

УДК 624.012.45

ЖЕСТКОСТЬ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МНОГОПУСТОТНЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ, УСИЛЕННЫХ АРМАТУРОЙ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

Е.Н. БАДАЛОВА

(Полоцкий государственный университет)

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований жесткости и трещиностойкости железобетонных многопустотных плит перекрытий, усиленных в растянутой зоне арматурой из углеродных волокон, приклеенной к наружной поверхности бетона. Показано, что при усилении железобетонных конструкций приклеиванием такой дополнительной арматуры, кроме обеспечения прочности, важным является соблюдение требований жесткости и трещиностойкости усиленных конструкций. Наличие в сечении усиленного элемента контактного соединения накладывает ограничения на возможность полного использования прочностных свойств арматуры из углеродных волокон, что также должно быть учтено и при расчетах по эксплуатационной пригодности. Научно обоснован подход к подбору дополнительной арматуры исходя из требований по эксплуатационной пригодности, учитывающий совместную работу дополнительной арматуры с бетоном, который позволяет обеспечить надлежащее функционирование и долговечность усиленной конструкции в течение всего проектного срока службы при соразмерных расходах. Выявленные в процессе экспериментальных исследований особенности работы усиленных конструкций учтены при разработке методики расчета прогиба и ширины раскрытия трещин.

Введение. Исследованию жесткости и трещиностойкости железобетонных конструкций, усиленных приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон, посвящены работы М. Daugevičius [1], А.А. Шилина [2], Р. Holzenkampfer [3], F. Rostásy [4] и др. В результате экспериментальных исследований, проведенных на железобетонных балках, усиленных под нагрузкой приклеиванием в растянутой зоне пластин из углеродных волокон [1], установлено, что прирост прогиба уменьшается для усиленных конструкций по сравнению с неусиленными и зависит от дополнительной анкеровки пластин из углеродных волокон. В [2] отмечено, что усиление изгибаемых железобетонных конструкций композиционными материалами не позволяет значительно уменьшить прогиб и увеличить момент трещинообразования усиленной конструкции в силу малой жесткости (небольшой толщины) композиционного материала. Однако в несколько раз увеличивается прогиб усиленной конструкции до наступления ее разрушения. Расчет усиленной конструкции по жесткости и трещиностойкости предлагается осуществлять по действующим российским нормам с учетом наличия в сечении композиционного материала. Ширина раскрытия трещин согласно [2] определяется разностью удлинений арматуры и композиционного материала на участке между трещинами.

По результатам обработки экспериментальных данных Р. Holzenkampfer предложил эмпирическую формулу для расчета ширины раскрытия трещин [3], учитывая влияние дополнительной арматуры суммарным коэффициентом армирования. В Fib Bulletin 14 прогиб усиленных конструкций предложено определять по формулам Eurocode 2, вводя в расчет геометрические характеристики сечения с учетом композиционной арматуры [5]. Ширина раскрытия трещин определяется по формуле Eurocode 2, при этом средний шаг трещин вычисляются с учетом влияния основной и дополнительной арматуры по формуле, предложенной Rostásy и другими учеными в 1996 году.

Экспериментальные исследования. С целью получения данных о фактических значениях прогибов и ширины раскрытия трещин, а также выявления особенностей трещинообразования изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных приклеиванием в растянутой зоне дополнительной арматурой из углеродных волокон, были проведены экспериментальные исследования.

В качестве опытных образцов использовались многопустотные плиты длиной 5980 мм, шириной 720 мм, высотой 220 мм [6]. Плиты армированы предварительно напряженными стержнями $2\varnothing 12$ S800. Плита П-1 не имела усиления; другие плиты были усилены в растянутой зоне приклеиванием двух пластин из углеродных волокон на длине 5500 мм без заведения за грани опор шириной 50 мм, толщиной 1,4 мм (плита П-2: $f_{ik,ad} = 1715$ МПа; $E_{s,ad} = 280000$ МПа) и шириной 50 мм, толщиной 1,2 мм (плиты П-3, П-4, П-5: $f_{ik,ad} = 2465$ МПа; $E_{s,ad} = 191000$ МПа).

