

dr inż. Ołeksij Kopyłow<sup>1)\*</sup>

ORCID: 0000-0002-8436-2521

Filip Chelkowski<sup>2)</sup>

# Stosowanie narzędzi obliczeniowych do określenia właściwości mechanicznych konsoli do elewacji wentylowanych

## *The use of calculation tools to determine the mechanical properties of ventilated façades subframe*

DOI: 10.15199/33.2023.09.14

**Streszczenie.** Podkonstrukcje systemów elewacji wentylowanych mają istotny wpływ na bezpieczeństwo użytkowania budynku. Podczas projektowania elewacji wentylowanych niezwykle ważne jest poprawne określenie parametrów wytrzymałościowych podkonstrukcji za pomocą badań laboratoryjnych. Wraz z rozwojem technik obliczeniowych coraz częściej parametry te oceniane są na podstawie symulacji numerycznych. W artykule przeprowadzono porównawczą analizę wyników badań laboratoryjnych odporności na działanie siły pionowej konsoli aluminiowej oraz wyników badań analitycznych uzyskanych na podstawie symulacji obliczeniowych.

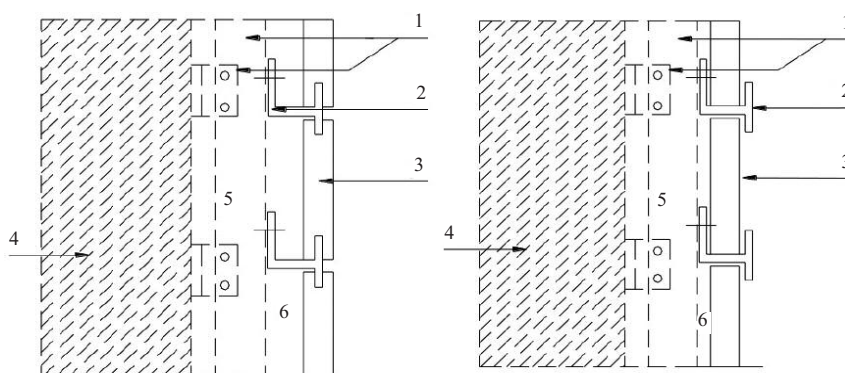
**Słowa kluczowe:** podkonstrukcja; elewacja wentylowana; analiza numeryczna; badania laboratoryjne.

**Abstract.** Substructures of ventilated facade systems have a significant impact on the safety of building use. When designing ventilated facades, it is extremely important to correctly determine the strength parameters of the substructure. These parameters are determined by laboratory tests. With the development of computational techniques, these parameters are more and more often determined on the basis of numerical simulations. The article presents a comparative analysis of the results of laboratory tests of resistance to the vertical force of the aluminum console and the results of analytical tests obtained on the basis of computational simulations.

**Keywords:** substructure; ventilated facade; numerical analysis; laboratory tests.

Podkonstrukcja stanowi jeden z podstawowych elementów składowych każdej elewacji wentylowanej i służy do utworzenia przestrzeni pozwalającej na cyrkulację powietrza pomiędzy warstwą termoizolacji a tylną częścią okładziny elewacyjnej, wynosząc tę okładzinę poza warstwę docieplenia (rysunek 1). Podkonstrukcje najczęściej wykonywane są z metalu, drewna lub przez połączenie metali i tworzyw sztucznych [1, 2].

Z punktu widzenia mechanicznego podkonstrukcja odpowiada za przeniesienie obciążeń związanych z oddziaływaniem wiatru i masy okładzin elewacyjnych oraz rekompensuje zmianę wymiarów liniowych elementów składowych elewacji wentylowanych wynikających z rozszerzalności termicznej. Podkonstrukcje odpowiadają w dużym stopniu za bezpieczeństwo ogniowe elewacji wentylowanych, ponieważ mają



**Rys. 1. Schemat elewacji wentylowanej: 1 – podkonstrukcja; 2 – mocowanie okładziny; 3 – okładzina; 4 – ściana; 5 – termoizolacja; 6 – przestrzeń wentylowana [3]**

