

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАЦИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОСВЕННЫМ СЕТЧАТЫМ И ДИСПЕРСНЫМ АРМИРОВАНИЕМ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ СЖАТИИ

С. Н. Машталер, к.т.н., доцент; К. А. Казак

ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

Аннотация. Приведен анализ применения сетчатого и фибрового армирования, а также комбинированного армирования. В качестве образцов выступают образцы-призмы, некоторые из которых моделируют конструкции коротких колонн с продольным армированием. Присутствуют фотоиллюстрации и графики, характеризующие работу образцов под нагрузкой, в частности диаграммы деформирования. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния косвенного и дисперсного армирования на прочность и деформации элементов из высокопрочного модифицированного бетона при осевом сжатии. Предложены аналитические выражения для описания прочности и деформаций элементов с косвенным сетчатым и дисперсным армированием. Авторы приходят к выводу, что учет физической нелинейности деформирования материалов, согласно приведенным формулам в тексте статьи, позволяет достоверно оценивать несущую способность и деформации сжатых железобетонных элементов с косвенным сетчатым и дисперсным армированием.

Ключевые слова: высокопрочный бетон, армирование косвенное и дисперсное, экспериментальные исследования, деформации, прочность, расчет.



*Машталер
Сергей Николаевич*



*Казак
Кирилл Александрович*

Применение в современном строительстве высокопрочных (высококачественных) бетонов позволяет снижать материалоемкость конструкций и получать значительный долговременный экономический эффект. К недостаткам высокопрочных бетонов обычно относят близкий к упругому характер деформирования и склонность к хрупкому разрушению. Введение в бетон дисперсного армирования повышает его прочность на сжатие и растяжение, сдерживает процессы микротрещинообразования в структуре, увеличивает предельные значения сжимаемости и растяжимости. Применение фибрового армирования является действенным способом повышения несущей способности сильно нагруженных колонн, а также участков конструкций при местном приложении нагрузки.

В настоящее время основным материалом для создания строительных конструкций и изделий является бетон. Однако, несмотря на его преимущества, такие как простота производства, низкая стоимость и высокая прочность на сжатие, у него есть ряд недостатков: низкая прочность на растяжение, усадочные деформации, высокая газо- и водопроницаемость, низкая морозостойкость.

Армирование бетона стальными стержнями позволяет частично устранить эти недостатки, но не полностью. Железобетон обладает такими недостатками, как низкая трещиностойкость, слабая устойчивость к динамическим нагрузкам, недостаточная огнестойкость и морозостойкость, а также большой вес конструкций.

В строительной отрасли ведётся постоянный поиск новых прогрессивных материалов. Например, за последние десятилетия были разработаны высокопрочный бетон, армоцемент, бетоны с лёгкими заполнителями и другие. Также перспективными считаются мелкозернистые бетоны с дискретным или дисперсным армированием (фибробетоны).

Особый интерес представляет сталефибробетон (СФБ) – композитный материал, состоящий из мелкозернистого бетона и стальных волокон диаметром от 0,3 до 1,0 мм с длиной волокна от 50 до 400, которые обеспечивают дополнительную прочность и стойкость к внешним воздействиям.

Фибробетон становится всё более востребованным в современной строительной отрасли благодаря своим свойствам, таким как:

- высокая ударная прочность, превышающая аналогичный показатель обычного бетона в пять раз;
- высокая прочность на срез и растяжение;
- устойчивость к химическим воздействиям;
- трещиностойкость и меньшая подверженность сколам;
- морозостойкость;
- водонепроницаемость;
- жаропрочность и жаростойкость;
- меньший вес по сравнению с арматурным каркасом, что позволяет создавать лёгкие конструкции;
- хорошая адгезия;
- уменьшение толщины конструкции благодаря содержанию фибры, обеспечивающей необходимую прочность;
- увеличенный срок службы, который достигается за счёт добавления фибры.

