

DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-5-491-503

УДК 69.07

EDN: CXCIKN

Научная статья / Research article

## Несущая способность рамы-подиума для светопрозрачного покрытия атриума

А.Р. Масёнене<sup>1</sup>, С.В. Ключев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, *Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, *Белгород, Россия*

✉ masyonene.ar@gmail.com

Поступила в редакцию: 13 августа 2024 г.

Принята к публикации: 14 октября 2024 г.

**Аннотация.** Объект исследования — прочность и несущая способность элемента светопрозрачного покрытия атриума с каркасом подиума из стеклокомпозита с заполнением пеностеклом. Проведены механические испытания полноразмерного образца с использованием специализированной оснастки для изучения совместной работы опорной стальной конструкции, элемента покрытия и креплений элемента. Метод испытаний по определению несущей способности основан на методике статического испытания многослойного композитного материала на сжатие. Испытание осуществлялось в лабораторных условиях на сертифицированном оборудовании. В ходе испытаний фиксировались нагрузка, поведение и прогиб образца. Испытание проводилось до разрушения образца. Определена несущая способность каркаса подиума из стеклопластика. Получен график зависимости прогиба элемента покрытия от нагрузки. Испытания подтвердили возможность применения каркаса подиума из стеклокомпозита с заполнением пеностеклом для светопрозрачного покрытия атриума. Несущая способность каркаса подиума из стеклокомпозита с заполнением пеностеклом значительно превышает расчетные нагрузки при эксплуатации. Получены характеристики разрушения мест крепления конструкции. Усиление отверстий креплений конструкции может рассматриваться как одно из перспективных направлений дальнейших исследований. Рассмотрены перспективы исследований элемента светопрозрачного покрытия атриума из стеклокомпозита с заполнением пеностеклом.

**Ключевые слова:** строительные конструкции, стеклопластиковый композит, прочность, трансформируемый атриум, стеклокомпозитные конструкции, стеклопластик (GFRP)

**Заявление о конфликте интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Нераздельное соавторство.

**Для цитирования:** Масёнене А.Р., Ключев С.В. Несущая способность рамы-подиума для светопрозрачного покрытия атриума // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2024. Т. 20. № 5. С. 491–503. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-5-491-503>

*Масёнене Александра Руслановна*, аспирант, старший преподаватель кафедры информационных систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 6143-2194, ORCID: 0000-0001-7811-3855; e-mail: masyonene.ar@gmail.com

*Ключев Сергей Васильевич*, доктор технических наук, профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 5944-3648, ORCID: 0000-0002-1995-6139; e-mail: klyuyev@yandex.ru

© Масёнене А.Р., Ключев С.В., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

# Load-Bearing Capacity of Podium Frame for Translucent Atrium Roof

Aleksandra R. Masenene<sup>1</sup>✉, Sergey V. Klyuev<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, *Saint Petersburg, Russia*

<sup>2</sup> Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov, *Belgorod, Russia*

✉ masyonene.ar@gmail.com

Received: August 13, 2024

Accepted: October 14, 2024

**Abstract.** The object of the study is the strength and load-bearing capacity of an element of a translucent atrium roof with a podium frame made of glass composite filled with foam glass. Mechanical tests were carried out on a full-scale sample using specialized equipment to study the joint operation of the load-bearing steel structure, roof element and element fastening. The test method for determining load-bearing capacity is based on the method of static compression testing of a multilayer composite material. The test was carried out in laboratory conditions using certified equipment. The following parameters were tracked during the tests: load, deformation behavior, and deflection of the sample. The test was carried out until the sample was destroyed. Results. The load-bearing capacity of the podium frame made of fiberglass has been determined. A graph of the relationship between deformation (deflection) of the element and the load was obtained. The tests confirmed the possibility of using a podium frame made of glass composite filled with foam glass for a translucent atrium roof. The load-bearing capacity significantly exceeds the design loads during operation. The characteristics of failure of the fastening locations in the structure were obtained. Strengthening the fastening holes of the structure can be considered as one of the promising areas for further research. The directions for future studies of the element of the translucent atrium roof made of glass composite filled with foam glass are considered.

**Keywords:** building structures, fiberglass composite, strength, transformable atrium, glass composite structures, glass fiber reinforced plastic (GFRP)

**Conflicts of interest.** The author declares that there is no conflict of interest.

**Authors' contribution.** Undivided co-authorship.

**For citation:** Masenene A.R., Klyuev S.V. Load-bearing capacity of podium frame for translucent atrium roof. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024;20(5):491–503. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-5-491-503>

## Введение

В архитектуре образовательных учреждений прослеживается тенденция применения трансформируемых атриумов, то есть открытых пространств между блоками учебных зданий с круглогодичным использованием. Для эффективного использования таких пространств их покрывают светопрозрачными конструкциями различной конфигурации и конструктивных решений.

Термин «Атриум» происходит от древнегреческого «Атрий» и означает открытый внутренний двор в жилом здании, в который выходят внутренние помещения дома [1].

В исследованиях все чаще упоминается «Атриум» как коммуникационное и рекреационное пространство на полную высоту здания с покрытием светопрозрачной конструкцией. В связи с изменением понимания атриума в архитектуре произошло и изменение его конструктивных решений. Открытые атриумы уступили место трансформируемым по назначению пространствам, перекрытым светопрозрачными конструкциями. В таких атриумах проводят собрания, устраивают общешкольные мероприятия, концерты, располагают зоны для самостоятельных занятий, чтения и отдыха.