*Fig. 1. Scheme of the ventilated facade: 1 – subframe; 2 – cladding fixing; 3 – cladding; 4 – substrate; 5 – thermal insulation; 6 – ventilated space [3]*

istotny wpływ na odpadanie okładzin. W celu określenia odporności podkonstrukcji na obciążenia związane z masą okładzin oraz oddziaływaniem wiatru wytyczne do wydawania europejskich ocen technicznych [3 i 4] przewidują przeprowadzenie badań laboratoryjnych wymagających zastosowania precyzyjnych maszyn wytrzymałościowych (I klasa dokładności wg [5, 6]). Ze względu na pracochłonność badań i wy-

magania metrologiczne wielu projektantów pomijają dokonanie oceny laboratoryjnej podkonstrukcji i ocenia parametry mechaniczne na podstawie obliczeń. Dostępne metody obliczeniowe umożliwiają zrozumienie procesów mechanicznych zachodzących w elementach podkonstrukcji [1], ale brakuje danych o wiarygodności symulacji numerycznych w kontekście badań podkonstrukcji.

<sup>1)</sup> Instytut Techniki Budowlanej

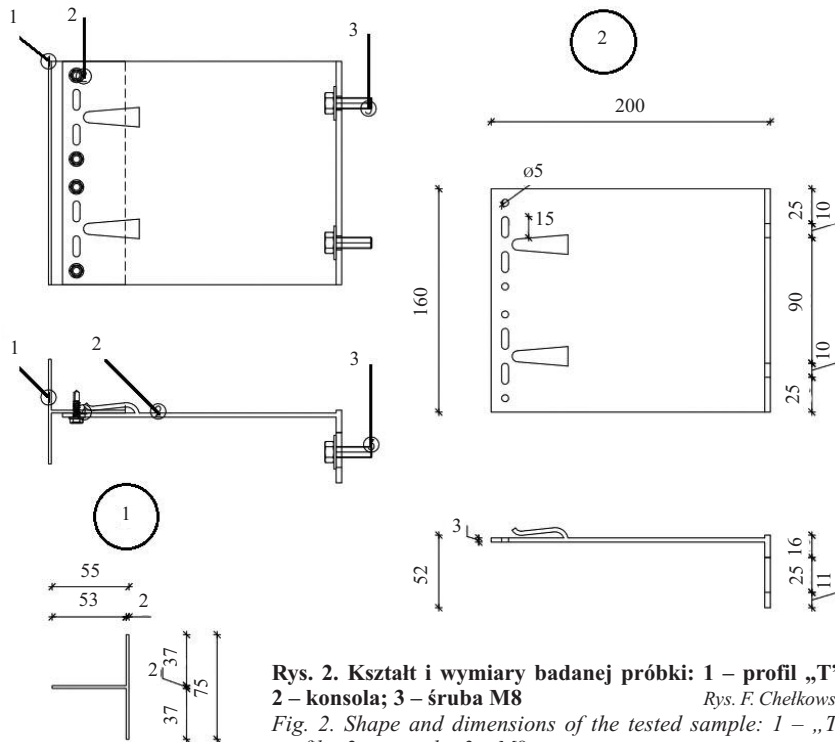
<sup>2)</sup> student Wyższej Szkoły Ekologii i Zarządzania w Warszawie

<sup>\*</sup>) Adres do korespondencji: o.kopylov@itb.pl

W artykule porównano wyniki badań laboratoryjnych odporności podkonstrukcji aluminiowej na działanie siły pionowej z wynikami symulacji numerycznych.

## Badania laboratoryjne

Przeprowadzono badania laboratoryjne konsol aluminiowych połączonych z profilem aluminiowym „T”, które są najczęściej stosowanym typem podkonstrukcji w systemach elewacji wentylowanych. Kształt i wymiary próbki przedstawia rysunek 2. Profile „T” oraz konsole wykonano ze stopu aluminium EN-AW 6060/T66.



**Rys. 2. Kształt i wymiary badanej próbki: 1 – profil „T”; 2 – konsola; 3 – śruba M8**  
*Rys. F. Chelkowski*  
**Fig. 2. Shape and dimensions of the tested sample: 1 – „T” profile; 2 – console; 3 – M8 screw**  
*Fig. by F. Chelkowski*

Badania polegały na pomiarze przemieszczeń próbki pod wpływem oddziaływania siły statycznej przyłożonej do profilu „T”. W ramach badań określono wartości sił [N], powodujące przemieszczenia od 0 do 10 mm. Próbkę przymocowano za pomocą śruby M8 do stalowego wspornika o grubości 20 mm. Prędkość przyłożenia siły była uzależniona od mierzonych przemieszczeń i wynosiła 5 mm/min. Głowica maszyny wytrzymałościowej pozwalała na jednoczesny pomiar wartości przykładowych sił oraz przemieszczeń.

