. Это обуславливает актуальность проведения экспериментальных исследований, нацеленных на получение зависимостей «напряжение-деформация» для материалов и конструкций при различных режимах и условиях нагружения.

В настоящее время в российском строительстве широко применяются механические соединения арматуры при помощи муфт на резьбе, изготавливаемых различными производителями. Такое соединение отвечает требованиям экономической целесообразности и технологичности изготовления в условиях строительной площадки. Однако, подобные соединения обладают повышенной деформативностью по сравнению с цельным арматурным стержнем, что, в свою очередь, сказывается на напряженно-деформированном состоянии и трещиностойкости бетона в местах стыковки арматуры. Применение диаграммного метода расчета для сечений с наличием арматурных стыков требует экспериментальных исследований особенностей совместной работы бетона и арматуры в месте стыка. При этом должны учитываться условия и режимы нагружения конструкции.

В процессе эксплуатации зданий и сооружений строительные конструкции подвергаются воздействиям как постоянных, так и временных нагрузок, которые могут сниматься и прикладываться вновь с некоторой периодичностью (снеговые, ветровые, от подвижного транспорта и др.), т.е. являются циклическими. Работа конструкции при циклическом воздействии может существенно отличаться от статического нагружения.

В работах [1-9] рассматривались различные аспекты работы железобетонных конструкций при циклическом и знакопеременном нагружении. В [10] исследовались особенности напряженно-деформированного состояния арматуры при нестационарном циклическом нагружении. В [11] получены уравнения выносливости арматуры при различных режимах многократно повторяющегося нагружения с учетом упругопластических свойств стали. Различные аспекты усталостного разрушения стальной арматуры железобетонных конструкций рассматривались в [12-15] и др. В [16-17] было дано развитие диаграммного метода расчета железобетонных конструкций на случай малоциклового нагружения. В [18] предложен способ оценки прочности и деформативности механических соединений арматуры на резьбе в сравнении с цельным стержнем по диаграммной методике. В [19] исследуется работа механических соединений арматуры на резьбе при малоцикловом, а в [20] – при среднецикловом нагружении (до 100 000 циклов). В работе [21] рассматривается работа механических соединений арматуры на резьбе при среднецикловом нагружении с точки зрения изменения модулей деформации.

Однако, совместная работа бетона и арматуры в местах ее стыковки при помощи муфт на резьбе исследована в недостаточной степени. В частности, необходимо экспериментально оценить влияние наличия стыка арматуры на трещиностойкость бетона при циклическом нагружении.

Вышеизложенное обуславливает актуальность рассматриваемой темы.

Целью данного исследования является изучение совместной работы бетона и арматуры в местах ее механического соединения при помощи муфт на резьбе на основе новых экспериментальных данных, полученных при различных видах нагружения (статическое и многоцикловое), для дальнейшего уточнения диаграммной методики оценки прочности и деформативности железобетонных конструкций с резьбовыми механическими соединениями арматуры при воздействии циклического нагружения.

Модели и методы исследования

Для оценки взаимного влияния и совместной работы бетона и арматуры в местах ее механического соединения при различных режимах нагружения были изготовлены следующие типы экспериментальных образцов:

- образец цельного стержня арматуры класса A500C Ø16 мм;
- образец механического соединения арматуры класса A500C Ø16 мм при помощи муфты на конусной резьбе «CONCON» типа 12А;
- образец цельного стержня арматуры класса A500C Ø16 мм, забетонированного в призме с размерами 70х70х220 мм из бетона класса по прочности на сжатие В60;
- образец механического соединения арматуры класса A500C Ø16 мм при помощи муфты на конусной резьбе «CONCON» типа 12А, забетонированного в призме с размерами 70х70х220 мм из бетона класса по прочности на сжатие В60.

Помимо этого, были изготовлены образцы-кубы используемого бетона с размерами 100х100х100 мм для определения его реальных прочностных характеристик.

Испытания проводились при двух режимах нагружения – статическом растяжении и многоцикловом растяжении.

Испытания прочности контрольных образцов кубов тяжелого бетона при сжатии проводили по методике ГОСТ 10180 -2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам»; оценку плотности бетона проводили по методике ГОСТ 12730.1-2020 «Бетоны. Методы определения плотности»; оценку класса бетона по результатам проведенных испытаний по методике ГОСТ 18105 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности».

Статические испытания по оценке механических свойств (предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения) арматурного проката A500C Ø16 мм и его механического соединения «CONCON» типа 12А, а также аналогичных образцов, забетонированных в бетонной призме, проводили по методике ГОСТ 12004-81 с использованием сервогидравлической испытательной системы SHENCK PEZ 7391 в режиме постоянной скорости перемещения активного захвата 0,02 мм/с. Статическая скорость испытаний была подобрана в соответствии с требованиями ГОСТ 12004 таким образом, чтобы средняя скорость роста напряжений в арматуре при испытании до предела текучести не превышала 10 МПа/с.

Многоцикловые усталостные испытания контрольных образцов арматурного проката A500C Ø16 мм и его механического соединения «CONCON» типа 12А, забетонированных в бетонной призме, проводили с использованием сервогидравлической испытательной системы SHENCK PEZ 7391 по методикам, соответственно, ГОСТ 34028-2016 «Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия» и ГОСТ 34227-2017 «Соединения арматуры механические для железобетонных конструкций. Методы испытаний» в условиях нормальной температуры и влажности по ГОСТ 15150 при мягком виде нагружения, база испытаний составляла 2 млн. циклов.

