



УДК 624.012

DOI: 10.22227/2949-1622.2023.3.49-61

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

Влияние уровня нагрузки усиления на несущую способность железобетонных балок, внешне армированных углепластиком

Г.А. Смоляго¹, А.Е. Жданов², Я.Л. Обернихина^{1*}¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Российская Федерация²ООО Строительная экспертиза, Белгород, Российская Федерация

*yana.ishuk@yandex.ru

Ключевые слова: железобетонная балка, нагрузка усиления, внешнее армирование, углепластик, напряженно-деформированное состояние

История статьи

Поступила в редакцию: 31.03.2023

Доработана: 04.04.2023

Принята к публикации: 11.04.2023

Для цитирования

Смоляго Г.А., Жданов А.Е., Обернихина Я.Л. Влияние уровня нагрузки усиления на несущую способность железобетонных балок, усиленных углепластиком, Железобетонные конструкции. 2023. Т. 3. № 3. С. 49–61.

Аннотация. В большинстве экспериментальных исследований, посвященных изучению НДС изгибаемых железобетонных элементов, усиленных полимеркомпозитными материалами на основе углеволокна, рассматриваются лишь ненагруженные или не имеющие предварительных трещин балки. Однако усиление реальных несущих конструкций чаще всего выполняют под нагрузкой и с учетом ранее возникших дефектов. В то же время систематических исследований влияния предварительной нагрузки на несущую способность железобетонных балок, усиленных углепластиком, ограниченное количество. В данной статье представлена методика оценки влияния уровня НДС усиления на несущую способность и другие параметры сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных углепластиком, с учетом физической нелинейности бетона и используя реальные диаграммы деформирования, в том числе стальной арматуры и углепластика. На основе разработанной методики выполнены численные исследования работы железобетонных сечений, усиленных на различных этапах НДС. Проведя анализ полученных данных, можно сделать вывод о существенном влиянии уровня нагрузки усиления на деформативность, жесткость и прочность нормальных сечений железобетонных балок и необходимости учета данного фактора при расчете изгибаемых железобетонных элементов.

Influence of Reinforcement Load Level on Bearing Capacity of RC Beams Externally Reinforced with CFRP

G. A. Smolyago¹, A. E. Zhdanov², Y. L. Obernikhina^{1*}¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation²ООО Stroitel'naya ekspertiza, Belgorod, Russian Federation

*yana.ishuk@yandex.ru

Геннадий Алексеевич Смоляго, советник РААСН, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры СиГХ, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова), 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; eLIBRARY SPIN-код: 6155-6736, Scopus: 6507734920, ORCID: 0000-0003-2182-2049, E-mail: tpk-psv@yandex.ru

Александр Егорович Жданов, к.т.н., доц., ведущий конструктор ООО Строительная экспертиза, 308000, г. Белгород, Свято-Троицкий б-р, 17, Офис 411А; eLIBRARY SPIN-код: 5776-9610, E-mail: zd-54@list.ru

Яна Леонидовна Обернихина, ст. пр. кафедры СиГХ, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова), 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; eLIBRARY SPIN-код: 8124-6914, ORCID: 0000-0001-5294-3586, E-mail: yana.ishuk@yandex.ru

© Смоляго Г.А., Жданов А.Е., Обернихина Я.Л., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Keywords: RC beams, reinforcement load, external reinforcement, CFRP, stress-strain state

Article history

Received: 31.03.2023

Revised: 04.04.2023

Accepted: 11.04.2023

For citation

Smolyago G. A., Zhdanov A. E., Obernikhina Y.L. Influence of Reinforcement Load Level on Bearing Capacity of RC Beams Externally Reinforced with CFRP. *Reinforced concrete structures*. 2023; 3(3):49–61.

Abstract. Most of the experimental investigations devoted to the study of the stress-strain state of bent reinforced concrete elements reinforced with carbon fiber-based polymer-composite materials have examined only unloaded beams or beams without preliminary cracks. However, reinforcement of real load-bearing structures is most often performed under load and taking into account previously occurring defects. At the same time, there are a limited number of systematic studies of the effect of preload on the bearing capacity of reinforced concrete beams reinforced with carbon fiber. This article presents a methodology for assessing the effect of the stress-strain state level of reinforcement on the bearing capacity and other parameters of the sections of bent reinforced concrete elements reinforced with carbon fiber, taking into account the physical nonlinearity of concrete and using real deformation diagrams, including reinforcement and reinforcement systems. On the basis of the developed method, numerical studies of the operation of reinforced concrete sections reinforced at various stages of SSS were performed. After analyzing the obtained data, we can conclude that the level of reinforcement load has a significant effect on the deformability, rigidity and strength of normal sections of reinforced concrete beams and the need to take this factor into account when calculating bending reinforced concrete elements. After analyzing the data obtained, we can conclude that the influence of the reinforcement load level on the deformability, rigidity and strength of normal sections of reinforced concrete beams and the need to take this factor into account when calculating bending reinforced concrete elements.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность системы внешнего армирования полимеркомпозитными материалами для усиления железобетонных конструкций была доказана в ходе многочисленных экспериментальных исследований [1-8]. В большинстве экспериментальных исследований изучалось НДС ненагруженных или не имеющих предварительных трещин железобетонных балок, усиленных углепластиком [9-11]. Однако усиление реальных несущих конструкций чаще всего выполняют под нагрузкой и с учетом ранее возникших дефектов. В то же время систематических исследований влияния предварительной нагрузки на несущую способность железобетонных балок, усиленных углепластиком, ограниченное количество. Изучение влияния предварительной нагрузки на несущую способность железобетонных балок, усиленных углепластиком, в ходе лабораторных испытаний проведены по трем случаям. В первом случае железобетонные балки нагружали до определенного уровня нагрузки, разгружали и проводили усиление [12-15]. Во втором случае предварительно нагруженные железобетонные балки частично разгружали до заданного уровня и проводили усиление [16, 17]. В третьем случае проводили усиление предварительно нагруженных железобетонных балок без разгрузки [9, 16-23]. Ввиду ограниченного количества испытуемых образцов и большого количества переменных параметров экспериментальных исследований, достаточно сложно всесторонне оценить влияние уровня предварительной нагрузки на несущую способность железобетонных балок, усиленных углепластиком.