В результате экспериментальных исследований установлено, что для усиленных плит значение изгибающего момента, при котором прогиб конструкции достигает предельной величины (29,6 мм), увеличивается в 1,29 – 1,51 раза по сравнению с неусиленной плитой. Наблюдалось также уменьшение прогиба плиты при применении дополнительной анкеровки пластин из углеродных волокон (плита П-5), что проиллюстрировано рисунком 1.

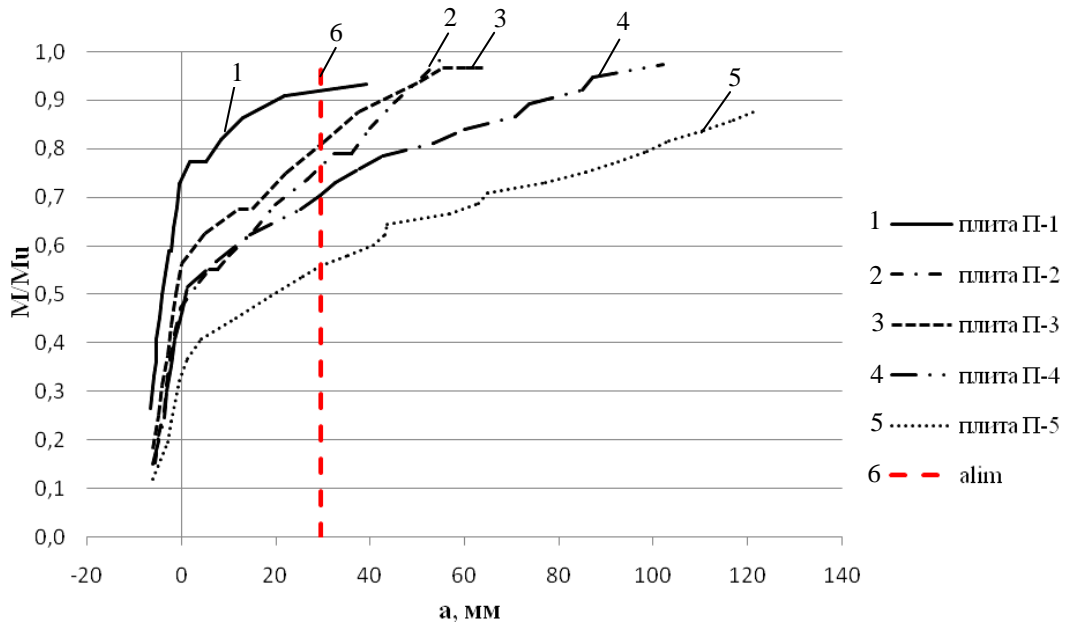


Рис. 1. Изменение прогиба плиты с уровнем нагружения

Увеличение момента трещинообразования M_{cr} для усиленных плит по сравнению с неусиленной составило 13 – 24 % (табл. 1); в 1,27 – 1,53 раза возросло значение изгибающего момента, при котором ширина раскрытия трещин, измеренная на уровне центра тяжести предварительно напряженной арматуры плиты, достигла предельного значения, составляющего 0,2 мм (рис. 2).

Таблица 1

Сопоставление значений изгибающего момента M_{ui} , $M_{[alim]}$, $M_{[wlim]}$ для плит П-1 – П-5

Шифр опытных плит	M_{ui} , кН·м	$\frac{M_{ui}}{M_{u1}}$	M_{cr} , кН·м	$M_{[wlim]}$, кН·м	$M_{[alim]}$, кН·м
П-1	40,2	1,00	31,0	31,0	37,0
П-2	69,4	1,73	36,5	47,5	53,2
П-3	58,4	1,45	36,5	39,4	55,9
П-4	67,7	1,68	34,9	42,2	47,7
П-5	85,6	2,13	38,5	46,0	47,9