При циклическом нагружении образцов в соответствии с режимом, предусмотренным указанными ГОСТами, видимого деформирования образцов и трещинообразования в бетоне зарегистрировано не было. В связи с этим была увеличена амплитуда напряжений цикла.

Параметры режима нагружения образца арматурного проката, забетонированного в бетонной призме, до 500 тыс. цикл. нагружения:

- максимальное напряжение цикла $\sigma_{\max} = 0,6\sigma_T = 300 \text{ Н/мм}^2$ (МПа), $P_{\max} = 60,33 \text{ кН}$;
- минимальное напряжение цикла $\sigma_{\min} = 150 \text{ Н/мм}^2$ (МПа), $P_{\min} = 30,165 \text{ кН}$;

- амплитуда напряжений цикла $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 150 \text{ Н/мм}^2$ (МПа), $\Delta P = 30,165 \text{ кН}$.

Параметры режима нагружения образца арматурного проката, забетонированного в бетонной призме, после 500 тыс. цикл. нагружения:

- максимальное напряжение цикла $\sigma_{\max} = 0,6\sigma_T = 300 \text{ Н/мм}^2$ (МПа), $P_{\max} = 60,33 \text{ кН}$;
- минимальное напряжение цикла $\sigma_{\min} = 100 \text{ Н/мм}^2$ (МПа), $P_{\min} = 20,11 \text{ кН}$;
- амплитуда напряжений цикла $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 200 \text{ Н/мм}^2$ (МПа), $\Delta P = 40,22 \text{ кН}$;
- частота циклов напряжений - 10,0 Гц;
- критерий разрушения - полное разрушение в рабочей части сечения образца.

Параметры режима нагружения образца механического соединения «CONCON» арматурного проката, забетонированного в бетонной призме, до 250 тыс. цикл. нагружения:

- максимальное напряжение цикла $\sigma_{\max} = 0,6\sigma_T = 300 \text{ Н/мм}^2$ (МПа), $P_{\max} = 60,33 \text{ кН}$;
- минимальное напряжение цикла $\sigma_{\min} = 240 \text{ Н/мм}^2$ (МПа), $P_{\min} = 48,264 \text{ кН}$;
- амплитуда напряжений цикла $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 60 \text{ Н/мм}^2$ (МПа), $\Delta P = 12,066 \text{ кН}$;

Параметры режима нагружения образца механического соединения «CONCON» арматурного проката, забетонированного в бетонной призме, после 250 тыс. цикл. нагружения:

- максимальное напряжение цикла $\sigma_{\max} = 0,6\sigma_T = 300 \text{ Н/мм}^2$ (МПа), $P_{\max} = 60,33 \text{ кН}$;
- минимальное напряжение цикла $\sigma_{\min} = 150 \text{ Н/мм}^2$ (МПа), $P_{\min} = 30,165 \text{ кН}$;
- амплитуда напряжений цикла $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 150 \text{ Н/мм}^2$ (МПа), $\Delta P = 30,165 \text{ кН}$;
- частота циклов напряжений - 10,0 Гц;
- критерий разрушения - полное разрушение в рабочей части сечения образца.

Для регистрации информации о механических характеристиках исследуемых образцов арматуры, их муфтовых соединений и бетона использовали измерительно-регистрирующий комплекс аппаратуры, включавший в себя датчики первичной информации – тензорезисторы, установленные на арматуре и бетоне; датчики перемещения активного захвата и усилия испытательной системы; электронную систему автоматизированного сбора данных «Traveller CF» для статических и динамических измерений механических величин фирмы ESA Messtechnik GmbH с соответствующим программным обеспечением.

Калибровку каналов измерений усилия P и перемещения активного захвата S производили электрическим сигналом заданной величины соответственно с тензодинамометра и датчика перемещения, предварительно прокалиброванным по образцовым мерам. Калибровку канала измерения деформаций выполняли электрическим сигналом заданной величины, создаваемой с помощью электромеханического тензокалибратора - тарировочного устройства с изгибаемой эталонной балочкой.

В процессе испытания проводили измерения и регистрацию изменения усилия P , деформаций ϵ и перемещения активной опоры S в режиме реального времени.

Схема установки датчиков для замера деформаций на образцах представлена на рисунке 1.

