

dr inż. Ołeksij Kopyłow^{1*)}
 ORCID: 0000-0002-8436-2521
 inż. Filip Chelkowski²⁾
 ORCID: 0009-0007-6729-0419

Zastosowanie wybranej metody numerycznej do określenia właściwości podkonstrukcji do elewacji wentylowanych, z termoizolacyjnymi elementami polimerowymi

Using selected numerical method to determine the properties of subframes for ventilated facades with thermal insulating polymeric elements

DOI: 10.15199/33.2023.12.17

Streszczenie. W celu poprawy parametrów termoizolacyjnych elewacji wentylowanych coraz częściej stosowane są podkonstrukcje z konsolami „pasywnymi”, zawierającymi wkładki polimerowe. Wyroby tego typu nie zostały objęte europejskimi specyfikacjami technicznymi typu EAD lub normami krajowymi. Nierzadko, ze względów ekonomicznych, właściwości mechaniczne podkonstrukcji „pasywnych” określone są wyłącznie za pomocą metod obliczeniowych. W artykule porównano wyniki badań laboratoryjnych oraz symulacji numerycznych podkonstrukcji z elementami polimerowymi. Stwierdzono znaczne rozbieżności pomiędzy nimi.

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

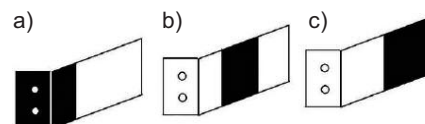
Abstract. In order to improve the thermal insulation parameters of ventilated facades, substructures with "passive" brackets containing polymeric inserts are increasingly being used. Products of this type are not covered by European technical specifications such as EAD or national standards. The mechanical properties of "passive" substructures are often determined by computational methods only, for economic reasons. This paper presents the results of a comparison between laboratory tests and numerical simulations of substructures with polymer elements. Significant discrepancies between the test results were observed.

Keywords: subframe; ventilated facade; numerical analysis; laboratory tests.

Jednym z podstawowych elementów elewacji wentylowanych przenoszących obciążenia od okładziny, parcia i ssania wiatru, kompensacji wymiarów liniowych wskutek zmiany temperatury, różnego rodzaju obciążeń eksploatacyjnych mogących wystąpić podczas użytkowania fasady (uderzeń, obciążeń siłą poziomą związaną z oparciem drabiny) jest podkonstrukcja [1 ÷ 3], najczęściej wykonana ze stali lub aluminium, rzadziej z drewna bądź innych materiałów. Wyroby z metalu charakteryzują się lepszymi właściwościami mechanicznymi, większą trwałością oraz odpornością ogniową w porównaniu z wykonanymi z pozostałych materiałów, ale mają duży współczynnik przewodzenia ciepła. **W celu ograniczenia wpływu mostków termicznych na właściwości termoizolacyjne przegród zewnętrznych w sys-**

temach elewacji wentylowanych coraz częściej stosowane są elementy podkonstrukcji składające się z kilku materiałów: metali i kompozytów polimerowych. Ze względu na bezpieczeństwo ogniowe przekładki termiczne stosowane są głównie w konsolach systemów elewacyjnych chowanych w warstwie wełny mineralnej. **Wyróżnia się konsole z elementami polimerowymi w stopkach (rysunek 1a) oraz w częściach wspornikowych (rysunki 1b i 1c).**

Polimerowe i metalowe elementy konsoli łączone są ze sobą za pomocą łączników mechanicznych (nitów, śrub), metodą zgrzewania (fragment metalu jest wtapiany w polimerze) lub wciskania (część polimerowa jest łączona z częścią metalową za pomocą klinów dociskających wytłoczonych z krawędzi metalowych). Konsole z przekładkami polimerowymi nie zostały objęte europejskimi specyfikacjami technicznymi [2, 3]. Wprowadzane są do obrotu na podstawie Krajowych lub Europejskich Ocen Tech-



Rys. 1. Konsole z przekładkami termoizolacyjnymi z polimeru (przedstawione kolorem czarnym): a) w stopce; b) w środkowej części wspornika; c) w skrajnej części wspornika
Rys. autorów [1]

Fig. 1. Brackets with heat insulating spacers made of polymer (shown in black): a) in base; b) in bracket with polymer separator; c) in bracket with polymer extension Fig. author's [1]

nicznych. Metody badawcze pozwalające na dokonanie ich oceny ustalane są indywidualnie przez Jednostki Ocen Technicznych.

