

Восстановление поврежденных железобетонных конструкций композитными пластиками

¹**БЕСПАЕВ Алий Аббасович**, профессор, зав. лабораторией, aliy40@mail.ru,

²***МУХАНБЕТЖАНОВА Жанна Шахижахановна**, докторант, sh.zhanna@bk.ru,

¹Казахский научно-исследовательский и проектный институт строительства и архитектуры, Казахстан, Алматы, ул. Солодовникова, 21,

²Satbayev University, Казахстан, Алматы, ул. Сапиева, 22а,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Формулируются направления развития методов восстановления эксплуатационной пригодности железобетонных конструкций. Предлагается способ восстановления эксплуатационной пригодности изгибаемых железобетонных конструкций, имеющих повышенные прогибы и чрезмерное раскрытие трещин. Для восстановления изгибаемых железобетонных конструкций предлагается поверхностное усиление предварительно напряженными фиброармированными пластиками, которое обеспечивается созданием в поврежденных элементах строительного подъема. Комплексные экспериментальные исследования изгибаемых и сжатых элементов, усиленных фиброармированными пластиками, включали изучение работы нормальных и наклонных сечений изгибаемых конструкций. Для изучения работы нормальных сечений выполнены испытания нескольких серий железобетонных балок сечением 120х200 мм и длиной 2200 мм, которые армировались симметричной продольной арматурой класса А400 и А500. Образцы подверглись поверхностному усилению углеродными лентами ламината марки S&P Laminate «BASF» (Германия), наклеиваемыми на сжатую и растянутую грань балок. Опытные образцы испытывались по схеме однопролетной шарнирно опертой балки, нагруженной в третях пролета равными сосредоточенными силами.

Ключевые слова: усиление, балка, железобетон, восстановление, фиброармированные пластики, статическое напряжение, динамическое напряжение, трещиностойкость, нормальные трещины, наклонные трещины.

Введение

Фиброармированные пластики обладают высоким модулем деформаций, упругим характером диаграммы, повышенной морозостойкостью, хорошо переносят усталостные воздействия, устойчивы к воздействию химически активных веществ. В отличие от традиционных методов усиления поверхностные методы усиления отличаются высокой эффективностью, коррозионной стойкостью, низкой трудоемкостью, короткими сроками выполнения работ и повышения прочности, экономической целесообразностью, повышают технический уровень строительства, не требуют вскрышных, сварочных и замоноличивающих работ. Процесс поверхностного усиления железобетонных конструкций занимает несколько часов, а уже через сутки усиленная конструкция способна воспринимать дополнительные нагрузки. Широкое применение эти методы усиления получили для продольного и поперечного армирования растянутой зоны железобетонных конструкций, а также создания армирующих обоев в сжатых элементах.

Методы исследования. Статические испы-

тания выполнялись при нагружении образцов гидравлическим домкратом. Разрушение железобетонных балок, не имеющих усиления вызывалось раздроблением сжатой зоны бетона в зоне чистого изгиба при текучести растянутой стальной арматуры. При усилении балок в растянутой зоне лентами ламината, наряду с традиционной схемой разрушения железобетонных конструкций, выявлены дополнительные схемы разрушения, вызванные отрывом защитного слоя бетона в растянутой зоне или отрывом растянутых лент ламината от бетона. При этом наблюдалось повышение трещиностойкости и жесткости нормальных сечений. Усиление балок наклеиванием одного слоя ламината на растянутую зону привело к повышению прочности на 75%, при деформациях растяжения в лентах ламината, достигающих 0,58-0,61 %, а деформации растянутой стальной арматуры уменьшились почти на 10%.

Усиление балок в растянутой зоне двумя слоями ламината мало отразилось на нагрузке образования трещин и прочности нормальных сечений, однако ширина раскрытия трещин уменьшилась почти в два раза, деформации растяжения лами-

ната уменьшились на 65%, а вертикальные прогибы уменьшились на 31%.

