

prof. dr hab. inż. Krzysztof Schabowicz¹⁾

ORCID: 0000-0001-6320-9539

dr inż. Łukasz Zawisławski^{1*)}

ORCID: 0000-0003-2828-5899

dr inż. Oleksij Kopyłow²⁾

ORCID: 0000-0002-8436-2521

Experimental research and finite element method (FEM) validation aluminum brackets in ventilated facades systems

*Badania eksperymentalne i walidacja MES konsoli aluminiowych
w elewacjach wentylowanych*

DOI: 10.15199/33.2025.11.06

Abstract: The article presents the results of experimental studies and numerical analyses regarding aluminum brackets used in ventilated facade systems. Laboratory tests analyzed the behavior of the brackets under vertical loads with cyclic application of force, recording force–displacement curves and deformation characteristics. The results revealed a three-phase operation of the brackets: linear-elastic, a plasticization stage, and the development of a plastic hinge in the mounting zone.

Numerical analyses were performed using ANSYS Mechanical in the linear-elastic mode. The comparison between experimental and numerical results showed high agreement in the serviceability range – displacement differences did not exceed 10%. The obtained results confirmed that linear models are sufficient for operational analyses (SLS), while nonlinear models are necessary for the assessment of ultimate load-bearing capacity (ULS).

Keywords: aluminum brackets; ventilated facades; finite element method (FEM); experimental validation; elastoplastic behavior.

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych oraz analiz numerycznych aluminiowych konsoli stosowanych w systemach elewacji wentylowanych. W badaniach laboratoryjnych analizowano zachowanie konsoli pod obciążeniem pionowym przy cyklicznym przyłożeniu siły, rejestrując krzywe siła–ugięcie i charakter deformacji. Wyniki wykazały trójfazowy przebieg pracy konsoli: liniowo-sprężysty, etap uplastycznienia oraz rozwój przegubu plastycznego w strefie mocowania.

Analizy numeryczne wykonano w środowisku ANSYS Mechanical w wariancie liniowo-sprężystym. Porównanie wyników eksperymentalnych i numerycznych wykazało dużą zgodność w zakresie użytkowym – różnice przemieszczeń nie przekroczyły 10%. Otrzymane wyniki potwierdziły, że w analizach eksploatacyjnych (SLS) wystarczające są modele liniowe, natomiast do oceny granicznych stanów nośności (ULS) niezbędne jest zastosowanie modeli nieliniowych.

Słowa kluczowe: konsolle aluminiowe; elewacje wentylowane; metoda elementów skończonych (MES); walidacja eksperymentalna; sprężysto-plastyczne zachowanie.

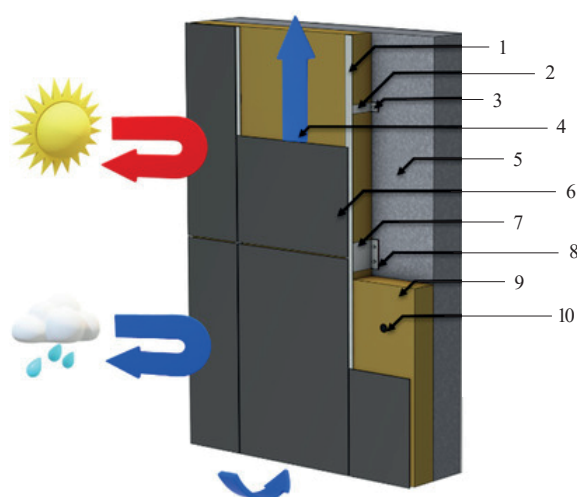
I ncreasing requirements for the energy performance of buildings and sustainability policies stimulate dynamic development of various types of energy-efficient façade systems in the European Union. In accordance with the EPBD Directive [1], EU Member States are obliged to reduce energy consumption in the building sector, which leads to the implementation of building partitions with high thermal insulation and long service life. One of the popular façade solutions that enables impressive thermal insulation effects are ventilated facades. This solution, owing to the ventilated cavity between the thermal insulation and the cladding (fastened to the substructure system), allows effective protection of the building façade from low and high temperatures. External claddings, due to their variety, enable integration of the building into diverse architectural ensembles and effectively drain rainwater, protect the building against overheating caused by solar radiation, and can provide effective acoustic insulation. A schematic representation of a ventilated façade is shown in Figure 1.