Однако в последние годы в зарубежной литературе имеет место тенденция увеличения количества работ, посвященных изучению данной проблематики.

В частности, авторами [12] были проведены экспериментальные исследования двух серий образцов: 8-и железобетонных балок, предварительно нагруженных до 30% от разрушающей нагрузки контрольных образцов, усиленных углепластиком после разгрузки; и 2-х железобетонных балок, усиленных углеволокном при эксплуатационной нагрузке. В ходе испытаний выявлено, что в среднем несущая способность образцов первой серии увеличилась на 24% по сравнению с контрольной балкой, а второй серии - только на 16% по сравнению с контрольной балкой.

Gennadiy A. Smolyago, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction and Urban Economics, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 st. Kostyukova, Belgorod, 308012, Russian Federation, eLIBRARY SPIN-код: 6155-6736, Scopus: 6507734920, ORCID: 0000-0003-2182-2049, E-mail: tpk-psv@yandex.ru

Alexander E. Zhdanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Lead Engineer OOO Stroitel'naya ekspertiza, 17 Svyato-Troitskiy Boulevard, Belgorod, 308000, Russian Federation, eLIBRARY SPIN-код: 5776-9610, E-mail: zd-54@list.ru

Yana L. Obernikhina, Senior Lecturer of the Department of Construction and Urban Economics, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 st. Kostyukova, Belgorod, 308012, Russian Federation, eLIBRARY SPIN-код: 8124-6914, ORCID: 0000-0001-5294-3586, E-mail: yana.ishuk@yandex.ru

В работе [13] представлены экспериментальные исследования 19-и железобетонных балок, усиленных углепластиком с разной ориентацией волокон, при наличии дефектов и повреждений. Впоследствии балки были нагружены до разрушения. В зависимости от ориентации волокна наблюдались различные типы разрушения. Целью данного исследования было изучение влияния ориентации волокон углепластика на прочность и жесткость балок. Оценка влияния уровня повреждений на несущую способность не проводилась.

Авторы [14] исследовали влияние двух разных вариантов предварительного нагружения - усиление при нагрузке соответствующей упругой стадии работы конструкций и при упруго-пластической - на несущую способность железобетонных балок, усиленных углеволокном. После разгрузки балки были усилены углепластиком с высоким или сверхвысоким модулем упругости (210 или 400 ГПа). Результаты испытаний показали, что уровень ранее существовавших дефектов и повреждений незначительно влияет на эффективность усиления и тип разрушения конструкции.

В работе [15] представлены исследования влияния уровня предварительного нагружения на несущую способность изгибаемых элементов, усиленных углеволокном. Были испытаны 3 железобетонные балки, которые предварительно нагрузили, а затем полностью разгрузили и усилили. Результаты экспериментов показали, несущая способность образцов после усиления увеличилась на 83%, 56% и 48% для уровней предварительного нагружения 35%, 66% и 100% от предельной расчетной нагрузки соответственно.

Авторами [16] проведены экспериментальные исследования предварительно нагруженных железобетонных балок, усиленных углепластиком. Образцы были разделены на 2 серии в зависимости от уровня предварительного нагружения. Образцы первой серии перед усилением были предварительно нагружены до 50% от разрушающей нагрузки контрольной балки. Образцы второй серии предварительно нагрузили до 50%, затем разгрузили до 25% от разрушающей нагрузки контрольной балки, усилили и довели до разрушения. Результаты испытаний показали, что чем выше уровень предварительной нагрузки, тем ниже несущая способность усиленных образцов.

В работе [17] приведены результаты экспериментальных исследований 8-и железобетонных балок, усиленных углепластиком под нагрузкой. Образцы были предварительно нагружены до 40%, 60% и 80% от разрушающей нагрузки контрольной балки и усилены углепластиком. В ходе испытания выявлено, что предельная несущая способность железобетонных балок, усиленных под нагрузкой, несущественно отличается от несущей способности образцов, усиленных без нагрузки.

Авторы [18] провели испытания 6-и железобетонных балок, усиленных углепластиком под нагрузкой. Уровень нагружения, при котором проводилось усиление, соответствовал 0%, 50% и 70% от разрушающей нагрузки контрольного образца. Экспериментальные исследования показали, что величина нагрузки усиления оказывает большее влияние на деформативность балок на высоких уровнях нагружения, чем на прочность (предварительное нагружение практически не повлияло).

В работах [19-21] приведены результаты экспериментальных исследований 6-и железобетонных балок, усиленных углепластиком, под нагрузкой и с различной историей нагружения. Испытания показали, что нагрузка усиления является важным фактором, влияющим на прочность образцов, усиленных углеволокном. Несущая способность железобетонных балок, усиленных углеволокном под нагрузкой, тем выше, чем ниже уровень нагрузки усиления. Если нагрузка усиления одинакова, несущая способность железобетонных балок, усиленных углепластиком, почти одинакова, независимо от истории нагружения.

Авторами [22] проведены экспериментальные исследования несущей способности 8-и полноразмерных железобетонных балок таврового сечения пролетом 6м. Опытные образцы были предварительно нагружены до 65%, 85% от разрушающей нагрузки эталонного образца и уси-

лены двумя слоями углепластика. Результаты эксперимента позволили сделать вывод об эффективности внешнего усиления углепластиком под нагрузкой. Уровень предварительной нагрузки до усиления практически не влиял на несущую способность и деформативность образцов.

В работе [23] представлены результаты экспериментальных исследований влияния предварительного уровня нагружения при усилении на НДС элемента. Сначала опытный образец подвергли трем циклам нагрузки-разгрузки от 45 кН до 90 кН, после чего нагрузили постоянной нагрузкой 45 кН и провели усиление. Разрушение происходило в результате отрыва системы усиления. Результаты испытаний показали, что при усилении углепластиком в два слоя под нагрузкой прирост прочности балки составил 28% по сравнению с контрольным образцом, аналогично усиленным без нагружения.

В отечественной литературе вопросам влияния уровня нагрузки усиления на напряженно-деформированное состояние железобетонных элементов, внешне армированных углепластиком, уделено недостаточно внимания. В частности, в работе [4] представлены результаты испытаний железобетонных балок, усиленных углепластиком на стадии близкой к исчерпанию несущей способности. Однако переменным фактором в данном исследовании является количество слоев в системе усиления, а не величина нагрузки усиления.

