

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

УДК 624.012.25

Е. М. Бабич, В. С. Довбенко

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ УСИЛЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК

UDC 624.012.25

Y. M. Babich, V. S. Dovbenko

CRACK RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований трещиностойкости изгибаемых статически определимых балок, усиленных полимерной композицией проникаемого действия, при кратковременной однократной нагрузке.

Ключевые слова:

железобетонная балка, полимерная композиция, усиление, трещиностойкость.

Abstract

Results of the experimental research of crack resistance of bendable statically determinate beams reinforced by the polymer composition of permeable action during a short-term single load event are given.

Key words:

concrete beam, polymer composition, reinforcement, crack resistance.

Усиление и восстановление конструкций зданий и сооружений требуют поиска новых рациональных и экономически обоснованных конструктивных решений. Одним из путей предотвращения указанной проблемы является использование полимерных материалов.

Различные способы усиления железобетонных конструкций полимерными материалами отображены в [1–9].

В последнее время разработана технология усиления железобетонных конструкций зданий и сооружений с использованием ряда специально разработанных полимерных материалов. Новизна технологии проникающего действия полимеров состоит в возможности создания системы усиления без нару-

шения статики конструкции. Для железобетонных конструкций большое значение имеет процесс появления и раскрытия трещин как для предупреждения коррозии арматуры, так и для обеспечения совместной работы бетона и арматуры. Полимерная композиция способна проникать в трещины и поры, пропитывать продукты коррозии металла и в дальнейшем предотвращать возможность ее возникновения. Стоимость полимерной композиции ниже стоимости применяемых в настоящее время композиций, компаундов и смол [10].

В лаборатории кафедры инженерных конструкций Национального университета водного хозяйства и природопользования выполнены эксперимен-

тальные исследования по изучению трещиностойкости железобетонных балок, усиленных полимерной композицией. Для проведения эксперимента были поставлены серии опытов. Одна из серий состояла из девяти железобетонных балок сечением 100×200 мм и длиной 2000 мм из бетона заводского изготовления класса С20/25. Балки сечением 100×200 мм и длиной 2000 мм были ар-

мированы двумя сварными каркасами (в зоне чистого изгиба верхние монтажные и поперечные стержни не устанавливали). В продольном направлении в качестве рабочей арматуры использовали стержни диаметром 14 мм из стали класса А500С, поперечной арматуры – стержни диаметром 6 мм класса А240С с шагом 100 мм (рис. 1).