Jedną z podstawowych cech mających wpływ na trwałość i bezpieczeństwo użytkowania elewacji wentylowanej jest **odporność konsoli na działanie siły pionowej**, pozwalająca na określenie granicznej masy okładziny elewacyjnej, definiowana zależnością „siła oddziałująca na konsolę – przemieszczenie konsoli wywołane działaniem siły”.

¹⁾ Instytut Techniki Budowlanej

²⁾ Wyższa Szkoła Ekologii i Zarządzania

^{*}

Praktyka pokazuje, że nierzadko producenci konsoli elewacyjnych pomijają badania laboratoryjne i próbują określić ich odporność na działanie siły pionowej za pomocą dostępnych narzędzi numerycznych. Dotychczasowe analizy porównawcze wyników badań laboratoryjnych konsoli aluminiowych z wynikami badań obliczeniowych wykazały duże różnice pomiędzy nimi [4]. Tematyka ta była również przedmiotem analiz zespołu badawczego dr. inż. Macieja Cwyła [5]. Analizowano zachowanie się konsoli z wkładką termiczną w środkowej części elementu (rysunek 1b). Potwierdzono podobieństwo mechanizmów uszkodzenia konsoli pod obciążeniem siłą pionową w badaniach laboratoryjnych oraz numerycznych. Nie podano natomiast informacji o różnicy przemieszczeń konsoli pod obciążeniem siłą pionową uzyskanych w badaniach analitycznych i laboratoryjnych, a z punktu widzenia praktyki inżynierskiej informacje te są niezbędne w projektowaniu systemów elewacyjnych. Stwierdzenie zbieżności wyników uzyskanych w drodze badań laboratoryjnych i analitycznych pozwoliłoby zmniejszyć koszty i czas wykonania oceny technicznej konsoli do elewacji wentylowanych.

W zależności od dodatków, jakie zawierają polimery w przekładkach konsoli pasywnych, mają one różną odporność na działanie wysokiej lub niskiej temperatury. Pod obciążeniem siły pionowej oraz oddziaływaniem temperatury konsole pasywne w warunkach rzeczywistych mogą zachowywać się inaczej niż w warunkach laboratoryjnych. Wcześniejsze prace dotyczące porównania badań laboratoryjnych oraz symulacji numerycznych [5] nie uwzględniały wpływu temperatury na przemieszczenia konsoli pod obciążeniem siłą pionową.

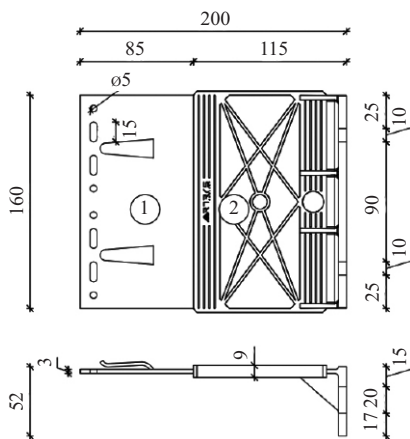
W artykule przeanalizowano różnice pomiędzy wynikami badań laboratoryjnych i numerycznych konsoli aluminiowych z przekładkami polimerowymi w stopce (rysunek 1a) w zakresie oddziaływania siły pionowej. Porównywano wartości przemieszczeń oraz mechanizm uszkodzenia.

Przedmiot badań

W celu oceny możliwości wykorzystania metody numerycznej do określania cech technicznych konsoli z prze-

kładkami termicznymi wybrano wcześniej nieanalizowaną konsolę z przekładką polimerową w jej stopce (rysunek 1a). W badaniach wykorzystano model składający się z konsoli z wkładką termoizolacyjną połączony z profilem T (rysunki 2 i 3).

Podstawę konsoli stanowi kompozyt składający się z poliamidu i włókna szklanego (PA66 + GF50) PA OMIAMID 6.6 IM GF 50 BC, pochodzący z recyklingu, natomiast metalową jej część wykonano ze stopu aluminium EN AW6060 w stanie T6. Konsolę połączono z profilem „T” ze stopu aluminium EN AW 6060 T66, o wymiarach 75 x 55 x 2 mm za pomocą czterech wkrętów samowiercących i 4,8 x 19 A4, uzyskując tzw. połączenie sztywne, i przymocowano je do stanowiska badawczego, tj. stalowej ścianki o grubości 30 mm za pomocą dwóch śrub M8 z poszerzonymi podkładkami. Widok modelu badawczego przedstawiono na rysunku 4.

