

Badanie nośności wybranych poliamidowo- -aluminiowych konsoli nośnych dla okładzin fasad budynków



dr inż.

MACIEJ CWYL

Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Lądowej
ORCID: 0000-0002-2894-7840



MICHAŁ PROCHERA

Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Lądowej, KNKM
ORCID: 0009-0004-3936-7763



JĘDRZEJ WOJDA

Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Lądowej, KNKM
ORCID: 0009-0005-6214-3810



KORNELIA WILGA

Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Lądowej, KNKM
ORCID: 0009-0005-4722-986X



PATRYK RADZIMIRSKI

Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Lądowej, KNKM
ORCID: 0009-0009-7672-8704

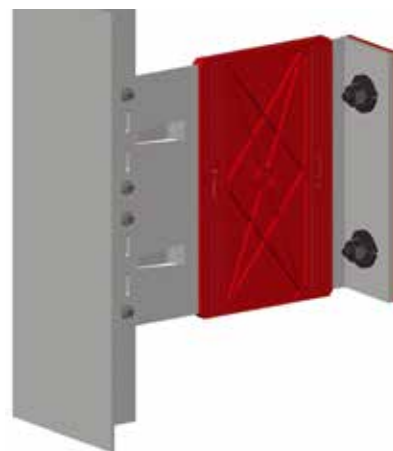
Zagadnieniem omawianym w ramach artykułu jest innowacyjny system konsoli nośnych z przekładkami z tworzywa sztucznego. W ramach zleconych prac i grantów badawczych Koła Naukowego Konstrukcji Metalowych przeprowadzono badania konsoli poliamidowo-
-aluminiowych.

Konsule nośne, zwane często również wieszakami, stanowią kluczowy element podkonstrukcji fasady. Podstawowy podział konsoli ze względu na przenoszone obciążenia wyróżnia wieszaki stałe i przesuwne. W pierwszym przypadku rolę przytwierdzonej do konstrukcji konsoli jest przenoszenie obciążeń pionowych i poziomych, tj. ciężar elewacji, a także obciążenia klimatyczne. W przypadku konsoli zapewniającej przesuw umożliwia ona łatwiejszą rektyfikację podkonstrukcji fasady, kompensuje wpływy termiczne (klimatyczne) i przenosi obciążenia poziome, tj. parcie i ssanie wiatru czy napór tłumu [1].

Podstawowe informacje

Coraz częstszym wyborem projektantów systemów fasad stają się dedykowane konsole pasywne (rys.1.). Główną zaletą wyróżniającą opisywane rozwiązania jest znaczące ograniczenie mostków termicznych w warstwie izolacji na elewacji zewnętrznej oraz poprawa parametrów dźwiękochłonnych struktury metalowo-szklanej. Zabieg ten uzyskuje się głównie w chwili wykorzystania przekładki z tworzywa sztucznego, najczęściej

różnego rodzaju poliamidów. Zespolecie tworzywa sztucznego z metalem uzyskuje się np. za pomocą dedykowanych łączników, jednak częstym zabiegiem jest staję się kształtowanie przekładki metodą wtryskową.



Rys. 1. Przykładowa konsola pasywna;
źródło: autor

Badania laboratoryjne

Informacje ogólne

W ramach badań statutowych i współpracy z przemysłem Kóło Naukowe Konstrukcji Metalowych wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej podjęto się badań i analiz wskazanych wieszaków poliamidowo-aluminiowych. Celem badań była analiza nowych rozwiązań i materiałów w zakresie wsporników konstrukcyjnych struktur metalowo-szklanych. Badania przeprowadzono na próbkach rynkowych, uzyskanych z rozwiązań wprowadzonych na rynek przez firmę ARTRYS PROJEKT Sp. z o.o. Sp. k.

Maszyna wytrzymałościowa

Przytoczone w dalszej części artykułu badania laboratoryjne zostały przeprowadzone w przestrzennej maszynie wytrzymałościowej znajdującej się na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej (rys. 2.). To wyjątkowe urządzenie w kształcie tzw. czaszy składa się z głównych części, którymi są: podstawa, ramiona oraz siłowniki. Do okrągłej podstawy w kształcie zakrzywionego dwuteownika zamocowane zostały uzębowane ramiona o tej samej krzywiznie co podstawa. Od góry ramiona spięte zostały prostopadłościennymi zwornikami, a do samych pótek przymocowane zostały na połączenie śrubowe blachy, które służą jako baza do zamocowania siłowników. Kolejne siłowniki zamocowano u podstawy maszyny w odpowiednio przygotowanych gniazdach montażowych. Panel sterujący pozwala na operowanie obciążeniem w postaci siły oraz przemieszczenia. Maksymalna siła, jaką można osiągnąć, to 350 kN, natomiast maksymalne przemieszczenie wynosi odpowiednio 180 mm.

