

ЛАЗАРЕВ А. Л., ПОЛТОРАЦКИЙ Д. М., ТАНЯКИН И. А.
ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВНЕШНЕГО
АРМИРОВАНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ
ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Изложены основные принципы метода расчета функционально-градиентных композиционных материалов с покрытием. Приведен пример прогнозирования свойств армированного углеродным волокном композита, выполненный методом расчета функционально-градиентных материалов с учетом выравнивания напряжений в прослойке.

Ключевые слова: прогнозирование свойств, расчет, функционально-градиентные композиционные материалы, углеродное волокно.

LAZAREV A. L., POLTORATSKY D. M., TANYAKIN I. A.
PRACTICAL IMPLEMENTATION OF METHODS FOR DESIGNING
EXTERNAL REINFORCEMENT OF WOODEN ELEMENTS BASED
ON FUNCTIONALLY GRADIENT COMPOSITE MATERIALS

Abstract. The basic principles of the method for calculating functionally gradient composite materials with coating are described. An example of predicting the properties of a carbon fiber-reinforced composite is provided. The predicting is performed by calculating functionally gradient materials considering stress equalization in the interlayer.

Keywords: prediction of properties, calculation, functionally gradient composite materials, carbon fiber.

Современные технологии предъявляют к конструктивным материалам повышенные функциональные требования. Высокая прочность, жесткость, сопротивляемость химическим, биологическим, физическим, атмосферным воздействиям – это далеко не полный перечень функциональных требований, которым должны отвечать современные композиты, свойства которых в изделии изменяются по объему или высоте поперечного сечения в соответствии с функциональными требованиями.

Существует множество способов получения композитов с заданным распределением свойств. Наиболее перспективными являются слоистые композиты. Большой интерес к слоистым композитам объясняется тем, что в результате возрастает прочность материала, увеличивается его долговечность, а также возникают особые свойства, недостижимые для обычного материала.

Применительно к деревянным конструкциям слоистыми считаются армированные элементы. Необходимость применения арматуры для деревянных конструкций обусловлена рядом причин:

- изменение эксплуатационного режима и нагрузок на конструкции;
- возникновение эксплуатационных дефектов;
- реконструкция и изменение конструктивной схемы и расчетных схем элементов;
- использование при изготовлении сращенных элементов из более низких сортов древесины;
- дефекты при изготовлении клееных конструкций.

В качестве арматуры применяются стальные стержни, листовые элементы, стеклопластиковая арматура и другие материалы.

Известно, что стальные армирующие стержни дают приращение несущей способности деревянных балок в два раза по сравнению с клеенощатыми и в три раза выше, чем у балок составного сечения на податливых связях. Также уменьшается прогиб при эксплуатационных нагрузках.

Известен и способ армирования деревянных балок как стальной, так и стеклопластиковой арматурой [1]. При этом для стальной арматуры определены основополагающие правила конструирования деревянных балок:

- поперечное сечение балок прямоугольное с постоянной высотой, либо двутаврового или коробчатого сечения;
- соотношение длины балки к ее ширине в пределах от 15 до 20;
- рекомендуется выполнять сечение в сжатой и растянутой зоне.

При решении проблемы армирования деревянных конструкций проектировщики сталкиваются с решением ряда вопросов:

- закрепление арматуры в балке;
- выбор схемы армирования (с точки зрения оптимального количества, размеров и размещения армирующих элементов, прогноз увеличения прочности и стоимость армированных элементов);
- разработка программного комплекса расчета армированных элементов;
- размещение арматуры в массиве элемента для обеспечения, в том числе, эстетических требований;
- обеспечение совместной работы армирующего и основного элемента.

В настоящее время широкое применение нашла арматура на основе углеродного волокна. Углеволокно – высокопрочный, высокомодульный, линейно упругий материал. Он применяется в виде холстов, а также лент. Усиление углепластиком относят к внешнему

армированию, поскольку материалы крепятся на конструкции с помощью монтажного клея (эпоксидного, эпоксиполиуретанового или полимерцементного).

Быстрота и легкость монтажа элементов внешнего армирования из углеволокна является основным преимуществом описываемого способа армирования. Кроме того, внешнее армирование не искажает эстетический облик конструкции, при этом процесс усиления становится значительно проще, чем традиционные технологии.