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

³⁾ Instytut Techniki Budowlanej

^{*)} Correspondence address: lukasz.zawislak@pwr.edu.pl

R ygorystyczne wymagania dotyczące efektywności energetycznej budynków oraz polityki zrównoważonego rozwoju sprzyjają dynamicznemu rozwojowi różnych typów energooszczędnych systemów elewacyjnych w Unii Europejskiej (UE). Zgodnie z Dyrektywą EPBD [1] państwa członkowskie UE są zobowiązane do ograniczania zużycia energii w budownictwie, co prowadzi do wdrażania przegród o bardzo dobrej izolacyjności cieplnej i trwałości eksploatacyjnej. Jednym z popularnych rozwiązań elewacyjnych pozwalających osiągnąć imponujące efekty termoizolacyjne są **elewacje wentylowane**, które dzięki szczelinie wentylacyjnej pomiędzy termoizolacją a okładziną (mocowaną do systemu podkonstrukcji) umożliwiają skuteczną izolację ścian budynku przed niskimi i wysokimi temperaturami. Różnorodność okładzin zewnętrznych pozwala na wkomponowanie budynku w różne ansamble architektoniczne oraz na skuteczne odprowadzanie wody opadowej, ochronę budynku przed przegrzewaniem wywołanym działaniem promieni słonecznych i ochronę akustyczną. Schemat elewacji wentylowanej przedstawiono na rysunku 1.



1 – vertical profile/profil pionowy, 2 – small bracket (sliding)/konsola wiatrowa (ślizgowa), 3 – anchor with dowel/mechaniczny łącznik konsoli, 4 – ventilated air gap/przestrzeń wentylowana, 5 – supporting wall/mur, 6 – façade cladding/okładzina elewacyjna, 7 – large bracket (fix)/konsola nośna (stała), 8 – thermal bracket/isolator/termoizolacyjna podkładka, 9 – mineral wool thermal insulation/welna mineralna, 10 – mechanical fastener/łącznik mechaniczny

Fig. 1. Schematic of a ventilated façade

Rys. 1. Schemat elewacji wentylowanej

Load-bearing brackets (Figure 1) constitute one of the most critical elements in the structure of ventilated façades. Their primary function is to transfer vertical and horizontal loads from the cladding to the structural wall and to maintain the geometric stability of the entire system, including the width of the ventilated cavity. Considering operational conditions and design requirements, these elements must demonstrate both adequate load-bearing capacity and resistance to environmental influences. In ventilated façades one direction of improving their thermal performance is the use of brackets that limit thermal bridges [2]. This is most commonly achieved by introducing polymer inserts into the bracket (Figure 2 a, b, c) or by making perforations in the bracket to interrupt heat flow (Figure 2 d) [3].

Jednym z najbardziej newralgicznych elementów w strukturze fasad wentylowanych są konsole nośne (rysunek 1). Ich podstawową funkcją jest przenoszenie obciążeń pionowych i poziomych z okładziny na ścianę konstrukcyjną oraz utrzymywanie stabilności geometrycznej całego układu, w tym szerokości szczeliny wentylacyjnej. Biorąc pod uwagę warunki eksploatacyjne i wymagania projektowe, elementy te muszą charakteryzować się zarówno odpowiednią nośnością, jak i odpornością na oddziaływania środowiskowe. W przypadku elewacji wentylowanych jednym z kierunków poprawy ich efektywności energetycznej jest **stosowanie konsoli pozwalających na ograniczenie mostków termicznych** [2]. Najczęściej osiąga się to przez wprowadzenie do konsoli „insertów” (wstawek) polimerowych (rysunek 2 a, b, c) lub perforacji (rysunek 2 d) [3].

Konsole z przekładkami termicznymi mają ograniczoną nośność. Niekiedy eliminuje się je ze względów bezpieczeństwa ogniowego. W związku z tym w sytuacji rygorystycznych wymagań dotyczących bezpieczeństwa ogniowego, gdy okładziny elewacyjne są ciężkie (z kamienia lub betonu), nadal stosowane są monomateriałowe konsole ze stali lub aluminium (rysunek 2 e). W celu przerwania mostka termicznego pod stopą takich konsoli (element tworzący oparcie konsoli o ścianę) układane są przekładki z materiału tworzywowego o małej przewodności cieplnej.

Producenci systemów elewacyjnych, opracowując nowe rozwiązania konsoli do elewacji wentylowanych, często prowadzą symulacje numeryczne w celu wyboru optymalnych rozwiązań pod względem nośności i przewodności cieplnej. Wyniki eksperymentalne [3, 4] potwierdzają, że ze względu na swoje ograniczenia metody numeryczne nie pozwalają na rzetelną analizę właściwości mechanicznych oraz uzyskanie porównywalnych wyników z badaniami laboratoryjnymi. Ponadto dokumenty europejskie określające wymagania podkonstrukcji EAD 090034-00-0404 [5], nie podają procedur obliczania ich wytrzymałości. W praktyce inżynierskiej konieczne jest więc uzupełnianie analiz projektowych badaniami eksperymentalnymi oraz symulacjami numerycznymi.

