

Научная статья / Original research article
УДК 624.21:620.22
DOI: <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-2-87-98>
EDN: <https://elibrary.ru/ypnqzp>

2.1.8 Проектирование и строительство дорог,
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных
тоннелей (технические науки)



Механические характеристики композиционного материала, изготовленного методом намотки

С. В. Пиняжин ✉

Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Дуси Ковальчук, 191,
Новосибирск, 630049, Российская Федерация

✉ s.v.pinyazhin@mail.ru



Аннотация. Исследование направлено на решение проблемы повышения долговечности и снижения затрат в мостостроении за счет применения стеклопластиковых труб, изготовленных методом непрерывной намотки. Несмотря на успешное использование полимерных композитов за рубежом, их применение в России ограничено из-за отсутствия нормативной базы и недостаточной изученности механических свойств. Посредством экспериментальных испытаний образцов, вырезанных из стеклопластиковых труб, на растяжение с использованием тензорезисторов и универсальной испытательной машины были получены ключевые характеристики: предел прочности (в среднем 200 МПа), модуль упругости (29.5–37.9 ГПа) и коэффициент Пуассона (0.21–0.27). Установлено, что свойства материала сопоставимы с бетоном и сталью, что подтверждает его пригодность для гибридных конструкций пролетных строений мостов. Выявлены особенности деформационного поведения, включая трещинообразование и изменение модуля упругости, при повторных нагружениях. Результаты исследования могут быть использованы для разработки нормативной базы и проектирования долговечных мостовых конструкций, что открывает перспективы для расширения применения композитов в строительстве.

Ключевые слова: мостовое сооружение, полимерные композиционные материалы, метод непрерывной намотки, стеклопластиковые трубы, механические характеристики композиционного материала

Благодарности. Автор выражает благодарность ООО «Электромаш» (г. Бийск, Российская Федерация) за предоставление материалов и образцов для проведения экспериментальных исследований.

Для цитирования: Пиняжин С. В. Механические характеристики композиционного материала, изготовленного методом намотки. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(2):87–98. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-2-87-98> EDN: YPNQZP

Mechanical characteristics of composite material manufactured by winding process

Sergey V. Pinyazhin ✉

Siberian Transport University, 191 Dusi Kovalchuk St., Novosibirsk, 630049, Russian Federation

✉ s.v.pinyazhin@mail.ru



Abstract. The study is aimed to increase durability and reduce costs in bridge construction through the use of fiberglass pipes manufactured by the filament winding process. Despite the successful use of fiber reinforced polymers (FRP) abroad, their application in Russia is limited due to the lack of regulatory framework and insufficient study of their mechanical properties. Through experimental tensile testing of fiberglass pipe specimens using strain gauges and a universal testing machine, key characteristics were obtained: tensile

strength (200 MPa on average), elastic modulus (29.5–37.9 GPa), and Poisson's ratio (0.21–0.27). The material properties were found to be comparable to concrete and steel, which confirms its suitability for hybrid bridge superstructures. The peculiarities of the deformation behavior, including cracking and changes in the elastic modulus under repeated loading were revealed. The results of the study can be used to develop a regulatory framework and to design durable bridge structures, opening up perspectives for the expansion of composite applications in construction.

Keywords: bridge structure, fiber reinforced polymers, filament winding, fiberglass pipes, mechanical characteristics of composite material

Acknowledgements. The author expresses his gratitude to LLC "Electromash" (Biysk, Russian Federation) for providing materials and samples for experimental studies.

For citation: Pinyazhin S. V. Mechanical characteristics of composite material manufactured by winding process. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(2):87–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-2-87-98>



1. Введение / Introduction

Современные тенденции развития мостостроения требуют обеспечения надежности, безопасности, грузоподъемности и долговечности сооружений. Конструкции из традиционных материалов (железобетона, стали, бетона) отвечают требованиям надежности и безопасности, но по-прежнему проблемным остается вопрос обеспечения их долговечности. Увеличение сроков службы конструкций может быть достигнуто за счет применения полимерных композиционных материалов (ПКМ), которые устойчивы к воздействиям различных агрессивных сред [1].

Наиболее широко при строительстве мостовых сооружений среди композиционных материалов используются пултрузионные стеклопластиковые профили и элементы, изготовленные методом вакуумной инфузии. Пултрузия очень эффективна в случае применения большого количества однотипных элементов из набора стандартных профилей, но данная технология не позволяет изготавливать профили больших размеров с переменным по длине поперечным сечением [2]. Изготовление изделий методом вакуумной инфузии является очень трудоемким и требует длительной подготовки [3]. Альтернативой вышеперечисленным методам производства элементов конструкций из полимерных композитов может стать намотка, которая эффективно реализуется при изготовлении труб.

Метод непрерывной намотки является весьма перспективным методом изготовления изделий, форма которых определяется вращением произвольных образующих. Существенным преимуществом данного метода в сравнении с вышеупомянутыми считается возможность свободной ориентации армирующих волокон на любом участке изделия. Такая мобильность обеспечивается за счет шести степеней свободы станка для намотки, среди которых: вращение оправки, поперечная раскладка, движение горизонтальной и вертикальной каретки и угол поворота проушины относительно двух осей. Зарубежный опыт применения данной технологии показывает, что намотка является универсальным методом для производства конструкций не только с выпуклой, но и с вогнутой геометрией [4].

