



Research Article

Received: January 24, 2025

Accepted: February 7, 2025

Published: February 15, 2025

ISSN 2304-6295

Bearing capacity of I-shaped brackets of curtain wall systems

Galyamichev, Alexander Viktorovich¹ Lysenko, Dmitry Alexandrovich¹ Shvedov, Maxim Andreevich^{1*}

¹ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU), Saint-Peterburg, Russian Federation; gav@spbstu.ru (G.A.V.); lysenko_da@spbstu.ru (L.D.A.); shvedov.ma@edu.spbstu.ru (S.M.A)

Correspondence:* email shvedov.ma@edu.spbstu.ru; contact phone [+79500763442](tel:+79500763442)

Keywords:

Brackets; Ventilated facade systems; Method verification; Finite element analysis; Pull-out tests; Bending tests; Compression testing

Abstract:

The object of the research is aluminum brackets with two anchor fastenings and various overhangs of the cantilever part in the range from 120 mm to 270 mm. The purpose of this work is to develop a methodology for the numerical calculation of fastening elements of curtain wall systems considering geometric and structural nonlinearity. Three types of forces acting on the brackets are considered: tensile, bending and compressive. **Method.** A methodology for numerical modeling of the L-shaped bracket structure using plate finite elements in nonlinear calculations is proposed. The modeling results are tested because of a laboratory study. **Results.** Analysis of the bearing capacity results obtained using numerical models with plate finite elements and during the laboratory study showed sufficient consistency. The use of simplified methods for modeling fastening elements of curtain wall systems leads to an underestimation of the bearing capacity under tension by 37%, and to a significant overestimation under a bending load by 88%.

1 Introduction

Навесные фасадные системы (НФС) являются распространённым видом облицовки зданий и сооружений благодаря небольшому весу, высоким теплоизоляционным свойствам [1]–[3], надёжности, эстетичному виду [4] и достаточно быстрой скорости закрепления (крепления) элементов фасада [5]. В качестве внешней облицовки используются такие материалы, как фиброцемент, HPL, композиты, натуральный камень, керамика и другие [6]. Облицовочные панели монтируются к подсистеме, которая передает собственный вес и внешнюю (ветровую) нагрузку на элементы конструкции здания. Подсистема вентилируемых фасадов состоит из набора направляющих, закрепленных на несущих или опорных кронштейнах, которые передают нагрузку, создаваемую внешним воздействием (ветровая, гололедная и температурная нагрузки). Кронштейны являются одними из основных несущих элементов НФС. Они воспринимают нагрузки от собственного веса фасадной системы, температурно-климатические нагрузки и передают их на конструктивные элементы здания. Пример конструкции навесной фасадной системы представлен на рисунке 1.

Наиболее распространенными материалами, используемыми для производства несущих кронштейнов, являются алюминиевые сплавы, нержавеющей и оцинкованные стали. Большинство кронштейнов имеют L-образную форму и используются для одностороннего крепления вертикальных направляющих в подсистеме фасада. Из-за толщины теплоизоляционного слоя вылет кронштейна в большинстве случаев лежит в диапазоне от 120 мм до 300. Алюминиевые кронштейны изготавливаются методом экструзии, а стальные – путем гибки листового проката.

Galyamichev, A.; Lysenko, D.; Shvedov, M.

Bearing capacity of L-shaped brackets of curtain wall systems;

2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 116 Article No 11602. doi: 10.4123/CUBS.116.2

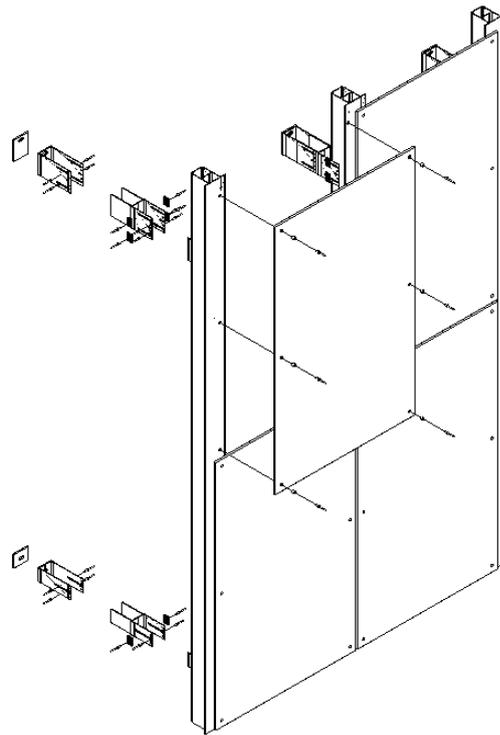


Fig. 1 - Example ventilated façade
Image by the author of the article

Оценка несущей способности элементов фасадной системы является одной из основных направлений исследований. В [7]–[9] авторами проводились исследования несущей способности элементов НФС с учетом методов расчета тонкостенных конструкций в стержневой постановке.

Наибольшее влияние на напряженно-деформированное состояние фасадной системы оказывает ветровая нагрузка [10]–[12]. Теплопроводность и численное моделирование климата вентилируемых фасадов представлены в [13]–[15]. Влияние терморазрыва между элементами НФС и несущим основанием на деформированность L-образного кронштейна представлен в [16]. Результаты исследования [17] установили влияние упругости стальных кронштейнов и жесткости элементов системы в целом. Различия в упругих свойствах соединений могут приводить к изменению распределения внешней нагрузки и, следовательно, внутренних сил и напряжений, возникающих в элементах навесной фасадной системе. Учет упругопластических свойств металлов позволяет значительно снизить материалоемкость элементов НФС [18].