Кроме того, в процессе затвердевания фибробетон меньше подвержен усадке по сравнению с материалом без дисперсного армирования. Благодаря этим характеристикам, фибробетон широко используется в гражданском и промышленном строительстве. Из него возводят различные резервуары, фундаменты под ударное и динамическое оборудование, реакторные отделения АЭС, своды тоннелей, промышленные полы, дорожные и мостовые покрытия, гидротехнические сооружения, а также применяют при ремонте и реконструкции зданий и сооружений.

Экономический фактор играет важную роль в строительном процессе, и в этом аспекте фибробетон имеет как плюсы, так и минусы. Основным преимуществом фибробетона является отсутствие необходимости использования арматуры или арматурной сетки, что сокращает сроки выполнения работ, расходы на транспортировку, монтаж и дополнительные материалы. Однако главный недостаток фибробетона – высокая стоимость самого материала.

Ряд нормативных документов формулирует основные принципы расчета и проектирования конструкций на основе сталефибробетона. Сталефибробетонные конструкции рассматриваются как композитный железобетон с использованием дисперсной арматуры в виде коротких стальных стержней – фибр.

Расчет строительных конструкций, в т.ч. фибробетонных, предполагает следующие стадии:

- создание расчетной модели конструкции, в которой представлены нагрузки, воздействия, жесткости элементов и граничные условия;
- определение напряжений, внутренних усилий и деформаций в элементах конструкции посредством статического или динамического расчетов;
- проверка элементов конструкций по первой и второй группе предельных состояний.

В практике проектирования большинство задач решается в рамках упругой постановки, при этом не учитывается физическая нелинейность используемого материала, что не приводит к влиянию указанной характеристики на полученные результаты, т.е. в расчете предполагается использование деформационных характеристик материала из предположения его упругой работы, таких как модуль деформации E , коэффициент Пуассона μ , коэффициент линейного температурного расширения α_{bt} . Указанные характеристики принимаются в соответствии с нормативным документом. Проведенные многочисленные теоретические исследования утверждают, что такой подход не позволяет достоверно оценить параметры напряженно-деформированного состояния конструкции, представляя возможность осторожной оценки и аналитического решения задач в более простом виде. В последнее время в инженерной практике расчета бетонных и железобетонных конструкций отмечено частое применение методик расчета с учетом физической нелинейности материалов, которые могут быть реализованы как в аналитической форме (методика расчета по нелинейной деформационной модели), так и с использованием различных программных комплексов, реализующих численные методы, такие как: метод конечных элементов (МКЭ), метод граничных разностей (МГР) и др.

Согласно проведенным исследованиям в области расчета и проектирования фибробетонных конструкций наибольшую эффективность полученных результатов можно получить, оценивая параметры НДС конструкций с учетом физической нелинейности материалов на стадии определения внутренних усилий, напряжений и деформаций, а также при расчете конструкций по предельным состояниям.

Наиболее эффективным способом снижения массы конструкций, трудоемкости и стоимости их возведения является применение современных высокопрочных бетонов. Действенным способом повышения несущей способности сильно нагруженных колонн, а также участков конструкций при местном приложении нагрузки является применение косвенного сетчатого и дисперсного (фибрового) армирования [1, 2]. Применительно к современным высокопрочным бетонам вопрос эффективности влияния таких видов армирования на прочность и деформации сжатых элементов является недостаточно изученным.

Для исследования влияния сетчатого и фибрового армирования в сопоставимых показателях интенсивности косвенного армирования на прочность и деформации коротких железобетонных элементов при кратковременном сжатии были изготовлены 3 серии основных образцов. В серии 1 представлены бетонные образцы-призмы размерами 150x150x600 мм без стержневой арматуры с процентами фибрового армирования $\mu_{xy} = 0; 1$ и 2,5 %. В сериях 2 и 3 представлены образцы в виде железобетонных призм таких же размеров, моделирующих конструкции коротких колонн с продольным армированием из 4Ø10 А-500.

Проценты косвенного сетчатого и фибрового армирования для образцов 2-ой и 3-ей серии составили соответственно 1 % и 2,5 % (рис. 1, 2).