На сегодняшний день отечественный опыт применения стеклопластика в качестве несущих элементов мостов очень ограничен. Большая часть разработок в области использования ПКМ касается пешеходных мостов. Известны лишь единичные случаи применения композитов в качестве несущих элементов автодорожных и железнодорожных мостов в России [5–7], и ведутся исследования по расширению области их применения [8–10]. При этом общая мировая тенденция применения пултрузионных профилей и объемных элементов, изготовленных методом вакуумной инфузии, поддерживается и в нашей стране. Композитные трубы хорошо себя зарекомендовали в системе трубо-

проводов. Они эффективно применяются для транспортировки широкого спектра текучих веществ от воды до нефти [11] и эксплуатируются в разнообразных условиях: переменная влажность, высокие температуры, морская вода и т. п. При этом их не принято рассматривать в качестве элементов несущих конструкций. Отечественный опыт показывает, что в определенных случаях трубы могут составить конкуренцию профилям в виде двутавров, швеллеров и уголков, используемым в мостостроении более широко [12]. За рубежом помимо металлических труб в мостостроении находят применение и композитные [13].

Использование труб в качестве несущих элементов конструкций позволит повысить конкурентоспособность материалов в этой области, что положительно отразится на увеличении объемов применения композитов и снижении стоимости материалов и конструкций в целом.

Специалисты СибНИИ мостов Сибирского государственного университета путей сообщения ведут разработки нового пролетного строения с применением трубчатых стеклопластиковых секций. Выбор труб, изготовленных методом намотки, обусловлен высокими механическими характеристиками материала. Применение сборных трубчатых секций, в свою очередь, способствует значительному сокращению сроков монтажа конструкций. Таким образом, конечным продуктом должно стать быстровозводимое и долговечное пролетное строение, ресурсы на эксплуатацию которого будут значительно сокращены.

В качестве конструктивного решения для пролетного строения моста предложена балочная разрезная система со стеклопластиковыми несущими элементами и железобетонной плитой проезжей части, представленная на рис. 1. Конструкция пролетного строения по своей сути схожа с первым в России автодорожным мостом из полимерных композитов, построенным в 2014 г. в Новосибирской области на р. Пашенке [14]. Отличительной особенностью новой конструкции являются стеклопластиковые трубы, которые выполняют те же функции, что и стеклопластиковые решетчатые фермы пролетного строения успешно эксплуатирующегося отечественного моста. Включение железобетонной плиты проезжей части в совместную работу с балками осуществляется посредством гибких стержневых упоров для обеспечения упругого взаимодействия элементов.

Использование стеклопластиковых труб в несущих конструкциях мостовых сооружений в качестве балок пролетных строений или столбов опор возможно только при наличии соответствующих нормативных документов, в которых будут отражены основные требования, предъявляемые к подобного типа конструкциям и механическим характеристикам композиционного материала. На данный момент ни в нормативной, ни в справочной литературе нет исчерпывающих данных о механических характеристиках стеклопластика, изготавливаемого методом намотки. Нормативная база

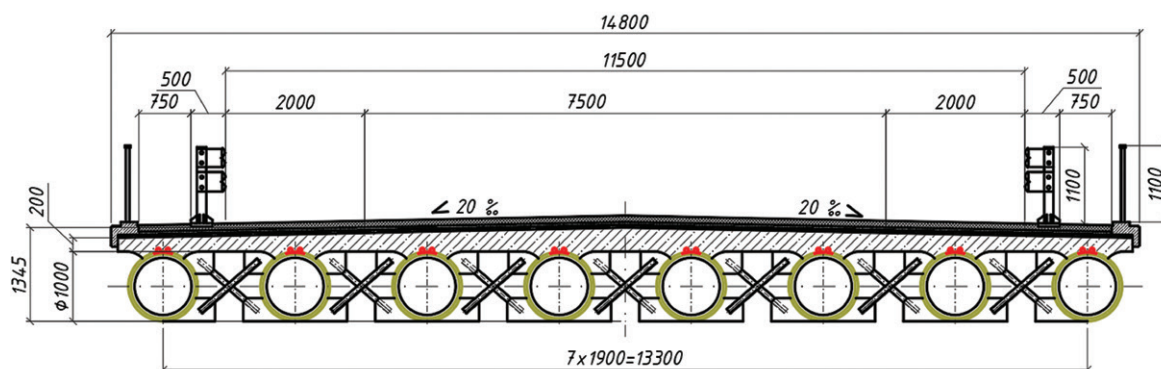


Рис. 1. Принципиальное конструктивное решение пролетного строения с балками из стеклопластиковых труб (рисунок автора)

Fig. 1. Principal structural solution for a span with beams made of fiberglass pipes (author's figure)

ориентирована на регламентирование механических характеристик труб применительно к их использованию в качестве элементов трубопроводов. Поэтому требования к таким важным характеристикам, как модуль упругости, коэффициент Пуассона, модуль сдвига и т. п., необходимых для выполнения прочностных расчетов конструкций, в нормативных документах отсутствуют.

