

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 9, №1 (2017) <http://naukovedenie.ru/vol9-1.php>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/34TVN117.pdf>

Статья опубликована 08.02.2017

Ссылка для цитирования этой статьи:

Клементьев А.О., Смердов Д.Н. Расчет по прочности сечений, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных элементов с комбинированным армированием металлической и полимерной композиционной арматурой, с использованием нелинейной деформационной модели материалов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №1 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/34TVN117.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 691.328.43

Клементьев Алексей Олегович

ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», Россия, Екатеринбург¹
Ассистент кафедры «Мосты и транспортные тоннели»
E-mail: AOKlementev@mail.ru

Смердов Дмитрий Николаевич

ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», Россия, Екатеринбург
Заведующий кафедрой «Мосты и транспортные тоннели»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: DNSmerdov@mail.ru

**Расчет по прочности сечений, нормальных
к продольной оси изгибаемых железобетонных
элементов с комбинированным армированием
металлической и полимерной композиционной
арматурой, с использованием нелинейной
деформационной модели материалов**

Аннотация. В статье приведен расчет по прочности сечений, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных элементов с комбинированным армированием металлической и полимерной композиционной арматурой, с использованием нелинейной деформационной модели материалов. В современных условиях с развитием численных методов решения задач теории бетона и железобетона широкое применение получил метод расчета сечений, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных элементов, с использованием нелинейной деформационной модели (НДМ) материалов бетона и арматуры. Для определения напряженного состояния изгибаемых железобетонных элементов в сечениях, нормальных к продольной оси элемента, широко применяются расчеты сечений по предельным состояниям с использованием фактических диаграмм деформирования бетона и арматуры. Особенностью этих расчетов является то, что задача определения напряженно-деформированного по высоте сечения элемента сводится к решению ряда последовательных итерационных линейно-упругих задач для этого же элемента с пошаговым приращением внешней нагрузки. В статье представлен способ расчета по предельным состояниям сечений, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных элементов с комбинированным армированием металлической и

¹ 620130, г. Екатеринбург, ул. Юлиуса Фучика, 13-9

полимерной композиционной арматурой, с использованием нелинейной деформационной модели материалов бетона и арматуры.

Ключевые слова: численные методы решения; расчеты; изгибаемые железобетонные элементы; нелинейная деформационная модель; расчетная схема; композиционная арматура; фактическая жесткость

В современных условиях с развитием численных методов решения задач теории бетона и железобетона широкое применение получил метод расчета сечений, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных элементов, с использованием нелинейной деформационной модели (НДМ) материалов бетона и арматуры [7], [12]. Численные методы решения задач теории бетона и железобетона широко изложены в работах С.А. Бокарева [3], Н.И. Безухова и О.В. Лужина [1], [2], Г.М. Власова и В.М. Козлова [4], [5], А.С. Залесова [6], И.И. Ильюшина [7], В.С. Плевкова [14], Н.И. Карпенко [8], В.М. Круглова [8], А.Г. Колмогорова [13], О.Г. Кумпяка [9], Л.Ю. Соловьева [8], а также в других работах. Для определения напряженного состояния изгибаемых железобетонных элементов в сечениях, нормальных к продольной оси элемента, широко применяются расчеты сечений по предельным состояниям с использованием фактических диаграмм деформирования бетона и арматуры [4]. Особенностью этих расчетов является то, что задача определения напряженно-деформированного по высоте сечения элемента сводится к решению ряда последовательных итерационных линейно-упругих задач для этого же элемента с пошаговым приращением внешней нагрузки. Ниже представлен способ расчета по предельным состояниям сечений, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных элементов с комбинированным армированием металлической и полимерной композиционной арматурой, с использованием нелинейной деформационной модели материалов бетона и арматуры.

Расчетная схема изгибаемых железобетонных элементов с комбинированным армированием металлической и полимерной композиционной арматурой, принята в виде стержня, работающего на изгиб, как показано на рисунке 1.

