

УДК 624.012

Болошенко Ю. Г.,
Белорусско-Российский университет

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ МАЛОЦИКЛОВЫХ НАГРУЗКАХ

Представлены основные положения методики расчета прочности наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при действии малоцикловых нагрузжений различных уровней с учетом особенностей работы бетонов разных классов и видов (тяжелого бетона, сталефибробетона, бетона на основе отходов литейно-металлургических производств). Предложенная методика позволяет учитывать предысторию загрузки усиливаемых элементов, которые до усиления также работали в условиях малоциклового нагружения.

Ключевые слова: бетон, малоцикловой, нагружение, усиление, наращивание, расчет, наклонный

Формулировка проблемы. При техническом перевооружении и реконструкции гражданских и промышленных здания и сооружений эффективным способом усиления изгибаемых конструкций, в частности, балок, плит перекрытия и покрытия, является наращивание сечений намоноличиванием, дающее возможность существенно увеличить несущую способность конструкции. При этом усиление может производиться при полной или частичной разгрузке и под нагрузкой. Этот метод является одним из наиболее часто применяемых методов усиления железобетонных конструкций, так как не требует устройства сложных и дорогостоящих разгружающих систем из тяжелей и шпренгелей, является технологичным и наименее трудоемким из известных способов усиления железобетонных конструкций при изгибе. Ввиду распространенности данного вида усиления интерес к этой теме не ослабевает и в настоящее время.

На сегодняшний день практически не изучены особенности работы изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, в условиях малоциклового нагружения, а также влияние на работу конструкций предыстории нагружения, которое также может являться малоцикловым.

Особенности работы изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны. В настоящее время при усилении изгибаемого железобетонного элемента под нагрузкой, составляющей не менее 65 % от эксплуатационной (высокая степень нагружения), усиливаемая часть его попе-

речного сечения уже находится в определенном напряженно-деформированном состоянии, которое влияет на работу усиленного элемента в предельном состоянии.

В случае полной разгрузки усиливаемого элемента предыстория его нагружения не учитывается. Однако так как полные деформации бетона ε_c состоят из упругих ε_{el} и пластических деформаций ε_{pl} ($\varepsilon_c = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}$), причем упругие деформации являются возвратными и при разгрузении конструкции равны нулю $\varepsilon_{el} = 0$, то в бетоне сжатой зоны усиливаемой конструкции сохраняются остаточные пластические деформации ε_{pl} , которые равны $\varepsilon_{pl} = \lambda_c \cdot \varepsilon_c$ (рисунок а). Учитывая, что коэффициент пластичности равен $\lambda_c = 1 - \nu_c = 1 - E'_c / E_{c0}$ (E_{c0} – начальный модуль упругости бетона) и секущий модуль деформаций на рассматриваемом этапе нагружения $E'_c = \sigma_c / \varepsilon_c$, получаем:

$$\varepsilon_{pl} = \left(1 - \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c \cdot E_{c0}} \right) \cdot \varepsilon_c = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_{c0}}. \quad (1)$$

Согласно нормативным требованиям основная (усиливаемая) и дополнительная (усиливающая) части сечения должны работать вплоть до полного исчерпания несущей способности как единое целое без расслоения по шву контакта. При этом шов контакта двух бетонов принимается условно жестким и характеризуется высоким модулем сдвига. Особенностью эпюр напряжений и деформаций является наличие скачков на границе усиливаемого и усиливающего элементов (рисунок 1, б). Скачки на эпюрах обусловлены наличием остаточных деформаций в бетоне усиливаемой конструкции.

Однако не всегда практически возможно должным образом обеспечить необходимое сцепление бетона усиления и бетона усиливаемой конструкции (например, пропитка поверхности конструкции маслами, продуктами нефтепереработки, невозможность устройства шпоночного соединения). Характер разрушения усиленного изгибаемого элемента в результате податливости шва изменяется: взаимное смещение частей, выполненных из различных бетонов, интенсивно развивается на стадиях, близких к разрушению. Происходит активное развитие вертикальных и наклонных трещин с последующим слиянием их с горизонтальными трещинами по шву контакта. В результате механизм разрушения может измениться: конструкция может разрушиться не по нормальному, а по наклонному сечению.