Исследования посвящены оптимизации геометрических характеристик несущих и опорных кронштейнов [19], [20], [21], а также внедрению композитных материалов [22], [23], [24].

Исследование [25] демонстрирует влияние расположения болтов или анкеров на конечную жесткость соединения на изгиб и кручение. Влияние диаметра относительно мало.

Во многих научных работах представлены расчеты кронштейнов различной конфигурации в программных комплексах, в которых реализован метод конечных элементов (МКЭ) с использованием объемных конечных элементов (КЭ). Подобные расчеты требуют большого количества вычислительных ресурсов и, следовательно, неприменимы для инженерных вычислений напряженного деформированного состояния (НДС) элементов НФС. Исходя из этого, смонтированные фасадные системы не удовлетворяют требованиям по установленным срокам службы [26], [27].

В работе [28] рассматривается НДС стальных L-образных кронштейнов постоянного сечения с учетом геометрической нелинейности на действие срезающего усилия. Авторы указывают на необходимость рассмотрения конструктивно-нелинейной постановки задачи.

Действующая нормативная документация по проектированию и расчету элементов навесных фасадных систем в Российской Федерации предлагает несколько типов расчетных схем для определения, вытягивающего и срезающего усилий, действующих на несущие кронштейны и методику расчета на устойчивость направляющих профилей. Однако в нормах не дано никаких руководящих принципов, касающихся проведения математического моделирования и учета совместной работы элементов навесной фасадной системы.

Galyamichev, A.; Lysenko, D.; Shvedov, M.

Bearing capacity of L-shaped brackets of curtain wall systems;

2025; Construction of Unique Buildings and Structures; **116** Article No 11602. doi: 10.4123/CUBS.116.2

Инженеру необходимо определять максимально допустимую нагрузку на несущие кронштейны, чтобы конструкция НФС удовлетворяла требованиям групп предельных состояний. Ввиду уникальности каждого фасадного решения диапазон испытанных производителем кронштейнов может оказаться недостаточным, и в таком случае следует использовать конечно-элементный анализ.

Различия в результатах численного моделирования могут быть связаны с используемыми алгоритмами построения сетки КЭ, размерами элементов и настроек решателя, используемых в расчетных программных комплексах [29], [30].

Все вышеуказанное свидетельствует о необходимости проведения дальнейших исследований и позволяет сформулировать цель: предложить способ расчета кронштейнов НФС численным методом на действие эксплуатационных нагрузок, действующих в различных направлениях.

Алюминиевые L-образные кронштейны являются объектом исследования, напряженно-деформированное состояние данных элементов НФС – предметом исследования.

2 Materials and Methods

В качестве объекта исследования был выбран алюминиевый L-образный кронштейн навесной фасадной системы с двумя точками крепления к несущему основанию, конструктивная схема которого представлена на рисунке 2. Выбор связан с большой распространенностью подобных элементов конструкции НФС.

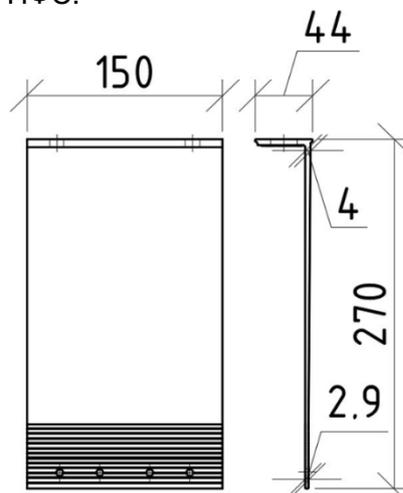


Fig. 2 - Standard sizes of the investigated bracket, mm
Image by the author of the article

Для определения прочности кронштейна рассматривалась его несущая способность под действием вертикальных нагрузок, действующих в плоскости фасада – изгиб (рисунок 3а), а также горизонтальных нагрузок, действующих из плоскости фасада – сжатие (рисунок 3б) и отрыв (рисунок 3с).

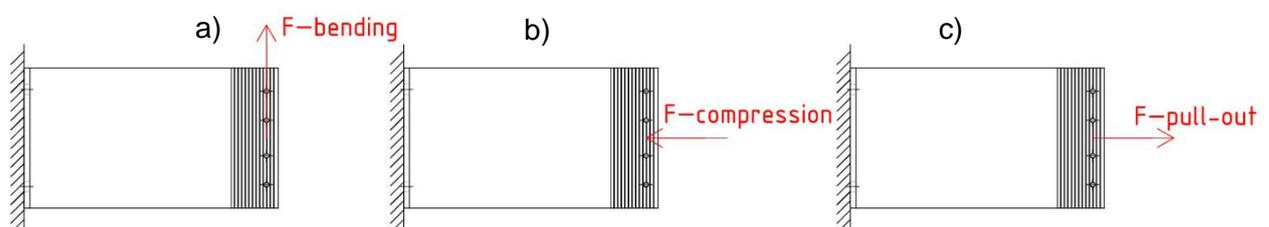


Fig. 3 - Loading schemes: a – bending; b – compression; c – tension (pull-out)
Image by the author of the article

Для выполнения расчета были составлены конечно-элементные модели в программном комплексе SCAD Office версии 21.1. Данный программный комплекс является наиболее распространенным инструментом расчета навесных фасадных систем среди российских инженеров.

Моделирование кронштейнов производилось в типе схемы 5 (система общего вида) при помощи оболочечных конечных элементов, учитывающих геометрическую нелинейность (КЭ тип 42 и 44). Для обеспечения совместной работы пластин между собой, а также с несущим основанием использовались односторонние связи (КЭ тип 351 и 352), отключаемые при растяжении, как показано на рисунке 4. Таким образом моделировалась контактная задача.

