

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-2\(25\)-5-11](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-2(25)-5-11)
УДК 624.011.78

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ

APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS FOR INDUSTRIAL STRUCTURES

В. Е. БАТРАК, канд. техн. наук

В настоящее время расширяется применение композитных материалов в строительстве. Однако имеются только единичные примеры применения композитных материалов для крупногабаритных промышленных сооружений. Сдерживает применение композитов их существенно более высокая стоимость по сравнению с традиционными строительными материалами. Однако в последнее время ввиду совершенствования технологии переработки композитов удалось существенно снизить стоимость некоторых из них, в частности, пултрузионных стеклопластиков. Установлена эффективность применения такого стеклопластика для кабельных эстакад промышленных сооружений. Показано, что расчет элемента кабельной эстакады рационально проводить в вероятностной постановке.

Currently, the use of composite materials in construction is expanding. However, there are only isolated examples of the use of composite materials for large-scale industrial structures. The use of composites is hindered by their significantly higher cost compared to traditional building materials. However, recently, due to the improvement of the processing technology of composites, it has been possible to significantly reduce the cost of some of them, in particular pultrusion fibreglass. The efficiency of using pultrusion fibreglass for cable trestles of industrial structures has been established. It is shown that the calculation of the cable overpass element is rational in the probabilistic setting.

Ключевые слова:

Конструкционные стеклопластики, проектирование и расчёт, промышленные сооружения, элементы кабельных эстакад

Key words:

Design and calculation, elements of cable overpasses, industrial structures, structural fibreglass

Композитные конструкции для промышленного строительства

Композитный материал – это неоднородный сплошной материал из двух или более компонентов с четкой разницей между ними. Самый простой пример – обычная клееная фанера. Два или более неоднородных материала используют вместе, чтобы создать новый уни-

кальный материал или же улучшить характеристики одного из них. Первое использование этого метода относится к XVI веку до нашей эры, когда в Египте и в Месопотамии начали использовать глину и солому для возведения зданий. Также солому вносили в составы для укрепления керамических изделий и лодок.

Следующее принципиально новое массовое применение композитов произошло в XIII веке нашей эры, когда монголы создали первый композитный лук из таких материалов как древесина, кость и животный клей. Монгольский лук делали обычно из нескольких слоев древесины (это, в основном, была береза), которые склеивали с помощью животного клея.

В XX веке началось массовое применение композитов в различных областях техники, прежде всего — в электротехнической промышленности, авиации, космонавтике, судостроении и оборонной промышленности.

В строительстве широкое применение композитов сдерживается, в основном, их существенно более высокой стоимостью по сравнению с традиционными строительными материалами. В то же время имеются примеры довольно широкого применения стеклопластиковой арматуры для армирования железобетонных конструкций в средне- и высокоагрессивных средах, где существенно более высокая стоимость стеклопластиковой арматуры по сравнению со стальной и снижение прочности во времени оправдываются её исключительно высокой коррозионной стойкостью. Имеется также опыт применения композитных материалов для шпунтовых ограждений котлованов и траншей в грунтах, считающихся коррозионными. В этом случае, так же как и для стеклопластиковой арматуры железобетонных конструкций, более высокая стоимость шпунтов по сравнению с металлическими шпунтами оправдывается их отличными противокоррозионными свойствами.

До последнего времени имеются лишь единичные примеры применения композитных материалов для крупногабаритных промышленных сооружений. Одно из них – башня для размещения электротехнического оборудования на площадке для проверки молниепоражаемости различных образцов техники в г. Истра Московской области [1]. Самое высокое сооружение площадки имеет высоту около 42 м. Несущие наклонные решетчатые конструкции выполнены из стеклоэпоксидных труб, поэтажные горизонтальные площадки – из стеклотекстолита. Диаметр поэтажных площадок составляет около 3 м. Расчёт сооружения на динамические воздействия и испытания несущих элементов башен выполнил ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. На другой башне площадки аналогичной конструкции высотой 25 м дополнительно к несущим конструкциям из стеклопластика выполнено стеновое ограждение из панелей со стеклопластиковыми обшивками и эффективным утеплителем из пенополиуретана. Разработка и изготовление панелей производились в ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко.

У ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко имеется также опыт применения в Подмоскowie радио-прозрачного покрытия со стеклопластиковыми обшивками пониженной горючести и эффективным утеплителем из пенополиуретана площадью более 500 м².

Все перечисленные объекты позволили накопить значительный опыт разработки и применения композитных конструкций для промышленных сооружений, однако следует отметить, что перечисленные сооружения с применением композитов создавались только в единичных экземплярах, без «тиражирования» уникальных конструкций и опыта их применения.

В настоящее время вследствие совершенствования технологии переработки композитов удалось существенно снизить стоимость одного из широко применяемых композитных материалов — пултрузионного стеклопластика. В г. Елабуге Республики Татарстан на основе современной технологии из пултрузионного стеклопластика освоено производство различных профилей для строительства. По заказу ПАО «Татнефть» ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко подготовил рекомендации по расчёту и проектированию строительных конструкций из пултрузионных стеклопластиковых профилей; разработаны первые в России специальные технические условия (СТУ) по применению композитных конструкций для кабельных эстакад промышленных сооружений. На основе СТУ институтом ООО «Ленгипронефтехим» были запроектированы крупногабаритные кабельные эстакады на новом производстве – нефтехимическом заводе Нижнекамскнефтехим в г. Нижнекамске Республики Татарстан. Завод в Нефтекамске с кабельными эстакадами из пултрузионных профилей был запущен в 2018 г., однако даже незначительный опыт применения композитных профилей свидетельствует об эффективности их применения для крупногабаритных промышленных сооружений.

Следует отметить, что расчет и проектирование конструкций из композитных материалов имеет свои особенности. Традиционные материалы, которые в обоснованных случаях заменяют композиты — сталь и алюминий, — разделяются по маркам, для каждой из которых нормированы физико-механические свойства независимо от завода-изготовителя. Композитные же материалы даже при одинаковой технологии очень чувствительны к изменению сырья для их изготовления и других технологических параметров. Даже на одном стабильном производстве характеристики материала могут иметь существенные различия физико-механических характеристик. Поэтому для конструкций из композитных материалов особое значение приобретают статистическая оценка их свойств, расчеты конструкций с применением методов теории вероятностей.

Применительно к несущим ферменным конструкциям кабельных эстакад актуальной являлась задача оценивания несущей способности элементов ферменных конструкций через вероятность отказа. Следует отметить, что методика оценки несущей способности конструкций на этой основе приведена во многих зарубежных нормах. В России также опубликованы многочисленные исследования по методам оценки вероятности отказа различных строительных конструкций, однако до настоящего времени эти методы не получили широкого применения в российских нормативных документах.

В настоящей статье показано применение метода оценки вероятности отказа конструкции на простом примере растянутого элемента из композитного материала — раскоса ферменной конструкции эстакады для электрических кабелей.

Первоначально изучались кратковременные механические характеристики композитного материала с полимерной матрицей — однонаправленного стеклопластика, вырабатываемого на основе ненасыщенных смол, минеральных наполнителей и стекловолоконистых армирующих материалов методом пултрузии под торговым названием FiberPull, при действии постоянной нагрузки вдоль направления армирования материала.

Образцы композитного материала для эксперимента вырезали из стеклопластиковой прямоугольной трубы FT 40×25×3×3, изготавливаемой из материала FiberPull. Плотность образцов материала составляла в среднем 1,84 г/см³.

Для образцов композитного материала первоначально определяли прочность образцов материала при кратковременном растяжении. Испытания на растяжение проводили в соответствии с [2]. Для испытаний вдоль направления армирования были использованы образцы типа А.

Испытания проводили на немецкой универсальной испытательной машине FP 100/1, обеспечивающей измерение нагрузки с точностью 1 % измеряемой величины нагрузки. Скорость нагружения образцов при испытании вдоль направления армирования составляла 2 мм/мин.