Так как к проектированию образовательных учреждений предъявляются повышенные требования безопасности, разработка конструктивных решений для светопрозрачных покрытий атриумов, соответствующих требованиям прочности и долговечности, является важной научной проблемой. Одним из примеров школьных зданий, спроектированных с трансформируемым светопрозрачным

*Aleksandra R. Masenene*, Postgraduate student, Senior Lecturer at the Department of Information Systems and Technologies, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia; eLIBRARY SPIN code: 6143-2194, ORCID: 0000-0001-7811-3855; e-mail: masyonene.ar@gmail.com

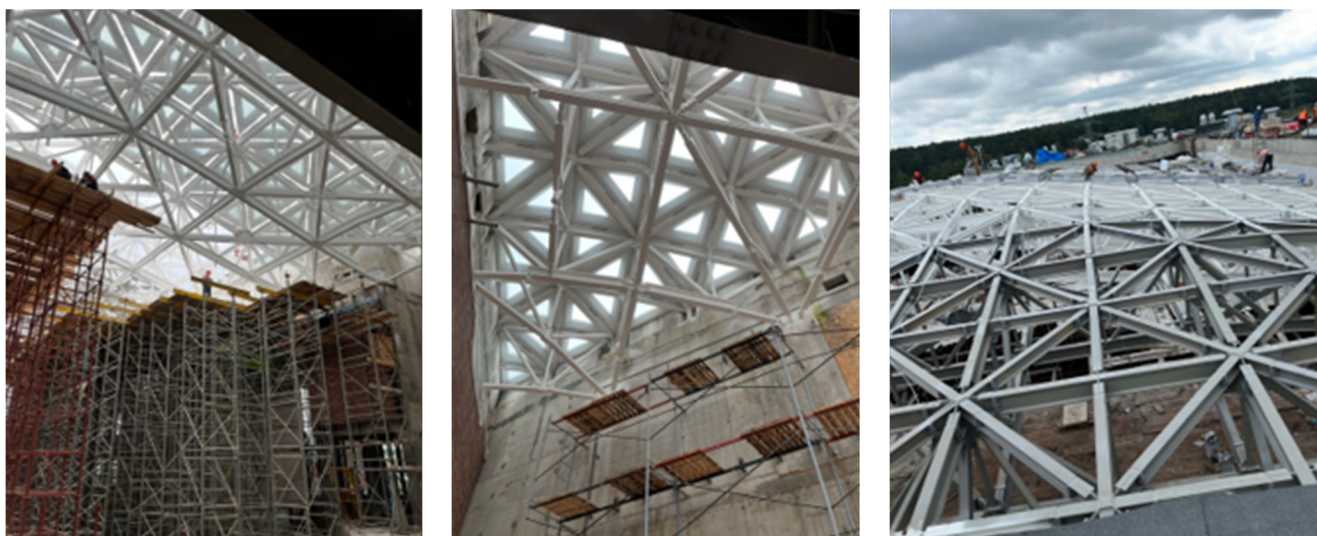
*Sergey V. Klyuev*, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Theoretical Mechanics and Resistance of Materials, Equipment and Complexes of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov, Belgorod, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 5944-3648, ORCID: 0000-0002-1995-6139; e-mail: klyuev@yandex.ru

атриумом, является гимназия имени Е.М. Примакова, расположенная в Московской области (деревня Раздоры, Российская Федерация).

В исследовании рассматривается конструктивное решение светопрозрачного покрытия атриума школы имени Е.М. Примакова и результаты его испытания на прочность.

В связи со сложной конфигурацией атриума, значительной площадью покрытия и малыми уклонами прямое опирание алюминиевых рам светопрозрачных элементов на металлоконструкции покрытия не удовлетворяло условиям эксплуатации перекрываемого атриума, поэтому возникла необходимость разработки нового конструктивного решения элемента светопрозрачного покрытия. Для решения данной задачи был разработан конструктивный элемент — рама-подиум из стеклокомпозита. Внутреннее пространство рамы заполнялось энергоэффективным пеностеклом.

На рис. 1 представлено фото металлоконструкций покрытия атриума в период строительства.



**Рис. 1.** Конструкции атриума

И с т о ч н и к: фото А.Р. Масёнене, С.В. Ключева

**Figure 1.** Atrium structures

S o u r c e: photo by A.R. Masenene, S.V. Klyuev

Одним из критериев для разработки конструктивного решения элемента покрытия эксплуатируемого круглогодично атриума являлось снижение теплопроводности покрытия, что важно для уменьшения выпадения конденсата, поэтому в качестве материала был выбран стеклокомпозит, обладающий значительно меньшей теплопроводностью по сравнению с традиционными материалами, такими как сталь, алюминий, ПВХ<sup>1</sup>. Разработанная конструкция из стеклокомпозита заполнялась пеностеклом для увеличения прочности и несущей способности элемента, что позволило также снизить его теплопроводность.

Автором рассмотрена конструкция светопрозрачного элемента покрытия атриума, приведены результаты его испытаний на прочность.

### ***Обзор исследований прочности стеклокомпозитных материалов***

В [3] было применено двухпараметрическое распределение Вейбулла для стандартизации широко рассредоточенных значений прочности на излом в условиях квазистатического испытания на растяжение композита, армированного Е-стеклом.

<sup>1</sup> См.: Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. Научные основы и технологии. 2008. 820 с. EDN: RBBLIB

В [4] выполнен анализ методом конечных элементов и моделирование в качестве метода анализа отказов, чтобы понять сложное поведение композитного материала с полимерной матрицей при разрушении.

В [5] предпринята попытка изготовить композиты E-стекло/эпоксидная смола с тремя различными ориентациями ламината. Изготовленные образцы были испытаны на прочность, растяжение и изгиб. Экспериментальные результаты были проверены с помощью программного обеспечения ANSYS.

В [6] экспериментально исследовано влияние архитектуры волокна на механические свойства полимерного композита, армированного стекловолокном E. Влияние объемной доли волокна на прочность композита было предсказано с использованием моделей полиномиальной регрессии второго порядка.

