

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, УСИЛЕННЫХ НАРАЩИВАНИЕМ СЖАТОЙ ЗОНЫ

Семенюк С.Д., д-р техн. наук, профессор,
Москалькова Ю.Г., канд. техн. наук, доцент (БРУ)

Аннотация. В статье представлены особенности уточнённой методики расчёта железобетонных изгибаемых элементов прямоугольного сечения, усиленных наращиванием сжатой зоны. Рассматривается упрощённая упругопластическая модель для проверки прочности нормальных и наклонных сечений. Приводится упрощённый метод расчёта по деформациям и ширине раскрытия трещин.

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 изгибаемого элемента, усиленного наращиванием сжатой зоны, при жестком контактном шве.

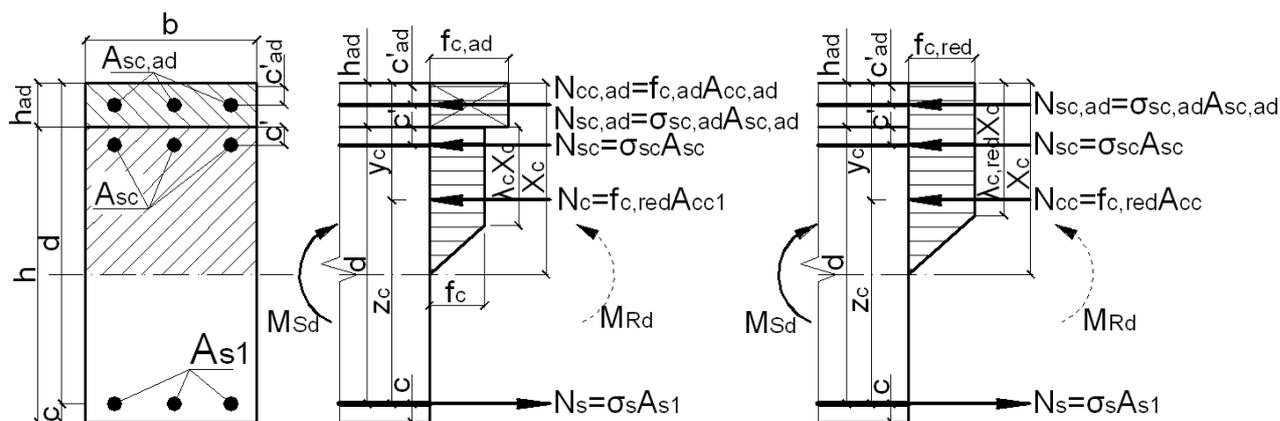


Рисунок 1 – Расчетная схема к проверке прочности нормальных сечений

При расчёте нормальных сечений усиленных конструкций предыстория загрузки 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: $f_{cd,cyc} = \Gamma_{c,cyc} f'_{cd}$,

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

- для бетона усиления: $f_{cd,ad,cyc} = \gamma_{c,cyc} f_{cd,ad}$,

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

Расчётное значение разрушающего момента M_{Rd} :

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

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

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

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

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

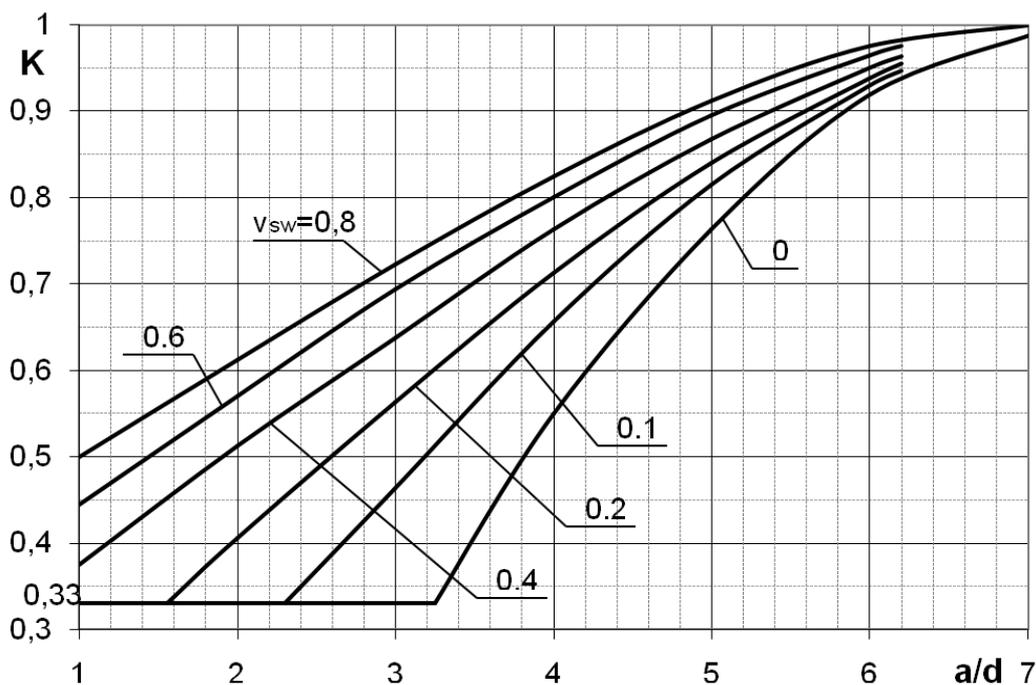


Рисунок 2 – График зависимости « $K - a/d$ » (по величине усилия в хомутах на единицу длины элемента v_{sw} , МПа·м)