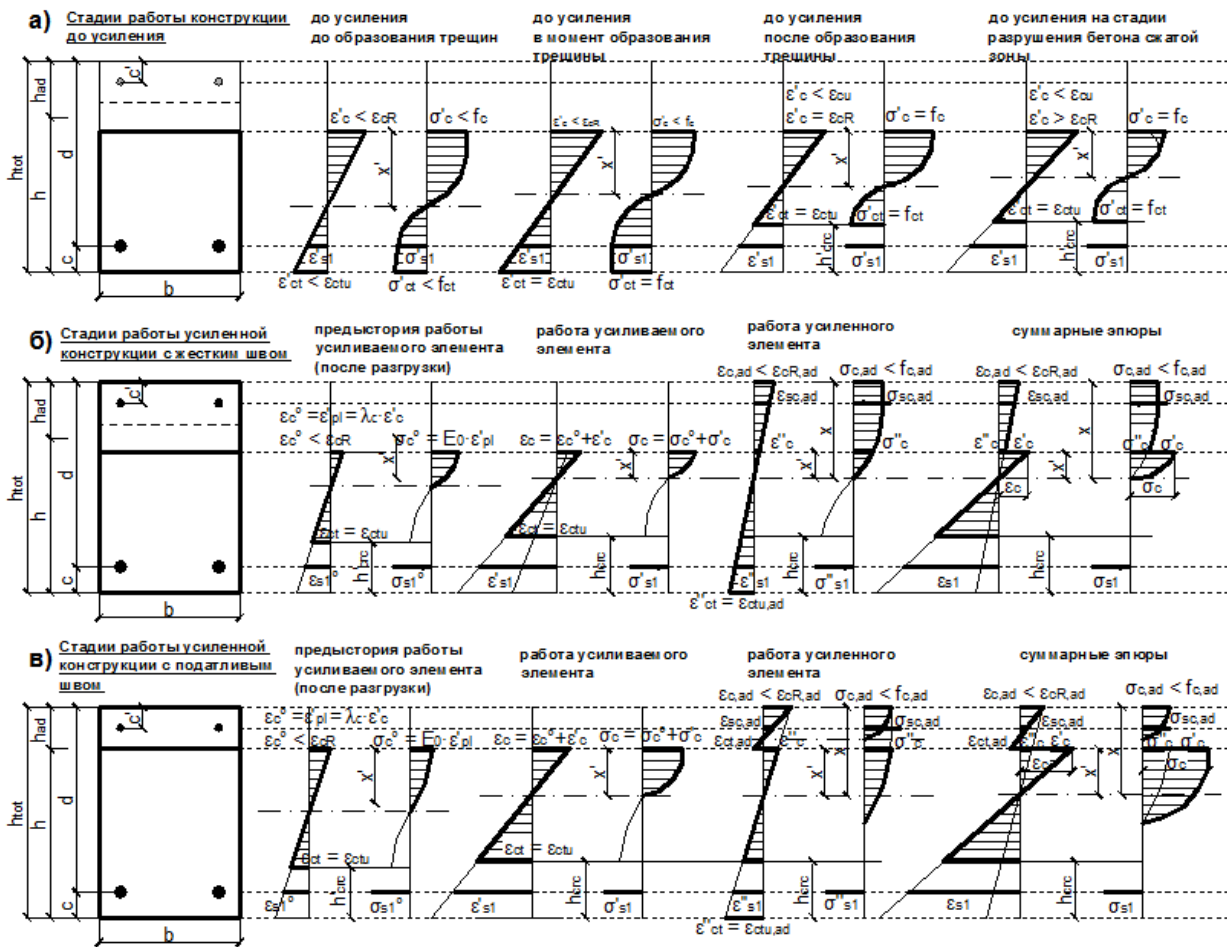


Рисунок 1 – Напряженно-деформированное состояние изгибаемого железобетонного элемента: а) до усиления; б) с жестким швом контакта после усиления; в) с податливым швом контакта после усиления

Особенностью работы усиленных изгибаемых железобетонных элементов с податливым швом контакта являются деформации сдвига блока усиления относительно усиливаемой части конструкций. Дополнительное нагружение в процессе эксплуатации усиленных конструкций при небольшом по величине модуле сдвига шва сопряжения двух бетонов вызывает как в элементе усиления, так и в усиливаемой конструкции напряжения сжатия и растяжения одновременно (рисунок 1, в).