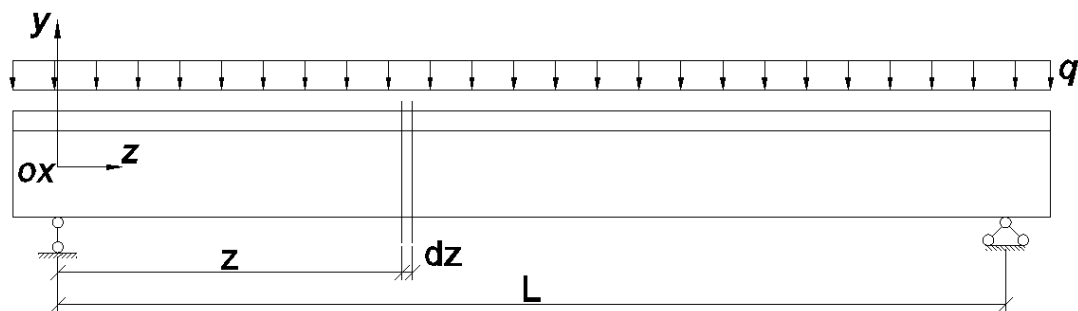


Рисунок 1. Расчетная схема изгибаемого железобетонного элемента
(разработано автором)

При расчете сечений, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных элементов используется гипотеза плоских сечений, при этом принято, что каждое волокно сечения работает в условиях одноосного напряженного состояния [15]. Расчетные схемы и формы поперечных сечений изгибаемых железобетонных элементов приняты по рисунку 1.

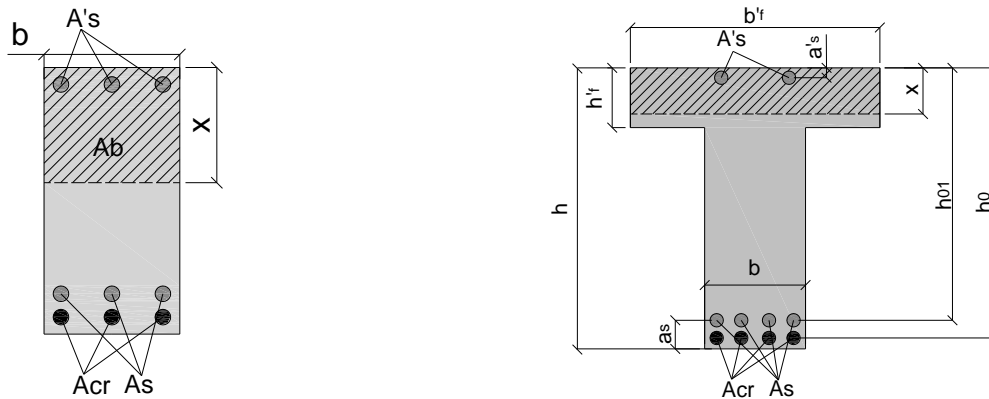


Рисунок 2. Формы поперечных сечений изгибаемых железобетонных элементов с комбинированным армированием металлической и полимерной композиционной арматурой (разработано автором)

Принятая в расчетах диаграмма деформирования бетона, приведена на рисунке 3.

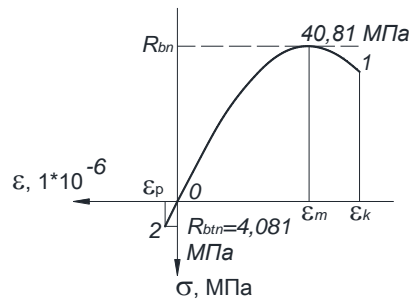


Рисунок 3. Принятая в расчетах диаграмма деформирования бетона при сжатии и растяжении (разработано автором)

Диаграмма деформирования металлической арматуры принята в виде диаграммы Прандтля, которая показана на рисунке 4.

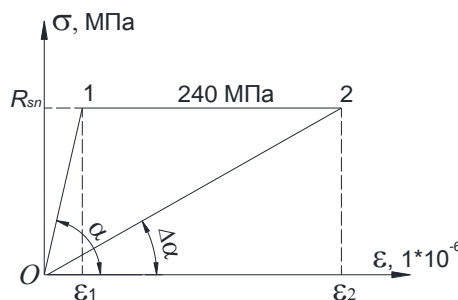


Рисунок 4. Диаграмма деформирования металлической арматуры (разработано автором)

Диаграмма деформирования полимерной композиционной арматуры на всем свое протяжении принята линейной для которой напряжения определяются по закону Гука по формуле:

$$\sigma_{cr} = \varepsilon_{cr} E_{cr}, \quad (1)$$

где: ε_{cr} - предельные относительные деформации в полимерной композиционной арматуре в момент наступления предельного состояния в сечении, нормальном к продольной оси элемента;

E_{cr} - модуль упругости полимерной композиционной арматуры, МПа.

Относительные деформации в нормальном сечении элемента определяются по формуле:

$$\varepsilon = \frac{M_{\omega} + \Delta M}{E_b I_{red}} y, \quad (2)$$

где: M_{ω} - внутренний момент в нормальном сечении элемента от действия внешних сил, кНм;

ΔM - принятый шаг нагружения элемента, кНм;

I_{red} - приведенный момент инерции нормального сечения, м⁴;

y - координата по высоте сечения, начало которой расположено на уровне нейтральной оси, м.

