

УДК 677.017  
DOI 10.47367/0021-3497\_2021\_1\_40

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ТЕКСТИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА  
В КАЧЕСТВЕ ПРЕДНАПРЯЖЕННОГО АРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТА**

**USE OF TEXTILE PRODUCTS  
AS A PRE-STRESSED COMPOSITE REINFORCEMENT**

*Н.О. КОПАНИЦА, А.М. УСТИНОВ, А.С. ПЛЯСКИН*

*N.O. KOPANITSA, A.M. USTINOV, A.S. PLYASKIN*

(Томский государственный архитектурно-строительный университет)

(Tomsk State University of Architecture and Building)

E-mail: artemustinov@bk.ru

*В работе предложен новый метод формования композитных материалов на основе продуктов текстильного производства – углеродных однонаправленных лент и матрицы – эпоксидного связующего. Разработан стенд для предварительного напряжения углеродных лент. Описан процесс заправки, смачивания и натяжки ленты. Представлены результаты микроскопии преднапряженной углеродной ленты и композита. Выявлены особенности формования монослоя углеродного армирования в композите. Установлено, что на поверхности образцов композита наблюдаются разные картины пересечения углеродных волокон в зависимости от преднапряжения.*

*The paper proposes a new method for forming composite materials based on textile products - carbon unidirectional tapes and a matrix - an epoxy binder. A stand for prestressing carbon strips has been developed. The process of reserving, wetting and stretching the tape is described. The results of microscopy of a prestressed carbon ribbon and a composite are presented. The features of forming a monolayer of carbon reinforcement in a composite are revealed. It was found that on the surface of the composite samples, different patterns of intersection of carbon fibers are observed depending on the prestress.*

**Ключевые слова:** углеродная лента, преднапряжение, монослой, композит.

**Keywords:** carbon tape, prestressing, monolayer, composite.

Композитные материалы на основе эпоксидного связующего с армированием в виде углеродных однонаправленных лент широко применяются в несущих элементах машин, механизмов и конструкций. Их прочностные и деформационные характеристики зависят как от характеристик самих материалов, так и структуры сформированного композита.

Для армирования композита используют продукты текстильного производства: однонаправленные углеродные ленты и двунаправленные ткани с разной поверхностной плотностью, которые широко представлены на рынке. Лента представляет собой особый вид ткани полотняного плетения, где нити основы – углеродные пряжи шириной около 4...5 мм и нити утка – клеящие термонити, установленные с шагом 10 мм. Нити основы, огибая жесткие нити утка, образуют изгибы, что создает изысканный визуальный вид углеродной ленты. В качестве матрицы композита применено эпоксидное связующее, которое выполняет роль клея.

Традиционный метод формования композита с монослоем углеродного армирования заключается в предварительном смачивании ленты с двух сторон в связующем, укладке на подготовленное основание и раскатке валиком для удаления излишков клея и воздуха. При таком методе армирования композита углеродная лента сохраняет свою форму плетения на всех этапах до набора прочности эпоксидного связующего.

Используемый при производстве углеродной ленты тип плетения – полотняный, изгибает пряжи углеволокна в виде волн, что снижает прочностные и жесткостные характеристики готового композита [1].

Поэтому изучение особенностей создания композитов на монослое углеродного армирования является актуальной задачей.

Цель работы заключалась в разработке технологии предварительного натяжения углеродной ленты с последующим созданием композита.

Необходимо было отработать закрепление углеродной ленты на стенде, смачивание углеродной ленты связующим, равномерное натяжение без значительных перекосов, поддержание уровня преднапряжения во время набора прочности связующего.

В качестве армирования композита применена углеродная лента CarbonWrap® Tape 530/150. Инновационный продукт, разработанный специально для усиления ребристых плит перекрытия, тавровых балок мостовых пролетов с малой шириной ребра, балочных элементов рамных конструкций, ферм и малогабаритных конструкций. С гарантийным сроком хранения 3 года со дня изготовления.

Матрица композита – эпоксидное двухкомпонентное связующее CarbonWrap® Resin 530+. Эпоксидное двухкомпонентное связующее для пропитки систем внешнего армирования CarbonWrap® с повышенной поверхностной плотностью углеродного наполнителя.

Высокие прочностные свойства углеродных волокон создают трудности при преднапряжении углеродной ленты. Применяемые в практике испытаний на маши-

нах клиновидные захваты с плоскими губками вызывают разрушение ленты в зоне сжатия.