Celem artykułu jest porównanie wyników badań laboratoryjnych konsoli aluminiowych ze stopu EN AW-6060 T6/T66

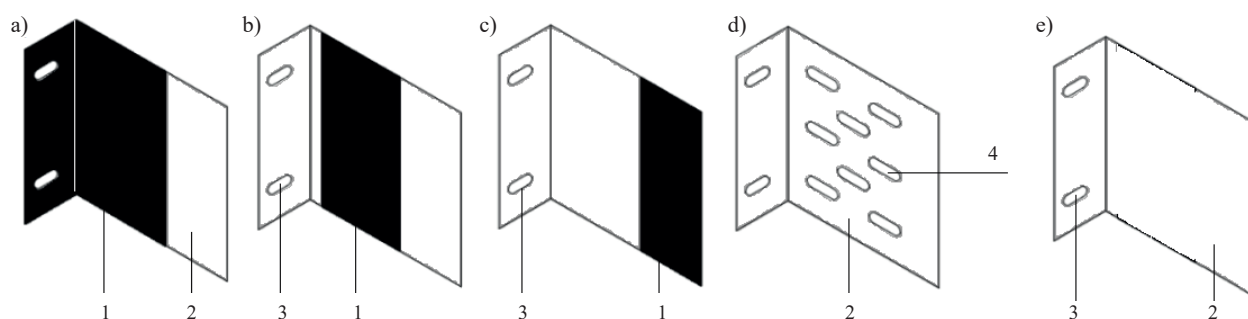


Fig. 2. Brackets that minimize thermal bridges used in ventilated façades: a) bracket with a plastic base; b) bracket with a plastic middle section; c) bracket with a plastic arm; d) perforated metal bracket; e) traditional metal bracket: 1 – plastic; 2 – metal; 3 – holes for screw fastenings; 4 – holes to interrupt the heat flow [3]

Rys. 2. Konsole pozwalające na minimalizację mostka termicznego stosowane w elewacjach wentylowanych: a) konsola ze stopką tworzywową; b) konsola z tworzywową częścią środkową; c) konsola z wysięgnikiem tworzywowym; d) konsola metalowa, perforowana; e) tradycyjna pełna konsola metalowa; 1 – tworzywo sztuczne; 2 – metal; 3 – otwory do mocowań mechanicznych; 4 – otwory do przerwania strumienia ciepła [3]

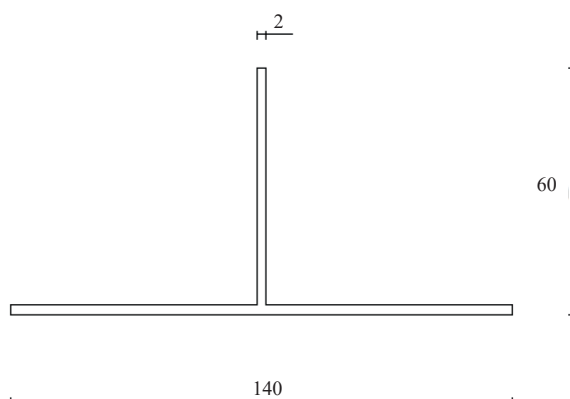


Fig. 4. Aluminum T-profile
Rys. 4. Aluminiowy profil T

Laboratory tests

The laboratory test of resistance to vertical loading was carried out according to the testing method contained in Annex H to EAD 090034-00-0404 [5]. The specimen (bracket with T-profile) was fixed to a metal plate 20 mm thick. A static point load directed downward was applied to the outermost point of the substructure assembly (T-profile). During tests the force was applied cyclically, as in Figure 5. The force rise rate was 5 mm/min. After reaching a force N that is a multiple of 100 N the instantaneous displacement of the specimen was measured, then the load was removed from the test specimen (rate as above). After the load dropped to 0 N residual deformation was checked. Then the loading cycle was repeated.

To avoid measurement errors resulting from initial seating related to bolted connections, a preload of 100 N was applied to the specimen. The testing machine head allowed measurement of forces and displacements. The testing machine met class one accuracy requirements in accordance with the Regulation of the Minister of Economy, Labour and Social Policy of 4 February 2004 regarding metrological requirements to be met by testing machines used for static tests. The expanded uncertainty of measurements (related to the accuracy of the applied instruments), at a confidence level of 95% and with coverage factor $k = 2$ was:

- 1% in the case of force;
- 0.1 mm in the case of displacements;
- 1°C in the case of temperature.

A view of the test setup is shown in Figure 6 and Photo 1.

Tests were performed on 10 specimens of brackets connected with T-profiles (as in Fig. 6). All tests were carried out at laboratory temperature: +20°C and relative air humidity ~50%.

The recorded force–deflection curves (Figure 7) were characterized by a three-phase course:

- Linear-elastic range – up to deflection of approx. 3 mm,
- Transition to plasticity – with stiffness reduction and partial redistribution of stresses,
- Development of a plastic hinge – in the area of the bracket foot, leading to gradual loss of load capacity.

The force values corresponding to characteristic displacements are summarized in Table.

