

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИТА, АРМИРОВАННОГО ПРЕДНАПРЯЖЕННОЙ УГЛЕРОДНОЙ ОДНОНАПРАВЛЕННОЙ ЛЕНТОЙ

Артем Михайлович Устинов¹

*¹Томский государственный архитектурно-строительный университет г.
Томск Россия*

Аннотация. Предложен новый метод формования композита, в котором применяется предварительное натяжение углеродной однонаправленной ленты. Данный метод позволяет выпрямить углеродные пряди, которые огибают клеевые термонити утка. Так как снятие преднапряжения производилось после набора прочности эпоксидного связующего форма углеродной пряди не менялась, все также оставаясь прямой.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, испытание на растяжение, углекомпозит, предварительное напряжение.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № *FEMN* – 2022-0004)

Введение

При усилении строительных конструкций в настоящее время распространено применение углекомпозитных материалов. Для армирования композита используют и на рынке широко представлены однонаправленные углеродные ленты с разной поверхностной плотностью. Лента представляет собой ткань полотняного плетения, где нити основы – углеродные пряди шириной около 4 – 5 мм, а нити утка – клеящие термонити установленные с шагом около 10 мм. Жесткие нити утка позволяют создать изгибы нитей

основы вокруг них, что создает изысканный визуальный вид углеродной ленты.

Для усиления строительных конструкций применяют два метода композитного элемента: «сухой» и «мокрый». В «мокром» типе формование производится в условиях строительной площадки, непосредственно на поверхности дефектной конструкции (балке, плите, стойке).

Матрица композита – двухкомпонентное эпоксидное связующее, оно же играет роль клея. Углеродную ленту предварительно смачивают с двух сторон в связующем, укладывают на конструкцию и раскатывают валиком для удаления излишков клея. Дефектные поверхности элементов конструкций подготавливают. Полости, сколы и язвы заполняют эпоксидной шпаклевкой. При таком методе усиления армирование композита – углеродная лента сохраняет свою форму при всех этапах усиления: смачивании, формовании, раскатывании и наборе прочности эпоксидного связующего.

В исследовании выполнено преднапряжение углеродной ленты, а связано это с тем, что используемый на производстве ленты тип плетения (полотняной) изгибает пряди углеволокна в виде волн, что снижает прочностные и жесткостные характеристики готового композита. Результаты сравнения данных испытаний углеродных ламелей и формованного «мокрым» способом углекомпозита привели к предположению о снижении характеристик.

Обзор научно-технической литературы по вопросу предварительного натяжения углеродных композитов

Научный коллектив под руководством Томаша Сивовски из департамента дорог и мостов Жешувского технологического университета Польши занимается разработкой, тестированием и внедрением системы натяжения углекомпозита для усиления изгибаемых стальных и железобетонных конструкций, в частности мостов.

В работе [2] представлена разработка, тестирование и внедрение на месте новой системы предварительного натяжения углепластика (армированного углеродным волокном полимера) для усиления изгибаемых элементов.

Основные элементы системы анкеровки и натяжения, были подвергнуты испытаниям с целью выработки оптимальных решений. Оценивалась прочность на разрыв анкерных соединений ламелей из углекомпозита со стальным фланцем: склеенных, клепаных, болтовых и гибридных (склеенных / болтовых и склеенных / заклепанных). Сравнивая графики для гибридных типов анкеров, можно видеть, что тип S скрепленные / болтовые анкерные крепления показали более высокую прочность на растяжение по сравнению с типом N скрепленными / приклепанными.

Для преднапряжения использовались высокопрочные ламели *UHS 614* с поперечным сечением 60 мм × 1,4 мм, пределом прочности при растяжении $f_{fu} = 3200$ МПа, модулем упругости $E_f = 160$ ГПа и деформацией при разрушении примерно $\varepsilon_{fu} = 2$ %.

Была определена максимальная сила предварительного напряжения. Анкерное крепление позволяет получить максимальную нагрузку в 185 кН (напряжения в ламели 2202 МПа) для типа N и почти 200 кН (напряжения в ламели 2380 МПа) для типа S. Кроме того, анкерные крепления S-типа продемонстрировали высокий уровень однородности. Повторяемая эффективность анкеровки, более 70%, может быть получена в испытанной серии. Это было признано достаточным значением для восстановления после растяжения или усилением бетонных конструкций, поскольку оптимальный усиливающий эффект достигается при уровне предварительного напряжения полосы, составляющем примерно 60% от предела прочности углепластика [3].