Учет особенностей работы бетонов разных видов и классов в условиях малоциклового нагружения. На основании экспериментальных исследований было выявлено, что между верхним и нижним пределами микротрещинообразования существует прямая пропорциональность. Коэффициент пропорциональности $k_{cr} = \eta_{cr}^0 / \eta_{cr}^v$ отличается для бетонов различных видов и может быть принят: для тяжелого бетона $k_{cr} \approx 0,67$; для сталефибробетона (СФБ) $k_{cr} \approx 0,70$; для бетона с использованием отходов литейно-металлургических производств в качестве мелкого заполнителя (ОМП-бетона) $k_{cr} \approx 0,73$ [1]. Полученные значе-

ния коэффициента $k_{сгс}$ подтверждаются также экспериментальными данными, представленными в работах [2, 3] соответственно.

В работах [4, 5] были предложены зависимости для определения нижнего и верхнего пределов микротрещинообразования, однако, как показали проведенные исследования, данные зависимости не дают высокой сходимости результатов ($\Delta > 15\%$) и применимы только для тяжелого бетона. Для ОМП-бетонов подобная зависимость выведена не была. Из этого следует, что для определения нижнего и верхнего пределов микротрещинообразования целесообразно вывести зависимости, в которых помимо прочности бетона был бы учтен вид бетона (например, тяжелый бетон, СФБ, ОМП-бетон). Критерием для учета особенностей работы бетонов различных видов может служить коэффициент $k_{сгс}$. Были получены зависимости для определения пределов микротрещинообразования нижнего $\eta_{сгс}^0$ и верхнего $\eta_{сгс}^v$, представленные в работах [6, 7] и дающие высокую сходимость с экспериментальными данными как для традиционного тяжелого бетона, так и для СФБ и ОМП-бетона (в среднем около 3 %).

В работах различных авторов, посвященных исследованию работы бетона и железобетонных элементов при действии малоцикловых нагрузок, для значения прочности бетона в условиях малоциклового нагружения использовать понижающий коэффициент условий работы $\gamma_{с,сгс}$, учитывающий неблагоприятное воздействие малоцикловых нагружений. Авторами [8, 9] предложены эмпирические зависимости для определения коэффициента $\gamma_{с,сгс}$ в зависимости от уровня нагружения. Однако предложенные зависимости применимы только для тяжелого бетона. По результатам проведенных экспериментальных исследований для определения коэффициента, учитывающего изменение прочности бетона при $\eta_{top} < 1.0$, была получена следующая зависимость, являющееся универсальной и дающая хорошую сходимость с экспериментальными данными (отклонение в пределах 10 %):

$$\gamma_{с,сгс} = 0.97\sqrt{\eta_{сгс}^v} - 0.3\ln \eta_{top}, \quad (2)$$

где η_{top} – верхний уровень нагружения.

В случае, если режим нагружения предполагает изменение верхнего уровня на более высокий (с η_{top1} на η_{top2}), то в расчет вводится уточненное значение η_{top} .

Также на основании проведенных экспериментальных исследований, проведенных автором, была установлена зависимость начального модуля упругости бетона от верхнего уровня нагружения η_{top1} , имевшего место на первых 1-3 циклах (отклонение от опытных данных в пределах 10 %):

$$E_{c0} = \frac{55f_c}{19 + \eta_{top1} \cdot f_c}. \quad (3)$$

Прочность наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при податливом шве контакта. Определение усилий в плоских сечениях осуществляется на основе следующих рабочих гипотез, изложенных в [5, 10].