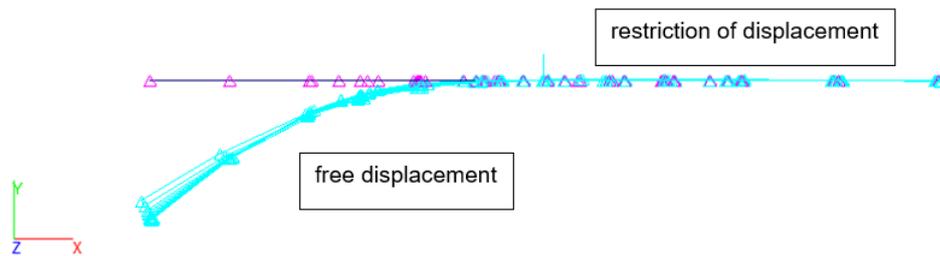


Fig. 4 - Modeling the contact of the bracket with the supporting base

Анкерное крепление моделировалось путем задания связей во всех направлениях (X, Y, Z, U_x , U_y , U_z). При этом учитывалась работа алюминиевой шайбы путем ввода объединения перемещения смежных узлов с конечными элементами основания кронштейна по линейным направлениям. Узел анкерного крепления показан на рисунке 5. Общий вид расчетной схемы продемонстрирован на рисунке 6. Расчет выполнялся простым шаговым методом.

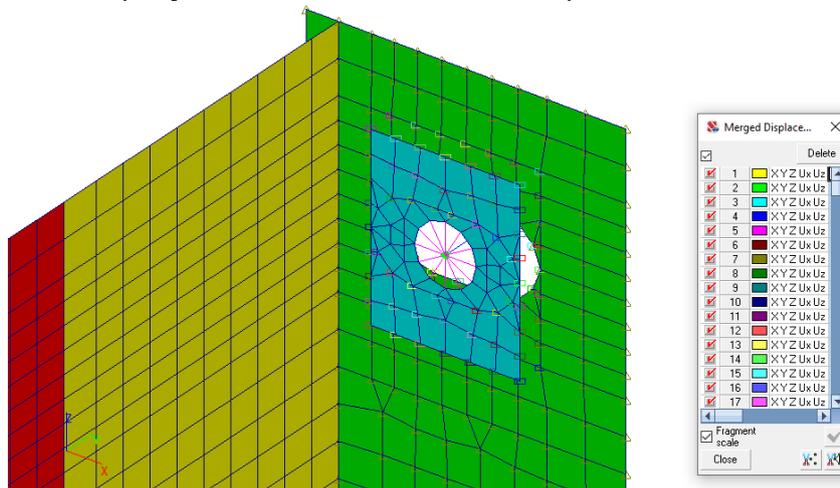


Fig. 5 - Anchor fastening modeling

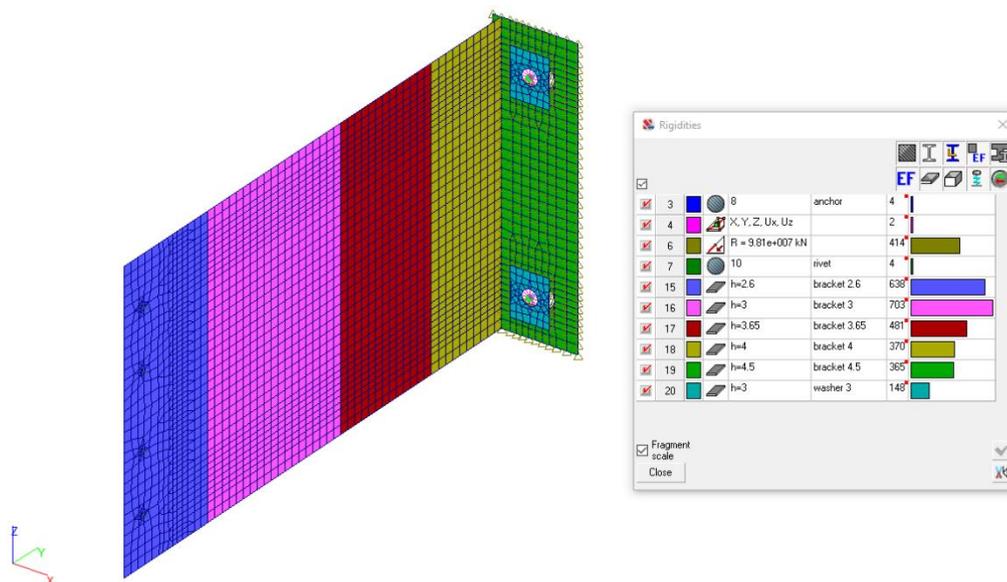


Fig. 6 - General view of the calculation scheme in the software package SCAD Office

Galyamichev, A.; Lysenko, D.; Shvedov, M.

Bearing capacity of L-shaped brackets of curtain wall systems;

2025; Construction of Unique Buildings and Structures; **116** Article No 11602. doi: 10.4123/CUBS.116.2

Анализ МКЭ был проведен для модели алюминиевого несущего кронштейна с вылетом 270 мм, а также были проведены лабораторные испытания для проверки метода моделирования. Впоследствии был проведен сравнительный анализ результатов численного моделирования в пластинчатой постановке для трех типов несущих кронштейнов различных вылетов (270 мм, 180 мм и 120 мм) с стержневыми моделями (КЭ 5) в линейной постановке. Расчетная схема в стержневой постановке в ПК SCAD Office представлена на рисунке 7.