Анализируя имеющиеся данные, можно отметить, что на несущую способность, кроме прочих факторов, влияет уровень нагружения балок. Кроме этого, в зависимости от уровня нагружения в качестве «критического параметра несущей способности» выступают в различных комбинациях бетон, арматура или элементы усиления.

Имеющиеся методики расчета изгибаемых элементов, как правило, не учитывают всех особенностей работы усиленных балок, и в большинстве случаев оценивают несущую способность балки лишь по работе одного характерного (как правило наиболее нагруженного) сечения.

Такой подход, на наш взгляд, не может привести к универсальному расчетному аппарату поскольку на различных уровнях нагружения различные сечения балок находятся на разных уровнях НДС, и здесь корректировку в характер работы вносит, как материал усиления, так и уровень нагружения, при котором выполнялось усиление.

С учетом изложенного, для корректного описания работы усиленных балок, расчетный аппарат должен учитывать поведение различных сечений, в том числе, описывать особенности, обусловленные различным уровнем НДС сечений в момент усиления.

Указанный расчетный аппарат включает в себя две составляющие – статический расчет балки и расчет параметров НДС сечений, а учитывая нелинейный характер процессов, происходящих в материалах балки, в конечном счете необходима организация итерационного процесса для получения решения по искомым параметрам НДС балки.

Кроме того, для обеспечения стабильности и сходимости итерационного процесса расчетный аппарат должен позволять надежно оценивать НДС сечений в районе максимальных значений момента, в том числе и в закритической области, а выход в последнюю вполне возможен в процессе итерационного счета.

В данной статье представлена методика оценки влияния уровня НДС усиления на несущую способность и другие параметры сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных углепластиком, а также результаты численных исследований изгибаемых сечений, усиленных углеволокном при различных уровнях нагружения.

МЕТОД

Основной целью расчета любой строительной конструкции является определение параметров ее напряженно-деформированного состояния. Для этого необходимо определить напряжения и деформации во всех точках конструкции на всех этапах нагружения. При этом железобетон

бетон с определенного уровня нагружения начинает работать как физически нелинейный материал, вследствие влияния ползучести бетона, трещинообразования и различных деградиационных процессов [24]. Кроме того, усложняет решение задачи и материал системы усиления, включаемый в работу на одном из уровней деформирования.

Поэтому для определения НДС в произвольной точке или сечении необходимо использовать соответствующие диаграммы деформирования материалов [25].

Так, одним из способов представления нелинейной связи между напряжениями и деформациями бетона является использование зависимости, описанной степенным полиномом k_i – той степени:

$$\sigma_b = \sum_{i=1}^n A_i \varepsilon_b^{k_i}, \quad (1)$$

где A_i – некоторые эмпирические константы, имеющие размерность напряжений; k_i – безразмерные коэффициенты, которые могут быть любыми положительными числами.

Указанной зависимостью, подбирая численные значения A_i, k_i и n , можно описать с достаточно высокой точностью практически любую экспериментальную диаграмму деформирования бетона.

Однако использование дробных показателей степени k_i – может привести к определенным затруднениям при разработке математического аппарата для описания напряженно-деформированного состояния сечений, а также к некоторому усложнению алгоритма расчета.

В этом случае достаточно целесообразной представляется зависимость « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » в виде степенного полинома с целыми показателями степеней:

$$\sigma_b = \sum_{k=1}^n A_k \varepsilon_b^k. \quad (2)$$

Кроме того, выражение (2) достаточно просто описывается оператором цикла при расчете на ЭВМ, что позволяет без изменения текста программы использовать в расчете полиномы различных порядков. Использование зависимости позволяет исключить из расчетного аппарата ряд эмпирических коэффициентов, оставив только коэффициенты A_k , которые описывают реальные диаграммы работы бетона (рис.1).

При разработке методики оценки напряженно-деформированного состояния нормальных сечений железобетонных балок, усиленных углепластиком под нагрузкой, используются следующие предпосылки:

- В качестве расчетного принимается сечение, напряженно-деформированное состояние которого соответствует усредненному состоянию блока между трещинами.
- Для указанного сечения считается справедливым линейный закон распределения деформаций по высоте.
- Связь между напряжениями и деформациями бетона выражается формулой (2).
- Работа растянутого бетона описывается диаграммой Прандтля с ординатой равных напряжений $\psi_{bt} R_{bt}$, где ψ_{bt} – коэффициент, учитывающий постепенное снижение усилия, воспринимаемого бетоном растянутой зоны за счет развития трещин, и определяемый по формуле

$$\psi_{bt} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{btm}}{\varepsilon_2}}, \quad (3)$$

где ε_2 – относительные деформации бетона растянутой грани.

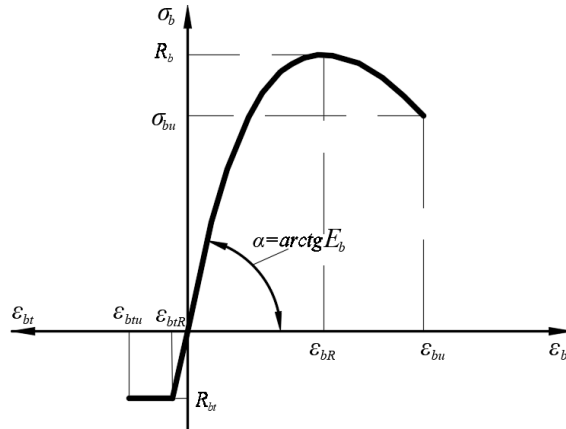


Рисунок 1. Диаграмма деформирования бетона
Figure 1. Diagram of concrete deformation

- Связь между напряжениями и деформациями арматурной стали принимается в виде кусочно-линейной диаграммы, параметры которой получают экспериментальным путем или согласно существующих рекомендаций (рис. 2).