Т а б л и ц а 1

Наименование	Значение
Направление волокон	0°
Поверхностная плотность	530 ± 15 г/м <sup>2</sup>
Тип нити основы	Углеродная нить 12К /24К
Тип нити утка	Клеевая термонить
Плотность нитей основы, нитей на 10 см <sup>2</sup>	64 ± 1 / 32 ± 1
Плотность нитей утка, нитей на 10 см	10 ± 1
Прочность на растяжение волокна	не менее 4,9 ГПа
Модуль упругости при растяжении волокна	не менее 245 ГПа
Удлинение на разрыв волокна	1,8%

Возможность ленты вытягиваться по диагонали, большая ширина и гладкость волокон не позволили применить стандартное решение захватов для узких, жестких ремней спортивной, военной продукции, которое используют при испытаниях на растяжение.

Для решения возникшей проблемы был разработан специальный стенд для углеродных лент большой ширины.

Захват состоит из вала – стального цилиндра, двух фланцев – крестообразные пластины, установленные по основаниям цилиндра, на которые прикладывается нагрузка.

Вместо жесткого крепления вала в системе нагружения применяется шарнирное крепление пассивного вала, кроме вращения вокруг продольной оси. Активный вал имеет возможность вращения вокруг продольной оси вала, необходимого для преднапряжения, а также в вертикальной плоскости, перпендикулярной углеродной пряжи. Такое крепление позволяет скомпенсировать диагональный перекося ленты, допущенный при запасовке.

Неравномерное натяжение нитей основы – углеродных прядей ленты, возникающее в следствие низкой точности закрепления концов ленты при ручной запасовке, можно скомпенсировать использованием прокладок из вспененной резины, устанавливаемых по ширине ленты.

Нагрузочная система с домкратами и датчиками давления сложна по конструкции и в изготовлении, а также нестабильна

при работе, так как значительно снижает нагрузку на лист углекомпозиата при выдержке образца до затвердевания связующего, о чем написано в выводе статьи [2].

Для поддержания заданного уровня преднапряжения углеродной ленты в процессе формования и набора прочности применена рычажная система, на которую прикладывалась нагрузка от массы гирь. Применение такой нагрузки не меняет значение преднапряжения при деформации (релаксации, расправлении нитей, проскальзывании на опоре или затяжки) ленты.

#### *Преднапряжение углеродной ленты*

Конец углеродной ленты укладывался по образующей вала и приклеивался самоклеящейся лентой, после чего обматывался вокруг захвата с послойной укладкой подложек по ширине ленты. Приложенная к захватам нагрузка затягивала ленту вокруг захвата, что предотвращало проскальзывание углеродной ленты. Обмотка образца позволяла избежать местного разрушения, поскольку растягивающая сила воспринималась трением поверхности соседних слоев ленты и вала.

Намотка 2-3 слоев ленты на вал достаточна для удержания трением ленты, что позволяло точно регулировать деформации растяжения.

Устанавливались межслойные прокладки из вспененной резины, которые деформацией сжатия перераспределяли напряжения между прядями, уравнивая их. Побочный эффект применения прокладки проявляется в продольном смещении пря-

дей друг относительно друга и, как следствие, изгибом термонитей утка.

Испытания различных вариантов анкеровки конца ленты показали, что он не нуждается в силовом защемлении на валу – достаточно приклеить край широкой самоклеящейся лентой. Вал при таком креплении ленты можно выполнить с высокой точностью.

#### *Смачивание связующим углеродной ленты*

В выводах работы [2] отмечено, что полученные результаты измерения преднапряжения углеродной ленты в процессе заливки бетона в опалубку показывают значительные потери напряжения. Причина данного явления кроется в смачивании углеродной ленты, находящейся под нагрузкой. Проведенные предварительные эксперименты на отдельных углеродных прядях показали, что несущая способность сухих прядей в два раза выше, чем смоченных в эпоксидном связующем, без значительного их удлинения.

Предположительно в несмоченной связующим углеродной пряди за счет продольных сил трения волокон происходит перераспределение нагрузок между волокнами, а при смачивании уменьшается трение между волокнами, что приводит к разрыву натянутых волокон и к выпрямлению ослабленных.

При плетении лент происходит переплетение углеродных волокон вокруг друг друга в углеродных прядях (рис. 1 – снимки с микроскопа углеродной ленты: а) между термонитями утка, б) около термонити утка) и изгибание вокруг нитей утка.

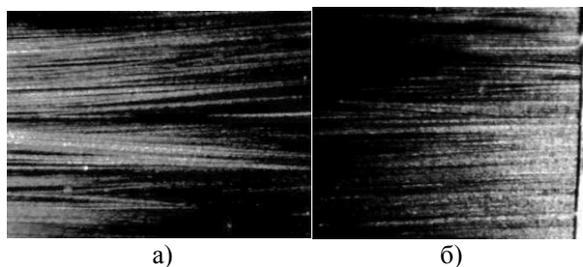


Рис. 1

Традиционный метод формования композита не позволял расправить углеродные волокна, а мог только больше запутать во-

локна между собой при прокатывании валиком (рис. 2 – снимки с микроскопа углекомпозита без преднапряжения: а) между термонитями утка, б) около термонити утка).