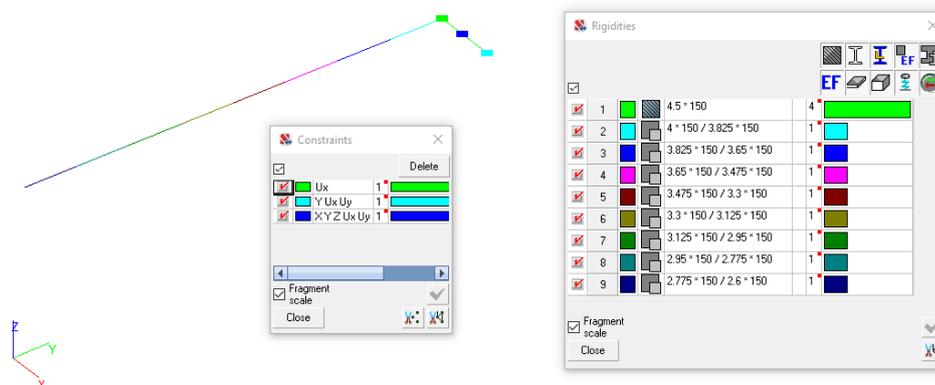


Fig. 7 - Modeling of the rod calculation scheme in the software package SCAD Office

Для оценки прочности максимальное напряжение, возникающее в кронштейне, сравнивались с расчетным сопротивлением алюминиевого сплава R_u ($R_u=135$ МПа).

Предельно-допустимый прогиб кронштейна рассчитывался по формуле (1).

$$f_u = \frac{1}{75} \cdot l_k, \quad (1)$$

где f_u – предельно-допустимый прогиб;

l_k – длина консоли.

Для анализа устойчивости кронштейна при сжатии применялась формула Эйлера (2), по которой определялась расчетная критическая сила.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{min}}{(\mu \cdot L)^2}, \quad (2)$$

где P_{cr} – критическая сила потери устойчивости по Эйлеру;

π – число пи;

E – модуль упругости алюминия ($E=70000$ МПа);

I_{min} – минимальный момент инерции вылета кронштейна (рассчитывается для каждого типоразмера несущего кронштейна);

μ – коэффициент приведенной длины, как показано на рисунке 8;

L – величина вылета несущего кронштейна.

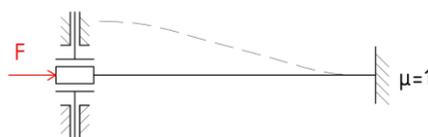


Fig. 8 - Effective length factor of the analyzed bracket structure
Image by the author of the article

Для проведения серии из 5 натурных испытаний на сжатие к образцам кронштейнов прикреплялись оснастка для передачи нагрузки от ручного насоса ULTIMA P-80 Enerpac и гидравлического цилиндра одностороннего действия RC-2514 Enerpac (Enerpac Tool Group, Menomonee Falls, Wisconsin, USA) после чего конструкция фиксировалась на испытательном стенде, как показано на рисунке 9. Для фиксации перемещений в характерных точках устанавливались прогибомеры типа 6-ПАО (ООО «НПФ Завод «Измерон», г. Санкт-Петербург,

Россия). Значения нагрузки фиксировались при помощи динамометра ДМ-МГ4 (ООО "СКБ Стройприбор", г. Челябинск, Россия).



Fig. 9 - Compression testing stand

Для проведения серий из 5 натурных испытаний на изгиб и отрыв к образцам кронштейнов прикреплялась оснастка для передачи нагрузки от измерителя адгезии ПСО-20МГ4АД (ООО "СКБ Стройприбор", г. Челябинск, Россия), после чего конструкции устанавливались на испытательные стелды, как показано на рисунке 10. Зависимости нагрузки от перемещений фиксировались прибором автоматически.



Fig. 10 - Testing stands: a – for bending; b – tension (pull-out)

3 Results and Discussion

Для детального анализа был рассмотрен несущий алюминиевый кронштейн габаритами 270x150x44 мм. На рисунках 11, 14 и 15 представлены графики зависимости нагрузки от перемещения по результатам лабораторных испытаний на сжатие, изгиб и растяжение соответственно с результатами численного экспериментального исследования. При помощи формулы (2) было вычислено значение критической силы по Эйлеру для сжимающей нагрузки ($P_{cr}=2.08$ кН), вычислены значения предельно допустимых прогибов ($f_u=3.6$ мм) для сжатия и изгиба при принятой длине консоли, равной вылету кронштейна. С помощью препроцессора ПК SCAD Office «Устойчивость» получено значение критической силы для стержневой модели.