Внутренний момент M_{ω} в нормальном сечении определяется по формуле:

$$M_{\omega} = \sum_{i=1}^n \int_A \sigma_i^b y_i^b dA + \sum_{k=1}^m \sigma_k^s y_k^s A_k^s + \sum_{j=1}^l \sigma_j^{cr} y_j^{cr} A_j^{cr}, \quad (3)$$

где: n - количество слоев бетона в нормальном сечении с различными прочностными и деформативными характеристиками;

m - количество стержней рабочей металлической арматуры;

l - количество стержней рабочей полимерной композиционной арматуры;

A - площадь рабочей зоны бетона в нормальном сечении, м²;

A_k^s - площадь поперечного сечения k -го стержня рабочей металлической арматуры, м²;

A_j^{cr} - площадь поперечного сечения j -го стержня рабочей полимерной композиционной арматуры.

Приведенный момент инерции сечения, нормального к продольной оси изгибаемого железобетонного элемента с комбинированным армированием металлической и полимерной композиционной арматурой, определяются по формуле:

$$I_{red} = \sum_{i=1}^n n_i^b \int_A y_i^b dA + \sum_{k=1}^m n_k^s (y_k^s)^2 A_k^s + \sum_{j=1}^l n_j^{cr} (y_j^{cr})^2 A_j^{cr}, \quad (4)$$

где n_i^b , n_k^s и n_j^{cr} - коэффициенты приведения модулей упругости материалов слоев к эталонному материалу к бетону с наиболее низким модулем упругости.

В первом приближении M_{ω} принимается равным нулю и по формуле (2) определяется деформированное состояние нормального сечения этого приближения. Затем по формуле (3) находится значение M_{ω} , подставив которое в формулу (2) получают характеристики деформированного состояния нормального сечения второго приближения. Итерационный процесс продолжается до тех пор пока для элемента выполняется условие равновесия внешних M и внутренних M_{ω} усилий. В случае, если значения величин M и M_{ω} расходятся относительно принятого предела расхождения в текущей итерации, то считается, что в сечении, нормальном к продольной оси изгибаемого железобетонного элемента с комбинированным армированием металлической и полимерной композиционной арматуре наступило предельное состояние. Соответствующего в момент наступления предельного состояния с использованием формулы

(2) может быть определена величина предельных нормальных напряжений в полимерной композиционной арматуре σ_{cr} по формуле (1).

С использованием фактической жесткости $E_b I_{red}$ изгибаемого железобетонного элемента с комбинированным армированием металлической и полимерной композиционной арматурой (см. рисунок 1) с учетом трещин, можно определить прогиб конструкции в предельном состоянии, решив дифференциальное уравнение вида:

$$\frac{d^2 V_y(z)}{dz^2} = \frac{M_{\omega, x}(z)}{E_b I_{red}}, \quad (5)$$

где: V_y - величины прогиба изгибаемого элемента в середине пролета, м;

x , y и z - обозначение осей локальной системы координат изгибаемого элемента (см. рисунок 1).

По описанной выше методике расчета по прочности сечений, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных элементов с использованием нелинейной деформационной модели материалов, на платформе вычислительного пакета MATLAB была разработана соответствующая автоматизированная программа, алгоритм которой реализован на языке программирования MATLAB Language функционирующем как встроенное приложение в MATLAB в операционной среде Microsoft Windows [15].

В разработанном расчетном комплексе на платформе вычислительного пакета MATLAB был выполнен расчет сечений, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных элементов, образцов серии «УП» с полимерной композиционной арматурой на основе углеродных волокон с использованием нелинейной деформационной модели материалов. По результатам расчета образцов серии «УП» был построен график изменения прогиба балок в зависимости от приложенной нагрузки, который представлен на рисунке 5, а, а также график, показывающий характер изменения расчетной эпюры напряжений в бетоне в процессе нагружения образца по высоте нормального сечения в середине пролета от начала трещинообразования и до наступления предельного состояния, который показан на рисунке 5, б.