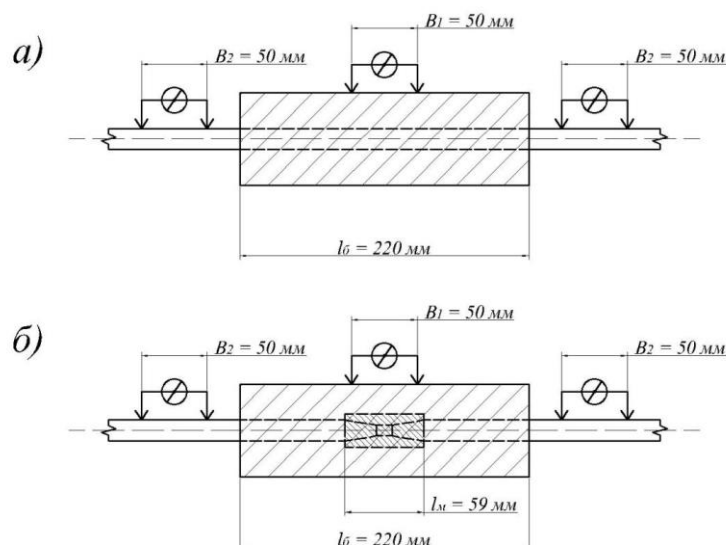


Рисунок 1 – Схема расположения датчиков на контрольных образцах целого арматурного стержня (а) и муфтового соединения (б) проката А500С Ø16 мм, забетонированного в бетонной призме (В60) при статической нагрузке

Результаты проведенных экспериментальных исследований

Фактическая средняя прочность бетона по результатам проведенных испытаний составила 85,6 МПа, что соответствует классу В70. Средняя плотность образцов составила 2352 кг/м³.

Результаты проведенных статических испытаний образцов арматурного проката и механических соединений арматурного проката в свободном состоянии и в бетонной призме представлены, соответственно, в таблице 1 и таблице 2.

Таблица 1 - Результаты проведенных испытаний арматурного проката А500С и его механического соединения CONCON CC16 тип 12 в свободном состоянии при статическом нагружении

№ п/п	Измеряемый показатель испытываемой продукции	Ед. изм.	Значение показателя при испытании арматурного проката А500С Ø16 мм при статическом растяжении	Значение показателя при испытании механического соединения CONCON CC16 типа А12 арматуры А500С Ø16 мм
1	Деформативность ΔL_s при растяжении	мм	-	0,06
2	Предел текучести, σ_T	Н/мм ² (МПа)	534,0	-
3	Временное сопротивление разрыву, σ_B	Н/мм ² (МПа)	624,5	606,4
4	Относительное удлинение δ_5	%	18,7	-
5	Равномерное относительное удлинение δ_p	%	5,8	3,5
6	Характер разрушения		В рабочем сечении	Выдергивание из муфты

Таблица 2 - Результаты проведенных испытаний арматурного проката А500С и его механического соединения CONCON CC16 тип 12, забетонированных в бетонной призме (В60), при статическом нагружении

№ п/п	Измеряемый показатель испытываемой продукции	Ед. изм.	Значение показателя при испытании арматурного проката А500С Ø16 мм забетонированного в бетонной (В60) призме	Значение показателя при испытании механического соединения CC16 А12 арматурного проката А500С Ø16 мм забетонированного в бетонной (В60) призме
1	Предел текучести σ_T	Н/мм ² (МПа)	545,0	545,0
2	Временное сопротивление σ_B	Н/мм ² (МПа)	643,5	621,6
3	Относительное удлинение δ_5	%	19,2	16,8
4	Равномерное относительное удлинение δ_p	%	7,2	6,9
5	Момент образования поперечной трещины в бетоне	$P_{сгс}$	кН	70-80
6		$\sigma_{сгс}$	Н/мм ²	350-400
7	Образование регулярных поперечных трещин в бетоне	P	кН	>100
8		σ	Н/мм ²	>500
9		шаг	мм	40-50
10	Характер разрушения	-	Обрыв в рабочем сечении вне бетонной призмы	Выдергивание арматуры из муфты

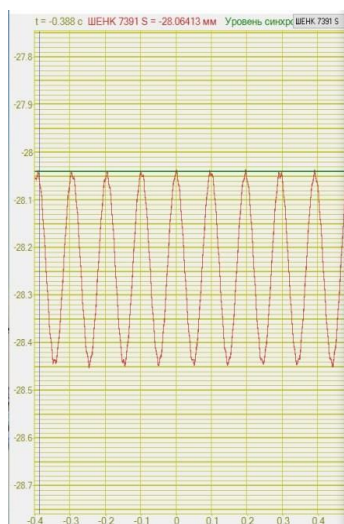


Рисунок 2 – Осциллограмма процесса многоцикловых испытаний контрольного образца арматурного проката А500С Ø16 мм, забетонированного в бетонной призме. Скриншот зависимости «перемещение активного захвата-время» в первые 10 тыс. цикл

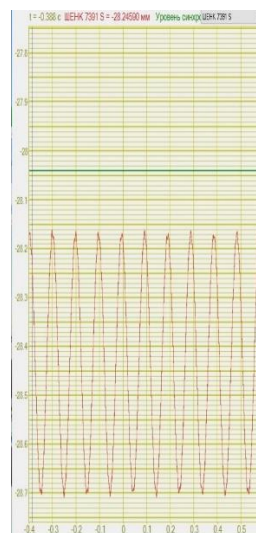


Рисунок 3 – Осциллограмма процесса многоцикловых испытаний контрольного образца арматурного проката А500С Ø16 мм, забетонированного в бетонной призме после увеличения амплитуды до 200 мПа после 500 тыс. цикл. Скриншот зависимости «перемещение активного захвата-время» при 510 тыс. цикл. Появление сквозной поперечной трещины с шириной раскрытия 0,05 мм

На рисунках 4 - 5 представлены осциллограммы проведенных испытаний муфтовых соединений, забетонированных в бетонной призме, на циклическую нагрузку.