Charakterystyka konsoli

Badaniom poddanych zostało 10 typów konsoli, łącznie około 120 sztuk, a wyniki badań poddano opracowaniom statystycznym. Konsole poddane analizie różniły się odpowiednio wysięgiem, wysokością, a także rodzajem tworzywa sztucznego. Łatwiejsze rozróżnienie konsoli zapewnia kolorystyka przekładek pasywnych. Wieszaki, w których wykorzystano Poliamid 66, wyróżniają kolor czarny, zaś w przypadku wykorzystania w procesie technologicznym Poliamidu 6 widoczny jest kolor czerwony. Pierwszy poliamid cechuje się większą wytrzymałością udaroodpornościową, drugi natomiast dzięki wyższej temperaturze topnienia cechuje się większą odpornością przeciwpożarową.

Przebieg badań

Badania wytrzymałości konsoli pasywnych obejmowały próby oddziaływania sił podłużnych statycznych, zgodnie z ETAG 034 [2–3]. Obciążenie podczas wszystkich prób było zadawane za pomocą



Rys. 2. Przestrzenna maszyna wytrzymałościowa; źródło: autor

zaprogramowanego przemieszczenia siłownika hydraulicznego.

Charakterystykę prowadzonych badań statycznych przedstawiono w poniższych punktach:

- Prędkość obciążenia: 1 mm/s.
- Badanie konsoli prowadzone pod ciągłym obciążeniem do momentu jej zniszczenia.
- Dokładność odczytu
 - zadanych przemieszczeń: 0,1 mm.
 - otrzymanych sił: 0,1 kN.

Analiza numeryczna

Charakterystyka materiałowa

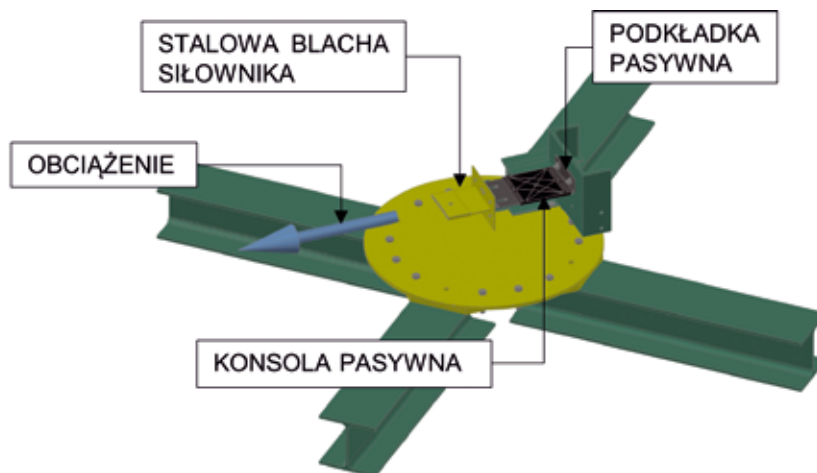
Celem analizy numerycznej za pomocą programu Abaqus CAE było uzyskanie stanu odkształcenia zgodnego z rzeczywistym, uzyskanym w ramach omawianych badań laboratoryjnych. W ramach przeprowadzonej analizy dla wybranego typu konsoli z przekładką pasywną z Poliamidu 66 stworzono odpowiedni model numeryczny. Dostępne dane wykorzystanego tworzywa sztucznego skłoniły do przyjęcia charakterystyki sprężystego modelu materiału.

W przypadku aluminium, a także stali wysokowęglowej przyjęto charakterystykę sprężysto-plastyczną.