В [7] сравниваются результаты различных механических испытаний стекловолоконного композита с обычной сталью. Оценивались прочность на растяжение, прочность на изгиб, ударная вязкость, усталостная прочность с использованием соответствующей экспериментальной техники. Также результаты эксперимента сравниваются с результатами, полученными с применением ANSYS R15.

В [8] образцы из стекловолокна / эпоксидной матрицы, выполненные с разной ориентацией волокон и толщиной, подвергаются испытаниям с целью определения их прочности на растяжение, прочности, ударной вязкости и модуля упругости Юнга.

Исследование [9] сосредоточено на изучении механических свойств гибридных полимерных композитов. Результаты испытаний показывают, что максимальная прочность на растяжение и сжатие, наблюдаемая у 40 % волокна из E-стекла с 60 % эпоксидной матрицы, составляет соответственно 254,964 МПа и 37,52 МПа. Максимальная прочность на изгиб, наблюдаемая у композитов, армированных E-стеклом, составляет 250,43 МПа.

В [10] сделан обзор исследований композитных материалов из стекловолокна и эпоксидной смолы. Отмечено большое количество исследований, связанных с производством таких материалов. Однако ограничено число исследований для анализа поведения при растягивающей, сдвиговой и изгибающей нагрузке.

В [11] исследуется влияние геометрии материала с точки зрения толщины на механические свойства изофталевых полиэфиров, армированных стекловолокном. Исследовались прочность на растяжение, прочность на изгиб и твердость по Барколу. Экспериментальные испытания показывают, что прочность на разрыв и твердость увеличивается, а прочность на изгиб снижается с увеличением толщины ламинатов. Уменьшение межфазного сцепления с увеличением толщины ламината визуализируется при микроструктурных исследованиях изображений с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM).

В [12] исследуется возможность восстановления и повторного использования стекловолокна из производственных отходов и композитов с истекшим сроком эксплуатации.

Цель исследования [13] — анализ прочностных свойств и малоцикловых динамических испытаний композиционных материалов, модифицированных стеклянными и базальтовыми волокнами. В качестве прочностных испытаний проводились статические испытания на растяжение, ударные испытания и определение петель механического гистерезиса. Результаты показали, что композиты с базальтовым волокном имеют более высокую прочность на разрыв и почти в два раза повышенный модуль Юнга.

В [14] рассматривается исследование полимерно-стеклянного композита при растяжении с целью определения изменений его прочностных характеристик. Рассмотрены механические свойства и особенности зон повреждения, важные для эксплуатации и оценки технического состояния деталей из этого материала. Основное внимание уделялось модулю Юнга, пределу упругости, пределу текучести и пределу прочности при растяжении.

В [15] рассматриваются синтез, а также механические свойства (прочность на растяжение, свойства при изгибе и усталость) стеклоэпоксидных, а также стекловинилэфирных композитов. Результаты

анализа усталости композитов указывают на более быстрый рост трещин и дефектов при более высоких частотах, что приводит к быстрому снижению уровня напряжений в испытуемом образце. Статистический анализ проводился для установления взаимной корреляции между механическими и физическими свойствами.

В [16] описывается, как детальное исследование и измерение «зеркальных зон» на поверхностях излома волокон можно применять для оценки их прочности в момент разрушения композита. При исследованиях прочности волокон стеклоцементных композитов и армированных пластиков использовался метод сканирующей электронной микроскопии.

В [17] были проведены испытания композитов на основе эпоксидной и полиэфирной смолы с использованием карбида кремния в различных пропорциях и стеклопластика на растяжение, удар и изгиб. Были исследованы их механические свойства, такие как предел текучести, деформация текучести, модуль Юнга, модуль упругости при изгибе и энергия удара. Результаты показывают, что композиты с эпоксидной смолой демонстрируют более высокие прочность и модуль Юнга по сравнению с композитами с полиэфирной смолой.

В [18] изучалось влияние ориентации волокон на механические свойства полимера, армированного углеродом/Е-стеклом. Образцы представляли собой Е-стекло/углеродное волокно с полиэфирной смолой, приготовленное методом ручной укладки. Образцы подвергались растяжению и изгибу, а также ударной нагрузке.

В [19] полимер, армированный однонаправленным стекловолокном (GFRP), испытывается с использованием ударной системы падающего груза Instron. Приводятся квазистатические свойства стеклопластика и стекловолокна. Обсуждаются реакции напряжения-деформации при различных скоростях деформации и повышенных температурах. Статистическая модель Вейбулла используется для количественной оценки степени изменчивости прочности на разрыв и получения параметров Вейбулла для инженерных приложений.

В исследовании [20] изучается воздействие УФ-излучения на стеклопластик в камере ускоренного старения. Композиты прошли механические испытания на растяжение и изгиб, а химические и физические изменения в композите были оценены с помощью инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье, термогравиметрического анализа и оптической микроскопии.

В [21] произвольно ориентированные полиэфирные композитные ламинаты, армированные матом из коротких волокон, погруженные в естественную морскую воду на различные периоды времени, были испытаны на статическую и циклическую усталостную нагрузку в условиях трехточечного изгиба. Кривые Велера, полученные в результате повторяющихся усталостных испытаний, были построены для различных периодов времени погружения. Сравнение различных математических моделей кривых выносливости показывает, что уравнение Велера дает хорошее представление о средней части кривой.

В экспериментальной работе [22] были проведены механические испытания на растяжение, на изгиб, на удар, на твердость трех видов композитов. Для армирования образцов использовались стеклянные волокна, такие как стекловолокно, гибридное волокно WRM и волокно CSM с использованием терморезактивного материала ненасыщенного полиэфира. Тканый ровинговый мат (Е-стекловолокно) обладает хорошими механическими свойствами по сравнению с другими полимерными и гибридными композитами, армированными рубленным матом.

