This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Research Article
Received: July 8, 2026 *Accepted: August 12, 2026* *Published: September 15, 2026*
ISSN 2658-5553

Boundary conditions for adhesive joints in façade cladding elements

Gusev, Konstantin Vladimirovich[1]
Galyamichev, Alexander Viktorovich[1]
Abdulova, Dalia Ilfatovna[1]
Golubkov, Nikita Aleksandrovich[1]
Rybakov, Vladimir Aleksandrovich[2,3*]

[1] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; konstantin0399@yandex.ru (G.K.V.); adaliyal@yandex.ru (A.D.I.); galyamichev@yandex.ru (G.A.V.); golubkov-na@yandex.ru (G.N.A.)
[2] Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation; fishermanoff@mail.ru (R.V.A.)
[3] NTS-Project LLC, St.Petersburg, Russian Federation; fishermanoff@mail.ru (R.V.A.)
Correspondence:* email fishermanoff@mail.ru; contact phone +79118297767

Keywords:

Adhesive tapes; Bonded connections; Façade metal cassettes; Silicone adhesive sealant; Stress–strain state; Forces in fastening elements; Wind load

Abstract:

The object of research is adhesive fastenings in façade metal cassettes of hinged façade systems. This work aims to develop a simplified method for defining boundary conditions of adhesive fastenings of façade cassettes in numerical models. **Method.** Experimental tests of adhesive tapes were carried out to determine the estimated elastic modulus, load-bearing capacity, and failure mode. Finite element analysis of façade metal cassettes was performed using different approaches to modelling adhesive joints to assess their influence on the structure's stress–strain state. **Results.** A preliminary value of the elastic modulus of the structural adhesive tape (375 kPa) and the average failure stress (548 kPa) were obtained. Failure exhibits a mixed adhesive–cohesive character and depends on the loading rate. Replacing silicone sealant adhesive with structural tapes has almost no influence on cassette deflections (2–4%). Numerical models showed that adhesive fastening can be represented as hinged contacts without explicitly modelling solid geometry. Load-width participation factors were determined for various span configurations, and a formula was proposed to calculate stresses in adhesive joints under wind loading.

1 Introduction

Навесные фасадные системы (НФС) получили широкое распространение с начала XXI века [1]–[3], что связано с их эксплуатационными и архитектурными преимуществами [4], [5]. Такие системы применяются в качестве ограждающих конструкций как при новом строительстве, так и при реконструкции зданий и сооружений различного назначения [6], [7]. Основная причина их популярности заключается в разнообразии облицовочных материалов, позволяющих придавать зданиям практически любой архитектурный облик [8]. Наличие различных типов облицовки обусловливает разнообразие конструктивных решений подсистем и способов их крепления [9]. Можно выделить следующие способы крепления облицовки: открытый и скрытый механические, скрытый клеевой, а также комбинированный. Отдельно стоит отметить наличие скрытых способов крепления, так как они улучшают внешний вид фасадов и повышают их архитектурную выразительность. Одним из таких

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

решений является применение клеевых соединений на основе силиконового клея-герметика или клеевых лент [10], [11]. Данные клеевые крепления активно используются в навесных фасадных конструкциях с облицовкой керамогранитными панелями и металлическими кассетами [12].

В статьях большое внимание уделяют исследованию механических характеристик клеевых соединений, их долговечности, их особенности работы при различных нагрузках, свойственных фасадным конструкциям, и напряженно-деформированному состоянию [13], [14]. Исследования показывают, что прочностные характеристики клеевых лент зависят от климатических факторов, условий эксплуатации, геометрических характеристик, адгезионных свойств склеиваемых материалов, а также от характера прикладываемых нагрузок [15]. Особенно оказывают влияние на несущую способность температурно-влажностное воздействие и длительность эксплуатации [16], [17]. В статье [18] установлено, что наиболее значимыми факторами разрушения материала являются воздействие ультрафиолетового излучения, влаги и температуры. Также авторы определили, что при длительном воздействии атмосферных факторов сопротивление отслаиванию клеевых соединений снижалось на 50%, а сопротивление сдвигу на 30%. При этом отдельно в статьях рассматривается поведение соединения под действием растягивающих усилий, так как ветровая нагрузка зачастую является критической [19]. [20]. В работе [21] авторы обращают внимание, что клеевые соединения имеют выраженное нелинейное поведение, в связи с чем рекомендуют выполнение нелинейного расчета при проектировании соединений. Наличие большой экспериментальной базы о работе клеевых соединений позволяет корректно моделировать их в программных комплексах. Так, в исследовании [22] была показана высокая согласованность результатов численного и экспериментального исследования.

Другим вариантом клеевого крепления облицовочных элементов является конструкционная клеевая лента на основе вспененного высокопрочного акрила. Отличительной особенностью данного типа соединения является выраженное вязкоупругое поведение материала [33], [34], существенно влияющее на работу узла в условиях эксплуатации. В работе [23] представлен экспериментальный метод оценки ударной вязкости материалов, к которым относятся клеевые ленты типа 3M. Экспериментально установлена зависимость прочности клеевой ленты от скорости нагружения: при ударном воздействии прочность соединения может увеличиваться в 3–5 раз, однако при этом материал проявляет склонность к хрупкому разрушению. В другом исследовании [35] показано, что адгезионные характеристики подобных материалов существенно зависят от шероховатости поверхности сопряжения. Тем не менее, несмотря на расширение применения клеевых лент в фасадных конструкциях, подходы к их корректному моделированию в программных расчетных комплексах совместно с ограждающими конструкциями остаются недостаточно разработанными.

Следует отметить, что навесные фасадные системы являются конструктивно сложными и включают значительное количество элементов: облицовочные панели из различных материалов с разными геометрическими характеристиками, элементы крепления, направляющие и облицовочные профили, кронштейны и другие элементы [8]. Совместная работа этих элементов определяет надежность и долговечность всей системы. В этой связи рассматриваются исследования, основанные на экспериментальном изучении работы навесных фасадных конструкций, в том числе направленные на определение несущей способности и характера деформирования отдельных узлов и системы в целом [24]–[28].

Вместе с тем проведение натурных и лабораторных испытаний связано со значительными трудозатратами и материальными расходами, а также осложняется большим разнообразием конструктивных решений фасадных систем. В связи с этим возрастает роль численных методов расчета, позволяющих оценивать напряженно-деформированное состояние конструкций. Ранее в работе [29] предложена методика экспериментального и численного исследования навесной фасадной системы с облицовкой фиброцементными панелями при действии равномерно распределенной нагрузки: панель моделируется оболочкой, направляющие — стержневыми элементами, крепление — шарнирами с одной фиксированной точкой. Установлено, что численный расчет в SCAD Office (https://scadsoft.com/) позволяет определить критическую нагрузку по I и II группам предельных состояний на основании верификации расчетной модели с результатами

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

эксперимента. Представленная методика численного моделирования фасадных конструкций может быть адаптирована и к расчетам других конструктивных решений.

Анализ опубликованных исследований показывает, что в научной литературе подробно рассмотрены вопросы определения несущей способности, физико-химических характеристик и моделирования силиконовых клеевых соединений, применяемых в навесных фасадных системах, а также разработаны методики их экспериментального и численного исследования. Вместе с тем количественные жесткостные характеристики клеевых лент конструкционного типа и подходы к их корректному учету в расчетных моделях изучены недостаточно. Существующие инженерные методы проектирования фасадных конструкций с клеевым креплением облицовки, как правило, не рассматривают влияние жесткости клеевых соединений на напряженно-деформированное состояние системы либо принимают упрощенные допущения без экспериментального обоснования. Вследствие этого остается нерешенным вопрос выбора корректной расчетной схемы крепления облицовочных кассет, позволяющей учитывать работу клеевых материалов без излишнего усложнения модели. Выявленные недостатки существующих исследований определяют необходимость экспериментального определения жесткостных характеристик клеевых лент для расчетных моделей, оценки их несущей способности и разработки способа задания граничных условий клеевых креплений при численном моделировании фасадных кассет.

Цель работы — разработать упрощенный способ задания граничных условий клеевых креплений фасадных облицовочных элементов в пластинчатых численных моделях. **Объект исследования** — клеевые крепления в фасадных металлических кассетах навесных фасадных систем. **Предмет исследования** — граничные условия клеевых креплений фасадных облицовочных элементов в пластинчатых численных моделях.