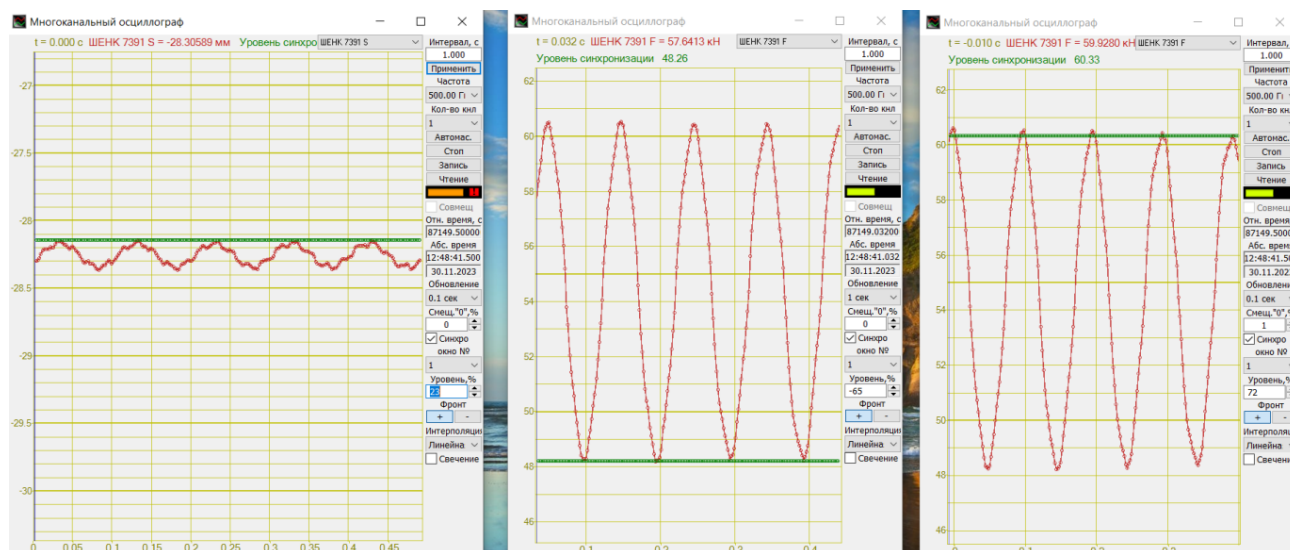


Рисунок 4 – Осциллограмма процесса многоцикловых испытаний контрольного образца муфтового соединения арматурного проката А500С Ø16 мм, забетонированного в бетонной призме. Скриншот зависимости «перемещение активного захвата-время» при 0 цикл

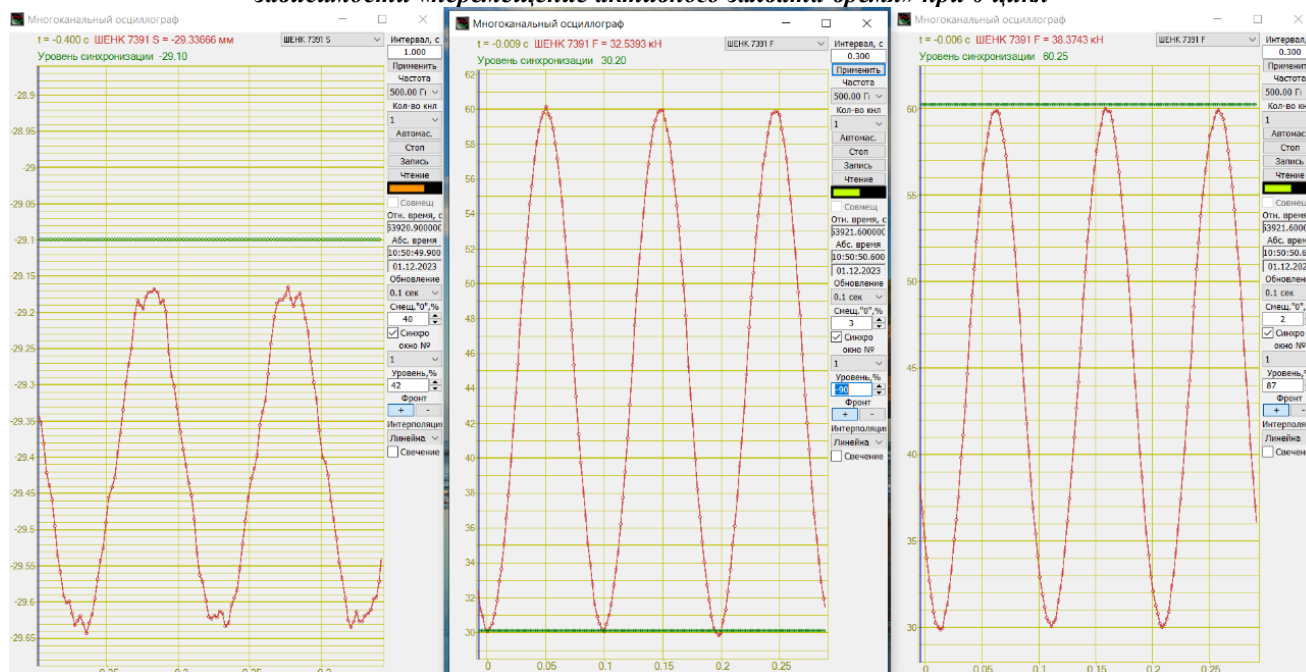


Рисунок 5 – Осциллограмма процесса многоцикловых испытаний контрольного образца муфтового соединения арматурного проката А500С Ø16 мм, забетонированного в бетонной призме. Скриншот зависимости «перемещение активного захвата-время» при 800 тыс. цикл

На рисунках 6-9 представлен характер разрушения образцов.