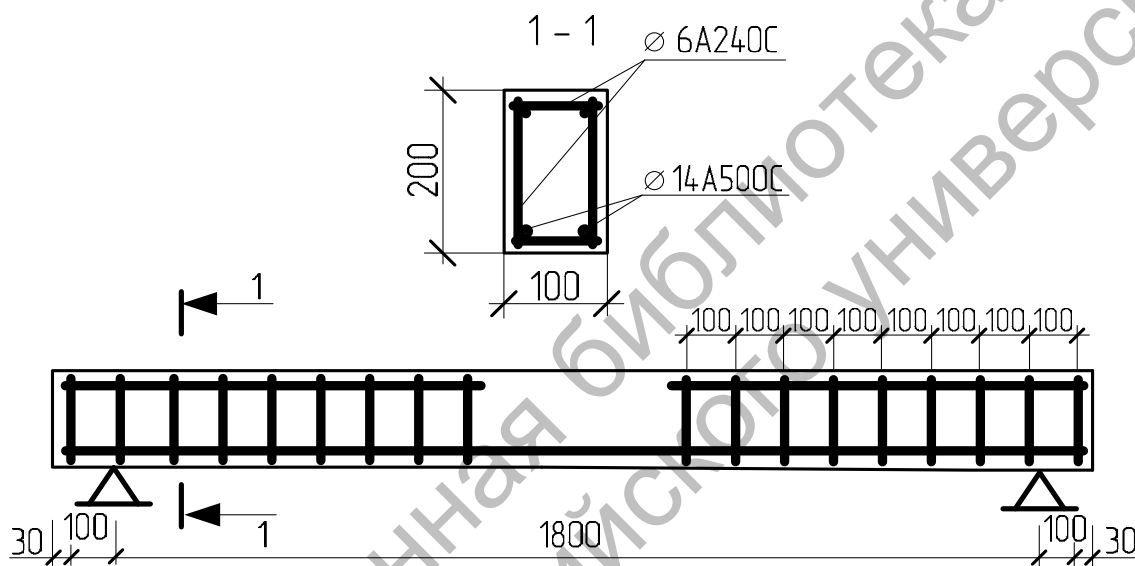


Рис. 1. Схема армирования опытных балок

Испытание всех балок проводилось на специально изготовленной установке по схеме однопролетной шарнирно-опертой балки на двух опорах (расчетный пролет 1800 мм), которые загружали двумя сосредоточенными силами F на расстоянии 600 мм от опор.

Все балки загружали ступенями приблизительно по 10 % от разрушающей нагрузки до разрушения. На каждой ступени загрузки выдержка длилась 10...15 мин. Во время выдержки снимали показания по приборам, выполняли визуальный осмотр образцов, тщательно измеряли ширину раскрытия нормальных трещин на уровне центра тяжести продольной арматуры. Измерения проводили по трем-четырем наиболее

типичным трещинам – с наибольшей шириной раскрытия. Характер трещинообразования опытных балок отображали на самих образцах с помощью маркера. В непосредственной близости с трещиной дублировали ее направление, отмечали номер и нагрузку, при которой она возникла. Ширину раскрытия трещин измеряли микроскопом МПБ-3 с ценой деления шкалы 0,02 мм; деформации бетона и арматуры – тензорезисторами с базой 50 и 20 мм, которые подключали к многоканальной тензометрической измерительной системе ВПП-8; прогибы балок и вертикальное перемещение опор – прогибомером БПАО с ценой деления шкалы 0,01 мм. Схема загрузки балок сосредо-

точными силами и расположение измерительных приборов приведены на рис. 2.

Балки были разделены на три группы: первая – обычные контрольные балки (марка БК), которые испытывали без усиления; вторая – балки (марка БУ), которые до начала испытаний усиливали; третья – балки (марка БВ), которые сначала подвергали нагрузкам, имитируя таким образом процесс эксплуатации конструкций. Разница между балками БУ и БВ состояла в том, что балки БУ усиливали до начала испытаний, а балки БВ предварительно нагружали, только потом усиливали.

Для усиления использовали полимерную композицию проникающего действия, которая представляет собой

мономер (однородная низковязкая жидкость светло-коричневого цвета), преобразующийся после полимеризации в полимер. При поверхностном нанесении полимерная композиция пропитывает поверхность бетона и после химического взаимодействия образует новый композиционный материал, который по своей структуре отличается от необработанной конструкции [10]. Полимеризация происходит за счет химической реакции компонентов композиции с солями, основаниями и влагой, имеющимися в составе бетона. Отвердевшая полимерная композиция превращается в прочный полимер, который является экологически безопасным, нетоксичным и негорючим продуктом.

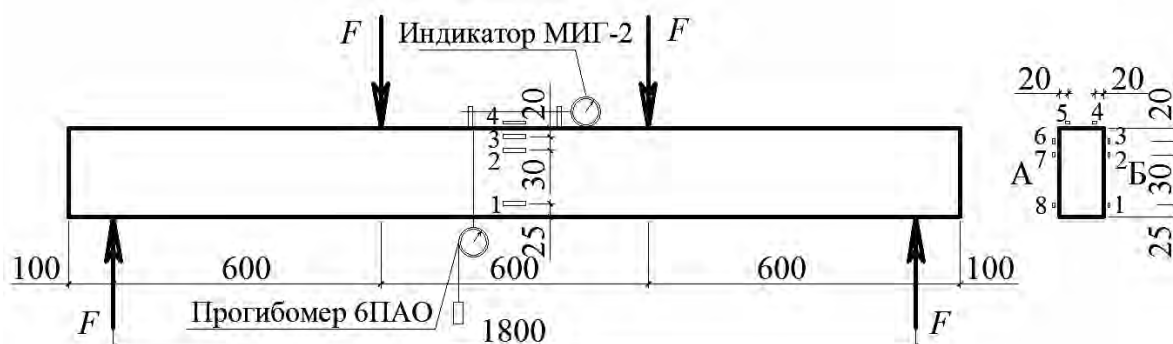


Рис. 2. Схема расположения измерительных приборов: А, Б – боковые грани (стороны) балок; 1...8 – нумерация тензорезисторов