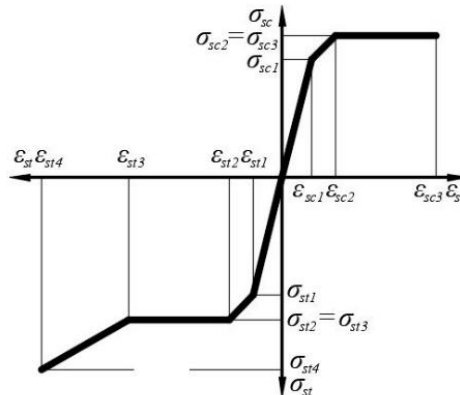


Рисунок 2. Диаграмма деформирования стальной арматуры
Figure 2. Diagram of deformation of steel reinforcement

- Связь между напряжениями и деформациями композиционного материала усиления принимается в виде линейной диаграммы деформирования вплоть до разрушения, параметры которой получают экспериментальным путем или согласно существующих рекомендаций (рис. 3).

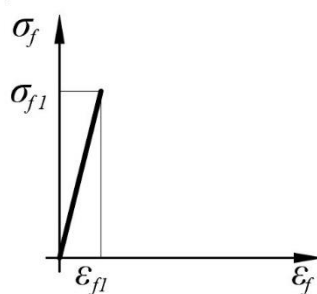


Рисунок 3. Диаграмма деформирования углепластика
Figure 3. Diagram of deformation of CFRP

Для отыскания связи между напряженно-деформированным состоянием нормального сечения без трещин и внешними усилиями запишем следующие уравнения:

$$\int_A \sigma_b dA + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} A_{si} + \sum_{j=1}^t \sigma_{fj} A_{fj} - N = 0; \quad (4)$$

$$\int_A \sigma_b y dA + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} y_{si} A_{si} + \sum_{j=1}^t \sigma_{fj} y_{fj} A_{fj} - M = 0, \quad (5)$$

где σ_b – напряжения на элементарной площадке бетона площадью dA_b , расположенной на расстоянии, равном y от нижней грани сечения; σ_{si} , A_{si} , y_{si} – напряжения в i - том арматурном стержне, площадь его поперечного сечения и расстояние от нижней грани сечения конструкции до указанной площади; σ_{fj} , A_{fj} , y_{fj} – напряжения в j - том слое углепластика, площадь его поперечного сечения и расстояние от нижней грани сечения конструкции до указанной площади.

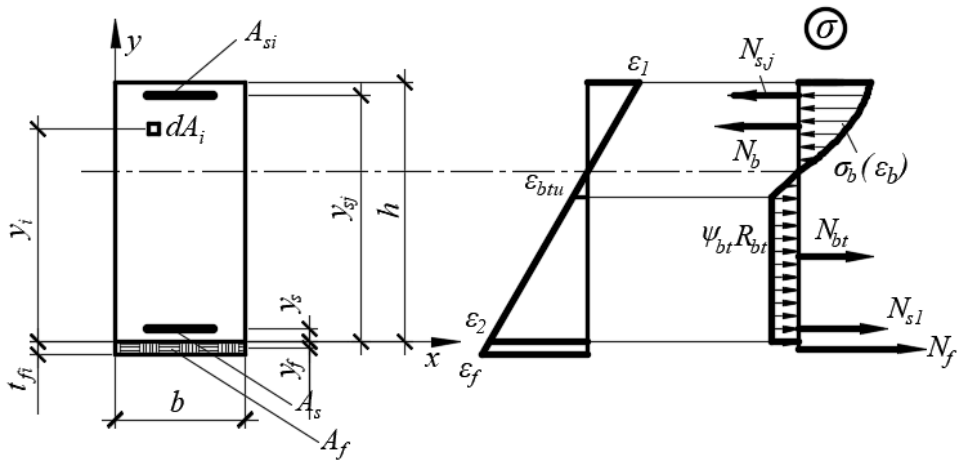


Рисунок 4. Напряженно-деформированное состояние усиленного сечения
Figure 4. Stress-strain state of a reinforced section

Обозначим относительную высоту сечения до элементарной площадки бетона через $\xi_i = \frac{h_i}{h}$. Учитывая, что в предполагаемых пределах интегрирования значения b и h постоянны и, следовательно, $dA_s = bhd\xi$ и $dA_f = bhd\xi$ уравнения (4) и (5) можно переписать в форме:

$$bh \int_{\xi=0}^{\xi=1} \sigma_b \xi d\xi + h \sum_{i=1}^m \sigma_{si} \xi_{si} A_{si} + h \sum_{j=1}^t \sigma_{fj} \xi_{fj} A_{fj} - M = 0; \quad (6)$$

$$bh^2 \int_{\xi=0}^{\xi=1} \sigma_b d\xi + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} A_{si} + \sum_{j=1}^t \sigma_{fj} A_{fj} - N = 0. \quad (7)$$

Преобразовав (6) и (7) и обозначив $P = \frac{N}{bh}$, $m = \frac{M}{bh^2}$, $\mu_{si} = \frac{A_{si}}{bh}$, $\eta_{fj} = \frac{A_{fj}}{bh}$, получим

$$\int_{\xi=0}^{\xi=1} \sigma_b d\xi + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} \mu_{si} + \sum_{j=1}^t \sigma_{fj} \eta_{fj} - P = 0; \quad (8)$$

$$\int_{\xi=0}^{\xi=1} \sigma_b \xi d\xi + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} \mu_{si} \xi_{si} + \sum_{j=1}^t \sigma_{fj} \eta_{fj} \xi_{fj} - m = 0. \quad (9)$$

Кривизна изогнутой оси в сечении равна

$$\aleph = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{h}. \quad (10)$$

Обозначим

$$\bar{\aleph} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\xi}, \quad (11)$$

тогда

$$\xi = \frac{\varepsilon - \varepsilon_2}{\bar{\aleph}}. \quad (12)$$

Подставляя (12) и (2) в уравнения (8) и (9) и произведя интегрирование, приходим к системе уравнений, описывающих напряженно-деформированное состояние сечения, усиленного углелепластиком, работающего без трещин:

$$\frac{1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{k+1} \varepsilon_1^{k+1} + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} \mu_{si} + \sum_{j=1}^t \sigma_{fj} \mu_{fj} - P = 0; \quad (13)$$

$$\frac{1}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2} \left[\sum_{k=1}^n \frac{A_k}{k+2} (\varepsilon_1^{k+2} + \varepsilon_2^{k+2}) - \varepsilon_2 \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{k+1} (\varepsilon_1^{k+1} + \varepsilon_2^{k+1}) \right] + \quad (14)$$

$$+ \sum_{i=1}^m \sigma_{si} \mu_{si} \xi_{si} + \sum_{j=1}^t \sigma_{fj} \mu_{fj} \xi_{fj} - m = 0.$$