Углехолсты эффективны на участках, где действуют главные растягивающие напряжения и имеется опасность раскалывания вдоль волокон. Также целесообразно их приклеивание на гибкие фанерные стенки в зоне действия поперечной силы. Эти элементы внешнего армирования обычно либо приклеиваются к поверхности, либо вклеиваются в предварительно подготовленные пропилы. Пропилы предпочтительно делать вертикальными для минимального нарушения целостности сечения.

Вариант с установкой арматуры в пропилы предпочтителен, когда необходимо сохранить первоначальный вид балок и сделать незаметным само усиление.

Незаметность наряду с технологической простотой и высокой скоростью монтажа относят к основным преимуществам армирования деревянных конструкций из углеволоконных элементов.

Технология изготовления покрытия оказывает значительное влияние на работу изделия в процессе эксплуатации. Распределение упругих свойств по сечению основного материала и покрытия могут иметь дискретный или градиентный характер, что должно отражаться на методах расчета элементов с покрытием.

В литературе описан ряд методов расчета слоистых композитов на силовые воздействия различными методами [2–4]. Для элемента с дискретным характером распределения свойств по высоте сечения применима модель составного стержня.

При рассмотрении элементов с покрытием методом составного стержня, структура материала моделируется стержневой системой, в которой составляющие стержни соединены равномерно распределенными по длине связями сдвига и поперечными связями. Структуру функционально-градиентного материала (ФГКМ) можно условно представить слоистой. Можно предположить, что поперечное сечение элемента ФГКМ состоит из слоев, соединенных по всей длине. Материал отдельных слоев представим практически однородным. Составляющие стержни соединяются между собой связями.

Во многих случаях податливостью поперечных связей можно пренебрегать. Во время работы составного стержня, состоящего из $n + 1$ отдельных стержней, в связях сдвига каждого шва возникают усилия T , являющиеся функциями координаты x .

Суммарные сдвигающие усилия в T_i — m шве в сечении x определяются по формуле

$$T_i = \int_0^x \tau_i dx. \quad (1)$$

С учетом этих усилий формулы для определения полного изгибающего момента в системе будут иметь следующий вид:

$$M = M^0 + \sum_{i=1}^{N+1} M_i^r = M_0 - \sum_{i=1}^n T_i u_i - \sum_{i=1}^n T_i v_i = M^0 - \sum_{i=1}^n T_i \omega_i, \quad (2)$$

где M^0 – суммарный изгибающий момент, равный сумме моментов, возникающих в каждом отдельном стержне от действия нагрузки без учета усилий, передающихся от поперечных связей и связей сдвига; ω_i – расстояние между центрами тяжести сечений двух смежных стержней разделенных i -м швом.

Внутренний момент в том же стержне равен полному моменту M , умноженному на отношение $E_i J_i / (\sum E J)$:

$$M_i = \frac{M^0}{\sum E_i J_i} E_i J_i - \sum_{j=1}^n T_j \omega_j \frac{E_i J_i}{\sum E_i J_i}.$$

Нормальные напряжения определяются по формуле

$$\sigma_x = \frac{N_i}{F_i} + \frac{M_i z_i}{J_i},$$

где z_i – расстояние от центра тяжести i -го стержня до рассматриваемого волокна.

Эпюра продольных напряжений в составном стержне получается ступенчатой, но с одинаковым наклоном к вертикали во всех стержнях.

Скачки в эпюре продольных напряжений в каждом шве равны $M \omega_i / (\sum E J)$. Данный метод удобен для моделирования ФГКМ при использовании дискретного распределения свойств по высоте поперечного сечения. В тех случаях, когда свойства материала по сечению изменяются равномерно, возможно применение методов механики сплошной среды.

Для конструкций с дискретным распределением свойств материала по высоте поперечного сечения расчет необходимо проводить с учетом нелинейного изменения нормальных напряжений в бетоне конструкционного слоя.

