

УДК 624.012.45

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, УСИЛЕННЫХ
НАРАЩИВАНИЕМ СЖАТОЙ ЗОНЫ

STRENGTH AND DEFORMABILITY OF REINFORCED CONCRETE
MEMBERS SUBJECTED TO BENDING THAT REINFORCED BY
INCREASING OF THE COMPRESSED ZONE

Семенюк С.Д., д.т.н., проф., зав. кафедрой, Москалькова Ю.Г., к.т.н. доц.
Подголин А.Г., магистрант (Белорусско-Российский университет, г.
Могилёв, Республика Беларусь)

Semeniuk S.D., doctor of technical sciences, professor, head of department,
Moskalkova Y.G., candidate of technical sciences, associate professor,
Podgolin A.G., graduate student (Belorussian-Russian University, Mogilev,
Republic of Belarus)

Приведены особенности уточнённой методики расчёта железобетонных изгибающихся элементов прямоугольного сечения, усиленных наращиванием сжатой зоны. На основе упрощённой упругопластической модели приводится методика расчёта прочности нормальных и наклонных сечений и упрощённый метод расчёта по деформациям и ширине раскрытия трещин. Предлагаемая методика расчёта основана на приведённых экспериментальных и теоретических исследованиях.

The specified method of calculation of reinforced concrete elements of rectangular section subjected to bending that reinforced by increasing of the compressed zone is presented. Method of calculating the strength of normal and sloping sections and a simplified method of calculation of the deformations and cracking width are given on the basis of simplified elastic-plastic model. The proposed calculation method is based on the given experimental and theoretical researches.

Ключевые слова: железобетон, исследования, упруго-пластическая модель, прочность, сечения, деформации, прогибы, трещина, обеспеченность точности, расчёт.

Reinforced concrete, researches, elastic-plastic model, strength, cross-section, deformation, deflection, cracks, accuracy grade, calculation.

Введение. Анализ существующих моделей расчёта прочности и деформативности изгибающихся железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, показал, что на сегодняшний день существуют

две основные модели расчёта нормальных сечений железобетонных элементов: альтернативная (метод предельных усилий) и деформационная. В странах СНГ довольно популярной становится упругопластическая модель расчёта, основанная на представлении связи между напряжениями и деформациями бетона в виде билинейной диаграммы.

Обзор публикаций показал, что в Республике Беларусь на сегодняшний день в достаточной степени не изучена работа железобетонных элементов при действии нагрузок малоциклического характера. Изучение работы изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при действии малоциклических нагрузок к настоящему времени не проводилось.

Постановка задачи и цели исследований. С целью достаточно полного изучения особенностей работы изгибаемых железобетонных элементов с неоднородной структурой сжатой зоны (бетоны разных классов) были проведены экспериментальные исследования на четырёх сериях образцов включавших в себя 46 балок и необходимое количество кубов, призм и цилиндров. Программа и методика экспериментальных исследований позволили обеспечить необходимую достоверность полученных результатов.

Для расчёта нормальных и наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов предложена единая методика расчёта на основе уточнённой упругопластической модели, которая позволяет учесть влияние повторных нагрузок на несущую способность усиленной конструкции.

На рисунке 1 представлена схема внутренних усилий в сечении изгибающегося элемента, усиленного наращиванием сжатой зоны, при жестком контактном шве.

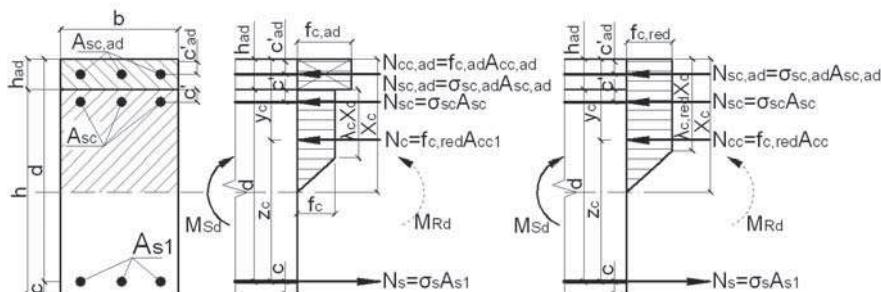


Рис. 1 Расчетная схема к проверке прочности нормальных сечений

При расчёте нормальных сечений усиленных конструкций предыстория загружения учитывается уточнением прочностных характеристик бетона усиливаемого элемента в зависимости от режима предварительного нагружения: $f'_{cd,cyc} = \gamma_{c,cyc} f'_{cd}$.

