

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТКАНЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### THE USE OF WOVEN COMPOSITES FOR RECOVERY BUILDING CONSTRUCTION

*С.И. МЕРКУЛОВ, С.М. ЕСИПОВ*

*S.I. MERKULOV, S.M. ESIPOV*

(Курский государственный университет,  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова)

(Kursk State University,  
Belgorod State Technological University V.G. Shukhov)

E-mail: mersi.dom@yandex.ru; sk31.sm@gmail.com

*Приведены результаты экспериментальных исследований усиленных железобетонных элементов ткаными композитными материалами. Показано, что на работу усиленной конструкции существенное влияние оказывает наличие в усиливаемом элементе напряженного состояния и силовых повреждений.*

*The results of experimental studies of reinforced concrete elements with woven composite materials are presented. It is shown that the operation of the reinforced structure is significantly influenced by the presence of a stressed state and force damage in the reinforced element.*

**Ключевые слова:** композитный материал, повреждения конструкций, восстановление конструкций, сцепление.

**Keywords:** composite material, structural repair, structural damage, adhesion.

Повреждения строительных конструкций эксплуатируемых зданий, как правило, вызываются совокупностью нескольких причин, причем часто эти причины носят взаимно усиливающий характер. В частности, для зданий текстильной промышленности характерны вибрационные и знакопеременные нагрузки на строительные конструкции, а также пропитка железобетонных конструкций технологическими маслосодержащими жидкостями. Накоплен определенный опыт реконструкции зданий легкой промышленности [1], [2]. Усиление железобетонных конструкций зданий текстильной промышленности можно эффективно выполнить с применением композитных тканых материалов. Усиление строительных конструкций композитными ткаными материалами возмож-

но выполнять без остановки технологических процессов. Для усиления конструкций ткаными материалами им должны быть присущи малый собственный вес, простая технологии работ [3...6]. Для усиления строительных конструкций применяются различные тканые композитные материалы в виде холстов и ламелей. При производстве тканых композитов используются стеклянные, базальтовые, углеродные волокна. По виду переплетения нитей различают однонаправленные, двунаправленные и мультиаксиальные ткани. В однонаправленных тканях более 75% волокон расположены в одном направлении. Именно такие ткани наиболее часто используются в системах усиления конструкций, так как они позволяют целенаправленно размещать элементы

усиления с учетом напряженно-деформированного состояния конструкций. Основными факторами, определяющими эффективность усиления конструкций, являются расчетные значения прочностных и деформативных характеристик композитных материалов и расчетная характеристика сцепления элемента усиления с конструкцией. Прочность холста определяется прочностью составляющих его отдельных нитей. При растяжении тканого материала отдельные нити испытывают сложное напряженно-деформированное состояние [7]. Прочность растянутого холста составляет до 70% прочности отдельной нити на растяжение. В результате испытаний, выполненных авторами, тканого углепластикового композита установлена несущая способность материала при одноосном нагружении в плоскости волокон [8], [9]. Были испытаны композитная ткань в сухом состоянии и композитные ламинаты, полученные омоноличиванием композитной ткани эпоксидным связующим. Композитная ткань начинает разрушаться (рис. 1) с разрывом отдельных нитей, в которых напряжения достигают предельных значений, с последующим прогрессирующим разрывом всех однонаправленных нитей ткани (рис. 1-а), композитные ламинаты разрываются хрупко (рис. 1-б). Относительное удлинение при разрыве ткани до двух раз выше, чем у ламината. Прочность ткани на разрыв до 40% ниже прочности ламината.



а)



б)

Рис. 1

Особенностью усиления строительных конструкций эксплуатируемых зданий является наличие в конструкциях на момент усиления начальных напряжений и повреждений. В известных методиках особенности усиления строительных конструкций под нагрузкой напряженное состояние усиливаемой конструкции и наличие повреждений учитывается весьма условно, приводятся общие указания по расчету и конструированию усиления [10], [11]. Рядом авторов выполнены экспериментальные исследования усиленных железобетонных конструкций с внешним армированием композитными материалами при отсутствии начального напряженного состояния [12], [13]. Для оценки прочности напряженно-деформированного состояния изгибаемых нагруженных железобетонных конструкций, усиленных внешним армированием ткаными композитными материалами, выполнены экспериментальные исследования конструкций с различными вариантами усиления. Образцы серии Б2 были усилены в ненагруженном состоянии, образцы серии Б4 были усилены под нагрузкой 0,7 от значения разрушающей нагрузки, на момент исследования образцы имели нормальные трещины в бетоне растянутой зоны. Усиление выполнено наклейкой углепластиковой ткани в один слой на растянутую грань железобетонной однопролетной балки. Также были испытаны контрольные железобетонные образцы без усиления. Характеристики углеволоконной ткани, примененной для усиления железобетонных балок, определены по ГОСТ 25.601–80, для сухого волокна прочность на растяжение 1911 МПа, модуль упругости 101000 МПа, для пропитанного полимером волокна 2940 МПа и 279000 МПа соответственно. Размеры экспериментальных усиленных железобетонных элементов 100×150×1200 мм. Материалы элементов: бетон В20 ( $R_b=11,65$  МПа,  $R_{bt}=0,9$  МПа) и рабочая арматура 2Ø8 А400.