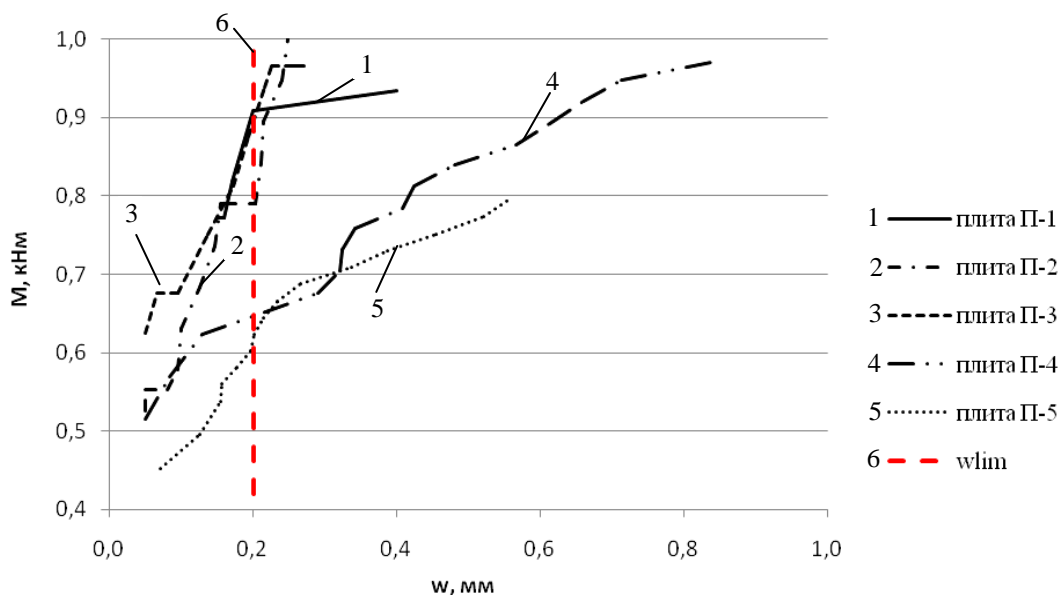


Рис. 2. Изменение ширины раскрытия трещин с уровнем нагружения

Таким образом, экспериментально подтверждено влияние усиления предварительно напряженных многопустотных плит приклеиванием в растянутой зоне дополнительной арматуры из углеродных волокон на повышение жесткости и трещиностойкости конструкции.

При исследовании трещинообразования наблюдали следующую картину распределения трещин: средний шаг трещин был близок по значению для неусиленной и усиленных плит и составлял на разных уровнях нагружения для плиты П-1 130 – 183 мм и для плит П-2 – П-5 110 – 170 мм. Однако для усиленных плит зона образования трещин, нормальных к продольной оси, по длине конструкции была больше по сравнению с неусиленной плитой. Отношение длины участка с трещинами для усиленных и неусиленной плит изменялось в процессе нагружения и в предельном состоянии составило 1,58 – 1,84.

Как известно, основной причиной потери работоспособности усиленных конструкций является разрушение контактного соединения арматуры из углеродных волокон с бетоном. Это накладывает ограничения на возможность полного использования прочностных свойств арматуры из углеродных волокон, что учитывается расчетом на прочность сечения усиленного элемента [7]. Подобные ограничения имеют место, когда учитывается работа дополнительной арматуры из углеродных волокон в сечении усиленного элемента в расчетах по эксплуатационной пригодности. Для повышения эффективности использования данного способа усиления дополнительную арматуру из углеродных волокон следует выполнять с предварительным напряжением.

Расчет прогиба и ширины раскрытия трещин. При расчете прогиба усиленной изгибаемой конструкции учитывается ее напряженно-деформированное состояние до усиления. Прогиб железобетонной многопустотной плиты, усиленной приклеиванием арматуры из углеродных волокон, от действия внешней нагрузки можно определить в соответствии с требованиями действующих нормативных документов [8]:

$$a = k_r \cdot \int_0^l \bar{M}(x) \cdot \frac{1}{r(x)} \cdot dx, \quad (1)$$

где $\bar{M}(x)$ – изгибающий момент в сечении с координатой x по длине пролета от действия единичной силы, приложенной по направлению искомого перемещения; $\frac{1}{r(x)}$ – кривизна усиленного элемента в сечении x , определяемая по формуле:

$$\frac{1}{r(x)} = \frac{1}{r_0(x)} + \frac{1}{r_1(x)} + \frac{1}{r_{ad}(x)}. \quad (2)$$

Здесь $\frac{1}{r_0(x)}$ – кривизна элемента в сечении x от действия усилия предварительного напряжения; $\frac{1}{r_1(x)}$ – кривизна элемента в сечении x от внешней нагрузки, действующей до усиления; $\frac{1}{r_{ad}(x)}$ – кривизна усиленного элемента в сечении x от внешней нагрузки, действующей после усиления.