Badania laboratoryjne przeprowadzono w Laboratorium Wytrzymałości Materiałów Budowlanych Wyższej Szkoły

Ekologii i Zarządzania w Warszawie. Maszyna wytrzymałościowa spełniała wymagania metrologiczne, o których mowa w [3 ÷ 6]. Zasadę badania oraz widok badanej próbki przedstawia fotografia oraz rysunek 3. Wyniki badań odporności na działanie siły pionowej podkonstrukcji aluminiowej w postaci zależności graficznej „siła – przemieszczenie” przedstawiono na rysunku 4.

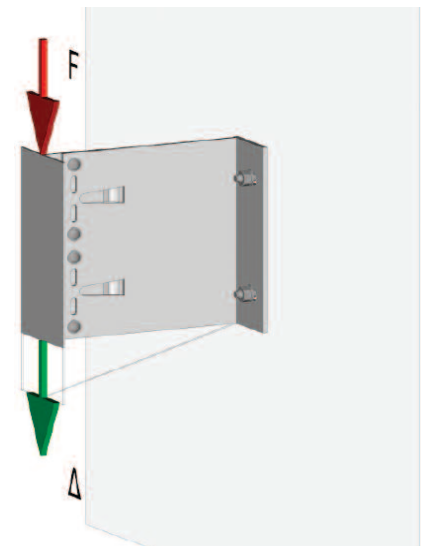
Największe odchylenia standardowe wartości pomierzonych sił w przypadku poszczególnych próbek (na poziomie 24%) odnotowano przy przemieszczeniu 0,5 ÷ 1 mm. Jest to związane z pra-



**Widok próbki: 1 – konsola; 2 – podpora; 3 – adapter z frezem; 4 – głowica maszyny; 5 – śruba M8**

*Fot. F. Chelkowski*  
**Sample view: 1 – console; 2 – support; 3 – cutter adapter; 4 – machine head; 5 – M8 bolt.**

*Photo by F. Chelkowski*



**Rys. 3. Ideowy schemat badania: F – siła; Δ – przemieszczenie**

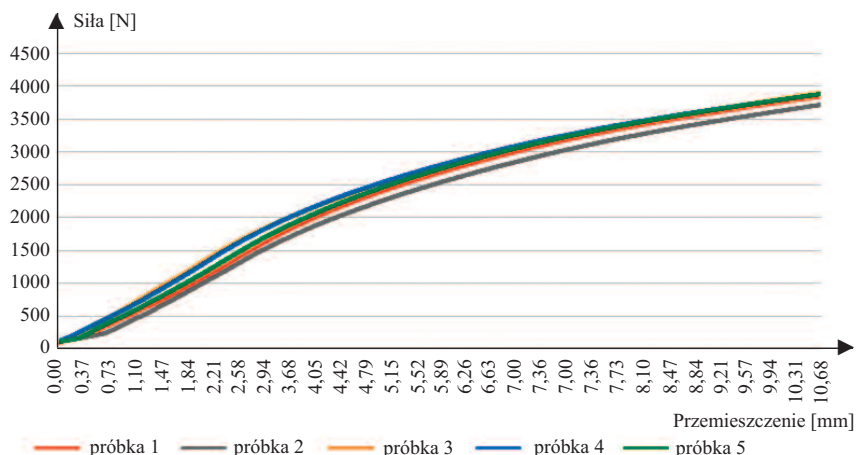
*Rys. F. Chelkowski*  
**Fig. 3. Schematic diagram of the test: F – force; Δ – displacement**  
*Fig. by F. Chelkowski*

całą połączeń śrubowych mocujących podkonstrukcję do ściany oraz połączeń śrubowych „konsola – profil „T”. W pierwszej fazie obciążenia podkonstrukcji dochodzi do niewielkich przemieszczeń na połączeniu „profil aluminiowy – śruba” mających wpływ na rozrzut wyników. Przy większych przemieszczeniach, odchylenia standardowe wartości sił zmniejszały się i wynosiły 5 ÷ 8%.