Нормальные напряжения в сечении определяют выражением

$$\sigma = \frac{N_i}{F_i} + \frac{4M_i}{bh^2 \int_{-1}^1 f(\eta) \eta d\eta} \quad (3)$$

(где N_i – осевая сила в каждом составляющем стержне; M_i – внутренний момент в том же стержне; F_i – площадь поперечного сечения i -го стержня);

с учетом формул

$$\sigma_x = kx f(\eta) \quad (4)$$

и

$$\int_{-b}^b \sigma_x y dy = M. \quad (5)$$

Внутренний момент в i -м стержне определен из выражения

$$M_i = \frac{M^0}{\sum EJ} E_i J_i - \sum_{i=1}^n T_i \omega_i \frac{E_i J_i}{\sum EJ}.$$

Здесь $\sum EJ$ и $E_i J_i$ рассчитываются по формулам

$$\sum EJ = (J_1 + J_2) \int_{h_2}^{h_1} E(y) dy, \quad (6)$$

$$E_i J_i = J_i \frac{\int_0^{h_i} E(y) dy}{h_i}. \quad (7)$$

Предполагаем, что сдвигающие усилия развиваются в промежуточном слое, соединяющем первый и второй стержни.

Модуль упругости $E_{\text{км}}$ композиционного материала можно оценить по следующей формуле:

$$E_{\text{км}} = E_1 \gamma_1 + E_2 \gamma_2,$$

где E_1, E_2 – модули упругости структур составляющих композит в каждом слое стержня; γ_1, γ_2 – объемное содержание.

При проектировании функционально-градиентных композитов с покрытием необходимо обеспечить надежную работу композита, покрытия и промежуточного слоя. Эффект от покрытия наблюдается лишь при его совместной работе с основным материалом, что говорит о необходимости уделять особое внимание при расчете таких конструкций возникающим в контактном слое напряжениям и отслоению покрытия. При работе изгибаемых изделий с покрытием в контактном слое возникают значительные сдвигающие напряжения. Они распределены по длине образца неравномерно и имеют максимальные значения на краях. Для того, чтобы обеспечить совместную работу элемента и покрытия, целесообразно снизить сдвигающие напряжения на краях слоя. Добиться этого можно путем изменения конструкции соединения и свойств прослойки.

Известно, что усилия на непрерывные связи соединительного слоя, работающие на сдвиг, передаются неравномерно. Перенапряженными являются крайние участки, где возникает опасность разрушения. Устранить это обстоятельство можно путем усложнения конструкции соединения (геометрии и деформативных свойств связей).

При рассмотрении образцов с покрытием мы имеем случай прикрепления упругой пластинки постоянного сечения к жесткому основанию через связующие прослойки.

Напряжения в прослойке являются функциями координат $\tau = \tau(z)$ и $\sigma = \sigma(x)$. Предполагая, что для достижения цели может потребоваться изменение по сечению толщины прослойки, зададим $h=h(x)$.

В работах [3; 5] предложены зависимости, определяющие характер изменения толщины клеевой прослойки и упругих свойств связевого материала по длине изгибаемого материала.

В первом случае, при $\frac{G_0}{G_\xi} = 1$, характер изменения толщины прослойки определяется формулой

$$\frac{h_\xi}{h_0} = f(\zeta) \cdot \left\{ 1 + \frac{G_0}{E} \cdot \frac{1}{b\delta} \cdot \frac{1}{h_0} \xi^2 \right\}. \quad (8)$$

Изменения толщины промежуточного слоя можно достичь, варьируя глубину проникания композита при нанесении покрытия.

Если же решение реализуется за счет изменения свойств соединительной прослойки, то мы имеем $\frac{h_\xi}{h_0} = 1$ и характер изменения деформационных параметров по формуле

$$\frac{G_0}{G_\xi} = \frac{1}{f(\zeta)} \left\{ 1 + \frac{G_0}{E} \cdot \frac{1}{\delta} \cdot \frac{1}{h_0} \xi^2 \right\}, \quad (9)$$

где $\zeta = z/l$; $\xi = x/l$ - безразмерные координаты; G_0 - модуль прослойки при $x=0$.

Реализация принципов проектирования функционально-градиентных покрытий проверялась испытанием нескольких серий изгибаемых деревянных балочек. Образцы имели различное соотношение высоты сечения к длине образцов от 1/15 до 1/30. Часть образцов была выполнена с однослойным покрытием равной толщины, другая – с изменением толщины, выполненным по принципам ФГКМ, рассчитанным по вышеприведенным формулам. Различалось также количество приклеиваемой арматуры.

