

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КРЕПЕЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЕНТИЛИРУЕМЫХ ФАСАДОВ

Матеев И.Х.¹, Бегалиев У.Т.²

⁽¹⁾ Международный университет инновационных технологий, г. Бишкек, магистрант, E-mail: ilyaz.mateev@mail.ru

⁽²⁾ Международный университет инновационных технологий, г. Бишкек, д.т.н., проф. МУИТ, E-mail: utbegaliev@mail.ru

Аннотация. Вентилируемые фасады, обеспечивающие энергоэффективность и долговечность зданий, требуют надёжных крепежных элементов, способных выдерживать механические, коррозионные и температурные воздействия. Настоящее исследование представляет комплексный анализ свойств крепежных систем, включая винты, болты, анкеры и клипсы, применяемые в фасадных конструкциях. Особое внимание уделено методам испытаний на сдвиг, критически важных для оценки устойчивости соединений к поперечным нагрузкам, вызванным ветровыми или сейсмическими воздействиями. Анализированное исследование охватывало коррозионную стойкость, тепловые характеристики и акустические свойства крепежей, выявляя преимущества нержавеющей стали с оптимизированной геометрией, обеспечивающей сдвиговую прочность до 6,5 кН и минимальные тепловые потери. Полученные данные подчёркивают необходимость комплексного подхода к выбору крепежных элементов, учитывая межевые, экологические и энергетические требования. Результаты испытаний и моделирования предоставляют проектировщикам основу для оптимизации фасадных систем, особенно в условиях строгих стандартов энергоэффективности. В перспективе необходимо дальнейшее исследование с разработкой систем крепежных решений, выдерживающих циклические и гравитационные нагрузки, сочетающих прочность металла, для повышения долговечности и функциональности вентилируемых фасадов.

Ключевые слова: вентилируемые фасады, крепежные элементы, испытания на сдвиг, нержавеющая сталь, численное моделирование

ЖЕЛДЕТИЛҮҮЧҮ ФАСАДДАР ҮЧҮН БЕКИТКИЧ ЭЛЕМЕНТТЕРДИН КАСИЕТТЕРИН КОМПЛЕКСТҮҮ ИЗИЛДӨӨ

Матеев И.Х.¹, Бегалиев У.Т.²

⁽¹⁾ Эл аралык инновациялык технологиялар университети, Бишкек шаары, магистрант, E-mail: ilyaz.mateev@mail.ru

⁽²⁾ Эл аралык инновациялык технологиялар университети, т.и.д., ЭИТУ профессору, E-mail: utbegaliev@mail.ru

Аннотация. Энергияны үнөмдөөчү жана узак мөөнөттүү пайдаланууга ылайыктуулугу менен айырмаланган желдетилген фасаддар ишенимдүү бекиткич элементтерин талап кылат. Алар механикалык күчтөрөгө, коррозияга жана температуралык өзгөрүүлөрөгө түруштүк бере алыны керек. Бул изилдөө фасад конструкцияларында колдонулуучу бурамалар, болттор, анкер жана клиптер сыйктуу бекиткич системалардын өзгөчөлүктөрүн комплекстүү талдоону сунуштайт. Айрыкча

көңүл кесилиши жүктөмдөрүнө түрүктүүлүкту аныктоочу жылыш күчүнө сынат көрүү ыкмаларына бурулган, булар шамал же жер титирөө сыйктуу күчтөрдөн улам келип чыгышы мүмкүн. Изилдөөдө бекиткичтердин коррозияга түрүктүүлүгү, жылуулук мүнөздөмөлөрү жана акустикалык касиеттери каралып, оптималдаштырылган геометриясы бар дат баспаган болоттун артыкчылыктары белгиленген – алар 6.5 кН чейин сырткы жүктөмгө түрүштүк берип, жылуулук жоготууларды азайтат. Алынган жыйынтыктар бекиткичтерди тандоодо механикалык, экологиялык жана энергиялык талаптарды эске алуу керектигин көрсөттөт. Сынактардын жана моделдөө шишигинин натыйжалары фасад системаларын оптималдаштыруу учун долбоорчуларга ишенимдүү негиз берет, айрыкча энергия унөмдөө боюнча каттуу стандарттагы шарттарда. Келечекте цикл жана гравитациялык жүктөрө түрүштүк бере алган, металдын бекемдигин сактап калуу менен узак мөөнөткө жарактуу жана функционалдуулугу жогору бекиткич системаларын шишип чыгуу багытында кошумча изилдөөлөр талап кылынат.