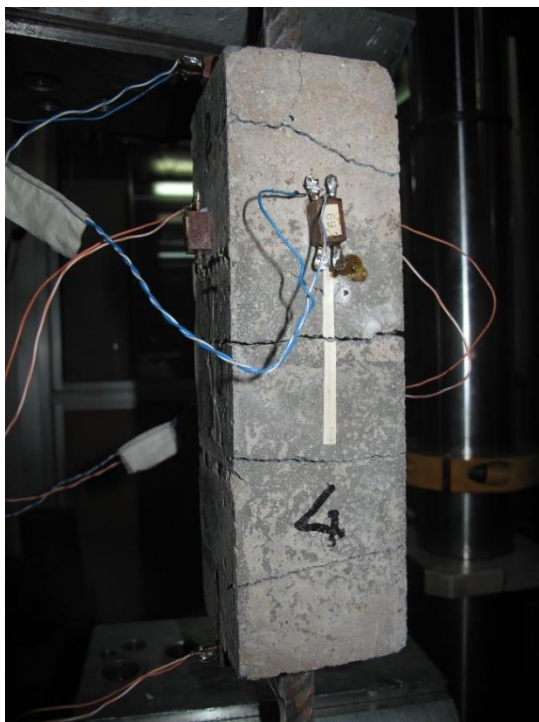


Рисунок 6 – Характер разрушения (образования трещин) в бетонной призме при испытании контрольного образца арматурного проката А500С Ø16 мм при статическом растяжении

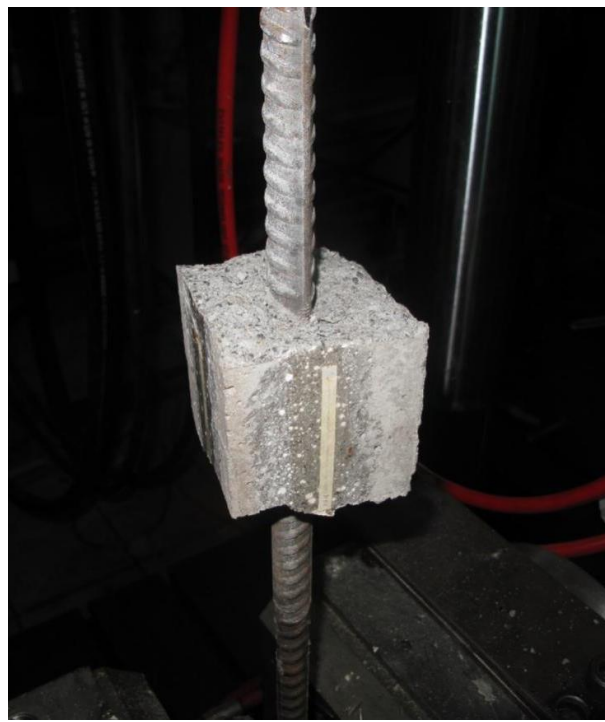


Рисунок 7 – Характер разрушения в бетонной призме при испытании контрольного образца с муфтовым соединением проката А500С Ø16 мм при статическом растяжении



Рисунок 8 – Характер трещинообразования в бетоне контрольного образца арматурного проката А500С Ø16 мм, забетонированного в бетонной призме (В60), при многократно повторяющихся циклических нагрузках



Рисунок 9 – Характер трещинообразования в бетоне контрольного образца муфтового соединения арматурного проката А500С Ø16 мм, забетонированного в бетонной призме (В60), при многократно повторяющихся циклических нагрузках

Анализ полученных результатов

Результаты экспериментальных исследований образцов арматуры и ее стыков в бетоне при статическом нагружении говорят о том, что совместная работа резьбового механического соединения с бетоном оказывает существенное влияние на конечные деформации образца перед разрывом, увеличение составляет до 84%. Для цельного стержня в бетоне данный фактор сказывается в меньшей степени – прирост конечных деформаций составляет 15%. При этом усилие при разрыве в случае совместной работы с бетоном увеличивается незначительно как для арматуры, так и для резьбового соединения. Сопоставление полученных диаграмм деформирования образцов представлено на рисунке 10.