Для достижения данной цели были сформированы и выполнены следующие задачи:

1. Определены расчетные параметры клеевых лент на основании сопоставления результатов экспериментального и численного исследования;
2. Выполнены статические расчеты фасадных кассет с различным способом моделирования клеевых креплений для оценки их влияния на работу облицовочной конструкции;
3. Разработан обоснованный упрощенный способ задания граничных условий клеевых креплений для применения в численных моделях.
4. Предложено уточнение аналитического расчета несущей способности клеевых креплений при действии ветровой статической нагрузки.

2 Materials and Methods

2.1 Experimental investigation

В первую очередь исследование клейких лент, используемых в качестве элемента крепления облицовочных материалов в фасадных конструкциях, было выполнено посредством экспериментальных испытаний. Испытательные образцы (см. рис. 1) представляли собой соединения типа «жесткое основание — клеевая лента — жесткое основание». Алюминиевая пластина с размерами 92×50 мм и толщиной 5 мм соединялась с алюминиевой трубой с размерами поперечного сечения 80x60x4 мм, с использованием ленты для конструкционного склеивания Sanz Bonding Tape BT33185G [30] изготовленной из высокопрочного акрила.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

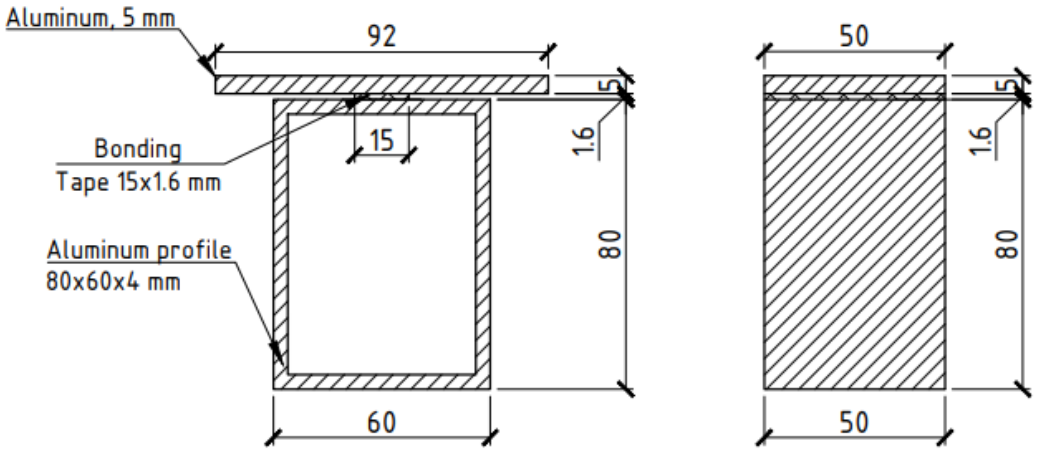


Рис. 1 – Испытательный образец
Fig. 1 – Test specimen
Image by the authors of the article

Испытательная нагрузка прикладывалась к образцам с использованием металлической оснастки (см. рисунок 2) на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z100, с максимальной нагрузкой 100 кН, производства Zwick Roell AG (Ульм, Германия). Скорость растяжения испытательных образцов была выбрана на основании требований ETAG 002, как для конструкционного склеивания элементов и составляла 5 мм/мин. Для оценки и сравнения поведения клеевых лент при длительном воздействии, дополнительно было проведено испытание на растяжение при скорости нагружения, равной 1 мм/мин. Установка и положение образца в испытательной разрывной машине показано на рисунке 3.

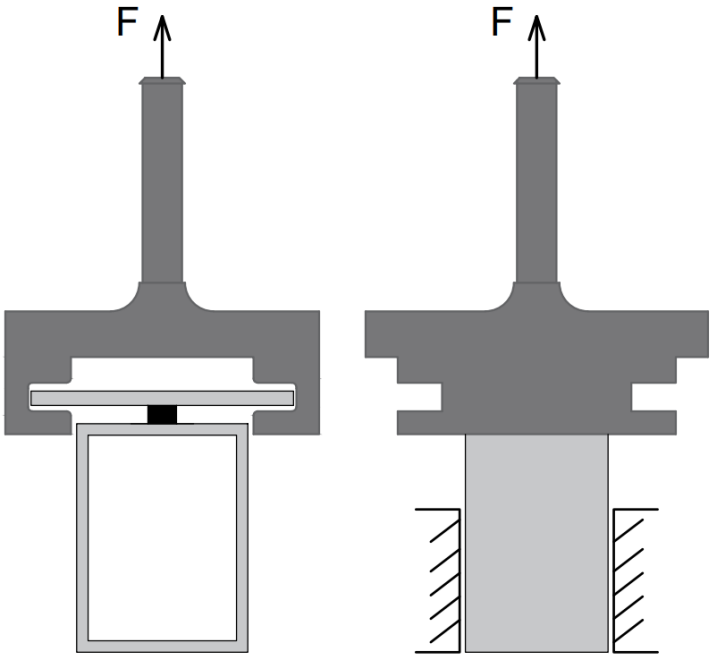


Рис. 2 – Схема приложения нагрузки: вид спереди (a); вид сбоку (b)
Fig. 2 – Loading scheme: front view (a); side view (b)
Image by the authors of the article

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

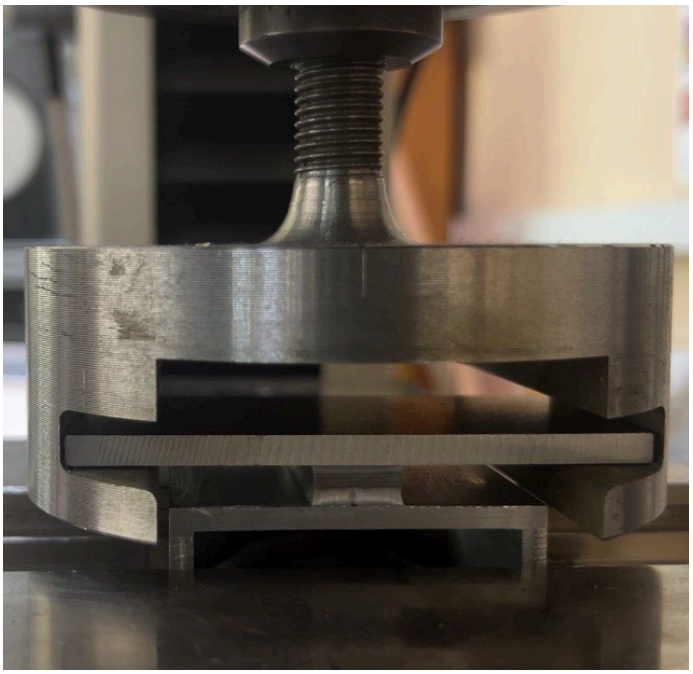


Рис. 3 – Положение образца во время испытания
Fig. 3 – Specimen position during testing
Image by the authors of the article

Определение оценочного значения модуля упругости, который может быть использован для учета жесткости клеевой ленты в расчетной модели фасадной металлической кассеты, было выполнено с помощью численного метода расчета в ПК SCAD Office.

2.2 Numerical modelling of test specimens

Клеевые ленты моделировались при помощи объемных конечных элементов (КЭ Тип 36). Разбивка конструкционной ленты Bonding Tape - 16x8 КЭ по ширине и толщине ленты соответственно. Выбор данной сетки КЭ связан с предыдущими работами автора, направленных на получение подходящей дискретизации сетки клеевых соединений на основании сопоставлений экспериментальных и численных исследований. Алюминиевые труба и пластина моделировались оболочечными конечными элементами (КЭ Тип 44). Соединение трубы, ленты и пластины в расчетной модели осуществлялось через общие узлы конечных элементов. Расчетная модель показана на рисунке 4.