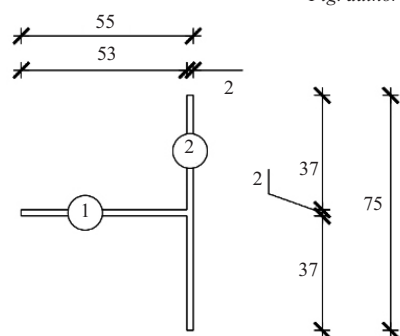


Rys. 2. Konsola z przekładką termoizolacyjną: 1 – część z aluminium; 2 – poliamid

Rys. autorów

Fig. 2. Bracket with thermal insulation base: 1 – aluminum part; 2 – polyamide

Fig. author's



Rys. 3. Profil „T”: 1 – słupki; 2 – półka

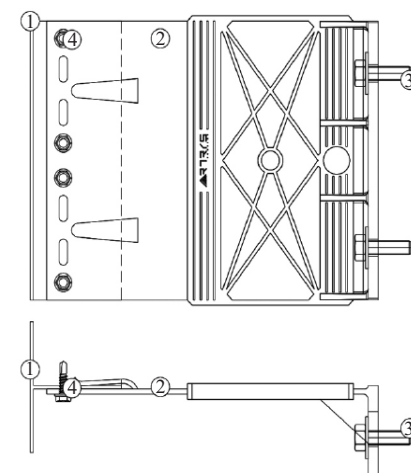
Rys. autorów

Fig. 3. The „T” rail: 1 – upright; 2 – flange

Fig. author's

Długość próbki mierzona od powierzchni zewnętrznej półki profilu „T” (powierzchnia stykająca się z okładziną elewacyjną) do powierzchni zewnętrznej konsoli (powierzchni stykającej się ze ścianą) wynosiła 210 mm.

W badaniach laboratoryjnych oraz numerycznych przykładano pionową siłę statyczną do profilu „T” oraz określano przemieszczenie (rysunek 5).

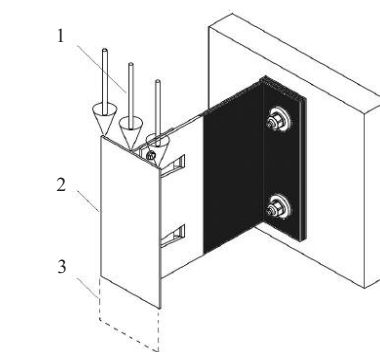


Rys. 4. Widok modelu: 1 – profil „T”; 2 – konsola; 3 – śruba M8; 4 – wkręt samowiercący 4,8 x 19 A4

Rys. autorów

Fig. 4. View of the model: 1 – „T” rail; 2 – bracket; 3 – M8 screw; 4 – self-drilling screw 4,8 x 19 A4

Fig. author's



Rys. 5. Schemat badania: 1 – siła; 2 – model; 3 – przemieszczenie

Rys. autorów

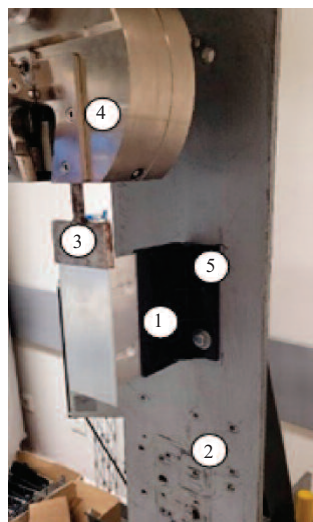
Fig. 5. Test scheme: 1 – force; 2 – model; 3 – displacement

Fig. author's

Badania laboratoryjne

Badania przeprowadzono w Laboratorium Wytrzymałości Materiałów Budowlanych Wyższej Szkoły Ekologii i Zarządzania w Warszawie. Warunki ich wykonania były zgodne z wytycznymi [2, 3]: temperatura powietrza 19°C, a jego wilgotność względna 55%. Siłę zadawano z prędkością 5 mm/min. W celu uniknięcia błędów pomiaru wynikających z deformacji początkowych,

związanych z dopasowaniem się elementów połączonych śrubowo, przykładano do próbek obciążenie wstępne o wartości 100 N. Głowica maszyny wytrzymałościowej pozwalała na pomiar sił i przemieszczeń. Sposób przeprowadzenia badania przedstawiono na fotografii 1.

