

POLITECHNIKA ŚLĄSKA W GLIWICACH

Wydział Mechaniczny Technologiczny



mgr inż. Patryk Placzek

PRACA DOKTORSKA

Badania własności użytkowych nowo zaprojektowanej ościeżnicy o obniżonym współczynniku przenikalności termicznej

Promotor

Dr hab. inż. Tomasz Tański prof. PŚ

Promotor pomocniczy:

Dr inż. Przemysław Snopiński

Promotor z przemysłu:

mgr inż. Sławomir Kopiec

Gliwice, 2025

Spis treści

1. Wstęp	4
2. Przegląd literatury	6
2.1. Warunki techniczne dotyczące drzwi wejściowych	6
2.2. Charakterystyka materiałów stosowanych na ościeżnice	9
2.3. Technologia produkcji ościeżnic stalowych	26
2.4. Technologiczność produktu	28
3. Badania własne	31
3.1. Cel i teza pracy	31
3.2. Materiał do badań	33
3.2.1. Projekty przekrojów ościeżnicy	34
3.2.2. Opracowanie próbek połączenia przekładki termicznej ościeżnicy wykorzystanych do badań wytrzymałościowych	42
3.2.3. Wykonane prototypy ościeżnicy	43
3.2.4. Przygotowanie próbek ościeżnicy do badań wytrzymałości na rozciąganie	48
3.3. Metodyka badań	49
3.3.1. Badania przenikalności termicznej drzwi	49
3.3.2. Wpływ zastosowania przekładki na wytrzymałość na rozciąganie przekroju poprzecznego profilu ościeżnicy	54
3.3.3. Badanie rozszerzalności termicznej zaprojektowanego profilu	55
3.3.4. Badania wodoszczelności, obciążenia na wiatr	56
3.3.5. Odporność na wielokrotne otwieranie i zamykanie drzwi	58
3.3.6. Przydatność materiału przekładki termicznej	61
3.3.7. Wytrzymałość na ścinanie	62
4. Wyniki badań i ich omówienie	64
4.1. Badania przenikalności termicznej drzwi	64
4.2. Wpływ zastosowania przekładki na wytrzymałość na rozrywanie przekroju poprzecznego profilu ościeżnicy	75
4.3. Badanie rozszerzalności termicznej zaprojektowanego profilu	81
4.4. Badanie wytrzymałości drzwi na wielokrotne otwieranie i zamykanie skrzydła	84
4.5. Badanie wytrzymałości przekroju poprzecznego ościeżnicy	86

4.6.	Badanie wytrzymałości na rozciąganie po zanurzeniu w wodzie	88
4.7.	Badanie wytrzymałość na ścinanie przekładki termicznej	90
4.8.	Opracowanie technologii procesu produkcyjnego ościeżnicy.....	92
4.9.	Porównanie prototypu ościeżnicy z aktualnie produkowanym produktem.....	94
5.	Podsumowanie	97
6.	Wnioski	102
7.	Bibliografia	104

1. Wstęp

Jednym z głównych wyzwań, z którym obecnie mierzy się sektor budowlany to ograniczenie emisyjności budynków. Energetyczna efektywność i ekologiczne podejście staje się nieodzownym aspektem współczesnego projektowania. Wynika to zarówno z rosnącej świadomości ekologicznej społeczeństwa dotyczącej wpływu urbanizacji na środowisko naturalne i jej skutków w długofalowym procesie zmian, jak również obowiązujących regulacji prawnych [1].

Jak wynika z raportu WWF ((World Wide Fund for Nature), budynki w Polsce odpowiadają za około 38% emisji CO₂ do atmosfery. Konieczna jest zatem transformacja sektora budowlanego, bez której niemożliwe będą zmiany w miastach i osiągnięcie celów klimatycznych w Polsce i Europie. Rządowa strategia zakłada długoterminową politykę renowacji budynków, w tym wymianę okien i drzwi (odpowiedzialnych za 10-15% strat ciepła) oraz docieplenie ścian i stropów w ponad 4,5 mln domów. W związku z powyższym, szczególnie istotne są parametry izolacyjności termicznej drzwi, wpływające na oszczędności energii cieplnej i elektrycznej gospodarstw domowych [2-4].

Rozporządzenie dotyczące przenikalności termicznej drzwi, wprowadzone przez polskie Ministerstwo Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej 5 lipca 2013 roku, zostało wydane w następstwie unijnej dyrektywy dotyczącej efektywności energetycznej. Zgodnie z rozporządzeniem od dnia 1.01.2021 roku współczynnik przenikania ciepła w przegrodach zewnętrznych lub w przegrodach pomiędzy pomieszczeniami ogrzewanymi i nieogrzewanymi nie może być większy niż 1,3 W/(m²·K). Proces wdrażania dyrektywy unijnej rozpoczął się w 2012 roku kiedy to kraje Unii Europejskiej stopniowo zaczęły zaostrezzać wymagania dotyczące efektywności energetycznej. Od 2014 roku Polska rozpoczęła proces nowelizacji obowiązujących regulacji. Wówczas maksymalną wartość współczynnika przenikania ciepła ustalono na poziomie 1,7 W/(m²·K). Zaostrzenie norm nastąpiło w 2017 roku, kiedy to maksymalną wartość współczynnika przenikania ustalono na 1,5 W/(m²·K), by w kolejnych latach, docelowo od 2021 wprowadzić wspomniane powyżej kryteria. Rozporządzenie dotyczące przenikalności termicznej drzwi obowiązuje od pierwszego dnia 2021 i w szczególności dotyczy inwestorów uzyskujących pozwolenie na budowę. Oznacza to, że każdy nowo wybudowany budynek od 2021 roku, który uzyskał pozwolenie musiał spełniać wymagania powyższego rozporządzenia [5].

Wyznaczone parametry przenikalności cieplnej w większości eliminują z rynku budowlanego konstrukcje stalowe ościeżnic pozbawione przekładki termicznej, ponieważ nie

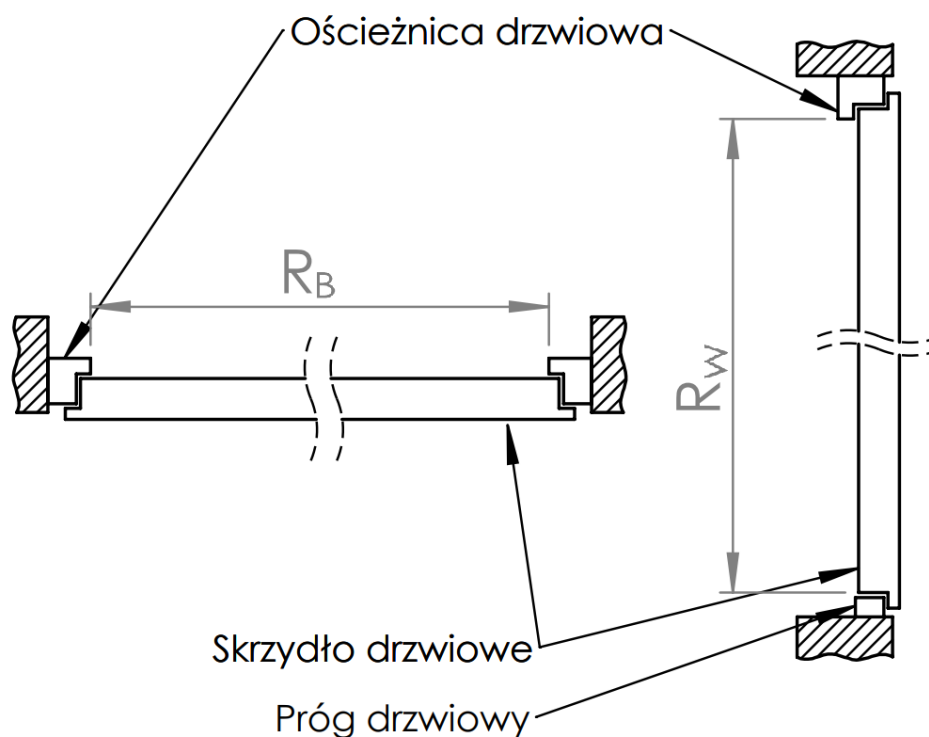
spełniają one wymagań dotyczących współczynnika przenikania ciepła na poziomie $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Jest zatem zasadne opracowanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych, w celu zapewnienia wymaganej efektywności energetycznej ościeżnic. Generuje to olbrzymi koszt dla branży producentów drzwi, która musi swoje produkty przekonstruować, w taki sposób by spełniały nowe wymagania rynkowe. Jednym ze sposobów radzenia sobie z nową rzeczywistością energetyczną jest wykorzystanie w konstrukcji ościeżnicy materiałów o niskim współczynniku przenikalności termicznej (m. in. pianki poliuretanowe, polistyren ekstrudowany lub ekspandowany). Są to materiały powszechnie stosowane w izolacji budynków. Pianki poliuretanowe coraz częściej zastępują polistyren w izolacjach przegród pomiędzy pomieszczeniami ogrzewanymi i nieogrzewanymi, ze względu na swoje parametry techniczne oraz możliwość aplikacji natryskowej, co z kolei przekłada się na lepsze właściwości termiczne izolowanych przegród. Wszechstronność zastosowania poliuretanów wynika z możliwości dość swobodnej regulacji ich struktury polimerowej oraz wzbogacania ich różnorodnymi modyfikatorami oraz dodatkami, co jest możliwe dzięki obecności licznych wiązań uretanowych i wodorowych. Te wiązania stabilizują strukturę polimeru, a także pozwalają na regulację właściwości materiału, takich jak gęstość, wytrzymałość i izolacyjność, do dedykowanych potrzeb aplikacyjnych [6].

Mając na uwadze powyższe, gdzie kluczowe jest opracowanie konstrukcji ościeżnicy z zastosowaniem materiałów o niskim współczynniku przenikania ciepła oraz materiałów o wysokiej wytrzymałości, takich jak stal czy aluminium, w pierwszym etapie pracy podjęto się opracowania modelu numerycznego ościeżnicy. Wykorzystano w tym celu narzędzia CAD, takie jak SolidWorks oraz analizę MES (Physibel) w celu oceny przenikalności cieplnej zaprojektowanej numerycznej konstrukcji. W ramach prac laboratoryjnych przeprowadzono również badania właściwości mechanicznych i użytkowych fizycznych modeli ościeżnicy oraz analizę wpływu zastosowania różnych materiałów, tj. stali, aluminium i poliuretanu o różnej gęstości, na jej parametry. Celem wdrożenia było opracowanie procesu produkcyjnego, który umożliwiłby wytworzenie pełnowartościowego produktu ościeżnicy, wyróżniającego się innowacyjnymi rozwiązaniami zarówno pod względem technologicznym, jak i marketingowym.

2. Przegląd literatury

2.1. Warunki techniczne dotyczące drzwi wejściowych

Drzwi powinny spełniać dwa podstawowe warunki, tj. wymiarów szerokości (oznaczenia R_B na Rys. 1) i wysokości (oznaczenia R_W na Rys. 1) w świetle przejścia. Drzwi wejściowe do budynku powinny być usytuowane w miejscu, w którym będą umożliwiać dogodne warunki ruchu dla każdego, również dla osób o odmiennych wymiarach, w tym z różnymi rodzajami i stopniami niepełnosprawności, np. poruszających się na wózkach inwalidzkich, o kulach, czy też poruszających się z wózkami dziecięcymi, zakupowymi i innymi. Drzwi jednoskrzydłowe powinny mieć światło przejścia co najmniej 0,9 m szerokości i 2 m wysokości, a wysokość progu nie może przekraczać 0,02 m [7-9].



Rys. 1. Schemat wymiarowania od lewej: szerokości i wysokości drzwi [materiały własne]

Dodatkowo, w przypadku montażu drzwi dwuskrzydłowych, szerokość skrzydła głównego nie może być mniejsza niż 0,9 m. Parametry techniczne drzwi obejmują m.in.: przenikalność termiczną, odporność na obciążenie wiatrem, wodoszczelność, odporność mechaniczną na wielokrotne otwieranie i zamykanie, odporność na uderzenia, przepuszczalność powietrza, siły operacyjne, reakcję na ogień, właściwości akustyczne, wentylację oraz kuloodporność. W przypadku drzwi zewnętrznych, wejściowych, kluczowe znaczenie mają: przenikalność termiczna, odporność na obciążenie wiatrem, wodoszczelność, trwałość mechaniczna oraz przepuszczalność powietrza. [7,9].

Przenikalność cieplna

Najważniejszym parametrem, którym powinny charakteryzować się drzwi zewnętrzne wejściowe, jest niski współczynnik przenikalności termicznej. Im niższa wartość tego współczynnika, tym lepszą izolację cieplną i energooszczędność zapewniają drzwi. Aby określić termoizolacyjność drzwi, należy wyznaczyć współczynnik przenikania ciepła U_d , który zgodnie z rozporządzeniem nie może być większy niż $1,3 [W/(m^2 \cdot K)]$ pomiędzy pomieszczeniem ogrzewanym i nieogrzewanym. Wartość współczynnika przenikania ciepła może zostać wyznaczona empirycznie lub za pomocą badań laboratoryjnych, np. z wykorzystaniem metody skrzynki grzejnej [5,10,11].