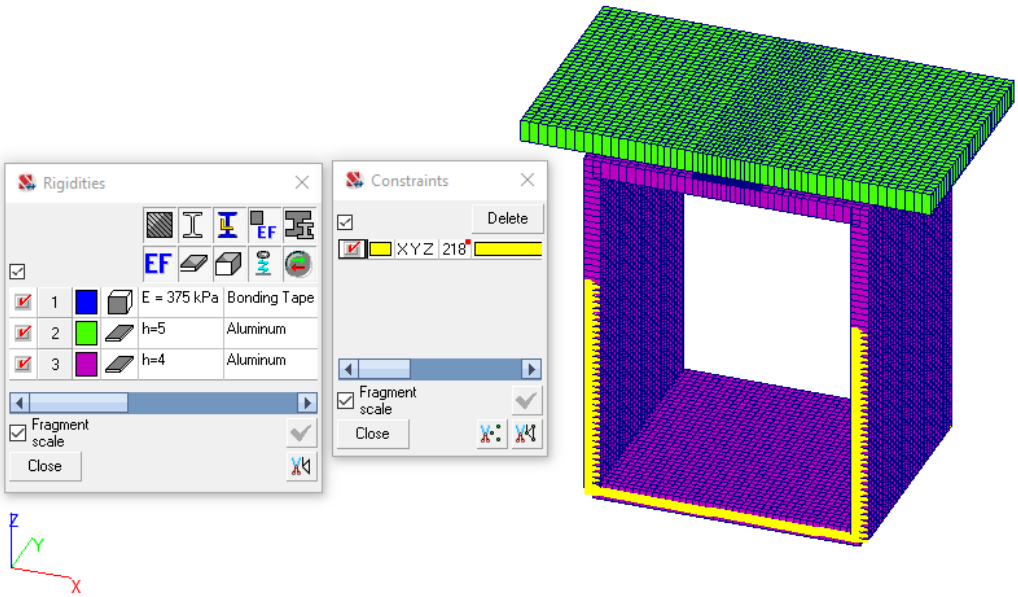


Рис. 4 – Расчетная модель испытательного образца
Fig. 4 – Computational model of the test specimen
Image by the authors of the article

Gusev, K.; Galyamichev, A.; Abdulova, D.; Golubkov, N.; Rybakov, V.
Boundary conditions for adhesive joints in facade cladding elements;
2026; AlfaBuild; 38 Article No 3810. doi: 10.57728/ALF.38.10

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

2.3 Numerical modelling of façade cassettes

Конструктивное решение и габариты фасадной металлической кассеты из алюминиевого композита были выбраны наиболее типовыми (см. рисунок 5). В качестве ребра жесткости был принят Г-образный профиль из алюминиевого композита, с размерами поперечного сечения 40х40х4 мм. Крепление облицовочной конструкции к подсистеме НФС при помощи креплений в расчетной модели учитывалось установкой опорных связей. Важно отметить, что в рассматриваемом конструктивном решении выполнено крепления ребра жесткости к верхнему и нижнему бортикам облицовки, что также учитывается в расчетных моделях. Клеевые крепления (конструкционная лента или силиконовый клей-герметик) были расположены как можно ближе к стенке профиля (см. рисунок 6).

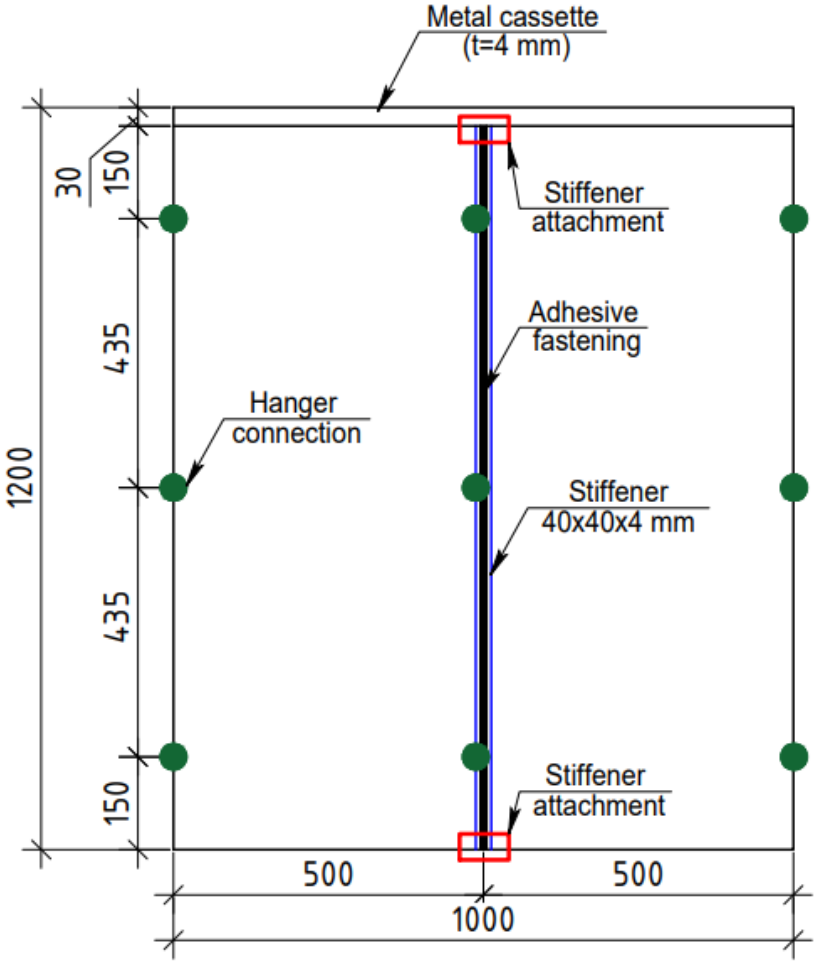


Рис. 5 – Конструктивная схема фасадной металлической кассеты
Fig. 5 – Structural scheme of the metal facade cassette
Image by the authors of the article

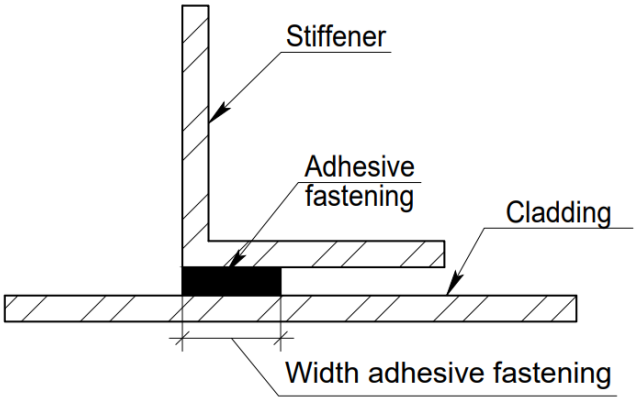


Рис. 6 – Схема расположения клеевых креплений
Fig. 6 – Layout of adhesive fastenings
Image by the authors of the article

Gusev, K.; Galyamichev, A.; Abdulova, D.; Golubkov, N.; Rybakov, V.
Boundary conditions for adhesive joints in facade cladding elements;
2026; AlfaBuild; 38 Article No 3810. doi: 10.57728/ALF.38.10

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Общий вид расчетных моделей фасадных металлических кассет с клеевыми способами крепления (силиконовый клей-герметик или конструкционная лента) и установка опорных связей и показаны на рисунке 7. Методика численного моделирования фасадных металлических кассет соответствует методике, примененной при моделировании испытательных образцов.