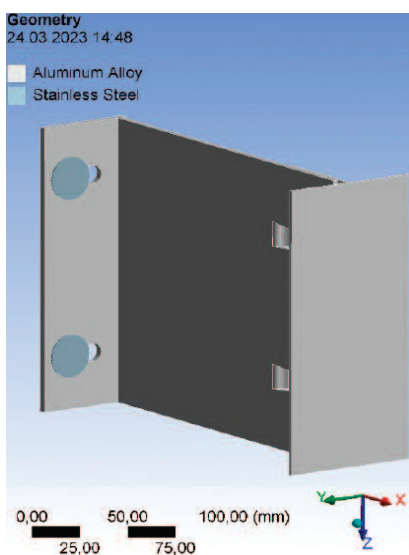
## Symulacje numeryczne

Symulacje zostały wykonane w programie ANSYS Workbench 2022 R2. W ramach badań analitycznych do modelu próbki przymocowanej w sposób

sztynny do ściany (rysunek 3) przykładano obciążenie skierowane w dół i określano przemieszczenie zamodelowanego elementu. Model (rysunek 5), który pier-



Rys. 4. Wyniki badań odporności podkonstrukcji aluminiowej na działanie siły pionowej  
Fig. 4. Test results of the aluminum substructure for resistance to vertical force



Rys. 5. Model obliczeniowy badanych elementów podkonstrukcji  
Fig. 5. Numerical model of the subframe

wotnie został stworzony w programie GstarCAD 2022, a następnie wyeksportowany za pomocą AutoCAD 2023 do formatu IGS, miał pomijalne błędy geometryczne, które zostały automatycznie poprawione w programie Workbench 2022 R2 za pomocą wirtualnej topologii (ang. *virtual topology*). Widok modelu przyjętego do dalszych symulacji obliczeniowych przedstawia rysunek 5. W obliczeniach przyjęto siatkę o wymiarach 3 mm.

Poziom komplikacji modelu obliczeniowego został przyjęty na podstawie analiz dziesięciu projektów obliczeń systemów elewacji wentylowanych. Projekty pochodziły z różnych regionów kraju i były sporządzone przez uprawnionych inżynierów. Podobnie, jak w analizowanych projektach, w modelu poddanym dalszym symula-

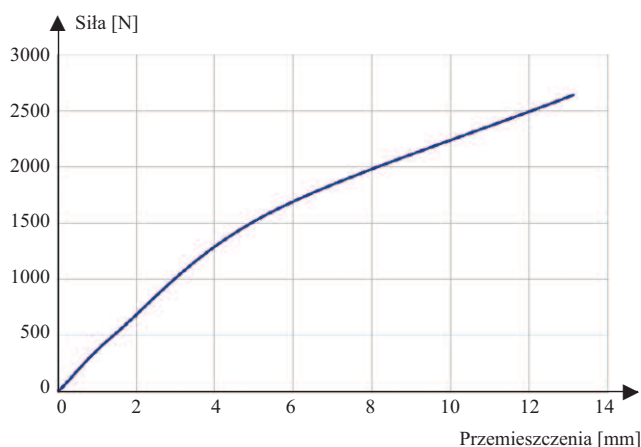
cją pominięto kwestie związane z pracą śrub łączących elementy podkonstrukcji (profil „T” i konsolę) lub łączących konsolę ze ścianą. W modelu przyjęte zostały sztywne połączenia śrubowe występujące na stykach „profil „T” – konsola” oraz „ściana – stopa konsoli”.

W ramach symulacji określono wartości przemieszczeń w przypadku poszczególnych wartości sił uzyskanych podczas badań laboratoryjnych, powodujących przemieszczenia rzeczywistej próbki w przedziale 0 – 10 mm. Wyniki symulacji w postaci graficznej przedstawiono na rysunku 6.