Odporności na obciążenie wiatrem

Badanie odporności na obciążenie wiatrem wykonywane jest dla drzwi otwieranych na zewnątrz i do środka. Odporność na obciążenie wiatrem mierzone jest na podstawie strzałki ugięcia ramy (słupek ościeżnicy ryglowy i zamkowy). Badanie to definiuje do jakiej wartości może zostać obciążona konstrukcja zanim ulegnie nadmiernej deformacji, która doprowadzi do niekontrolowanej przepuszczalności powietrza czy przecieków wody opadowej. W normie wyróżniono trzy klasy, które określają stopień ugięcia ramy:

- A- Ugięcie drzwi nie może być większe niż $1/150$ swojej długości;
- B- Ugięcie drzwi nie może być większe niż $1/200$ swojej długości;
- C- Ugięcie drzwi nie może być większe niż $1/300$ swojej długości.

Klasy odporności na obciążenia wiatrem są przedstawione za pomocą cyfr, które oznaczają maksymalny poziom ciśnienia, jakiemu drzwi mogą być poddane bez utraty swojej funkcjonalności. W tabeli 1 przedstawiono prędkości wiatru odpowiadające ciśnieniu badawczemu [12,13].

Tabela 1. Klasyfikacja odporności drzwi na wiatr [12]

Klasa obciążenia wiatrem	Ciśnienie badawcze [Pa]	Prędkość wiatru [km/h]	Klasyfikacja ugięcia		
			A	B	C
1	400	90	A1	B1	C1
2	800	130	A2	B2	C2
3	1200	158	A3	B3	C3
4	1600	184	A4	B4	C4
5	2000	205	A5	B5	C5

Wodoszczelność

Wodoszczelność to jedna z kluczowych cech użytkowych, na które zwracają uwagę klienci wybierający drzwi zewnętrzne dla domów. Aby precyzyjnie określić stopień wodoszczelności drzwi, przeprowadza się badanie zgodnie z normą [14]. Norma ta klasyfikuje odporność na przenikanie wody opadowej. Badanie prowadzone jest w specjalnej komorze, gdzie symuluje się warunki intensywnego deszczu (120 l/h na 1 m²) oraz wytwarza nadciśnienie (Tabela 2). Aby drzwi uzyskały podstawową klasę wodoszczelności 1 muszą pozostać szczelne przez 10 minut. Każda kolejna klasa oznacza, że drzwi muszą zachować swoją szczelność odpowiednio o kolejne 5 minut względem poprzedniej klasy. Norma [14] definiuje dwie metody badania wodoszczelności: A oraz B. Metoda A stosowana jest dla drzwi nieosłoniętych, natomiast metoda B stosowana jest dla drzwi osłoniętych. W metodzie A symuluje się sytuację, w której okno lub drzwi narażone są na bezpośrednie działanie deszczu i wiatru bez żadnych dodatkowych elementów ochronnych, takich jak daszek czy wiatrołap. W trakcie badania, na badany wyrób kierowany jest z góry strumień wody o intensywności 2l/m², a jednocześnie stopniowo zwiększane jest ciśnienie (Tabela 2), symulując wzmagający się wiatr. W ten sposób określa się maksymalne ciśnienie, przy którym drzwi pozostają szczelne. Z kolei w metodzie B zakłada się, że wyrób jest częściowo osłonięty przed opadami, np. przez dodatkowe elementy, takie jak daszek, okap czy wiatrołap. Badanie przebiega podobnie jak w metodzie A, z tą różnicą, że uwzględnia się wpływ osłony na ilość wody docierającej do drzwi i kąt jej padania. Pozwala to na dokładniejsze odwzorowanie rzeczywistych warunków eksploatacji drzwi z zadaszeniem [14,15].

Tabela 2. Wymagania dotyczące wodoszczelności [14]

Ciśnienie próbne [Pa]	Orientacyjna prędkość wiatru w km/h	Klasyfikacja dla drzwi nieosłoniętych	Klasyfikacja dla drzwi osłoniętych
0	0	1A	1B
50	33	2A	2B
100	47	3A	3B
150	60	4A	4B
200	65	5A	5B
250	72	6A	6B
300	80	7A	7B
400	90	8A	8B
600	116	9A	9B

Odporność na wielokrotne otwieranie i zamykanie drzwi

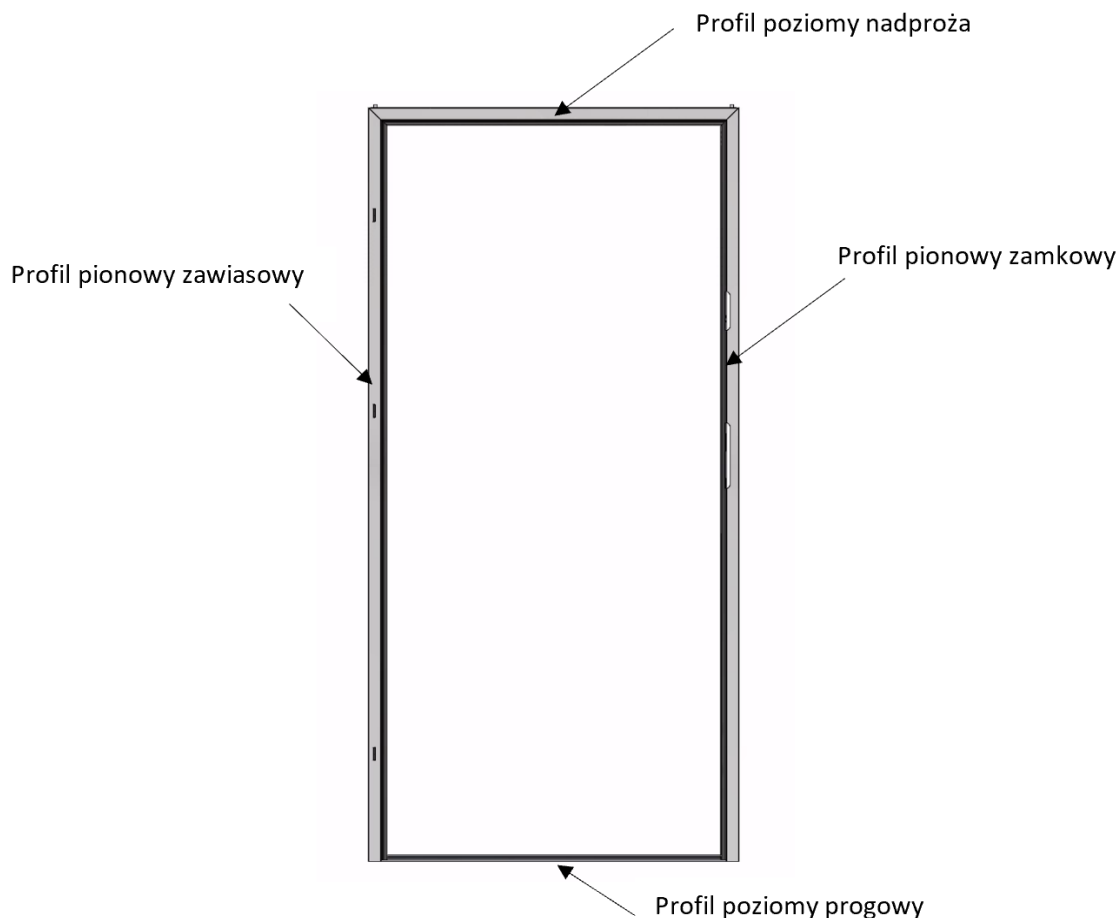
Kluczowym parametrem, decydującym o trwałości i niezawodności drzwi, jest ich odporność na wielokrotne otwieranie i zamykanie, mierzona liczbą cykli, które wytrzymują bez uszkodzeń. W budynkach o dużym natężeniu ruchu, takich jak bloki mieszkalne, biurowce czy centra handlowe, drzwi wejściowe są szczególnie narażone na intensywną eksploatację. Ich wytrzymałość mechaniczną klasyfikuje się zgodnie z normą. Klasyfikacja ta zależy od przewidywanych warunków użytkowania i przeznaczenia stolarki. W przypadku drzwi zewnętrznych wejściowych w budynkach o dużym natężeniu ruchu, zaleca się, aby spełniały one wymagania wytrzymałościowe co najmniej klasy 2[16].

Tabela 3. Ogólne wytyczne klas trwałości mechanicznej w odniesieniu do przewidywanych kategorii warunków użytkowania [16]

Warunki użytkowania	Okazjonalne	Lekkie	Nieczęste	Umiarkowane	Normalne	Częste
Klasa	C0	C1	C2	C3	C4	C5
Liczba cykli	1-449	>500	≥10 000	≥50 000	≥100 000	≥200 000

2.2.Charakterystyka materiałów stosowanych na ościeżnice

Ościeżnica jest nieodzownym elementem składowym drzwi i stanowi nieruchomą ramę, na której za pomocą zawiasów montowane jest skrzydło drzwiowe. Ościeżnice mają za zadanie utrzymywać drzwi we właściwej pozycji, dzięki czemu możliwe jest swobodne ich otwieranie i zamykanie. Ościeżnice mają również za zadanie utrzymywanie szczelności oraz izolacyjności. Są również elementem dekoracyjnym, dopełniającym estetykę drzwi. Ościeżnica składa się z dwóch elementów pionowych (Rys. 2), poziomego profilu nadproża oraz profilu progowego. Drzwi są istotnym elementem każdego budynku ze względu na bezpieczeństwo, funkcjonalność, energooszczędność oraz estetykę. Dlatego kluczowe jest, aby były wykonane z materiałów odpowiadających potrzebom użytkownika. Na rynku dostępna jest szeroka gama materiałów stosowanych w produkcji drzwi. W niniejszym przeglądzie omówione zostaną materiały najczęściej stosowane do produkcji drzwi i ościeżnic, takie jak poliuretan, stal i stopy aluminium [9,17,18].



Rys. 2. Schemat budowy ościeżnicy [materiały własne]

Poliuretany

Pianki poliuretanowe znalazły zastosowanie przede wszystkim w budownictwie, do wytwarzania izolacji ścian, sufitów oraz jako wypełnienia skrzydeł drzwiowych. Ze względu na niski współczynnik przewodzenia ciepła materiały poliuretanowe charakteryzują się korzystnymi właściwościami termoizolacyjnymi w porównaniu do właściwości innych materiałów stosowanych w sektorze budowlanym (PVC - polichlorek winylu, EPS - polistyren ekspandowany, XPS - polistyren ekstrudowany) (Tabela 4) [19].

Tabela 4. Współczynniki przenikalności termicznej [20]

Material	Współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)]
Poliuretan	0,022-0,028
Polistyren ekspandowany	0,031-0,045
Polistyren ekstrudowany	0,032-0,038
Włna mineralna	0,033-0,045

Wadami poliuretanów są ich niska izolacyjność akustyczna oraz słaba odporność na promieniowanie UV. Poliuretan jest polimerem składającym się z dwóch surowców- polioliu i izocyjanianu, pozyskiwanych z ropy naftowej. Poliuretany otrzymuje się w skutek reakcji chemicznej poliaddycji diizocyjanów aromatycznych lub alifatycznych ze związkami zawierającymi co najmniej 2 grupy hydroksylowe. Grupa izocyjanianowa, ze względu na obecność dwóch skumulowanych wiązań podwójnych $-N=C=O$, wykazuje wysoką reaktywność. Jej różne formy mezomeryczne sprawiają, że może podlegać zróżnicowanym konfiguracjom elektronowym. Reakcje towarzyszące powstawaniu izocyjanianów mają charakter egzotermiczny i nie tylko w interakcjach ze związkami posiadającymi aktywny wodór, ale także w reakcjach między sobą, w odpowiednich warunkach. Istotnym składnikiem w procesie produkcji pianek poliuretanowych jest woda, która odgrywa kluczową rolę w procesie ich powstawania reagując z izocyjanianami, generuje gazowy dwutlenek węgla (CO_2), który działa w charakterze poroforu, powodując powstawanie pęcherzyków gazu. To właśnie te pęcherzyki odpowiadają za tworzenie struktury pianki, nadając jej charakterystyczną porowatość i lekkość. Również w reakcjach izocyjanianów z kwasami organicznymi zawierającymi grupy karboksylowe ($-COOH$) może dochodzić do wydzielania się CO_2 . W wyniku tych reakcji powstają różne związki chemiczne, takie jak izocyjanurany, które modyfikując strukturę poliuretanów, wpływają na ich sztywność oraz przenikalność termiczną. Struktury izocyjanuranowe skutecznie zmniejszają palność sztywnych pianek, szczególnie tych używanych w budownictwie. Proces reakcji izocyjanianów z nadmiarem kwasów organicznych może również prowadzić do dodatkowych reakcji chemicznych z mieszaninami zawierającymi nadmiar nieprzerobionego lub nadmiarowego izocyjanianu, co z kolei może wpływać na końcowe właściwości materiałów poliuretanowych, takie jak wytrzymałość, elastyczność oraz stabilność termiczna i chemiczna [19,21-23].