Ачыкч сөздөр: жедетилүүчү фасаддар, бекиткич элементтер, кесүү сыноолору, дат баспас болот, сандык моделдөө

COMPREHENSIVE INVESTIGATION OF FASTENING ELEMENTS FOR VENTILATED FACADES

Mateev I.H.¹, Begaliev U.T.²

⁽¹⁾ International University of Innovative Technologies, Bishkek, Master's student, E-mail: ilyaz.mateev@mail.ru

⁽²⁾ International University of Innovative Technologies, Bishkek, Doctor of Technical Sciences, E-mail: utbegaliev@mail.ru

Abstract. Ventilated facades, which ensure energy efficiency and durability of buildings, require reliable fasteners capable of withstanding mechanical, corrosive, and thermal impacts. This study presents a comprehensive analysis of fastening systems, including screws, bolts, anchors, and clips used in facade constructions. Special attention is given to shear testing methods, which are critical for assessing the resistance of joints to transverse loads caused by wind or seismic actions. The analyzed research covers corrosion resistance, thermal characteristics, and acoustic properties of fasteners, highlighting the advantages of stainless steel with optimized geometry, providing shear strength up to 6.5 kN and minimal thermal losses. The findings emphasize the necessity of an integrated approach to the selection of fasteners, considering mechanical, environmental, and energy efficiency requirements. The results of tests and modeling offer designers a basis for optimizing facade systems, especially under strict energy efficiency standards. Future research is needed to develop fastening systems that withstand cyclic and gravitational loads, combining the strength of metal to enhance the durability and functionality of ventilated facades.

Keywords: ventilated facades, fastening elements, shear testing, stainless steel, numerical modeling

Введение. Современные вентилируемые фасады сочетают эстетическую привлекательность с функциональностью, обеспечивая теплоизоляцию, вентиляцию и защиту от влаги [2]. Конструкция таких систем включает облицовочные панели, подконструкцию и вентиляционный зазор, предотвращающий накопление конденсата. Надёжность фасада во многом определяется крепежными элементами, соединяющими панели с несущей структурой здания. Эти элементы должны выдерживать механические

нагрузки, противостоять коррозии, минимизировать теплопотери и обеспечивать звукоизоляцию [3,6].

С ужесточением стандартов энергоэффективности и повышением требований к долговечности зданий выбор надёжных крепежных систем приобретает всё большую значимость [3]. Исследование крепежных элементов является актуальной задачей, поскольку вентилируемые фасады эксплуатируются в разнообразных климатических условиях – от экстремальных температур до высоких уровней влажности и ветровых нагрузок.

Цель настоящей работы – провести анализ экспериментальных исследований различных типов крепежных элементов, применяемых в вентилируемых фасадах, с оценкой их механических характеристик, коррозионной стойкости и усталостной прочности.

В статье представлены анализ результатов испытаний на растяжение, сдвиг, коррозионную стойкость и усталостную прочность четырёх типов крепежных элементов: винтов, болтов, клипс и анкеров [1-7]. Полученные данные проанализированы с применением инженерных расчётов. Эти результаты могут служить основой для обоснованного выбора крепежных решений при проектировании вентилируемых фасадов.

Ранее исследования крепежных систем преимущественно сосредотачивались на отдельных аспектах, таких как механическая прочность, коррозионная стойкость [4] или усталостная надёжность [5]. Однако с усилением требований к энергоэффективности и комфорту зданий в фокус исследований вошли также тепловые и акустические свойства крепежей [3,6]. Современные подходы требуют комплексного анализа, учитывающего все перечисленные характеристики.

Настоящая работа устраняет существующий пробел, объединяя результаты экспериментальных исследований 2019–2023 годов с численным моделированием в среде COMSOL Multiphysics [1]. В рамках исследования рассмотрены крепёжные элементы из различных материалов, включая металлические, пластиковые и композитные решения. Оценка охватывает параметры механической прочности, коррозионной стойкости, тепловых мостов, усталостной выносливости и звукоизоляции.

Полученные данные представляют ценность для проектировщиков и инженеров, обеспечивая обоснованную базу для выбора крепежных систем, учитывающих как конструктивные, так и эксплуатационные требования к вентилируемым фасадам.

Методика исследования. Для анализа были выбраны крепежные элементы, широко применяемые в вентилируемых фасадах: самонарезающие винты из нержавеющей стали (AISI 304/316), шестигранные болты из оцинкованной стали, химические и стальные анкера для бетонных оснований, алюминиевые клипсы, а также пластиковые и комбинированные решения (металл с полимерными вставками). Теплопроводность материалов варьировалась: нержавеющая сталь – $15 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, алюминиевые сплавы – $154 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, полимерные материалы имели низкую теплопроводность, но ограниченную прочность.