Произведя аналогичные преобразования, получим систему уравнений, описывающих напряженно-деформированное состояние усиленных сечений с трещинами:

$$\frac{1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \left[\sum_{k=1}^n \frac{A_k}{k+1} (\varepsilon_1^{k+1} - \varepsilon_{btu}^{k+1}) + \psi_{bt} R_{bt} (\varepsilon_{btu} - \varepsilon_2) \right] + \sum_{i=1}^m \sigma_{si} \mu_{si} + \sum_{j=1}^t \sigma_{fj} \mu_{fj} - P = 0; \quad (15)$$

$$\frac{1}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2} \left[\sum_{k=1}^n \frac{A_k}{k+2} (\varepsilon_1^{k+2} - \varepsilon_{btu}^{k+2}) - \varepsilon_2 \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{k+1} (\varepsilon_1^{k+2} - \varepsilon_{btu}^{k+2}) + \frac{\psi_{bt} R_{bt}}{2} (\varepsilon_{btu} - \varepsilon_2)^2 \right] + \quad (16)$$

$$+ \sum_{i=1}^m \sigma_{si} \mu_{si} \xi_{si} + \sum_{j=1}^t \sigma_{fj} \mu_{fj} \xi_{fj} - m = 0.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе описанной выше методики разработан алгоритм и написана программа расчета для определения параметров напряженно деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов прямоугольного сечения (момента, деформаций бетона на верхней - ε_{p1} и нижней грани сечений - ε_{p2} , его жесткости) по заданной кривизне.

Программа дает возможность выполнять расчет с учетом физической нелинейности бетона, используя реальные диаграммы деформирования, в том числе арматуры и углелепластика.

Алгоритм работы программы для ЭВМ построен на реализации метода заданных деформаций, где в качестве нагрузочного параметра задается кривизна сечения, а в качестве неизвестного выступает момент в нормальном сечении. Это позволяет определять параметры

напряженно-деформированного состояния во всей области работы сечения, включая закритические стадии.

Кроме того, в программе предусмотрена возможность рассчитывать сечения, в которых выполнялось усиление внешним армированием полимеркомпозитными материалами под нагрузкой.

Расчет выполняется пошагово при последовательном увеличении значений кривизны. Начальная кривизна, шаг по кривизне, количество шагов задаются в исходных данных. Имеется возможность выполнить расчет при одном значении кривизны.

На каждом шаге расчета определяются также характеристики работы сечения, а именно наличие или отсутствия трещин, возможное раздробление части бетона сжатой зоны.

Для апробации данной методики были проведены численные исследования напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов без усиления и внешне армированных полимеркомпозитами на основе углеволокна при различных значениях кривизны.

В качестве расчетного принято сечение железобетонной балки с размерами $b \times h = 80 \times 120$ мм.

Бетон класса по прочности на сжатие В25. Коэффициенты полинома бетона определены по опытным данным, представленным в работе [8].

Продольная арматура класса А400.

Коэффициент армирования принят $\mu = 1,5$.

В качестве материала усиления выбран однонаправленный углеродный холст на основе высокопрочного углеродного волокна марки FibARM 530/300 с прочностью на растяжение 4200 МПа и модулем упругости 240 000 МПа.

Диаграммы деформирования стальной арматуры и углепластика заданы в виде кусочно-линейных функций.

Определение параметров напряженно-деформированного состояния сечения проводилось для изгибаемых элементов 3-х типов:

- Не усиленная балка;
- Балка, усиленная углепластиком в растянутой зоне при 0%, 30%, 50% и 70% от предельной кривизны не усиленных образцов;
- Балка, усиленная углепластиком в сжатой зоне при 0%, 30%, 50% и 70% от предельной кривизны не усиленных образцов;

Результаты расчета представлены в табл. 1 и на рис. 4 и 5.

Таблица 1

Параметры напряженно-деформированного состояния расчетных сечений

Кривизна в момент усиления, m^{-1}	Предельный изгибающий момент, кН·м	Кривизна, m^{-1}	Жесткость, кН·м ²
Не усиленная балка			
-	3,579	$7,6 \cdot 10^{-2}$	47,10
Балка, усиленная по нижней грани			
0	5,562	$5,4 \cdot 10^{-2}$	100,30
2,3	4,951	$6,0 \cdot 10^{-2}$	82,51
3,8	4,535	$6,25 \cdot 10^{-2}$	72,57
5,3	4,139	$6,75 \cdot 10^{-2}$	61,31
Балка, усиленная по верхней грани			
0	3,853	$10,05 \cdot 10^{-2}$	38,34
2,3	3,941	$11,4 \cdot 10^{-2}$	34,57
3,8	4,001	$12,75 \cdot 10^{-2}$	31,38
5,3	4,035	$13,75 \cdot 10^{-2}$	29,35

Table 1

Parameters of the stress-strain state of design sections

Curvature at the moment of reinforcement, m^{-1}	Ultimate bending moment, kN·m	Curvature, m^{-1}	Stiffness, kN·m ²
Not reinforced beam			
-	3,579	$7,6 \cdot 10^{-2}$	47,10
Beam reinforced with CFRP at the bottom			
0	5,562	$5,4 \cdot 10^{-2}$	100,30
2,3	4,951	$6,0 \cdot 10^{-2}$	82,51
3,8	4,535	$6,25 \cdot 10^{-2}$	72,57
5,3	4,139	$6,75 \cdot 10^{-2}$	61,31
Beam reinforced with CFRP on the top face			
0	3,853	$10,05 \cdot 10^{-2}$	38,34
2,3	3,941	$11,4 \cdot 10^{-2}$	34,57
3,8	4,001	$12,75 \cdot 10^{-2}$	31,38
5,3	4,035	$13,75 \cdot 10^{-2}$	29,35