Poliole

Wg danych z 1990 roku, produkcja poliuretanów opierała się głównie na wykorzystaniu 2800 tys. ton polioli, z czego udział polieterów wynosił 90%, a poliestrów 10% [23]. Aktualnie stosunek ten określa się odpowiednio 85 do 15% [24]. Poliiole to substancje posiadające długie, elastyczne łańcuchy o masie cząsteczkowej od 1000 do 6000 Da (Dalton), zakończone co najmniej dwiema grupami hydroksylowymi. W procesie syntezy poliuretanów wykorzystuje się polieterole, poliestrole oraz poliestrole z napełniaczami organicznymi. Składniki te nadają poliuretanom elastyczność, miękkość, odporność na niskie temperatury i są zazwyczaj najtańszymi komponentami w produkcji poliuretanów. Polieterole są najczęściej używanym

"kręgosłupem" w strukturze poliuretanów. Istnieje wiele dostępnych polieteroli, które są uzyskiwane z alkoholi wielofunkcyjnych, takich jak tlenek etylenu i propylenu. Trwają również badania nad syntezą nowych polioli, które mogą istotnie wpływać na parametry otrzymywanych poliuretanów [25]. Do znanych surowców polioliowych zalicza się glikol poli(oksytetrametylenowy) (PTMG), będący produktem kationowej polimeryzacji tetrahydrofuranu (THF) oraz e-kaprolaktonodiolidole oligowęglanowe. Poliestrole choć rzadziej używane od polieteroli, ze względu na ich większą lepkość i kosztowną produkcję, charakteryzują się większą odpornością na fotooksydację, w porównaniu do poliuretanów opartych na polieterolach, co znacząco wpływa na poprawę ich wytrzymałości oraz otrzymanych z nich poliuretanów. Aby zwiększyć twardość i wytrzymałość cieplną poliuretanu, można wprowadzić do jego struktury substancje sieciujące oraz przedłużacze łańcuchów zawierające grupy NH_2 i segmenty mocznikowe. Gęstość sieciowania poliuretanu można kontrolować poprzez zastosowanie odpowiednich środków spieniających. Sieciowanie polimeru uretanowego może być przeprowadzone na różne sposoby, między innymi poprzez:

- dodanie trójfunkcyjnych alkoholi lub izocyjanianów;
- zastosowanie siarki lub nadtlenków organicznych;
- trimeryzację grup izocyjanianowych, które stanowią zakończenie łańcuchów polimeru uretanowego.

Kataliza w procesach tworzenia poliuretanów odgrywa kluczową rolę, wpływając na przebieg i szybkość reakcji chemicznych, które determinują właściwości końcowego produktu. Katalizatory stosuje się, aby przyspieszyć reakcje między izocyjanianami i poliolami oraz inne reakcje sieciowania, co pozwala na efektywne formowanie polimeru uretanowego. Ich zastosowanie nie tylko zwiększa wydajność procesu, ale także umożliwia kontrolę nad poszczególnymi etapami reakcji, co jest istotne dla uzyskania pożądanej struktury i właściwości finalnego produktu. Katalizatory wpływają na szybkość wzrostu łańcucha, proces spieniania oraz utwardzania polimeru. Często stosuje się mieszanki różnych katalizatorów, aby osiągnąć pożądane efekty. Katalizatory można podzielić na dwie główne grupy: aminy trzeciorzędowe oraz związki metaloorganiczne, głównie cynoorganiczne. Aminy trzeciorzędowe wykazują silniejsze właściwości katalityczne w reakcjach grup izocyjanianowych z wodą w porównaniu z reakcjami z grupami hydroksylowymi. Z kolei katalizatory cynoorganiczne wykazują odwrotny wpływ, silniej katalizują reakcje izocyjanianów z grupami hydroksylowymi niż z wodą. Do produkcji poliuretanów, oprócz wymienionych składników, niezbędne są również środki pomocnicze, takie jak katalizatory, uniepalniacze, porofory, stabilizatory, substancje

antystatyczne, napelniacze, biocydy oraz środki rozdzielające. Dodatki te wpływają m.in. na szybkość reakcji, właściwości ogniowe, strukturę materiału, stabilność chemiczną, przewodnictwo elektrostatyczne, właściwości mechaniczne oraz ułatwiają proces formowania i wyjmowania produktów z form [25-27].

Techniki przetwórstwa poliuretanów

Zależnie od własności końcowych poliuretanu jak i technologii jego produkcji, możemy wyróżnić następujące metody przetwarzania poliuretanów:

- a) odlewanie ręczne;
- b) technika RIM (ang. Reaction Injection Molding);
- c) technika RRIM (ang. Reinforced Reaction Injection Molding);
- d) technika SRIM (ang. Structural RIM);
- e) technika RI-RIM;
- f) formowanie polimeryzacyjne;
- g) formowanie wtryskowe.

Odlewanie ręczne to metoda, w której poszczególne składniki poliuretanu miesza się ręcznie lub maszynowo, a następnie poliuretan w stanie ciekłym wlewa się do otwartej formy odlewniczej. Metodę tę stosuje się przy wykonywaniu prototypów lub w przypadku niewielkich partii produkcyjnych. Jej zaletą jest możliwość szybkiej wymiany oraz zmiany proporcji składników poliuretanu. Technika RIM (Reaction Injection Molding) polega na ciągłym przygotowywaniu mieszaniny poliuretanu w komorze mieszającej, z której następnie mieszanina ta jest wtryskiwana pod ciśnieniem 3–25 MPa do zamkniętych gniazd form przetwórczych. Odmianą tego procesu jest technika RRIM (Reinforced Reaction Injection Molding), w której do głowicy mieszającej wprowadza się dodatkowo napelniacz krótkowłóknisty lub proszkowy w ilości nieprzekraczającej zazwyczaj 40% objętościowo. Pozwala to na uzyskanie kompozytu na osnowie poliuretanowej o podwyższonych właściwościach wytrzymałościowych. Kolejną wersją jest technika SRIM (Structural Reaction Injection Molding), w której jako napelniacz wykorzystuje się preformę o kształcie i wymiarach zbliżonych do kształtu finalnego wyrobu. Technologia ta umożliwia wytwarzanie elementów o dużych gabarytach, nawet do 1,5 metra. Z kolei technika RI-RIM, znana od 1988 roku, polega na ciągłym przygotowywaniu mieszaniny w specjalnej mieszarce wyposażonej w mieszadło obrotowe oraz cyklicznym wypełnianiu gniazda formy, w którym materiał uzyskuje pożądany kształt [20,22,23].

Formowanie polimeryzacyjne, znane również wtryskiwaniem reaktywnym, to metoda przetwórstwa, w której jednocześnie zachodzą dwa procesy: polimeryzacja oraz formowanie gotowych do użytkowania wyrobów, o strukturze litej lub porowatej. Proces ten polega na przygotowaniu reaktywnej mieszaniny polimerowej, którą następnie miesza się w komorze i wypełnia zamknięte gniazdo formy przetwórczej pod ciśnieniem wynoszącym od 0,3 do 2,5 MPa w przypadku procesu niskociśnieniowego lub od 10 do 20 MPa w procesie wysokociśnieniowym. Po wypełnieniu formy mieszanina ulega polimeryzacji, tworząc gotowy produkt. Technika ta jest stosowana głównie do produkcji tworzyw uretanowych, a także przy wytwarzaniu poliamidów i poli (metakrylanu metylu). Proces formowania polimeryzacyjnego poliuretanów (PUR) obejmuje kilka etapów, takich jak mieszanie wstępne, przechowywanie, dozowanie, mieszanie właściwe oraz wypełnianie gniazda formy przetwórczej. Szacuje się, że około 90% produktów z poliuretanu stanowią pianki. W procesie spieniania można wyróżnić kilka charakterystycznych etapów, takich jak: okres utajony (mieszanie komponentów), okres wzrostu (rozprężanie materiału), okres stabilizacji (sieciowanie materiału) oraz okres dojrzewania pianki (stabilizacja materiału). Formowanie wtryskowe to proces, w którym izocyjanian i polioli są mieszane pod wysokim ciśnieniem w głowicy mieszającej, a następnie wtryskiwane pod wysokim ciśnieniem do formy we wtryskarce. Ta technika umożliwia precyzyjne odtworzenie złożonych kształtów z bardzo dużą dokładnością oraz zapewnia powtarzalność uzyskiwanych form, co jest niezwykle istotne w produkcji komponentów o skomplikowanej geometrii [27,28].

Stal

Stopy żelaza z węglem, takie jak stale, staliwa i żeliwa, należą do najpopularniejszych materiałów konstrukcyjnych. Stal jest stopem żelaza z węglem (o stężeniu do ok. 2%) i innymi pierwiastkami, otrzymywanym w procesach metalurgicznych ze stanu ciekłego. Staliwo to odlewniczy stop żelaza z węglem i innymi pierwiastkami, poddawany obróbce cieplnej o zawartości węgla do 2% jednak zazwyczaj zawierają od 0,2% do 0,6% węgla. W porównaniu do żeliwa, które ma ponad 2% węgla, wyróżniają się lepszą plastycznością i udarnością, dzięki czemu są często wykorzystywane w elementach wymagających wysokiej wytrzymałości mechanicznej. Żeliwo to stop żelaza z węglem, zawierający praktycznie 2,5-4,5% węgla i innymi pierwiastkami [29].

Wytworzenie stali węglowej jest jednym z przełomowych wydarzeń w rozwoju cywilizacji. Historia odkrycia żelaza sięga 3000 roku p.n.e. Z upływem czasu nauczono się wytapiać żelazo z rud, co zapoczątkowało epokę żelaza około 1200 roku p.n.e. Wówczas stal powstawała

w sposób niezamierzony podczas obróbki żelaza, gdy węgiel z węgla drzewnego dyfundował do metalu. W VI wieku p.n.e. w starożytnych Indiach rzemieślnicy opracowali metodę wytwarzania stali Wootz, wykorzystując tygle do stapiania kutego żelaza z węglem drzewnym. Stal ta wyróżniała się wysoką twardością i unikalną mikrostrukturą, co sprawiło, że znalazła szerokie zastosowanie na Bliskim Wschodzie, gdzie w XI wieku n.e. zaczęto produkować stal damasceńską. Wykorzystywano ją głównie do wyrobu mieczy, które słynęły z niezwyklej ostrości i odporności na uszkodzenia. W międzyczasie, w III wieku n.e., w Chinach rozpoczęto masową produkcję stali wysokiej jakości. Chińczycy opracowali metody przypominające późniejszy proces Bessemera, który w Europie pojawił się dopiero w XIX wieku. W średniowieczu rozwój hutnictwa doprowadził do udoskonalenia technologii wytwarzania stali. W Europie zastosowanie znalazły dymarki i kuźnie wodne, natomiast w Japonii opracowano technologię produkcji stali Tamahagane, wykorzystywanej do wytwarzania wysokiej jakości ostrzy, takich jak miecze samurajskie. Przełom w produkcji stali nastąpił w okresie rewolucji przemysłowej w XVIII i XIX wieku, gdy w 1784 roku Henry Cort opracował metodę pudlarską, umożliwiającą wytwarzanie żelaza o wyższej jakości. W XVIII wieku nastąpił przełom w produkcji żelaza dzięki zastąpieniu węgla drzewnego koksem w procesie wielkopiecowym. Umożliwiło to wytapianie znacznie większych ilości surówki oraz uzyskanie wyższych temperatur, co przygotowało grunt pod późniejsze rozwinięcie technologii wytwarzania stali. Proces wielkopiecowy (ang. *blast furnace*) stał się wówczas podstawowym narzędziem do otrzymywania surówki, czyli żelaza nasyconego węglem, które następnie poddawano dalszej obróbce w kierunku uzyskania stali. Rewolucja w produkcji stali nastąpiła w XIX wieku za sprawą Henry’ego Bessemera, twórcy pierwszej przemysłowej metody otrzymywania stali. Proces Bessemera polegał na przedmuchiwanie żelaza strumieniem powietrza w specjalnym konwerterze (tzw. „gruzce Bessemera”) w celu redukcji zawartości węgla i innych zanieczyszczeń. Kolejnym przełomem w procesie metalurgii było opracowanie pieca martenowskiego przez Pierre-Émile’a Martina pod koniec XIX wieku. Metoda ta polegała na spalaniu gazu węglowego nad ładunkiem surówki, co eliminowało straty energii typowe dla przedmuchiwania chłodnym powietrzem w procesie Bessemera. Na początku XX wieku wprowadzono piece elektryczne, w których łuk elektryczny służy do stopienia wsadu. To rozwiązanie pozwoliło na precyzyjną kontrolę procesu produkcji, a co za tym idzie – wytwarzanie specjalistycznych stali. W tym okresie rozpoczęto także prace nad stalą nierdzewną (pierwsze patenty około 1912–1913 r.), która dzięki domieszkom chromu i niklu zyskała wysoką odporność korozyjną i szybko znalazła zastosowanie w przemyśle

chemicznym, spożywczym i wielu innych dziedzinach. W połowie XX wieku opracowano konwertor tlenowy (BOF – *Basic Oxygen Furnace*), znany też jako urządzenie LD (Linz-Donawitz). Stał się on jedną z najpowszechniejszych metod produkcji stali dzięki znacznie krótszemu czasowi wytopu niż w piecu martenowskim oraz lepszej kontroli nad składem chemicznym. Duży wpływ na efektywność wytwarzania stali miało także odlewanie ciągłe (*continuous casting*), które umożliwiło skrócenie procesu, zmniejszenie strat materiału i poprawę jakości wyrobów. Współczesna produkcja stali opiera się na zaawansowanych technologiach, wykorzystujących piece elektryczne lub złożone procesy wielkopiecowe z wieloma etapami rafinacji. Pozwala to zarówno na masowe wytwarzanie stali konstrukcyjnych, jak i na precyzyjne otrzymywanie stali o specjalistycznych właściwościach, dostosowanych do potrzeb różnych branż. W związku z tym klasyfikacje stali można podzielić między innymi na podstawie następujących kryteriów[29-34]:

- Według składu chemicznego – wyróżniamy stal niestopową (węglową) oraz stopową;
- Według zastosowania – obejmuje stal konstrukcyjną, narzędziową oraz specjalistyczną o unikalnych właściwościach;
- Według jakości (zawartości siarki i fosforu) – dzieli się na stal jakościową i specjalną;
- Według sposobu wytwarzania – wyróżniamy stal produkowaną metodą martenowską, elektryczną, konwertorową i innymi technologiami;
- Według sposobu odtleniania – obejmuje stal uspokojoną, półuspokojoną i nieuspokojoną;
- Według rodzaju produktu – w tej kategorii znajdują się blachy, pręty, druty, rury, odkuwki itp.;
- Według formy (postaci) – stal może występować jako lana, kuta, walcowana na gorąco, walcowana na zimno lub ciągniona;
- Według stanu kwalifikacyjnego – wyróżnia się stal surową, wyżarzoną normalizująco, ulepszoną cieplnie i inne.