Система была проверена на железобетонных и стальных балках в лаборатории, что доказало свою эффективность и позволило внедрить

технологии на эксплуатируемых мостах. Несмотря на умеренную эффективность гибридного усиления жесткости моста, испытания мостов под нагрузкой ясно показали, что новая технология усиления с использованием напряженных полос *CFRP* может быть эффективно применена для мостов из железобетонных и стальных балок, а также может быть усилена до требуемой грузоподъемности [4].

В статье [5] А. Хоссейни, Э. Гафури, М. Мотавалли, А. Нуссбаумер и И.Л. Чжао, «Анализ напряжений стальных пластин усиленных предварительно-напряженным углекомпозитом в несвязанном и связанном состоянии» показывают, что предварительное напряжение углепластика может значительно снизить растягивающие напряжения в стали. Усиление предварительно напряженными ламинатами из углепластика может быть использовано в качестве эффективного метода для стальных элементов, особенно подверженных усталости [6].

В работе [7] авторов: Инь Шен, Шаохуэй Лу и Фаньюань Ли «Экспериментальное исследование плоских бетонных плит, предварительно напряженных полимерными листами, армированными углеродным волокном» разработан и произведено устройство для анкеровки и самоподъемного натяжения для углеродных лент. Преднапряжение было успешно применено к одной и нескольким лентам (достигнуто 80% прочности на растяжение). На основе этих результатов были изготовлены и испытаны плоские бетонные плиты, спроектированы с предварительно натянутыми листами углекомпозита в виде нижнего продольного рабочего армирования.

Материалы

В качестве армирования композита применена углеродная лента *CarbonWrap® Tape 530/150*. Инновационный продукт, специально разработанный 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.

Таблица 1 – Технические характеристики углеродная лента *CarbonWrap®*
Tape 530/150

Наименование	Значение
Направление волокон	0°
Поверхностная плотность	530 ± 15 г/м ²
Тип нити основы	Углеродная нить 12K /24K
Тип нити утка	Клеевая термонить
Плотность нитей основы, нитей на 10 см ²	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%

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

Таблица 2 – Технические характеристики связующего *CarbonWrap® Resin* 530+

Наименование	Значение
Внешний вид компонентов	Однородная прозрачная система без посторонних включений
Цвет материала	Компонент А – бесцветный; Компонент В – бледно-желтый
Динамическая вязкость по Брукфильду, при $(25 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ - при 20 об/мин	Компонент А $N=4$ 4000-10000 Компонент В $N=2$ 15-50
Плотность смеси компонентов А+В при температуре $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$, г/см ³ , не более	~ 1,20
Время жизнеспособности при температуре $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$, мин, не менее	50
Прочность сцепления (адгезия к бетону), МПа, не менее	> 2,5 (разрушение по бетону)
Прочность при сдвиге образцов клея (7 суток при $23 ^\circ\text{C}$), МПа, не менее	12

Оборудование

Стенд для преднапряжения углеродной ленты. Высокие прочностные свойства углеродных волокон, которые позволяют эффективно применять их при усилении строительных конструкций, создают трудности при преднапряжении углеродной ленты.

Применяемые в практике испытаний на машинах клиновидные захваты с плоскими губками вызывают разрушение ленты в зоне сжатия.

Возможность вытягиваться ткани по диагонали, большая ширина (по сравнению с ремнями безопасности или текстильными стропами), гладкость волокон не позволяли применить стандартное решение захватов для узких,

жестких ремней спортивной, военной продукции и ремней безопасности, которое используют при испытании на растяжение.

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

Захват состоит из барабана - стального цилиндра, двух фланцев – крестообразные пластины, установленных по основаниям цилиндра, на которые прикладывается нагрузка и мягких подложек. Равномерное натяжение всех прядей ленты, можно добиться только использованием узких подложек из вспененной резины, устанавливаемых на обратной стороне валика.

Вместо жестких закреплений концов барабанов, мы в системе нагружения применили шарнирное крепление пассивного барабана, кроме вращения вокруг продольной оси. Активный барабан также имеет возможность вращения вокруг продольной оси барабана, необходимого для преднапряжения, а также в вертикальной плоскости перпендикулярной углеродной пряди. Такое крепление позволяет скомпенсировать перекос ленты допущенный при запуске.

Нагрузочная система с домкратами и датчиками давления сложна по конструкции и в изготовлении, а также не стабильна при работе так как значительно снижает нагрузку на лист углекомполита при выдержке образца углекомполита до затвердевания связующего, о чем написано в выводе статьи [7]

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) ткани.

Преднапряжение углеродной ленты

Процесс преднапряжения.