Испытания проводились в несколько этапов. Механические свойства определялись с помощью универсальной испытательной машины Instron 5982 с максимальной нагрузкой 100 кН [7]. Образцы подвергались растяжению (скорость 5 мм/мин) и сдвигу (шаг нагружения 0,1 кН) до разрушения. Усталостная прочность оценивалась на вибростенде при частоте 10–15 Гц и амплитуде 50–60% от статической прочности [5]. Коррозионная стойкость

испытывалась в камере солевого тумана при 35 °C и 5%-ной концентрации NaCl в течение 1000 часов согласно международным стандартам [8,10].

Тепловые свойства определялись методом измерения эффективного коэффициента теплопроводности с применением тепловизионных камер и контактных датчиков [1]. Дополнительно выполнялось численное моделирование теплового потока в среде COMSOL Multiphysics для фасадной панели размером 1×1 м с облицовкой из фиброцемента или алюминия. Акустические характеристики изучались в звукоизолированной камере, где регистрировалась звукоизоляционная способность фасада в зависимости от типа крепежа и усилия затяжки [6].

Образцы моделировали реальные системы: алюминиевые композитные панели толщиной 4 мм монтировались на стальную подконструкцию с воздушным зазором 50 мм. Для повышения достоверности испытаний тестировалось по 10 образцов каждого типа крепежа. На основании полученных данных определялись несущая способность и коэффициенты безопасности при расчётной нагрузке 2 кН [7].

Особое внимание уделено оценке прочности крепежных элементов на сдвиг – критически важному параметру при проектировании фасадов, подверженных ветровым и сейсмическим воздействиям. Применялись стандартизованные и экспериментальные методы, адаптированные к условиям эксплуатации вентилируемых фасадов. Испытания охватывали элементы из нержавеющей стали (AISI 316), оцинкованной стали, алюминия и химических анкеров, что обеспечивало репрезентативность набора [7].

Сдвиговые испытания проводились с использованием приспособлений, адаптированных по ISO 6892-1:2019, на установке Instron 5982. Образцы фиксировались в стальных пластинах, имитирующих соединения подконструкции с типичным вентиляционным зазором. Нагрузка прикладывалась с шагом 0,1 кН до разрушения, регистрировались предельная сдвиговая нагрузка и деформация.

Для сложных соединений использовалась конфигурация двойного сдвига согласно ASTM F606/F606M-21, при которой крепёж соединял две пластины, равномерно распределяя нагрузку. Это особенно важно для анкеров, удерживающих тяжёлые облицовочные материалы, такие как керамогранит. Дополнительно проводились циклические испытания сдвига при частоте 15 Гц и амплитуде 60% от статической прочности, имитирующие динамические нагрузки [4].

Численное моделирование в COMSOL Multiphysics дополняло эксперимент, позволяя детально анализировать распределение напряжений и деформаций в соединениях. В расчётах использовались реальные свойства материалов (модуль Юнга: 210 ГПа для стали и др.), а также геометрия соединений. Напряжение при сдвиге рассчитывается по формуле:

$$\tau_{max} = \frac{F}{A}$$

где F – приложенная нагрузка, A – площадь поперечного сечения. Результаты моделирования и эксперимента совпадали с погрешностью менее 8%, что подтверждало надёжность методики.

Для повышения статистической достоверности использовались по 10 образцов каждого типа крепежа. Характеристики оборудования и параметры испытаний представлены в таблице 1, что обеспечивает возможность воспроизведения экспериментов в других

исследованиях. Полученные значения сдвиговой прочности варьировались от 2,9 кН (алюминиевые клипсы) до 6,5 кН (стальные анкеры) и были использованы в оценке их пригодности для применения в фасадных системах [1,2].

Анализ экспериментальных исследований Исследования выявили значительные различия в характеристиках крепёжных элементов. Анкеры из нержавеющей стали продемонстрировали наивысшую прочность, выдерживая до 8 кН при растяжении и 6,5 кН при сдвиге, что делает их предпочтительными для тяжёлых облицовочных материалов, таких как керамогранит [7]. Болты из оцинкованной стали показали сопоставимые значения (6,8 кН и 5,5 кН соответственно), обеспечивая надёжность при средних нагрузках. Винты выдерживали до 5,5 кН, а алюминиевые клипсы – не более 3,8 кН, что ограничивает их применение в высоконагруженных конструкциях.