Badania laboratoryjne

Badanie laboratoryjne odporności na obciążenie siłą pionową przeprowadzono wg metody badawczej zawartej w Załączniku H do EAD 090034-00-0404 [5]. Próbkę (konsolę z profilem T) przymocowano do metalowej ścianki o grubości 20 mm. Do skrajnego punktu zestawu elementów podkonstrukcji (profil T) przykładano cyklicznie statyczną siłę punktową skierowaną w dół (rysunek 5). Prędkość przyrostu siły wynosiła 5 mm/min. Po osiągnięciu siły N będącej krotnością 100 N mierzono przemieszczenie doraźne próbki, następnie usuwano obciążenie. Gdy obciążenie osiągnęło wartość 0 N, sprawdzano odkształcenia resztkowe i powtarzano cykl obciążeniowy.

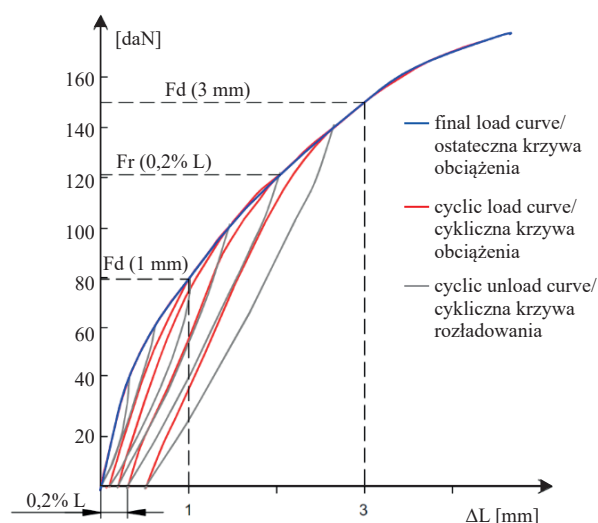


Fig. 5. Method of applying cyclic load to the sample [5]
Rys. 5. Sposób przyłożenia obciążenia cyklicznego do próbki [5]

W celu uniknięcia błędów pomiaru wynikających z deformacji początkowej związanej z dopasowaniem się elementów połączonych śrubowo, przykładano do próbki obciążenie wstępne o wartości 100 N. Głowica maszyny wytrzymałościowej pozwalała na pomiar sił i przemieszczeń. Maszyna wytrzymałościowa spełniała wymagania pierwszej klasy dokładności zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z 4 lutego 2004 r. w sprawie wymagań metrologicznych, którym powinny odpowiadać maszyny wytrzymałościowe do prób statycznych. Niepewność rozszerzona pomiarów (związana z dokładnością zastosowanych urządzeń), była na poziomie ufności 95% i przy współczynniku rozszerzenia $k = 2$ wynosiła:

- 1% w przypadku siły;
- 0,1 mm w przypadku przemieszczeń;
- 1°C w przypadku temperatury.

Widok modelu badawczego przedstawiono na rysunku 6 i fotografii 1.

Badania przeprowadzono na 10 próbkach konsol połączonych z profilami T (rysunek 6). Wszystkie testy wykonano w temperaturze laboratoryjnej: +20°C i przy wilgotności względnej powietrza ~50%.

Rejestrowane krzywe siła–ugięcie (rysunek 7) charakteryzowały się trójfazowym przebiegiem:

- zakres liniowo-sprężysty – do przemieszczenia ok. 3 mm;

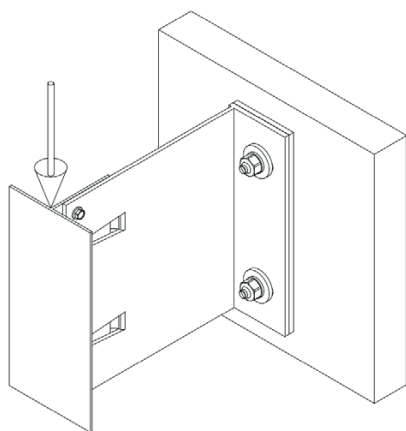


Fig. 6. Research design of testing resistance to vertical force
Rys. 6. Schemat badania odporności na działanie siły pionowej

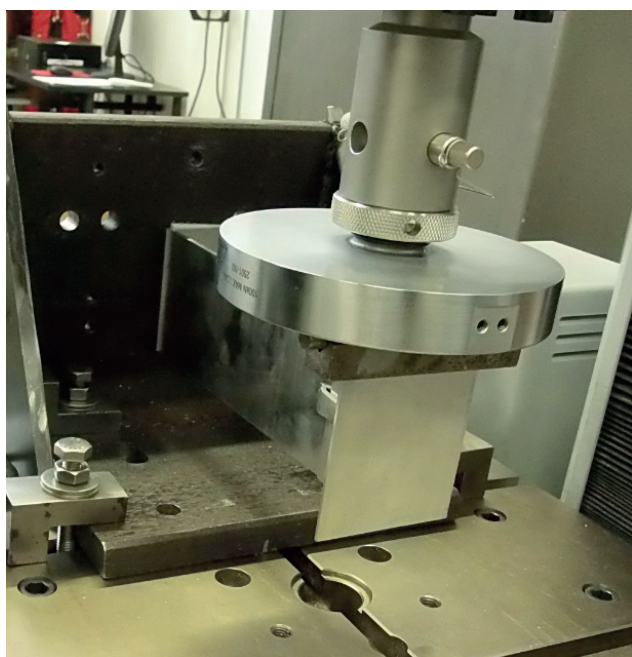


Photo 1. The sample during testing – the connection of the brackets with the T-profile

Fot. 1. Próbką w trakcie badań – połączenie konsoli z profilem T

Destruction of specimens had a predictable character: formation of a plastic hinge in the area of the arm root, with visible deformations signaling loss of stiffness (Photo 2).