Усиление балок в растянутой и сжатой зонах лентами ламината незначительно отразилось на нагрузке образования трещин, жесткости, ширине раскрытия трещин, деформациях растянутого ламината и прочности нормальных сечений по сравнению с поведением балок, усилением ламинатом только в растянутой зоне, а деформации сжатого ламината соответствовали предельным деформациям бетона сжатой зоны.

Динамические испытания балок производились при циклическом знакопеременном нагружении с помощью гидравлических домкратов и гидродинамической установкой МВГ-1. с частотой около одного герца и коэффициентом асимметрии усилий $\rho=0,1$. Высокая амплитуда наибольших усилий обеспечивала разрушение образцов за 10÷300 циклов нагружений. Эмпирическая зависимость разрушающей нагрузки (M_d) от количества циклических нагружений (n) имеет следующий вид:

$$\frac{M_d}{M} = 1,33 - 0,116 \lg n. \quad (1)$$

Динамическая прочность при циклическом нагружении нормальных сечений изгибаемых элементов, усиленных в растянутой при однократном нагружении превышала статическую прочность на 33%. При увеличении требуемого для разрушения количества циклических нагружений от 2-х до 280-ти деформаций растянутого ламината составляли от 1,88‰ до 2,05‰, а вертикальные прогибы увеличились на 26%. В целом, наибольшие деформации растянутого ламината при динамических нагрузках были меньше деформаций растянутого ламината при статических испытаниях на 45%. Характер разрушения нормальных сечений балок при динамическом нагружении мало отличался от разрушения аналогичных балок при статическом нагружении.

Исследования прочности наклонных сечений изгибаемых элементов, усиленных фиброармированными пластиками, при циклическом нагружении выполнялись на подобных железобетонных балках, усиленных в опорных зонах поверхностной наклейкой однонаправленных сеток FirArm Tare 530/300. Испытания балок производились по схеме однопролетной шарнирно опертой балки, нагруженной двумя равными поперечными силами, отстоящими от опор на расстояниях, равных $l_{cp}=1,75h$ -2,0h. В процессе поэтапного увеличения вертикальной нагрузки после образования нормальных трещин в зоне чистого изгиба наблюдалось появление наклонных трещин в приопорной зоне, а в стадии ускоренного раскрытия наклонных трещин до 3 мм происходило разрушение приопорной зоны. После снятия усиления из сеток обнаружено раздробление сжатого бетона между сетками. Усиление приопорной зоны вертикальными или наклонными полимерными

сетками привело к увеличению прочности наклонных сечений по поперечной силе в два раза, а деформации фиброармированных сеток составляли 3-4 ‰. Наряду с традиционной схемой разрушения наклонных сечений по поперечной силе, выявлена дополнительная схема разрушения, вызываемая откалыванием защитного слоя бетона под полосами сеток усиления. При этом повышение прочности не превышало 50%, а наибольшие деформации сеток за этап до разрушения составляли 1,8-2,5‰.

Расчетное сопротивление на растяжение f_{yd} для FRP определяется по формуле:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk} \cdot \gamma_{Ff}}{\gamma_f}. \quad (2)$$

Расчетные деформации растяжения ϵ_f и расчетное значение упругого модуля деформаций E_f для FRP определяются по формулам:

$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_{uf} \cdot \gamma_{Ff}}{\gamma_f}, \quad (3)$$

$$E_f = \frac{f_{yk}}{\epsilon_{uf}}. \quad (4)$$

Отслаивание FRP может произойти, если деформация в ней не может быть воспринята основанием.

Прочность по поперечной силе наклонного сечения V_{cd} усиленного FRP, определяется как сумма прочности сечения без усиления и дополнительной поперечной силы $V_{Rd,fr}$, которая воспринимается арматурой FRP:

$$V_{cd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,xy} + V_{Rd,f}, \quad (5)$$

$$V_{Rd,f} = A_f \epsilon_{fe} \cdot E_f (\sin \alpha + \cos \alpha) / s_f, \quad (6)$$

$$\epsilon_{fe} = 0,004 \leq 0,75 \epsilon_u, \quad (7)$$

где A_f , E_f , ϵ_{fe} , α и s_f – площадь сечения и деформация полимерных сеток усиления, их модуль деформации, угол наклона и расстояние между полосами сеток усиления.