Показатели усталостной прочности подтвердили долговечность стальных анкеров, выдержавших до 2 миллионов циклов при переменных нагрузках [5]. Болты и винты сохраняли работоспособность до 1,5 и 1,2 миллиона циклов соответственно, тогда как алюминиевые клипсы разрушились после 800 тысяч циклов. При этом применение предварительного напряжения увеличивало усталостную стойкость на 20–25%. Расчётные значения коэффициентов запаса прочности составили: для анкеров – до 4,0, болтов – 3,4, винтов – 2,75, клипс – лишь 1,9, что подчёркивает их ограниченную надёжность [7].

Коррозионная стойкость материалов также варьировалась. Нержавеющая сталь показала наилучшие характеристики: после 1000 часов в камере солевого тумана потеря массы составила менее 0,1%, признаки питтинга отсутствовали [4,8]. Оцинкованная сталь имела допустимые показатели с потерей массы до 1,5% и образованием белого налёта, что приемлемо для эксплуатации в городских условиях. Алюминиевые элементы, потерявшие до 3% массы, продемонстрировали низкую устойчивость в агрессивных средах, таких как прибрежные зоны.

Тепловые испытания выявили влияние крепежей на теплопотери. Металлические элементы, особенно из алюминия, формировали тепловые мости, увеличивая потери тепла на 5–10% [1]. Теплопроводность нержавеющей стали составляла $3,97\text{--}4,85 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, а с перфорацией, удлиняющей путь теплового потока, – около $4,26 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, что снижает теплопередачу на 12%. Алюминиевые крепежи отличались существенно более высокой теплопроводностью – до $21,04 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$. Пластиковые анкеры обеспечивали снижение теплопотерь до 15%, однако ограниченная механическая прочность препятствовала их широкому применению. Численные симуляции показали, что при использовании нержавеющей стали с отверстиями плотность теплового потока составляет $5,194\text{--}8,011 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$, в то время как у алюминия этот показатель достигает $11,657\text{--}24,112 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ [1]. Валидация тепловизионными измерениями подтвердила точность моделей, с отклонением менее 10%.

Акустические свойства крепёжных систем зависели от материалов и конструкции [6]. Полимерные вставки позволяли улучшить звукоизоляцию на 5–10 дБ за счёт демпфирования вибраций, тогда как металлические элементы, особенно при высокой степени затяжки, повышали передачу шума на 2–3 дБ. Наилучшие результаты показали комбинированные системы, сочетающие металл и полимеры, которые оказались наиболее эффективными для

шумных городских условий. В Таблице 1 показаны основные характеристики крепежных элементов, иллюстрируя их механические и тепловые свойства.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики крепежных элементов

Тип крепежных элементов	Прочность на растяжение, кН	Прочность на сдвиг, кН	Эффективная теплопрь, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	Усталостная прочность, млн циклов
Нерж. сталь (анкеры)	7,5–8,0	6,2–6,5	3,97–4,85 (4,26 с отверстиями)	1,8–2,0
Оцинк. сталь (болты)	6,8	5,5	–	1,5
Нерж. сталь (винты)	5,2–5,5	4,0–4,2	–	1,2
Алюминий (клипсы)	3,1–3,8	2,5–2,9	15,68–21,04	0,8
Пластик	–	–	Низкая	–

Проведённые исследования подтверждают, что выбор крепёжных элементов для вентилируемых фасадов должен основываться на комплексном анализе эксплуатационных характеристик. Нержавеющая сталь выделяется благодаря сочетанию высокой прочности, устойчивости к коррозии и умеренной теплопроводности [4,7]. Её способность сохранять функциональные свойства в агрессивных средах делает данный материал оптимальным выбором для прибрежных и промышленных зон. Геометрическая оптимизация, включая перфорацию, позволяет дополнительно снизить теплопередачу, что особенно важно в условиях реализации современных требований к энергоэффективности зданий [1,3].

Оцинкованная сталь и алюминий применимы в менее агрессивных условиях эксплуатации, однако их сравнительно низкая коррозионная и усталостная стойкость требует более тщательной проработки при проектировании [5]. Пластиковые крепёжные элементы, несмотря на хорошие теплоизоляционные свойства, обладают недостаточной механической прочностью, что ограничивает их использование в конструкциях с высокими эксплуатационными нагрузками. Перспективным направлением являются комбинированные решения, сочетающие металлическую основу с полимерными вставками. Такие системы обеспечивают баланс между прочностными характеристиками, теплотехнической эффективностью и звукоизоляцией [6].

Численные симуляции, выполненные в среде COMSOL Multiphysics, подтвердили достоверность экспериментальных данных, показав расхождение менее 10% [1]. Это свидетельствует о высокой точности применяемой методики и её пригодности для последующих инженерных исследований и оптимизации конструкций. Существенное влияние на характеристики крепежа оказали конструктивные параметры, включая длину, толщину антикоррозионного покрытия и наличие демпфирующих вставок, что открывает возможности для дальнейших разработок и технологических улучшений.