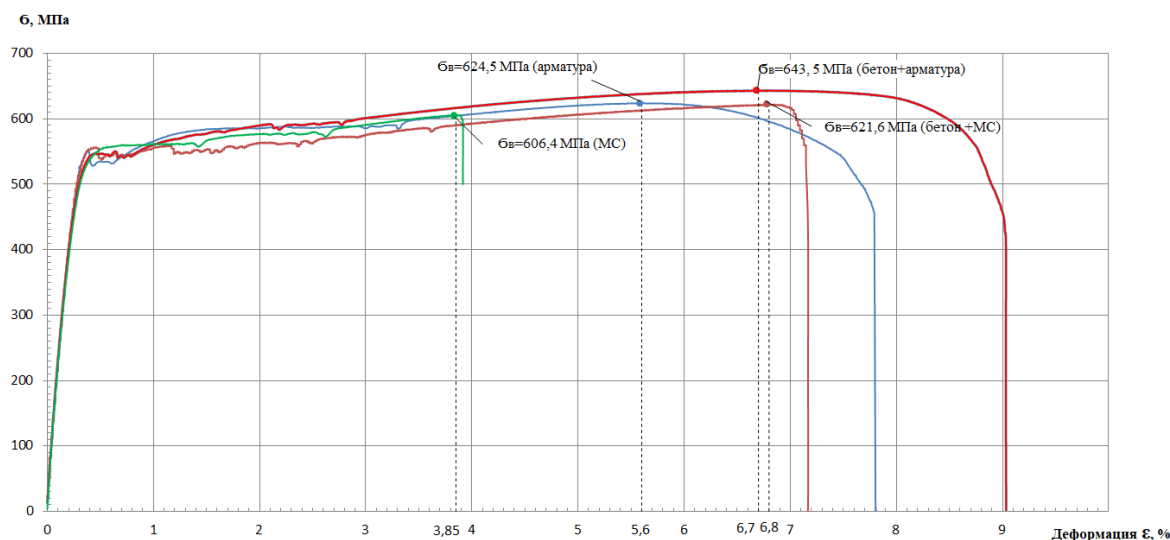


Рисунок 10 – Диаграммы деформирования арматуры и механического соединения арматуры в свободном состоянии и при совместной работе с бетоном

Результаты проведенных испытаний образца арматурного проката А500С, забетонированного в бетонной призме, на многоцикловую нагрузку при параметрах, предусмотренных ГОСТ 34028-2016 «Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия» ($\sigma_{\text{max}} = 0,6\sigma_{\text{т}}$, $\Delta\sigma = \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}} = 150$ МПа), показали, что циклическое нагружение образца арматуры в бетоне при данной амплитуде цикла 150 МПа не дало существенных деформаций. Увеличение амплитуды цикла до 200 МПа привело к образованию трещин в бетоне. Циклическое нагружение образца муфтового соединения в бетоне при амплитуде цикла 60 МПа привело к трещинообразованию в бетоне на начальном этапе нагружения. Зависимость амплитуды перемещения активного захвата при циклических испытаниях арматуры А500С Ø 16 мм в бетоне представлена на рисунке 11, зависимость амплитуды перемещения активного захвата при циклических испытаниях муфтового соединения арматуры А500С Ø16 мм в бетоне представлена на рисунке 12.



Рисунок 11 – Зависимость амплитуды перемещения активного захвата при циклических испытаниях арматуры A500C Ø16 мм в бетоне

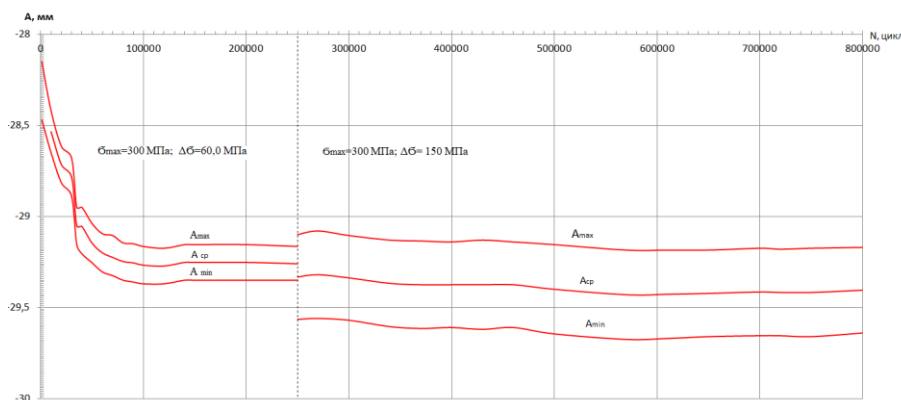


Рисунок 12 – Зависимость амплитуды перемещения активного захвата при циклических испытаниях механического соединения арматуры A500C Ø16 мм в бетоне

Выводы

По результатам проведенных испытаний формулируются следующие выводы:

- совместная работа арматурного проката с бетоном оказывает влияние на предельные деформации арматуры перед разрывом вследствие сдерживания процесса деформирования арматуры за счет сцепления с бетоном, особенно существенно данный фактор сказывается на механическом соединении арматуры; при этом на прочность данный фактор не оказывает существенного влияния;
- трещинообразование в бетоне при растяжении арматурного проката носит равномерный характер по длине образца; разрушение бетона при наличии муфтового соединения происходит в месте входа арматуры в муфту вследствие наибольших деформаций арматуры в данном сечении;
- работа арматурного проката совместно с бетоном при режимах многоциклового нагружения, предусмотренных ГОСТ 34028, не оказывает существенного влияния на процессы трещинообразования в бетоне;
- наличие механического стыка в сечении при циклическом нагружении приводит к трещинообразованию в бетоне на начальной стадии нагружения циклической нагрузкой;
- полученные экспериментальные данные являются основой для корректировки диаграммного метода расчета железобетонных конструкций в сечениях с механическими соединениями арматуры, работающих при многоцикловом нагружении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liang J., Nie X., Masud M., Li J., Mo Y. L. A study on the simulation method for fatigue damage behavior of reinforced concrete structures // Engineering Structures. 2017. №150. P. 25-38.
2. Luo X., Tan Z., Chen Y. F., Wang Y. Comparative study on fatigue behavior between unbounded prestressed and ordinary reinforced reactive powder concrete beams // Materialpruefung. Materials Testing. 2019. № 4 (61). P. 323-328.