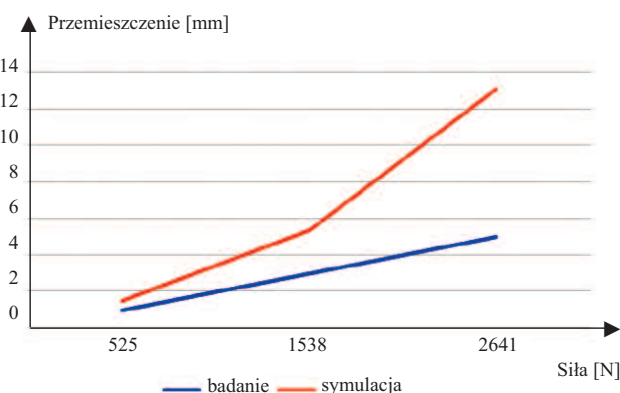
### Analiza porównawcza wyników badań

Porównanie wyników badań laboratoryjnych oraz wyników symulacji numerycznej odporności na działanie siły pionowej wykazało różnice, sięgające niekiedy 160% (rysunek 7 oraz tabela). Do porównania (zgodnie z zaleceniami EAD [3 i 4]) przyjęto wartości sił powodujących przemieszczenia podkonstrukcji 1, 3 oraz 5 mm (uznaje się, że jest to wartość graniczna, przy której odkształcenia są zauważalne i świadczą o znacznych uszkodzeniach systemu elewacji wentylowanej [7]).

Różnice pomiędzy wynikami badań laboratoryjnych a symulacjami numerycznymi powiększały się wraz ze zwiększeniem wartości siły pionowej. Wyniki badań laboratoryjnych były



Rys. 6. Wyniki symulacji obciążenia systemu podkonstrukcji statyczną siłą pionową  
Fig. 6. Simulation results of loading the subframe with a static vertical force



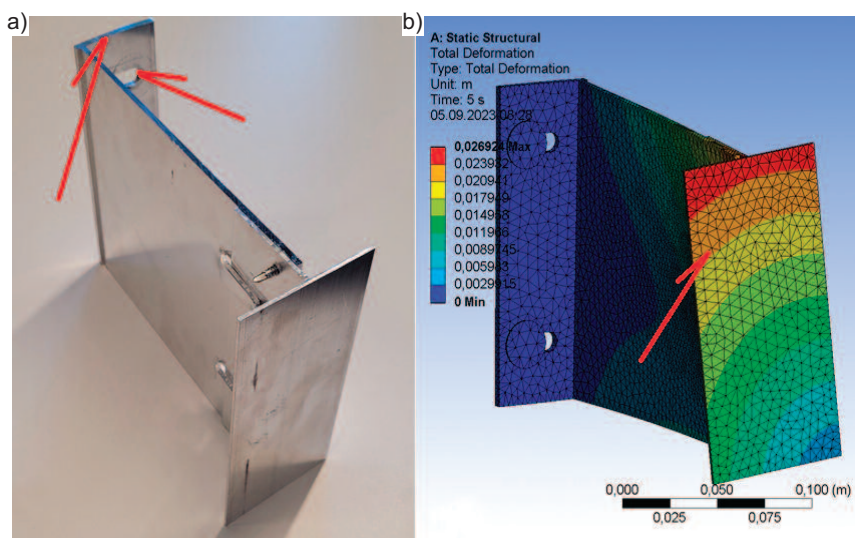
Rys. 7. Porównanie wyników badań laboratoryjnych podkonstrukcji aluminiowej na działanie siły pionowej z wynikami symulacji numerycznej  
Fig. 7. Comparison of the results of laboratory tests of the aluminum substructure on the vertical force with the results of numerical simulation

### Porównanie wyników badań laboratoryjnych podkonstrukcji aluminiowej na działanie siły pionowej z wynikami symulacji numerycznej

*Comparison of the results of laboratory tests of the aluminum substructure on the vertical force with the results of numerical simulation*

Siła [N]	Przemieszczenie [mm]		Różnica [%]
	w badaniach laboratoryjnych	symulacja numeryczna	
525	1	1,49	49,0
1583	3	5,35	78,3
2641	5	13,14	162,8

znacznie mniejsze od uzyskanych podczas symulacji numerycznych. Zawyżanie wyników w przypadku badań numerycznych wynikało z przyjętych uproszczeń w modelu obliczeniowym próbki: model nie uwzględnił zjawisk zachodzących na połączeniach śrubowych występujących na stykach „profil „T” – konsola” oraz „konsola – ściana”. Potwierdzają to obserwacje badań laboratoryjnych podkonstrukcji, w których odnotowano występowanie istotnych deformacji na tych połączeniach, w tym deformacji śrub oraz przesunięć łączonych płaszczyzn (rysunek 8). Dokładne zamodelowanie tych zjawisk oraz ich uwzględnienie w modelu obliczeniowym nie zawsze jest technicznie możliwe, jak również wymaga dokonania wcześniejszych badań laboratoryjnych.