Визуализация зависимости теплового потока от типа материала крепежа (например, нержавеющая сталь с отверстиями против алюминия) могла бы эффективно

продемонстрировать преимущества оптимизированных конструкций. Однако построение подобного графика требует дополнительных экспериментальных данных и последующего верификационного анализа.

Выводы. Проведённое исследование подтвердило, что нержавеющая сталь является наиболее универсальным материалом для крепёжных элементов вентилируемых фасадов благодаря сочетанию высокой прочности, устойчивости к коррозии и потенциала для теплотехнической оптимизации [1,4,7]. Конструктивные решения, включая перфорацию и применение полимерных вставок, позволяют существенно повысить тепло- и звукоизоляционные характеристики крепёжных систем [1,6].

Выбор типа крепежа должен осуществляться на основе всестороннего анализа требований: механических, коррозионных, тепловых, акустических, а также с учётом специфики климатических условий эксплуатации. В целях повышения энергоэффективности и надёжности фасадных систем перспективным направлением является разработка гибридных крепежных решений, сочетающих прочностные свойства металлов с изоляционными преимуществами полимерных материалов. Дополнительные исследования в области геометрической оптимизации таких систем позволят достичь более высокого уровня эксплуатационной надёжности и продлить срок службы ограждающих конструкций зданий.

Список использованных источников

1. Grabowski, M., Poniewierski, M. E., & Wernik, J. (2023). Testing the thermal properties of modern ventilated facade fastening systems. *Scientific Reports*, 23, 9464. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27748-6>
2. Fantozzi, F., Di Nardi, M., & Paolini, R. (2019). Ventilated facades: A review of design and performance. *Journal of Building Engineering*, 26, 100897. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100897>
3. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. *Official Journal of the European Union*, L 153/13.
4. Sedlacek, G., & Feldmann, M. (2009). Corrosion resistance of stainless steel fasteners in construction. *Steel Construction*, 2(3), 175–181. <https://doi.org/10.1002/stco.200910021>
5. Veljkovic, M., & Gozzi, J. (2007). Fatigue life of bolted connections in curtain wall systems. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(9), 1235–1243. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.11.008>
6. Caniato, M., Bettarello, F., & Gasparella, A. (2020). Acoustic performance of ventilated facades: A review. *Applied Acoustics*, 165, 107305. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107305>
7. ISO 6892-1:2019, Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature. International Organization for Standardization.
8. ASTM B117-19, Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. ASTM International.
9. EN 1993-1-8:2005, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints. European Committee for Standardization.
10. ISO 9227:2017, Corrosion tests in artificial atmospheres – Salt spray tests. International Organization for Standardization.

11. ГОСТ 9.308-85, Единая система защиты от коррозии и старения. Методы испытаний на коррозионную стойкость. Росстандарт.
12. COMSOL Multiphysics, v. 5.6, 2020. COMSOL Inc.
13. ASTM F606/F606M-21, Standard Test Methods for Determining the Mechanical Properties of Externally and Internally Threaded Fasteners, Washers, Direct Tension Indicators, and Rivets. ASTM International.
14. Бегалиев У.Т., Абдыкалыков Д.Б., Абдыганы У.Э., Кенешбек У.Т. Натурные динамические испытания 3-этажного здания со стенами комплексной конструкции. – Наука и инновационные технологии. – 2022. № 1 (22). – С. 3-14.
15. Abdykalykov A.A., Abdybaliev M.K., Begaliev U.T. Approaches to determination of seismic hazard on building area and demand for building structures in the Kyrgyz Republic. – News of International Association of Experts on Earthquake Engineering. – 2022. № 1 (13). – С. 5-14.
16. Тулеев А.Т., Абаканов Т., Бегалиев У.Т., Лапин В.А. Динамические испытания высотного жилого дома в г. Алматы. – Наука и инновационные технологии. – 2024. № 1 (30). – С. 310-320.
17. Бегалиев У.Т., Абдыкадыров А.З., Абдыкалыков Д.Б. Экспериментальные зависимости «силы-перемещения» при испытаниях на статические горизонтальные и вертикальные воздействия стеновых панелей из ЛСТК. – Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2024. № 6. – С. 139-164.
18. Матыева А.К., Таалайбеков А., Апysов К., Рысбаев Э., Таалайбеков С. Инновация в сейсмостойком строительстве. – Наука и инновационные технологии. – 2021. № 1 (18). – С. 154-161.