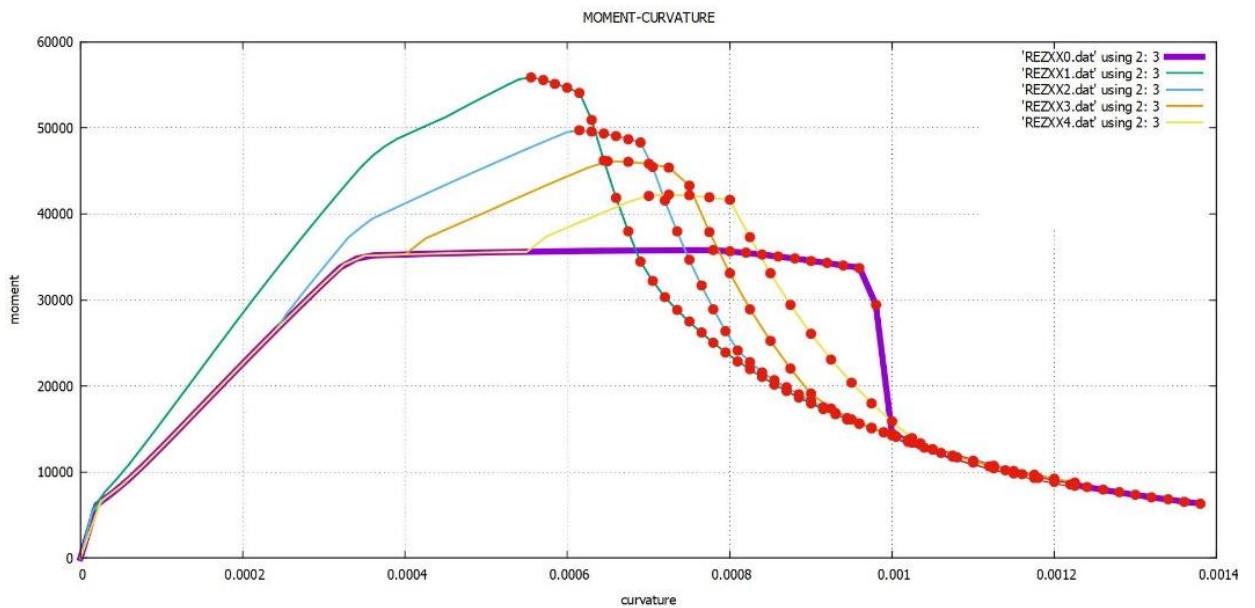


Рисунок 5. График момент-кривизна расчетных сечений при усилении растянутой зоны балки (красными точками обозначено начало раздробления сжатой зоны бетона):

REZXX0 – образец без усиления; REZXX1 – усиление при 0% от предельной кривизны; REZXX2 – усиление при 30% от предельной кривизны; REZXX3 – усиление при 50% от предельной кривизны; REZXX4 – усиление при 70% от предельной кривизны

Figure 5. Graph moment-curvature of design sections with reinforcement of the tension zone of the beam (red dots indicate the beginning of the crushing of the compressed zone of concrete):

REZXX0 - sample without reinforcement; REZXX1 - reinforcement at 0% of ultimate curvature; REZXX2 - reinforcement at 30% of ultimate curvature; REZXX3 - reinforcement at 50% of curvature limit; REZXX4 - reinforcement at 70% of curvature

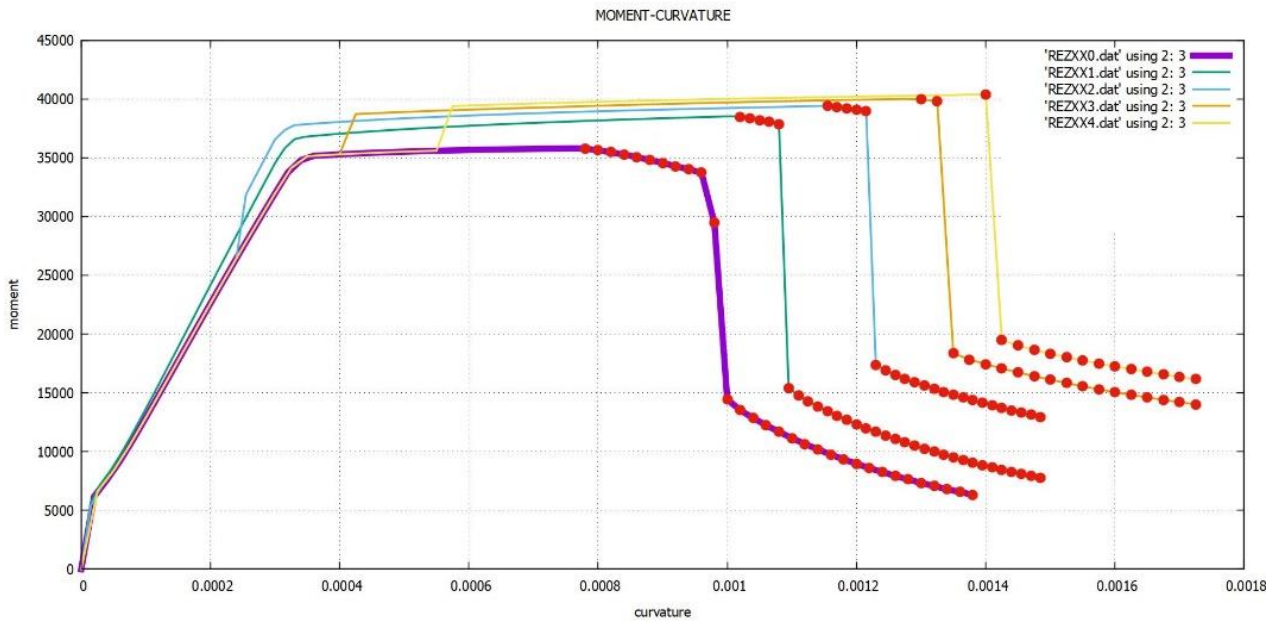


Рисунок 6. График момент-кривизна расчетных сечений при усилении сжатой зоны балки (красными точками обозначено начало раздробления сжатой зоны бетона):

REZXX0 – образец без усиления; *REZXX1*– усиление при 0% от предельной кривизны; *REZXX2*– усиление при 30% от предельной кривизны; *REZXX3*– усиление при 50% от предельной кривизны; *REZXX4*– усиление при 70% от предельной кривизны