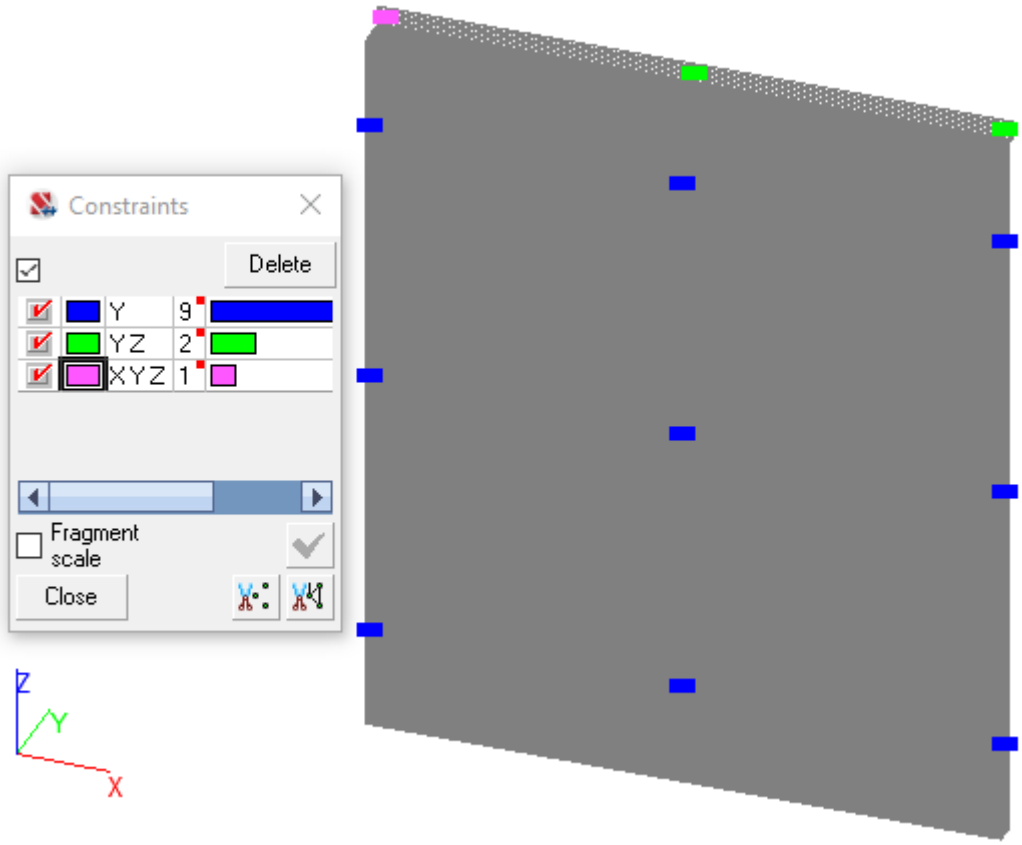


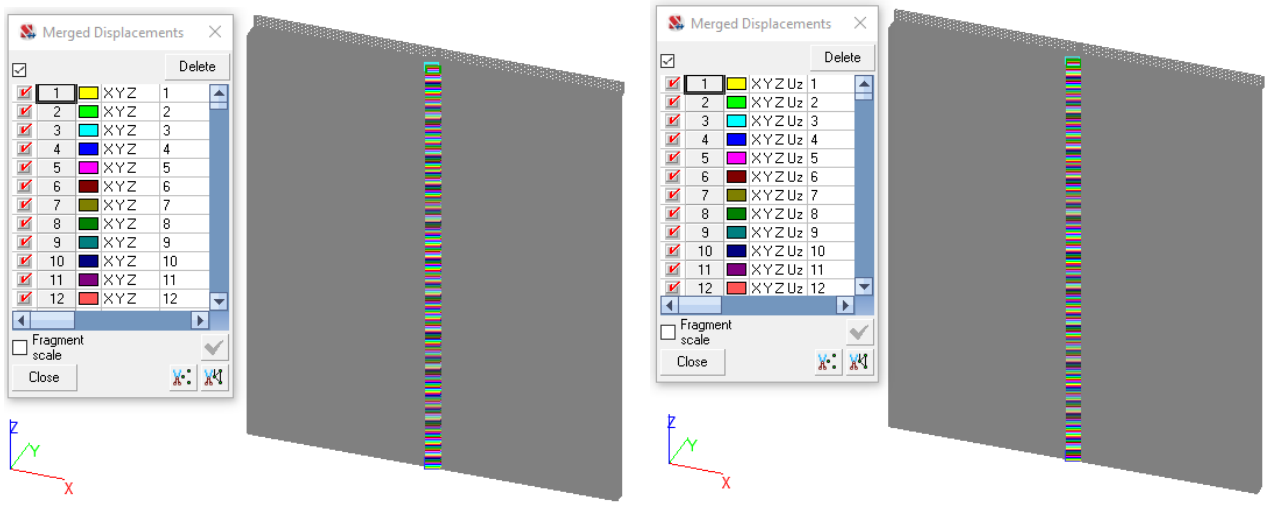
Рис. 7 – Общий вид расчетной модели фасадной металлической кассеты
Fig. 7 – General view of the computational model of the metal facade cassette
Image by the authors of the article

В рамках исследования было разработано пять расчетных моделей, отличающихся способом моделирования крепления ребра жесткости к облицовочной панели кассеты.

1. Модель с явным представлением клеевой конструкционной ленты с учетом ее жесткости;
2. Модель с представлением клеевого шва размерами 12×3 мм, выполненного из силиконового клея-герметика, с учетом его жесткости;
3. Модель с представлением клеевого шва размерами 12×6 мм из силиконового клея-герметика с учетом жесткости клеевого слоя;
4. Модель, в которой клеевое крепление заменено введением объединения перемещений по направлениям X, Y и Z (рисунок 8a) для совпадающих узлов облицовки и ребра жесткости. Жесткость клеевого соединения не учитывалась; опирание в плоскости фасада принято шарнирным;
5. Модель, в которой клеевое соединение заменено введением объединения перемещений по направлениям X, Y, Z и Uz (рисунок 8b) для совпадающих узлов облицовки и ребра жесткости. Жесткость клеевого соединения не учитывалась; опирание в плоскости фасада принято жестким.

Статические расчеты были выполнены для случая отрицательного ветрового воздействия, равного 1 кПа.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0



(a) (b)

Рис. 8 – Назначение объединения перемещений в расчетной модели: с шарнирным опиранием (a) и жестким опиранием (b) облицовки.
Fig. 8 – Assignment of displacement coupling in the numerical model: with hinged support (a) and rigid support (b) of the cladding
Image by the authors of the article

В таблице 1 приведены характеристики облицовочных материалов, используемых для статических расчетов в ПК SCAD Office.

Таблица 1. Физико-механические показатели облицовочных кассет
Table 1. Physical and mechanical properties of cladding cassettes

Материал	Алюминиевый композит
Толщина, мм	4 (0.4x3.2x0.4)
Объемный вес, кг/м3	1150
Коэффициент Пуассона	0.3
Модуль упругости, МПа	25000

При моделировании клеевого шва из силиконового клея-герметика и конструкционной клеевой ленты были приняты следующие коэффициента Пуассона ($v_{bonding_tape}$, $v_{bonded_connection}$), исходя из того, что исследуемые материалы следует считать несжимаемыми [31], [32] и численные расчеты проводились в линейно-упругой постановке:

$$v_{bonding_tape} = 0.49,$$

$$v_{bonded_connection} = 0.49.$$

Модуль упругости силиконового клея-герметика был принят на основании экспериментальных исследований образца на растяжении при относительной деформации не более 60%:

$$E_{bonded_connection} = 1200 кПа.$$

3 Results and Discussion

3.1 Determination of the stiffness of adhesive tape

В результате проведенного экспериментального исследования была получена диаграмма «нагрузка-перемещения», показанная на рисунке 9 при различных скоростях нагружения.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

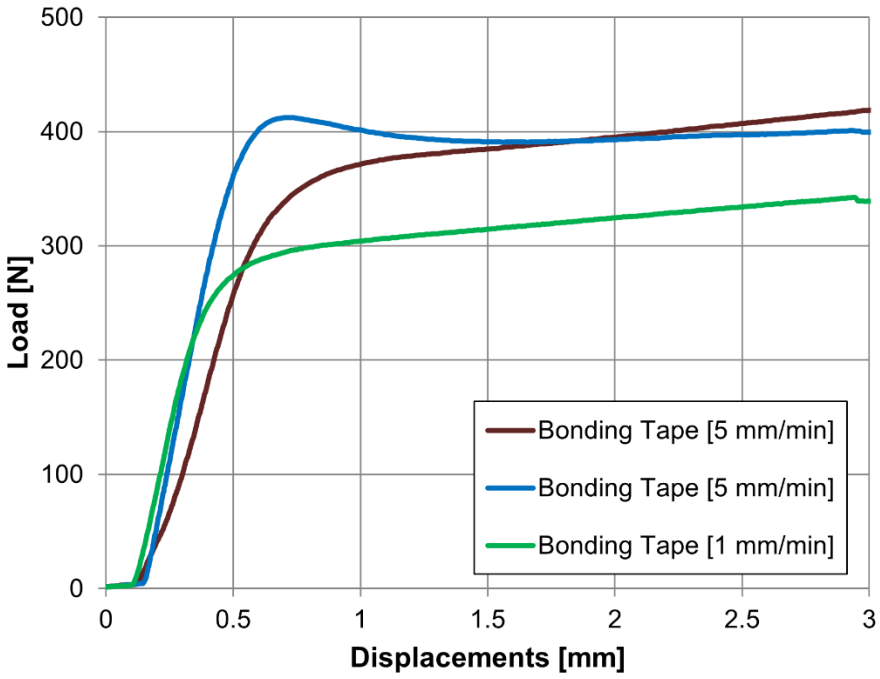


Рис. 9 – Диаграмма «нагрузка-перемещение»
Fig. 9 – Load–displacement diagram.
Image by the authors of the article

Разрушение конструкционной клейкой ленты характеризовалось наличием различных типов разрушения — частично когезионного и адгезионного. Испытательные образцы после проведения экспериментальных исследований показаны на рисунке 10.