Geometria numeryczna konsoli

Złożoność geometrii, a także charakterystyka badania, zdecydowały o przyjęciu szeregu uproszczeń. Zmiany dotyczyły m.in. zastąpienia łączników montażowych odpowiednimi warunkami brzegowymi i ograniczeniem uzębowania przekładki pasywnej. W dalszej kolejności wydzielono dwa niezależne od siebie modele numeryczne, tj. model M1 konsoli pasywnej BLP 200 i model M2 uproszczonego węzła konsoli i teownika. Wskazane uproszczenia pozwoliły na uzyskanie znacznie bardziej jednorodnej siatki MES, a także niezależną ocenę wpływu poszczególnych mechanizmów zniszczenia na przeniesioną siłę. Poszczególne elementy zostały stworzone w architekturze modelu przestrzennego 3D programu, poprzez funkcję wyciągnięcia szkicu.

Model M1 (rys. 4.), złożony jedynie z części składowych konsoli pasywnej, miał na celu uchwycenie wpływu efektu dźwigni na



Rys. 3. Schemat zamocowanej konsoli pasywnej w próbie obciążenia osiowego; źródło: autor

Tab. 1. Właściwości mechaniczne Poliamid 66; źródło: [4]

Charakterystyka	Wartość
Moduł Younga	$E=69500$ MPa
Współczynnik Poissona	$\nu=0,33$
Min. wytrzymałość na rozciąganie	$f_u=190$ MPa
Umowna granica plastyczności	$f_o=150$ MPa
Wydłużenie przy zerwaniu	$A=8\%$

Tab. 2. Właściwości mechaniczne stopu aluminium EN-AW 6060 T6; źródło: [5]

Charakterystyka	Wartość
Kolor	Czarny (B)
Moduł Younga	$E=12000$ MPa
Współczynnik Poissona	$\nu=0,18$
Naprężenie zrywające	185 MPa
Wydłużenie przy zerwaniu	$A=3\%$



Rys. 4. Geometria numeryczna badanej konsoli pasywnej modelu M1; źródło: autor



Rys. 5. Geometria numeryczna badanej konsoli pasywnej modelu M2; źródło: autor

przeniesioną siłę. Złożeniem dla wydzielania modelu M2 (rys. 5.) było uchwycenie utraty nośności podkonstrukcji fasady ze względu na połączenie. Uproszczone modele kształtownika konsoli pasywnej i teownika montażowego połączone z wykorzystaniem stalowych łączników, zapewniając odpowiednie warunki brzegowe.

Proces tworzenia modeli numerycznych obejmował utworzenie geometrii 6 poszczególnych elementów konsoli, tj. kształtowników aluminiowych, przekładki pasywnej oraz łączników stalowych. Każdej części nadano charakterystykę możliwej deformacji pod wpływem działania sił.

Uchwycenie złożonej geometrii łączników samowiercących przewidzianych w modelu M2 prowadzi do wygenerowania niejednorodnej siatki elementów skończonych. Gwintowany trzpień łącznika uniemożliwia stworzenie siatki strukturalnej złożonej z elementów prostopadłościennych. W konsekwencji czas symulacji staje się nieporównywalnie większy, a wyniki końcowe poddają dyskusji sens uchwycenia gwintu łączników. Na potrzeby uproszczonej analizy połączenia zakładkowego zdecydowano się na uproszczenie geometrii łączników. Trzpień gwintowany zastąpiono walcem o średnicy odpowiadającej otworom montażowym.

Siatka elementów skończonych

W trakcie procesu tworzenia poszczególnych elementów składowych konsoli szczególną uwagę przyłożono do aspektu uproszczenia i dopracowania geometrii, tak aby utworzona w dalszej kolejności siatka elementów skończonych była w jak największym stopniu jednorodna (rys. 6).

Nie zdecydowano się na ewentualne dogęszczenie siatki wokół otworów owalnych, otworów montażowych, a także obszary zespolenia poliamidu z aluminium. Wstępne analizy dowiodły, że zagęszczenie siatki nie wpłynie na poprawę dokładności



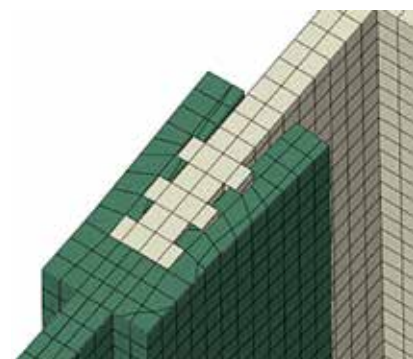
Rys. 6. Siatka MES modelu M1; źródło: autor

wyników, a jedynie znacząco wydłużył sam proces symulacji.