Figure 6. Graph moment-curvature of design sections with strengthening of the compressed zone of the beam (red dots indicate the beginning of the crushing of the compressed zone of concrete):

REZXX0 - sample without reinforcement; *REZXX1* - reinforcement at 0% of ultimate curvature; *REZXX2* - reinforcement at 30% of ultimate curvature; *REZXX3* - reinforcement at 50% of curvature limit; *REZXX4* - reinforcement at 70% of curvature

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Разработана методика и составлена программа расчета усиленных изгибаемых железобетонных элементов с учетом реальных физико-механических характеристик материалов, позволяющая учитывать уровень НДС, при котором производилось усиление элементов.
2. Полученная методика и программа расчета позволяют определять параметры НДС сечений в том числе и в закритической области, что актуально при организации итерационных расчетов статически определимых и неопределимых железобетонных балок и приводит к стабилизации итерационного процесса и исключению его «раскачки».
3. Принятый в разработанной методике подход «от кривизны к моменту» существенно улучшит сходимость итерационного процесса при расчете балок, особенно на высоких уровнях нагружения, поскольку здесь значительным изменениям кривизны соответствуют небольшие изменения моментов.
4. На основе разработанной методики выполнены численные исследования работы сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных на различных этапах НДС.
5. Выполненные численные исследования показали существенное влияние уровня нагружения на деформативность, жесткость и прочность нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов в пределах их пролетов.

Анализ полученных данных численного эксперимента указывает на необходимость учета влияния нагрузки усиления на прочность и деформативность изгибаемых железобетонных элементов, что особенно актуально при расчете статически неопределимых балок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Ч.1. Отечественные эксперименты при статическом нагружении [Электронный ресурс], Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2016. [Т. 8]. №3. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/>
2. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чесноков Г.В., Михалдыкин Е.С. Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами. Ч.2. Влияние температуры [Электронный ресурс], Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2016. [Т. 8]. №4. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/01TVN416.pdf>.
3. Быков А.А., Румянцев С.Д., Бирин А.С. Экспериментальное исследование прочностных и деформационных характеристик железобетонных балок, усиленных углепластиком, Вестник ПНИПУ. 2016. №2(22). С. 112–126.
4. Григорьева Я.Е. Экспериментальное исследование влияния внешнего армирования изгибаемых железобетонных балок углеволокном на прочность и жесткость конструкций, Вестник Московского государственного строительного университета. 2011. №8. С. 181–184.
5. Бокарев С.А., Костенко А.Н., Смердов Д.Н., Неровных А.А. Экспериментальные исследования при пониженных и повышенных температурах железобетонных образцов, усиленных полимерными композиционными материалами, Интернет-журнал «Науковедение». 2013. №3 (16). С. 1–9.
6. Смердов М.Н., Смердов Д.Н., Клементьев А.О. Экспериментальные исследования прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, армированных в сжатой и растянутой зоне неметаллической композиционной арматурой, Транспорт Урала. 2014. №4. С. 49–54.
7. Меркулов С. И., Есинов С. М. Экспериментальные исследования железобетонных элементов, усиленных внешним армированием композитными материалами, " Лолейтовские чтения–150". Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям. 2018. С. 248–252.
8. Смоляго Г. А., Обернихина Я. Л. Прочность и деформативность изгибаемых железобетонных элементов, усиленных углепластиком, Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. 2022. №. 4. С. 25–38.
9. Demakos C.B., Repapis C.C., and Drivas D. Investigation of structural response of reinforced concrete beams strengthened with anchored FRPs, Open Const. Build. Technol. J. 2013. Vol. 7. P. 146–157.
10. Spyarakos C. C., Maniatakis C. A., Smyrou E., and Psycharis I. N. FRP strengthened brick-infilled RC frames: an approach for their proper consideration in design, Open Const. Build. Technol. J. 2012. Vol. 6. P. 306–324.
11. Mitolidis G. J., Salonikios T. N., Kappos and A. J. Mechanical and bond characteristics of SRP and CFRP reinforcement—a comparative research, Open Const. Build. Technol. J. 2008. Vol. 2. P. 207–216.
12. Arduini M., Nanni A. Behaviour of pre-cracked R. C. beams strengthened with carbon FRP sheets, ASCE Journal of Composites for Construction. 1997. Vol. 1. № 2. P. 63–70. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0268(1997)1:2(63)
13. Norris T., Saadatmanesh H., and Ehsani M. R. Shear and flexural strengthening of RC beams with carbon fiber sheets, ASCE. J. Struct. 1997. Vol. 123. P. 903–911. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:7(903)
14. Richardson T., Fam A. Modulus effect of bonded cfrp laminates used for repairing preyield and postyield cracked concrete beams, J. Compos. Constr. 2014. Vol. 18. №. 4. P. 30–54. DOI:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000454
15. Fayyadh M. M., Abdul Razak H. Assessment of effectiveness of CFRP repaired RC beams under different damage levels based on flexural stiffness, Constr. Build. Mater. 2012. Vol. 37. P. 125–134.
16. Cao G., Fang Z., Wu J. Experimental study on RC beams strengthened with FRP laminates, Build. Struct. 2005. Vol. 35. P. 214–225. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.021
17. Wang T., Chang Y. Experimental research on the flexural behavior of RC beams strengthened by NSM CFRP sheets, J. Wuhan Univ. Technol. 2009. Vol. 31. P. 5–15.
18. Shin Y.S., Lee C. Flexural behavior of R.C. beams strengthened with carbon fiber-reinforced polymer laminates at different levels of sustaining load, ACI Struct. J. 2003. Vol. 100. P. 231–239.
19. Wenwei W., Guo L. Experimental study and analysis of RC beams strengthened with CFRP laminates under sustaining load, Int. J. Solids Struct. 2006. Vol. 43. P. 1372-1387. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2005.03.076
20. Wang W., Zhao G., Huang C., Ren H. An experimental study of strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using CFRP sheets, Eng. Mech. 2004. Vol. 21. P. 7–19.
21. Wang W., Zhao G., Huang C. An experimental study of RC beams strengthened with CFRP sheets under simulated continuous traffic loads, Eng. Mech. 2006. Vol. 23. P. 6–21.
22. Shahawy M., Chaallal O., Thomas E.B., Adnan E. Flexural strengthening with carbon fiber-reinforced polymer composites of preload full-scale girders, ACI Structural Journal. 2001. Vol. 98. №. 5. P. 735–743.
23. Bonacci J.F., Maalej M. Externally bonded fiber-reinforced polymer for rehabilitation of corrosion damaged concrete beams, ACI Structural Journal. 2000. Vol. 97. №. 5. P. 703–711.
24. Тамразян А.Г. Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирование срока службы железобетонных конструкций, Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 5–18.
25. Мурашкин В.Г. Учет многократного нагружения в деформационной модели для реконструируемого железобетона, Железобетонные конструкции. 2023. Т. 2. № 2. С. 42–47.