Кривизну усиленного элемента принимают равной разности относительных деформаций крайнего сжатого волокна бетона и крайнего растянутого стержня арматуры (предварительно напряженной арматуры плиты), деленной на расстояние от крайнего сжатого волокна бетона до крайнего растянутого стержня арматуры. Краевые относительные деформации усиленного сечения определяют с учетом наличия дополнительной арматуры из углеродных волокон из расчета системы уравнений деформационной модели.

Особенность работы дополнительной арматуры в сечении, проявляющаяся в увеличении длины участка с трещинами для конструкций, усиленных приклеиванием дополнительной арматуры из углеродных волокон, предлагается учитывать коэффициентом k_r . Коэффициент k_r определяли по результатам обработки экспериментальных данных и принимали равным отношению длины участка с трещинами для неусиленной плиты к длине участка с трещинами для усиленной плиты на соответствующем уровне нагружения.

Сравнение экспериментальных значений прогибов железобетонных многопустотных плит с теоретическими значениями прогибов (2) при изгибающем моменте от эксплуатационной нагрузки отражено в таблице 2.

Ширину раскрытия трещин, нормальных к продольной оси изгибаемого элемента, усиленного дополнительной арматурой из углеродных волокон, предлагается определять согласно [8] по формуле:

$$w = k_r \cdot s_r \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}), \quad (3)$$

где s_r – расстояние между трещинами (в расчетах, приведенных в данной статье, s_r принималось равным опытным значениям); ε_{sm} – средние относительные деформации стержневой арматуры, определенные с

учетом работы дополнительной арматуры из углеродных волокон и работы бетона на растяжение; ε_{cm} – средняя относительная деформация бетона между трещинами.

Таблица 2

Сопоставление экспериментальных и теоретических значений прогиба a для плит П-1 – П-5

Шифр опытных плит	$M_{эксп.}$ кН·м	a_{exp} , мм	a_{calc} , мм	$\frac{a_{exp}}{a_{calc}}$
П-1	32,9	8,4	11,4	0,74
П-2	51,1	26,8	32,6	0,82
П-3	43,8	22,0	25,9	0,85
П-4	49,5	32,5	34,7	0,94
П-5	60,7	65,0	67,2	0,97

Значение $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ определяется по следующей формуле [8]:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}, \quad (4)$$

где σ_s – напряжение в растянутой стержневой арматуре в сечении с трещиной, определенное с учетом работы дополнительной арматуры из углеродных волокон; $\rho_{p,eff}$ – коэффициент армирования эффективной площади растянутого бетона, определяемый по формуле:

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_{s,ad} \cdot \frac{E_{s,ad}}{E_s} + \xi_1^2 \cdot A'_p}{A_{c,eff}}. \quad (5)$$

Здесь $A_{s,ad}$, A'_p – площадь поперечного сечения соответственно дополнительной арматуры из углеродных волокон и предварительно напряженной стержневой арматуры; $E_{s,ad}$, E_s – модули упругости соответственно дополнительной арматуры из углеродных волокон и предварительно напряженной стержневой арматуры; ξ_1 – поправочный коэффициент прочности сцепления, равный

$$\xi_1 = \sqrt{\xi \cdot \frac{\varnothing_{s,ad}}{\varnothing_p}}, \quad (6)$$

где $\varnothing_{s,ad}$ – эквивалентный диаметр дополнительной арматуры, соответствующий площади контакта арматуры из углеродных волокон с бетоном конструкции. Для условий эксперимента $\varnothing_{s,ad} = \frac{b_{s,ad}}{\pi}$; \varnothing_p – диаметр предварительно напряженной арматуры.

Сопоставление экспериментальных данных средней ширины раскрытия трещин, полученных при испытании железобетонных многопустотных плит, со значениями, определенными по формуле (3) при изгибающем моменте от эксплуатационной нагрузки, приведено в таблице 3.

