Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и тоннелей

УДК 69.07

© В. А. Шендрик, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: vicinshendrik@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-5-131-136

© V. A. Shendrik, post-graduate student
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: vicinshendrik@yandex.ru

ИСПЫТАНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ОБОЛОЧЕК В СВЕТЕ ИХ ДАЛЬНЕЙШЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В СТОЙКАХ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

EXPERIMENTS WITH GLASS FIBER REINFORCED PLASTIC TUBES IN ORDER TO USE COMPOSITES IN THE COLUMNS OF THE BRIDGES PIERS IN THE FUTURE

Рассматривается возможность применения зарекомендовавших себя композиционных материалов в мостостроении. Перечислены имеющиеся качества композитов, полезные для данной отрасли. Предполагается использование оболочек из композиционных материалов и железобетона для создания гибридных конструкций стоек опор мостовых сооружений. Названы основные проблемы, сдерживающие широкое применение композитов в мостовых сооружениях, и предложения для решения. Для этого были проведены испытания оболочек из композитного материала — стекловолокна — на вертикальную нагрузку, боковую нагрузку (изгиб) и кручение, и приведены их результаты.

Ключевые слова: композиционные материалы, опоры мостовых сооружений, экспериментальные исследования.

The article presents the results of researching the possibilities of composite materials acknowledged to possess high qualities in bridge construction. The properties of composites are listed that are suitable for bridge construction. The author proposes using pipes made of composite materials and reinforced concrete for creation of hybrid structures of the columns for the piers of bridges. The main problems hindering the wide range use of composites in bridge structures are indicated and suggestions for solving these problems are offered. For this purpose, vertical load, lateral load (bending) and torsion load tests were carried out with tubes of composite material. The results of the experiment are submitted in the article.

Keywords: composite materials, bridges piers, experimental investigation.

Композиционные материалы, или композиты, в последнее время постепенно увеличивают свою долю в общем объеме всех материалов, применяемых в строительстве. Ученые заявляют, что традиционные металлические и неметаллические материалы в значительной мере достигли предела своей конструктивной прочности [1]. В настоящее время композиты частично замещают традиционно применяемые железобетон и металл в объектах, где их свойства обеспечивают более рациональную и выгодную эксплуатацию. Первоначально инновационные композиционные материалы в основном при-

менялись в аэрокосмической промышленности благодаря достаточной прочности и легкости, однако их массовому развитию препятствовала значительная дороговизна [2]. Спектр композиционных материалов разнообразен. Ими могут называться любые многокомпонентные материалы, от углепластиков до изделий древности из глины с добавлением соломы, однако в данной статье речь пойдет об изделиях из стеклопластика: композитах из стекловолокна с применением эпоксидного или полиэфирного связующего. Такие материалы в разы дешевле своих углепластиковых конкурентов, к тому же обладают опреде-

ленной прочностью, коррозионной стойкостью и рядом других положительных характеристик, которые позволяют сделать вывод о более широком их применении в строительстве, в том числе и мостостроении [3].

Постепенно модернизируя производство композитов и повышая объемы их изготовления, удалось добиться приближения стоимости их производства к стоимости традиционных материалов, а иногда и уравнивать данный показатель. Наиболее привлекательными свойствами композиционных материалов являются небольшая удельная плотность, высокая прочность и износостойкость, хорошие декоративные свойства, устойчивость к агрессивным средам [4].

Мостовые сооружения не только служат для преодоления препятствия в точке их местоположения, но и входят в комплекс транспортной артерии, поддерживая работоспособность целых автомобильных магистралей, на которых они находятся. Вследствие этого мостовые сооружения требуют к себе повышенного внимания. Поэтому желание улучшить надежность, повысить живучесть и добавить декоративности мостовым сооружениям с помощью включения в их конструкцию композиционных материалов вполне справедливо. Основными сдерживающими факторами для реализации этого являются отсутствие методик расчетов конструктивных элементов искусственных сооружений из композиционных материалов и, как следствие, недостаточное развитие нормативной базы [5, 6].

Степень изученности композиционных материалов позволяет решить первую из вышеупомянутых проблем. Данные материалы уже применялись в аэрокосмической отрасли, их изучение и дальнейшее внедрение было одним из основных направлений экономического развития нашей [7] и других стран в последние несколько десятилетий [8]. Однако для обоснования известных расчетных аппаратов с целью применения композиционных материалов в мостостроении необходима их эмпирическая проверка. Причем изначально в целях планируемого эксперимента следовало бы сделать акцент именно на нагрузки, которые испытывают конструктивные элементы мостовых сооружений, что позволит создать условия, максимально приближенные к реальным, поскольку изготов-

ление композита — индивидуальный процесс, в котором материал и конструкция создаются одновременно [9], с заранее определенными свойствами.