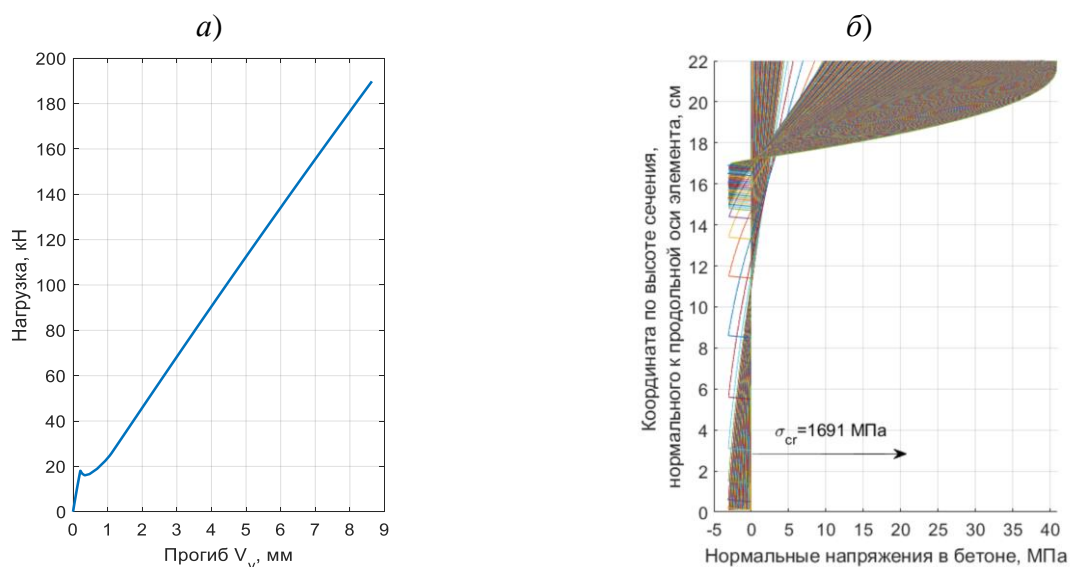


Рисунок 5. Графики по результат расчета нормальных сечений образцов серии «УП»: а) нагрузка-прогиб по формуле (5); б) изменение эпюры нормальных напряжений в бетоне по высоте сечения (разработано автором)

В таблице 1 представлено сравнение результатов расчета образцов серии «УП» с полимерной композиционной арматурой на основе углеродных волокон с использованием нелинейной деформационной модели материалов с результатами испытания этих же образцов на прочность и деформативность.

Таблица 1

Несущая способность балок серии «УП» по данным эксперимента и расчета с использованием нелинейной деформационной модели (разработано автором)

№ п.п.	Серия балок	Номер образца	Несущая способность и деформативность образцов по результатам эксперимента				Несущая способность и деформативность образцов по результатам расчета НДМ		Отклонение экспериментальных данных от результатов расчета по НДМ, %	
			P , кН	P_{cp} , кН	δ , мм	δ_{cp} , мм	P_{calc} , кН	δ_{calc} , мм		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	УП	1	163,04	177,33	6,46	9,49	189,80	8,64	-16,41	-7,65
2		2	162,16		9,91				-17,04	
3		3	206,79		12,09				8,22	

Из рисунка 5, а, и таблицы 1 видно, что несущая способность образцов серии «УП» из расчета по нелинейной деформационной модели составила 189,80 кН, а прогиб в предельном состоянии 8,64 мм. Экспериментальное значение несущей способности для образцов серии «УП» составило в среднем 177,33 кН, что на 7,65% ниже по сравнению с расчетом по нелинейной деформационной модели. Как видно из рисунка 5, б, величина предельных нормальных напряжений в полимерной композиционной арматуре σ_{cr} составила 1691 МПа, которая ниже ее фактического сопротивления растяжению [10], [11], [13].

Выполненные расчеты образцов серии «УП» с полимерной композиционной арматурой на основе углеродных волокон с использованием нелинейной деформационной модели материалов подтверждают справедливость применения уравнений равновесия метода предельных состояний, которые предполагают, что предельное состояние бетона сжатой зоны изгибаемых элементов наступает ранее достижения в растянутой полимерной композиционной арматуре напряжения, равного их расчетному сопротивлению R_{cr} . Предложенный способ расчета сечений, нормальных к продольной оси изгибаемых железобетонных элементов с комбинированным армированием металлической и полимерной композиционной арматурой, по предельным состояниям с использованием нелинейной деформационной модели позволяет определять напряженно-деформированное состояние по высоте сечения элементов с учетом фактических диаграмм деформирования бетона и арматуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безухов, Н.И. Основы теории сооружений, материал которых не следует закону Гука: Труды МАДИ / Н.И. Безухов. - М.: Трансиздат, 1966. - С. 7-80.
2. Безухов, Н.И. Приложение методов теории упругости и пластичности к решению инженерных задач / Н.И. Безухов, О.В. Лужин. - М.: Высшая школа, 1974. - 200 с.
3. Бокарев, С.А. Учет пластических свойств бетона и влияние попеременного замораживания и оттаивания на изменение его прочностных и деформативных характеристик в расчетах бетонных опор мостов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / Бокарев Сергей Александрович. - Новосибирск, 1986. - 214 с.