Рис. 10 – Испытательные образцы после испытаний
Fig. 10 – Test specimens after testing
Image by the authors of the article

Также в результате испытаний были получены значения разрушающих давлений для клеевых лент:

$$x_1 = 612 кПа\,,$$
$$x_2 = 492 кПа\,,$$
$$x_3 = 539 кПа\,,$$

где x_i - отдельное экспериментальное значение.

Было определено среднее значение разрушающего давления ($\bar{x}$) по формуле (1). Важно отметить, что в виду малого количества испытательных образцов данный показатель применялся в роли оценочного значения. Для уточнения данного значения необходимо провести экспериментальное исследование на большем количестве образцов.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

$$\overline{x} = \frac{\sum x_i}{n}, \quad (1)$$

где n – число испытаний.

$$\overline{x} = 548 кПа$$

Стоит отметить, что в данном случае учитывались испытания для различных скоростей приложения растягивающей нагрузки. При этом снижение скорости нагружения с 5 до 1 мм/мин приводит к уменьшению предела прочности при растяжении конструкционной ленты Bonding Tape на 10–25%, что свидетельствует о выраженной скоростной зависимости механических характеристик данного материала и обусловлено его вязкоупругой природой.

Определение оценочного значения модуля упругости клеевой конструкционной ленты Bonding Tape было выполнено на основании сопоставления результатов экспериментального и численного исследования для начальной упругой стадии работы материала (см. рисунок 11). Получено, что:

$$E_{bonding_tape} = 375 кПа.$$

Перемещения испытательных образцов, зафиксированные в диапазоне 0–0.15 мм, не отражают деформационного поведения исследуемого материала и являются следствием устранения зазоров в испытательной машине и оснастке на начальной стадии нагружения. По указанной причине верификация расчетной модели и подбор оценочного модуля упругости конструкционной ленты осуществлялась на основании линейного участка диаграммы, соответствующего перемещениям от 0.15 мм.

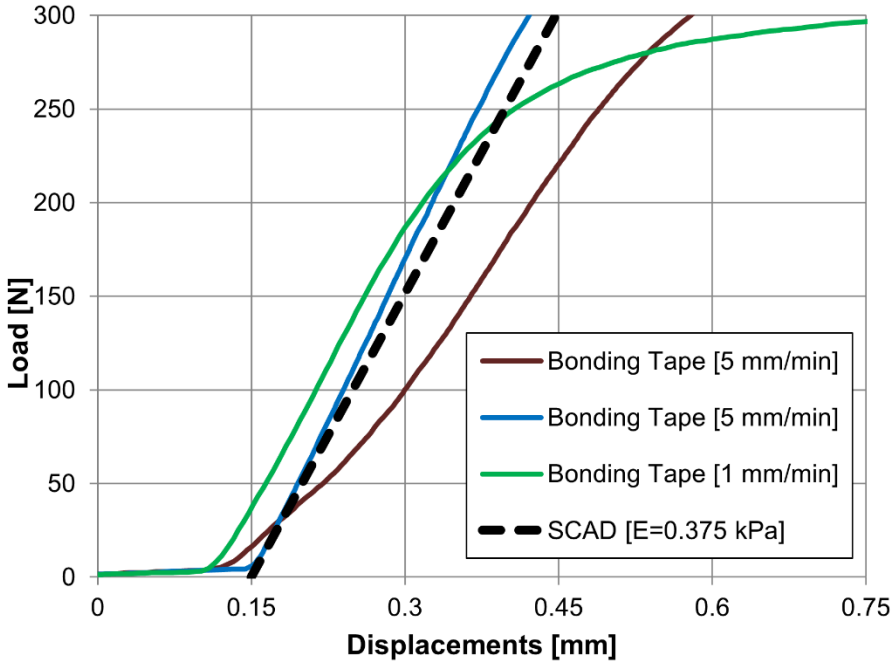


Рис. 11 – Диаграмма «нагрузка-перемещение»
Fig. 11 – Load–displacement diagram
Image by the authors of the article

3.2 Computational analysis of the performance of metal cassettes with adhesive joints

В результате выполнения статических расчетов в ПК SCAD Office были получены значения прогибов металлической кассеты из алюминиевого композита с различным креплением ребра жесткости к облицовке: с помощью клеевых швов сечениями 12х3 мм, 12х6 мм, с помощью клеевой ленты Bonding Tape и без учета жесткости клеевых креплений (шарнирное и жесткое опирание облицовки). Значения модуля упругости для клеевой конструкционной ленты было принято согласно результатам, полученным в разделе 3.1. Оценка рассматриваемых фасадных конструкций по перемещениям связана с тем, что для металлических кассет более характерно достижение предельных состояний второй группы.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

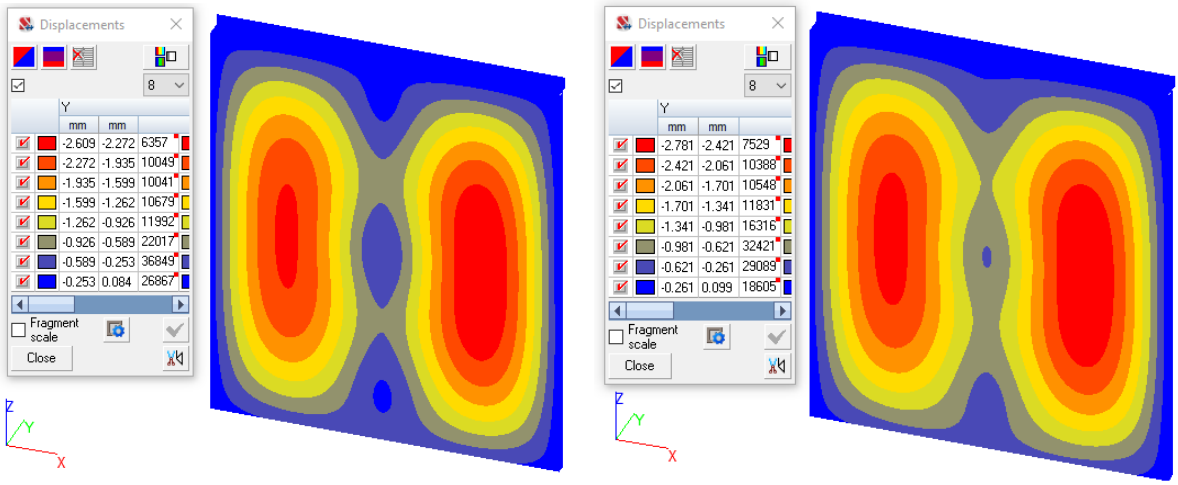


Рис. 12 – Перемещения расчетной модели с различными способами крепления ребра жесткости, мм: слева – клеевое крепление 12x3 мм; справа – клеевое крепление 12x6 мм
Fig. 12 – Displacements of the numerical model with different methods of stiffener attachment, mm: left – adhesive fastening 12x3 mm; right – adhesive fastening 12x6 mm
Image by the authors of the article