Экспериментальные исследования физических характеристик стеклопластиков были проведены автором в лаборатории исследования прочности материалов № 40 СПбГАСУ. Цель эксперимента заключалась в подтверждении возможности реального внедрения изделий из композитных материалов в конструкцию опор мостовых сооружений. Конструкции опор характеризуются крупными габаритами, в то же время имеющиеся испытательные машины имеют ограничения по размерам и величине воздействия. Исходя из этого проводились модельные исследования изделий из композитов. Испытаниям подвергались изделия в виде композитных оболочек из стекловолокна. Были выбраны несколько видов стекловолокна принципиально одного типа производства, но несколько отличающиеся сырьем и технологическим методом получения изделий. Неоднократно отмечалось, что композитные материалы наиболее рационально работают в гибридных конструкциях совместно с прочими традиционно применяемыми материалами, показывая высокие прочностные характеристики [10, 11]. Замысел конструктивного решения заключался во включении композитных оболочек в совместную работу со стойками опор, создавая тем самым единую гибридную конструкцию. В этом случае композитная оболочка выполняет функции:

- внешнего армирования и усиления прочностных характеристик;
- защиты от агрессивных воздействий внешней среды;
- добавления эстетических качеств.

Испытания проводились последовательно в три этапа: первый этап включал опыты на воздействие вертикальной нагрузки на композитную оболочку, второй — на изгиб (или боковую нагрузку в горизонтальном направлении), третий этап — на воздействие кручения. Последний вид воздействий не протекает явно при работе стоек опор, но, несмотря на это, исследовался как один из типичных видов нагрузки на балку или стержень для понимания характера работы материала. Внешний диаметр оболочек состав-

лял 100...110 мм, толщина стенки различных видов образцов варьировалась от 3,5 до 5 мм.

Первый этап испытаний состоял из четырех серий, в каждой из которых вертикальной нагрузке подвергались образцы разной высоты одного сечения. Нагрузка создавалась испытательной машиной INSTRON W-5196 с максимальным усилием 600 кН. С целью обеспечения центрального приложения нагрузки выполнялась горизонтальная нивелировка верхней и нижней площадок привода электронными уровнями. Кромки образцов также были выровнены по одной плоскости и зачищены от неровностей с помощью автоматического токарного оборудования. Образец — композиционная оболочка — устанавливался в пресс, нагружался до плотного сжатия в машине, проверялась ровность его положения, затем запускалась автоматизированная программа испытательной машины, позволяющая задавать параметры нагружения. Интервал между шагами нагружения был задан 500 кг, а после достижения 2500 кг — уже 1 т. По мере достижения очередного шага машина автоматически ставилась на паузу, равную 10 с. Испытание продолжалось до разрушения образца.

Для измерения напряжений на разных участках композитных материалов применялись тензорезисторы, которые устанавливались по горизонтали и вертикали в верхнем, среднем и нижнем поясах оболочек, а также по окружности испытываемого образца. Схема расположения тензорезисторов представлена на рис. 1.

Максимальная нагрузка от агрегата при испытаниях составила 347,75 кН, среднее [12] значение — 164,4 кН. Чем ближе к стадии разрушения образца, тем чаще раздается его потрескивание, а непосредственно перед разрушением оно становится непрерывным. Таким образом, нагрузка перераспределяется между слоями композита в местах концентрации напряжений. После характерного разрыва, сопровождаемого очень громким хлопком, несущая способность падает на порядок, но не до нуля. После этого происходит некоторое увеличение несущей способности, однако оно не достигает даже половины от первоначально достигнутой максимальной несущей способности. В зависимости от составляющих стекловолокна характер разрушения образца может варьироваться либо в сторону хрупкости,

либо в сторону пластичности. При этом хрупкие образцы, как правило, показывают большую прочность при первоначальном приложении нагрузки, но в дальнейшем прочность таких образцов резко снижается, а более пластичные образцы являются менее прочными, однако и дальнейшее уменьшение прочности таких образцов происходит более плавно и предсказуемо. Наибольшие напряжения были зафиксированы в показаниях вертикальных датчиков, что показано на рис. 2.

Второй этап испытаний проводился в три серии, в которых различные виды композитных образцов подвергались изгибающему воздействию. Диаметры и толщины стенок образцов такие же, как у образцов первого этапа. Возможности

Рис. 1. Схемы вариантов установки тензорезисторов на образцы композитных оболочек при испытаниях на вертикальную нагрузку

Рис. 2. Принципиальный график зависимости напряжений на горизонтальных и вертикальных тензодатчиках от вертикальной нагрузки

установить образцы вертикально и осуществлять давление сбоку не было, поэтому образцы помещались горизонтально, а давление привода на установленный образец было направлено сверху вниз. Силой тяжести было решено пренебречь ввиду малого веса композитных оболочек. Опыты проводились на машине испытательной универсальной УТ-05-2000 с максимальным усилием до 2000 кН, которая имеет мощную станину с двумя крепежными передвижными платформами. Для крепления оболочек круглого сечения была специально сконструирована и изготовлена металлическая крепежная оснастка. На образцы устанавливались тензодатчики вдоль и поперек продольной оси образца. С целью предотвращения сколов в месте давления привода испытательной машины, образец заносился под площадку привода на 100 мм, как показано на рис. 3.