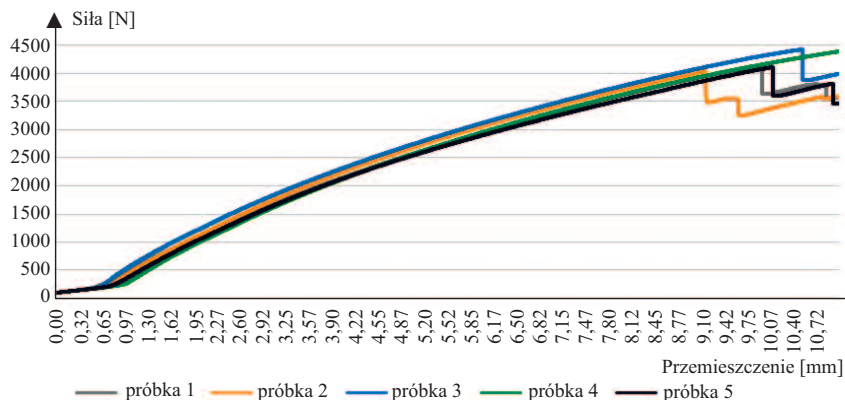


Fot. 1. Badanie laboratoryjne odporności modelu podkonstrukcji na obciążenie siłą pionową: 1 – model; 2 – ścianka stalowa, do której przymocowano model; 3 – element przekazujący oddziaływanie siły; 4 – głowica maszyny wytrzymałościowej; 5 – śruba mocująca model *Rys. autorów*
Photo 1. Laboratory test on the resistance of the substructure model to a vertical load: 1 – model; 2 – steel wall to which the model is fixed; 3 – force transmission element; 4 – testing machine head; 5 – model fixing screw *Fig. author's*

Zgodnie z wytycznymi [2 i 3] określono wartości sił wywołujących przemieszczenia: 0,42; 1; 3; 5 mm oraz maksymalną siłę powodującą uszkodzenie modelu. Wyniki badań laboratoryjnych przedstawiono w tabeli 1, a zależność pomiędzy siłą pionową a przemieszczeniem podczas obciążania modelu na rysunku 6. Wyodrębniono trzy obszary:

Tabela 1. Wyniki badań odporności modelu na działanie siły pionowej
Table 1. Results of the vertical force resistance test of the model

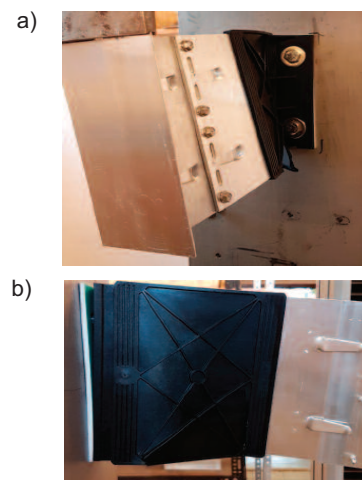
Nr próbki	Wartość siły [N] powodującej przemieszczenie modelu [mm]				Przemieszczenie maksymalne [mm]	Siła powodująca przemieszczenie maksymalne [N]
	0,42	1,0	3,0	5,0		
1	163,99	487,97	1650,86	2571,55	9,92	4155,36
2	169,24	435,79	1733,56	2686,99	9,13	4055,23
3	164,06	550,15	1812,96	2738,72	10,49	4428,56
4	155,23	277,76	1593,71	2568,03	11,00	4404,80
5	165,85	376,46	1632,19	2548,67	10,07	4124,35
Wartość średnia	163,67	425,63	1684,66	2622,79	10,12	4233,66
Odchylenie standardowe	5,18	104,62	88,06	87,67	0,70	171,17



Rys. 6. Zależność pomiędzy siłą pionową a przemieszczeniem przy obciążeniu modelu
Fig. 6. Relationship between vertical force and displacement when the load is applied

- anomalii związanych z ułożeniem się połączeń elementów modelu w pierwszej fazie obciążenia;
- quasi-liniowy;
- anomalii występujących przed uszkodzeniem.

Zauważono powtarzalność przy zniszczeniu badanych elementów: uszkodzenia występowały w stopkach konsoli (elementach polimerowych) przy przemieszczeniu ok. 10 mm. Uzyskane wartości siły niszczącej i przemieszczeń były porównywalne z wartościami siły i przemieszczeń modeli podkonstrukcji aluminiowych o analogicznym wysięgu [4]. Widok typowego uszkodzenia badanych modeli podkonstrukcji przedstawiono na fotografii 2.