Поверхность бетона должна иметь открытую капиллярную структуру для проникновения полимерной композиции, следовательно, для усиления железобетонных балок БУ одна из первых операций – это подготовка поверхности. Со всех граней балок БУ было снято «цементное молочко», чтобы поверхность приобрела шероховатость. Очистку выполняли механизированным инструментом. После подготовки балок БУ к усилению полимерную композицию наносили послойно с помощью кисти, по мере ее проникновения, через каждые 10...15 мин до полного насыщения по-

верхностных слоев всех граней балок (всего три–четыре слоя). Признаком насыщения являлось образование глянцевой поверхности темно-коричневого цвета (однородное покрытие). Глубина проникновения и структурные изменения бетона, пропитанного полимерной композицией, рассмотрены в [11]. Средний расход полимерной композиции на 1 м^2 поверхности для балок составил 600 мл.

Балки БВ нагружали ступенями статической нагрузкой, которая составила приблизительно 0,8 от разрушающей. Далее эти балки были полностью

разгружены, усилены аналогично балкам БУ. По истечении 10 сут хранения в лабораторных условиях усиленные (восстановленные) балки БВ вновь подвергали воздействию кратковременных статических нагрузок до разрушения.

Перед основными испытаниями опытных балок были определены физико-механические характеристики материалов. Образцы-кубы и призмы в возрасте 28 сут по результатам трех образцов имели прочность: кубиковую – $f_{cm,cube} = 30,2$ МПа; призмную – $f_{cm,prism} = 27,8$ МПа. Максимальные деформации бетона по результатам испыта-

ния образцов-призм на осевое сжатие при $\sigma_c = f_{cm,prism}$ составили $\varepsilon_c = 178,4 \cdot 10^{-5}$. Усиление бетонных кубов и призм выполняли аналогично балкам. Среднее значение прочности усиленного бетона для кубов и призм составило соответственно $f_{cm,cube} = 34,8$ и $f_{cm,prism} = 30,9$ МПа. Максимальные деформации бетона усиленных призм на осевое сжатие при $\sigma_c = f_{cm,prism}$ были меньшими и $\varepsilon_c = 166,1 \cdot 10^{-5}$. Усиление образцов полимерной композицией повысило кубиковую и призмную прочность соответственно на 14,2 и 12,0 % (табл. 1).

Табл. 1. Физико-механические характеристики материалов

Образец	Кубиковая прочность бетона $f_{cm,cube}$ МПа	Призмная прочность бетона $f_{cm,prism}$ МПа	Деформация		Начальный модуль упругости бетона E_{cm} ГПа
			бетона при сжатии $\varepsilon_c \cdot 10^{-5}$	арматуры при растяжении $\varepsilon_s \cdot 10^{-5}$	
Контрольный	30,2	27,8	178,4	274,5	20,3
Усиленный	34,8	30,9	166,1		24,6

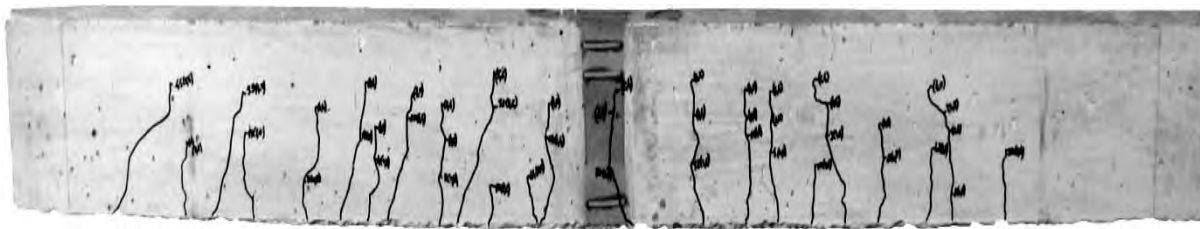
Изучение характера трещинообразования опытных балок начинали с первой ступени загрузки, особое внимание было обращено на измерения и развитие нормальных трещин и их количество. Эти измерения проводили по двум боковым граням для проверки симметричности работы балок. Для более контрастного проявления и обнаружения трещин на поверхность балок перед испытанием был нанесен слабый раствор извести.