Приведенные исследования показывают перспективность и актуальность исследований в области разработки новых конструктивных решений с использованием стеклокомпозитных материалов для улучшения характеристик конструкций и экономии металла.

Цель данной работы — анализ прочности и несущей способности элемента светопрозрачного покрытия атриума с рамой-подиумом из заполненного пеностеклом стеклокомпозита на примере элемента покрытия атриума в школе имени Е.М. Примакова в Московской области (Одинцовский городской округ, деревня Раздоры, Утренняя улица, д. 1, Российская Федерация).

Для достижения цели исследования были поставлены следующие задачи:

- 1) рассмотреть характеристики и способы испытаний стеклокомпозитных материалов;
- 2) проанализировать научные исследования в области прочности стеклокомпозитных материалов;
- 3) исследовать конструкцию элемента покрытия атриума на предельную нагрузку;
- 4) сделать выводы по полученным результатам.

## 2. Методы

Композиционными материалами принято считать такие материалы, которые состоят из двух или более компонентов, нерастворимых друг в друге, при этом свойства итогового материала не идентичны сумме свойств, его составляющих.

В состав стеклокомпозита входит два основных типа компонентов: связующее (полимерная смола-матрица) и армирующее вещество (стекловолокно, стеклоткань, ровинг). Связующее покрывает и пропитывает армирующий компонент, фиксирует его и придает форму. Армирующий компонент усиливает свойства матрицы. Наиболее распространены следующие виды связующих: полиэфир, эпоксида и фенолы. Связующие можно разделить на термопласты (способные размягчаться и затвердевать в зависимости от температуры) и реактопласты, термореактивные смолы (связующие затвердевают в процессе формования изделия). Наибольшее распространение получили термореактивные связующие<sup>2</sup>.

У стеклополимеров высокая механическая прочность, они выдерживают не менее 2269 кг/см<sup>2</sup> без ущерба для физико-механических показателей.

Критерием выбора матрицы является стоимость, а также требования к несущей способности элемента конструкции.

При изготовлении образца для заполнения конструктивной полости было использовано пеностекло марки «Foamglass T3+», что позволило повысить прочность конструкции и ее теплоизоляционные свойства [23–25].

«Foamglass T3+» производства Owens Corning FOAMGLAS®, Тессендерло (Бельгия) обладает следующими характеристиками [26]:

- плотность — 100 кг/м<sup>3</sup>;
- теплопроводность  $\lambda_B$  — 0,039 Вт/м·°С;
- предел прочности на сжатие — 53 т/м<sup>2</sup>;
- предел прочности при изгибе — 31,6 т/м<sup>2</sup>;
- водопоглощение — не более 0,5 кг/м<sup>2</sup>;
- класс горючести по EN 13501–01: Еврокласс А1 (негорючий материал, не выделяющий токсичных газов);
- толщина плиты — 50 мм.

Для заполнения конструкции плита из пеностекла распиливалась на блоки по форме заполняемой полости.

### *Методика проведения испытания*

Испытание полноразмерного образца элемента конструкции из композитных материалов проводилось на универсальной испытательной машине с сервогидравлической испытательной системой Magnum марки Biss UT-05-2000 производства компании “Biss” (Bangalore Integrated System Solutions (P) Ltd.), Bangalore, Индия, 2014 г., регистрационный номер СИ: 56317-14.

Фото испытательной машины представлено на рис. 2. Максимальная испытательная нагрузка машины составляет 2000 кН.

<sup>2</sup> *Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г.* Полимерные композиционные материалы: учебное пособие. Томский политехнический университет, 2013. Ч. 1. 118 с.



Для измерения линейных прогибов поверхности образца применялись прогибомеры Аистова — Овчинникова ПАО-6 производства АО «Измерон», г. Санкт-Петербург, РФ. Схема установки прогибомеров изображена на рис. 3.

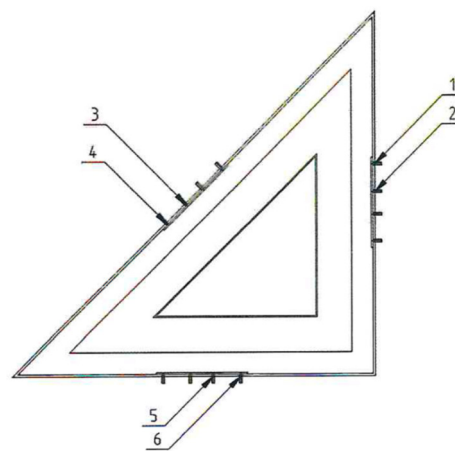


**Рис. 2.** Универсальная испытательная машина UT-05-2000

Источники: фото А.Р. Масёнене, С.В. Ключева

**Figure 2.** Universal testing machine UT-05-2000

Source: photo by A.R. Masenene, S.V. Klyuev



**Рис. 3.** Схема расположения прогибомеров ПАО-6:

1 — положение датчика № 1; 2 — положение датчика № 2;  
3 — положение датчика № 3; 4 — положение датчика № 4;

5 — положение датчика № 5; 6 — положение датчика № 6

Источники: фото А.Р. Масёнене, С.В. Ключева

**Figure 3.** Layout of deflectometers PAO-6:

1 — position of sensor No. 1; 2 — position of sensor No. 2;

3 — position of sensor No. 3; 4 — position of sensor No. 4;

5 — position of sensor No. 5; 6 — position of sensor No. 6

Source: made by A.R. Masenene, S.V. Klyuev

Перед испытанием образец выдерживался в помещении, в котором затем проводилось испытание, в течение 72 ч.