Для изучения закономерностей изменения жесткости и трещиностойкости в процессе создания предварительного напряжения фиброармированных пластиков выполнены дополнительные испытания трех серий железобетонных балок сечением 120х200 мм и длиной 2200 мм, которые различались процентом армирования растянутой зоны. Опытные образцы испытывались по схеме однопролетной шарнирно опертой балки, нагруженной в пролете. Испытания балок предусматривало несколько стадий нагружения с разгрузкой при разных уровнях усилий.

Для оценки прочностных и деформативных характеристик бетона выполнены испытания бетонных кубов с размером граней по 150 мм и цилиндров диаметром 150 мм и высотой 300 мм. Бетонные образцы испытаны при осевом сжатии на гидравлическом прессе ALPHA 3-3000S с поэтапным увеличением величины продольной сжима-

ющей силы со скоростью 0,3 МПа/сек., вплоть до разрушения образца. Величина этапа увеличения нагрузки не превышала $5 \div 8$ % от разрушающей нагрузки. В процессе статического нагружения цилиндров замерялись продольные и поперечные деформации с помощью тензодатчиков с базой 50 мм, наклеенных на боковые грани образцов, и автоматического измерителя деформаций АИД-4М. Нагружение опытных призм осуществлялось по физической оси образцов этапами, составляющими 5-10% от разрушающей нагрузки.

Прочность бетона в кубах находилась в преде-

лах 27,9-32,7 МПа, в среднем составляла 30,4 МПа (рисунок 1). Цилиндрическая прочность бетона находится в пределах 19,9-21,5 МПа и в среднем составляет 20,6 МПа (рисунки 2,3). На рисунке 4 приведены диаграммы продольных и поперечных деформаций бетона, полученные по результатам испытаний цилиндров. Предельные продольные деформации бетона при сжатии находились в пределах $-(23-25) \cdot 10^{-4}$ относительных единиц, а поперечные деформации $+(7-8) \cdot 10^{-4}$ относительных единиц.