Расчёт усиленной наращиванием конструкции производится по следующим характеристикам:

- для бетона усиливаемой конструкции: $f_{cd,cyc} = \gamma_{c,cyc} f'_{cd}$,

$$E_{c,cyc} = \frac{55f_{cd,cyc}}{19 + \eta_{top1}f_{cd,cyc}};$$

- для бетона усиления: $f_{cd,ad,cyc} = \gamma_{c,cyc} f_{cd,ad}$, $E_{c,ad,cyc} = \frac{55f_{cd,ad,cyc}}{19 + \eta_{top1}f_{cd,ad,cyc}}$.

Расчётное значение разрушающего момента M_{Rd} :

- если нейтральная ось проходит в пределах усиления ($X_c \leq h_{ad}$):

$$M_{Rd} = 0,5f_{cd,ad,cyc}bX_c[(1+\lambda_{c,ad})d - 0,33X_c(1+\lambda_{c,ad} + \lambda_{c,ad}^2)] + \sigma_{sc,ad}A_{sc,ad}(d - c'_{ad}). \quad (1)$$

- если нейтральная ось проходит в теле усиливаемой конструкции ($X_c > h_{ad}$):

$$M_{Rd} = 0,5f_{cd,red,cyc}bX_c[(1+\lambda_{c,red})d - 0,33X_c(1+\lambda_{c,red} + \lambda_{c,red}^2)] + \sigma_{sc}A_{sc}(d - h_{ad} - c') + \sigma_{sc,ad}A_{sc,ad}(d - c'_{ad}). \quad (2)$$

Недостаточное обеспечение жёсткости (податливость) шва контакта двух бетонов оказывает существенное влияние на работу конструкции и может изменить механизм её разрушения: разрушение может произойти по наклонному сечению без достижения бетоном сжатой зоны и растянутой арматурой предельных деформаций.

В случае недостаточной обеспеченности жёсткости контактного шва установлена необходимость обязательной проверки наклонных сечений усиленных наращиванием изгибаемых железобетонных элементов.

Расчёт производится по уточнённой упругопластической модели с учётом корректировки значения коэффициента пластичности следующим образом:

$$\lambda_c^* = 1 - \frac{1 - \lambda_c}{K}. \quad (3)$$

Эмпирический коэффициент К определяется по графикам « $K-a/d$ » (рис. 2), которые позволяют перейти от деформаций граничной сжимаемости в направлении главных сжимающих напряжений к деформациям крайних сжатых волокон бетона.

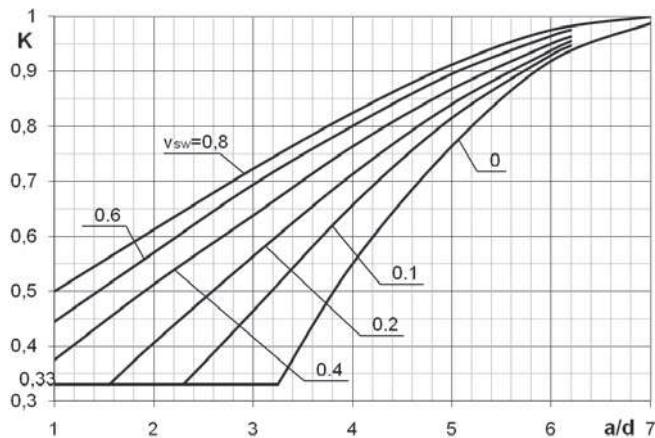


Рис. 2 График зависимости « $K - a/d$ » (по величине усилия в хомутах на единицу длины элемента v_{sw} , МПа·м)

Таким образом, проверку прочности наклонных сечений можно заменить проверкой прочности нормальных сечений с пониженной деформативностью сжатого бетона, то есть использовать одну расчётную методику - упругопластическую модель - для элементов с различными механизмами разрушения.

Если контактный шов оказывается податливым, то в предельной стадии (при разрушающей нагрузке) основная конструкция и набетонка будут работать как отдельные элементы, деформируемые совместно. В связи с этим высота сжатой зоны определяется как в бетоне усиления $X_{c,ad}$, так и в теле основной конструкции X_c , а несущая способность составного сечения определяется как сумма моментов, воспринимаемых усилием M_1 и усиливающей конструкцией M_2 :

$$M_1 = 0,5 f_{cd,ad,cyc} b X_{c,ad} [(1 + \lambda_{c,ad}^*) d - 0,33 X_{c,ad} (1 + \lambda_{c,ad}^* + \lambda_{c,ad}^{*2})] + \\ + \sigma_{sc,ad} A_{sc,ad} (d - c'_{ad}); \quad (4)$$

$$M_2 = 0,5 f_{cd,cyc} b X_c [(1 + \lambda_c^*) d - 0,33 X_c (1 + \lambda_c^* + \lambda_c^{*2})] + \\ + \sigma_{sc} A_{sc} (d - h_{ad} - c'); \quad (5)$$

$$M_{Rd} = M_1 + M_2. \quad (6)$$

Рассматривается упрощённый метод расчёта по деформациям изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при действии нагрузок малоциклового характера, основанный на определении значений относительных деформаций сжатого бетона и растянутой арматуры в соответствии с ТКП EN 1992-1-1-2009.