Образец испытывался в специально разработанной специализированной оснастке, общий вид образца, закрепленного на оснастке, представлен на рис. 4.

Оснастка представляет собой сборную раму из стального профиля квадратного сечения с приспособлениями для крепления снизу и штатными креплениями для образца, которые обеспечивали его шарнирное опирание.

Для проведения испытания на платформу испытательной машины сначала устанавливалась оснастка, которая крепилась к платформе креплениями с болтовым соединением. Диаметр болтов для крепления — 12 мм. Затем к оснастке монтировался образец и крепился штатными креплениями.

При проведении испытания различались следующие предельные состояния конструкции:

— для изгибаемых конструкций принято, что предельное состояние наступило, если:

- прогиб достиг величины  $L/20$  или
- скорость нарастания деформаций достигла  $L2/(9000 \cdot h)$  см/мин,

где  $L$  — пролет, см;  $h$  — расчетная высота сечения конструкции, см.

Для испытываемых образцов  $L = 284$  см,  $h = 25$  см; предельный прогиб — 14,20 см; предельная скорость нарастания деформаций — 0,36 см/мин.

*Образец испытаний* — элемент конструкции светопрозрачного покрытия атриума, состоящий:

- 1) из плиты из упрочненной фанеры толщиной 90 мм;
- 2) рамы-подиума из стеклокомпозита с заполнением пеностеклом «Foamglass T3+».

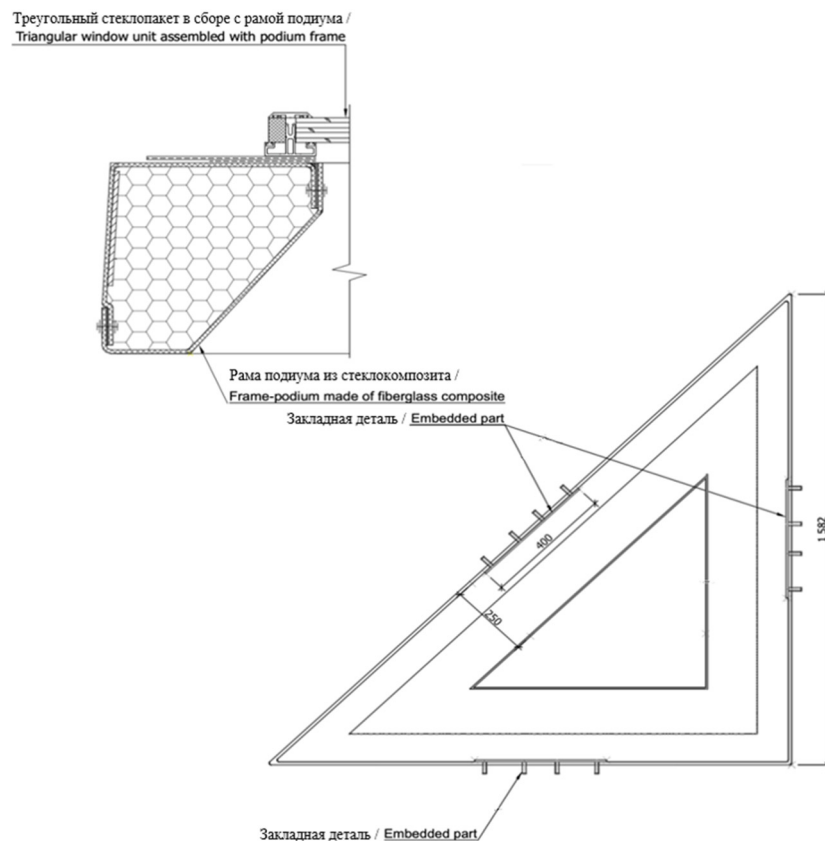
Общие габаритные размеры образца 1548×1548 мм, высота конструкции — 250 мм. Фото образца представлено на рис. 5, чертеж образца — на рис. 6.



**Рис. 4.** Расположение образца с оснасткой на опорной плите испытательной машины  
И с т о ч н и к: фото А.Р. Масёнене, С.В. Клюева  
**Figure 4.** Position of the sample with equipment on the base plate of the testing machine  
S o u r c e: photo by A.R. Masenene, S.V. Klyuev



**Рис. 5.** Образец для испытания (элемент конструкции светопрозрачного покрытия)  
И с т о ч н и к: фото А.Р. Масёнене, С.В. Клюева  
**Figure 5.** Sample (element of translucent roof structure)  
S o u r c e: photo by A.R. Masenene, S.V. Klyuev



**Рис. 6.** Чертеж образца элемента конструкции светопрозрачного покрытия  
И с т о ч н и к: выполнено А.Р. Масёнене, С.В. Клюева  
**Figure 6.** Drawing of sample element of translucent roof structure  
S o u r c e: made by A.R. Masenene, S.V. Klyuev



Плита из упрочненной фанеры жестко крепилась сверху образца, повторяя его форму, и использовалась для равномерного распределения нагрузки от испытательной машины на испытуемый образец.

Порядок проведения испытания:

- 1) обмеры образца;
- 2) монтаж и крепление оснастки;
- 3) монтаж образца с креплением к оснастке;
- 4) нагружение образца;
- 5) регистрация данных испытаний;
- 6) снятие нагрузки;
- 7) демонтаж и обследование образца;
- 8) описание результатов.

Испытание проводилось в два этапа. На каждом этапе проводилась регистрация зависимости между нагрузкой  $P$  и перемещением траверсы  $\Delta l$  с формированием диаграммы зависимости. Фиксация и обработка результатов замеров проводились в реальном времени, что позволило построить зависимость между нагрузкой и прогибом.

Фото образца, закрепленного на платформе испытательной машины, представлено на рис. 7.