В образцах с $\mu_{xy} = 1$ % устанавливались сетки из арматуры Ø6,5 А-400 с ячейкой 60 мм, шаг сеток – 138 мм, а в образцах с $\mu_{xy} = 2,5\%$ – сетки из арматуры Ø8 А-400 с ячейкой 60 мм, шаг сеток – 80 мм.

Состав высокопрочного бетона – портландцемент М500 – 545 кг/м³; песок кварцевый (M_к = 1.9) – 660 кг/м³; щебень гранитный фракции 5...20 мм – 870 кг/м³; органоминеральный модификатор (ОММ) – 190 кг; вода – 153 л/м³.

Органоминеральный модификатор получен с использованием вторичного сырья промышленности Донбасса [1].

Фибра – стальная с загнутыми концами со следующими характеристиками: длина $l = 60.0 \pm 6.0$ мм, диаметр $d = 0.75 \pm 0.07$ мм; длина и высота загнутого конца соответственно $l_1 = 5.0 \pm 1.0$ мм, $h_1 = 2.9 \pm 0.5$ мм; временное сопротивление разрыву – 1160÷1290 МПа.

Влияние косвенного и дисперсного армирования на прочность и деформации образцов-призм из высокопрочного бетона оказалось подобным закономерностям, выявленным в исследованиях бетонов средней прочности [3, 6], а именно: с по-

вышением процента косвенного армирования увеличиваются показатели прочности и предельной сжимаемости по сравнению с неармированным бетоном. Для образцов-призм с $\mu_{xy} = 1\%$ и $2,5\%$ величины приведенной прочности $R_{b,loc}$ и $R_{sfb,loc}$ увеличились в среднем, соответственно в 1,15 и 1,32 раза по сравнению с неармированным бетоном (рис. 3 а), а предельная сжимаемость ε_{sb} – в 1,2 и 1,52 раза для образцов с косвенным армированием и ε_{sb} в 1,12 и 1,33 для образцов с дисперсным армированием соответственно (рис. 3 б). Линейные относительные деформации удлинения стержней арматуры в сетках поперечного армирования практически совпадали с поперечными деформациями удлинения бетона до уровней нагружения, не превышающих $0,9 \times R_{b,loc}$. При более высоких уровнях нагружения наблюдается опережение роста деформаций удлинения в поперечном направлении, измеренных по бетону, в сравнении с удлинениями стержней в сетках косвенного армирования, что объясняется дилатационными процессами в бетоне. Предельные деформации поперечного удлинения по бетону непосредственно перед разрушением на 20÷40 % превысили деформации удлинения стержней сеток.

С повышением процента косвенного и дисперсного армирования разрушение образцов-призм носило более плавный характер с большей долей пластических деформаций. Разрушение сопровождалось сколами бетона лещадками за пределами контура сеток и текучестью с последующей потерей устойчивости стержней продольной арматуры.

Экспериментальные данные о влиянии косвенного и дисперсного армирования на прочность и предельные деформации железобетонных элементов из высокопрочного бетона представлены на рис. 3, 4.