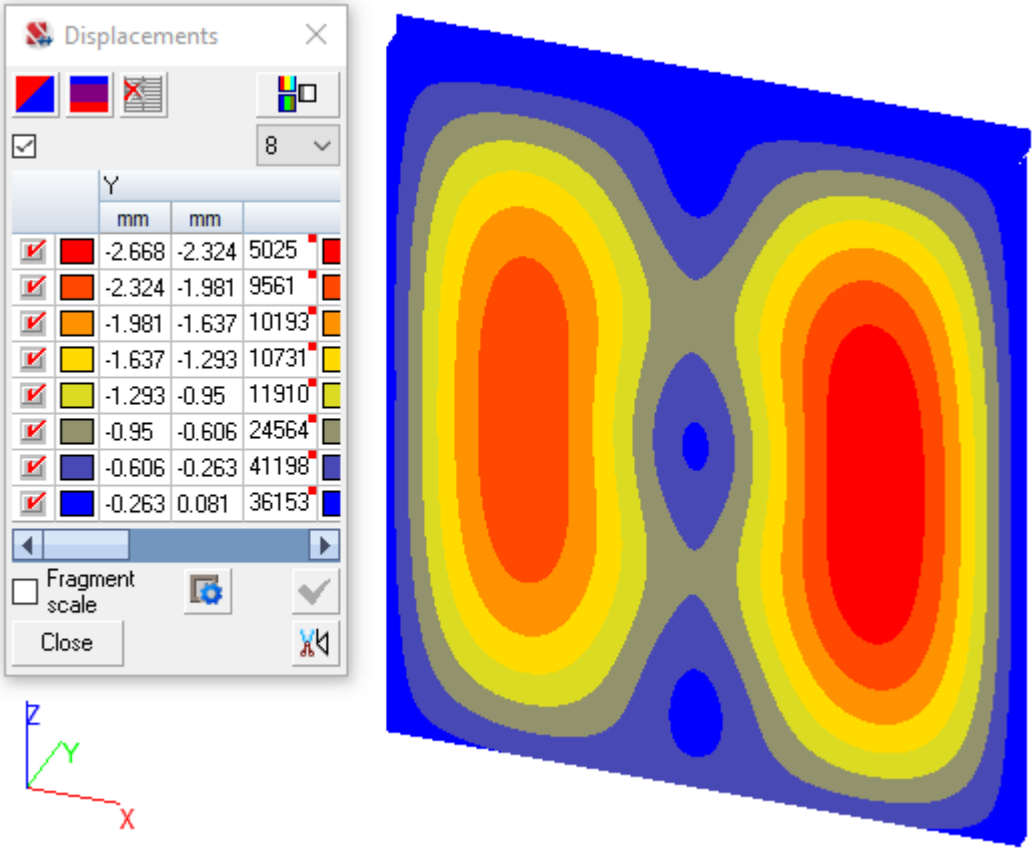


Рис. 13 – Перемещения расчетной модели с креплением ребра жесткости с помощью структурной клеевой ленты, мм
Fig. 13 – Displacements of the numerical model of the stiffener connection using structural tape, mm
Image by the authors of the article

Gusev, K.; Galyamichev, A.; Abdulova, D.; Golubkov, N.; Rybakov, V.
Boundary conditions for adhesive joints in facade cladding elements;
2026; AlfaBuild; 38 Article No 3810. doi: 10.57728/ALF.38.10

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

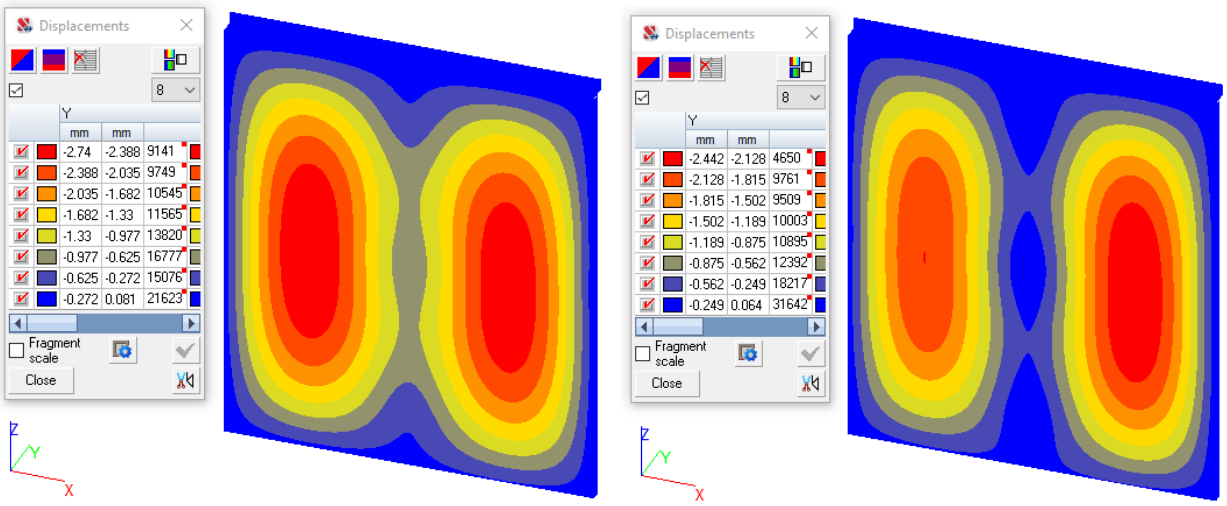


Рис. 14 – Перемещения расчетной модели без учета жесткости клеевых креплений, мм: слева – шарнирное опирание; справа – жесткое опирание
Fig. 14 – Displacements of the numerical model without considering the stiffness of adhesive fastenings, mm: left – pinned support; right – fixed support
Image by the authors of the article

Для количественной оценки влияния учета жесткости клеевых креплений на работу фасадных металлических кассет результаты были сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты статических расчетов фасадных кассет
Table 2. Results of static analyses of facade cassettes

№	Крепление ребра жесткости	Перемещения, мм
1	Конструкционная лента, 15х1.6 мм	2.668
2	Клеевой шов, 12х3 мм	2.609
3	Клеевой шов, 12х6 мм	2.781
4	Объединение перемещений (шарнирное опирание)	2.740
5	Объединение перемещений (жесткое опирание)	2.442

Представленные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Получено, что учет дополнительной жесткости клеевых лент и клеевых соединений с различными размерами швов в общей жесткости элементов расчетных моделей фасадных металлических кассет оказывает незначительное влияние на величину прогибов (до 5%) облицовочной конструкции. Следовательно, что для упрощения расчетных моделей фасадных металлических кассет допустимо клеевые ленты или клеевые соединения не моделировать объемными конечными элементами;
2. Применение клеевых конструкционных лент в качестве элемента крепления ребра жесткости в фасадных металлических кассетах вместо крепления с помощью силиконового клея-герметика практически не оказывает влияние на прогибы облицовки (от 2 до 4%). Полученный результат говорит о перспективах использования клеевых конструкционных лент в фасадных металлических кассетах, однако необходимо дополнительное исследование клеевых лент в областях долговечности и устойчивости к климатическим воздействиям;
3. При моделировании клеевых креплений с помощью объединения перемещений с жестким опиранием облицовки, значения прогибов фасадных кассет могут быть меньше на 14%, чем при моделировании креплений объемными конечными элементами. Подходящим способом моделирования клеевых креплений является назначение объединений перемещений с шарнирным опиранием облицовки или аналогичными инструментами.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

3.3 Determination of the Tributary Width for Wind Load

На основании численного моделирования также были получены значения усилий, возникающих в креплениях фасадной металлической кассеты.

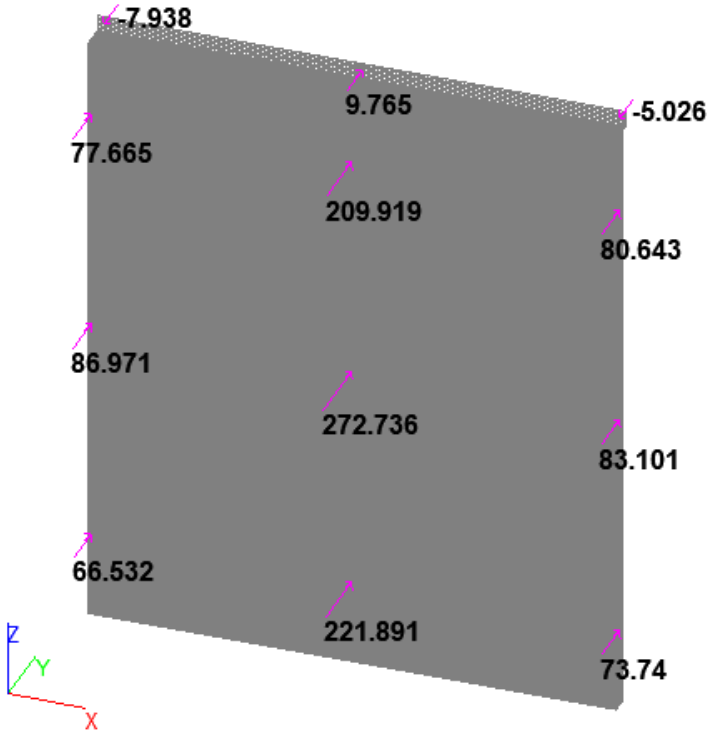


Рис. 15 – Усилия, возникающие в элементах крепления (расчетная модель №4), Н
Fig. 15 – Forces arising in the fastening elements (numerical model No. 4), N
Image by the authors of the article