Конец углеродной ленты укладывается по плоскости сечения цилиндра и приклеивался самоклеящейся лентой, после чего обматывается вокруг захвата с послойной укладкой подложек по ширине ленты. Приложенная к захватам нагрузка затягивает ленту вокруг захвата, что предотвращает проскальзывание углеродной ленты. Обмотка образца позволяет избежать местного разрушения, поскольку растягивающая сила воспринимается трением поверхности соседних слоев ленты и зажимного цилиндра.

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

Необходимо установить межслойные прокладки из легко сжимаемого (пористого) материала, который снижает неоднородность напряжения между прядями ленты, возникающую в следствии низкой точности закрепления концов ленты при ручной заправке и своей деформацией сжатия перераспределит (уровняет) напряжения между прядями. Побочный эффект применения прокладки проявляется в продольном смещении прядей друг относительно друга, а как следствие изгибом термонитей утка.

Испытания различных вариантов анкеровки конца ленты показали, что он не нуждается в силовом защемлении в барабане, а достаточно приклеить край широкой самоклеящейся лентой. Барабан при таком креплении ленты можно выполнить с высокой точностью на токарном станке и исключить неравномерности натяжения, возникающие при его геометрических несовершенствах в конструкции с крышкой.

Процесс смачивания связующим углеродной ленты.

В выводах работы [7] отмечено, что полученные результаты измерения преднапряжения углеродной ленты в процессе заливки бетона в опалубку, показывают значительные потери напряжения. Причина данного вывода кроется в смачивании углеродной ленты, находящейся под нагрузкой. Проведенные предварительные эксперименты на отдельных углеродных

пряжях показали, что несущая способность сухих прядей в два раза выше, чем смоченных в эпоксидном связующем, без значительного их удлинения.

Предположительно в несмоченное связующим углеродной пряди за счет продольных сил трения волокон происходит перераспределение нагрузок между волокнами, а при смачивании углеродных прядей эпоксидным связующим, уменьшается сцепление (трение) между волокнами, что приводит к выпрямлению длинных (слабо натянутых, искривленных) волокон в пряди, а короткие (сильно натянутые, прямые) в этот момент перенапрягаются и рвутся[8].

Микроскопия углеродной ткани и композита

При плетении ткани (лент) из нити основы - углеродных прядей и нитей утка - термонитей происходит переплетение углеродных волокон вокруг друг друга (рис. 1) и изгибание вокруг нитей утка [9].

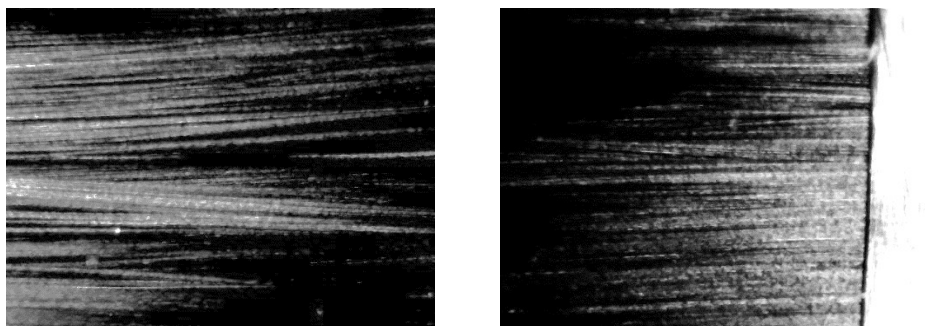


Рисунок 1 – Снимки с микроскопа углеродной пряди: а) между термонитями утка, б) около термонити утка

При изготовлении «мокрым» методом композита углеродная лента смачивается в связующем и укладывается на поверхность усиливаемого элемента и раскатывается валиком для удаления воздуха и лишнего связующего. Такой метод не позволяет расправить углеродные волокна, а может только больше запутать волокна между собой (рис. 2).

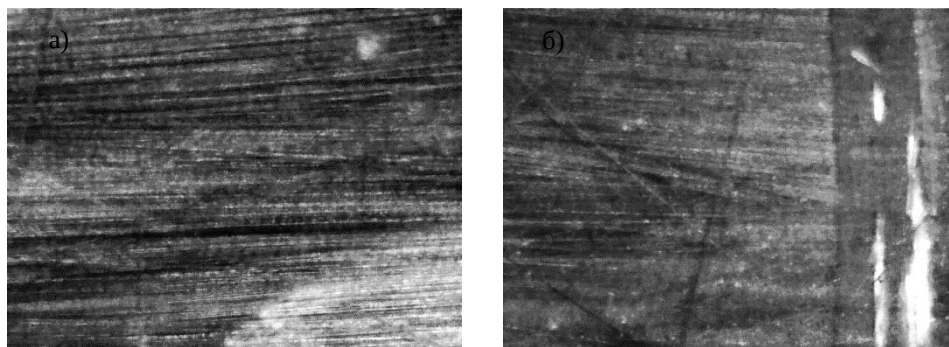


Рисунок 2 – Снимки с микроскопа углекомпози́та без преднапряжения: а) между термонитями утка, б) около термонити утка