Значения этих характеристик зависят от ряда факторов: объемной доли волокон, типа волокон и матрицы, угла укладки волокон и т. п. [15]. К тому же данный материал анизотропен, и это следует учитывать при выполнении расчетов. Но для обоснования возможности и целесообразности использования композитных труб в качестве несущих элементов мостовых конструкций требуется провести большой объем экспериментальных работ по установлению значений необходимых механических характеристик.

Сотрудниками СибНИИ мостов Сибирского государственного университета путей сообщения совместно с ООО «Электромаш» была составлена программа экспериментальных исследований стеклопластиковых образцов, вырезанных из трубы диаметром 1 м, изготовленной методом намотки с дополнительным поперечным обвитием основных армирующих волокон. Целью испытаний являлось установление фактических значений нормальных растягивающих напряжений при разрыве, а также модуля упругости и коэффициента Пуассона при осевом растяжении.

2. Материалы и методы / Materials and methods

Достижение поставленной цели возможно только при обеспечении надежного измерения деформаций материала в процессе нагружения. При статических испытаниях образцов деформации могут быть зафиксированы по величине перемещения захватов испытательной машины и по данным измерительных приборов, устанавливаемых на материал образца непосредственно в рабочей его части.

Для испытаний была использована универсальная испытательная машина Time WDW300E (TIME Group Inc., Китай), которая осуществляет приложение нагрузки с заданной скоростью и непрерывно фиксирует перемещение захватов. Так как захваты обжимают материал образца, наряду с упругими деформациями имеют место и необратимые деформации – пластическое смятие и проскальзывание. Это хорошо видно на графике, на котором по оси абсцисс отложены перемещения захватов, по оси ординат – нагрузка (рис. 2). Пластические деформации в зоне захватов явно выделяются в нижней половине графика, но утверждать, что они отсутствуют во второй половине, оснований нет. При этом количественно выделить пластические деформации и соотнести их с упругими по данным только перемещений захватов не представляется возможным. Поэтому корректно определить деформативные характеристики материала только по перемещениям захватов невозможно. Фиксацию деформаций следует осуществлять исключительно на рабочем участке образцов с использованием специальных измерительных приборов.

В качестве измерительных приборов были рассмотрены:

- деформометры с электронными индикаторами с рабочей базой 60 мм;
- съемные электронные тензодатчики с рабочей базой 60 мм;
- наклеиваемые тензорезисторы.

Главной отличительной особенностью тензорезисторов является их малая база (5 мм),

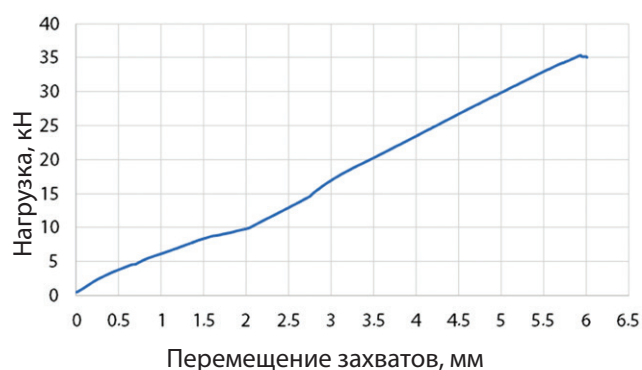


Рис. 2. Диаграмма растяжения контрольного образца (график составлен автором)

Fig. 2. Tensile diagram of the control sample (diagram created by the author)

что позволяет наряду с продольными деформациями фиксировать и поперечные деформации материала. Сбор данных со всех датчиков производился с помощью измерительной системы «Тензор-МС» (СГУПС, Российская Федерация) [16] с частотой 5 Гц. Пример образца с установленными датчиками показан на рис. 3.

Измерение деформаций с помощью деформометров показало, что эти приборы имеют определенные недостатки. Во-первых, деформометры следует прикреплять к образцам посредством клея, чтобы не оказывать механического воздействия на исследуемый материал в рабочей зоне. Во-вторых, жесткость стандартной штанги при базе 60 мм оказывает влияние на показания приборов. Кроме того, необходимо точно позиционировать места закрепления приборов на образце относительно друг друга для минимизации вероятности возникновения изгиба штанги. В-третьих, округлая форма поверхностей образцов, вырезанных из трубы, оказывает влияние на точность размещения деформометров на этих гранях и, как следствие, на результаты измерений.

Использование съемных электронных тензодатчиков, с помощью которых проводили измерения деформаций, также выявило некоторые недостатки. Во-первых, присоединение тензодатчика к исследуемому элементу осуществляется только посредством магнитного взаимодействия, чтобы можно было их применять повторно. Это требует наклейки металлических пластин в рабочей части, что имеет свои недостатки, присущие закреплению деформометров. Во-вторых, не обеспечивается достаточная сила прижатия тензодатчиков к образцам в процессе нагружения, что приводит к их проскальзыванию в момент образования трещин в матрице.