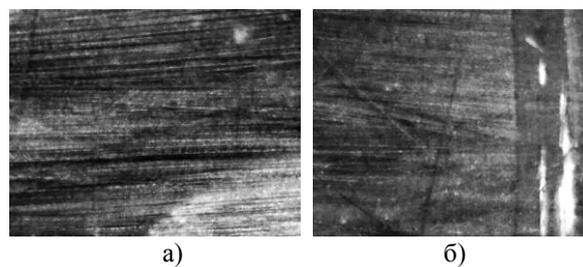


Рис. 2

На снимках видно, что углеродное волокно изгибается в двух плоскостях. Толщина ленты без натяжения около 1,5 мм, при натяжении 0,4 мм. Шаг нитей утка 10 мм. Наклон нитей основы к продольной оси ленты составил около 9°. Исходя из этого прочность композита снижается на 1,2%. Снижение модуля упругости при таком искривлении возможно оценить только при испытаниях композита.

Формование композита с предварительным напряжением углеродной ленты позволило расправить углеродные волокна в пряди (рис. 3 – снимки с микроскопа углекомпозита с преднапряжением: а) между термонитями утка, б) около термонити утка), а также выпрямить саму прядь при этом согнув нити утка – термонить.

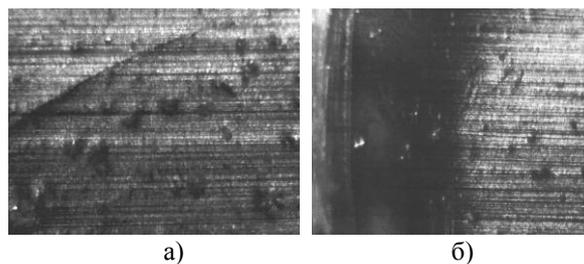


Рис. 3

Уровень преднапряжений составлял 205,54 МПа, приведенный к толщине композита в 0,6 мм, а общие продольные деформации 0,198%.

Распрявление углеродных прядей – добиться при значениях преднапряжения, потому как визуальнo пряди распрявляются уже при 100 МПа.

*Деформации композита при разгрузке, определенные методом корреляции цифровых изображений*

После набора прочности эпоксидного связующего производилась разгрузка в шесть этапов с регистрацией стереоскопических изображений рабочего участка углекомпозита. На зону регистрации для определения деформированного состояния нанесено спекл-изображение.

На нулевом этапе картина абсолютных деформаций по оси вдоль нити основы на шести этапах снижения преднапряжения (рис. 4) составлена из случайных значений и показывает значение погрешности измерений оптического цифрового комплекса VIC-3D [3]. Данная картина является опорной для последующего вычисления деформаций.