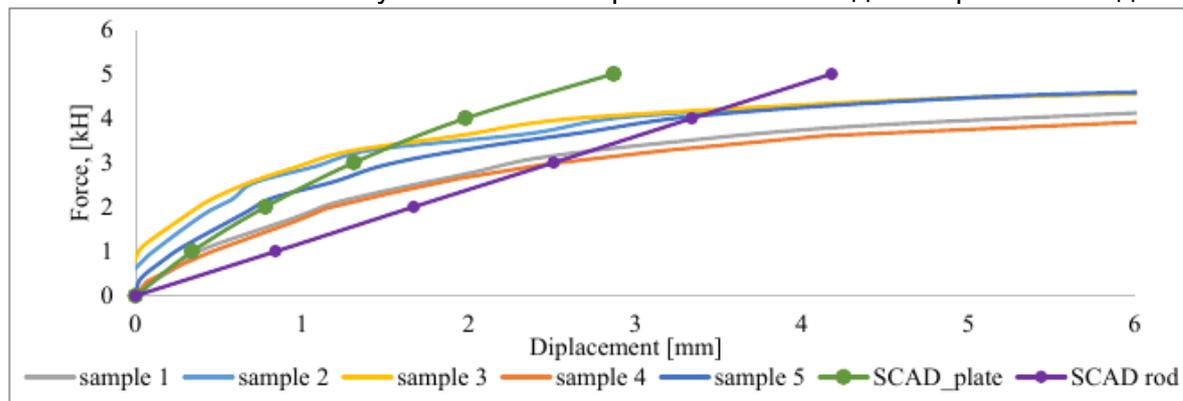


Fig. 11 - Graph of the dependence of compressive load on displacements

В результате проведения испытаний был выявлен характер работы конструкции, а также выявлены зоны с наиболее выраженными деформациями. Расчет на устойчивость с учетом геометрической и конструктивной нелинейности программным комплексом SCAD Office невозможен. Поведение образцов при испытаниях на сжатие, представленные на рисунке 12 позволили выбрать схему работы конструкции для дальнейших расчетов на устойчивость по формуле Эйлера. С помощью препроцессора ПК SCAD Office «Устойчивость» получено значение критической силы для стержневой модели (P_{cr}^{rod}), что составило 16.15 кН. При этом форма потери устойчивости (рисунок 13) аналогична деформированной конструкцией кронштейна при лабораторных испытаниях, продемонстрированной на рисунке 12b.

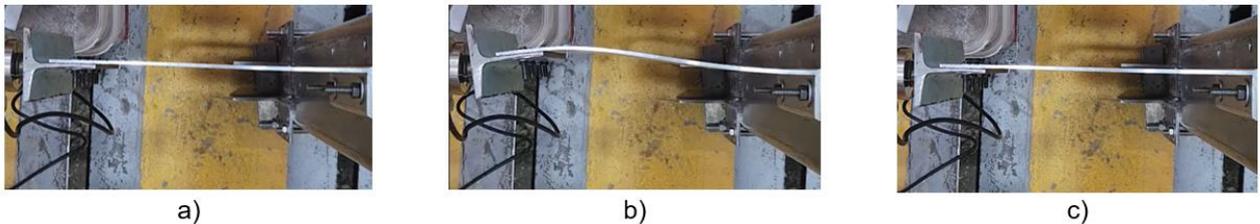


Fig. 12 - Bracket specimen during compression testing: a – before load application; b – at maximum load; c – after load removal