Наклеиваемые тензорезисторы гибкие и имеют базу лишь 5 мм, поэтому обозначенных выше недостатков деформометров и съемных тензодатчиков в ключе решения данной задачи у них нет. К тому же они позволяют наряду с продольными деформациями измерять и поперечные деформации материала. Поэтому по результатам контрольных нагружений образцов наклеиваемые тензорезисторы показали наиболее приемлемые результаты и были приняты для контроля деформаций в рабочей зоне образцов.

a)



b)



Рис. 3. Образец: а) до испытаний; б) после испытаний (фото автора)
Fig. 3. Sample: a) before testing; b) after testing (author's photo)

Измерения посредством наклеиваемых тензорезисторов, реализуемые в измерительном комплексе «Тензор МС», заключаются в следующем. Электрическое сопротивление тензорезисторов, изменяющееся под действием механических деформаций, усиливается и пьезоэлектрическими аналогово-цифровыми преобразователями (АЦП) переводится в цифровой сигнал, который передается в блок сбора данных. По беспроводной связи данные из блока могут в режиме реального времени передаваться на смартфон и воспроизводиться в виде графиков с заданной частотой дискретизации.

При проведении измерений тензорезисторы неизбежно нагреваются на поверхности образца при прохождении электрического сигнала, подаваемого источником питания, вследствие чего появляется систематическая температурная погрешность. Для устранения данной погрешности предусмотрен компенсационный образец, на котором устроен мост Уитстона из тензорезисторов, аналогичных тем, которые устанавливаются на образцы во время испытаний. Принципиальная схема моста Уитстона и компенсационный образец проиллюстрированы на рис. 4.

В качестве базового нормативного документа для проведения испытаний образцов на растяжение был принят ГОСТ Р 54924-2017¹, в соответствии с которым нагружение назначено по схеме «А». Геометрические параметры образца представлены на рис. 5.

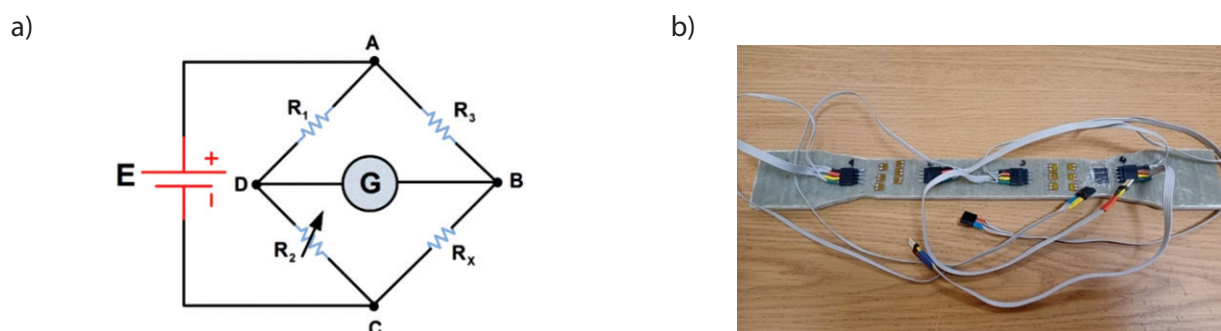


Рис. 4. Мост Уитстона с тензорезисторами для измерительной системы «Тензор МС»: а) принципиальная схема моста Уитстона (схема с сайта²); б) компенсационный образец (фото автора)

Fig. 4. Wheatstone bridge with strain gauges for the "Tensor MS" measuring system: a) schematic diagram of the Wheatstone bridge (scheme from the site²); b) compensation sample (author's photo).

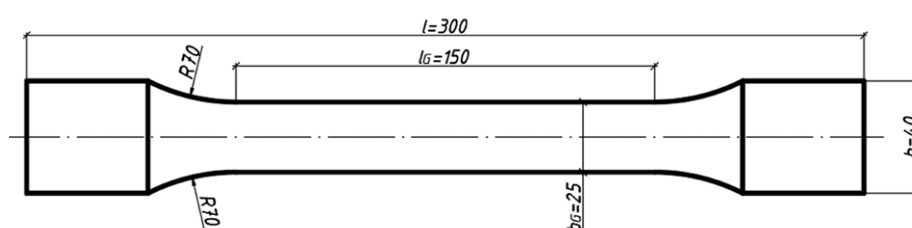


Рис. 5. Геометрические параметры образца для испытаний на растяжение (рисунок автора)

Fig. 5. Geometric parameters of the tensile test sample (author's figure)

¹ ГОСТ Р 54924-2017 (ИСО 8513:2016). Трубы и детали трубопроводов из реактопластов, армированных стекловолокном. Методы определения механических характеристик при осевом растяжении = Glass-reinforced thermosetting plastics pipes and parts of pipelines. Methods for determination of mechanical characteristics under longitudinal tension. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200157211> (дата обращения: 27.01.2025).

² Повный А. Применение моста Уитстона для измерения неэлектрических величин. URL: <https://elektrik.info/main/school/1594-primeneniye-mosta-uitstona-izmereniye-neelektricheskikh-velichin.html> (дата обращения: 27.01.2025).

Испытания выполнены на пяти образцах в универсальной испытательной машине. Образцы вырезаны из стеклопластиковой трубы с объемной долей армирующих волокон 0.75 и матрицей из эпоксидной смолы.