3. Mirsayapov Ilshat T. Detection of stress concentration regions in cyclic loading by the heat monitoring method // *Mechanics of Solids*. 2010. № 1(45). P. 133-139.
4. Song L., Fan Z., Hou J. Experimental and Analytical Investigation of the Fatigue Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2019. № 1 (13).
5. Zhang G., Zhang Y., Zhou Y. Fatigue Tests of Concrete Slabs Reinforced with Stainless Steel Bars // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. № 1.
6. Мирсаяпов Ильшат Т. Усталостное сопротивление изгибаемых элементов действию поперечных сил при средних пролетах среза // *Бетон и железобетон*. 2006. №3. С. 23-25.
7. Мирсаяпов Ильшат Т., Тамразян А. Г. К разработке научных основ теории выносливости железобетонных конструкций // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 1. С. 50-56.
8. Mirsayapov Ilshat T. A study of stress concentration zones under cyclic loading by thermal imaging method // *Strength of Materials*. 2009. № 3 (41). P. 339-344.
9. Zhang C., Duan P., Zheng B., Li M. Numerical analysis of diaphragm fatigue of reinforced concrete simply supported T-beams // *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2018. № 5 (11). P. 193-201.
10. Barclay L., Kowalsky M. Critical bending strain of reinforcing steel and the buckled bar tension test // *ACI Materials Journal*. 2019. №3 (116). Pp. 53-61.
11. Мирсаяпов И. Т., Гарифуллин Д. Р. Уравнения выносливости арматуры изгибаемого железобетонного элемента при режимном многократно повторяющемся нагружении // *Известия КГАСУ*, 2020, №1 (51), стр. 93-100.
12. Мирсаяпов Илизар Т. Теоретические основы усталостного разрушения стальной арматуры железобетонных конструкций // *Известия КГАСУ*. 2021. № 4 (58). С. 15–25. DOI: 10.52409/20731523_2021_4_15
13. Atutis E., Valivonis J., Atutis M. Deflection determination method for bfrp prestressed concrete beams under fatigue loading // *Compos. Struct*. 2019. № 226. P. 111182. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111182.
14. Kim G., Loreto G., Kim J.-Y., Kurtis K. E., Wall J. J., Jacobs L. J. In situ nonlinear ultrasonic technique for monitoring microcracking in concrete subjected to creep and cyclic loading // *Ultrasonics*. 2018. №88. P. 64–71. DOI: 10.1016/j.ultras.2018.03.006.
15. Li Q., Liu M., Lu Z., Deng X. Creep Model of High-Strength High-Performance Concrete Under Cyclic Loading // *J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed*. 2019. №3 (34). P. 622–629. DOI: 10.1007/s11595-019-2096-9.
16. Ерышев В.А., Тошин Д.С. Диаграмма деформирования бетона при многократных повторных нагружениях // *Известия ВУЗов. Строительство и Архитектура*. – 2005. - №10. - С. 109-114.
17. Карпенко Н.И., Ерышев В.А., Латышева Е.В. К построению диаграмм деформирования бетона повторными нагрузками сжатия при постоянных уровнях напряжений // *Строительные материалы*. – 2013. - №6. – С. 48-52.
18. С.Н. Карпенко, И.Г. Чепизубов, К.С. Шифрин. О результатах проверки прочности муфтовых соединений арматуры на резьбе по диаграммной методике // *Промышленное и гражданское строительство*, 2008, №11.
19. С.Н. Карпенко, И.Г. Чепизубов, А.А. Андрианов. Определение деформативности муфтовых соединений арматуры при среднецикловом нагружении (до 100 000 циклов). В сборнике: *Фундаментальные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2012 году. Сборник научных трудов*. Волгоград, 2013. С. 361-363.
20. С.Н. Карпенко, И.Г. Чепизубов. Определение деформативности и прочности муфтовых соединений арматуры при циклическом нагружении. *Вестник Отделения строительных наук Российской академии архитектуры и строительных наук*. 2009. № 3. С. 147-151.
21. Карпенко С.Н., Чепизубов И.Г., Моисеенко Г.А. Изменение модулей деформации муфтовых соединений арматуры при циклическом нагружении // *Строительные материалы*. 2022. № 6. С. 4–7.