Таблица 3

Сопоставление экспериментальных
и теоретических значений ширины раскрытия трещин w для плит П-1 – П-5

Шифр опытных плит	$M_{эксп.}$ кН·м	w_{exp} , мм	w_{calc} , мм	$\frac{w_{exp}}{w_{calc}}$
П-1	32,9	0,25	0,27	0,93
П-2	51,1	0,15	0,18	0,83
П-3	43,8	0,14	0,19	0,74
П-4	49,5	0,33	0,34	0,97
П-5	60,7	0,34	0,35	0,97

Заключение. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили влияние усиления растянутой зоны железобетонных многослойных плит перекрытия дополнительной арматурой из углеродных волокон на повышение жесткости и трещиностойкости конструкции. С целью повышения эффективности использования данного способа усиления дополнительную арматуру следует выполнять с предварительным напряжением. Выявлена особенность работы дополнительной арматуры из углеродных волокон в сечении конструкции. Длина участка с трещинами, нормальными к продольной оси, для усиленных плит была больше по сравнению с длиной участка с трещинами для неусиленной плиты при соответствующем уровне нагружения. Отношение длины участка с трещинами для усиленных и неусиленной плит изменялось в процессе нагружения и в предельном состоянии составило 1,58 – 1,84.

Предложенная методика расчета прогиба и ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси сечения изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных арматурой из углеродных волокон, позволит учитывать работу дополнительной арматуры в сечении элемента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mykolas Daugevičius. Жесткость железобетонных балок, усиленных углепластиком при действии кратковременной и длительной нагрузки / Mykolas Daugevičius // Проблемы современного бетона и железобетона: материалы III междунар. симпоз., Минск, 9 – 11 нояб. 2011 г.: в 2 т.; М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь. Науч.-исслед. респ. унитарное предприятие по строительству «Институт БелНИИС»; редкол.: М.Ф. Марковский [и др.]. – Минск: Минсктиппроект, 2011. – Т. 1: Бетонные и железобетонные конструкции. – С. 9 – 19.
2. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами / А.А. Шилин [и др.]. – М.: ОАО «Изд-во “Стройиздат”», 2007. – 184 с.
3. Holzenkampfer P. Ingenieurmodelle des verbundes geklebter Bewehrung für Betonbauteile / P. Holzenkampfer. – TU Braunschweig, Germany, 1996.
4. Neubauer, U.N. Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP plates / U.N. Neubauer and F.S. Rostasy // Concrete and Composites, Proc. 7th Int. Conf. on Structural Faults and Repair, ECS Pub. Edinburgh, Scotland. – 1997. – V. 2. – P. 109 – 118.
5. Federation International du Beton // Bul. 14: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. – Lausanne, 2001.
6. Бадалова, Е.Н. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных приклеиванием углепластиковых пластин / Е.Н. Бадалова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2009. – № 12. – С. 45 – 50.
7. Бадалова, Е.Н. Прочность по нормальному сечению железобетонных многослойных плит перекрытий, усиленных арматурой из углеродных волокон / Е.Н. Бадалова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2011. – № 16. – С. 60 – 66.
8. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций: ТКП EN 1992-1-1-2009 (02250) / М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь. – Минск, 2010. – 191 с.

Поступила 21.05.2012

THE STIFFNESS AND CRACK RESISTANCE OF THE REINFORCED CONCRETE HOLLOW-CORE SLABS, THAT WERE STRENGTHENED WITH THE CFRP ADDITIONAL ARMATURE

E. BADALOVA

In the questions of reinforced concrete structures additional CFRP armature strengthening, other than to ensure the strength capacity, the compliance with the stiffness and crack resistance requirements for the strengthened elements is important too. The presence of the contact joint in the cross-section of the strengthened element, which destruction is a major cause of the structure efficiency loss, imposes restrictions on the strength capacity of the CFRP armature usage possibility, which should also be taken into account in the operational integrity analysis. The evidence-based approach to the reinforcement rate analysis, which is based on the operational integrity analysis, which takes into account the joint work of the additional armature with the concrete, allows the ensuring of the proper functioning and longevity of the strengthened structure throughout the design lifetime with fair debits. In this article the results of the experimental and theoretical researches of the stiffness and crack resistance of the reinforced concrete hollow-core slabs, that were strengthened in the tensile zone with the help of additional CFRP armature are listed. The features of the strengthened elements, which were identified during the experiments, were taken into account when the deflection and crack opening width calculations were developed.