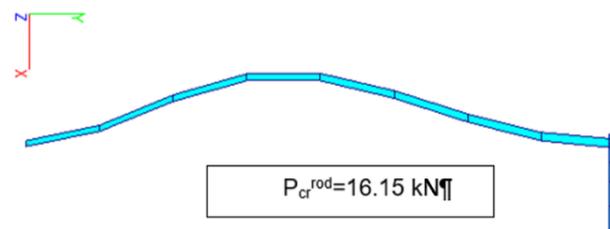


Fig. 13 - Form of loss of stability of the rod calculation scheme

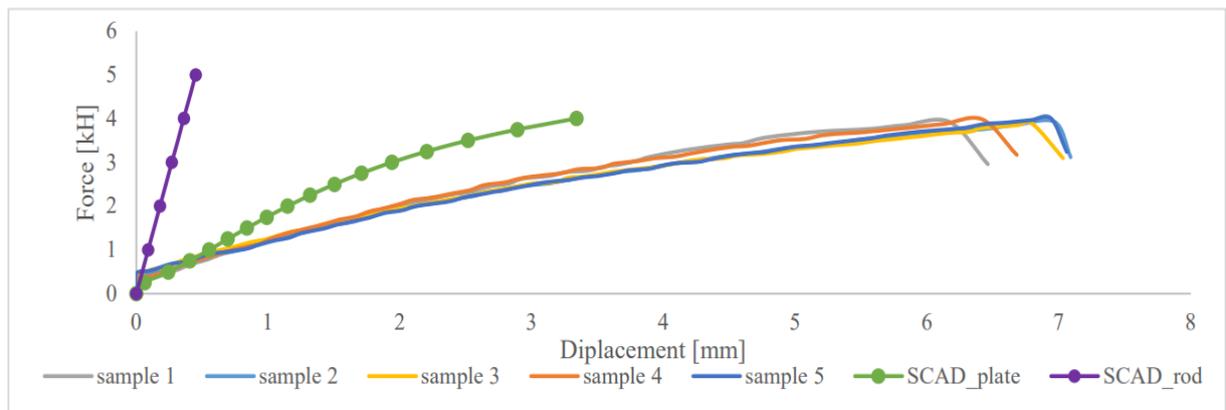


Fig. 14 - Graph of the dependence of bending load on displacements

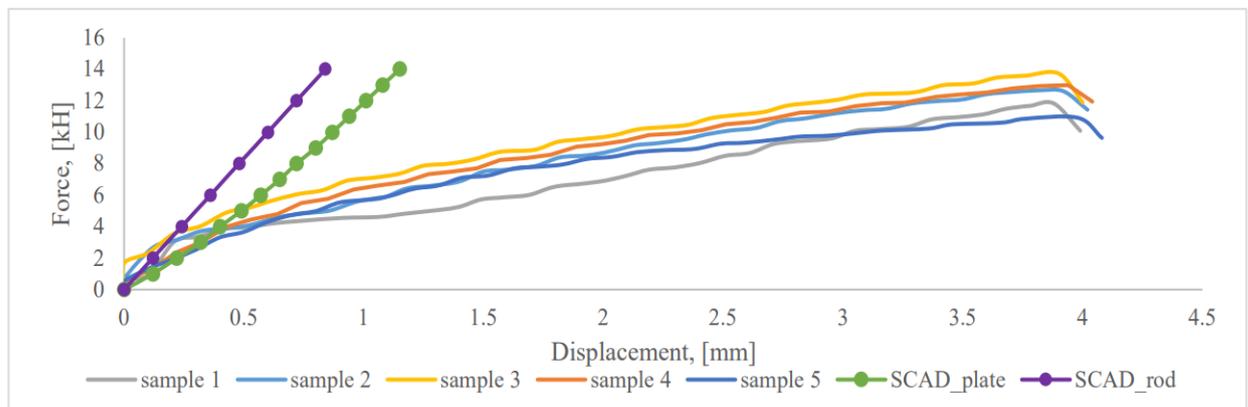


Fig. 15 - Graph of the dependence of tensile load on displacements

Различия в зависимостях нагрузки от перемещений в нелинейной модели с использованием пластинчатых конечных элементов связаны с перемещением испытательной оснастки, не учитываемым в расчетах, наличием люфтов закреплениях и несовершенством методов учета геометрической нелинейности, заложенных в программный комплекс SCAD Office, а также отсутствием возможности использования физической нелинейности совместно с геометрической. Расчет устойчивости с использованием формулы Эйлера дает достаточно точное решение, однако учитывает только сжимающую силу и постоянную жесткость поперечного сечения стержня.

Также, при помощи конечно-элементных моделей проводился анализ напряжений в кронштейне. На рисунке 16 представлено распределение напряжений при действии сжимающей нагрузки равной 1.98 кН, погрешность по сравнению с величиной критической силы по Эйлеру составляет 4.8%.

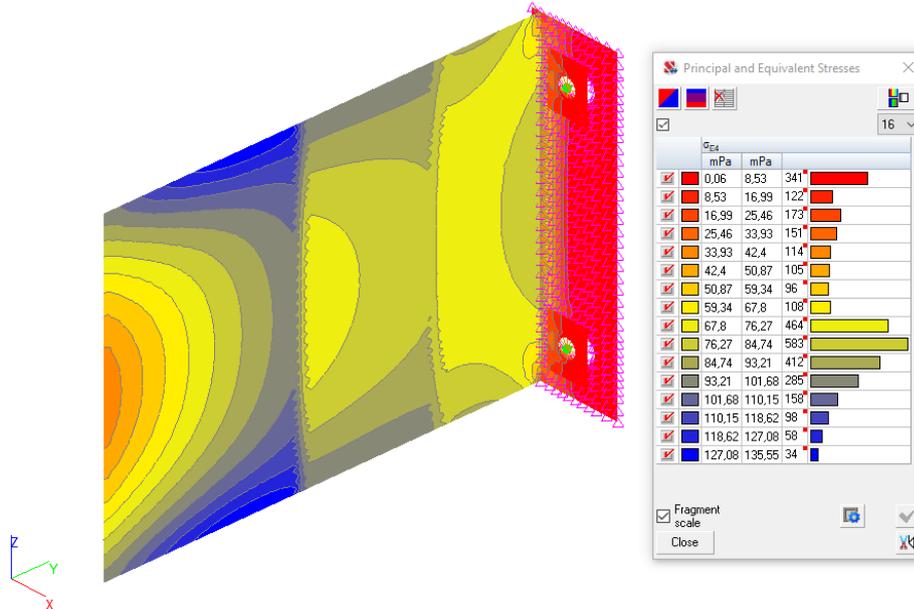


Fig. 16 - Stresses in the structure during compression analysis

Характером разрушения кронштейна при сжимающей нагрузке является потеря общей устойчивости кронштейна вследствие образование пластических деформаций в центре консольной части. При воздействии изгибающих и растягивающих усилий – образование пластического шарнира в зоне анкерного крепления к несущему основанию, что также подтверждается анализом напряженно-деформированного состояния, продемонстрированного на рисунке 17.

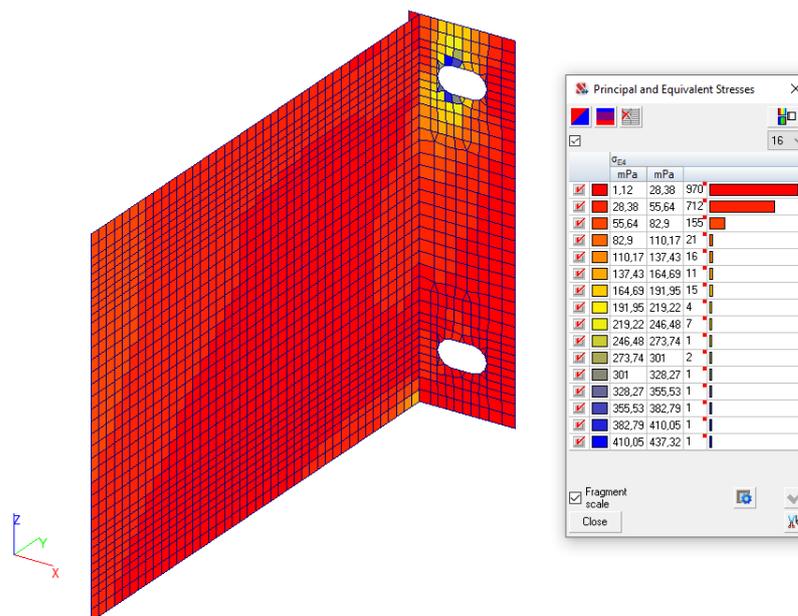


Fig. 17 - Stresses in the structure during bending analysis. The load value is 2 kN

В таблице 1 представлены данные предельных расчетных нагрузок при растяжении, изгибе и сжатии двух численных моделей в ПК SCAD Office.