Научные результаты. Изучение работы нор-



Рисунок 1 – Испытание бетонного куба на гидравлическом прессе ALPHA 3-3000S



Рисунок 2 – Испытание бетонного цилиндра на гидравлическом прессе ALPHA 3-3000S



Рисунок 3 – Приборы для регистрации деформаций испытаний бетонного цилиндра

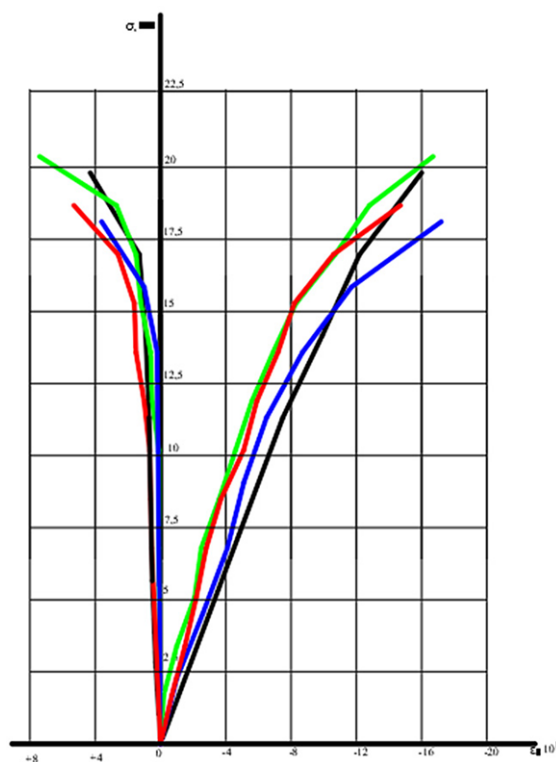


Рисунок 4 – Диаграммы продольных и поперечных деформаций бетонных цилиндров

мальных сечений изгибаемых железобетонных конструкций производилось на железобетонных балках, испытанных по схеме однопролетной шарнирно-опертой балки, загруженной двумя равными сосредоточенными силами, которые создавались с помощью насосной НСП-6. В процессе испытаний с помощью тензодатчиков с базой 50 мм и автоматического измерителя деформаций АИМ-4М с ценой деления 10-5 относительных единиц замерялись продольные деформации балки по высоте сжатой зоны бетона, с помощью тензодатчиков с базой 20 мм замерялись деформации растянутой арматуры, а также регистрировалась картина образований и замерялась ширина раскрытия трещин с помощью микроскопа с ценой деления 0,02 мм, а также фиксировалась величина поперечной нагрузки по высокоточному манометру ручной насосной станции (рисунки 5, 6). Нагружение образцов поперечной нагрузкой производилось с этапами, составляющими около 5-7% от разрушающей нагрузки, в несколько стадий. На каждой стадии создавалась нагрузка, вызывающая заданную ширину раскрытия трещин, затем нагрузка снималась и производилось нагружение на следующей стадии до большей ширины раскрытия трещин.

Опытные образцы балок включали три серии образцов, различавшихся процентом продольного армирования. Балки первой серии имели наименьшее количество растянутой арматуры (2Ø18 S500). Они нагружались гидравлическим домкратом ДГ-25 этапами, составляющими 7-9% от разрушающей нагрузки. При величине изгибающего момента в балке Б-18-1, равном $M=4,42$ кНм, образовалась нормальная трещина в зоне чистого изгиба, затем при изгибающем моменте $M=13,24$ кНм наибольшая ширина раскрытий нормаль-

ных трещин достигла 0,13 мм, а расстояние между нормальными трещинами находилось в пределах 80-82 мм (рисунок 7). После создания изгибающего момента $M=14,17$ кНм вертикальная нагрузка была сброшена и на этом закончилась первая стадия испытаний. На рисунке 8 представлен график раскрытия трещин на всех дальнейших стадиях нагружения. На второй стадии испытаний вертикальная нагрузка была увеличена до $M=19,12$ кНм, а ширина раскрытия нормальных трещин увеличилась до 0,15 мм; на следующих стадиях нагружения величина нагрузки была увеличена до $M=21,09$ кНм, $M=25,51$ кНм и $M=26,0$ кНм, но увеличения ширины раскрытия нормальных трещин не наблюдалось, поэтому картина раскрытия нормальных трещин приведена только для двух первых стадий нагружения.

Наряду с нормальными трещинами в зоне чистого изгиба балки наблюдалось ускоренное развитие наклонных трещин в приопорных зонах. Первая наклонная трещина образовалась на первой стадии испытаний при поперечной силе $V=16,1$ кН, а ширина раскрытия наклонных трещин на первой стадии испытаний при испытаниях при поперечной силе $V=23,0$ кН достигала 0,30 мм. На второй стадии испытаний при поперечной силе $V=23$ кН ширина раскрытия наклонных трещин достигала 0,40 мм, а при поперечной силе $V=23$ кН ширина раскрытия наклонных трещин достигала 0,40 мм, а при поперечной силе $V=301$ кН ширина раскрытия наклонных трещин достигала 0,45 мм. На третьей стадии испытаний при $V=33$ кН ширина раскрытия наклонных трещин достигала 0,60 мм, а на четвертой стадии испытаний при $V=39,8$ кН ширина раскрытия наклонных трещин достигала 0,75 мм. На пятой стадии испытаний при $V=51,35$ кН ширина раскрытия наклон-



Рисунок 5 – Общий вид испытаний железобетонной балки

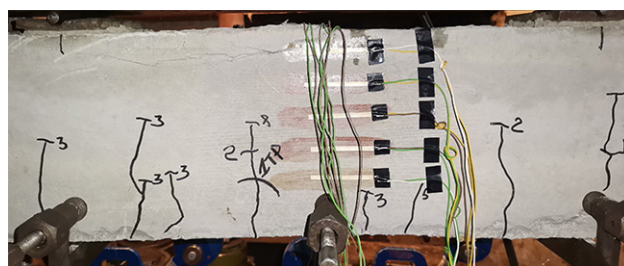


Рисунок 6 – Вид тензодатчиков на бетоне, нормальных трещин и участка повреждения сжатой зоны бетона



Рисунок 7 – Вид балки Б-22-1 после испытаний

ных трещин достигала 0,90 мм (рисунок 9).