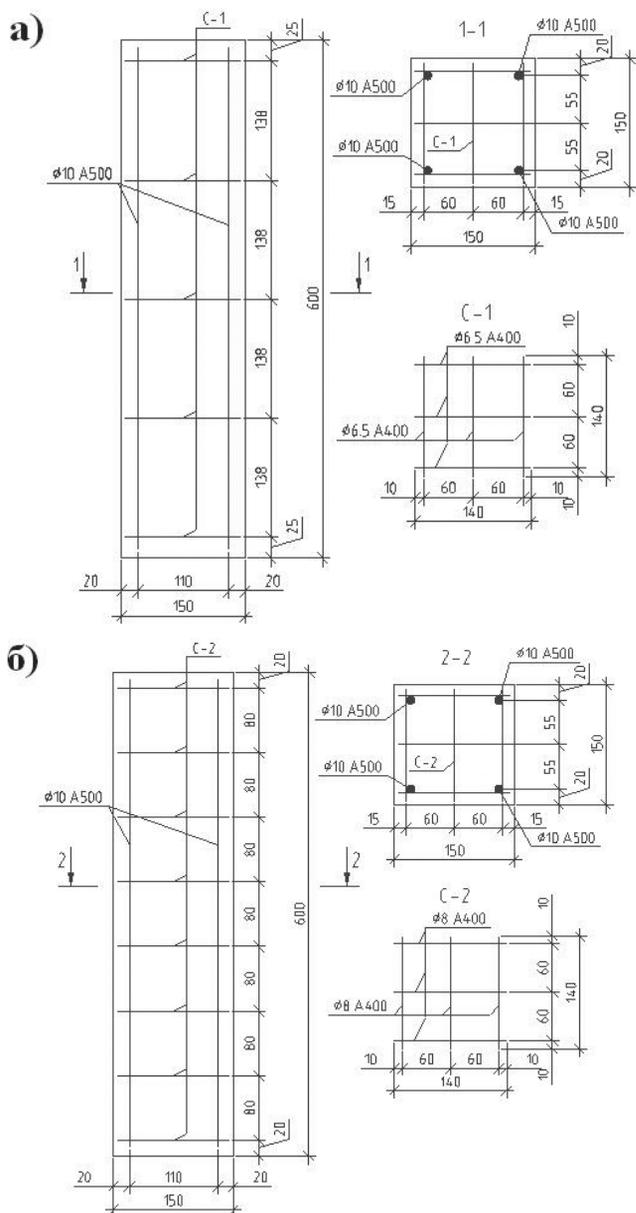


Рис. 1. Схемы продольного и поперечного сетчатого армирования железобетонных образцов-призм с $\mu_{xy} = 1\%$ (а) и $\mu_{xy} = 2,5\%$ (б).

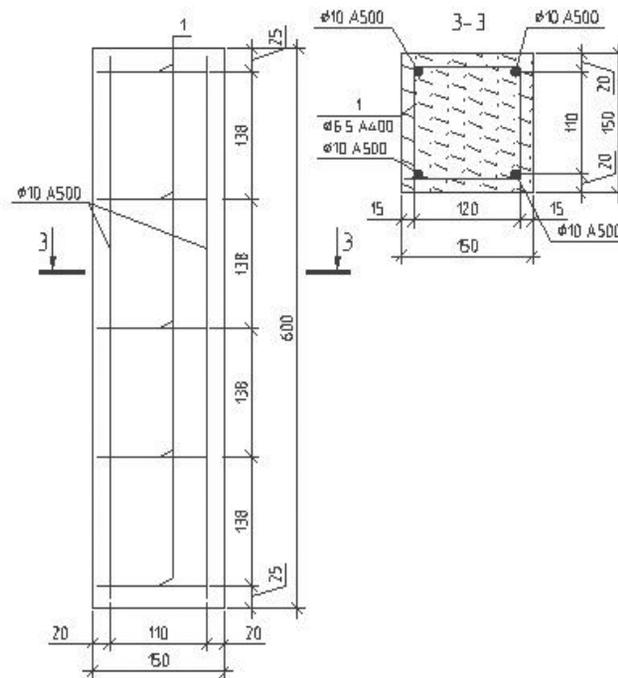


Рис. 2. Схема продольного и поперечного армирования образцов-призм из сталефибробетона с $\mu_{fb} = 1\%$ и $\mu_{xy} = 2,5\%$.