На рисунке 3 представлена схема внутренних усилий в сечении усиленного изгибающегося элемента.

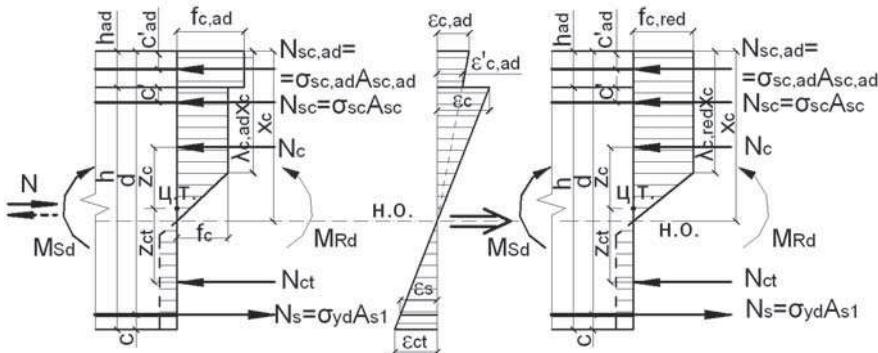


Рис. 3 К определению относительных деформаций сжатого бетона и растянутой арматуры: а) эпюра напряжений в сечении усиленного изгибающегося железобетонного элемента; б) эпюра деформаций; в) эпюра напряжений для приведенного значения прочности бетона

Относительные деформации сжатого бетона $\varepsilon_{cc,cyc}$ при малоциклическом нагружении:

$$\varepsilon_{cc,cyc} = \varepsilon_{cl,cyc}^{изг} = 0,7 \cdot (1,25 f_{c,cyc,red})^{0,31}; \quad (7)$$

$$\varepsilon_{cc,cyc}^{\text{ОМП}} = \varepsilon_{cl,cyc}^{\text{ОМП изг}} = (1,25 f_{c,cyc,red}^{\text{ОМП}})^{1,07 - \eta_{crc}^0}. \quad (8)$$

Деформации растянутой арматуры ε_s предложено определять следующим образом:

- если расчётные напряжения в арматуре σ_s не превышают предела текучести стали ($\sigma_s < f_{sm}$), то

$$\varepsilon_{st,cyc} = \sigma_s / E_s. \quad (9)$$

- если расчётные напряжения в арматуре σ_s превышают предел текучести стали ($\sigma_s \geq f_{sm}$), то

$$\varepsilon_{st,cyc} = \eta_{top} \cdot \sigma_s / E_s. \quad (10)$$

Авторами предложено при расчёте прогибов опытных балок использовать полученные по приведенной выше методике значения средних относительных деформаций бетона и арматуры. Учёт действия нагрузок малоциклического характера производится путём уточнения прочностных и деформативных характеристик бетона сжатой зоны. Для усиленных образцов расчёт производится по приведенным характеристикам.

Кривизна железобетонных изгибаемых элементов:

$$\left(\frac{1}{r} \right)_{cyc} = \frac{\varepsilon_{cc,cyc} + \varepsilon_{ct,cyc}}{d}. \quad (11)$$

Изгибная жёсткость элемента:

$$B_{cyc} = \frac{M_{sd}}{(1/r)_{cyc}}. \quad (12)$$

Прогибы опытных балок определяются по формуле:

$$a_{cyc} = \alpha_k \frac{M_{sd} l_{eff}^2}{B_{cyc}} = \alpha_k \left(\frac{1}{r} \right)_{cyc} l_{eff}^2. \quad (13)$$

Для образцов с недостаточной обеспеченностью жёсткости контактного шва (разрушение по наклонному сечению) предложено расчётный прогиб увеличивать на 30 %, то есть $a_{cyc}^{накл} = 1,3a_{cyc}$.

Ширина раскрытия нормальных трещин:

$$w_{k,cyc} = S_r \cdot (\varepsilon_{cc,cyc} + \varepsilon_{st,cyc}). \quad (14)$$

Ширина раскрытия наклонных трещин:

$$w_{k,cyc}^{накл} = S_r \cdot (\varepsilon_{cc,cyc}^* + \varepsilon_{st,cyc}), \quad (15)$$

где

$$\varepsilon_{cc,cyc}^* = k_{crc,ad} \varepsilon_{cc,cyc}. \quad (16)$$

Сравнение результатов расчёта ширины раскрытия трещин опытных балок при статическом и малоциклическом нагружениях даёт хорошую сходимость с экспериментальными данными.