Для сравнения усилий, возникающих в элементах крепления, в зависимости от способа моделирования клеевого крепления, результаты расчетов сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Усилия, возникающие в элементах крепления
Table 3. Forces arising in the fastening elements

Способ крепления ребра жесткости	Усилия, возникающие в креплениях, Н	
	Крепление на бортике кассеты	Крепление на ребре жесткости
Конструкционная лента, 15х1.6 мм	81.199	279.697
Клеевой шов, 12х3 мм	81.720	280.428
Клеевой шов, 12х6 мм	79.973	280.919
Объединение перемещений (шарнирное опирание)	86.971	272.736
Объединение перемещений (жесткое опирание)	84.327	277.107

Видно, что наибольшие усилия возникают в креплениях ребра жесткости к подсистеме НФС. Более того, распределение усилий характерно для неразрезной двухпролетной балки, где усилие в центральной опоре увеличивается на 25%, в отличие от разрезной расчетной схемы (см. рисунок 16)

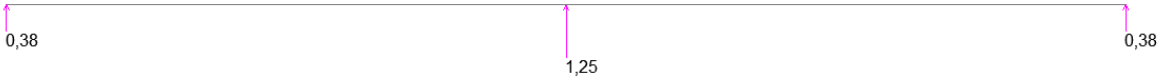


Рис. 16 – Коэффициенты неразрезности двухпролетной схемы
Fig. 16 – Continuity factors for the two-span scheme
Image by the authors of the article

Исходя из полученных значений (таблица 3) видно, что распределения усилий для крайний и центральных креплений соответствует коэффициентам, представленным на рисунке 17 с разницей не более 6%. Важно отметить, что данное распределение будет аналогично и для напряжений, возникающих в клеевых креплениях при ветровом воздействии, в виду того, что элемент будет воспринимать большую нагрузку.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Таким образом, расчет фасадных металлических кассет численным методом допустимо выполнять без учета жесткости клеевых креплений, используя назначения объединения перемещений (или аналогичные инструменты) с шарнирных опиранием облицовки. Однако, в сопутствующих расчетах клеевых креплений аналитическими методами необходимо учитывать коэффициенты неразрезности.

Определение значениий коэффициентов неразрезности в стержневой постановке для различного количества опор (клеевых креплений) показано на рисунках 17-20.

Рис. 17 – Коэффициенты неразрезности 4-ех пролетной схемы
Fig. 17 – Continuity factors for the three-span scheme
Image by the authors of the article

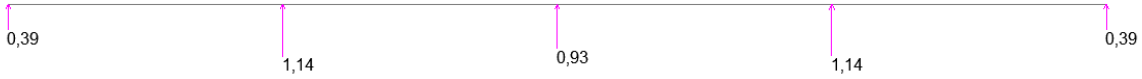


Рис. 18 – Коэффициенты неразрезности 4-ех пролетной схемы
Fig. 18 – Continuity factors for the four-span scheme
Image by the authors of the article

Рис. 19 – Коэффициенты неразрезности 5-ти пролетной схемы
Fig. 19 – Continuity factors for the five-span scheme
Image by the authors of the article

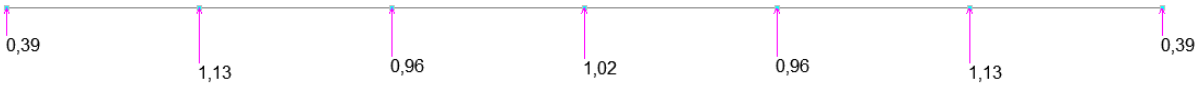


Рис. 20 – Коэффициенты неразрезности 6-ти пролетной схемы
Fig. 20 – Continuity factors for the six-span configuration
Image by the authors of the article

Максимальные коэффициенты неразрезности при действии ветровой нагрузки сведены в таблицу 4.

Таблица 4. Коэффициенты неразрезности
Table 4. Continuity factors

Количество пролетов	Максимальный коэффициент неразрезности
2	1.25
3	1.10
4	1.14
5	1.13
6	1.13

Таким образом, для расчета напряжений, возникающих в клеевом креплении при действии отрицательной ветровой нагрузки, целесообразно пользоваться формулой (2).

$$\sigma = \frac{w_{(-)} \cdot c \cdot k_1}{h_{c(tensile)}}, \quad (2)$$

где c — шаг элементов крепления;

$w_{(-)}$ — пиковая ветровая нагрузка;

$h_{c(tensile)}$ — ширина клеевого крепления;

k_1 — коэффициент неразрезности при действии ветровой нагрузки.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

4 Conclusions

1. На основании сопоставления результатов экспериментального и численного исследования было получено предварительное оценочное значение модуля упругости для конструкционной клеевой ленты (375 кПа), которое может быть использовано для уточнения расчетных моделей фасадных конструкций с клеевыми лентами;
2. На основании экспериментального исследования конструкционных клеевых лент получено, что разрушение носило как адгезионный, так и когезионный характер. Более того, несущая способность клеевого крепления зависит от скорости приложения нагрузки, в связи с вязкоупругими свойствами материала. Определено среднее значение разрушающего давления для исследуемых клеевых лент, составившее 548 кПа. Следует отметить, что полученное значение носит ориентировочный характер и для его уточнения требуется проведение дополнительных испытаний с увеличенным числом образцов;
3. Получено, что применение клеевых конструкционных лент в качестве элемента крепления ребра жесткости в фасадных металлических кассетах вместо крепления с помощью силиконового клея-герметика практически не оказывает влияние на прогибы фасадных металлических кассет (от 2 до 4%).
4. Установлено, что при разработке упрощенных расчетных моделей фасадных кассет клеевые крепления могут не учитываться в виде отдельной твердотельной геометрии. При этом сопряжение облицовочной панели с металлическим профилем следует моделировать как шарнирное. Моделирование данного узла как жесткого приводит к завышению расчетной жесткости конструкции, вследствие чего перемещения занижаются — расхождение может достигать 14 %;
5. По результатам статических расчетов установлено, что облицовка фасадных металлических кассет работает по неразрезной схеме. Вследствие этого элементы, расположенные в пролетах облицовки, воспринимают основную часть ветровой нагрузки. Определены значения коэффициентов включения грузовой ширины для расчетных схем с числом пролетов от 2 до 6 (таблица 4);
6. Предложена формула для расчета напряжений, возникающих в клеевых креплениях при действии отрицательной ветровой нагрузки, с учетом коэффициента включения грузовой ширины:

$$\sigma = \frac{w_{+(-)} \cdot c \cdot k_1}{h_{c(tensile)}}.$$

5 Acknowledgements

Коллектив авторов выражает благодарность Роскошному Д.С. и компании ООО «АЗИАНА ТРЕЙД» (SANZ) за предоставленные испытательные образцы и материалы.