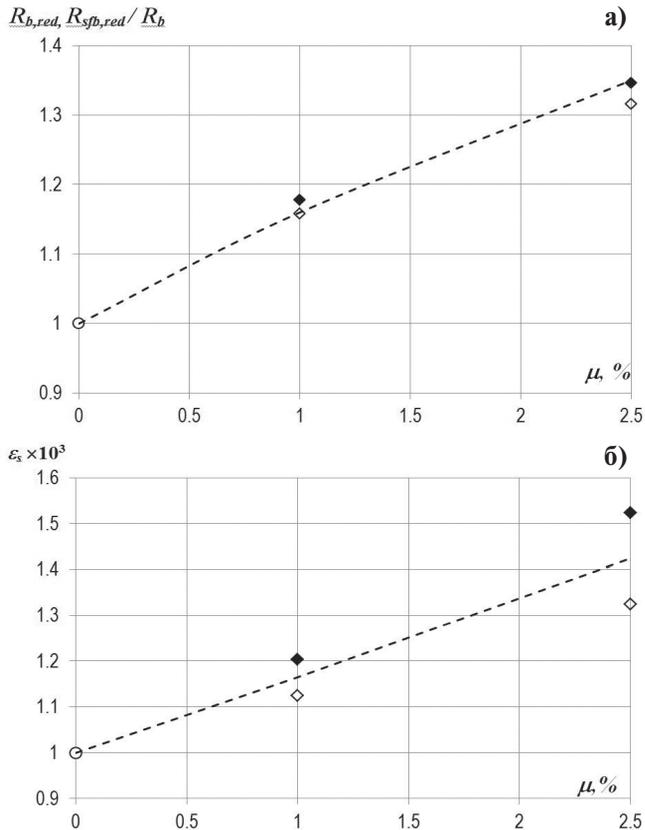


Рис. 3. Влияние процента косвенного и дисперсного армирования на приведенную прочность (а) и предельные деформации укорочения высокопрочного бетона (б)

Условные обозначения соответственно видам армирования:

- – неармированный бетон ($\mu = 0\%$; $\mu_{xy} = 0\%$);
- ◆ – косвенное армирование, $\mu_{xy} = 1\%$; 2.5%;
- ◇ – дисперсное армирование, $\mu_{sfb} = 1\%$; 2.5%

Установлена возможность применения формул (6.84 и 6.85) СП 360.1325800.2017 [4] и формулы (8.81) СП 63.13330.2012 [5] к расчету прочности элементов с косвенным и дисперсным армированием из высокопрочного бетона классов В60÷В80 (рис. 4). На основе результатов анализа опытных данных предложены модифицированные аналитические выражения [1]:

– для вычисления предельных деформаций ϵ_{sb} элементов из высокопрочного бетона в зависимости от интенсивности косвенного армирования на основе формулы Е. А. Чистякова [6]:

$$|\epsilon_{sb}| = (|\epsilon_b| + 18 \cdot \psi) \times 10^{-3}; \quad (1)$$

– для описания диаграммы «σ-ε» элементов с косвенным армированием в виде полинома 3-ей степени на основе предложений [3]:

$$\eta_\sigma = a_1 \cdot \eta_\epsilon + a_2 \cdot \eta_\epsilon^2 + a_3 \cdot \eta_\epsilon^3, \quad (2)$$

где: $\eta_\sigma = \frac{|\sigma_{b,loc}|}{R_{b,loc}}$ – для случая с применением косвенного сетчатого армирования;

$\eta_\sigma = \frac{|\sigma_{fb,loc}|}{R_{fb,loc}}$ – для случая с применением дисперсного армирования;

$$\eta_\epsilon = \frac{\epsilon_{sb}}{\epsilon_b}; \quad a_1 = 3; \quad a_2 = -3; \quad a_3 = 1;$$

$R_{b,loc}$ – приведенная призмная прочность бетона по формуле (8.81) СП 63.13330.2012 [5];

$R_{fb,loc}$ – расчетное сопротивление сталефибробетона сжатию при местном действии сжимающей силы по формуле (6.84) СП 360.1325800.2017 [4].