Podzielenie złożonych modeli na proste regiony pozwoliło na stworzenie siatki MES z wykorzystaniem techniki siatki strukturalnej. Dzięki wstępnym wzorom topologii program tworzy siatkę obszaru o regularnych kształtach, złożoną głównie z kwadratów i sześciątów w przypadku układu płaskiego. Metodę siatki strukturalnej można także stosować dla obszarów trójwymiarowych o prostej budowie [6].

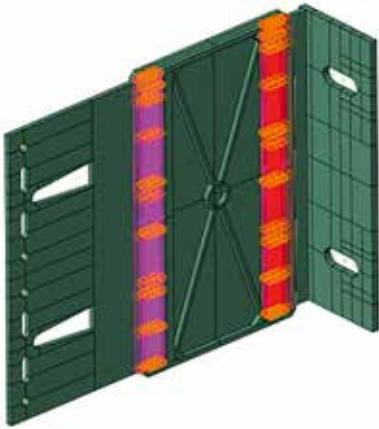
Interakcje

W procesie tworzenia modelu zachowano charakterystyczne użebrowanie profili aluminiowych. Próba zadania odpowiedniej charakterystyki zespolenia dowiodła, że jest to zagadnienie, które wymaga dodatkowych rozważań. Wstępne analizy numeryczne prowadziły do wystąpienia zjawiska odspojenia poliamidu od profili aluminiowych w strefie środkowej (rys. 7), a w konsekwencji wydłużony czas procesu uzyskania wyników, a także prowadziły do powstawania licznych błędów, a ostatecznie niepowodzenia symulacji.



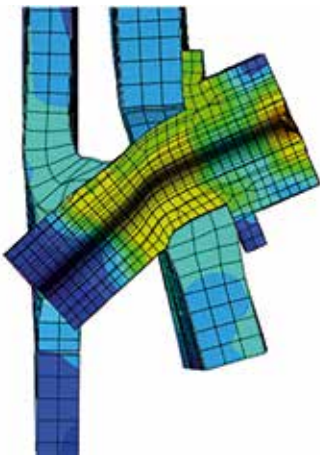
Rys. 7. Efekt odspojenia poliamidu od aluminium w strefie zespolenia; źródło: autor

Na potrzeby analizy ograniczono się do połączenia wszystkich elementów za pomocą funkcji *Tie* [6], która zapewnia ciągłość przemieszczeń i naprężeń, a także zezwala na wystąpienie różnic w gęstości i układzie siatki MES poszczególnych elementów (rys. 8.).



Rys. 8. Uchwycenie zespolenia poliamidu i aluminium; źródło: autor

Szczególną uwagę w procesie tworzenia modelu obliczeniowego M2 przyłożono do zagadnienia połączenia zakładkowego. Wstępne analizy wykazały, że poczynione uproszczenia wymagają precyzyjnego określenia sił kontaktowych stycznych i normalnych do ścianek otworów. Sugerowane wartości współczynnika tarcia między stalą a stopem aluminium prowadzą do sklejenia obu materiałów i wystąpienia niechcianego zjawiska pociągnięcia aluminium za wyciągającym trzpieniem łącznika (rys. 9).



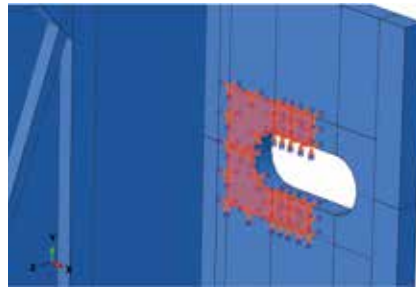
Rys. 9. Efekt pociągnięcia aluminium; źródło: autor

W przygotowanym modelu docisk trzpienia łącznika do ścianki otworu uchwycony został w ramach oddziaływania normalnego do powierzchni. Domyślnie twardy kontakt powierzchni (*hard contact*) [6] występuje, jeśli odległość między powierzchnią nadrzędną i podrzędną jest zerowa. Wybrana formuła nie ogranicza jednak wielkości maksymalnego nacisku przenoszonego w wyniku kontaktu elementów, jednakże może powodować problemy z konwergencją modelu i znacząco wydłużać czas obliczeń. Opcja *Allow separation after contact* [6] dopuszcza odseparowanie od siebie powierzchni nawet po ich wcześniejszym zetknięciu, co w dalszej

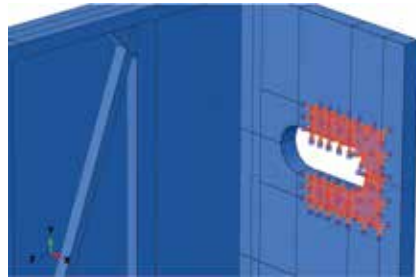
kolejności pozwoli na ograniczenie efektu pociągnięcia aluminium.