Numerical analyses (FEM)

At the same time as the laboratory tests, numerical analyses were performed using ANSYS Mechanical. The 3D model was developed based on the geometry of the tested samples, employing Solid volume elements (with a 3 mm mesh size) and applying local mesh refinement in the area of the mounting holes and the base of the arm. The bracket model is shown in Figure 8.

- przejście do uplastycznienia – ze spadkiem sztywności i częściową redystrybucją naprężeń;
- rozwój przegubu plastycznego – w rejonie stopy konsoli, prowadzący do stopniowej utraty nośności.

Wartości sił odpowiadające charakterystycznym przemieszczeniom zestawiono w tabeli. Zniszczenie próbek miało przewidywalny charakter; pojawił się przegub plastyczny w strefie nasady ramienia, z widocznymi deformacjami sygnalizującymi utratę sztywności (fotografia 2).

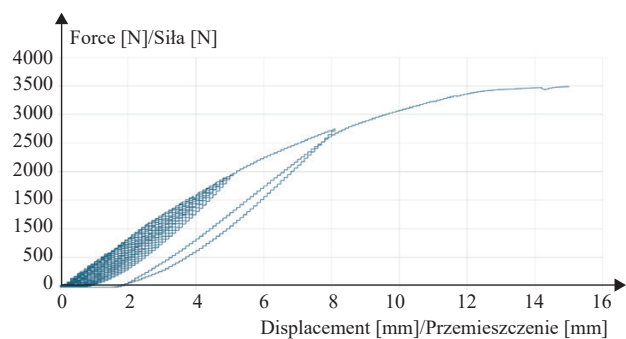


Fig. 7. Force-deflection function obtained in the tests of the aluminum brackets

Rys. 7. Funkcja siła-ugięcie uzyskana w badaniach konsoli aluminiowej

Vertical force resistance test results

Wyniki badań odporności na siłę pionową

Measurement No/ Pomiar nr	Obtained force values [N] corresponding to displacements/ Uzyskane wartości sił [N] odpowiadające przemieszczeniom			
	0,2% L	1 mm	3 mm	8 mm
1	153	381	1274	2472
2	188	394	1152	2614
3	173	372	1120	2404
4	162	358	1155	2445
5	144	364	1207	2617
6	113	354	1109	2705
7	188	402	1204	2635
8	144	374	1245	2808
9	122	338	1211	2654
10	168	383	1222	2712
Mean value/ Wartość średnia	155,5	372	1189,9	2606,6
Standard deviation/ Odchylenie standardowe	25,4	19,2	53,9	129,0
Design value $F_{u,10}$ $F_{u,10} = F_{mean} - k_n \cdot S$ $k_n = 1,92$ / Wartość obliczeniowa $F_{u,10}$ $F_{u,10} = F_{mean} - k_n \cdot S$ $k_n = 1,92$	106,7	335,1	1086,4	2358,9

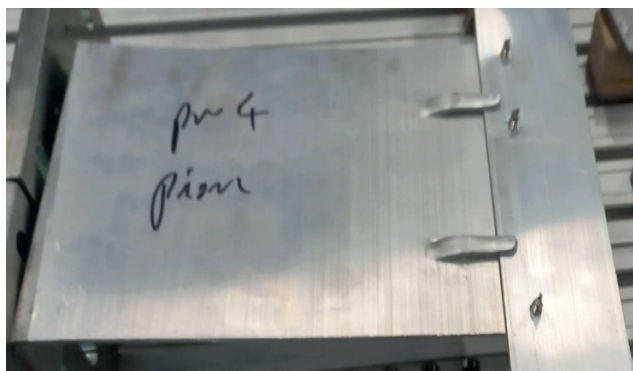


Photo 2. Sample destruction mechanism – development of a plastic hinge in the brackets foot zone

Fot. 2. Mechanizm zniszczenia próbki – rozwój przegubu plastycznego w strefie stopy konsoli

Boundary conditions applied in the computational model are shown in Figure 9:

- Fixed Support – rigid anchorage in the mounting zone,
- Bonded Contact – bracket-spacer profile contact,

Linear load along the upper edge of the arm corresponding to the laboratory test.

Analyses were performed in a linear-elastic variant – to assess agreement in the serviceability range.

Numerical models prepared in ANSYS Mechanical replicated the geometry of the specimens tested in the laboratory. Analyses were conducted in the linear-elastic variant.