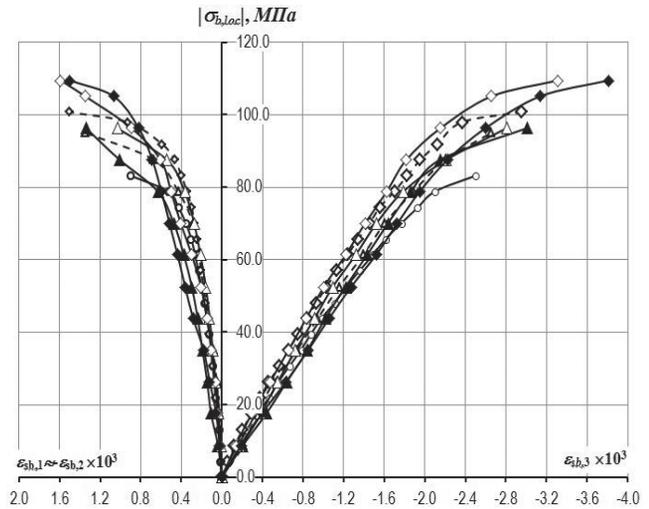


Рис. 4. Диаграммы деформирования железобетонных образцов-призм из высокопрочного бетона с косвенным и дисперсным армированием

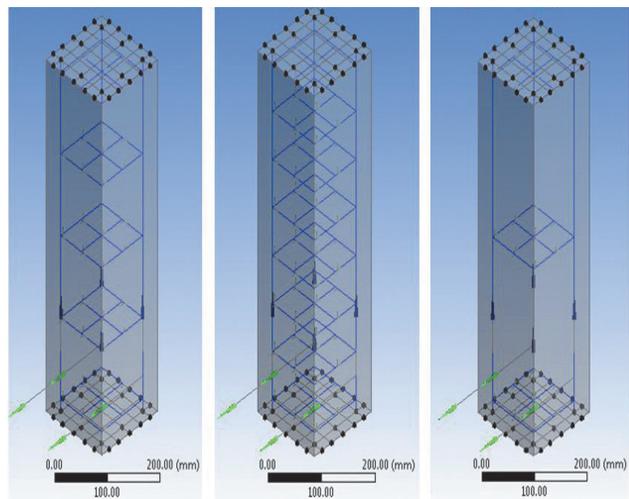
Условные обозначения соответственно видам армирования:

- – неармированный бетон ($\mu = 0\%$; $\mu_{xy} = 0\%$);
- ◆ – косвенное армирование, $\mu_{xy} = 1\%$; 2.5%;
- ◇ – дисперсное армирование, $\mu_{sfb} = 1\%$; 2.5%

Выражения (1)÷(2) позволяют достоверно описывать диаграммы деформирования железобетонных элементов с косвенным и дисперсным армированием различной интенсивности.

Конечно-элементное моделирование НДС сжатых элементов с косвенным и дисперсным армированием

- а) $\mu_{xy} = 1\%$ $\mu_{xy} = 2,5\%$ $\mu_{sfb} = 1\%$;
 $\mu_{sfb} = 2,5\%$



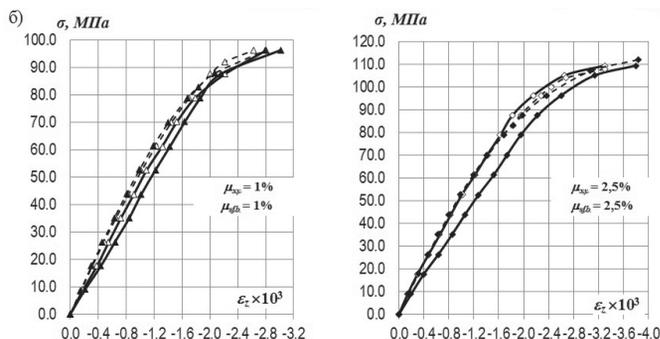


Рис. 5. Расчетные схемы (а) и диаграммы деформирования элементов (б)

Условные обозначения соответственно видам армирования:

----- результаты расчета с помощью ПК «ANSYS Workbench 14.5»;

————— эксперимент;

▲◆ — косвенное армирование, $\mu_{xy} = 1\%$; 2.5% ;