Najczęściej stosowany jest podział ze względu na skład chemiczny [29]:

- Stale niestopowe – głównym pierwiastkiem stopowym jest węgiel, udział pozostałych pierwiastków zawiera maksymalnie 1%;
- Stale nierdzewne – charakteryzują się zawartością chromu na poziomie co najmniej 10,5% oraz maksymalnie 1,2% węgla;
- Inne stale stopowe – obejmują stale, które nie spełniają kryteriów stali nierdzewnych, ale zawierają co najmniej jeden pierwiastek stopowy w ilości większej niż 5%.

W zależności od zawartości węgla, stale niestopowe dzielimy na [35]:

- Stale niskowęglowe- zawartość węgla $<0,3\%$.
- Stale średniowęglowe- $0,3-0,6\%$;
- Stale wysokowęglowe- $0,6-2\%$.

W stalach węglowych głównym składnikiem wpływającym na ich strukturę jest węgiel. Stale o zawartości węgla do $0,1\%$ charakteryzują się strukturą ferrytyczną (roztwór stały graniczny węgla w żelazie Fe_α o maksymalnej rozpuszczalności węgla $0,0218$ w temperaturze $727\text{ }^\circ\text{C}$). Wraz ze wzrostem stężenia węgla w stali pojawia się perlit (roztwór stały graniczny węgla w żelazie Fe_γ o maksymalnej rozpuszczalności węgla $2,11$ w temperaturze $1148\text{ }^\circ\text{C}$), tworząc strukturę ferrytyczno-perlityczną. W stalach średniowęglowych, przy zawartości węgla poniżej $0,4\%$, udział perlitu i ferrytu w strukturze jest zbliżony. W stalach wysokowęglowych, przy stężeniu węgla $0,77\%$, występuje struktura czysto perlityczna. W stalach nadeutektoidalnych o zawartości węgla od $0,8$ do 2% , obok perlitu w strukturze pojawiają się na granicach ziarn również płytki cementytu (zawartość węgla wynosi $6,67\%$) [29].

Właściwości stali węglowych

Stale węglowe to jedne z najpopularniejszych materiałów konstrukcyjnych, szeroko stosowane w różnych gałęziach przemysłu. Ich popularność wynika z połączenia korzystnych właściwości, takich jak dobra wytrzymałość mechaniczna, łatwość obróbki oraz niska cena. Dodatkowo, właściwości stali węglowych można modyfikować poprzez zmianę zawartości węgla oraz zastosowanie odpowiednich procesów obróbki cieplnej. Stale niskowęglowe, ze względu na zawartość węgla do $0,3\%$, charakteryzują się dobrą plastycznością i ciągliwością (wydłużenie A do 35% , które maleje wraz ze wzrostem zawartości węgla) oraz udarnością KC wynoszącą od 27 do 60 J . Ponadto cechuje je dobra spawalność oraz niska skrawalność (ze względu na dużą ciągliwość) [31-32].

Stale niskowęglowe, ze względu na swą plastyczność i podatność na formowanie, doskonale sprawdzają się w produkcji elementów o skomplikowanym kształcie. Znajdują one szerokie zastosowanie w wytwarzaniu [31]:

- poszyc karoserii samochodowych, gdzie istotna jest zdolność do tłoczenia i formowania;
- obudów sprzętu AGD, dla których liczy się estetyka i precyzja wykonania;
- drzwi wejściowych, technicznych, przeciwpożarowych, które muszą być odporne na odkształcenia.

Stale niskowęglowe, ze względu na ich plastyczność, wytrzymałość na rozciąganie, skład chemiczny oraz zastosowanie, można podzielić między innymi na [29,31-36]:

- Grupa DC (Drawing Cold) obejmuje stale niestopowe, niskowęglowe, przeznaczone do kształtowania plastycznego na zimno, dostarczane w stanie zimnowalcowanym. Charakteryzują się one bardzo dobrą plastycznością, umożliwiającą realizację operacji takich jak tłoczenie, gięcie czy profilowanie. Oznaczenie gatunku (od DC01 do DC07) informuje o zdolności stali do tłoczenia – im wyższa cyfra, tym lepsza tłoczność materiału. Gatunek DC01 jest podstawowym gatunkiem ogólnego przeznaczenia, odpowiednim do prostych operacji gięcia i płytkiego tłoczenia. Gatunki DC03 i DC04 wykazują dobrą tłoczność, DC05 i DC06 bardzo dobrą (do głębokiego tłoczenia), a DC07 charakteryzuje się najwyższą zdolnością do bardzo głębokiego i złożonego tłoczenia (super deep drawing quality). Dzięki połączeniu dobrej formowalności z gładką powierzchnią uzyskiwaną w procesie walcowania na zimno (co ułatwia późniejsze lakierowanie), stale te są powszechnie stosowane w przemyśle motoryzacyjnym do produkcji elementów karoserii samochodowych, takich jak poszycia drzwi, błotniki, pokrywy silnika czy dachy [37];
- Grupa DX obejmuje stale niskowęglowe przeznaczone do kształtowania na zimno, jednak kluczową cechą tej grupy jest obecność powłoki metalicznej, najczęściej cynkowej, nanoszonej w celu zapewnienia ochrony przed korozją. Oznaczenie DX jest zazwyczaj uzupełnione symbolem wskazującym na rodzaj i jakość powłoki, np. "+Z" oznacza powłokę cynkową naniesioną ogniowo (zanurzeniowo), a "+ZE" powłokę cynkową naniesioną elektrolitycznie. Podobnie jak w grupie DC, kolejne numery (np. w oznaczeniach DX51D+Z, DX52D+Z, aż do DX57D+Z) wskazują na wzrastającą podatność na tłoczenie i formowanie. Stale te łączą zalety dobrej formowalności z podwyższoną odpornością korozyjną. Znajdują zastosowanie w produkcji elementów o skomplikowanych kształtach, które są narażone na działanie czynników środowiskowych, m.in. w motoryzacji (elementy podwozia, progi, wzmocnienia), budownictwie (kształtowniki zimnogięte, profile ościeżnic, płaszcze skrzydeł drzwiowych, pokrycia dachowe, systemy rynnowe) oraz w produkcji sprzętu AGD (obudowy pralek, lodówek) [38,39];
- Grupa S obejmuje stale konstrukcyjne, niestopowe, których głównym kryterium klasyfikacyjnym jest minimalna granica plastyczności (R_e) oraz wytrzymałość na rozciąganie (R_m). Oznaczenie gatunku zaczyna się od litery "S", po której następuje liczba wskazująca minimalną granicę plastyczności w megapaskalach (MPa) dla najmniejszego zakresu grubości wyrobu (np. S235, S275, S355). Dodatkowe symbole (np. JR, J0, J2, K2)

określają pracę łamania (udarność) w określonych temperaturach, co jest istotne dla bezpieczeństwa konstrukcji pracujących w zmiennych warunkach termicznych. Stale te mogą być dostarczane w różnych stanach obróbki (np. po walcowaniu normalizującym - S355N, czy termomechanicznym - S355M). Ze względu na swoje właściwości wytrzymałościowe i dobrą spawalność, są podstawowym materiałem do budowy wszelkiego rodzaju konstrukcji stalowych, takich jak mosty, wiadukty, hale przemysłowe, budynki, maszty, a także w przemyśle maszynowym i motoryzacyjnym do produkcji ram pojazdów ciężarowych, elementów maszyn roboczych czy niektórych części silników (np. wsporniki, obudowy) [40,41];

- Grupa IF- stale zawierające śladowe ilości węgla (poniżej 0,005%). W celu poprawy ich właściwości stosuje się dodatki Tytanu (Ti) oraz niobu (Nb). Stosowane na elementy wymagające wysokiej plastyczności oraz niskiej wytrzymałości np. elementy dekoracyjne. Stal odgrywa kluczową rolę w stolarce drzwiowej, zapewniając wysoką wytrzymałość, trwałość i odporność na uszkodzenia mechaniczne. Dzięki swoim właściwościom jest szeroko stosowana zarówno w konstrukcjach drzwi zewnętrznych, jak i wewnętrznych, oferując bezpieczeństwo i estetykę. Nowoczesne technologie pozwalają na łączenie stali z innymi materiałami, takimi jak drewno. Na europejskim rynku budowlanym możemy rozróżnić kilka najpopularniejszych typów konstrukcji ościeżnic stalowych [17,18]:

1. Monolityczna;
2. Z przekładką PCV;
3. Stalowo- drewniana.

Ościeżnica stalowa monolityczna

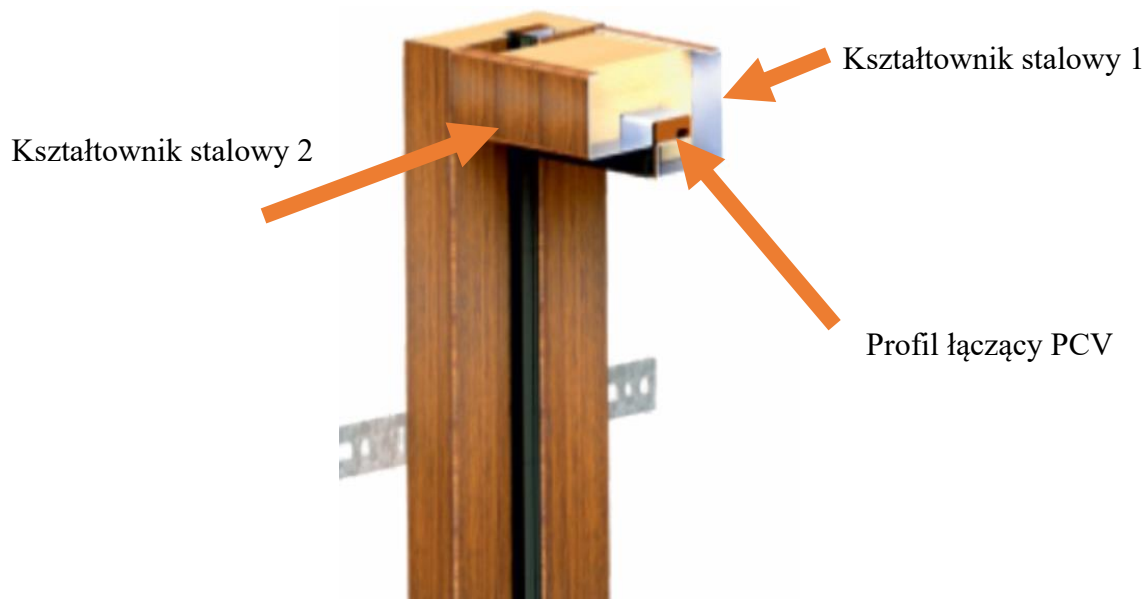
Ościeżnice stalowe (Rys.3.) składają się ocynkowanej zimnowalcowanej blachy krawędziowanej lub profilowanej w kształtowniki, której grubość zawiera się w przedziale 1,2- 2 mm. Narożniki ościeżnic mogą być zagniatane, skręcane lub spawane. Stalowe ościeżnice, mimo prostej konstrukcji i wysokiej wytrzymałości, charakteryzują się wysokim współczynnikiem przenikania ciepła ze względu na wysoką przewodność cieplną stali ($\lambda = 50$). Z tego powodu rzadko stosuje się je na zewnątrz [18].