В качестве материалов для изготовления испытательных образцов использовались:

- эпоксидная смола ЭД-20 представляет собой жидкий реакционноспособный олигомерный продукт на основе диглицидилового эфира дифенилолпропана;
- активный разбавитель Этал-1 – алифатическая трехфункциональная смола, применяется как модификатор и разбавитель эпоксидных смол и составов на их основе – клеев, мастик, герметиков, адгезивов и т.д.;
- нетоксичный отвердитель аминного типа Этал-45М, который рекомендован к применению при изготовлении антикоррозионных покрытий, изготовлении стеклопластиковых изделий методом контактного формования;
- однонаправленные углеродные ленты FibArm.

Нити однонаправленных углеродных лент FibArm составляют высококачественные углеродные волокна. В качестве утка используются высокопрочные стеклянные нити, получаемые путем высокотемпературного воздействия на органические вещества в инертной среде. Углеродная лента значительно превосходит по физико-механическим показателям традиционные материалы, например, изготовленные из стекловолокна, базальта, арамида.

Таблица 1

Результаты испытаний

№	Соотно- шение высота/ длина	Прочность при изгибе, МПа	Среднее по серии, МПа	Характер разрушения	Изменение толщины прослойки
KIV1	1/20	220,5	233,365	В середине пролета по нормальному сечению, без отслоения арматуры и ее разрыва	Один слой
KIV2		220,5			
KIV3		183,75			
KIV4		202,13		В середине пролета по нормальному сечению, с разрывом арматуры	
KIV5		229,69			
KIV6		266,44			
KIV7		268,28		В середине пролета по нормальному сечению, без отслоения арматуры и ее разрыв	
KIV8		275,63			
KV5	1/15	291,1	361,9883	В середине пролета по нормальному сечению, с отслоением арматуры	ФГКМ
KV6		429,2		В середине пролета по нормальному сечению, без отслоения арматуры и ее разрыва, разрушение в середине сечения вдоль волокон	
KV7		312,38		В середине пролета по нормальному сечению, без разрыва арматуры	
KV8		330,75			
KV9		257,25			
KV10		451,25			
KI-1	1/15	330,75	309,7883	В середине пролета по нормальному сечению, без отслоения арматуры и ее разрыва	Один слой

KI-2		316,05		В середине пролета по нормальному сечению, без отслоения арматуры и ее разрыва, разрушение в середине сечения вдоль волокон	
KI-3		330,75			
KI-4		301,35		В середине пролета по нормальному сечению, без отслоения арматуры и ее разрыва	
KI-5		278,48			
KI-6		301,35			
KII-1		308,7			
KII-2		338,1			
KII-3		345,45			
KII-4	1/30	389,55	349,125	В середине пролета по нормальному сечению, с отрывом арматуры и приповерхностным слоем от касательных напряжений	Один слой без ФГКМ
KII-5		279,3			
KII-6		382,2			
KII-7		360,15			

Характер разрушения подтверждает объективность применения градиентных покрытий для приклейки внешнего армирующего слоя на основе углеродного волокна. Несмотря на применение образцов с соотношением геометрических параметров, вызывающих пиковые краевые напряжения, отслоения арматуры не происходило у образцов с функционально-градиентным клеевым слоем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Уточкина Е. С., Крицин А. В. Внешнее армирование несущих деревянных конструкций углеродной лентой // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 8-2. – С. 294–296.
2. Ржаницын А. Р. Строительная механика. – М.: Высш. шк., 1991. – 440 с.
3. Селяев В. П., Карташов В. А., Клементьев В. Д., Лазарев А. Л. Функционально-градиентные композиционные строительные материалы и конструкции. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2005. – 160 с.
4. Победра Б. Е. Механика композиционных материалов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. – 336 с.
5. Какурин И. Р., Киселев А. Н., Лазарев А. Л., Шорин М. А. Практическое применение методов проектирования характеристик элементов на основе функционально-градиентных композиционных материалов [Электронный ресурс] //

Огарев-online. – 2014. – Спецвыпуск. – Режим доступа:
<http://journal.mrsu.ru/arts/prakticheskoe-primenenie-metodov-proektirovaniya-kharakteristik-ehlementov-na-osnove-funkcionalno-gradientnykh-kompozicionnykh-materialov>.