На основании обработки большого количества экспериментальных данных авторами [5, 10] были построены графики « $K - a/d$ » (рисунок 2).

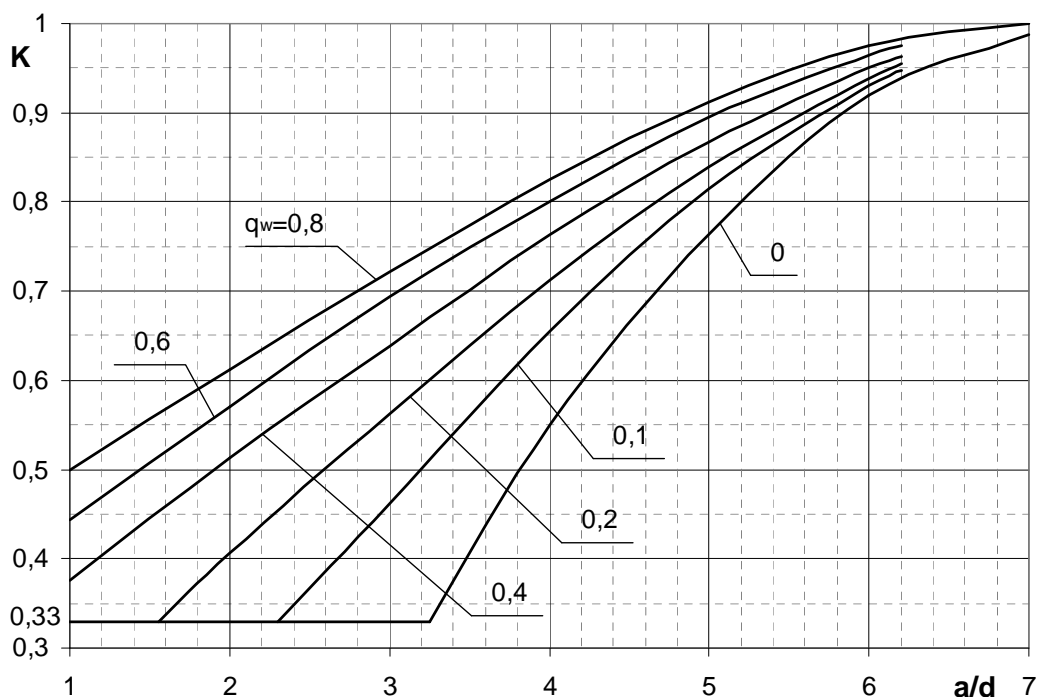


Рисунок 2 – График зависимости « $K - a/d$ » (по значениям q_w , МПа·м)

Коэффициент K позволяет перейти от деформаций граничной сжимаемости в направлении главных сжимающих напряжений к деформациям крайних сжатых волокон бетона путем уточнения значения коэффициента пластичности, заменив λ_c на λ_c^* , рассчитываемое по формуле:

$$\lambda_c^* = 1 - \frac{1 - \lambda_c}{K}. \quad (4)$$

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

Так как стыковой шов в усиленных балках был выполнен податливым, то основная конструкция и набетонка при разрушающей нагрузке будут работать как отдельные элементы, деформируемые совместно. В связи с этим высоту сжатой зоны следует определять как в бетоне усиления, так и в бетоне основной конструкции, а несущая способность составного сечения может быть определена как сумма моментов, воспринимаемых бетоном усиления и бетоном основной конструкции (x_{ad} определяется как для сечения, в котором нейтральная ось проходит в теле усиления, x – как для сечения базовой балки без набетонки).

Для образцов, испытанных малоцикловой нагрузкой, расчет выполнен с учетом изменения прочностных и деформативных свойств бетона в зависимости от режима нагружения и предыстории работы.