Rys. 3. Przekrój ościeżnicy stalowej [opracowania własne]

Ościeżnica stalowa z przekładką PVC

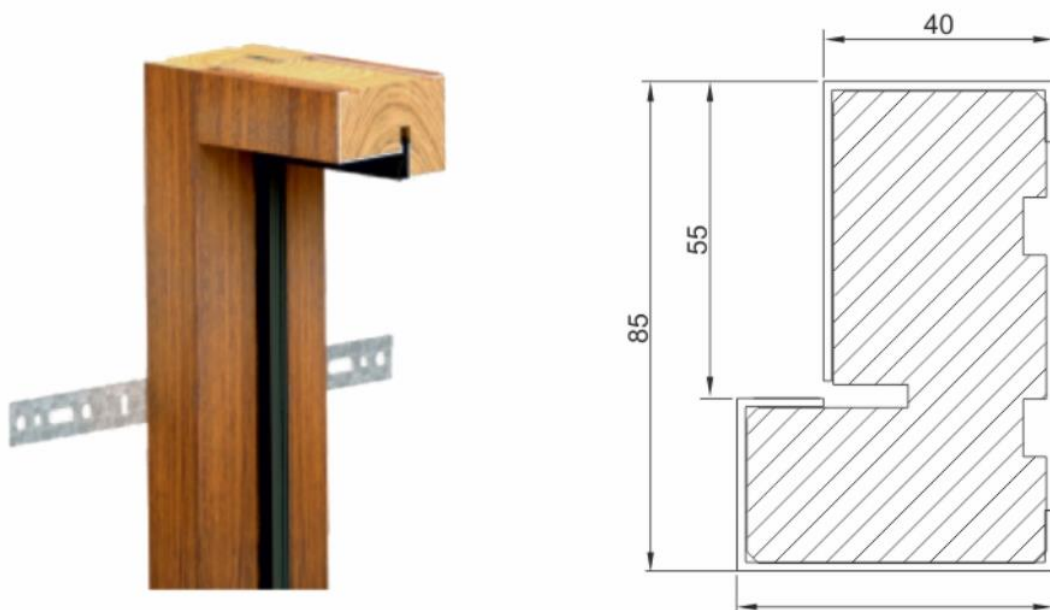
Jest to typ ościeżnicy stalowej, składający się z dwóch kształtowników stalowych, między którymi znajduje się kształtownik PVC stanowiący przekładkę termiczną (Rys.4). Ościeżnica ta charakteryzuje się lepszymi parametrami przewodności cieplnej niż typowa stalowa ościeżnica bez przekładki termicznej, jednak ze względu na zaawansowaną technologię, w tym konieczność tłoczenia dedykowanego profilu PVC oraz złożony proces produkcji, jest bardzo kosztowna. W efekcie nie zawsze jest opłacalna, co powoduje, że klienci rzadziej ją wybierają. Wysokie koszty produkcji wynikają również z ograniczonej elastyczności produktowej, ponieważ dla każdego kształtu przekroju poprzecznego ościeżnicy konieczne jest zastosowanie innej linii technologicznej do jej profilowania [42].



Rys. 4. Przekrój ościeżnicy z przekładką PCV [9]

Ościeżnice stalowo-drewniane

Tego typu rozwiązania konstrukcyjno-materiałowe mają za zadanie poprawić parametry izolacyjności drzwi. Ościeżnica składa się z rdzenia wykonanego z reguły z klejonego drewna sosnowego, oprawionego blachą stalową laminowaną (Rys.5). Rolę przekładki termicznej w tego typu rozwiązaniach pełni drewniany kształownik. Dla takiej konstrukcji ościeżnicy projektuje się indywidualny kształt profilu drewnianego dla każdego modelu ościeżnicy, co w efekcie wiąże się z dużym asortymentem magazynowym. Zastosowanie drewna sosnowego jako rdzenia ościeżnicy znacząco poprawia jej izolacyjność, natomiast okładzina stalowa chroni drewno przed szkodliwymi warunkami atmosferycznymi [42].



Rys. 5. Przekrój ościeżnicy stalowo-drewnianej [9]

Stopy aluminium

Aluminium nie wykazuje odmian alotropowych i krystalizuje w regularnej strukturze A1. Charakteryzuje się stosunkowo niską temperaturą topnienia wynoszącą około 660°C oraz temperaturą wrzenia na poziomie 2494°C. Jego istotną cechą jest wysoka przewodność elektryczna, osiągająca 37,74 MS/m, a także wyjątkowa odporność na korozję, wynikająca z naturalnego tworzenia się na jego powierzchni cienkiej warstwy tlenku aluminium (Al_2O_3), która skutecznie chroni metal przed działaniem czynników zewnętrznych .

Współcześnie, dzięki wprowadzeniu do jego struktury pierwiastków stopowych i zastosowaniu obróbki cieplnej i plastycznej, stopy aluminium są szeroko stosowane w konstrukcjach, w których kluczową rolę odgrywają takie czynniki, jak: zmniejszenie masy,

wysoka odporność na korozję oraz możliwość wytwarzania skomplikowanych kształtów [29,30,43].

Klasyfikacja stopów aluminium

Stopy aluminium możemy podzielić ze względu na sposób wytwarzania, na stopy [29]:

- Do obróbki plastycznej, które zawierają zwykle do ok. 5% domieszek, najczęściej pierwiastki Cu, Mg, Mn a także Si, Zn, Ni, Cr.
- Odlewnicze powyżej 5%, charakteryzujące się dobrą lejnością wymaganą w procesie odlewania skomplikowanych kształtów i odlewów cienkościennych.

Podstawą systematyki stopów aluminium do przeróbki plastycznej jest międzynarodowy system oznaczeń numerycznych, w którym pierwsza cyfra (od 1 do 8) wskazuje na główny pierwiastek lub grupę pierwiastków stopowych [44]:

- EN- przedrostek odnoszący się do normy;
- A- litera oznaczająca aluminium;
- W- oznaczenie wyrobów przeznaczonych do obróbki plastycznej, litera C- stopy dedykowane do odlewania;
- łącznik;
- Cztery ostatnie cyfry w oznaczeniu stopów aluminium wskazują na ich skład chemiczny, z czego pierwsza cyfra określa grupę stopu zawierającą największą ilość domieszki danego pierwiastka. Dokładny podział grup stopów według dominującego pierwiastka przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. podział grup stopowych ze względu na wiodący pierwiastek stopowy [29].

Pierwiastek stopowy	Grupa stopu	Zastosowanie
Al >99%	Seria 1000	Elektronika
Cu	Seria 2000	Przemysł lotniczy
Mn	Seria 3000	Przemysł spożywczy
Si	Seria 4000	Przemysł samochodowy
Mg	Seria 5000	Przemysł stoczniowy
Mg+Si	Seria 6000	Architektura elementy wyciskane
Zn	Seria 7000	Przemysł lotniczy
Inne pierwiastki	Seria 8000	-

Seria 1xxx obejmuje aluminium technicznie czyste, o gwarantowanej zawartości aluminium minimum 99,0%. Suma pierwiastków stopowych i zanieczyszczeń w tych materiałach nie przekracza 1%. Charakteryzują się one stosunkowo niską wytrzymałością mechaniczną, jednakże wyróżniają się doskonałą przewodnością cieplną i elektryczną, bardzo wysoką odpornością na korozję w wielu środowiskach oraz wyjątkową plastycznością. Dzięki temu są łatwo podatne na obróbkę plastyczną zarówno na zimno, jak i na gorąco. Znajdują zastosowanie głównie w przemyśle elektrotechnicznym (przewody, szynoprzewody), chemicznym (aparatura, zbiorniki), spożywczym (folie opakowaniowe) oraz w architekturze (elementy dekoracyjne) [45,46].

Kolejną grupę stanowią stopy serii 2xxx, w których głównym dodatkiem stopowym jest miedź (Cu), zwykle w ilości do około 6%, często w połączeniu z magnezem (Mg) lub krzemem (Si). Są to stopy utwardzane wydzieleniowo, osiągające wysoką wytrzymałość mechaniczną po odpowiedniej obróbce cieplnej (przesycanie i starzenie). Cechują się również dobrą skrawalnością i podwyższoną żarowytrzymałością w porównaniu do czystego aluminium. Istotnym ograniczeniem jest ich niższa odporność na korozję, zwłaszcza międzykrystaliczną, wynikająca z obecności wydzieleni faz bogatych w miedź na granicach ziaren, co często wymusza stosowanie powłok ochronnych (np. platerowania czystym aluminium). Ze względu na wysoką wytrzymałość, są one powszechnie stosowane w konstrukcjach lotniczych, elementach pojazdów i maszyn pracujących pod dużym obciążeniem [47,48].

Stopy serii 3xxx wykorzystują mangan (Mn) jako główny pierwiastek stopowy, zazwyczaj w ilości 1-1,5% [49]. Są to stopy nieutwardzalne wydzieleniowo, których własności wytrzymałościowe modyfikowane są głównie przez umocnienie roztworowe i zgmiot na zimno. Charakteryzują się umiarkowaną wytrzymałością, ale doskonałą odpornością na korozję atmosferyczną i w środowiskach spożywczych, a także dobrą podatnością na formowanie i spawanie. Znajdują szerokie zastosowanie w produkcji opakowań (puszki na napoje), wymienników ciepła (chłodnice), naczyń kuchennych oraz w budownictwie (pokrycia dachowe, rynny) [50].

Charakterystyczną cechą stopów serii 4xxx jest obecność krzemu (Si) jako głównego dodatku, w ilości od kilku do kilkunastu procent (choć istnieją stopy o zawartości Si do 30%) [51]. Dodatek krzemu znacząco poprawia właściwości odlewnicze stopów (lejność, skurcz odlewniczy) poprzez obniżenie temperatury topnienia, a także zwiększa odporność na zużycie ścierne i żarowytrzymałość. Stopy o wyższej zawartości krzemu (np. eutektyczne i nadeutektyczne, ok. 12% Si i więcej) są typowymi siluminami odlewniczymi, stosowanymi

do produkcji tłoków, bloków silników czy głowic. Stopy o niższej zawartości krzemu bywają stosowane jako materiały do przeróbki plastycznej lub częściej jako materiały dodatkowe (druły, pręty) do spawania i lutowania innych stopów aluminium [52].

W stopach serii 5xxx dominuje magnez (Mg) jako główny składnik stopowy, w zakresie od około 1% do 6%. Są to głównie stopy umacniane roztworowo i przez zgniot, nieutwardzalne wydzieleniowo (z wyjątkiem niektórych bardziej złożonych stopów) [53]. Wyróżniają się dobrą lub wysoką wytrzymałością mechaniczną, doskonałą odpornością na korozję, zwłaszcza w środowisku morskim, oraz bardzo dobrą spawalnością [54]. Wytrzymałość rośnie wraz ze wzrostem zawartości Mg, jednak przy wyższych stężeniach może pojawić się podatność na korozję naprężeniową. Znajdują zastosowanie w przemyśle stoczniowym, konstrukcjach spawanych, zbiornikach ciśnieniowych (także kriogenicznych) oraz w elementach karoserii pojazdów.

Seria 6xxx obejmuje stopy trójskładnikowe, zawierające magnez i krzem w proporcjach zbliżonych do stechiometrycznego składu fazy Mg_2Si . Zawartość Mg wynosi typowo 0,4-1,2%, a Si 0,6-1%. Są to stopy utwardzane wydzieleniowo poprzez wydzielenie fazy Mg_2Si podczas starzenia. Charakteryzują się bardzo dobrą kombinacją umiarkowanie wysokiej wytrzymałości, doskonałej odporności na korozję, dobrej plastyczności i spawalności. Ich kluczową zaletą technologiczną jest znakomita podatność na wyciskanie, co pozwala na produkcję złożonych profili. Są one masowo wykorzystywane w budownictwie (profile okienne, drzwiowe, fasady), w motoryzacji (elementy konstrukcyjne, relingi) oraz w produkcji ram rowerowych i elementów mebli [55,56].

Najwyższe właściwości wytrzymałościowe wśród stopów aluminium osiągnęte są w serii 7xxx, gdzie głównym dodatkiem stopowym jest cynk (Zn, 1-8,5%), zwykle w połączeniu z magnezem (Mg) i często z miedzią (Cu). Są to stopy utwardzane wydzieleniowo, których wysoka wytrzymałość uwarunkowana jest obecnością drobnych wydzieleni fazy międzymetalicznej $MgZn_2$ (oraz innych faz w obecności Cu). Wadą stopów serii 7xxx jest niższa odporność na korozję naprężeniową oraz ograniczona odporność na działanie podwyższonych temperatur. Główne zastosowania obejmują odpowiedzialne konstrukcje lotnicze i wojskowe oraz sprzęt sportowy [57,58].

Ostatnią grupę, serię 8xxx, stanowią stopy aluminium zawierające inne pierwiastki stopowe niż te dominujące w seriach 2xxx-7xxx lub stopy o specjalnym przeznaczeniu. Przykładem mogą być stopy Al-Li, w których dodatek litu znacząco zwiększa moduł sprężystości i obniża gęstość, co jest pożądane w przemyśle lotniczym i kosmicznym. Inne stopy tej serii mogą

zawierać żelazo, nikiel lub cynę w celu uzyskania specyficznych właściwości, takich jak podwyższona wytrzymałość w wysokich temperaturach, lepsza przewodność elektryczna czy szczególna formowalność, znajdując zastosowanie np. w produkcji specjalistycznych folii czy przewodów [43,59,60].