4. Власов, Г.М. К определению напряженного состояния железобетонных элементов с учетом пластических свойств бетона / Г.М. Власов, В.М. Козлов // Исследование работы искусственных сооружений. - Новосибирск: НИИЖТ, 1974. - С. 3-14.
5. Власов, Г.М. Расчет железобетонных мостов: монография / Г.М. Власов, В.П. Устинов. - М.: Транспорт, 1992. - 256 с.
6. Залесов, А.С., Исследование работы железобетонных балок-стенок на действие поперечных сил / А.С. Залесов, В.Н. Сахаров, А.В. Старчевский, Б.С. Соколов // Новые исследования элементов железобетонных конструкций при различных предельных состояниях. - М., 1982. - С. 60-71.
7. Ильюшин, А.А. Пластичность / А.А. Ильюшин. - М.: Изд-во АН СССР, 1963. - 376 с.
8. Карпенко, Н.И. Нелинейное деформирование бетона и железобетона / Н.И. Карпенко, В.М. Круглов, Л.Ю. Соловьев. - Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2001. - 276 с.
9. Кумпяк О.Г. Железобетонные и каменные конструкции: учебник / О.Г. Кумпяк, З.Р. Галяутдинов, О.Р. Пахмурин, В.С. Самсонов; под ред. О.Г. Кумпяка. - Москва, 2014. - 748 с.
10. Клементьев, А.О. Методика расчета изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерными композиционными материалами / М.Н. Смердов, Д.Г. Неволин, А.О. Клементьев, Д.Н. Смердов // Транспорт Урала. - 2015. - №3. - С. 98-101.
11. Клементьев, А.О. Обзор литературы по применению в железобетонных пролетных строениях мостов неметаллической композитной арматуры / М.Н. Смердов, А.О. Клементьев // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. - Екатеринбург: УрГУПС, 2013. - №4. - С. 74-80.
12. Козлов, В.М. Использование метода упругих решений для расчета нормальных сечений железобетонных элементов мостовых конструкций: дис. ... канд. техн. наук 05.23.15 / Козлов Владимир Михайлович. - Новосибирск, 1980. - 220 с.
13. Плевков, В.С. Расчет железобетонных конструкций по Российским и зарубежным нормам: учебное пособие / В.С. Плевков, А.Г. Колмогоров, - Томск: Печатная мануфактура, 2009. - 496 с.
14. Плевков, В.С. Прочность и деформативность арматуры композитной полимерной при статическом и кратковременном динамическом растяжении и сжатии / В.С. Плевков, И.В. Балдин, К.Л. Кудяков, А.В. Невский // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. - 2016. - №5 (58). - С. 91-101.
15. Смердов, Д.Н. Оценка несущей способности железобетонных пролетных строений мостов, усиленных композиционными материалами: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / Смердов Дмитрий Николаевич. - Новосибирск, 2010. - 159 с.

Klementyev Aleksey Olegovich

Ural state university of railway transport, Russia, Yekaterinburg
E-mail: AOKlementev@mail.ru

Smerdov Dmitry Nikolaevich

Ural state university of railway transport, Russia, Yekaterinburg
E-mail: DNSmerdov@mail.ru

The calculation of the strength of the cross-sections normal to the longitudinal axis of bendable concrete elements with combined reinforcement in metal and polymer composite fittings, using a nonlinear deformation model of the material

Abstract. The article describes the calculation of the strength of the cross-section normal to the longitudinal axis of bendable concrete elements with combined reinforcement by steel and polymer composite fittings, using a nonlinear deformation model of the material. In modern conditions of development of numerical methods for solving problems of the theory of concrete and reinforced concrete widely used method of calculating the cross sections normal to the longitudinal axis of the bent reinforced concrete elements using nonlinear deformation model (NDM) materials concrete and reinforcement. To determine the stress state of bending reinforced concrete elements in cross sections normal to the longitudinal axis of the element, are widely used calculations of the cross sections at the limit state using actual diagrams of deformation of concrete and reinforcement. A feature of these calculations is that the problem of determining the stress-strain the height of the cross section of the element is reduced to the solution of a series of successive iterative linear-elastic problems for the same item with step by step increment of the external load. The following is a method of calculation for limit state design of sections normal to the longitudinal axis of bendable concrete elements with combined reinforcement in metal and polymer composite reinforcement using the nonlinear deformation material models of concrete and reinforcement.

Keywords: numerical methods of solution; computations; flexible reinforced concrete elements; nonlinear deformation model; design model; composite rebar; the actual stiffness