Контрольные балки. Первые нормальные трещины в контрольных балках БК начинали возникать в растянутой зоне на участке максимального момента на первой ступени загрузки, равной 8 кН, а ширина их раскрытия составила 0,04...0,08 мм. Количество нормальных трещин на первой ступени загрузки – 14 шт. С увеличением нагрузки на каждой ступени ширина раскрытия, высота и количество трещин увеличивались. На противоположных

сторонах балок БК характер развития трещин и их количество были практически одинаковыми, что свидетельствует о симметричной работе балок в своей плоскости. Максимальная ширина раскрытия трещин на девятой (последней) ступени загрузки перед разрушением при нагрузке 72 кН составляла 0,37 мм. Количество трещин с двух сторон – 45 шт., а их длина по высоте балки достигала две третьих всей высоты. Схема трещинообразования балок БК показана на рис. 3.

Разрушение контрольных балок БК произошло одновременно по растянутой и сжатой зонам вследствие достижения в арматуре напряжений условного предела текучести и выкалывания бетона сжатой зоны. Средняя разрушающая нагрузка трех балок-близнецов БК составила 79,5 кН (изгибающий момент 23,7 кН·м). Результаты испытаний приведены в табл. 2.

а)



б)

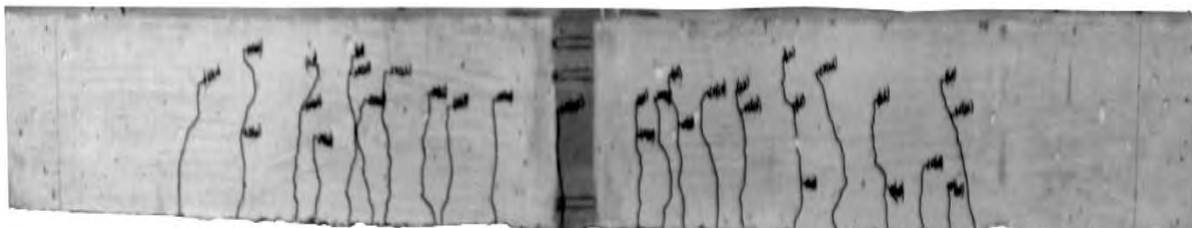


Рис. 3. Характер трещинообразования контрольных балок БК: а – сторона А; б – сторона Б

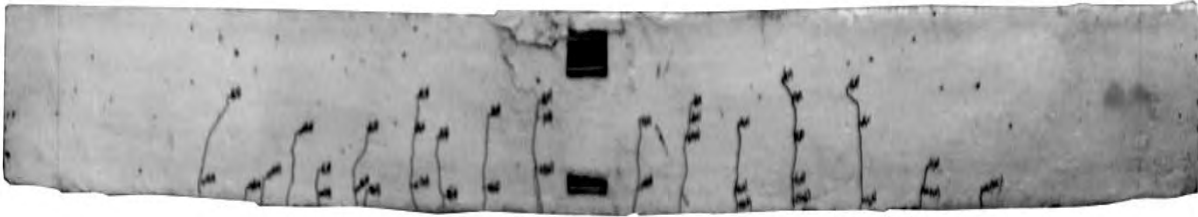
Табл. 2. Результаты испытаний опытных образцов

Марка балок	Разрушающая нагрузка, кН	Изгибающий момент, кН·м	Момент образования первых нормальных трещин, кН·м	Максимальная ширина раскрытия нормальных трещин, мм
БК	79,5	23,7	2,4	0,37
БУ	82,8	25,7	7,2	0,23
БВ	101,0	30,3	7,2	0,23