Comparison of displacement values for characteristic loads showed the following results (Figure 10):

- **100 N:** FEM – 0.30 mm, laboratory – 0.49 mm,
- **350 N:** FEM – 1.07 mm, laboratory – 1.00 mm,
- **1100 N:** FEM – 3.35 mm, laboratory – 3.00 mm,
- **2400 N:** FEM – 7.33 mm, laboratory – 8.00 mm.

Discrepancies between the results did not exceed 10%. Vertical deformation maps from FEM are shown in Figures 11 and 12.

Comparison of laboratory and FEM results

Comparison of laboratory test results with FEM analyses provides grounds to state acceptable agreement of results within the entire analyzed range of bracket deflections up to approx. 3 mm, which corresponds to the serviceability limit state (SLS). Linear-elastic models faithfully reproduced the system response in this displacement range.

In the performed experiment the sample behavior beyond the elastic range was not analyzed and parameters of plasticization/failure were not determined. Consequently, no conclusions are drawn regarding an elastoplastic failure mechanism based solely on these data. The recorded control points (0.2%L; 1 mm; 3 mm; 8 mm) serve solely for serviceability (deflection) evaluation and comparison with numerical models within the adopted range.

Agreement between FEM results and measurements indicates that:

- linear models are sufficient for serviceability analyses (SLS) within the tested range;

Analizy numeryczne (MES)

Jednocześnie z badaniami laboratoryjnymi wykonano analizy numeryczne w środowisku ANSYS Mechanical. Modele 3D opracowano na podstawie geometrii badanych próbek, stosując elementy objętościowe typu Solid (zagęszczenie 3 mm) z lokalnym zagęszczeniem siatki w rejonie otworów montażowych i nasady ramienia. Model konsoli przedstawiono na rysunku 8.

Warunki brzegowe stosowane w modelu obliczeniowym pokazuje rysunek 9:

- Fixed Support – sztywne zakotwienie w strefie mocowania;

- Bonded Contact – kontakt konsola – profil dystansowy; Obciążenie liniowe wzdłuż górnej krawędzi ramienia odpowiadało próbie laboratoryjnej.

Analizy przeprowadzono w wariancie liniowo-sprężystym w celu oceny zgodności w zakresie użytkowym. Modele numeryczne przygotowane w środowisku ANSYS Mechanical odwzorowywały geometrię próbek badanych w laboratorium.

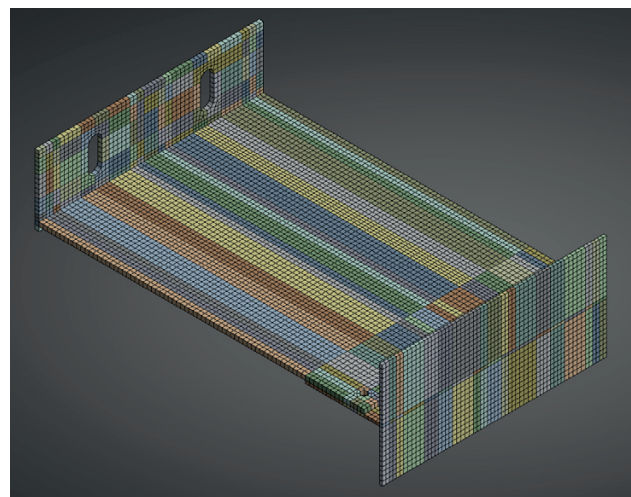


Fig. 8. FEM model of the aluminum brackets with a finite element mesh

Rys. 8. Model MES konsoli aluminiowej z siatką elementów skończonych

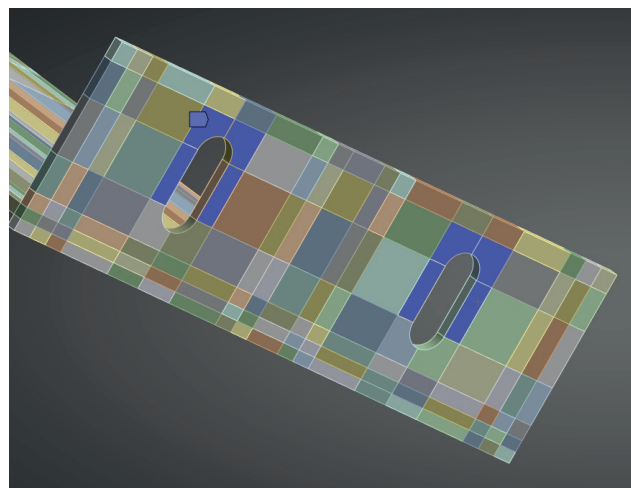


Fig. 9. Boundary conditions of the aluminum brackets

Rys. 9. Warunki brzegowe konsoli aluminiowej

• assessment of ultimate limit states (ULS) and possible nonlinear phenomena requires a separate experimental campaign extended beyond elasticity and calibration of nonlinear (material and/or geometric) models based on these tests.