Балка разрушилась в зоне чистого изгиба от раздробления сжатой зоны бетона при изгибающем моменте $M=32,86$ кНм (рисунок 10). Относительная величина сжатой зоны бетона составляла

$\xi = d/h = 0,45$ (рисунок 11), величина вертикальных перемещений пролетной части достигала 28,6 мм, а мест приложения вертикальных сил 22,8-25,1 мм, которые составляли 1/70 и 1/63 пролета.

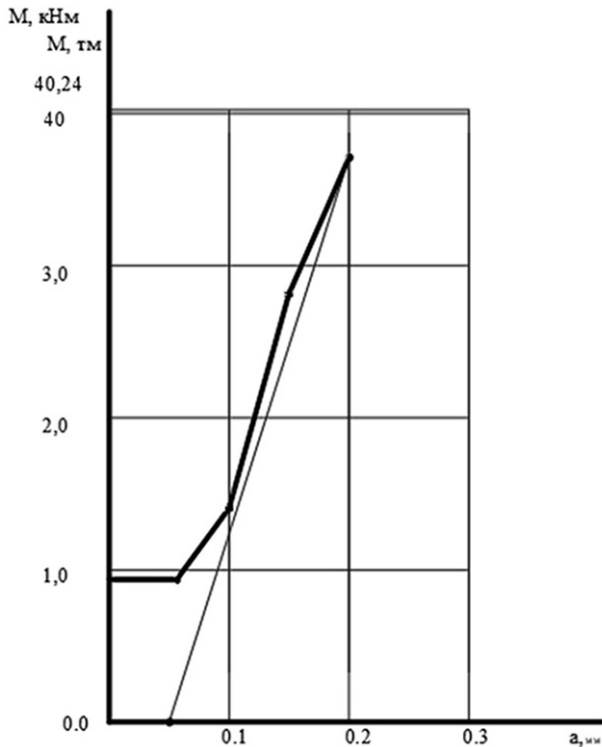


Рисунок 8 – График развития нормальных трещин в балке Б-22-1

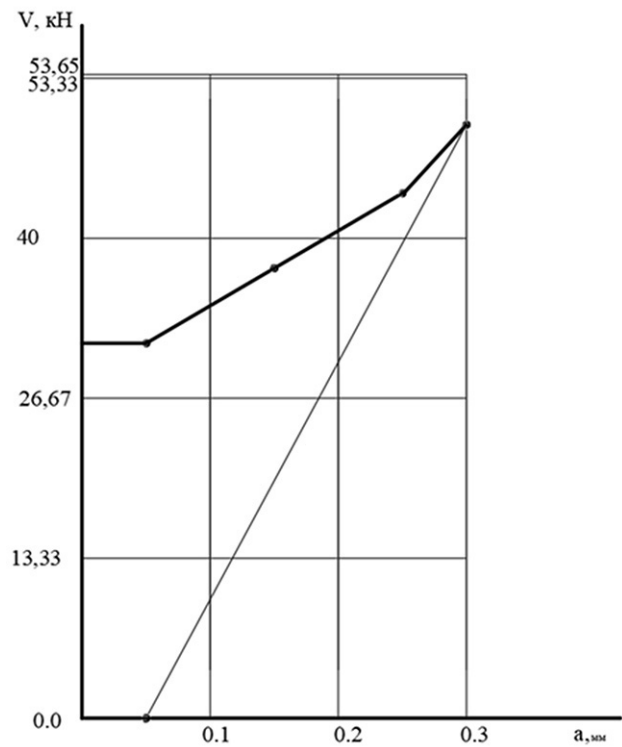


Рисунок 9 – График развития наклонных трещин в балке Б-22-1

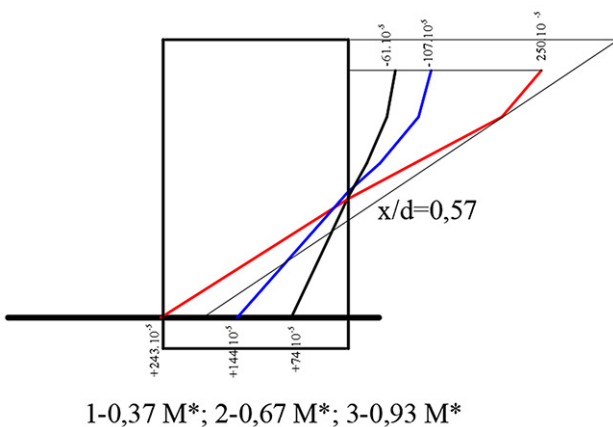


Рисунок 10 – Распределение деформаций по высоте сечения балки Б-22-1

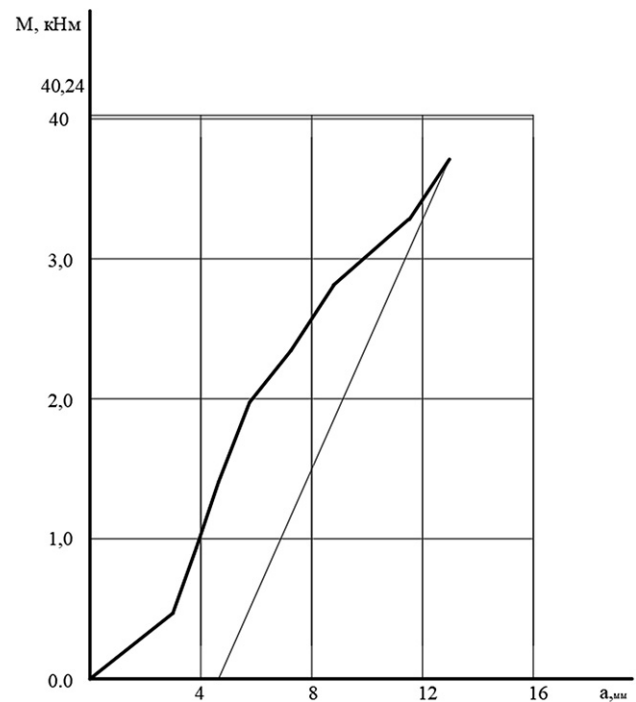


Рисунок 11 – Вертикальные прогибы пролетной части балки Б-22-1

Марка балки	Опытные данные			Нормативные деформации [1]	
	x/d	$\epsilon_c, 10^{-5}$	$\epsilon_s, 10^{-5}$	ξ	$\epsilon_{sy}, 10^{-5}$
B-22-1	0,57	434	302	0,65	186

Заклучение

Данные таблицы подтверждают линейную зависимость относительной высоты сжатой зоны бетона от процента продольного армирования растянутой зоны. Анализ результатов выполненных экспериментальных исследований жесткости и трещиностойкости свидетельствует о необходимости раздельного расчета остаточных деформаций и ширины раскрытия нормальных и наклонных трещин. Большинство поврежденных изгибаемых железобетонных конструкций требует уменьшения повышенных вертикальных перемещений и чрезмерной ширины раскрытия нормальных трещин. При разрушении железобетонных изгибаемых элементов от истощения прочности нормальных сечений вертикальные прогибы более чем в два раза превышают прогибы этих элементов при разрушении по поперечной силе. Основная часть этих прогибов вызвана чрезмерным раскрытием нормальных трещин. При проектировании восстановления нормальных сечений поврежденных железобетонных

конструкций предварительно напряженным поверхностным усилением фиброармированными пластиками следует руководствоваться следующими предпосылками:

- при расчете величины требуемого подъема поврежденных железобетонных элементов принимать начальную жесткость неповрежденного элемента;

- остаточную ширину раскрытия нормальных трещин при создании искусственного строительного подъема, эквивалентного собственному весу восстанавливаемого элемента, принимать равной $a = 0,05-0,10$ мм;

- в большинстве восстановленных железобетонных конструкций остаточная ширина раскрытия нормальных трещин составляла около 50% от ширины раскрытия имеющихся трещин.