**Rys. 8. Porównanie deformacji: a) w modelu fizycznym; b) w modelu numerycznym. Strzałkami przedstawiono miejsca zauważalnych deformacji**

*Fig. 8. Comparison of deformations: a) on the physical model; b) the numerical model. The arrows show places of noticeable deformations*

*Rys. Autorzy  
Authors' drawing*

### Wnioski

Zaprojektowanie bezpiecznej i trwałej elewacji wentylowanej jest możliwe z uwzględnieniem właściwości fizyko-mechanicznych poszczególnych elementów składowych systemu elewacyjnego. Bardzo ważne jest przy tym określenie rzeczywistej odporności na działanie siły pionowej podkonstrukcji systemu elewacyjnego. Podczas oceny właściwości mechanicznych podkonstrukcji elewacji wentylowanych dokumenty Unii Europejskiej EAD 090034-00-0404 [3] i EAD 090062-00-0404 [4] przewidują przeprowadzenie wyłącznie badań laboratoryjnych modeli rzeczywistych. Wynika to ze zrozumienia stopnia komplikacji tworzenia modeli numerycznych.

**Wyniki badań laboratoryjnych** odporności na działanie siły pionowej podkonstrukcji aluminiowej były znacznie mniejsze od wyników symulacji numerycznej. Różnice wynikały z nadmiernych uproszczeń w modelu obliczeniowym nieodtworzącym rzeczywistej pracy podkonstrukcji oraz ograniczeń technicznych oprogramowania. **W badaniach numerycznych** podkonstrukcji elewacji wentylowanych bardzo istotne jest uszczegółowienie modeli [8]. W wielu przypadkach jest ono możliwe po przeprowadzeniu wcześniejszych badań laboratoryjnych, pozwalających zrozumieć sposób pracy badanej próbki oraz okre-

ślić parametry techniczne elementów składowych (niewynikające z parametrów materiałowych).

Badania numeryczne podkonstrukcji do elewacji wentylowanych są bardzo przydatne na etapie konstruowania wyrobu, gdyż dobrze odwzorowują tendencje procesów mechanicznych zachodzących w wyrobie [9]. Parametry mechaniczne uwzględniane podczas projektowania systemów elewacyjnych należy jednak przyjmować na podstawie badań laboratoryjnych, jak to wynika z [3 i 4].

### Literatura

- [1] 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.
- [2] Kopyłow O. Właściwości mechaniczne podkonstrukcji elewacji wentylowanych z elementami polimerowymi – propozycje zakresu oceny. Izolacje. 2021; 5: 62 – 66.
- [3] EAD 090034-00-0404 Kit composed by subframe and fixings for fastening cladding and external wall elements, 2016.
- [4] EAD 090062-00-0404 Kits for external wall claddings mechanically fixed, 2018.
- [5] PN-EN ISO 7500-1:2018-05 Metale – Wzorcowanie i sprawdzanie statycznych jednoosiowych maszyn wytrzymałościowych – Część 1: Maszyny wytrzymałościowe rozciągające/ściiskające – Wzorcowanie i sprawdzanie układu pomiarowego siły.
- [6] Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z 4 lutego 2004 r. w sprawie wymagań metrologicznych, którym powinny odpowiadać maszyny wytrzymałościowe do prób statycznych.
- [7] Runkiewicz L, Kopyłow O, Sieczkowski J. Elewacje wentylowane. Diagnostyka stanu technicznego. Seria wydawnicza: Instrukcje, Wytyczne, Poradniki. Wydawnictwo ITB. 2021 ISBN: 9788324986149.
- [8] Cwyl M, Wierzbicki S, Michalczyk R. Laboratory tests and numerical analysis of façade sub-structure made of austenitic steel. Archives of Civil Engineering. Vol. LXVIII, ISSUE 4, 2022. pp. 237 –252. ISSN 1230-2945.
- [9] Bedon C, Honfi D, Machalická KV, Eliášová M, Vokáč M, Kozłowski M, Wüest T, Santos F & Portal N. W Structural characterisation of adaptive facades in Europe – Part II: Validity of conventional experimental testing methods and key issues. Journal of Building Engineering. 2019; https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100797.

*Artykuł powstał na podstawie pracy dyplomowej Filipa Chelkowskiego pod kierownictwem dr. inż. Oleksija Kopyłowa na Wydziale Architektury Wyższej Szkoły Ekologii i Zarządzania w Warszawie.*

*Przyjęto do druku: 8.09.2023 r.*