REFERENCES

1. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. Analysis of experimental studies on the reinforcement of reinforced concrete structures with polymer composite materials. Part 1. *Domestic experiments under static loading Naukovedenie Internet magazine*. 2016. Vol. 8. No. 3 (2016). <http://naukovedenie.ru/PDF/> (free access). (Rus.)
2. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chesnokov G.V., Mikhaldykin E.S. Analysis of experimental studies on the reinforcement of reinforced concrete structures with polymer composite materials. Part 2. Influence of temperature. *Online magazine "Science"*. 2016. Vol. 8. No. 4 <http://naukovedenie.ru/PDF/01TVN416.pdf> (free access). (Rus.)
3. Bykov A.A., Rummyantsev S.D., Birin A.S. Experimental study of the strength and deformation characteristics of reinforced concrete beams reinforced with carbon fiber. *Vestnik PNRPU*. 2016; 2 (22): 112–126. (Rus.)
4. Grigorieva Ya. E. The strength and deformability of reinforced concrete beams, reinforced with carbon fiber at a stage close to the exhaustion of the bearing capacity. *Vestnik MGSU*. 2011; 8: 181–184. (Rus.)
5. Bokarev S.A., Kostenko A.N., Smerdov D.N., Nerovnykh A.A. Experimental studies at low and high temperatures of reinforced concrete specimens reinforced with polymer composite materials. *Naukovedenie Internet journal*. 2013; 3 (16): 1–9. (Rus.)
6. Smerdov M.N., Smerdov D.N., Klementyev A.O. Experimental studies of the strength and deformability of bending reinforced concrete elements reinforced in a compressed and stretched zone with non-metallic composite reinforcement. *Transport of the Urals*. 2014; 4: 49–54. (Rus.)
7. Merkulov S. I., Esipov S. M. Experimental studies of reinforced concrete elements reinforced with external reinforcement by composite materials. Loleit readings-150. Modern methods for calculating reinforced concrete and stone structures for limiting states. 2018; 1: 248–252. (Rus.)
8. Smolyago G.A., Obernihina Y.L. Strength and deformation of bended reinforced concrete elements reinforced with carbon fiber. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022; 4: 25–38. (Rus.)
9. Demakos C.B., Repapis C.C., and Drivas D. Investigation of structural response of reinforced concrete beams strengthened with anchored FRPs. *Open Const. Build. Technol. J*. 2013; 7: 146–157.
10. Spyarakos C. C., Maniatakis C. A., Smyrou E., and Psycharis I. N. FRP strengthened brick-infilled RC frames: an approach for their proper consideration in design. *Open Const. Build. Technol. J*. 2012; 6: P. 306–324.
11. Mitolidis G. J., Salonikios T. N., Kappos and A. J. Mechanical and bond characteristics of SRP and CFRP reinforcement-a comparative research. *Open Const. Build. Technol. J*. 2008; 2: 207–216.
12. Arduini M., Nanni A. Behaviour of pre-cracked R. C. beams strengthened with carbon FRP sheets. *ASCE Journal of Composites for Construction*. 1997; 1(2): 63–70.
13. Norris T., Saadatmanesh H., and Ehsani M. R. Shear and flexural strengthening of R/C beams with carbon fiber sheets. *ASCE. J. Struct.* 1997; 123: 903–911.
14. Richardson T., Fam A. Modulus effect of bonded CFRP laminates used for repairing preyield and postyield cracked concrete beams. *J. Compos. Constr.* 2014; 18(4): 30–54.
15. Fayyadh M. M., Abdul Razak H. Assessment of effectiveness of CFRP repaired RC beams under different damage levels based on flexural stiffness. *Constr. Build. Mater.* 2012; 37: 125–134.
16. Cao G., Fang Z., Wu J. Experimental study on RC beams strengthened with FRP laminates. *Build. Struct.* 2005; 35: 214–225.
17. Wang T., Chang Y. Experimental research on the flexural behavior of RC beams strengthened by NSM CFRP sheets. *J. Wuhan Univ. Technol.* 2009; 31: 5–15.
18. Shin Y.S., Lee C. Flexural behavior of RC beams strengthened with carbon fiber-reinforced polymer laminates at different levels of sustaining load. *ACI Struct. J*. 2003; 100: 231–239.
19. Wenwei W., Guo L. Experimental study and analysis of RC beams strengthened with CFRP laminates under sustaining load. *Int. J. Solids Struct.* 2006; 43: 1372–1387.
20. Wang W., Zhao G., Huang C., Ren H. An experimental study of strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using CFRP sheets. *Eng. Mech.* 2004; 21: 7–19.
21. Wang W., Zhao G., Huang C. An experimental study of RC beams strengthened with CFRP sheets under simulated continuous traffic loads. *Eng. Mech.* 2006; 23: 6–21.
22. Shahawy M., Chaallal O., Thomas E.B., Adnan E. Flexural strengthening with carbon fiber-reinforced polymer composites of preloaded full-scale girders. *ACI Structural Journal*. 2001; 98(5): 735–743.
23. Bonacci J.F., Maalej M. Externally bonded fiber-reinforced polymer for rehabilitation of corrosion damaged concrete beams. *ACI Structural Journal*. 2000; 97(5): 703–711.
24. Tamrazyan A.G. Methodology for the Analysis and Assessment of the Reliability of the State and Prediction the Service Life of Reinforced Concrete Structures. *Reinforced Concrete Structures*. 2023;1(1): 5–18.
25. Murashkin V.G. Reflection of Multiple Loading in The Deformation Model for Reconstructed Reinforced Concrete. *Reinforced concrete structures*. 2023;2(2):42–47.