После закрепления образец немного нагружали (до 0,1 кН), снимали начальные показания. Далее нагрузка постепенно повышалась, агрегат продвигался по 0,5 см за минуту. Испытание также продолжалось до разрушения образца. Измерения показаний с датчиков производились каждые 30 с и продолжались после разрушения образца. В ходе эксперимента было установлено, что после разрушения образец теряет прочность на порядок, далее машина увеличивала нагрузку и образец ее выдерживал, но рост прочности не достигал и половины максимального значения при первом разрушении, происходил очередной межосевой сдвиг и прочность образца падала еще ниже. После трех таких обрывов опыт прекращался. На максимальной нагрузке образец прогибался вниз на $3/4 \dots 1/3$ от высоты своего сечения. Если при этом не достигать стадии разрушения образца и снять всю нагрузку, то он за несколько секунд возвращается в первоначаль-

Рис. 3. Схема закрепления образца в оснастке и места установки тензорезисторов на образцы композитных оболочек при испытаниях на боковую нагрузку (изгиб)

ное положение. Если нагрузку убрать после разрушения, образец также стремится вернуться в исходную форму, однако до конца этот процесс не происходит, так как появляются остаточные деформации. При испытаниях максимальная нагрузка от испытательной машины достигала 7,016 кН, средняя — 6,534 кН. Наибольшие напряжения были зафиксированы в показаниях датчиков, расположенных вдоль продольной оси образца, что отражено на рис. 4.

В ходе третьего этапа образцы двух видов подвергались кручению. Закрепленные в оснастке образцы с нулевой степенью свободы с одного конца с другого воспринимали кручение от динамометрического ключа. Ключ TorqueMasterTM 1000R приводился в действие вручную. Кручение производилось строго в одной плоскости. На ключе имеется шкала и механизм для установления требуемого усилия. Возможный диапазон задаваемых усилий 540...1380 Н·м. Усилия скручивания задавались от минимального до максимального пошагово с интервалом в 100 Н·м. После достижения соответствующего момента кручения (срабатывал специальный механизм в ключе) снимались показания с тензодатчиков. Затем значение усилия повышалось на 100 Н·м и т. д. Максимально возможный момент кручения достигался с трехкратным повтором, каждый раз считывались показания с тензорезисторов, время между измерениями составляло не менее 2 мин. В конце опыта снимались показания с образца в состоянии покоя, непосредственно сразу после снятия нагрузки, и после истечения 5 мин,

Рис. 4. Принципиальный график зависимости роста напряжений на поперечных и продольных оси образца тензодатчиках от увеличения боковой нагрузки (изгиба)

когда наступала стабилизация испытываемого образца. Принципиальный график зависимости изменения напряжений от увеличения крутящего усилия показан на рис. 5. Ни один из образцов не достиг стадии разрушения. Максимально зафиксированное напряжение на стенках материала составило 3972,93 кг/см².

Как уже упоминалось выше, для данных испытаний были выбраны несколько видов стекловолокна одного типа производства, но имеющих незначительные отличия по сырью и технологии получения. Один из видов образцов изготавливался методом косослойной продольно-поперечной намотки с полимерным связующим — он проявил относительно более пластичные свойства по характеру разрушения и несколько меньшую прочность, как и было описано выше. Максимальная прочность на вертикальное давление у этого вида композита составила 138,61 кН, на изгиб — 6,605 кН. Другой вид образцов изготавливался методом пултрузии из мультиаксиальных тканей с эпоксидным связующим — он был более хрупок, имел практически равные показатели при изгибе, но большие при вертикальном нагружении. Максимальная прочность на вертикальное давление у второго вида композита составила 347,75 кН, а на изгиб — 7,016 кН. Это подчеркивает одно из главных свойств композитных материалов и стекловолокна, в частности, что материал и конструкция создаются одновременно с необходимыми свойствами.

Композитные оболочки из стекловолокна проявили себя в данных испытаниях достаточно

Рис. 5. Принципиальный график зависимости роста напряжения на стенках материала от крутящего усилия

хорошо, продемонстрировав высокие физические характеристики. Результаты эксперимента помогут воспользоваться имеющимся теоретическим заделом при разработке методик расчета опор мостовых сооружений из композитных материалов, что позволит значительно расширить область применения композиционных материалов в мостостроении.