Результаты кратковременных испытаний 36 образцов стеклопластика при растяжении представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты кратковременных испытаний образцов композитного материала при растяжении вдоль армирования

| Среднее значение, МПа | Медиана, МПа | Мода, наименьшая, МПа | Коэффициент вариации, % | Асимметрия | Экссесс |
|-----------------------|--------------|-----------------------|-------------------------|------------|---------|
| 504,8 | 508,21 | 430,6 | 15,8 | -0,350 | 0,158 |

Сравнение экспериментального распределения прочности образцов композитного материала с нормальным распределением использовался критерий Колмогорова – Смирнова для одной выборки. Метод заключался в сравнении эмпирического (наблюдаемого) распределения накопленных частот выборки с теоретическим (ожидаемым) распределением накопленных частот. Результаты сравнения приведены в табл. 2

Таблица 2

Сравнение экспериментального распределения прочности образцов композитного материала с нормальным распределением

| Количество образцов, шт. | Среднее значение, МПа | Стандартное отклонение, МПа | Значение Z критерия | Уровень значимости Z значения |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------------------|
| 36 | 504,8 | 79,6 | 0,753 | 0,621 |

Уровень значимости Z- значения критерия Колмогорова – Смирнова равен 0,621. Это означает, что распределение значений прочности композита при растяжении вдоль волокон статистически не отличается от нормального.

Результаты оценки длительной прочности 10 образцов материала при растяжении приведены в работе [3]. В результате длительных испытаний установлено, что особенностью композитного материала на полимерной основе является свойство заметного снижения прочности во времени под действием нагрузки.

При проектировании размеры поперечных сечений и материал конструкции должны быть выбраны таким образом, чтобы за всё время службы несущей конструкции сопротивление R было с высокой вероятностью больше нагрузки S :

$$Z = R - S \geq 0.$$

Разность $R - S$ называется резервом прочности Z . В состоянии безотказной работы эта величина положительная. При этом влияние случайных факторов нагрузки и прочности на безопасность конструкции может быть установлено только методами математической статистики и теории вероятностей.

Для практического использования приходится, однако, упрощать все зависимости. В нормах случайные влияния учитываются так называемыми элементами безопасности – нормативными значениями и коэффициентами запаса или частными коэффициентами надежности.

Для оценки безопасности конструкции в нормах введено понятие предельного состояния — такого, при переходе за которое конструкция или сооружение перестают соответствовать поставленным требованиям [4].

Предельные состояния могут быть отнесены к конструкции в целом либо к отдельным элементам или поперечным сечениям и основаниям конструкции.

В методе предельных состояний при решении уравнения предельного состояния вводятся частные коэффициенты надёжности, которые учитывают изменчивость нагрузок, прочности и другие факторы при расчёте. Некоторые из коэффициентов надёжности вводятся в виде множителей к нормативным значениям, а некоторые, — в виде делителей.

Для более тщательной оценки безопасности конструкции или сооружения вводится понятие вероятности их отказа.

Вероятность отказа, или вероятность выхода из строя $P_f = P(V)$ есть вероятность того, что в рассматриваемое время будет превзойдено предельное состояние и таким образом будет достигнуто состояние отказа V . Вероятность безотказной работы, или вероятность выживания $P_s = P(\bar{V})$ есть вероятность того, что за время t не будет выхода за предельное состояние.

Для количественных оценок предполагается также, что существует механическая модель, в которой возможно описание предельного состояния с помощью уравнений или алгоритма в зависимости от величин, допускающих их прямое измерение или наблюдение.

Эта величины в теории надежности несущих конструкций называются базисными переменными X_i . Большей частью базисные переменные являются случайными числами, иногда — стохастическими процессами, для которых может быть собрана статистическая информация. К ним относятся нагрузки, свойства материалов и грунтов и геометрические размеры.

В настоящее время общепризнано, что вероятность безотказной работы или индекс надёжности β конструкции являются теми показателями, которые позволяют более объективно по сравнению с методом предельных состояний оценивать проектное решение.