Warunki brzegowe

W ramach rozbudowy analizy numerycznej zdecydowano się na przeprowadzenie dodatkowych analiz ze względu na lokalizację kotwy w otworze owalnym. Założono, że docisk podkładki stalowej do blachy konsoli nie pozwala na jakiegokolwiek obrót i przesuw w objętym obszarze. W związku z tym obszarem wokół otworów owalnych odebrano wszystkie stopnie swobody. W pierwszym przypadku zakotwienie ułożono skrajnie do wewnątrz (rys. 10.), w drugim skrajnie do zewnątrz (rys. 11.).

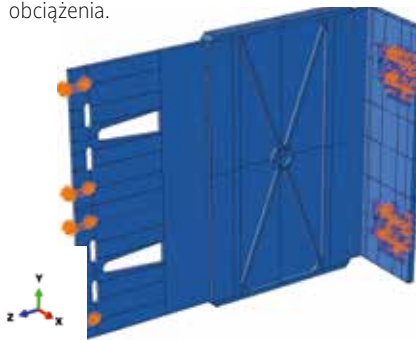


Rys. 10. Zakotwienie skrajnie do wewnątrz; źródło: autor



Rys. 11. Zakotwienie skrajnie do zewnątrz; źródło: autor

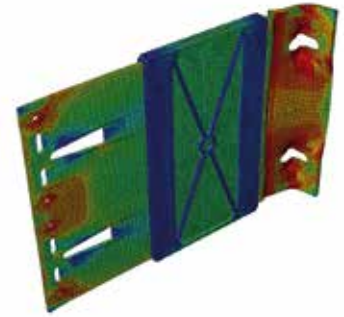
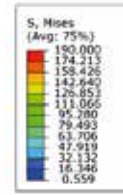
Obciążenie w formie zadanego przemieszczenia zgodnego z wartościami użytymi w badaniach laboratoryjnych zostało przyłożone do ścianek otworów montażowych wolnego końca konsoli (rys. 12.). Dodatkowo, mając na uwadze rzeczywistą interakcję między konsolą i dodatkowym teownikiem, zablokowano możliwość przemieszczenia w kierunku ortogonalnym do kierunku obciążenia.



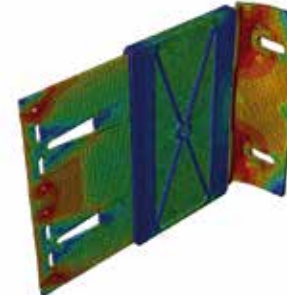
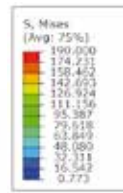
Rys. 12. Warunki brzegowe modelu M1; źródło: autor

Mechanizmy zniszczeń

W wyniku przeprowadzonej analizy numerycznej statycznego rozciągania w modelu doszło do widocznego uplastycznienia blachy doczołowej, tj. wystąpienia efektu dźwigni. Analiza porównawcza wskazuje, że zlokalizowanie zakotwienia skrajnie do zewnątrz spowodowało znacznie większe odkształcenia plastyczne teownika, a w konsekwencji zwiększone przemieszczenie wolnego końca konsoli (rys. 13., rys. 14.).



Rys. 13. Mapa naprężeń von Misesa dla zakotwienia skrajnie do zewnątrz; źródło: autor



Rys. 14. Mapa naprężeń von Misesa dla zakotwienia skrajnie do wewnątrz; źródło: autor

Strefą szczególnie wyjątkową, gdzie naprężenia von Misesa osiągają granicę plastyczności aluminium, jest obszar otworów owalnych. W przypadku zakotwienia skrajnego do wewnątrz zauważa się przyrost naprężeń w strefie środkowej w obszarze zespolenia poliamidu z aluminium.

Wydzielenie obu analiz ze względu na miejsce ułożenia łączników okazało się słusznym zabiegiem. Przeprowadzone badania laboratoryjne osiowego rozciągania konsoli potwierdzają te rezultaty. Podobnie jak w analizie numerycznej, zależność zlokalizowania łącznika decydowała o ewentualnym pogłębieniu efektu dźwigni i wygięciu blachy w strefie karbu (rys. 15., rys. 16.).