△◇ — дисперсное армирование, $\mu_{sfb} = 1\%$; 2.5%

В теоретических исследованиях моделирование условий работы сжатых железобетонных образцов с косвенным и дисперсным армированием выполнено методом конечных элементов (МКЭ) с помощью ПК «ANSYS Workbench 14.5» (рис. 5а). Оценка результатов осуществлялась на основе сопоставления опытных величин деформаций по бетону на гранях конструкций с расчетными деформациями конструкций в целом, с деформациями их элементов — стержней продольной и поперечной арматуры, а также по величинам разрушающих нагрузок. Результаты сопоставления (рис. 5б) свидетельствуют об их удовлетворительной сходимости.

Учет физической нелинейности материала в форме модифицированных диаграмм « $\sigma-\epsilon$ » (1)÷(2) позволяет приблизить расчетные величины несущей способности и предельных деформаций сжатых элементов к опытным, достоверно оценивать резервы несущей способности таких конструкций.

ВЫВОДЫ

1. Применение косвенного и дисперсного армирования с коэффициентами объемного армирования $\mu_{xy} = 1\%$ и $2,5\%$ повышает величины приведенной прочности высокопрочного бетона $R_{b,loc}$ и $R_{sfb,loc}$, в среднем, в 1,15 и 1,32 раза по сравнению с неармированным бетоном, а предельную сжимаемость $\overline{\epsilon}_{sb}$ — в 1,2 и 1,52 раза для образцов с косвенным армированием и в 1,12 и 1,33 для образцов с дисперсным армированием соответственно.

2. Для количественной оценки приведенной призмной прочности модифицированных бетонов классов по прочности до В80 могут быть использованы с достаточной степенью точности формулы (6.84 и 6.85) СП 360.1325800.2017 [4] и формула (8.81) СП 63.13330.2012 [5].

3. Учет физической нелинейности деформирования материалов с помощью выражений (1)÷(2) позволяет достоверно оценивать несущую способность и деформации сжатых железобетонных элементов с косвенным сетчатым и дисперсным армированием.

Список литературы

1. Корсун, В. И. Влияние косвенного и фибрового армирования на прочность и деформации элементов из высокопрочного модифицированного бетона // В. И. Корсун, А. В. Корсун, С. Н. Машталер // Механика разрушения строительных материалов и конструкций: Материалы VIII Академических чтений РААСН. — Казань: КГАСУ, 2014. — С. 132-137.
2. Мишина, А. В. Физико-технические свойства сверхвысокопрочного сталефибробетона // А. В. Мишина, И. А. Чилин, А. А. Андрианов // Научно технический журнал Вестник МГСУ. — 2011. — С. 159.
3. Попов, Н. Н. Влияние косвенного армирования на деформативность бетона // Н. Н. Попов, Н. Н. Трекин, Н. Г. Матков // Бетон и железобетон. — 1986. — № 11. — С. 33-34.
4. СП 360.1325800.2017. Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования // Госстрой РФ. — М.: ЦИТП Госстроя РФ, 2017. — 79 с.
5. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения — М.: Министерство регионального развития Российской Федерации, 2012. — 152 с.
6. Чистяков, Е. А., Бакиров, К. К. Высокопрочная арматура в сжатых элементах с косвенным армированием // Бетон и железобетон. — 1976. — № 9. — С. 35-38.
7. Левченко, В. Н. Становление научной школы развития теории железобетона в стенах ДонНАСА // В. Н. Левченко, А. В. Недорезов, С. Н. Машталер // Научно-практический журнал Строитель Донбасса. 2022. № 3. С. 25-29.
8. Salomon M. Levy. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development // Salomon M. Levy, Paulo Helene // Cement and Concrete Research. 2004. Vol. 34. ISSN. 11. P. 1975-1980.
9. Sukontasukkul P. Effect of loading rate on damage of concrete // P. Sukontasukkul, P. Nimityongskul, S. Mindess // Cement and Concrete Research. 2004. Vol. 34. ISSN. 11. P. 2127-2134.