References

1. Ryabukhina, S.A., Koshkarova, M.V. and Simankina, T.L. (2017) Russian Market of Ventilated Curtain Wall Systems. *Actual Problems of Humanities and Natural Sciences*, **3(3)**. https://cyberleninka.ru/article/n/rossiyskiy-rynok-navesnyh-ventiliruemyh-fasadov
2. Pizzatto, S.M., Pizzatto, F., Raupp-Pereira, F., Arcaro, S., Angioletto, E. and Montedo, O.R.K. (2025) Ventilated Façade System: A Review. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, **64(3)**, 100443. https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2025.100443
3. Granovsky, A.V., Dobrina, K.E. and Tangamyan, G.S. (2020) Curtain Brick Façade Systems for Seismic Regions of Russia. *Industrial and Civil Engineering*, **1**, 33–39. https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.01.33-39
4. Varlamova, L.A. and Rynkova, M.V. (2017) Ventilated Curtain Wall Systems in Large-Panel Residential Construction. *University Complex as a Regional Center of Education, Science and Culture: Proceedings of the All-Russian Scientific and Methodological Conference*, 619–623. https://elibrary.ru/item.asp?id=28976955
5. Ibañez-Puy, M., Vidaurre-Arbizu, M., Sacristán-Fernández, J.A. and Martín-Gómez, C. (2017) Opaque Ventilated Façades: Thermal and Energy Performance Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **79**, 180–191. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.059

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

6. Polyakova, T.V., Shkondin, V.V., Dorogova, A.A. and Tsokalo, R.A. (2019) Curtain Wall Systems in Reconstruction of Buildings. *Modern Science*, **5(4)**, 10–12. https://elibrary.ru/item.asp?id=38204634
7. Kuzmina, N.I. and Zhivotov, D.A. (2020) Ventilated Curtain Wall Systems as a Structural Element of Reconstructed and Newly Built Buildings. *Colloquium-Journal*, **8(60)**. https://cyberleninka.ru/article/n/navesnye-ventiliruemye-fasadnye-sistemy-kak-konstruktivnyy-element-rekonstruiruemyh-i-vnov-vozvodimyh-zdaniy
8. Morina, A.A., Morina, E.A., Makarov, A.I. et al. (2020) Influence of Cladding Fixing Method on the Design Scheme of Ventilated Curtain Wall Frames. *AlfaBuild*, **1(13)**, 21–28. https://alfabuild.spbstu.ru/article/2020.13.4/
9. Kolesova, E.N. (2016) Ventilated Curtain Wall: Classification of Components and Problems of Air Gap Design. Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture, **7(2),** 22–28. https://doi.org/10.15593/2224-9826/2016.2.02
10. Kimberlain, J., Yee, S. and Dull, B. (2016) Adhesive Bonding in Ventilated Façade. Façade Tectonics World Congress 2016. https://www.researchgate.net/publication/317371184_Adhesive_Bonding_in_Ventilated_Facade
11. Jucienė, M. and Dobilaitė, V. (2021) Impact of Climatic Effects and Various Surfaces on the Tack of Adhesive Tapes for Building and Construction. *Journal of Building Engineering*, **42**, 102825. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102825
12. Simonov, A.A. and Alfimov, A.V. (2023) Ventilated Curtain Wall Systems: Metal Cassettes and Porcelain Stoneware as Cladding Materials. Youth and Knowledge—Guarantee of Success 2023: Proceedings of the 10th International Youth Scientific Conference, Kursk, 269–271. https://elibrary.ru/item.asp?id=54672081
13. Drass, M. and Schneider, J. (2016) On the Mechanical Behavior of Transparent Structural Silicone Adhesive (TSSA). https://doi.org/10.1201/9781315641645-74
14. Drass, M. (2016) Constitutive Modeling of Transparent Structural Silicone Adhesive (TSSA). https://www.researchgate.net/publication/317106675_Constitutive_Modeling_of_Transparent_Structural_Silicone_Adhesive_-_TSSA
15. Machalická, K. and Eliášová, M. (2017) Adhesive Joints in Glass Structures: Effects of Materials, Adhesive Thickness and Ageing. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **72**, 10–22. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.09.007
16. Schaaf, B. and Feldmann, M. (2024) Time-Dependent Design of Hyperelastic Bonded Joints in Structural Glass. *Glass Structures and Engineering*, **9**, 147–163. https://doi.org/10.1007/s40940-024-00254-3
17. Van Lancker, B., Dispersyn, J., De Corte, W. and Belis, J. (2016) Durability of Adhesive Glass–Metal Connections for Structural Applications. *Engineering Structures*, **126**, 237–251. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.07.024
18. Fufa, S.M., Labonnote, N., Frank, S., Rüther, P. and Jelle, B.P. (2018) Durability Evaluation of Adhesive Tapes for Building Applications. *Construction and Building Materials*, **161**, 528–538. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.056
19. Zarei, H., Marulli, M.R. and Paggi, M. et al. (2022) Mechanical Characterization and Failure Modes in Peeling of Adhesively Bonded Strips from Plastic Substrates. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, **29(11),** 1523–1528. https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1827099
20. Rizzo, F. and Bedon, C. (2023) Performance of Cable-Supported Glass Façades under Time-Dependent Wind Action. *Glass Structures and Engineering*, **8**, 81–98. https://doi.org/10.1007/s40940-022-00180-2
21. Oikonomopoulou, F. and Bristogianni, T. (2022) Adhesive Solutions for Cast Glass Assemblies: Ground Rules from Case Studies. *Glass Structures and Engineering*, **7**, 293–317. https://doi.org/10.1007/s40940-022-00178-w
22. Bolghand, Y., Chakherlou, T.N. and Biglari, H. (2023) Effect of Graphene Oxide Nanoplatelets on Araldite Adhesive Fracture Strength under Mixed-Mode Loading. *Physica Mesomechanics*, **26**, 466–476. https://doi.org/10.1134/S1029959923040082
23. Chambers, R.J., Li, R.J., Youssef, G. and Cai, S. (2025) Experimental Studies of Impact Resistance of Pressure-Sensitive Adhesives. *Experimental Mechanics*, **65**, 885–892. https://doi.org/10.1007/s11340-025-01176-z

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

24. Ogdanets, V.V., Galyamichev, A.V. and Nenashev, V.S. (2019) Load-Bearing Capacity of Curtain Wall Systems with Brick Cladding. *Week of Science SPbPU: Proceedings, St. Petersburg*, 125–127. https://elibrary.ru/item.asp?id=41757160
25. Egorov, D.V. and Galyamichev, A.V. (2019) Bearing Capacity of Attachment Points of Fibre-Cement Panels in Curtain Wall Systems. *Light-Transmitting Structures*, **5–6(127–128)**, 80–86. https://elibrary.ru/item.asp?id=42644485
26. Mikhailova, M.K. and Galyamichev, A.V. (2018) Load-Bearing Capacity of Adhesive Joints in Curtain Wall Systems. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **5(68),** 1–14. https://unistroy.spbstu.ru/article/2018.68.1/
27. Pavlova, M.O., Zakharov, V.A. and Kushnir, S.V. (2016) Reliability of Brick Facing Protective-Decorative Structures. *Industrial and Civil Engineering*, **12**, 44–49. https://elibrary.ru/item.asp?id=27724992
28. Galyamichev, A.V., Lysenko, D.A. and Shvedov, M.A. (2025) Bearing Capacity of L-Shaped Brackets of Curtain Wall Systems. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **2(116),** 11602. https://doi.org/10.4123/CUBS.116.2
29. Egorov, D.V. and Galyamichev, A.V. (2019) Bearing Capacity of Fibre-Cement Panels under Uniform Load. *Week of Science SPbPU: Proceedings, St. Petersburg*, 91–93. https://elibrary.ru/item.asp?id=41757140
30. Double-sided structural bonding tape SANZ BONDING TAPE BT33185G. URL: https://www.sanz-russia.ru/catalog/dvukhstoronnyaya-lenta-dlya-konstruktsionnogo-skleivaniya-sanz-bonding-tape/dvukhstoronnyaya-lenta-dlya-konstruktsionnogo-skleivaniya-sanz-bonding-tape-bt33185g/ (date of application: 27.07.2026)
31. Silvestru, V.A., Kolany, G., Freytag, B., Schneider, J. and Englhardt, O. (2019) Adhesively Bonded Glass–Metal Façade Elements with Composite Structural Behaviour under In-Plane and Out-of-Plane Loading. *Engineering Structures*, **200**, 109692. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109692
32. Zhao, X. and Suo, Z. (2007) Method to Analyze Electromechanical Stability of Dielectric Elastomers. *Applied Physics Letters*, **91**, 061921. https://doi.org/10.1063/1.2768641
33. Mohammed, I.K., Charalambides, M.N. and Kinloch, A.J. (2016) Modeling the Effect of Rate and Geometry on Peeling and Tack of Pressure-Sensitive Adhesives. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, **233**, 85–94. https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2016.01.016
34. Hossain, M., Vu, D.K. and Steinmann, P. (2012) Experimental Study and Numerical Modelling of VHB 4910 Polymer. *Computational Materials Science*, **59**, 65–74. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.02.027
35. Sun, S., Li, M., Liu, A. (2013) A Review on Mechanical Properties of Pressure Sensitive Adhesives. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, **41**, 98–106. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.10.011