- расчетная прочность наклеиваемых фиброармированных пластиков должна обеспечивать прочность наклонных сечений, превышающую требуемую прочность наклонных сечений на 20%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспаяев А.А., Исаков Т.М. Усиление сжатых железобетонных элементов фиброармированными пластиками // Актуальные проблемы и перспективы для разработки строительных конструкций: инновации, модернизация и энергоэффективность в строительстве: Сборник материалов международной научно-практической конференции / КазГАСА. Алматы, 2013.
2. Беспаяев А.А., Куралов У.С., Алтигенов У.Б. Усиление железобетонных конструкций полимерными материалами // Вестник Национальной инженерной академии РК. Алматы, 2011. № 2.
3. Беспаяев А.А., Куралов У.С., Алтигенов У.Б. Усиление конструкций, сейсמודинамика зданий, перспективы развития // Проблемы механики. Ташкент, 2016. № 3.
4. Грановский А.В., Костенко А.Н., Мочалов А.Л. Усиление железобетонных колонн каркасных зданий в сейсмоопасных районах с использованием элементов внешнего армирования из углеволокна // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2007. № 2.
5. Клевцов В.А., Фаткуллин Н.В. Расчет прочности нормальных сечений изгибаемых элементов усиленных внешней арматурой из композиционных материалов // Научно-техническая конференция молодых ученых и аспирантов ЦНИИС. 2006.
6. Хаятин Ю.Г., Чернявский В.Л., Аксельрод Е.З. Применение углепластиков для усиления строительных конструкций // Бетон и железобетон. – Москва, 2002. № 6.
7. Чернявский В.Л., Аксельрод Е.З. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами // Жилищное строительство. 2003. № 3.
8. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Москва: Стройиздат, 2007.
9. Bakis C.E., Bank L.C., Brown V.L., Cjzenza E. Fibre-Reinforced Polymer Composites for Construction-State of the Art Review // «Journal of Composites in Construction», New York. 2002, v.6.
10. Nabil F. Grace, S.B. Singh. Durability Evaluation of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Strengthened Concrete Beams: Experimental Study and Design. ACI Structural Journal, January-February, 2005.

Темірбетон конструкцияларының зақымдалуын композиттік пластикпен қалпына келтіру

¹БЕСПАЕВ Алий Аббасович, профессор, лаборатория меңгерушісі, aliy40@mail.ru,

²*МУХАНБЕТЖАНОВА Жанна Шахижахановна, докторант, sh.zhanna@bk.ru,

¹Қазақ құрылыс және сәулет ғылыми зерттеу және жобалау институты, Қазақстан, Алматы,

Солодовников көшесі, 21,

²Сәтбаев Университеті, Қазақстан, Алматы, Сәтбаев көшесі, 22а,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Темірбетон конструкцияларының жарамдылығын қалпына келтіру мақсатында қолданылатын тәсілдер қарастырылмақ. Оның ішінде шектен тыс жарықтары бар темірбетон конструкцияларының иілгіштік қасиетін қалпына келтіру әдісі ұсынылады. Ол үшін зақымдалған элементті көтергіш эффектісімен қамтамасыз ететін алдын ала керілген фиброармиленген пластиктермен беттік күшейту әдісін пайдаланамыз. Фиброармиленген пластиктермен нығайтылған майысатын және қысылатын элементтерді кешенді эксперименталдық зерттеулер иілгіш конструкциялардың қалыпты және қиғаш қималарының жұмысын зерттеумен қамтылады. Қалыпты қиманы зерттеу үшін А400, А500 классты арматураларымен армиленген 120*200*2200 темірбетон балкалары бірнеше серияда жасалынды. Үлгілерге көміртекті лента-лар жапсырылды. Үлгілер біраралық шарнирді бекітілген балкасы сұлбасымен сыналды.

Кілт сөздер: нығайту, арқалық, темірбетон, қалпына келтіру, фиброармиленген лента, статикалық кернеу, динамикалық кернеу, жарыққа төзімділік, қалыпты жарықтар, қиғаш жарықтар.