Znacznie dokładniejszy obraz wpływu zlokalizowania łączników na końcowe przemieszczenie, przy którym dochodzi do utraty nośności konsoli, dostarczają zbiorcze wykresy zależności siła – przemieszczenie (rys. 17.).



Rys. 15. Odsztącenia uzyskane w ramach badań laboratoryjnych dla zakotwienia skrajnie do zewnątrz; źródło: autor



Rys. 16. Odsztącenia uzyskane w ramach badań laboratoryjnych dla zakotwienia skrajnie do wewnątrz; źródło: autor

Graficzne przedstawienie wyników obrazuje wpływ lokalizacji łączników na charakter przyrostu sił w próbach. Prędkość przyrostu sił w próbach B2 i B3, tj. łączniki zlokalizowane skrajnie do wewnątrz, jest zauważalnie mniejsza. Maksymalną siłę rozciągającą odnotowuje się widocznie później, tj. w przedziale od -23 mm do -26 mm,

potem wartości przyjmują charakter malejący, niemonotoniczny o widocznych lokalnych skokach wartości. W przypadku prób B1, B4 i B5 przyrost sił jest widocznie szybszy. Siłę krytyczną odnotowano w przedziale od -15 mm do -21 mm. Co więcej, próby te wyróżniają się znacznie gwałtowniejszą utratą nośności.

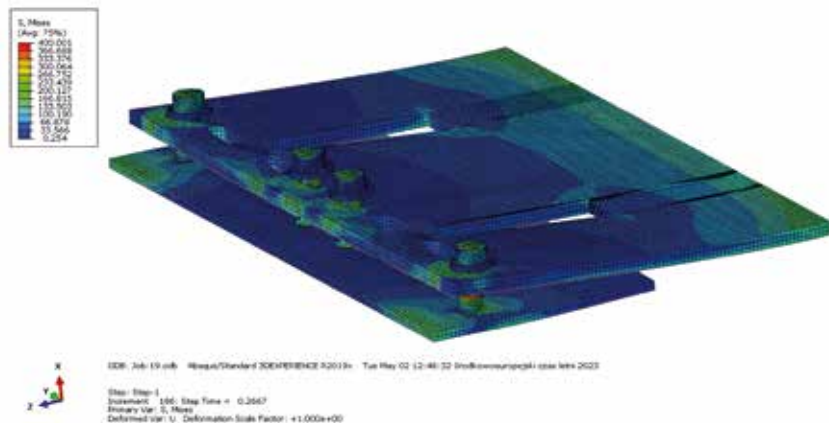
Przeprowadzona analiza numeryczna modelu M2 osiowego rozciągania potężnego zaktadkowego spowodowała wyciągnięcie trzpieni łączników z blachy kształtownika (rys. 18.). Badania laboratoryjne dowiodły, że elementem decydującym o ostatecznej nośności konstrukcji jest wspomniane połączenie zaktadkowe. Przyłożone obciążenie powoduje utratę kontaktu między aluminiowymi kształtownikami, a w konsekwencji powstanie widocznej szczeliny między nimi (rys. 19.). Docisk trzpienia do otworów spowodował zgięcie łączników w płaszczyźnie przyłożonej siły, a ostatecznie całkowite wysunięcie trzonu z otworu blachy teownika.

Wnioski

Wyniki uzyskane w ramach przeprowadzonych badań laboratoryjnych statycznego rozciągania wybranej konsoli nośnej potwierdzają wiarygodność analizy numerycznej. W obu podejściach bezpośrednią przyczyną utraty nośności badanej podkonstrukcji było zjawisko wyciągnięcia trzpieni łączników z otworów połączenia zaktadkowego, tzw. *pull-out failure* [7]. Schematy zniszczenia okazały się powtarzalne w obrębie danego typu konsoli. Zgodny był zarówno schemat ostatecznego zniszczenia, tj. wyrwanie wkrętów samowierzących, jak i pojawienie się efektu dźwigni i zginanie blachy w obrębie karbu. W każdym badaniu opisany model



Rys. 17. Zestawienie wyników nośności konsoli poddanych statycznemu rozciąganiu; źródło: autor



Rys. 18. Mapa naprężeń von Misesa w obrębie połączenia za pomocą łączników; źródło: autor



Rys. 19. Efekt wyciągnięcia wkrętów uzyskany w badaniach laboratoryjnych; źródło: autor

zniszczenia zdecydował o maksymalnym przemieszczeniu.