Усиленные балки. Трещиностойкость усиленных балок БУ была значительно выше по сравнению с балками БК. Так, первые нормальные трещины наблюдали на две ступени выше – третья ступень загрузки 24 кН (изгибающий момент 7,2 кН·м). Ширина раскрытия трещин при этой нагрузке была практически минимальной и составила 0...0,01 мм. Измерения проводили по трем-четырем наиболее характерным трещинам, количество нормальных трещин на третьей ступени загрузки – 8 шт. Следует отметить, что балки БУ при моменте образования трещин

7,2 кН, по сравнению с балками БК – 2,4 кН, имели количество трещин в 2 раза меньше. На каждой ступени с увеличением нагрузки ширина раскрытия, высота и количество трещин увеличивались. На десятой (последней) ступени загрузки перед разрушением при 80 кН максимальная ширина раскрытия трещин составляла 0,23 мм. Длина трещин по высоте балки была разная, большинство из них были длиной в половину высоты балки, их максимальное количество с двух сторон – 32 шт. Схема трещинообразования балок БУ показана на рис. 4.

а)



б)



Рис. 4. Характер трещинообразования усиленных балок БУ: а – сторона А; б – сторона Б

Разрушение усиленных балок БУ произошло по нормальному сечению при нагрузке 82,8 кН (момент 25,7 кН·м) вследствие достижения в арматуре напряжений условного предела текучести и выкалывания бетона в середине пролета.

Восстановленные балки. Балки БВ сначала однократно нагружали восемью ступенями загрузки $2F = 64$ кН. При этом образовались трещины шириной раскрытия 0,2 мм. На каждой ступени загрузки процесс трещинообразования был аналогичен контрольным балкам БК, после чего балки БВ были полностью разгружены. После разгрузки были видны волосяные трещины, остаточная ширина их раскрытия была меньше цены деления микроскопа 0,01 мм, то есть можно принять, что закрывались полностью. Далее выполняли усиление полимерной композицией по такой же схеме, как и для балок БУ. Балки БВ восстанавливались и повторно испытывались статической нагрузкой.

В усиленных (восстановленных) балках БВ трещинообразование протекало иным образом. Были предположения, что при новой загрузке в этих балках начнут раскрываться старые воло-

сяные трещины. Особый интерес представлял тот факт, что до третьей ступени загрузки никакого раскрытия старых трещин не обнаружено. При этом на третьей ступени (нагрузка 24 кН) старые волосяные трещины не были раскрыты, но в других местах образовались новые трещины. Ширина раскрытия новых нормальных трещин составляла 0,02...0,06 мм. Постепенно с увеличением нагрузки новые трещины развивались и раскрывались. Старые трещины при высшей ступени нагрузки также развивались, но ширина их раскрытия была меньше новообразовавшихся. Этот факт можно объяснить тем, что полимерная композиция проникла вглубь волосяных трещин и в процессе полимеризации как бы заклеила дефекты структуры цементного камня, заполнителя и контактной зоны, связавши, таким образом, тысячами нитей различные участки бетона, повышая их трещиностойкость и сопротивление нагрузке. Сетка полимера в бетоне образовала особого рода дисперсное армирование.

Максимальная ширина раскрытия трещин на двенадцатой (последней) ступени загрузки перед разрушением

при $2F = 96$ кН составляла 0,23 мм. Если сравнить ширину раскрытия трещин балок БВ и БК при нагрузке 72 кН (последняя ступень загрузки балок БК перед разрушением), то она будет следующей: для балок БК – 0,37; для балок БВ – 0,18 мм. Длина трещин балок БВ достигала половины высоты балки, а их количество с двух сторон составило 31 шт. Схема трещинообразования балок БК представлена на рис. 5.

Характер разрушения усиленных (восстановленных) балок БВ аналогичен балкам БУ, но только при высшей ступени загрузки. Средняя разрушающая нагрузка трех балок-близнецов БВ составила 101,0 кН (изгибающий момент 30,3 кН·м).

Результаты исследования трещиностойкости опытных балок трех групп приведены в табл. 3.