Table 1. Results of the analysis of types of FEM calculation schemes

Вылет кронштейна, мм	Предельная расчетная нагрузка					
	при растяжении, кН		при изгибе, кН		при сжатии, кН	
	КЭ 42-44	КЭ 5	КЭ 42-44	КЭ 5	КЭ 42-44	КЭ 5
270	2.54	1.95	1.35	7.56	1.98	-
180	2.82	1.95	1.35	11.37	3.58	-
120	3.13	1.95	1.71	14.27	-	-

В таблице 2 представлены данные предельных расчетных нагрузок при растяжении, изгибе и сжатии численной модели в ПК SCAD Office с использованием пластинчатых КЭ и нелинейного расчета в сравнении с данными, полученными исходя из анализа графиков натуральных испытаний.

Table 2. Results of the analysis of the plate FEM calculation scheme with laboratory tests

Вылет кронштейна, мм	Предельная расчетная нагрузка					
	при растяжении, кН		при изгибе, кН		при сжатии, кН	
	КЭ 42-44	Испытания	КЭ 42-44	Испытания	КЭ 42-44	Испытания
270	2.54	3.1	1.35	1.8	1.98	2.2
180	2.82	3.5	1.35	1.8	3.27	3.4
120	3.13	3.9	1.71	2.2	-	5.5

На основе полученных графиков на рисунках 11, 14, 15 и таблиц 1, 2 зафиксировано удовлетворительное соответствие результатов, полученных по численным моделям МКЭ в пластинчатой постановке с учетом геометрической и конструктивной нелинейности с результатами лабораторных испытаний.

4 Conclusions

На основании проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. Проведенный анализ доказал, что предложенная методика численного моделирования в программном комплексе SCAD Office применима для инженерного проектирования элементов навесных фасадных систем, что подтверждается достаточным соответствием результатов с лабораторными испытаниями.



2. Предложенный способ моделирования алюминиевых L-образных кронштейнов позволяет проводить оценку несущей способности при сжатии для кронштейна с длинной вылета больше его высоты.

3. Использование упрощенных методов моделирования элементов крепления навесных фасадных систем приводит к занижению несущей способности при растяжении на 37%, и к значительному завышению при действии изгибающей нагрузки на 88%.

4. Установлена обратно пропорциональная зависимость между значением вылета L-образного кронштейна и его расчетной несущей способности при растяжении и сжатии.

5 Conflict of Interests

The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

References

- Schabowicz, K., & Zawiślak, Ł. (2020). Numerical comparison of thermal behaviour between ventilated facades. *Studia Geotechnica et Mechanica*, **42(4)**, 297-305. <https://doi.org/10.2478/sgem-2019-0044>
- Summa, S., Mircoli, A., Potena, D., Ulpiani, G., Diamantini, C., & Di Perna, C. (2024). Combining artificial intelligence and building engineering technologies towards energy efficiency: the case of ventilated façades. *Construction Innovation*, **24(7)**, 44-64. <https://doi.org/10.1108/CI-11-2021-0229>
- Rubina, A., Uher, P., Vrána, J., Novotný, M., Nespěšný, O., Skřek, D., Šuhajdová, E., Vystrčil, J., & Formánek, M. (2023). Heat Flow through a Facade with a Controlled Ventilated Gap. *Buildings*, **13(3)**, 817. <https://doi.org/10.3390/buildings13030817>
- Baptista, J. F., Kokare, S., Francisco, A. V., Godina, R., & Aelenei, D. (2024). A comparative life cycle assessment of ETICS and ventilated façade systems with timber cladding. *Energy and Buildings*, **304**, 113842. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113842>
- Tusnina, V. M. (2016). To the problem of bearing capacity and operational reliability of suspended ventilated facade. *Procedia Engineering*, **153**, 799-804. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.245>
- Yaman, M. (2021). Different facade types and building integration in energy efficient building design strategies. *International Journal of Built Environment and Sustainability*, **8(2)**, 49-61. <https://doi.org/10.11113/ijbes.v8.n2.732>
- Rybakov, V. A., Deriugin, K. S., Pushkarskaya, M. A., & Urmanceva, K. A. (2020). Facade systems modal analysis in consideration its own dynamic characteristics of the frame. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **(4)**, 1-7. <https://doi.org/10.18720/CUBS.89.6>
- Lalin, V., Rybakov, V., Sergey, A. (2014). The finite elements for design of frame of thin-walled beams. *Applied mechanics and materials*, **578**, 858-863. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.578-579.858>
- Trubina, D., Abdulaev, D., Pichugin, E., & Rybakov, V. (2014). Effect of constructional measures on the total and local loss stability of the thin-walled profile under transverse bending. *Applied Mechanics and Materials*, **633**, 982-990. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.633-634.982>
- Lalin, V., Galyamichev, A., Zdanchuk, E., Mutovkin, A., & Dogru, S. (2019, November). Wind loads on a high-rise building. In *International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering* (pp. 551-562). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42351-3_48
- Galyamichev A. (2017). Wind load and its action on facade structures. *Construction of Wind load and its action on facade structures. Construction of Unique Buildings and Structures*, **9(60)**, 44-57. <https://doi.org/10.18720/CUBS.60.4>
- Zdanchuk, E., Nikitina, O., Galyamichev, A., Serdjuk, D. (2022). Influence of Protrusions on Building Facades on the Distribution of Peak Wind Loads. In: Manakov, A., Edigarian, A. (eds) *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia - 2021*. TransSiberia 2021.