Опытные балки базовой серии (до усиления) представляли собой балки с размерами поперечного сечения 100×120 мм длиной 1400 мм. В качестве рабочей арматуры использовались 2 стержня диаметром 10 мм класса S500. Монтажная и поперечная арматура класса S500 диаметром 3 мм. В зоне чистого изгиба монтажная и поперечная арматура отсутствовала. Прочность контактного шва обеспечивается только выпусками арматуры и неровностями на поверхности бетона. Как показали экспериментальные исследования, данная мера обеспечения жесткости контактного шва при отсутствии насечки на поверхности «старого» бетона недостаточна, шов является податливым.

В таблице 1 представлена расшифровка маркировки опытных образцов. Сравнение опытных и расчетных значений представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Характеристика опытных образцов

Маркировка опытных балок	Характеристика материалов	Режим нагружения (номера циклов)	Предыстория нагружения (номера циклов)
1	2	3	4
БОА-1	Базовые балки выполнены из тяжелого бетона условного класса	однократное	однократное
БОА_04-08 [07]		$\eta_{low}=0.4; \eta_{top}=0.8$ (1-10)	однократное до $\eta=0,7$
БОА_04-07(09) [04-06]	С' 29,7/36,7. Бетон усиления – ОМП-бетон условного класса С' 26,6/32,8. Дополнительная арматура расположена в теле бетона усиления: класс арматуры S500, диаметр 3 мм.	$\eta_{low}=0.4; \eta_{top}=0.7$ (1-5;7-11); $\eta_{top}=0.9$ (6)	$\eta_{low}=0.4$ $\eta_{top}=0.6$ (1-11)
БОА_04-07(09) [w]		$\eta_{low}=0.4; \eta_{top}=0.7$ (1-5;7-10); $\eta_{top}=0.9$ (6)	$\eta_{low}=0.4; \eta_{top}=0.7$ (1-5;7-11); $\eta_{top}=0.9$ (6)
БОА_04-08 [04-07]		$\eta_{low}=0.4; \eta_{top}=0.8$ (1-10)	$\eta_{low}=0.4; \eta_{top}=0.7$ (1-11)

Таблица 2 – Результаты расчета прочности наклонных сечений опытных балок при малоцикловых нагрузках различных уровней

Маркировка опытных балок	Базовые образцы					Усиленные образцы				
	Экспериментальный момент, кН·м	Расчетный момент по УПМ без учета режима нагружения, кН·м	Расчетный момент по УПМ с учетом режима нагружения, кН·м	Отклонение расчетных значений от опытных, %		Экспериментальный момент, кН·м	Расчетный момент по УПМ без учета режима нагружения, кН·м	Расчетный момент по УПМ с учетом режима нагружения, кН·м	Отклонение расчетных значений от опытных, %	
				без учета режима нагружения	с учетом режима нагружения				без учета режима нагружения	с учетом режима нагружения
БОА-1	6,73	7,015	-	-4,2	-	8,27	8,360	-	-1,1	-
БОА_04-08 [07]	-	-	-	-	-	7,81	7,532	7,880	3,6	-0,9
БОА_04-07(09) [04-06]	6,08	7,354	6,594	-21,0	-8,5	7,05	8,442	7,728	-19,7	-9,6
БОА_04-07(09) [w]	5,95	6,752	6,077	-13,6	-2,2	7,92	8,503	7,769	-7,4	1,9
БОА_04-08 [04-07]	6,18	6,639	6,231	-7,4	-0,8	7,98	8,264	7,821	-3,5	2,0

Из таблицы 2 видно, что предложенная методика имеет хорошую сходимость с экспериментальными данными.

Заключение. Предложенная методика расчета позволяет учитывать влияние малоциклового нагружения различных уровней на несущую способность при разрушении по наклонному сечению железобетонных изгибаемых элементов, в том числе и усиленных наращиванием сжатой зоны бетонами различных видов при условии обеспечения жесткости контактного шва, а также предысторию работы усиливаемых элементов.