При производстве труб армирующие волокна укладывались по прямой и обратной проходке с углами намотки соответственно 5° и 85° и дополнительным поперечным обвитием, ориентированным вдоль продольной оси труб. Фото-иллюстрация образца № 1 во время проведения испытаний приведена на рис. 6. В ходе испытаний осуществлялся контроль продольных и поперечных деформаций образцов по двум широким граням.



Рис. 6. Испытание образца № 1 на осевое растяжение (фото автора)

Fig. 6. Axial tensile test of sample No. 1 (author's photo)

3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

В ходе испытаний было установлено, что тензорезисторы не позволяют обеспечить измерение деформаций образцов на всем периоде загрузки. Из-за того, что деформирование стеклопластика сопровождается образованием трещин, нарушается целостность прикрепления тензорезистора к образцу непосредственно под ним. В среднем тензорезисторы выдерживали деформации от нагрузки порядка 40 % предельного усилия. Эти данные позволили определить деформативные характеристики материала, необходимые для выполнения предварительных расчетов.

По результатам испытаний пяти образцов были получены значения предельной нагрузки в момент разрушения и относительных продольных и поперечных деформаций материала в рабочей части образцов.

Значения предела прочности образцов определены по формуле:

$$\sigma_{pm} = \frac{F_{pm}}{A_0}, \quad (1)$$

где F_{pm} – максимальная растягивающая нагрузка, Н;

A_0 – площадь поперечного сечения испытываемой части образца до испытаний, мм^2 .

Значения модуля упругости материала образцов определены по формуле:

$$E = \frac{F_2 - F_1}{A_0 \cdot \left(\frac{\Delta \epsilon_{внут.}^{np} + \Delta \epsilon_{нар.}^{np}}{2} \right)}, \quad (2)$$

где F_2 – нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0.3 %, Н;

F_1 – нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0.1 %, Н;

$\Delta \epsilon_{внут.}^{np}$ – приращение продольной относительной деформации образца, измеряемое на внутренней грани образца системой «Тензор МС»;

$\Delta \epsilon_{нар.}^{np}$ – приращение относительной деформации образца, измеряемое на наружной грани образца системой «Тензор МС».

Значения коэффициента Пуассона для материала образцов определены по формуле:

$$\mu = \frac{\Delta \varepsilon_{\text{внут.}}^{\text{np}} + \Delta \varepsilon_{\text{нар.}}^{\text{np}}}{\Delta \varepsilon_{\text{внут.}}^{\text{np}} + \Delta \varepsilon_{\text{нар.}}^{\text{np}}}, \quad (3)$$

где $\Delta \varepsilon_{\text{внут.}}^{\text{np}}$ – приращение поперечной относительной деформации образца, измеряемое на внутренней грани образца системой «Тензор МС»;

$\Delta \varepsilon_{\text{нар.}}^{\text{np}}$ – приращение поперечной относительной деформации образца, измеряемое на наружной грани образца системой «Тензор МС».

Сводные значения механических характеристик материала испытанных образцов, определенные по данным испытаний на растяжение, приведены в таблице 1.

Результаты, приведенные в таблице 1, показывают, что максимальные напряжения в образце составляют не менее 200 МПа. Значение модуля упругости сопоставимы со значениями для бетона класса В25...В45, применяющегося в мостостроении. Значение коэффициента Пуассона в среднем составляет порядка 0.25 (при его значении 0.2 для бетона и 0.3 для стали). Таким образом, характер объемного деформирования стеклопластика под нагрузкой схож с традиционными строительными материалами. Его применение в гибридных по материалу конструкциях, особенно совместно с бетоном, вполне обоснованно.

Таблица 1. Механические характеристики
стеклопластика при растяжении вдоль волокон
Table 1. Mechanical characteristics of fiberglass
in tension along the fibers

№ образца	Предел прочности $\sigma_{\text{с}}$, МПа	Модуль упругости E , ГПа	Коэффициент Пуассона
1	205.2	37.9	0.21
2	202.4	36.6	0.23
3	202.9	34.3	0.25
4	239.4	29.5	0.27
5	206.2	30.9	0.26

Сравнение полученных значений механических характеристик на растяжение с изделиями из пультрузионных профилей показывает, что изделия, изготовленные намоткой, имеют определенные преимущества. Согласно СТО 39790001.03-2007³, значение среднего сопротивления пультрузионного стеклопластика СППС-240 при продольном растяжении – 240 МПа. Средняя прочность стеклопластиковых образцов, изготовленных намоткой, на 20 % ниже. Однако стоит отметить, что данные образцы вырезаны из цельного изделия (трубы), следовательно, они не имеют дополнительного запаса прочности от жесткого пространственного каркаса из волокон, который есть в трубах, изготовленных методом намотки. При этом средний модуль упругости у стеклопластика (33.8 МПа), изготовленного намоткой, на 47 % выше, чем у пультрузионного изделия СППС-240. Значения коэффициента Пуассона у обоих типов стеклопластика практически равны (для СППС-240 – 0.23). В настоящее время автором проводятся исследования механических характеристик образцов, вырезанных из стеклопластиковой трубы, на сжатие и изгиб.