Fot. 2. Widok typowego uszkodzenia badanych modeli: a) z przodu; b) z boku

Fot. autorów
Photo 2: View of typical damage to the test models: a) front; b) side *Photo: author's*

Wyniki symulacji numerycznych

Symulacje wykonano w programie ANSYS Workbench 2022 R2. Przy generowaniu modelu wykorzystano następujące materiały:

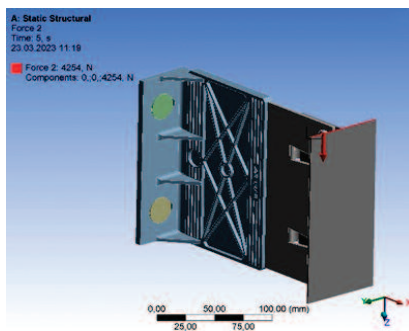
- poliamid oraz stop aluminium (ich właściwości zostały zmienione domyślnie i przyjęte zgodnie z kartami materiałowymi dostarczonymi przez producenta konsol). Założono, że poliamid jest materiałem jednolitym oraz izotropo-

wym ze względu na niewielki wymiar i losowe położenie włókien szklanych;

- stal nierdzewną, której parametry przyjęto ze standardowej biblioteki ANSYS.

Założono, że wszystkie połączenia w badanym modelu są scalone. Model, który pierwotnie został wygenerowany w programie GstarCAD 2022, a następnie wyeksportowany do formatu IGS za pomocą AutoCAD 2023, wykazywał drobne błędy geometryczne, które zostały automatycznie poprawione w programie Workbench 2022 R2 za pomocą wirtualnej topologii (rysunek 7).

W celu porównania zbieżności wyników uzyskanych w badaniach laboratoryjnych i numerycznych, w analizie numerycznej określano przemieszczenia modelu (tabela 2), które powstają po przyłożeniu siły powodującej podczas badań laboratoryjnych przemieszczenia 0,42; 1; 3; 5 oraz 10,1 mm (tabela 1).

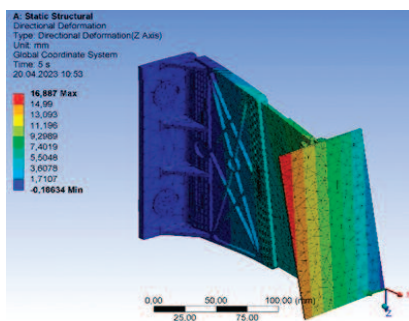


Rys. 7. Model numeryczny podkonstrukcji elewacji wentylowanej Rys. autorów
Fig. 7. Numerical model of the subframe of the ventilated façade Fig. author's

Tabela 2. Przemieszczenia modelu podkonstrukcji uzyskane w badaniach numerycznych
Table 2. Substructure model displacements obtained using numerical tests

Przemieszczenie modelu [mm] uzyskane po przyłożeniu siły [N]				
164	426	1685	2623	4234
0,32	0,81	3,51	6,85	16,89

Z analiz numerycznych wynika, że uszkodzeń badanej próbki należy się spodziewać na połączeniu konsoli z profilem „T” (rysunek 8), natomiast najmniejsze naprężenia są w stopce konsoli.



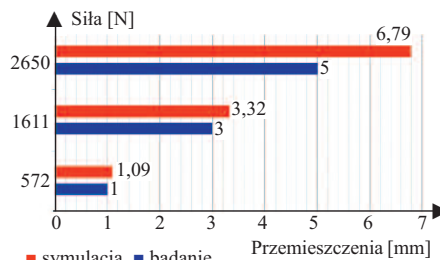
Rys. 8. Model numeryczny pod obciążeniem niszczącym Rys. autorów
Fig. 8. Numerical model under breaking load Fig. author's

Porównanie wyników badań laboratoryjnych i numerycznych

Wyniki symulacji numerycznych oraz badań laboratoryjnych mogą być porównywane tylko w ograniczonym zakresie. Na wstępnym etapie obciążenia próbki (powodującego jej przemieszczenie 0 ÷ 0,5 mm) jest to utrudnione ze względu na:

- anomalie wynikające z luzów montażowych elementów próbek;
- niepewność pomiaru siły i przemieszczeń podczas badań laboratoryjnych;
- brak możliwości modelowania luzów montażowych w modelu matematycznym.

W fazie quasi-liniowej (rysunek 8) wartości przemieszczeń próbek wywołane tym samym obciążeniem były większe w przypadku symulacji numerycznych (rysunek 9). Różnice sięgały nawet 37%.