The obtained results confirm that EN AW-6060 T6/T66 aluminum brackets behave predictably, with a clear division into three stages: linear elastic range, initiation of plasticization in the mounting zone, and development of a plastic hinge. The failure mechanism was not sudden – loss of stiffness was signalled by significant deformations, which is advantageous from the point of view of operational safety. This phenomenon distinguishes aluminum from steel, where – despite higher strength – failures can be more abrupt and less predictable.

Conclusions

Based on the conducted laboratory tests and FEM numerical analyses of aluminum brackets made of EN AW-6060 T6/T66 the following conclusions can be formulated:

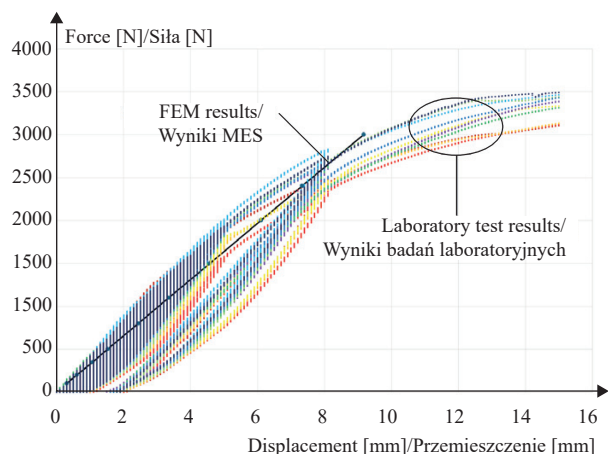


Fig. 10. Comparison of laboratory test results and FEM analyses
Rys. 10. Porównanie wyników badań laboratoryjnych oraz analiz MES

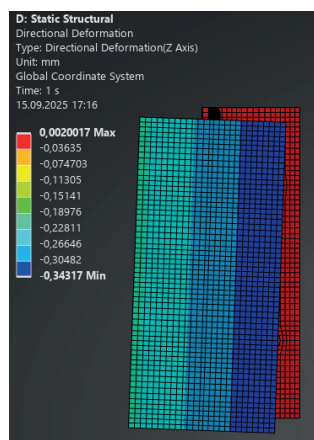


Fig. 11. Vertical deformation map in FEM for a load of 100 N
Rys. 11. Mapa deformacji pionowej w MES w przypadku obciążenia 100 N

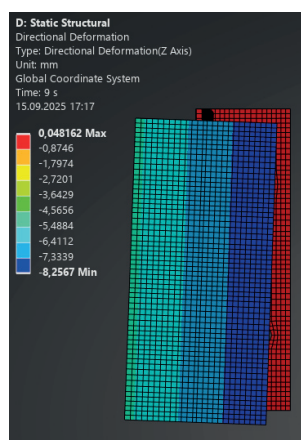


Fig. 12. Vertical deformation map in FEM for a load of 2400 N
Rys. 12. Mapa deformacji pionowej w MES w przypadku obciążenia 2400 N

Porównanie wartości przemieszczeń w przypadku obciążeń charakterystycznych wykazało następujące wyniki (rysunek 10):

- 100 N: MES – 0,30 mm, laboratorium – 0,49 mm;
- 350 N: MES – 1,07 mm, laboratorium – 1,00 mm;
- 1100 N: MES – 3,35 mm, laboratorium – 3,00 mm;
- 2400 N: MES – 7,33 mm, laboratorium – 8,00 mm.

Różnice pomiędzy wynikami nie przekroczyły 10%. Mapy deformacji pionowej przedstawiono na rysunkach 11 i 12.

Porównanie wyników badań laboratoryjnych z analizami MES

Porównanie wyników badań laboratoryjnych i analiz MES daje podstawę do stwierdzenia akceptowalnej zgodności wyników w całym analizowanym zakresie ugięcia konsoli elewacyjnych do ok. 3 mm, co odpowiada stanowi granicznemu użyteczności (SLS). Modele liniowo-sprężyste wiernie odwzorowały odpowiedź układu w tym przedziale przemieszczeń.

W przeprowadzonym eksperymencie nie analizowano zachowania próbki poza zakresem sprężystym ani nie wyznaczano parametrów uplastycznienia/utraty nośności. W konsekwencji nie sformułowano wniosków o sprężysto-plastycznym mechanizmie pracy na podstawie tych danych. Rejestrowane punkty kontrolne (0,2%L; 1 mm; 3 mm; 8 mm) służą wyłącznie ocenie użytkowej (ugięciowej) i porównaniu z modelami numerycznymi w przyjętym zakresie.

Zgodność wyników MES i pomiarów wskazuje, że:

- do analiz użytkowych (SLS) w badanym zakresie wystarczające są modele liniowo-sprężyste;
- ocena stanów granicznych nośności (ULS) oraz ewentualnych zjawisk nieliniowych wymaga oddzielnej kampanii doświadczalnej rozszerzonej o zakres poza sprężystością i kalibracji modeli nieliniowych (materiałowych i/lub geometrycznych) na podstawie tych badań.