Разброс значений предела прочности обусловлен неровной формой некоторых образцов и в большей степени характеристиками самого материала. В целом образцы соответствовали требованиям ГОСТ Р 54924-2017 в части отклонений в геометрических размерах по длине рабочей части,

³ СТО 39790001.03-2007. Дороги автомобильные общего пользования. Пешеходные мосты и путепроводы. Конструкции дорожно-строительные из композиционных материалов Технические требования, методы испытаний и контроля. URL: <https://informproekt.ru/docs/1304127978/> (дата обращения: 25.01.2025).

но были близки к критическим значениям. Отклонение размеров образцов по длине рабочей части от среднего значения не может оказывать значимого влияния на характеристики упругого деформирования материала. Ввиду значительного разброса значений модуля упругости и коэффициента Пуассона можно сделать вывод, что технология изготовления трубы, из которой были получены образцы для испытаний, требует корректировки.

В целом же испытания показали, что реализованный при испытаниях подход позволяет получать значения модуля упругости и коэффициента Пуассона стеклопластика, изготовленного методом непрерывной намотки, при растяжении материала. Однако данный подход требует доработки для возможности контроля деформаций материала в рабочей части образцов до момента полного их разрушения. Влияние дополнительного поперечного обвития основных армирующих волокон при испытании образцов не выявлено. Возможной причиной этого может быть непосредственное нарушение его целостности ввиду вырезания образцов из трубы. Так как обвитие захватывает несколько основных нитей, его влияние должно быть более заметным в объеме, а не в малых образцах, где оно скорее проявляется как отдельные рубленые волокна.

В ходе непрерывного измерения деформаций образцов в процессе нагружения по данным перемещения захватов были выявлены площадки перегиба деформаций. Для получения качественной картины деформирования образцов были построены графики деформирования до момента разрушения для всех испытанных образцов, и такие площадки были зафиксированы на каждом из них. Для получения полной картины поведения стеклопластика при растяжении один из образцов был подвергнут разгрузке и двум повторными нагружениям. Разгрузка производилась на уровне 80 % от среднего предельного значения, полученного по результатам испытаний предыдущих образцов. Таким образом, получена диаграмма деформирования образца с двумя циклами *загружение – разгрузка* и последующим доведением до разрушения (рис. 7).

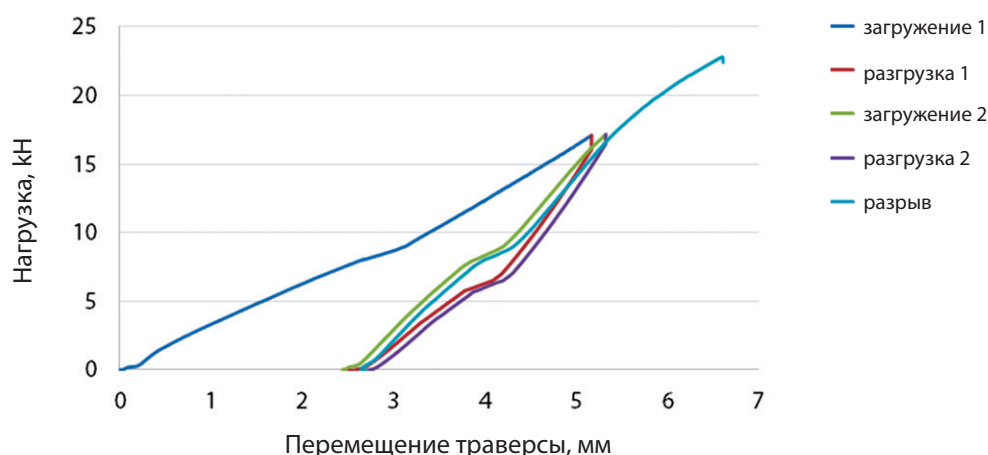


Рис. 7. Диаграмма деформирования образца при растяжении с нагружением и разгрузкой
(график составлен автором)

Fig. 7. Deformation diagram of the sample in tension with loading and unloading (diagram created by the author)

На диаграмме хорошо видно, что при повторном нагружении модуль упругости материала меняется. Это свидетельствует о выключении определенного процента матрицы из общей работы на восприятие растягивающих деформаций из-за появления в ней трещин. Чем выше будет уровень нагружения образца перед последующей разгрузкой, тем больше будут остаточные деформации. Однако для установления величины этих деформаций необходимо обеспечить измерение деформаций непосредственно в рабочей зоне образцов во всем диапазоне нагружения. Картина деформаций,

полученная по перемещениям захватов, позволяет лишь получить качественную картину, но не количественный результат.

Возможной причиной появления характерной точки перегиба на диаграмме деформирования является трещинообразование (нарушение сплошности) в матрице образца, способствующее резкому кратковременному скачку деформаций. Но характерная площадка перегиба имеет одинаковые параметры как при загрузке образца, так и при его разгрузке, а также повторяется при последующем нагружении. Это может свидетельствовать об ошибке фиксации перемещений захватов или о сложном характере деформирования образцов, обусловленном в том числе внутренней структурой материала.