Изготовлении композита «мокрым» методом, но с предварительным напряжением углеродной ленты позволяет расправить углеродные волокна в пряде (рис. 3), а также выпрямить нить основы – углеродную прядь при этом согнув нить утка – термонить [10].

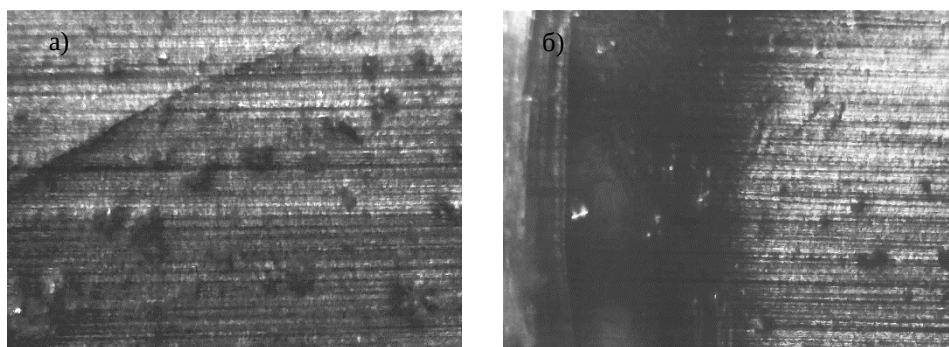


Рисунок 3 – Снимки с микроскопа углекомпози́та с преднапряжением: а) между термонитями утка, б) около термонити утка

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Устинов, А. М., Клопотов, А. А., Потекаев, А. И., Абзаев, Ю. А., Плевков, В. С. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев углепластика при осевом растяжении методом корреляции цифровых изображений //Известия Алтайского государственного университета. – 2018. – №. 1 (99). – С. 58-63.
[https://doi.org/10.14258/izvasu\(2018\)1-10](https://doi.org/10.14258/izvasu(2018)1-10)
2. Siwowski, T., Piatek, B., Siwowska, P., Wiater, A. Development and implementation of *CFRP* post-tensioning system for bridge strengthening //Engineering Structures. – 2020. – Т. 207. – С. 110266.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110266>
3. Meier U. Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites // Construction and building materials. – 1995. – Т. 9. – №. 6. – С. 341-351.
[https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00071-2](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00071-2).
4. Бокарев С. А., Ящук М. О. Усиление железобетонных пролетных строений мостов преднапряженными полимерными композиционными материалами //Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – №. 1. – С. 98-107.
5. Hosseini, A., Ghafoori, E., Motavalli, M., Nussbaumer, A., Zhao, X. L. Stress analysis of unbonded and bonded prestressed *CFRP*-strengthened steel plates //8th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering, CICE 2016. – Department of Civil and Environmental Engineering and Research Institute for Sustainable Urban Development, The Hong Kong Polytechnic University, 2016. – С. 1179-1186.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.09.025>
6. Harmanci, Y. E., Michels, J., Czaderski, C., Loser, R., Chatzi, E. Long-term residual anchorage resistance of gradient anchorages for prestressed *CFRP* strips // Composites Part B: Engineering. – 2018. – Т. 139. – С. 171-184.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.062>

7. Shen, Y., Lu, S., Li, F. An experimental study on concrete flat slabs prestressed with carbon fibre reinforced polymer sheets //Advances in Materials Science and Engineering. – 2015. – Т. 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72910-3_11
8. Гарифуллин А. Р., Абдуллин И. Ш. Современное состояние проблемы поверхностной обработки углеродных волокон для последующего их применения в полимерных композитах в качестве армирующего элемента //Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – №. 7. – С. 80-85.
9. Копаница Н. О., Устинов А. М., Пляскин А. С. Использование продуктов текстильного производства в качестве преднапряженного армирования композита //Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2021. – №. 1. – С. 40-45. https://doi.org/10.47367/0021-3497_2021_1_40
10. Есипов С. М. Композитные материалы для усиления строительных конструкций //Образование, наука, производство. – 2015. – С. 2475-2479.