Рассмотрим несущую способность ферменного раскоса кабельной эстакады под действием постоянной нагрузки, где уравнение предельного состояния содержит только одну случайную величину – прочность композита при растяжении.

Если механическая модель содержит только одну случайную величину – базисную переменную X_i , то пространство базисных переменных сводится к оси x . Ось x делится уравнением предельного состояния $g(x)=0$ на две области, а вероятность отказа $P_f = \int_{g(x)<0} f_x(x) dx$ представляет собой площадь под кривой плотности распределения для области, где функция $g(x)$ отрицательна.

Если обозначить через g^{-1} функцию, обратную к $g(x)$, и $g(x)$ является монотонно возрастающей функцией, то

$$P_f = \int f_x(x) dx = \int_{-\infty}^{g^{-1}(0)} f_x(x) dx = F_x[g^{-1}(0)]$$

при $x < g^{-1}(0)$

где F_x – функция распределения x

Обозначим единственную случайную величину прочности композита на растяжение индексом X . Уравнение предельного состояния по исчерпанию несущей способности растянутого раскоса под действием только одной постоянной нагрузки имеет вид

$$g = X - N/F = 0,$$

где N – постоянное растягивающее усилие в раскосе;

F – площадь сечения раскоса,

причем g монотонно возрастает с увеличением x . Параметр $g=0$ при $x = N/F$.

По выражению $P_f = F_x(N/F)$ можно найти вероятность отказа раскоса.

При усилии в раскосе 300 МПа вероятность его отказа равна

$$P_f = \Phi\left(\frac{N/F - m_x}{\sigma_x}\right) = \Phi\left(\frac{300 - 505}{80}\right) = \Phi(-2,562) = 0,520 * 10^{-2}.$$

Если в выражение для вероятности отказа подставить уменьшенную прочность композита через примерно 3 месяца после экспонирования раскоса под нагрузкой, то получим

$$P_f = \Phi\left(\frac{N/F - m_x}{\sigma_x}\right) = \Phi\left(\frac{300 - 450}{80}\right) = \Phi(-1,875) = 0,304 * 10^{-1}.$$

Следовательно, при сравнительно небольшом уменьшении прочности композита за 3 месяца экспонирования под нагрузкой вероятность отказа композитного раскоса увеличивается более чем в 5 раз, а индекс надёжности, естественно, значительно снижается.

При действии на раскос случайной нагрузки, распределённой по нормальному закону, выражение для вероятности отказа раскоса также можно получить в замкнутом виде.

При действии случайной нагрузки, распределённой по другому закону, вероятность отказа может быть получена с использованием численных методов интегрирования интеграла вероятности.

Выводы

1. Проведен анализ опыта применения в России композитных материалов для создания крупногабаритных промышленных сооружений.

2. Отмечено, что оценка безопасности для конструкций из композитных материалов особенно актуальна через вероятность отказа.

3. На примере раскоса крупногабаритной ферменной конструкции кабельных эстакад показано, что временной фактор оказывает существенное влияние на изменение вероятности отказа конструкции.

Библиографический список

1. Батрак В.Е., Кондакова Т.В., Оснач Р.Г., Чернов Е.Н. Применение стеклоэпоксидных труб для несущих конструкций генераторов импульсных напряжений и токов // Электротехника. 1989. № 9. С. 65-68.

2. ГОСТ 32656-2014. Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение.

3. Батрак В. Е., Бобряшов В. М. Влияние нагруженности на долговечность конструктивных стеклопластиков // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2018. № 7-8. С. 41-43.

4. ГОСТ 27751-2014. Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения.

Автор

Владимир Евгеньевич БАТРАК, канд. техн. наук, заведующий лабораторией легких конструкций и теплоизоляционных материалов ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Vladimir BATRAK, Ph.D. (Engineering), Head of the Laboratory of Lightweight Constructions and Heat Insulation TSNIISK named after V. A. Koucherenko JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: batrakve@yandex.ru

тел.: +7 (499) 174-73-28