4. Заключение / Conclusions

1. По результатам выполненных работ были получены значения механических характеристик (предел прочности – в среднем 200 МПа, модуль упругости – от 29.5 до 37.9 ГПа, коэффициент Пуассона – от 0.21 до 0.27), подтверждающие целесообразность использования стеклопластиковых труб, изготавливаемых методом намотки, в несущих элементах пролетных строений мостовых сооружений, в том числе включенных в совместную работу с элементами из других материалов (бетона, стали). Полученные данные позволяют выполнить первоначальные расчетные исследования для обоснования нового конструктивного решения для мостового сооружения с несущими элементами из композитных труб.
2. Экспериментальные исследования были проведены на образцах, вырезанных из трубы. Таким образом, целостность пространственного каркаса, который образуют основные армирующие волокна внутри матрицы совместно с дополнительным поперечным обвитием, была нарушена. Поэтому можно ожидать, что цельные секции труб будут иметь более высокие значения прочностных и жесткостных характеристик, чем вырезанные образцы. Подтверждение данной гипотезы является целью дальнейших исследований, направленных на расширение области применения полимерных композитов в мостостроении и увеличение номенклатуры их использования.
3. Выявленный характер деформирования материала при повторных нагружениях указывает на необходимость проведения дополнительных исследований в этом направлении. Хорошо видно, что связь между нагрузкой и деформациями сильно зависит от накопленных в матрице трещин, а значит, модуль упругости материала при статическом нагружении и динамическом могут быть отличными, что, например, характерно для бетона.

Дальнейшему совершенствованию подлежат приборная база и технология контроля деформаций непосредственно в рабочей зоне образцов, испытываемых на растяжение, на всем протяжении нагружения вплоть до разрушения. Это позволит определить параметры площадки перегиба деформаций и установить причину ее появления.



Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The author declares no relevant conflict of interest.

Список литературы

1. Татлыева Г. З., Закиров М. А., Осипова Л. Э. Оценка коррозионной стойкости композиционных материалов на базе смол Norpol Dion. *Вестник Казанского технологического университета*. 2012;15(11):235–239. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ozovol>.
2. Попов С. Н., Ушаков А. Е., Кленин Ю. Г. Перспективы расширения возможностей применения пултрузионных стеклопластиков в строительстве в северных климатических условиях. В сб.: *Физико-технические*

- проблемы добычи, транспорта и переработки органического сырья в условиях холодного климата. 2024. С. 225–227. <https://doi.org/10.24412/cl-37255-2024-1-225-227>
3. Хуанг Чун-Пинь. Моделирование процессов вакуумной инфузии в производстве крупногабаритных композитных конструкций. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2021;(3):172–185. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2021-3-172-185>
 4. Früh N., Knippers J. Multi-stage filament winding: Integrative design and fabrication method for fibre-reinforced composite components of complex geometries. *Composite Structures*. 2021;268:113969. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113969>
 5. Иванов А. Н., Яшнов А. Н. Экспериментальные исследования пролетного строения из полимерного композиционного материала. *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2014;(4):61–70. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=teqrfd>.
 6. Овчинников И. И., Овчинников И. Г., Чесноков Г. В., Михалдыкин Е. С. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 3. Опыт применения полимерных композитных материалов в мостостроении. *Наукоедение*. 2015;7(5):151. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/27TVN515.pdf>.
 7. Ушаков А. Е., Монастырев Е. А., Ермаков В. М., Егоров М. А., Мухина М. А., Кленин Ю. Г. (и др.) Результаты испытаний первого в мире железнодорожного моста с пролетным строением из композиционных материалов. *Путь и путевое хозяйство*. 2021;(10):13–15.
 8. Иванов А. Н., Кожевников В. С. Проблемы применения полимерных композиционных материалов в пролетных строениях железнодорожных мостов. *Химия. Экология. Урбанистика*. 2020;3:94–98. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=xidmrw>.
 9. Уткин В. А., Иванов А. Н., Мартынов А. В. *Пролетное строение с мостовым настилом из пултрузионного профиля*. Российская Федерация. Патент № 2735317C1. 16 декабря 2019. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2735317C1_20201030.
 10. Яшнов А. Н., Иванов А. Н. Струнные пролетные строения для магнитолевитационного транспорта. *Инновационные транспортные системы и технологии*. 2021;7(3):158–168. <https://doi.org/10.17816/transsyst202173158-168>
 11. Николаев А. К., Козйо Веласкес А. Л. Моделирование процесса разрушения стеклопластиковой трубы. *Записки Горного института*. 2017;223:93–98. <https://doi.org/10.18454/PMI.2017.1.93>
 12. Пыринов Б. В., Козьмин Н. А. Сталежелезобетонный автодорожный мост с балками из металлических труб. В сб.: *Совершенствование конструктивных решений пешеходных и автодорожных мостов в условиях Сибирского региона*. Новосибирск: Наука; 2012. С. 101–105.
 13. Zhao L., Burgueno R., La Rovere H., Seible F., Karbhari V. *Preliminary evaluation of the hybrid tube bridge system*. California; 2000. URL: <https://trid.trb.org/View/673592>
 14. Иванов А. Н., Кузьменков П. Ю. Мониторинг технического состояния автодорожного моста через реку Пашенку. *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. 2016;(2):20–27. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26737924>.
 15. Николаев А. К., Лутов В. А. Технология производства композиционных труб методом намотки для нефтегазовой отрасли. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2015;(8-2):50–54. URL: <https://research-journal.org/wp-content/uploads/2015/09/8-2-39.pdf#page=50>.
 16. Яшнов А. Н., Снежков И. И. Развитие систем диагностики и мониторинга мостов. *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. 2020;(3):6–13. URL: <https://elibrary.ru/kyabvu>.