REFERENCES

1. Liang J., Nie X., Masud M., Li J., Mo Y. L. A study on the simulation method for fatigue damage behavior of reinforced concrete structures // *Engineering Structures*. 2017. №150. P. 25-38.
2. Luo X., Tan Z., Chen Y. F., Wang Y. Comparative study on fatigue behavior between unbounded prestressed and ordinary reinforced reactive powder concrete beams // *Materialpruefung. Materials Test-ing*. 2019. № 4 (61). P. 323-328.
3. Mirsayapov Ilshat T. Detection of stress concentration regions in cyclic loading by the heat monitoring method // *Mechanics of Solids*. 2010. № 1(45). P. 133-139.
4. Song L., Fan Z., Hou J. Experimental and Analytical Investigation of the Fatigue Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2019. № 1 (13).
5. Zhang G., Zhang Y., Zhou Y. Fatigue Tests of Concrete Slabs Reinforced with Stainless Steel Bars // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. № 1.
6. Mirsayapov Ilshat T. Fatigue resistance of bent elements to the action of transverse forces at average shear spans // *Concrete and reinforced concrete*. 2006. No. 3. pp. 23-25.
7. Mirsayapov Ilshat T., Tamrazyan A. G. Towards the development of the scientific foundations of the theory of endurance of reinforced concrete structures // *Industrial and civil engineering*. 2017. No. 1. pp. 50-56.
8. Mirsayapov Ilshat T. A study of stress concentration zones under cyclic loading by thermal imaging method // *Strength of Materials*. 2009. № 3 (41). P. 339-344.

9. Zhang C., Duan P., Zheng B., Li M. Numerical analysis of diaphragm fatigue of reinforced concrete simply supported T-beams // *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2018. № 5 (11). P. 193-201.
10. Barclay L., Kowalsky M. Critical bending strain of reinforcing steel and the buckled bar tension test // *ACI Materials Journal*. 2019. №3 (116). Pp. 53-61.
11. Mirsayapov I. T., Garifullin D. R. Equations of endurance of reinforcement of a bent reinforced concrete element under regime repeated loading // *Izvestiya KGASU*, 2020, No. 1 (51), pp. 93-100.
12. Mirsayapov Ilizar T. Theoretical foundations of fatigue failure of steel reinforcement of reinforced concrete structures // *Izvestiya KGASU*. 2021. № 4 (58). pp. 15-25. DOI: 10.52409/20731523_2021_4_15
13. Atutis E., Valivonis J., Atutis M. Deflection determination method for bfrp prestressed concrete beams under fatigue loading // *Compos. Struct.* 2019. № 226. P. 111182. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111182.
14. Kim G., Loreto G., Kim J.-Y., Kurtis K. E., Wall J. J., Jacobs L. J. In situ nonlinear ultrasonic technique for monitoring microcracking in concrete subjected to creep and cyclic loading // *Ultrasonics*. 2018. №88. P. 64–71. DOI: 10.1016/j.ultras.2018.03.006.
15. Li Q., Liu M., Lu Z., Deng X. Creep Model of High-Strength High-Performance Concrete Under Cyclic Loading // *J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed.* 2019. №3 (34). P. 622–629. DOI: 10.1007/s11595-019-2096-9.
16. Yeryshev V.A., Toshin D.S. Diagram of concrete deformation under multiple repeated loads // *Izvestiya VUZov. Construction and Architecture*. 2005. No. 10. pp. 109-114.
17. Karpenko N.I., Yeryshev V.A., Latysheva E.V. On the construction of diagrams of concrete deformation by repeated compression loads at constant stress levels // *Construction materials*. - 2013. - No. 6. – pp. 48-52.
18. S.N. Karpenko, I.G. Chepizubov, K.S. Shifrin. On the results of testing the strength of armature coupling joints on threads according to the diagrammatic method // *Industrial and Civil Engineering*, 2008, No. 11.
19. S.N. Karpenko, I.G. Chepizubov, A.A. Andrianov. Determination of deformability of armature coupling joints under medium cycle loading (up to 100,000 cycles). In the collection: *Fundamental research of the Russian Academy of Natural Sciences on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2012. Collection of scientific papers*. Volgograd, 2013. pp. 361-363.
20. S.N. Karpenko, I.G. Chepizubov. Determination of deformability and strength of armature coupling joints under cyclic loading. *Bulletin of the Department of Building Sciences of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences*. 2009. No. 3. pp. 147-151.
21. Karpenko S.N., Chepizubov I.G., Moiseenko G.A. Changing the deformation modules of the valve coupling joints under cyclic loading // *Building materials*. 2022. No. 6. pp. 4-7.

Информация об авторах

Чепизубов Игорь Геннадьевич

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), Москва, Россия, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник
E-mail: niisf_lab9n@mail.ru

Сафонов Александр Александрович

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт "ВНИИЖелезобетон", Москва, Россия, руководитель Испытательного центра «НИЦСтром» ООО «Институт ВНИЖелезобетон»
E-mail: A.Safonov@vniizhbeton.ru

Моисеенко Георгий Александрович

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), Москва, Россия, канд. техн. наук, научный сотрудник
E-mail: gecklock@yandex.ru

Information about the authors

Chepizubov Igor Gennadievich

Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN), Moscow, Russia, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher
E-mail: niisf_lab9n@mail.ru

Safonov, Alexander Alexandrovich

Scientific Research, Design and Technological Institute "Vniizhelezo-beton", Moscow, Russia,
E-mail: A.Safonov@vniizhbeton.ru

Moiseenko Georgy Alexandrovich

Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN), Moscow, Russia, Candidate of Technical Sciences, Researcher
E-mail: gecklock@yandex.ru