Преимуществом данной методики является простота ее реализации при достаточной точности получаемых результатов. Использование в расчете фактических прочностных характеристик бетонов с учетом влияния нагрузок малоциклового характера позволяет учесть как снижение в процессе эксплуатации прочности нормальных сечений железобетонных изгибаемых элементов, так и ее увеличение при низких и средних режимах нагружения, что позволяет добиться некоторого снижения материалоемкости конструкций при проектирова-

нии. Однако ввиду значительного роста деформаций сжатого бетона и рабочей арматуры необходим расчет по II группе предельных состояний.

Литература

1. Болошенко, Ю.Г. Влияние малоциклового характера нагружения на прочность бетонов разных видов / Ю.Г. Болошенко // Энергоэффективность и экологическая безопасность в промышленности и в строительстве: материалы Междунар. научн.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ. – 2011. – С. 170–171.

2. Дробишинець, С.Я. Вплив повторних малоциклових навантажень на механічні характеристики сталевібробетону та роботу згинальних елементів на його основі : Дис... канд. техн. наук : 05.23.01 / Дробишинець Сергій Ярославович. – Луцьк, 2005. – 174 с.

3. Поветкин, М.С. Напряженно-деформированное состояние усиленных под нагрузкой железобетонных изгибаемых преднапряженных элементов : Дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Поветкин Максим Сергеевич / ГОУ ВПО «Курский государственный технический университет». – Орел, 2009. – 213 с.

4. Берг, О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О.Я. Берг. – М.: Госстройиздат, 1962. – 96 с.

5. Голишев, О.Б. Курс лекцій з основ розрахунку конструкцій і з опору залізобетону / О.Б. Голишев, А.Н. Бамбура. – К.: Логос, 2004. – 340 с.

6. Болошенко, Ю.Г. Определение нижнего и верхнего пределов микротрещинообразования для бетонов разных видов / Ю.Г. Болошенко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы междунар. научн.-технич. конф. молод. ученых. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2011. – С. 166.

7. Болошенко, Ю.Г. Особенности работы бетонов различных видов в условиях малоциклового нагружения / Ю.Г. Болошенко // Інженерні системи та техногенна безпека : Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – Макіївка : ДонНАБА, 2011. – Вип. 5 (91). – С. 190–197.

8. Бабич, Є.М. Міцність і деформативність важкого бетону при малоцикловому стисненні / Є.М. Бабич, Н.І. Ільчук // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. – Рівне: Видавництво Національного університету водного господарства та природокористування, 2003. – Вип. 9. – С. 116–123.

9. Тахтай, Д.А. Прочность и деформативность бетона при внецентренном циклическом нагружении / Д.А. Тахтай, В.И. Веретенников, А.А. Бармотин // Коммунальное хозяйство городов : науч.-технич. сб. – К., 2004. – № 60. – С. 53–65.

10. Семенюк, С.Д. Прогнозирование работы и расчет железобетонных пространственных конструкций на неравномерно деформируемом основании : Дисс... докт. техн. наук / Семенюк Славик Денисович / ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет». – Могилев, 2004. – 381 с.

Анотація

У статті представлені основні положення методики розрахунку міцності похилих перерізів згинальних залізобетонних елементів, підсилених нарощуванням стиснутої зони, при дії малоциклових навантажень різних рівнів з врахуванням особливостей роботи бетонів різних класів і видів (важкого бетону, сталевібробетону, бетону на основі відходів ливарно-металургійних виробництв). Запропонована методика дозволяє враховувати передісторію завантаження підсилюваних елементів, які до підсилення також працювали в умовах малоциклового навантаження.

Ключові слова: Бетон, малоцикловий, навантаження, підсилення, нарощування, розрахунок, похилий

Annotation

The article presents calculation method of slanting sections durability of the reinforced concrete flexural elements reinforced with on-scale up in the compressed zone in low-cycle loading of different levels taking into account the features of work of concretes of different classes and kinds (heavy concrete, steelfibreconcrete, concrete with using as fine aggregate a metallurgical industries wastes). The offered method allows to take into account the pre-loads of the strengthened elements which to strengthening also worked in the conditions of low-cycle loading.

Key words: Concrete, low-cycle, loading, strengthening, increase, calculation, slanting