Прогибомеры крепились для фиксации значений перемещений конструкции в узлах штатных креплений образца к оснастке. Для снятия показаний по вертикальной плоскости использовались прогибомеры № 1, 3, 5; по горизонтальной плоскости прогибомеры № 2, 4, 6. Фото узлов крепления с установленными прогибомерами представлено на рис. 8.



**Рис. 7.** Установка образца в испытательной машине, С.В. Клюева  
Источник: фото А.Р. Масёнене

**Figure 7.** Installing the sample in the testing machine

Source: photo by A.R. Masenene, S.V. Klyuev



*a*



*b*



*c*

**Рис. 8.** Размещение прогибомеров при испытании:  
*a* — узел 1; *b* — узел 2; *c* — узел 3

Источник: фото А.Р. Масёнене, С.В. Клюева

**Figure 8.** Placement of deflexometers during testing:

*a* — node 1; *b* — node 2; *c* — node 3

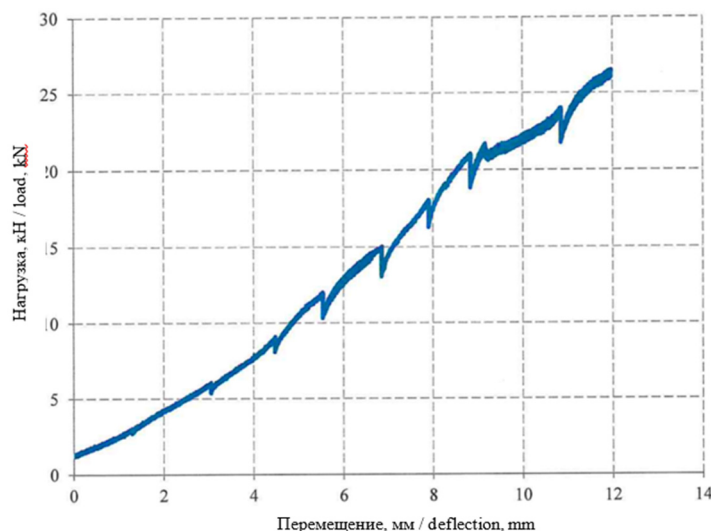
Source: photo by A.R. Masenene, S.V. Klyuev

В процессе испытаний регистрировались напряжение, поведение и прогиб образца.

Первый этап испытания проводился для контроля выполнения условия работы при расчетной нагрузке с учетом коэффициента запаса. Максимальное усилие 24 кН, скорость 0,5 мм/мин. Усилие прикладывалось ступенями с увеличением нагрузки на 3 кН за шаг и выдержкой 2 мин между шагами.

Значения линейных перемещений для испытания № 1 регистрировались на ступенях выдержки, указанных в табл. 1. Скорость нагружения в ходе испытания составляла 0,5 мм/мин до заданного значения ( $P1 = 24$  кН).

На рис. 9 показана кривая зависимости, полученная при испытании № 1.



**Рис. 9.** График зависимости прогиба конструкции от нагружения (испытание № 1)

Источники: выполнено А.Р. Масёне, С.В. Ключева

**Figure 9.** Graph of structure deflection versus load (test No. 1)

Source: made by A.R. Masenene, S.V. Klyuev

Таблица 1 / Table 1

**Измеренные показатели (результаты испытания № 1) /  
Measured characteristics (test results No. 1)**

Этап нагружения / Loading stage	№ узла / Node No.	Значения приращений перемещений на каждом этапе нагружения / Values of displacement increments at each loading stage					
		1		2		3	
	Нагрузка, кН / № датчика / Load, kN / Sensor No.	1	2	3	4	5	6
0	0	0	0	0	0	0	0
1	3	-0,13	-0,67	0,01	0,45	-0,07	-0,53
2	6	-0,48	-0,5	-0,03	0,45	-0,44	-2,16
3	9	-0,44	-0,38	-0,09	0,6	-0,73	-2,75
4	12	-0,28	0,04	-0,76	0,9	-0,88	-3,31
5	15	-0,85	0,48	-1,58	1,17	-1,11	-4,06
6	18	-0,43	0,6	-0,58	1,02	-1,39	-4,64
7	21	-0,04	1,04	-0,58	0,92	-1,84	-5,25
8	24	-0,38	2,34	-2,46	1,22	-3,49	-7,24

Второй этап испытания включал в себя определение предельной нагрузки на конструкцию.

Усилие прикладывалось до разрушения конструкции ступенями с увеличением нагрузки на 3,5 кН за шаг и выдержкой 2 мин между шагами.

Значения линейных перемещений для испытания № 2 регистрировались на ступенях выдержки, указанных в табл. 2. Скорость нагружения в ходе испытания составляла 2,0 мм/мин до заданного значения ( $P2 = 35$  кН).

Определение несущей способности и прогиба, соответствующих пределу упругой работы конструкции, производилось при нагружении образца до разрушения со скоростью 2,0 мм/мин.

На рис. 10 показана кривая зависимости полученная при испытании № 2.