References

1. Tatlyyeva G. Z., Zakirov M. A., Osipova L. E. Evaluation of corrosion resistance of composite materials based on Norpol Dion resins. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2012;15(11):235–239. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ozovol>.
2. Popov S. N., Ushakov A. Ye., Klenin Yu. G. Prospects for expanding the possibilities of application of pultrusion fiberglass plastics in construction in northern climatic conditions. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy dobychi, transporta i pererabotki organicheskogo syr'ya v usloviyakh kholodnogo klimata*. 2024. P. 225–227. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/cl-37255-2024-1-225-227>
3. Jyun-Ping Huang. Modeling of the vacuum infusion processes in the manufacturing of the large polymeric composite structures. *Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences*. 2021; (In Russ.). 2021;(3):172–185. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2021-3-172-185>

4. Fröh N., Knippers J. Multi-stage filament winding: Integrative design and fabrication method for fibre-reinforced composite components of complex geometries. *Composite Structures*. 2021;268:113969. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113969>
5. Ivanov A. N., Yashnov A. N. Experimental research of the superstructure from the polymer composite materials. *Bulletin of Pacific National University*. 2014;(4):61–70. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=teqrfd>.
6. Ovchinnikov I. I., Ovchinnikov I. G., Chesnokov G. V., Mikhaldykin Ye. S. On the problem of calculation of pipe-concrete structures with a shell made of different materials. Part 3. Experience of application of polymer composite materials in bridge construction. *Naukovedenie*. 2015;7(5):151. (In Russ.) URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/27TVN515.pdf>.
7. Ushakov A. Ye., Monastirev Ye. A., Yermakov V. M., Yegorov M. A., Mukhina M. A., Klenin Yu. G. (at al.) Test results of the world's first railroad bridge with composite materials span. *Railway Track and Facilities*. 2021;(10):13–15.
8. Ivanov A. N., Kozhevnikov V. S. Problems of application of polymeric composite materials in superstructure of railway bridges. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika*. 2020;3:94–98. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=xidmrw>.
9. Utkin V. A., Ivanov A. I., Martynov A. V. *Span with bridge flooring made of pultrusion profile*. Russian Federation. Patent No. 2735317C1. 16 December 2019. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2735317C1_20201030.
10. Yashnov A. N., Ivanov A. N. String superstructures for maglev transport. *Modern transportation systems and technologies*. 2021;7(3):158–168. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/transsyst202173158-168>
11. Nikolaev A. K., Coello Velazquez A. L. Modelling of fiberglass pipe destruction process. *Journal of Mining Institute*. 2017;223:93–98. <https://doi.org/10.18454/PMI.2017.1.93>
12. Pyrinov B. V., Koz'min N. A. Steel reinforced concrete road bridge with metal pipe girders. In: *Sovershenstvovaniye konstruktivnykh resheniy peshekhodnykh i avtodorozhnykh mostov v usloviyakh Sibirskogo regiona*. Novosibirsk: Nauka; 2012. P. 101–105. (In Russ.)
13. Zhao L., Burgueno R., La Rovere H., Seible F., Karbhari V. *Preliminary evaluation of the hybrid tube bridge system*. California; 2000. URL: <https://trid.trb.org/View/673592>
14. Ivanov A. N., Kuzmenkov P. Yu. Monitoring the technical state of a road bridge across the Pashenka river. *Siberian Transport University Bulletin*. 2016;(2):20–27. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26737924>.
15. Nikolaev A. K., Lutov V. A. Production technology composite pipes by winding for oil and gas industry. *International Research Journal*. 2015;(8-2):50–54. (In Russ.) URL: <https://research-journal.org/wp-content/uploads/2015/09/8-2-39.pdf#page=50>.
16. Yashnov A. N., Snezhkov I. I. Development of diagnostics and monitoring systems for bridges. *Siberian Transport University Bulletin*. 2020;(3):6–13. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/kyabvu>.



Информация об авторе

Пиняжин Сергей Викторович, аспирант кафедры мостов, инженер Сибирского научно-исследовательского института мостов, Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Российская Федерация, s.v.pinyazhin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5436-2558>

Information about the author

Sergey V. Pinyazhin, Postgraduate in the Department of Bridge, Engineer in the Siberian Research Institute of Bridges, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation, s.v.pinyazhin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5436-2558>

Получена 19 февраля 2025 г., одобрена 25 марта 2025 г., принята к публикации 30 мая 2025 г.

Received 19 February 2025, Approved 25 March 2025, Accepted for publication 30 May 2025