- Lecture Notes in Networks and Systems, **403**. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96383-5_155
13. Tusnina, V. (2020, June). Bearing capacity of the facade system under temperature effect. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering **869(5)**, 052024. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/5/052024>
 14. Petresevics, F., & Nagy, B. (2022). FEM-Based Evaluation of the Point Thermal Transmittance of Various Types of Ventilated Façade Cladding Fastening Systems. *Buildings*, **12(8)**, 1153. <https://doi.org/10.3390/buildings12081153>
 15. Ingeli, R., Gašparík, J., & Paulovičová, L. (2021). Impact of an Innovative Solution for the Interruption of 3-D Point Thermal Bridges in Buildings on Sustainability. *Sustainability*, **13(21)**, 11561. <https://doi.org/10.3390/su132111561>
 16. Endjievsky, L., Tereshkova, A. (2007). Experimental and theoretical analysis of carrying brackets deformation in the façade system with ventilated air-gap. *Journal of Construction and Architecture*, **(1)**, 110-117 <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalno-teoreticheskiy-analiz-deformirovaniya-nesuschih-kronshteynov-v-fasadnoy-sisteme-s-ventiliruemykh-vozdushnym-zazorom/viewer>
 17. Cwyl, M., Wierzbicki, S. J., & Michalczyk, R. (2022). Laboratory tests and numerical analysis of façade sub-structure made of austenitic steel. *Archives of Civil Engineering*, **68(4)**. <https://doi.org/10.24425/ace.2022.143036>
 18. Mastropasqua, A., Stefani, M., Rigone, P., Mazzucchelli, E. S., Giussani, P., & Ammari, M. (2023). Numerical analysis of aluminium façade components: material properties, elastic-plastic response and sustainable impact. *Journal of Facade Design and Engineering*, **11(1)**, 19-36. <http://doi.org/10.47982/jfde.2023.1.02>
 19. Grigoriadis, K., Bouchard, J., & Herrmann, M. (2024). Topologically optimised facade brackets: an embodied carbon, structural and residual stress analysis. *Architectural Intelligence*, **3(1)**, 22. <https://doi.org/10.1007/s44223-024-00063-2>
 20. Aisha, M., & Shanono, I. H. (2018). Strength analysis and structural optimisation of an I-shaped bracket. *Nigerian Journal of Technological Research*, **13(2)**, 14-19. <https://doi.org/10.4314/njtr.v13i2.2>
 21. Shmelev G. N., Antonov A. S., Alitdinova R. E., Valiev I.R. (2024). Designs of a rational corner bracket for attaching a post-and-beam facade system to a building. *News of KSUAE*. **3(69)**, 106-117. <https://doi.org/10.48612/NewsKSUAE/69.10>
 22. Cwyl, M., Dmowska-Michalak, I., Michalczyk, R., & Kaczmarczyk, A. (2022). Laboratory tests and numerical analysis of aluminum helping hand brackets with polyamide thermal break. *Archives of Civil Engineering*, **68(2)**. <https://doi.org/10.24425/ace.2022.140650>
 23. Fenni, B. Ö., Eken, E., & Kaygisiz, H. (2024). Application of topology optimization on a 3D-printed shelf bracket. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, **8(1)**, 32-45. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1331696>
 24. Raghunandan, A. B., Chiniwar, D. S., Hiremath, S., Sondar, P., & Vishwanatha, H. M. (2022). Modelling and Comparative Analysis of Epoxy-Fly-Ash Composite with Alloys for Bracket Application. *Journal of Composites Science*, **6(12)**, 358. <https://doi.org/10.3390/jcs6120358>
 25. Croccolo, D., Fini, S., & Khan, M. Y. (2024). Impact of bolt positioning on the stiffness of angular support brackets. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, **48**, 9-14. <https://doi.org/10.14311/APP.2024.48.0009>
 26. Molotkov, G., Podtelkov, V. (2015). Main causes of destruction of the «sial km» ventilated facades structures and recommendations for their elimination. *Scientific Journal of KubSAU*, **107**, 1579-1600. <http://ej.kubagro.ru/2015/03/pdf/102.pdf>
 27. Ivorra, S., Garcia-Barba, J., Mateo, M., Pérez-Carramiñana, C., & Maciá, A. (2013). Partial collapse of a ventilated stone façade: Diagnosis and analysis of the anchorage system. *Engineering Failure Analysis*, **31**, 290-301. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.01.045>
 28. Endzhievskiy L.V., Frolovskaya A.V., Petrova Yu.M. (2018). Experimental and theoretical analysis of the stress-strain state (sss) of the bearing brackets in the curtain wall systems with an air gap in building projects of the textile industry. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, **6(378)**, 196-201. https://tftp.ivgpu.com/wp-content/uploads/2019/05/378_43.pdf
 29. Parashuram, B., Aprameya C. (2016). Design, 3D Modelling, and study on L-Bracket Rib Strength through FEM Analysis: A Comparative Study using Solid Works and Ansys Software.

Galyamichev, A.; Lysenko, D.; Shvedov, M.

Bearing capacity of L-shaped brackets of curtain wall systems;

2025; Construction of Unique Buildings and Structures; **116** Article No 11602. doi: 10.4123/CUBS.116.2



- International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology* **2(1)**, 677-686. <https://doi.org/10.32628/IJSRSET173391>
30. Akhmadullina, G., Shmelev, G., Antonov, A., Gimazetdinov, A., & Fahrutdinov, R. (2020, July). Numerical modeling and optimization of geometric parameters of a composite bracket. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering **890(1)**, 012051. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012051>