Repairing of Damaged Reinforced Concrete Structures with Composite Materials

¹BESPAYEV Aliy, Professor, Head of Laboratory, aliy40@mail.ru,

²*MUKHANBETZHANOVA Zhanna, doctoral student, sh.zhanna@bk.ru,

¹Kazakh Research and Design Institute of Construction and Architecture, Kazakhstan, Almaty, Solodovnikov, Street, 21,

²Satbayev University, Kazakhstan, Almaty, Satbayev Street, 22a,

*corresponding author.

Abstract. Directions for the development of methods for restoring the serviceability of reinforced concrete structures are formulated. A method is proposed for restoring the serviceability of bent reinforced concrete structures with increased deflections and excessive crack opening. For the restoration of bent reinforced concrete structures, surface reinforcement with prestressed fiber-reinforced plastics is proposed, which is provided by the creation of a building lift in damaged elements. Comprehensive experimental studies of flexible and compressed elements reinforced with fiber-reinforced plastics included studying the operation of normal and inclined sections of flexible structures. To study the operation of normal sections, several series of reinforced concrete beams with a section of 120x200 mm and a length of 2200 mm were tested, which were reinforced with symmetrical longitudinal reinforcement of the A400 and A500 classes. The samples were surface-reinforced with S&P Laminate «BASF» (Germany) carbon tapes glued to the compressed and tensioned faces of the beams. The prototypes were tested according to the scheme of a single-span hinged beam, loaded in the thirds of the span by equal concentrated forces.

Keywords: reinforcement, beam, reinforced concrete, repairing, FRP, static stresses, dynamic stress, crack resistance, normal crack, oblique crack.

REFERENCES

1. Bespaev A.A., Iskakov T.M. Usilenie szhatyh zhelezobetonnyh jelementov fibroarmirovannymi plastikami // Aktual'nye problemy i perspektivy dlja razrabotki stroitel'nyh konstrukcij: innovacii, modernizacija i jenergojeffektivnost' v stroitel'stve: Sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii / KazGASA. Almaty, 2013.
2. Bespaev A.A., Kuralov U.S., Altigenov U.B. Usilenie zhelezobetonnyh konstrukcij polimernymi materialami // Vestnik Nacional'noj inzhenernoj akademii RK. Almaty, 2011. No. 2.
3. Bespaev A.A., Kuralov U.S., Altigenov U.B. Usilenie konstrukcij, sejsmodinamika zdaniy, perspektivy razvitiya // Problemy mehaniki. Tashkent, 2016. No. 3.
4. Granovskij A.V., Kostenko A.N., Mochalov A.L. Usilenie zhelezobetonnyh kolonn karkasnyh zdaniy v sejsmoopasnyh rajonah s ispol'zovaniem jelementov vneshnego armirovaniya iz uglevolokna // Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij. 2007. No. 2.
5. Klevcov V.A., Fatkullin N.V. Raschet prochnosti normal'nyh sechenij izgibaemyh jelementov usilennyh vneshnej armaturoj iz kompozicionnyh materialov // Nauchno-tehnicheskaja konferencija molodyh uchenyh i aspirantov CNINS. 2006.
6. Hajutin Ju.G., Chernjanskij V.L., Aksel'rod E.Z. Primenenie ugleplastikov dlja usilenija stroitel'nyh konstrukcij // Beton i zhelezobeton. – Moskva, 2002. No. 6.
7. Chernjanskij V.L., Aksel'rod E.Z. Usilenie zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitnymi materialami // Zhilishhnoe stroitel'stvo. 2003. No. 3.
8. Shilin A.A., Pshenichnyj V.A., Kartuzov D.V. Usilenie zhelezobetonnyh konstrukcij kompozitnymi materialami. Moscow: Strojizdat, 2007.
9. Bakis C.E., Bank L.C., Brown V.L., Cjzenza E. Fibre-Reinforced Polymer Composites for Construction-State of the Art Review // «Journal of Composites in Construction», New York. 2002, v. 6.
10. Nabil F. Grace, S.B. Singh. Durability Evaluation of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Strengthened Concrete Beams: Experimental Study and Design. ACI Structural Journal, January-February, 2005.