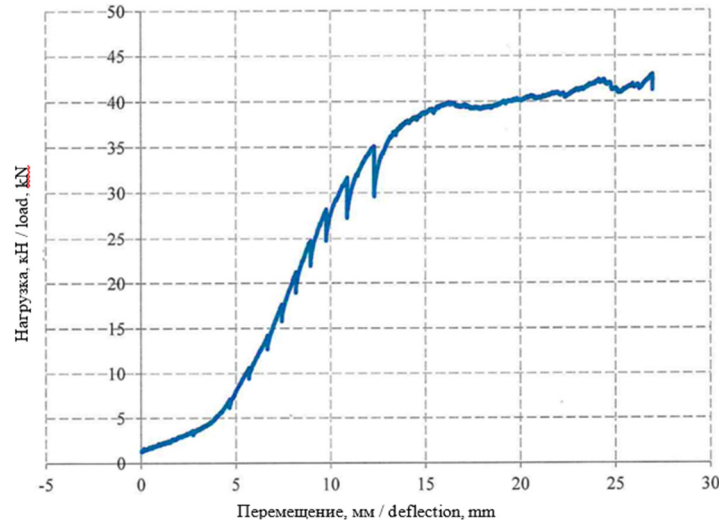


Рис. 10. График зависимости прогиба конструкции от нагружения (испытание № 2)

И с т о ч н и к : выполнено А.Р. Масёнене, С.В. Ключева

Figure 10. Graph of structure deflection versus load (test № 2)

S o u r c e : made by A.R. Masenene, S.V. Klyuev

Таблица 2 / Table 2

Измеренные показатели (результаты испытания № 2) /  
Measured characteristics (test results No. 2)

Этап нагружения / Loading stage	№ узла / Node No.	Значения приращений перемещений на каждом этапе нагружения / Values of displacement increments at each loading stage					
		1		2		3	
	Нагрузка, кН / № датчика / Load, kN / Sensor no.	1	2	3	4	5	6
0	0	0	0	0	0	0	0
1	3,5	-0,02	0,10	-	0,50	-0,97	1,43
2	7	-0,33	0,27	-	0,99	-1,93	3,13
3	10,5	-0,70	0,69	-	1,17	-2,38	4,07
4	14	-1,10	1,14	-	1,32	-2,91	5,00
5	17,5	-1,50	1,58	-	1,34	-3,36	5,68
6	21	-2,06	2,09	-	1,28	-3,78	6,35
7	24,5	-2,83	2,63	-	1,10	-4,18	7,05
8	28	-3,79	3,27	-	0,83	-4,64	7,82
9	31,5	-4,93	4,10	-	0,33	-5,27	8,98
10	35	-6,48	5,26	-	-0,40	-5,96	10,42

### 3. Результаты и обсуждение

Результаты испытания образца представлены в табл. 1 и 2.

По результатам испытания № 1: при достижении заданного значения нагрузки ( $P_1 = 24$  кН) в ходе проведения испытания, деформации образца можно охарактеризовать как упругие. Видимых признаков пластической деформации обнаружено не было.

По результатам испытания № 2: несущая способность составила  $3397,71$  кг/м<sup>2</sup>, прогиб, соответствующий упругой работе конструкции, составил  $12,87$  мм.

Отрицательные значения приращения перемещений в табл. 1–2 указывают на перемещение точки закрепления вдоль вертикальной оси и в направлении, противоположном направлению приложения нагрузки.

Датчик № 3 в ходе испытания № 2 был выведен из строя.

Предельный прогиб по расчету составляет  $14,20$  см, что значительно превышает прогиб конструкции, полученный при испытании  $1,29$  см.

### 4. Заключение

В статье проанализированы научные исследования в области изучения прочности стеклокомпозитов и конструкций из них.

Проведены экспериментальные исследования прочности элемента светопрозрачного покрытия, содержащего раму-подиум из стеклокомпозита.

Получены следующие результаты:

1) определен предел несущей способности стеклокомпозитной рамы-подиума, который составил  $3397,71$  кг/м<sup>2</sup>;

2) кривая зависимости прогиба элемента от нагружения;

3) определены перспективные направления исследований рамы-подиума из стеклокомпозита для светопрозрачного покрытия атриума.

Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

– анализ научных исследований показал, что проблема мало изучена и является актуальной;

– экспериментальные исследования несущей способности подтвердили возможность использования рамы-подиума из стеклокомпозита для светопрозрачного покрытия атриума.

Необходимы дальнейшие исследования долговечности конструкции элемента рамы-подиума для обоснования применения элементов конструкций из стеклокомпозитов в светопрозрачных покрытиях атриумов.

### References / Список литературы

1. Masenene A.R. Fire-resistant frame-podium for the translucent covering of the atrium. *AlfaBuild*. 2023;4(29):2907. <https://doi.org/10.57728/ALF.29.7>

2. Mikhailin Yu.A. *Fibrous polymer composite materials in engineering*. St.-Petersburg: Scientific foundations and Technologies Publ.; 2013. (In Russ.) EDN: QIONUK

Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. Санкт-Петербург: Научные основы и технологии. 2013. 715 с. EDN: QIONUK

3. Jeong Y.J., Kim H.T., Kim J.D., Kim J.H., Kim S.K., Lee J.M. Evaluation of mechanical properties of glass fiber-reinforced composites depending on length and structural anisotropy. *Results in Engineering*. 2023;17:101000. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101000>

4. Noman A., Shohel S.M., Riyad S. Study to analyze the mechanical strength of composite glass fiber laminated with resin epoxy, resin polyester, and PVC foam under tensile loading conditions by numerically using finite element analysis via Ansys. *Materials Today Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.062>

5. Jariwala H., Jain P., Maisuriya V. Experimental and statistical analysis of strength of glass fiber reinforced polymer composite for different fiber architecture. *Polymer Composites*. 2021;42:1407–1419. <https://doi.org/10.1002/pc.25911>

6. Kalia S., Gurau V.S., Kumar A. Experimental study of tensile strength of glass-epoxy composites at different laminate orientations. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science*. 2018;4(8):590–593. <http://doi.org/10.22161/ijaems.4.8.2>