Uzyskane wyniki badań potwierdzają, że konsoly aluminiowe EN AW-6060 T6/T66 pracują w sposób przewidywalny, z wyraźnym podziałem na trzy etapy: liniowy zakres sprężysty, inicjację uplastycznienia w strefie mocowania oraz rozwój przegubu plastycznego. Mechanizm awarii nie miał charakteru nagłego – utrata sztywności była sygnalizowana znacznymi deformacjami, co stanowi korzystną cechę z punktu widzenia bezpieczeństwa użytkowego. Zjawisko to odróżnia aluminium od stali, w przypadku której – mimo większej wytrzymałości – awaria ma bardziej gwałtowny charakter i jest mniej przewidywalna.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz analiz numerycznych MES konsoli aluminiowych ze stopu EN AW-6060 T6/T66 można sformułować następujące wnioski:

- 1) badane elementy elewacyjne wykazały klasyczny sprężysto-plastyczny mechanizm pracy, obejmujący trzy etapy: liniowo-sprężysty, inicjację uplastycznienia oraz rozwój przegubu plastycznego;

1) The tested façade elements exhibited a classical elastoplastic mechanism of behavior, including three stages: linear-elastic, initiation of plasticization and development of a plastic hinge.

2) The FEM analysis allowed the reconstruction of the working mechanism of mono-material consoles in the elastic range. In laboratory tests, after the linear phase, plasticization initiation was observed in the anchoring zone (this stage is not covered by the FEM analysis conducted), followed by the development of a plastic hinge. The failure mechanism was gradual, which increases the operational safety of ventilated façade systems.

3) Linear-elastic models faithfully reproduced bracket behavior in the serviceability range (deflections up to 3 mm). Differences in displacements between experimental results and simulations did not exceed 10%. In limit state analyses it is necessary to account for material and geometric nonlinearity.

4) Eurocode 9 and EAD 090034–00–0404 require supplementation with precise procedures for assessing the load-bearing capacity and deformations of cantilevers. Test results and FE analysis indicate that linear models are sufficient for serviceability analyses, whereas physically and geometrically nonlinear models should be used for ultimate limit state analyses.

2) analiza MES pozwoliła odtworzyć mechanizm pracy konsoli monomateriałowych w zakresie sprężystym. W badaniach laboratoryjnych, po fazie liniowej, zaobserwowano inicjację uplastycznienia w strefie mocowania (tego etapu przeprowadzona analiza MES nie obejmuje), a następnie rozwój przegubu plastycznego. Mechanizm awarii miał charakter stopniowy, co zwiększa bezpieczeństwo użytkowe systemów fasad wentylowanych.

3) modele liniowo-sprężyste wiernie odwzorowały zachowanie konsol w zakresie użytkowym (ugięcia do 3 mm). Różnica przemieszczeń pomiędzy wynikami eksperymentalnymi i symulacjami nie przekroczyła 10%. W analizach stanów granicznych konieczne jest uwzględnienie nieliniowości materiałowej i geometrycznej.

4) Eurokod 9 oraz EAD 090034-00-0404 wymagają uzupełnienia o precyzyjne procedury oceny nośności i deformacji konsol. Wyniki badań i analiz MES wskazują, że do analiz użytkowych wystarczają modele liniowe, natomiast w analizach stanów granicznych należy stosować fizycznie i geometrycznie nieliniowe modele.

*Received: 02.07.2025
Revised: 04.08.2025
Published: 21.11.2025*

*Artykuł wpłynął do redakcji: 02.07.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 04.08.2025 r.
Opublikowano: 21.11.2025 r.*

Literature

- [1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1275 z 24 kwietnia 2024 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków.
- [2] Nowak K, Byrdy A. Effect of mounting brackets on thermal performance of buildings with ventilated facades. *Journal of Building Physics* 43 (2), August 2018.
- [3] Kopyłow O, Chełkowski F. Problemy stosowania konsoli pasywnych w elewacjach wentylowanych. Problems of using passive brackets in ventilated facades system. *Materiały Budowlane* 2024, DOI: 10.15199/33.2024.12.05

- [4] Cwyl M, Dmowska-Michalak I, Kaczmarczyk A, Michalczyk R. Laboratory tests and numerical analysis of aluminum helping hand brackets with polyamide thermal break. *Archives of Civil Engineering*. 2022. DOI: 10.24425/ace.2022.140650.
- [5] EAD 090034-00-0404, „Kit composed by subframe and fixings for fastening cladding and external wall elements”.
- [6] Kopyłow O, Chełkowski F. Stosowanie narzędzi obliczeniowych do określenia właściwości mechanicznych konsoli do elewacji wentylowanych. *Materiały Budowlane*. 2023; DOI: 10.15199/33.2023.09.14.