Celem jednoznacznego odzwierciedlenia badań laboratoryjnych należy jednak przygotować analizę numeryczną, która obejmie całą podkonstrukcję. Dzięki takiemu zabiegowi w sposób najbardziej przybliżony uwzględniona zostanie interakcja między opisywanymi mechanizmami zniszczeń.

Bibliografia

- [1] Cwyl M., Kosieradzka K., 2017, Wpływ lokalnych mostków termicznych na projektowanie struktur metalowo-szkłanych, „Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe”, t.18, nr 5, s. 130–135.
- [2] ETAG 034 cz. 1, 2012, Część 1: Zestawy okładzin wentylowanych wraz z elementami mocującymi, European Organisation for Technical Approvals.
- [3] ETAG 034 cz. 2, 2012, Część 2: Zestawy zawierające elementy okładzinowe, elementy mocujące, podkonstrukcję oraz wyroby izolacyjne, European Organisation for Technical Approvals.
- [4] <https://grupaaazoty.com/> [dostęp: 30.05.2023].
- [5] <https://plastics.pl/produkty-katalogi/polprodukty-aluminium-tworzywa/profile-aluminiowe-standardowe> [dostęp: 30.05.2023].
- [6] <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5113/abaqus/docs/v6.6/books/usi/default.htm?startat=book01.html#usi> [dostęp: 30.05.2023].
- [7] <https://www.fixfast.com/skills-hub/what-are-the-various-failure-modes-of-fastener-connections> [dostęp: 30.05.2023].

DOI: 10.5604/01.3001.0053.8466

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA
Cwyl Maciej, Prochera Michał, Wojda Jędrzej, Wilga Kornelia, Radzimirski Patryk, 2023, Badanie nośności wybranych poliamidowo-aluminiowych konsoli nośnych dla okładzin fasad budynków, „Builder” 9 (314). DOI: 10.5604/01.3001.0053.8466

Streszczenie: Zagadnieniem omawianym w ramach artykułu jest innowacyjny system konsoli nośnych z przekładkami z tworzywa sztucznego. W ramach zleconych prac i grantów badawczych Koła Naukowego Konstrukcji Metalowych przeprowadzono badania konsoli poliamidowo-aluminiowych. Dostarczone wieszaki o różnych parametrach geometrycznych i materiałowych zostały przebadane w przestrzennej maszynie wytrzymałościowej znajdującej się na Wydziale Inżynierii Ładowej Politechniki Warszawskiej. Celem badań było określenie nośności konsoli na zginanie w płaszczyźnie, rozciąganie osiowe i wpływ zmęczenia. Następnym krokiem obejmującym przygotowanie analizy numerycznej w programie

Abaqus CAE dla wybranego typu konsoli. Celem analizy MES było osiągnięcie końcowego stanu odkształcenia zgodnego z rzeczywistym, uzyskanym w ramach badań laboratoryjnych. W podsumowaniu przedstawiono wnioski wyciągnięte z porównania wyników uzyskanych w ramach badań laboratoryjnych i analizy numerycznej.

Słowa kluczowe: konsole poliamidowo-aluminiowe, badania laboratoryjne nośności konsoli pasywnych, analiza numeryczna nośności konsoli pasywnych

Abstract: EXAMINE OF THE LOAD CAPACITY OF SELECTED POLYAMIDE-ALUMINUM SUPPORT CONSOLES FOR BUILDING FACADE CLADDING. The issue discussed in the article is an innovative system of support consoles with plastic spacers. As part of the commissioned works and research grants of the Koła Naukowego Konstrukcji Metalowych, tests of polyamide - aluminum consoles were carried out. Supplied hangers with different geometrical and material parameters were tested in a spatial testing machine located at the Faculty of Civil Engineering of the Warsaw University of Technology. The aim of the tests was to determine the bearing capacity of the console for in-plane bending, axial stretching and the effect of fatigue. The next step involved the preparation of a numerical analysis in the Abaqus CAE program for the selected type of console. The purpose of the FEM analysis was to achieve the final state of deformation consistent with the real one obtained during laboratory tests. The summary presents the conclusions drawn from the comparison of the results obtained as part of laboratory tests and numerical analysis.

Keywords: polyamide-aluminum consoles, laboratory tests of the load capacity of passive consoles, numerical analysis of the load capacity of passive consoles