Na europejskim rynku budowlanym możemy rozróżnić kilka najpopularniejszych typów konstrukcji ościeżnic stalowych [14]:

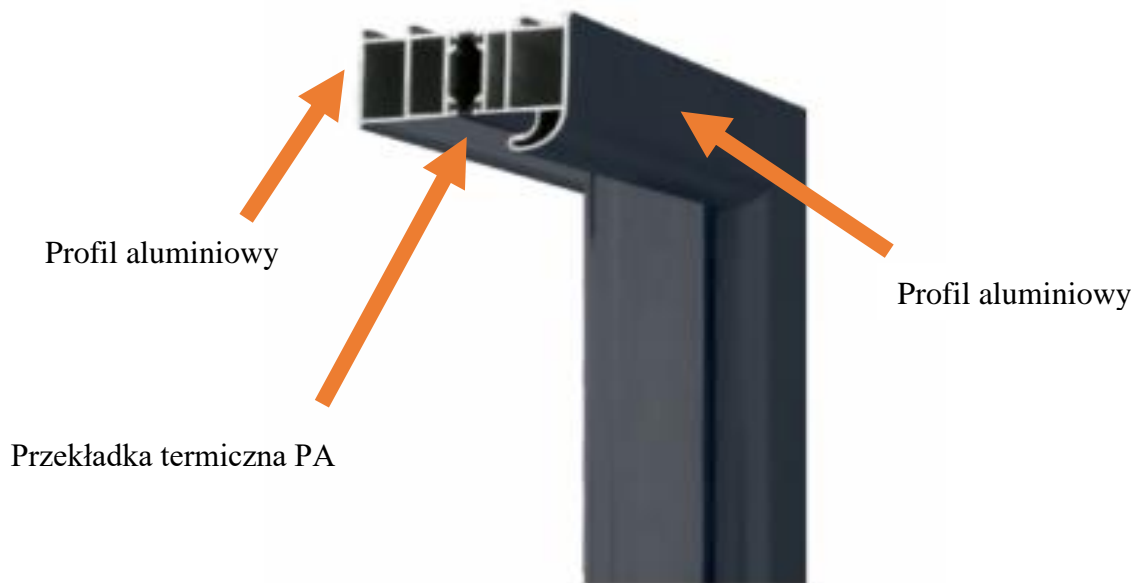
- Monolityczna;
- Z przekładką termiczną.

Ościeżnice monolityczne stanowią profile aluminiowe ekstrudowane ze stopów aluminium serii 6060 lub 6061 w klasie T5 lub T6. (Rys. 6). Ze względu na wysoki współczynnik przewodzenia ciepła stopy aluminium ($\lambda=160$), stosowane w konstrukcjach gdzie nie jest konieczna izolacja termiczna [14,29,62].



Rys. 6. Przekrój ościeżnicy monolitycznej [62]

Ościeżnice aluminiowe z przekładką termiczną (Rys.7). składają się z dwóch kształtowników wytłaczanych ze stopów aluminium 6060 lub 6061, połączonych ze sobą kształtownikiem poliamidowym (PA). Taka konstrukcja znacząco obniża przewodność cieplną całego układu, ograniczając straty energii i skutecznie eliminując mostki cieplne, które w tradycyjnych profilach aluminiowych mogłyby stanowić źródło niepożądanych ucieczek ciepła [17,62].



Rys. 7. Przekrój ościeżnicy monolitycznej [62]

2.3. Technologia produkcji ościeżnic stalowych

Ościeżnice stalowe, ze względu na swoje właściwości, takie jak wysoka wytrzymałość mechaniczna, odporność na odkształcenia, estetykę oraz zdolność do adaptacji w różnych warunkach środowiskowych, wymagają precyzyjnie kontrolowanego procesu produkcyjnego. W zależności od skali produkcji oraz specyfikacji projektowej, wyróżnia się dwa główne typy procesów produkcyjnych ościeżnic stalowych:

- a) Metodą gięcia na krawędziarkach;
- b) Metodą profilowania rolkowego.

Produkcja stalowych ościeżnic metodą gięcia na krawędziarce obejmuje kilka kluczowych etapów, których celem jest uzyskanie elementów o odpowiedniej wytrzymałości, precyzji wymiarowej i estetyce. Proces rozpoczyna się od przygotowania surowców, czyli blach stalowych o odpowiedniej grubości (zależnie od typu ościeżnicy), które następnie są poddawane wykrawaniu i cięciu na wykrawarkach lub wycinarkach laserowych. W zależności od wymagań projektowych oraz stopnia skomplikowania konstrukcji, wybiera się technologię cięcia, tak aby uzyskać formatki formatek o precyzyjnie określonych wymiarach i kształtach. Podczas etapu cięcia blach przygotowuje się formatki, które będą stanowić podstawę do dalszej obróbki. Proces ten obejmuje także wykrawanie otworów technologicznych pod zaczepy zamka, miejsca montażu zawiasów oraz wszelkie inne wycięcia niezbędne do późniejszego montażu i łączenia elementów ościeżnicy. Wycinarki laserowe są preferowaną metodą w przypadku bardziej skomplikowanych kształtów, ponieważ pozwalają na uzyskanie precyzji

oraz krótkiego czasu obróbki. Po zakończeniu wykrawania i cięcia formatki są przekazywane do kolejnego etapu, jakim jest gięcie. Etap gięcia odbywa się na prasach krawędziowych, nazywanych również krawędziarkami, które dzięki specjalnym matrycom umożliwiają precyzyjne odkształcanie blachy wzdłuż wyznaczonych linii. Formatki poddaje się serii gięć, aby nadać im ostateczny kształt i uzyskać pożądany profil. Proces ten jest kluczowy, ponieważ wpływa na dokładność wymiarową oraz wytrzymałość mechaniczną gotowego elementu. Na tym etapie powstają trzy podstawowe części składowe ościeżnicy: profil zamkowy, profil zawiasowy oraz nadproże, które są następnie łączone, tworząc kompletną konstrukcję [63-65].

Metodą profilowania rolkowego.

Kształtowanie profili ościeżnicowych metodą profilowania rolkowego to proces ciągły, realizowany na specjalistycznej linii technologicznej, w którym taśma stalowa jest stopniowo formowana wzdłuż kierunku ruchu przy użyciu serii rolek profilujących. Zestawy rolek, nazywane stacjami profilującymi, są rozmieszczone sekwencyjnie i odpowiadają za nadawanie taśmie pożądanego kształtu. W zależności od stopnia skomplikowania profilu ościeżnicy, linia technologiczna może składać się z kilku lub nawet kilkunastu stacji, z których każda realizuje inne zadanie w procesie formowania. Na początku linii technologicznej znajduje się sekcja rozwijania blachy, w której stalowa taśma rozwijana jest z kręgów i jest cięta na odpowiednią szerokość. Następnie taśma jest kierowana do stacji prostowania, gdzie eliminuje się ewentualne nierówności lub falowanie materiału, co jest kluczowe dla uzyskania równomiernego kształtu profilu na dalszych etapach. Kolejny krok to stacja wykrawania otworów, gdzie wykonuje się niezbędne otwory montażowe, takie jak miejsca na zamki, zawiasy oraz elementy mocujące. Po wykrawaniu taśma blachy trafia do sekcji kształtowania profili, w której szereg stacji rolkowych stopniowo nadaje jej docelowy kształt. Każda para rolek odkształca taśmę w określony sposób, a cały proces przebiega etapowo, co pozwala na równomierne formowanie bez ryzyka powstawania naprężeń wewnętrznych i deformacji. Na końcu linii znajduje się sekcja cięcia, w której gotowy profil jest przycinany na odpowiednie długości, zgodnie z wymaganiami technicznymi dotyczącymi wysokości ościeżnic. Cały proces profilowania rolkowego jest skomplikowaną operacją technologiczną, która wymaga precyzyjnego ustawienia każdej stacji oraz odpowiedniego doboru parametrów, takich jak prędkość przesuwu taśmy, siła nacisku rolek oraz kolejność operacji. Zastosowanie tej metody pozwala na uzyskanie profili o wysokiej powtarzalności wymiarowej, co sprawia, że jest to jedna z najbardziej wydajnych technologii w produkcji wielkoseryjnej ościeżnic stalowych [66- 68].

2.4. Technologiczność produktu

Technologiczność to kluczowy aspekt inżynierii i produkcji, który determinuje sukces w projektowaniu i wytwarzaniu wyrobów. Określa ona stopień, w jakim projekt jest dostosowany do wymagań technicznych, ekonomicznych i produkcyjnych, umożliwiając efektywną realizację i spełnienie oczekiwań rynku. Technologiczność pozwala nie tylko na przejście od etapu koncepcji do rzeczywistej produkcji, ale także na optymalizację zasobów oraz minimalizację kosztów wytwarzania. Stanowi więc niezbędny element łączący teorię z praktyką w każdej dziedzinie przemysłu [69].

Na znaczenie technologiczności zwraca się szczególną uwagę w kontekście zrównoważonego rozwoju, gdzie rosnące wymagania dotyczące wydajności, jakości i ekologii wymuszają stosowanie zaawansowanych metod projektowania i produkcji. Przykładem może być branża elektroniczna, w której miniaturyzacja i wysokie wymagania jakościowe wymagają precyzyjnego podejścia do wszystkich aspektów technologiczności, począwszy od materiałów, przez konstrukcję, aż po sam proces wytwarzania [70].

Rozpatrując technologiczność w kontekście cyklu życia produktu, wyróżnia się trzy główne aspekty: technologiczność materiałową, technologiczność konstrukcji i technologiczność procesu wytwarzania. Każdy z tych elementów pełni istotną rolę w zapewnieniu sprawnego i efektywnego procesu produkcyjnego [67].

Technologiczność materiałowa

Technologiczność materiałowa jest kluczowym czynnikiem, który odnosi się do wyboru odpowiednich materiałów, spełniających określone wymagania technologiczne i eksploatacyjne. Kluczowym kryterium jest tu nie tylko dostępność surowców, ale także ich podatność na obróbkę mechaniczną, chemiczną czy termiczną [68-70].

Współczesne podejście do technologiczności materiałowej uwzględnia również aspekty ekologiczne, takie jak recykling i wpływ na środowisko naturalne. W branży motoryzacyjnej popularne staje się stosowanie lekkich stopów aluminium czy kompozytów, które zapewniają zmniejszenie masy pojazdów i tym samym przyczyniają się do ograniczenia zużyciu paliwa i emisji spalin. Dzięki temu technologiczność materiałowa jest nie tylko narzędziem optymalizacji kosztów, ale także elementem wspierającym cele zrównoważonego rozwoju [68,71].

Technologiczność konstrukcji

Technologiczność konstrukcji stanowi kluczowy aspekt współczesnego projektowania inżynierskiego, który bezpośrednio wiąże się z procesem tworzenia produktów. Jest to pojęcie

obejmujące dostosowanie konstrukcji produktu do wymagań funkcjonalnych oraz technologicznych, z uwzględnieniem kryteriów doboru materiałów i dostępnych zasobów wytwórczych. Opracowanie konstrukcji wymaga zatem uwzględnienia zarówno funkcjonalności produktu, jak i możliwości technologicznych zakładu produkcyjnego, co czyni ten proces wyjątkowo złożonym [52].

Proces projektowania konstrukcji powinien być realizowany w dwóch kluczowych etapach. Pierwszy z nich obejmuje analizę kinematyki konstrukcji, skupiającą się na sposobie działania urządzenia, jego trwałości oraz eksploatacji. Drugi etap związany jest z technologią wytwarzania, a szczególnie z doбором odpowiednich materiałów i metod produkcji. Dobrze zaprojektowana konstrukcja musi być przystosowana zarówno do efektywnego wytwarzania, jak i do spełnienia wymagań użytkowych. Obejmuje to zaplanowanie procesu montażu, wykorzystanie dostępnego parku maszynowego oraz zastosowanie optymalnych technologii wytwarzania [68,72].

Prawidłowa ocena technologiczności konstrukcji wymaga uwzględnienia wielu kluczowych kryteriów. Oprócz oczywistych aspektów, takich jak bezpieczeństwo, niezawodność i ergonomia, należy również wziąć pod uwagę estetykę, ekonomikę eksploatacji oraz – co coraz ważniejsze – ekologiczność. Celem jest stworzenie konstrukcji, która będzie nie tylko spełniać wszystkie wymagania techniczne i użytkowe, ale również umożliwi efektywną i ekonomiczną produkcję. W tym kontekście istotne jest zastosowanie zasad typizacji, normalizacji i unifikacji, co ułatwia proces produkcji i zwiększa jego wydajność. Należy pamiętać, że projektowanie to proces iteracyjny, w którym poszczególne etapy wzajemnie na siebie wpływają. Dlatego ważna jest elastyczność i możliwość weryfikacji oraz modyfikacji założeń projektowych w odpowiedzi na zmieniające się wymagania [73,74].

Technologiczność konstrukcji to również umiejętne połączenie wymagań materiałowych z możliwościami produkcyjnymi. Oznacza to, że konstrukcja powinna być dostosowana do użycia dostępnych materiałów i technologii, co pozwala na zminimalizowanie kosztów produkcji przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej jakości. W szczególności dotyczy to produkcji wielkoseryjnej, gdzie optymalizacja technologiczności konstrukcji może znacząco wpłynąć na efektywność całego procesu. Analiza technologiczności konstrukcji obejmuje również ocenę funkcjonalności, niezawodności i trwałości produktu. Te czynniki są bowiem kluczowe dla zapewnienia jego konkurencyjności na rynku [71].