7. Pandav P.A., Sawant D.A. Experimental evaluation and analysis of glass fiber reinforced composite under mechanical loading by using FEA software. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2017;1(10). Available from: [https://www.ripublication.com/irph/ijert\\_spl117/ijertv10n1spl\\_127.pdf](https://www.ripublication.com/irph/ijert_spl117/ijertv10n1spl_127.pdf) (accessed: 14.07.2024).
8. Kotla S., Rachana K. Development and testing of glass fibre reinforced composites. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*. 2020;5(4):450–455. Available from: <https://www.ijeast.com/papers/450-455,Tesma504,IJEAST.pdf> (accessed: 14.07.2024).
9. Mekonen S.W., Palani S., Ravi B., At Naw S.M., Desta M., Regassa Y. Mechanical properties of bone particulate and E-glass fiber reinforced hybrid polymer composite. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022;7. <https://doi.org/10.1155/2022/5902616>
10. Chavan V.B., Gaikwad M.U. Review on development of glass fiber/epoxy composite material and its characterizations. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*. 2016;5(6). Available from: <https://www.strandek.co.uk/wp-content/uploads/2020/09/Glass-fibre-and-epoxy-composites-review.pdf> (accessed: 14.07.2024).
11. Bhat R., Mohan N., Sharma S., Pratap A., Keni A.P., Sodani D. Mechanical testing and microstructure characterization of glass fiber reinforced isophthalic polyester composites. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019;8(4):3653–3661. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.003>
12. Thomason J., Jenkins P., Yang L. Glass fibre strength: a review with relation to composite recycling. *Fibers*. 2016;4(2):18. <https://doi.org/10.3390/fib4020018>
13. Bednarowski D., Bazan P., Kuciel S. Enhancing strength and sustainability: evaluating glass and basalt fiber-reinforced biopolyamide as alternatives for petroleum-based polyamide composite. *Polymers*. 2023;15(16):3400. <https://doi.org/10.3390/polym15163400>
14. Szymczak T., Kowalewski Z.L. Strength tests of polymer-glass composite to evaluate its operational suitability for ballistic shield plates. *Eksploatacja i Niezawodność — Maintenance and Reliability*. 2020;22(4):592–600. <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2020.4.2>
15. Singh M.M., Kumar H., Kumar G.H. Determination of strength parameters of glass fibers reinforced composites for engineering applications. *Silicon*. 2020;12(1–11). <https://doi.org/10.1007/s12633-019-0078-3>
16. Jaras A.C., Norman B.J., Simmens S.C. The measurement of glass fibre strength in composites from studies of their fracture surfaces. *Journal of Materials Science*. 1983;18:2459–2465. <https://doi.org/10.1007/BF00541852>
17. Palle R.R., Schuster J., Shaik Y.P., Kazmi M. Fabrication and characterization of glass fiber with SiC reinforced polymer composites. *Open Journal of Composite Materials*. 2022;12:16–29. <https://doi.org/10.4236/ojcm.2022.121002>
18. Kumar U., Kalam S.A., Kumar P.R. Experimental study on the mechanical properties of E-glass reinforced polymer composite based on carbon nano powder percentage. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 2018;5(8). Available from: <https://www.jetir.org/papers/JETIR1808811.pdf>. (accessed: 14.07.2024).
19. Ou Y., Zhu D., Zhang H., Huang L., Yao Y., Li G., Mobasher B. Mechanical characterization of the tensile properties of glass fiber and its reinforced polymer (GFRP) composite under varying strain rates and temperatures. *Polymers*. 2016;8(5):196. <https://doi.org/10.3390/polym8050196>
20. Gualberto H.R., dos Reis J.M.L., de Andrade M.C., Costa H.R.M., Amorim F., Hunt J. Effect of exposure time to UV radiation on mechanical properties of glass/epoxy composites. *Applied Composite Materials*. 2024;31:447–465. <https://doi.org/10.1007/s10443-023-10182-0>
21. Djeghader D., Redjel B. Fatigue resistance of randomly oriented short glass fiber reinforced polyester composite materials immersed in seawater environment. *Mechanics & Industry*. 2017;18:604. <https://doi.org/10.1051/meca/2016087>
22. Manoj S.R., Vaddi T., Senkathir S., Arun R.A.C., Geethapriyan T. Development of hybrid E-glass fibre reinforced polymer matrix composite and study of mechanical properties. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*. 2016;9(4):2770–2774. Available from: [https://www.jchps.com/issues/Volume%209\\_Issue%204/jchps%209\(4\)%20202%200290616%202770-2774.pdf](https://www.jchps.com/issues/Volume%209_Issue%204/jchps%209(4)%20202%200290616%202770-2774.pdf) (accessed: 14.07.2024).
23. Zhuginisov M.T., Omarbek A. Analytical review of foam glass technology research. *Molodoy Uchenyy*. 2022;48(443):51–56. (In Russ.) EDN: WINLAD  
*Жугинисов М.Т., Омарбек А.* Аналитический обзор исследований по технологии пеностекла // Молодой учёный. 2022. № 48 (443). С. 51–56. EDN: WINLAD
24. Min'ko N.I., Puchka O.V., Stepanova M.N., Vaysera S.S. *Thermal insulation glass materials. Foam glass*. 2nd ed., revised. Belgorod State Technological University, 2016. (In Russ.) EDN: WOPNTV  
*Минько Н.И., Пучка О.В., Степанова М.Н., Вайсера С.С.* Теплоизоляционные стекломатериалы. Пеностекло. 2-е изд., испр. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. 263 с. EDN: WOPNTV
25. Shelikhov N.S., Rakhimov R.Z., Zareznov D.A., Sagdiev R.R. The current state of production and use of foam glass for thermal insulation. *News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2018;4(46):319–325. (In Russ.) EDN: YTDWXX  
*Шелихов Н.С., Рахимов Р.З., Зарезнов Д.А., Сагдиев Р.Р.* Современное состояние производства и применения пеностекла для тепловой изоляции // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 4 (46). С. 319–325. EDN: YTDWXX