Рис. 5. Характер трещинообразования усиленных (восстановленных) балок БВ: а – сторона А; б – сторона Б

Табл. 3. Трещиностойкость опытных балок

Изгибающий момент, кН·м	Ширина раскрытия трещин w_k , мм			Отношение ширины раскрытия трещин усиленных балок к контрольным	
	БК	БУ	БВ	$w_k(БУ)/w_k(БК)$	$w_k(БВ)/w_k(БК)$
0,0	0,00	0,00	0,00	–	–
2,4	0,05	0,00	0,00	–	–
4,8	0,09	0,00	0,00	–	–
7,2	0,12	0,02	0,06	0,17	0,50
9,6	0,15	0,04	0,08	0,27	0,55
12,0	0,17	0,07	0,09	0,40	0,56
14,4	0,21	0,09	0,11	0,45	0,55
16,8	0,24	0,11	0,14	0,47	0,58
19,2	0,27	0,14	0,15	0,53	0,58
21,6	0,33	0,18	0,17	0,55	0,53
24,0	0,37	0,23	0,18	0,61	0,49
26,4	–	–	0,20	–	–
28,8	–	–	0,23	–	–

На рис. 6 показаны кривые роста раскрытия трещин опытных балок в зависимости от роста нагрузки.

Экспериментально установлено, что усиление и восстановление железобетонных балок полимерной композицией уменьшает ширину раскрытия трещин до 40 %, а момент образования

первых трещин отодвигается на 67 %.

Разрушение всех опытных балок было одинаковым и происходило по нормальному сечению одновременно по растянутой и сжатой зонам вследствие достижения в арматуре напряжений условного предела текучести и выкалывания бетона сжатой зоны.