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 усилением M_1 и усиливаемой конструкцией M_2 :

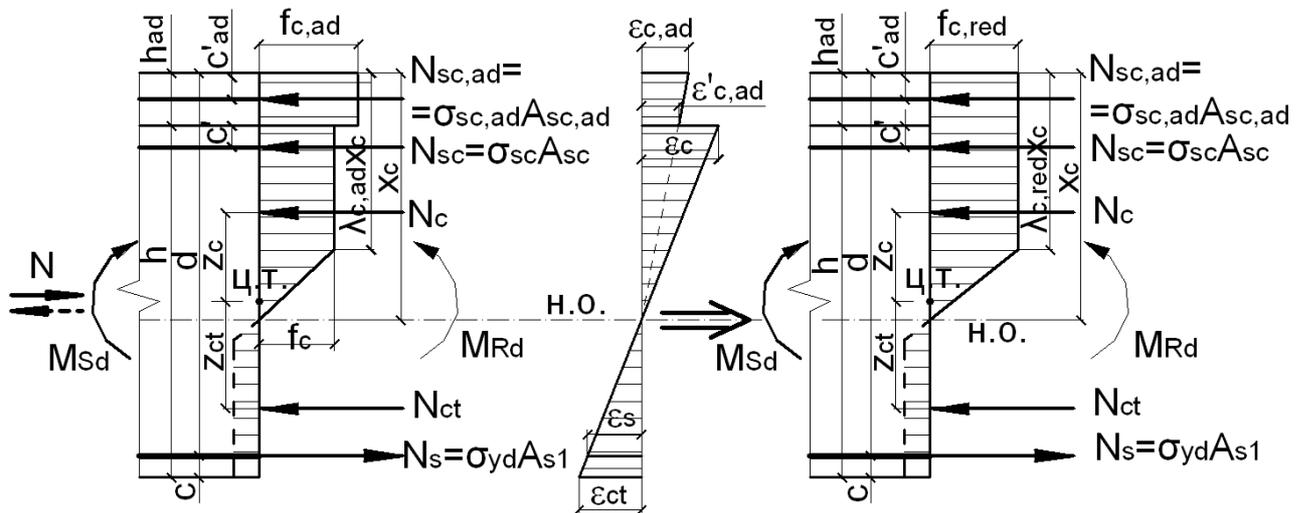
$$M_1 = 0,5 f_{cd,ad,cyc} b X_{c,ad} [(1 + \lambda_{c,ad}^*) d - 0,33 X_{c,ad} (1 + \lambda_{c,ad}^* + \lambda_{c,ad}^{*2})] + \sigma_{sc,ad} A_{sc,ad} (d - c'_{ad}) \quad (4)$$

$$M_2 = 0,5 f_{cd,cyc} b X_c [(1 + \lambda_c^*) d_1 - 0,33 X_c (1 + \lambda_c^* + \lambda_c^{*2})] + \sigma_{sc} A_{sc} (d - h_{ad} - c') \quad (5)$$

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

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 изгибаемого элемента.



- а) эпюра напряжений в сечении усиленного изгибаемого железобетонного элемента;
 б) эпюра деформаций; в) эпюра напряжений для приведенного значения прочности бетона

Рисунок 3 – К определению относительных деформаций сжатого бетона и растянутой арматуры

Относительные деформации сжатого бетона $\epsilon_{cc,cyc}$ при малоцикловом нагружении:

$$\epsilon_{cc,cyc} = \epsilon_{c1,cyc}^{изг} = 0,7 \cdot (1,25 f_{c,cyc,red})^{0,31}, \quad (7)$$

$$\epsilon_{cc,cyc}^{ОМП} = \epsilon_{c1,cyc}^{ОМП изг} = (1,25 f_{c,cyc,red}^{ОМП})^{1,07 - \eta_{crc}^0}. \quad (8)$$

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

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

- 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 малоциклового 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 малоцикловом нагружениях даёт хорошую сходимость с экспериментальными данными.

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.

Литература. 1. Семенюк, С.Д. Расчет прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов с высокопрочной арматурой или перearмированным 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. 2. Семенюк, С.Д. Эффективность усиления сжатой зоны изгибаемых железобетонных конструкций при малоцикловом нагружении / С.Д. Семенюк, Ю.Г. Болошенко // 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. 3. Семенюк, С.Д. Расчет прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при действии малоцикловых нагружений / 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, 2012. - Вип. 23. - С. 523-532. 4. Семенюк, С.Д. Прогибы изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при действии малоцикловых нагружений / 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, 2012. - Вип. 24. - С. 555-564.