Испытания опытных образцов выявили величины разрушающей нагрузки и характерные схемы разрушения усиленных изгибаемых элементов, усиленных внешним армированием ткаными материалами. Несущая способность неусиленных изгибаемых

железобетонных изгибаемых образцов составила 7,16 кН·м, усиленных ненагруженных образцов – 10,0 кН·м, усиленных под нагрузкой образцов с трещинами в бетоне в растянутой зоне – 8,66 кН·м. Разрушение всех опытных образцов произошло из-за отрыва внешнего композитного элемента (рис. 2 – отслоением элемента внешнего армирования при разрушении опытного образца 2). Усиление железобетонных изгибаемых балок внешним армированием углеволоконной тканью увеличило несущую способность до 1,4 раза при усилении ненагруженных образцов, до 1,2 раза – нагруженных элементов. В образцах, усиленных под нагрузкой, наличие трещин в бетоне растянутой зоны приводит к разрушению вследствие отслоения композитного материала в зоне трещин, чему способствуют значительные деформации растянутой зоны при трещинообразовании.



Рис. 2

Для анализа напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций, усиленных внешним армированием тканями композитными материалами, выполнены численные исследования. В качестве платформы для численных исследований был применен МКЭ-комплекс ANSYS 18. Модель балки составлялась из объемных конечных элементов с заданными прочностными и деформационными параметрами материалов, граничными условиями и внешней нагрузкой, заданной в виде функции от времени. В расчете применяется неявный решатель дифференциальных уравнений. Решение нелинейной задачи итерационным методом касательных с автоматической оптимизацией шага (при условии превышения итераций). Результаты численных исследований показывают высокую схо-

димость с результатами натурного эксперимента. Наиболее точные данные были получены при моделировании зоны контакта "композит-бетон" с помощью конечных элементов целевых поверхностей с заданием закона взаимодействия, разработанного в [14]. Нормальные трещины в бетоне растянутой зоны являются концентраторами напряжений в контактной зоне "композит-бетон", приводящими к отрыву внешнего композитного элемента (рис. 3 – изополя нормальных напряжений во внешнем армировании балки при разрушении образца серии Б2 (вверху) и образца серии Б4 (внизу)).

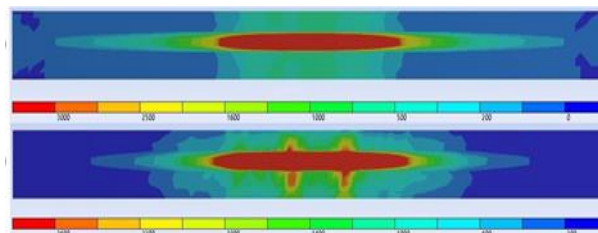


Рис. 3

## ВЫВОДЫ

1. Эффективность усиления изгибаемых железобетонных конструкций зависит от наличия в конструкции на момент усиления напряженного состояния и силовых повреждений. Наличие трещин в бетоне растянутой зоны снижает несущую способность усиленной конструкции внешним армированием тканым композитным материалами до 20%.

2. Предельным состоянием изгибаемых конструкций, усиленных внешним армированием композитным тканым материалом, является разрушение бетона в зоне клеевого шва между бетоном усиливаемой конструкции и композитным тканым материалом без разрушения бетона сжатой зоны.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов Б.С., Трошков Е.О. Реконструкция и новое строительство зданий легкой промышленности с использованием несущей системы "УИКСС" // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, №2. С. 237...241.
2. Тамразян А.Г. Использование свойств ограниченного бетона при анализе усиленных железобетонных колонн // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018, №5. С. 197...202.

3. Римшин В.И., Меркулов С.И. Элементы теории развития бетонных конструкций с неметаллической композитной арматурой // Промышленное и гражданское строительство. – 2015, № 5. С. 38...42.

4. Меркулов С.И., Есипов С.М. Увеличение несущей способности железобетонных конструкций усилением внешним армированием композитным материалом // Бюллетень строительной техники. – 2018, №2. С.56...57.

5. Бадалова Е.Н. Усиление изгибаемых железобетонных конструкций углепластиковой арматурой // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия. Ф. Прикладные науки. – 2007, № 6. С. 54...59.

6. Параничева Н.В., Назмеева Т.В. Усиление строительных конструкций с помощью углеродных композиционных материалов // Инженерно-строительный журнал. – 2010, № 2. С. 19...22.

7. Берендеев Н.Н. Описание поведения тканого композита при статическом нагружении с использованием структурной модели // Вестник НГУ им. Н.И. Лобачевского. – 2013, №4(1). С.173...179.