Для предлагаемой модели расчёта изгибающихся железобетонных элементов как усиленных наращиванием в сжатой зоне, так и неусиленных, при действии малоциклических нагрузок различных уровней представлено сопоставление расчётных и опытных значений для 46 балок и произведена оценка точности методом математической статистики согласно ТКП ЕН 1990-2011.

По отношениям опытных данных к теоретическим были построены гистограмма и кривая нормального распределения. Так как значения критериев В.И. Романовского, Б.С. Ястребского не превышают 3, то эмпирическое наблюдение можно описать кривой нормального распределения. Используя закон нормального распределения, интегральным методом по формуле А.М. Ляпунова

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left[\frac{S_n - A_n}{B_n} < x \right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-z^2/2} dz, \quad (17)$$

определенна обеспеченность предлагаемой модели расчёта в заданных пределах.

Таблица 1

Обеспеченность точности предлагаемой модели расчёта изгибаемых
железобетонных элементов при однократном и малоциклическом видах
нагружения

Рассчитываемый параметр	Математическое ожидание m_z	Среднее квадратическое отклонение s_z	Коэффициент вариации V	Обеспеченность точности % при отклонении			
				± 5	± 10	± 15	± 20
Разрушающий момент, M_{Rd} :							
при расчёте по уточнённой упругопластической модели	1,01709	0,05778	0,05681	61,31	91,65	99,05	99,93
при расчёте по упруго-пластической модели	0,98319	0,08286	0,08428	45,37	77,25	92,98	98,38
при расчёте по альтернативной модели	0,98443	0,08290	0,01842	45,35	77,23	92,97	98,41
при расчёте по деформационной модели	0,98909	0,08985	0,09084	42,21	73,42	90,49	97,40
Прогиб, а	1,09419	0,12904	0,11793	30,15	56,17	75,50	87,88
Ширина раскрытия трещин, w_k	1,01165	0,11714	0,11579	33,05	60,67	79,96	91,23

Выводы: Предлагаемая уточнённая методика прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных набетонкой, позволяет адекватно оценивать влияние предыстории нагружения, реальных свойств материалов, обеспечивая тем самым необходимый уровень конструктивной безопасности усиливаемых сборных железобетонных конструкций в виде балок, плит покрытия и перекрытия.

1. Семенюк, С.Д. Усиление сжатой зоны железобетонных изгибаемых элементов / С. Д. Семенюк, Ю. Г. Болошенко // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. тр., Минск, 16-19 октяб. 2007 г. : в 2 ч. / Институт БелНИИС; редкол. : М.Ф. Марковский [и др.]. - Минск : Стринко, 2007. - Ч. 1. Бетонные и железобетонные конструкции. - с. 306-321.
2. Болошенко, Ю.Г. Методика экспериментальных исследований работы железобетонных изгибаемых элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, в условиях действия малоциклических нагрузок / Ю.Г. Болошенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. -2009. - №4 (25). - с. 142-147.
3. Семенюк, С.Д. Расчет прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов с высокопрочной арматурой или переармированным сечением / С. Д. Семенюк, Ю. Г. Болошенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будовлі та споруди : збірник наукових праць / Нац. ун-т водн. госп-ва та природокорист.; редкол. : Є.М. Бабич [та інш.]. - Рівне, 2009. - Вип. 18. - с. 318-325.
4. Семенюк, С.Д. Ефективність усилення

сжатой зоны изгибаемых железобетонных конструкций при малоциклическом нагружении / С.Д. Семенюк, Ю.Г. Болощенко // Будівельні конструкції : міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво) : в 2 кн. / Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку та будівництва України ; редкол. : А.М. Бамбура [та інш.]. - Київ: ДП НДІБК, 2011. - Вип. 74. - Кн. 2. - с. 611-618. **5.** Семенюк, С.Д. Расчет прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при действии малоциклических нагрузений / С.Д. Семенюк, Ю.Г. Болощенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будовлі та споруди : збірник наукових праць / Нац. ун-т водн. госп-ва та природокорист.; редкол. : Є.М. Бабич [та інш.]. - Рівне, 2012. - Вип. 23. - с. 523-532. **6.** Семенюк, С.Д. Прогибы изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при действии малоциклических нагрузений / С.Д. Семенюк, Ю.Г. Болощенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будовлі та споруди : збірник наукових праць / Нац. ун-т водн. госп-ва та природокорист.; редкол. : Є.М. Бабич [та інш.]. - Рівне, 2012. - Вип. 24. - с. 555-564.