Rys. 9. Porównanie wyników badań laboratoryjnych i symulacji numerycznych zachowania się próbek pod obciążeniem pionowym Rys. autorów

Fig. 9. Comparison of the results of laboratory tests and numerical simulations of the behavior of samples under vertical load

Fig. author's

Wyniki uzyskane w końcowej fazie badań (przed zniszczeniem) nie mogą być porównywane ze względu na różny sposób zniszczenia modelu w warunkach rzeczywistych oraz podczas symulacji numerycznych (fotografia 2 i rysunek 8). W warunkach laboratoryjnych uszkodzenie następowało w stopce konsoli, natomiast w modelu obliczeniowym na połączeniu profilu „T” z konsolą. Podobne rozbieżności pomiędzy badaniami laboratoryjnymi a numerycznymi konsoli stalowych stwierdzono w pracy [7]. Średnie wartości maksymalnych przemieszczeń próbek odnotowane tuż przed ich zniszczeniem w warunkach laboratoryjnych były znacznie mniejsze od wartości uzyskanych z obliczeń (odpowiednio 10,1 i 16,9 mm). Wynik symulacji obliczeniowej był zgodny z wynikami badań laboratoryjnych zachowania się profilu „T” przy mocowaniu na końcu konsoli: w momencie uszkodzenia profil obracał się.

Wnioski

Porównanie wyników badań laboratoryjnych oraz symulacji numerycznych podkonstrukcji elewacji wentylowanej z przekładką polimerową pod obciążeniem siłą pionową wykazało rozbieżności w zachowaniu się próbek. Różne były wartości przemieszczeń podkonstrukcji pod obciążeniem siłą oraz sposób zniszczenia próbek, co jest związane z niedoskonałością przyjętego modelu numerycznego. Duży wpływ na wynik miały:

- nieznaną rzeczywistość rzeczywistych interakcji połączeń elementów metalowych i polimerowych konsoli. Mają one bardzo zindywidualizowany charakter i zależą od technologii produkcji konsoli;

- ograniczona wiedza na temat właściwości fizycznych polimeru zastosowanego w konsolach (przede wszystkim brak danych o odporności na ścinanie).

Określenie niezbędnych właściwości mechanicznych wiąże się z koniecznością przeprowadzenia dodatkowych badań laboratoryjnych. Naszym zdaniem, w przypadku braku danych, badania laboratoryjne elementów podkonstrukcji pozostają bezalternatywne do określenia podstawowych cech techniczno-użytkowych elementów podkonstrukcji z polimerami. Zastosowanie wyników symulacji numerycznych konsoli z przekładkami polimerowymi w praktyce inżynierskiej jest obarczone ryzykiem błędów.

Interesujące może być porównanie uzyskanych wyników laboratoryjnych z wynikami symulacji numerycznych przeprowadzonych za pomocą innych narzędzi obliczeniowych. Z punktu widzenia praktyki inżynierskiej bardzo istotne jest określenie wpływu temperatury na zachowanie się konsoli pasywnych (z przekładkami polimerowymi) pod obciążeniem siłą pionową. Planujemy przebadać te zależności zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak również numerycznie.

Literatura

- [1] Kopyłow O. Elewacje wentylowane przekrój: podkonstrukcje i połączenia. Muratorplus. Technika. Fasady. 2021 r. Wydanie elektroniczne: <https://www.muratorplus.pl/technika/fasady/elewacje-wentylowane-przekroj-podkonstrukcje-i-polaczenia-aa-dsTj-pCSc-BmeS.html>.
- [2] EAD 090034-00-0404 Kit composed by subframe and fixings for fastening cladding and external wall elements, 2016.
- [3] EAD 090062-00-0404 Kits for external wall claddings mechanically fixed, 2018.
- [4] Kopyłow O, Chelkowski F. Stosowanie narzędzi obliczeniowych do określenia właściwości mechanicznych konsoli do elewacji wentylowanych. Materiały Budowlane. 2023; DOI: 10.15199/33.2023.09.14.
- [5] 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.
- [6] Chelkowski F. Praca inżynierska. Możliwości zastosowania metod obliczeniowych podczas oceny technicznej konsol do elewacji wentylowanych. Konsola dwuelementowa. WSEiZ w Warszawie, 50 str., 2023 r.
- [7] Kołaczkowski M, Byrdy A. FEM Analysis and Experimental Research into Carrier Brackets in Ventilated Facades. Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2020; <https://doi.org/10.3311/PPci.13822>.

Przyjęto do druku: 20.11.2023 r.