Technologiczność konstrukcji wykracza poza samo spełnienie wymagań technicznych. Współczesne standardy nakładają na projektantów obowiązek uwzględnienia aspektów

ekologicznych, norm prawnych oraz dyrektyw unijnych. Projektowanie konstrukcji staje się więc procesem wielowymiarowym, wymagającym pogodzenia wielu, często sprzecznych, czynników. Jak podkreśla literatura fachowa, kluczem do sukcesu produktu na rynku jest jego optymalne przystosowanie do warunków produkcji oraz zaprojektowanie efektywnego procesu technologicznego. Podsumowując, technologiczność konstrukcji jest nieodłącznym elementem współczesnego projektowania inżynierskiego, który integruje aspekty funkcjonalne, technologiczne i ekonomiczne. Dzięki uwzględnieniu tego pojęcia w procesie projektowania możliwe jest tworzenie produktów spełniających współczesne wymagania techniczne, użytkowe i ekologiczne, przy jednoczesnym optymalizowaniu kosztów produkcji i efektywności wytwarzania [68,75].

Technologiczność procesu wytwarzania

Ostatnim, ale nie mniej istotnym aspektem jest technologiczność procesu wytwarzania, która obejmuje wszystkie etapy produkcji, od przygotowania materiałów po montaż i kontrolę jakości. Proces technologiczny musi być dostosowany do wymagań konstrukcyjnych produktu, ale także do dostępnych maszyn i narzędzi. Nowoczesne podejścia do technologiczności procesu uwzględniają zastosowanie automatyzacji, robotyzacji oraz systemów informatycznych, co pozwala na zwiększenie efektywności i powtarzalności produkcji [70].

Znaczenie technologiczności w praktyce

Technologiczność odgrywa szczególną rolę w sektorach, gdzie wymagana jest optymalizacja kosztów surowców oraz efektywność produkcji. Branże takie jak motoryzacja, przemysł lotniczy czy szeroko pojęta branża produkcyjna regularnie wprowadzają innowacje mające na celu zwiększenie technologiczności produktów i procesów. Zastosowanie zasad technologiczności przyczynia się do redukcji kosztów produkcji, skrócenia czasu wprowadzania produktów na rynek oraz poprawy ich jakości [69,74].

Ostatecznie, technologiczność jest nie tylko pojęciem teoretycznym, ale także narzędziem praktycznym, które umożliwia rozwój technologii i osiągnięcie trwałych korzyści ekonomicznych i ekologicznych. W miarę rozwoju technologii i wzrostu wymagań rynkowych znaczenie tego pojęcia będzie tylko rosło, stając się jednym z filarów nowoczesnego przemysłu [69,75].

3. Badania własne

3.1. Cel i teza pracy

Efektywność energetyczna budynków odgrywa kluczową rolę w redukcji emisji gazów cieplarnianych i tym samym przybliża nas w dążeniach do zrównoważonego rozwoju. W obliczu rosnących wymagań polityki klimatycznej i energetycznej Europy, takich jak unijny pakiet klimatyczny „Fit for 55”, którego celem jest osiągnięcie neutralności klimatycznej Europy do 2050 roku, przemysł i gospodarka muszą dostosować się do nowych standardów. Wymaga to inwestycji w technologie niskoemisyjne, zwiększenia efektywności energetycznej i redukcji emisji gazów cieplarnianych. Strategia „Fit for 55” zakłada znaczące, bo aż o 55% obniżenie emisji gazów cieplarnianych, co wymaga m.in. poprawy efektywności termicznej budynków. „Fit for 55” promuje nie tylko zwiększenie efektywności energetycznej, ale także równowagę materiałową i wydłużenie cyklu życia produktu. Oznacza to promowanie stosowania materiałów o wysokiej izolacyjności termicznej i odpornych na degradację, co zmniejsza potrzebę częstych wymian drzwi, a tym samym znacznie redukuje ślad węglowy [76- 78].

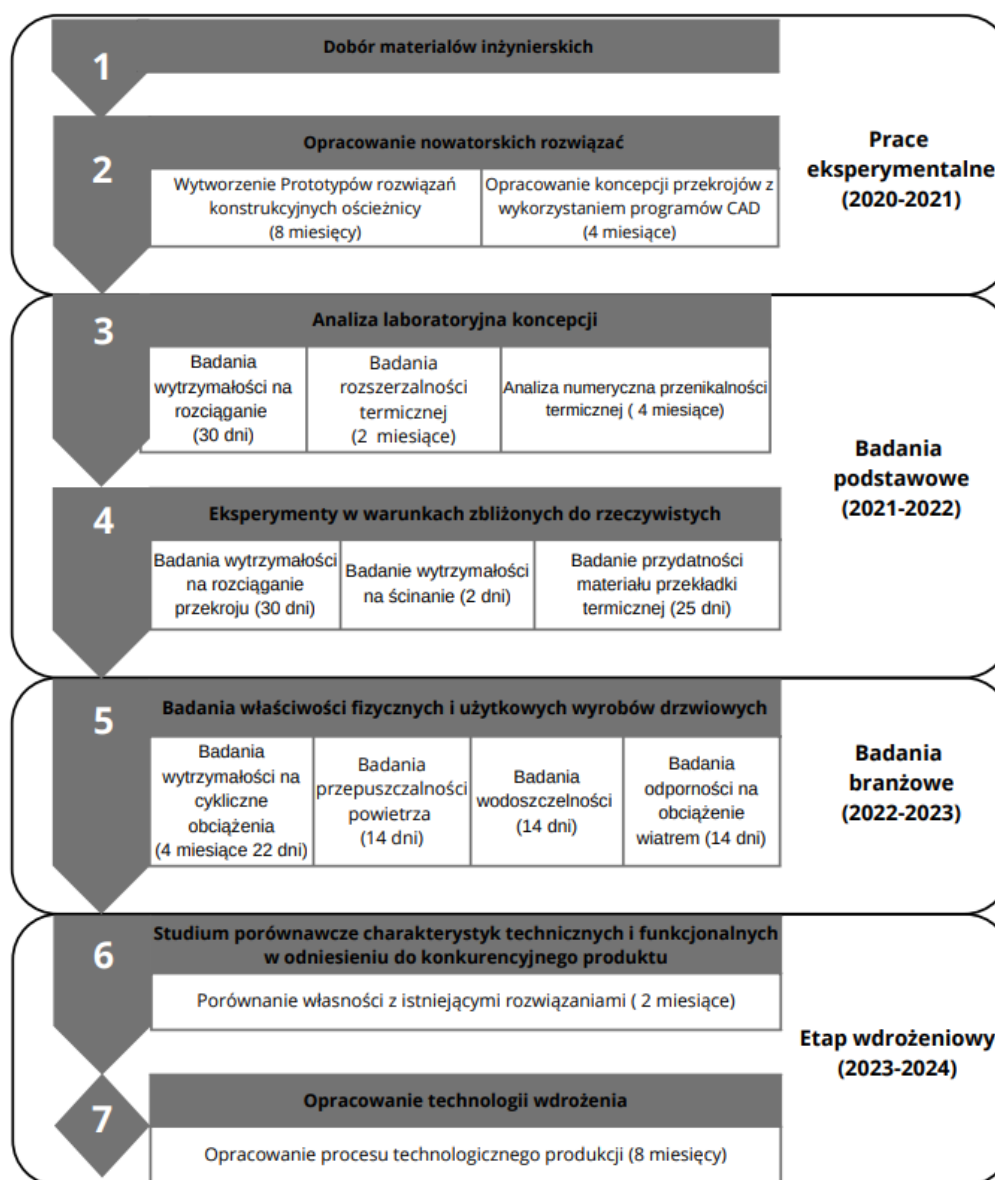
Stąd też aktualne wymagania związane z efektywnością energetyczną drzwi zewnętrznych nakładają na ich producentów obowiązek osiągania wysokich standardów izolacyjności termicznej, co bezpośrednio wpływa na projektowanie i konstrukcję drzwi. Zgodnie z obowiązującymi normami, parametr przenikalności termicznej dla drzwi musi wynosić co najwyżej $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$, aby skutecznie ograniczać straty ciepła i poprawiać efektywność energetyczną współczesnych budynków. W praktyce zazwyczaj oznacza to, że producenci stosują coraz grubsze panele drzwiowe, które wypełniane są materiałami izolacyjnymi, takimi jak pianki poliuretanowe, polistyren czy wełna mineralna, co bezpośrednio przekłada się także na koszt produktu. Większe zużycie materiałów do produkcji grubszych paneli drzwiowych ma również negatywny wpływ na środowisko, przyczyniając się bezpośrednio do zwiększenia śladu węglowego produkowanych drzwi. Ponadto, grubsze i cięższe drzwi wymagają zastosowania wytrzymałych elementów konstrukcyjnych, między innymi zawiasów, których zadaniem jest utrzymanie ciężaru skrzydła drzwiowego. Ponadto, grubsze drzwi mogą ograniczać możliwości projektowe, szczególnie w nowoczesnych rozwiązaniach architektonicznych, gdzie istotne są zarówno estetyka, jak i funkcjonalność. Zwiększona grubość paneli drzwiowych może wpływać na wygląd, ograniczając potencjał wzornictwa oraz ich integrację z innymi elementami budynku. Dodatkowo, grubsze drzwi wymagają więcej

przestrzeni montażowej, co może stanowić problem w budynkach o ograniczonej przestrzeni wokół drzwi. Współczesna architektura często preferuje minimalistyczne, smukłe i eleganckie linie, które nadają budynkom lekkości i nowoczesny charakter. Chociaż dążenie do poprawy efektywności energetycznej zabudowań jest kluczowe dla spełnienia wymogów regulacyjnych i zmniejszenia emisji budynków, istnieje potrzeba zrównoważenia tych celów z aspektami ekonomicznymi, użytkowymi i środowiskowymi [77-79].

Celem nadrzecznym niniejszej pracy jest opracowanie koncepcji ościeżnicy skrzydła drzwiowego o obniżonym współczynniku przenikalności termicznej z wykorzystaniem technologii wspomagania projektowania (CAx), a następnie stworzenie w drugim kroku modelu fizycznego o uprzednio zaprojektowanych własnościach i designie. Dzięki wielokryterialnej analizie możliwe było zaprojektowanie konstrukcji, która spełniała wymagane parametry izolacyjności termicznej przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia materiałów, a co za tym idzie, obniżeniu kosztów, które są głównym priorytetem w branży produkcji drzwi. Ponadto celem podrzędnym prezentowanej pracy, było dążenie do zachowania funkcjonalności i wytrzymałości ościeżnicy drzwiowej na dotychczasowym poziomie. Na podstawie przeglądu literaturowego oraz badań własnych sformułowano następującą tezę pracy doktorskiej: **Możliwe jest zaprojektowanie i wytworzenie nowego typu ościeżnicy stalowej o podwyższonych parametrach izolacyjnych, w odniesieniu do obecnie sprzedawanych modeli, która pozwoli na redukcję parametrów przenikalności termicznej drzwi przy jednoczesnym zachowaniu dotychczasowej grubości skrzydła drzwiowego, co w efekcie umożliwi stworzenie normatywnego i przystępnego cenowo produktu.**

3.2. Materiał do badań

Proces badawczy podzielono na cztery główne etapy badawcze (Rys.8), Pierwszy etap rozpoczęto od wykonania Badań podstawowych. Na podstawie przeglądu literatury, analizy istniejących produktów na rynku oraz własnego wieloletniego doświadczenia zawodowego, do planowanego w pracy eksperymentu wybrano popularne i powszechnie stosowane materiały inżynierskie, takie jak poliuretan, stal i stopy aluminium. Wybór tych materiałów podyktowany był ich dostępnością, atrakcyjną ceną oraz szerokim zastosowaniem w różnych gałęziach przemysłu. Proces badawczy rozpoczęto od wykonania prac eksperymentalnych, które miały na celu zaobserwowanie nowych zjawisk, zdobycia nowej wiedzy dotyczącej dobranych materiałów lub ich łączenia w celu opracowania nowatorskiego rozwiązania.



Rys.8. Harmonogram realizacji prac badawczych

Kolejny etap, obejmujący badania podstawowe, rozpoczął się od serii testów mających na celu analizę porównawczą opracowanych koncepcji. Celem tych badań było wskazanie optymalnych rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych spośród materiałów wybranych w procesie doboru. Kluczowym elementem tego etapu była analiza numeryczna przenikalności cieplnej (czas trwania: 4 miesiące), której celem było określenie współczynnika przenikania ciepła przekroju ościeżnica-skrzydło raz badania wytrzymałości na rozciąganie, stanowiące punkt wyjścia do dalszych analiz.

W ramach kolejnej fazy przeprowadzono badania odwzorowujące rzeczywiste warunki eksploatacyjne, ukierunkowane na walidację konstrukcji profilu ościeżnicy. Głównym celem badań było określenie wpływu zmiany gęstości rdzenia poliuretanowego na właściwości mechaniczne i użytkowe profilu. Zakres prac obejmował: badania wytrzymałościowe na rozciąganie przekroju, badania odporności na ścinanie oraz analizę przydatności zastosowanego materiału przekładki termicznej, ze szczególnym uwzględnieniem jego parametrów funkcjonalnych i trwałości eksploatacyjnej.