8. Меркулов С.И., Есипов С.М. Прочность и деформативность композитного материала на основе углеродной фибры при одноосном растяжении // Вестник Белгородского гос. технолог. ун-та им. В.Г. Шухова. – 2016, № 11. С. 69...73.

9. Меркулов С.И., Есипов С.М. Влияние скорости и режима нагружения на прочность и жесткость армированных углепластиков // Вестник Белгородского гос. технолог. ун-та им. В.Г. Шухова. – 2017, № 1. С. 52...56.

10. Римшин В.И., Галубка А.И., Синютин А.В. Инженерный метод расчета усиления железобетонных плит покрытия композитной арматурой // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014, №3. С.218...220.

11. СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования. Дата введения 09.01.2014.

12. Юшин А.В., Морозов В.И. Экспериментальные исследования двух пролетных железобетонных балок, усиленных композитными материалами по наклонному сечению // Вестник гражданских инженеров. – 2014, № 5 (46). С. 77...84.

13. Подольский П.П., Михуб Ахмад. О программе исследований изгибаемых железобетонных элементов, усиленных различными видами композитных материалов // Сб. научн. тр.: Строительство-2012. – Ростов н/Д, 2012. С. 51...52.

14. Меркулов С.И., Есипов С.М. Экспериментальные исследования сцепления внешней композитной неметаллической арматуры с бетоном // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. – 2017, № 1. С. 93...97.

## REFERENCES

1. Sokolov B.S., Troshkov E.O. Rekonstruktsiya i novoe stroitel'stvo zdaniy legkoy promyshlennosti s ispol'zovaniem nesushchey sistemy "UIKSS" // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2017, №2. S. 237...241.

2. Tamrazyan A.G. Ispol'zovanie svoystv ogranichenogo betona pri analize usilennykh zhelezobetonnykh kolonn // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2018, №5. S. 197...202.

3. Rimshin V.I., Merkulov S.I. Elementy teorii razvitiya betonnykh konstruksiy s nemetallicheskoj kompozitnoy armaturoy // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2015, № 5. S. 38...42.

4. Merkulov S.I., Esipov S.M. Uvelichenie nesushchey sposobnosti zhelezobetonnykh konstruksiy usileniem vneshnim armirovaniem kompozitnym materialom // Byulleten' stroitel'noy tekhniki. – 2018, №2. S.56...57.

5. Badalova E.N. Usilenie izgibaemykh zhelezobetonnykh konstruksiy ugleplastikovoy armaturoy // Vestnik Polotskogo gos. un-ta. Seriya. F. Prikladnye nauki. – 2007, № 6. S. 54...59.

6. Paranicheva N.V., Nazmeeva T.V. Usilenie stroitel'nykh konstruksiy s pomoshch'yu uglerodnykh kompozitsionnykh materialov // Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal. – 2010, № 2. S. 19...22.

7. Berendeev N.N. Opisanie povedeniya tkanogo kompozita pri staticheskom nagruzhении s ispol'zovaniem strukturnoy modeli // Vestnik NGU im. N.I. Lobachevskogo. – 2013, №4(1). S.173...179.

8. Merkulov S.I., Esipov S.M. Prochnost' i deformativnost' kompozitnogo materiala na osnove uglerodnoy fibry pri odnoosnom rastyazhenii // Vestnik Belgorodskogo gos. technolog. un-ta im. V.G. Shukhova. – 2016, № 11. S. 69...73.

9. Merkulov S.I., Esipov S.M. Vliyanie skorosti i rezhima nagruzheniya na prochnost' i zhestkost' armirovannykh ugleplastikov // Vestnik Belgorodskogo gos. technolog. un-ta im. V.G. Shukhova. – 2017, № 1. S.52...56.

10. Rimshin V.I., Galubka A.I., Sinyutin A.V. Inzhenernyy metod rascheta usileniya zhelezobetonnykh plit pokrytiya kompozitnoy armaturoy // Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya. – 2014, №3. S. 218...220.

11. SP 164.1325800.2014. Usilenie zhelezobetonnykh konstruksiy kompozitnymi materialami. Pravila proektirovaniya. Data vvedeniya 09.01.2014.

12. Yushin A.V., Morozov V.I. Eksperimental'nye issledovaniya dvukh proletnykh zhelezobetonnykh balok, usilennykh kompozitnymi materialami po naklonnomu secheniyu // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. – 2014, № 5 (46). S. 77...84.

13. Podol'skiy P.P., Mikhub Akhmad. O programme issledovaniy izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh razlichnymi vidami kompozitnykh materialov // Sb. nauchn. tr.: Stroitel'stvo-2012. – Ростов n/D, 2012. S. 51...52.

14. Merkulov S.I., Esipov S.M. Eksperimental'nye issledovaniya stsepleniya vneshney kompozitnoy nemetallicheskoj armatury s betonom // Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i resheniya. – 2017, №1. S. 93...97.

Рекомендована кафедрой промышленного и гражданского строительства Курского гос. ун-та. Поступила 28.05.19.