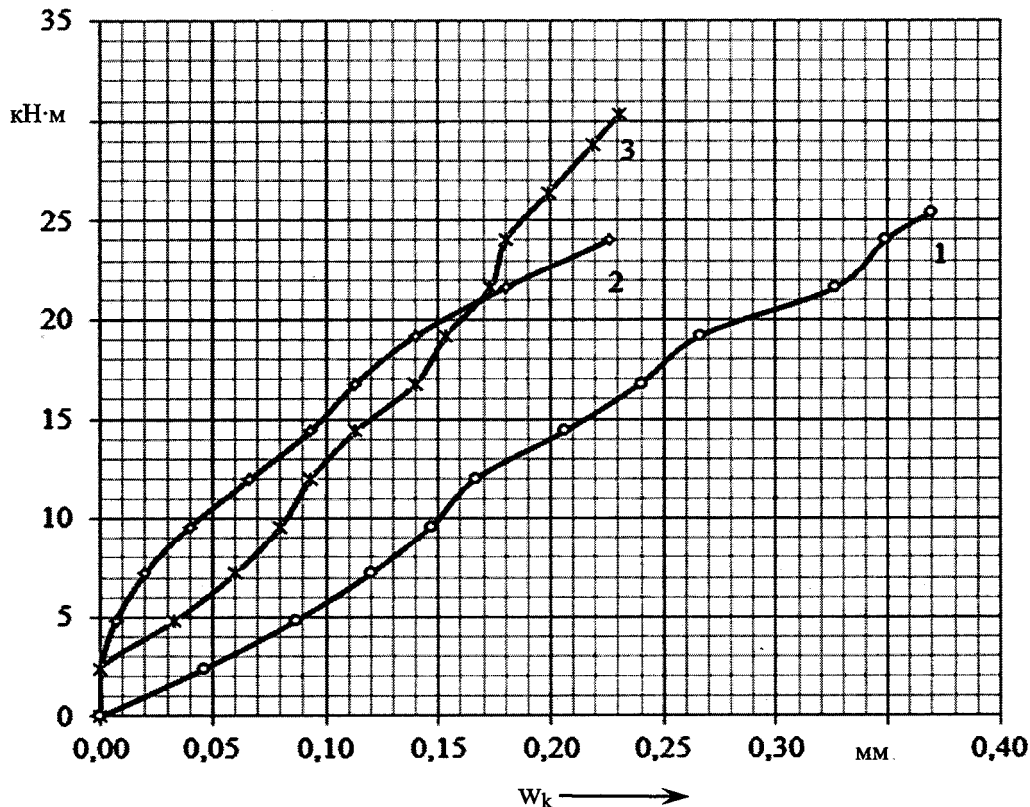


Рис. 6. График развития нормальных трещин опытных балок: 1 – контрольных (БК); 2 – усиленных (БУ); 3 – восстановленных (БВ)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Барашиков, В. Я.** Расчет прочности железобетонных балок, усиленных эффективными материалами в растянутой зоне / В. Я. Барашиков, Э. М. Блалы // Ресурсоэкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне : УДУВГП, 2003. – Вип. 10. – С. 252–258.
2. **Боярчук, Б. А.** Характер тріщиноутворення і розкриття тріщин в експериментальних залізобетонних балках, підсилених різними способами / Б. А. Боярчук // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій : зб. наук. пр. – Львів : Камінь, 2002. – Вип. 5. – С. 219–223.
3. **Веселовский, Д. Р.** Основные принципы создания мономеров для пропитки бетона / Д. Р. Веселовский, Н. В. Савицкий, Р. А. Веселовский // Строительство. Материаловедение. Машиностроение : сб. науч. тр. – Днепропетровск : ПГАСА, 2005. – Вип. 35, ч. 1. – С. 105–108.
4. **Войцехівський, О. В.** Відпрацювання найбільш ефективної схеми відновлення залізобетонних балок сучасними ремонтними сумішами / О. В. Войцехівський, Т. І. Приндюк // Ресурсоэкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне : НУВГП, 2004. – Вип. 11. – С. 357–360.
5. **Золотов, М. С.** Восстановление и усиление железобетонных конструкций покрытиями на основе акриловых полимеров / М. С. Золотов, М. Ю. Смолянинов // Ресурс і безпека експлуатації

конструкцій, будівель і споруд : матеріали Міжнар. конф. – Харків : ХДТУБА, 2003. – Вип. 23. – С. 174–177.

6. **Конончук, О. П.** Работа нормальных перерезів згинальних залізобетонних елементів, підсилених композитними матеріалами за дії малоциклового навантаження : автореф. дис. ... канд. техн. наук / О. П. Конончук. – Львів : Львівська політехніка, 2013. – 20 с.

7. **Климпуш, М. Д.** Розрахунок міцності нормальних перерезів залізобетонних балок, підсилених вуглецевими полімерами / М. Д. Климпуш, В. Г. Кваша // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне : НУВГП, 2007. – Вип. 15. – С. 370–376.

8. **Смолянинов, М. Ю.** Выносливость железобетонных изгибаемых элементов, усиленных акриловым полимерраствором, при многократно повторных нагружениях / М. Ю. Смолянинов, Л. Н. Шутенко, М. С. Золотов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне : РДТУ, 2003. – Вип. 10. – С. 281–289.

9. **Хаютин, Ю. Г.** Применение углепластиков для усиления строительных конструкций / Ю. Г. Хаютин, В. Л. Чернявский, Е. З. Аксельрод // Бетон и железобетон. – 2002. – № 6. – С. 17–20.

10. Научно-инженерный центр «Адгезив» [Электронный ресурс] / Режим доступа : [http : // www.adgeziv.com](http://www.adgeziv.com). – Дата доступа : 15.12.13.

11. **Довбенко, В. С.** Особливості структури і властивостей бетону, просоченого полімерною композицією проникаючої дії / В. С. Довбенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне : НУВГП, 2012. – Вип. 23. – С. 57–62.

Статья сдана в редакцию 16 января 2014 года

Евгений Михайлович Бабич, д-р техн. наук, проф., Национальный университет водного хозяйства и природопользования. Тел.: +38-050-142-25-04, (0362)-633-273.

Владимир Сергеевич Довбенко, ст. преподаватель, Национальный университет водного хозяйства и природопользования. E-mail: dovbenko.v.s@gmail.com.

Yevgeny Mikhailovich Babich, DSc (Engineering), Prof., National University of Water Management and Nature Resources Use. Phone: +38-050-142-25-04, (0362) 633-273.

Vladimir Sergeevich Dovbenko, senior lecturer, National University of Water Management and Nature Resources Use. E-mail: dovbenko.v.s@gmail.com