Библиографический список

1. Солнцев Ю. П., Пряхин Е. И. Материаловедение. Применение и выбор материалов: учебник для вузов. СПб.: Химиздат, 2007. С. 674–676.
2. Shendrik V., Kvitko A. Analysis of applicability of composite materials in supporting constructions of bridges // Architecture and Engineering. 2016. Vol. 1. Issue 3. P. 29–32.
3. Тентиев Ж. Т., Санжаровский Р. С. Прочность и устойчивость элементов композитных конструкций в условиях ползучести: учебник для вузов. Бишкек: Илим, 1997. С. 27–38.
4. Малбиев С. А., Горшков В. К., Разговоров П. Б. Полимеры в строительстве: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2008. С. 5–7.
5. Квитко А. В. Возможности применения композитных материалов при строительстве объектов транспортной инфраструктуры // Дорожная держава. 2014. № 56. С. 20–25.
6. Квитко А. В. Особенности применения композитов при строительстве объектов транспортной инфраструктуры // Дороги. Инновации в строительстве. 2014. № 42. С. 14–18.
7. Бондаренко В. М., Шагин А. Л. Расчет эффективных многокомпонентных конструкций. М.: Стройиздат, 1987. С. 4–18. (Курсом ускорения науч.-техн. прогресса).
8. Любин Дж., Геллер Б. Э. Справочник по композиционным материалам. Кн. 1. М.: Машиностроение, 1988. С. 179–182.
9. Арзамасов Б. Н. Материаловедение: учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. С. 21–32.
10. ElGawady M. Seismic behavior of self-centering precast segmental bridge bents // Journal of Bridge Engineering. Washington: State University, 2011. С. 471–478.
11. Алфутов Н. А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. М.: Машиностроение, 1978. С. 221–235.
12. Румишинский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента: справочное пособие. М.: Наука, 1971. С. 35.

References

1. Solntsev Yu. P., Pryakhin E. I. *Materialovedenie. Primenenie i vybor materialov. Uchebnik dlya vuzov* [Application and the selection of materials. Textbook for higher education institutions]. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2007, pp. 674–676.
2. Shendrik V., Kvitko A. Analysis of applicability of composite materials in supporting constructions of bridges. *Architecture and Engineering*, 2016, vol. 1, iss. 3, pp. 29–32.
3. Tentiev Zh. T., Sanzharovskiy R. S. *Prochnost' i ustoychivost' ehlementov kompozitnykh konstruksiy v usloviyakh polzuchesti. Uchebnik dlya vuzov* [Strength and stability of composite designs elements in conditions creep. Textbook for higher education institutions]. Bishkek, Ilim Publ., 1997, pp. 27–38.
4. Malbiev S. A., Gorshkov V. K., Razgovorov P. B. *Polimery v stroitel'stve. Uchebnik dlya vuzov* [Polymers in construction. Textbook for higher education institutions]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2008, pp. 5–7.
5. Kvitko A. V. *Vozmozhnosti primeneniya kompozitnykh materialov pri stroitel'stve ob'ektov transportnoy infrastruktury* [Possibilities of using composite materials at construction of transport infrastructure facilities]. *Dorozhnaya derzhava – Road Empire*, 2014, no. 56, pp. 20–25.
6. Kvitko A. V. *Osobennosti primeneniya kompozitov pri stroitel'stve ob'ektov transportnoy infrastruktury* [Features of composites' application at construction of transport infrastructure facilities]. *Dorogi. Innovatsii v stroitel'stve – Roads. Innovations in construction*, 2014, no. 42, pp. 14–18.
7. Bondarenko V. M., Shagin A. L. *Raschet ehffektivnykh mnogokomponentnykh konstruksiy* [Calculation of effective multi-component designs]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1987, pp. 4–18.
8. Lyubin Dzh., Geller B. Eh. *Spravochnik po kompozitsionnym materialam (Kn. 1)* [Reference book on composite materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, pp. 179–182.
9. Arzamasov B. N. *Materialovedenie. Uchebnik dlya vuzov*. [Materials science. Textbook for higher education institutions]. Moscow, MSTU Publ., 2008, pp. 21–32.
10. El Gawady M. Seismic behavior of self-centering precast segmental bridge bents. *Journal of Bridge Engineering*, Washington, State University Publ., 2011, pp. 471–478.
11. Alfutov N. A. *Osnovy rascheta na ustoychivost' uprugikh system* [Calculation bases on stability of elastic systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, pp. 221–235.
12. Rumshinskiy L. Z. *Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov ehksperimenta: spravochnoe posobie* [Mathematical processing of experiment results. Reference book]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 35 p.