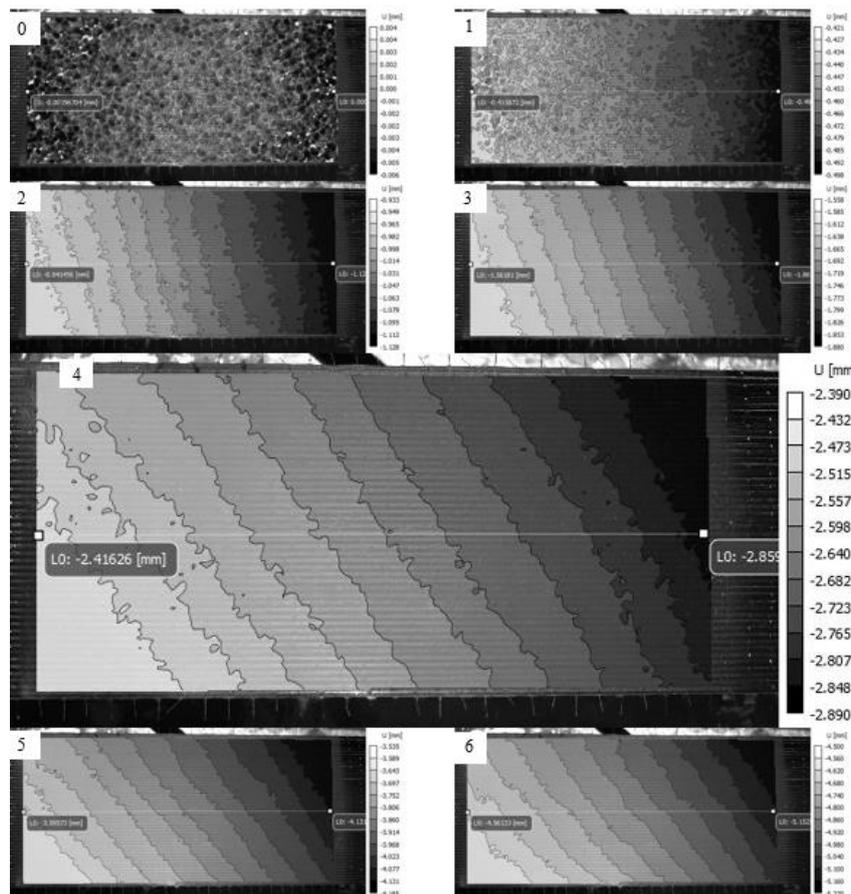


Рис. 4

На первом этапе снижения напряжения в композите они составили 171 МПа, а на картине деформаций проявляются изополя с различными значениями смещений от 0,42 до 0,49 мм (рис.4, линия L0-L0). На этом этапе большое значение вносит погрешность измерения комплекса, выражающаяся в смешивании светлых изополей.

На втором этапе при значении напряжений 137 МПа изополя приняли форму полос, границы которой имеют сильно изогнутые формы и островки в соседних изополях. Изополя наклонены на 77° к про-

дольной оси пряди. Неравномерности преднапряжения углеродных прядей составляют 0,018 мм между крайними прядями ленты при общих деформациях ленты 1,03 мм.

На третьем этапе напряжения составили 103 МПа. Границы изополей избавились от большей части островков в соседних изополях. Наклон изополей составил 73°. Неравномерности преднапряжения крайних прядей составляют 0,044 мм при общих деформациях ленты 1,71 мм.

На полученных картинах абсолютных деформаций четвертого этапа наблюдается наклон  $62^\circ$  к продольной оси пряжи изополей, что следует из-за неравномерности преднапряжения углеродных прядей, которая составляет 0,191 мм между крайними прядями ленты при общих деформациях ленты 4,84 мм. Форма границ изополей не изменилась. Напряжения составили 48 МПа.

На пятом и шестом этапах качественного изменения изополей не произошло, только увеличился их наклон до  $55^\circ$ . Напряжения предпоследнего этапа составили 17 МПа.

## ВЫВОДЫ

При использовании предложенной технологии формования композита с преднапряжением монослоя армирования из углеродной ленты неравномерность деформаций крайних прядей не превышает 4,5% от общих, что является удовлетворительным для использования в виде усиливающего элемента на строительных конструкциях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Устинов А.М., Клопотов А.А., Потехаев А.И., Абзаев Ю.А., Плевков В.С. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев углепластика при осевом растяжении методом корреляции цифровых изображений // Изв. Алтайского государственного университета. – 2018, №1 (99). С.58...63. DOI 10.14258/izvasu(2018)1-10.

2. Инь Шен, Шаохуэй Лу и Фанюань Ли. Экспериментальное исследование плоских бетонных плит, предварительно напряженных полимерными листами, армированными углеродным волокном // Hindawi Publishing Corporation. Достижения в области материаловедения и инженерии. – Том 2015. Статья ID 792320. С. 11.

3. Федоров В.С., Устинов А.М. и др. Исследование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя в образце из стали методом корреляции цифровых изображений // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016, №6. С. 288...294.

## REFERENCES

1. Ustinov A.M., Klopotov A.A., Potekhaev A.I., Abzaev Yu.A., Plevkov V.S. Eksperimental'noe issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya poverkhnostnykh sloev ugleplastika pri osevom rastyazhenii metodom korrelyatsii tsifrovyykh izobrazheniy // Izv. Altayskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2018, №1 (99). S.58...63. DOI 10.14258/izvasu(2018)1-10.

2. In' Shen, Shaokhuey Lu i Fanyuan' Li. Eksperimental'noe issledovanie ploskikh betonnykh plit, predvaritel'no napryazhennykh polimernymi listami, armirovannymi uglerodnym voloknom // Hindawi Publishing Corporation. Dostizheniya v oblasti materialovedeniya i inzhenerii. – Tom 2015. Stat'ya ID 792320. S. 11.

3. Fedorov V.S., Ustinov A.M. i dr. Issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya poverkhnostnogo sloya v obraztse iz stali metodom korrelyatsii tsifrovyykh izobrazheniy // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2016, №6. S. 288...294.

Рекомендована кафедрой металлических и деревянных конструкций. Поступила 10.02.21.