W ramach badań branżowych przeprowadzono ocenę właściwości fizycznych i użytkowych produktu. Badania te stanowią istotny element procesu certyfikacji i dopuszczenia produktu do obrotu rynkowego. Zakres prac obejmował: badania wytrzymałości na cykliczne obciążenia (czas trwania: 4 miesiące i 22 dni), badania przepuszczalności powietrza (14 dni), wodoszczelności (14 dni) oraz odporności na obciążenie wiatrem (14 dni).

Ostatni etap stanowiła faza wdrożeniowa, która rozpoczęła się od porównania opracowanego rozwiązania z produktami konkurencyjnymi (2 miesiące). Następnie opracowano technologię wdrożenia, obejmującą przygotowanie procesu technologicznego produkcji, co zajęło 8 miesięcy.

3.2.1. Projekty przekrojów ościeżnicy

W niniejszej pracy istotne było uzyskanie niskich parametrów przenikalności termicznej (poniżej $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$) oraz optymalizacja kosztów produkcji dla ościeżnicy. Na podstawie literatury oraz własnych doświadczeń zawodowych w sektorze stolarki otworowej, do opracowania nowego typu ościeżnicy wytypowano materiały o niskim współczynniku przenikalności termicznej jakim jest poliuretan, co wynika przede wszystkim z bardzo dobrych właściwości izolacyjnych tego materiału, które zapewnia szeroki zakres jego gęstości (zazwyczaj stosowany w zakresie od 33 do 1200 kg) oraz korzystnego stosunku masy do wytrzymałości i ekonomicznej opłacalności.

Zastosowanie materiału o gęstości wyższej niż 1200 kg/m^3 oznaczałoby praktycznie przejście do prawie litego poliuretanu, co znacznie ograniczałoby jego właściwości termoizolacyjne (ze względu na znikomy udział komórek powietrznych) i podnosiło koszty wytwarzania. W rezultacie nie przyniosłoby to oczekiwanych korzyści ani z punktu widzenia efektywności cieplnej oraz optymalizacji kosztowej.

Pierwszym zaprojektowanym rozwiązaniem konstrukcyjnym był profil poliuretanowy o gęstości 600 kg/m^3 (Rys. 9a) oklejony folią PCV. Profil z wypełnieniem o tej gęstości charakteryzował się niską sztywnością, co wymagało dalszych prac nad jego wzmocnieniem, aby spełnić wymogi konstrukcyjne i użytkowe. W pierwszej fazie modyfikacji do przekroju wprowadzono profil z drewna klejonego (Rys. 9b), który miał za zadanie poprawić sztywność konstrukcji. Ten zabieg przyniósł oczekiwany efekt w zakresie wytrzymałości, jednakże był przyczyną niepożądanego kwestii związanej z wytwarzaniem odpadów wielomateriałowych, w postaci wiórów drewnianych i poliuretanowych, powstających podczas procesów cięcia, frezowania i wiercenia.



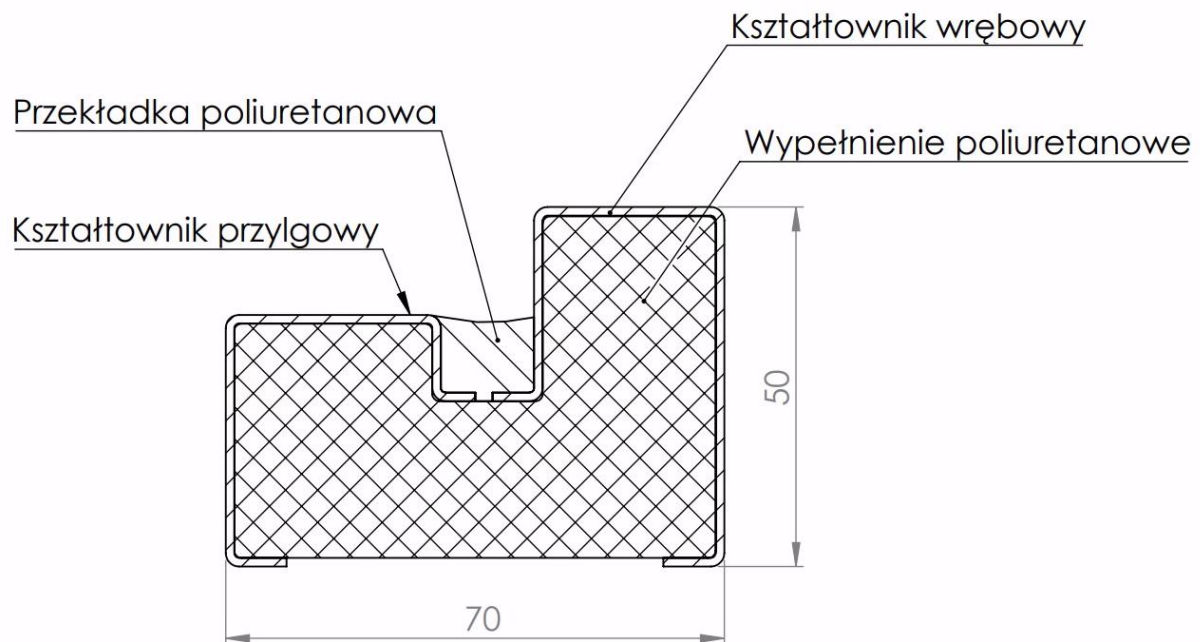
Rys. 9. Prototypy profili ościeżnicowych a) profil poliuretanowy, b) profil poliuretanowy wzmocniony profilem z drewna klejonego, c) profil poliuretanowy wzmocniony profilem stalowym [opracowania własne]

W trakcie procesu obróbki powstawały wióry drewniano-poliuretanowe, które były trudne do odseparowania od siebie i utylizacji. To z kolei negatywnie wpływało na efektywność całego procesu produkcji. W związku z powyższym drewniany element zastąpiono stalowym kształtownikiem umieszczonym wewnątrz profilu (Rys. 9c). Nowa konstrukcja zapewniła wymaganą sztywność. Stalowy element został ulokowany w taki sposób, aby nie kolidował z miejscami wymagającymi dodatkowej obróbki użytkowej. Taka zmiana znacząco poprawiła trwałość i wytrzymałość profilu, eliminując problem z wielomateriałowym odpadem.

Jednak podczas testów eksploatacyjnych, gdy profil wystawiono na działanie warunków atmosferycznych (promieniowanie UV, opady deszczu), zauważono, że okleina PVC na

krawędziach cięcia i frezowania, na skutek degradacji poliuretanu, zaczęła się odwarstwiać (delaminować) od powierzchni poliuretanu. To zjawisko osłabiło integralność konstrukcji i mogło znacząco wpłynąć na długoterminową trwałość profilu.

Na podstawie powyższych doświadczeń opracowano nowe rozwiązanie konstrukcyjne (Rys. 10), które wyeliminowało opisane powyżej problemy. Mianowicie zdecydowano się na zastosowanie stalowych okładzin pokrytych folią PCV wzmacniających na zewnętrznych powierzchniach ościeżnicy (zrezygnowano z koncepcji umieszczania kształtowników wewnątrz profilu). Dzięki temu podejściu nie tylko poprawiono wytrzymałość elementu, lecz także zapewniono lepszą ochronę przed warunkami atmosferycznymi, co zgodnie z oczekiwaniami znacząco zwiększy trwałość produktu.



Rys. 10. Prototyp profilu ościeżnicowego z okładziną stalową [opracowania własne]

Aby istotnie podnieść efektywność procesu produkcji ościeżnicy, wprowadzono w nim kilka istotnych modyfikacji. Najpierw w stalowych elementach wykrawano otwory za pomocą wykrawarek Trumpf 1000, a następnie blachy zaginano na krawędziarkach VIMERCATI, w kolejnym kroku założono uchwyty zawiasowe oraz elementy ryglowe. Dzięki temu wyeliminowano powstawanie odpadów mieszanych na dalszych etapach obróbki. W kolejnym kroku, za pomocą dedykowanego oprzyrządowania, spozycjonowano stalowe profile przylgowe i wrębowe, po czym wypełniono rowek poliuretanem o gęstości 1200kg/m^3 . W ostatniej fazie wewnątrz profilu wypełniono poliuretanem o niskiej gęstości (33 kg/m^3), co

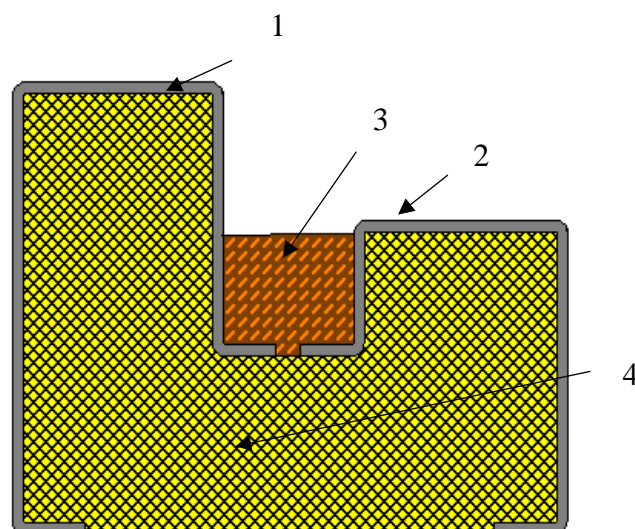
umożliwiło uzyskanie lekkiej, a jednocześnie wytrzymałej konstrukcji (rys.11). Zastosowanie materiałów o różnych gęstościach pozwoliło na zoptymalizowanie właściwości mechanicznych profilu bez zwiększania jego masy, co miało kluczowe znaczenie dla efektywności produkcji i eksploatacji.



Rys. 11. Prototyp ościeżnicy z przekładką poliuretanową [opracowania własne]

Dzięki wdrożeniu proponowanych rozwiązań uzyskano gotowy kształtownik, którego produkcja – zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju i lean manufacturing – generuje minimalne ilości odpadów. Na podstawie dotychczasowych doświadczeń z prac nad poprawą właściwości przekroju ościeżnicy wytypowano trzy gęstości poliuretanu: 33, 600 oraz 1200 kg/m³. Poliuretan o najniższej gęstości (33 kg/m³), dzięki wysokiej porowatości, charakteryzuje się najniższym współczynnikiem przenikalności termicznej, w porównaniu do pozostałych materiałów poliuretanowych i wynosi od 0,022 do 0,025 W/m·K. Jego wytrzymałość na rozciągania mieści się w przedziale od 20 do 40 N/cm². Materiał ten znajduje zastosowanie w aplikacjach, w których wymagana jest dobra izolacyjność termiczna i wysoka wytrzymałość na ściskanie. Natomiast poliuretan o gęstości 1200 kg/m³ charakteryzuje się bardzo wysoką wytrzymałością mechaniczną i znajduje zastosowanie w aplikacjach, gdzie wymagana jest wysoka wytrzymałość, twardość oraz stabilność wymiarowa. Współczynnik przewodności cieplnej dla tego materiału zależnie od producenta wynosi od 0,04 do 0,005

W/m·K. Natomiast wytrzymałość na rozciąganie mieści się w przedziale od 1000 do 1500 N/cm². Poliuretan o gęstości 600 kg/m³ stanowi materiał pośredni pomiędzy omawianymi powyżej materiałami, a jego współczynnik przenikalności termicznej mieści się w przedziale 0,026–0,038 W/m·K. Mając na uwadze, że poliuretan ma niską odporność na promieniowanie UV, długotrwałe narażenie go na tego typu oddziaływania może prowadzić do jego degradacji powierzchniowej. W związku z tym, aby zapewnić odporność projektowanych drzwi zewnętrznych zarówno na promieniowanie UV jak i na uderzenia, na które narażone są podczas zamykania skrzydła drzwiowego o profil ościeżnicy, postanowiono zabezpieczyć zewnętrzne powierzchnie ościeżnicy okładziną z krawędziowanej blachy aluminiowej 6061 [44] lub stalowej DX51D [35]. Stopy aluminium z gatunku 6061 charakteryzują się bardzo wysoką odpornością na korozję atmosferyczną, a ich współczynnik przenikalności termicznej wynosi od 150 do 160 W/(m·K). Natomiast zaproponowana stal z gatunku DX51D, która jest cynkowana ogniowo, w celu zabezpieczenia jej przed korozją atmosferyczną, charakteryzuje się współczynnikiem przewodzenia ciepła na poziomie 50 W/(m·K). W pierwszej kolejności projekt ościeżnicy wykonano w programie Solidworks. Na rysunku 12 przedstawiono koncepcje przekroju profilu ościeżnicy, która składa się z dwóch ukształtowanych arkuszy blachy. Kształtownik wrębowy (oznaczony na rysunku 12 numerem 1) oraz kształtownik przylgowy (oznaczony na rysunku 12 numerem 2) są połączone ze sobą poliuretanem (oznaczony na rysunku 12 numerem 3). Powstały przekrój wypełniony jest poliuretanem o gęstości 33 kg/m³ (oznaczony na rysunku 12 numerem 4) zapewniającym izolacyjność przekroju poprzecznego ościeżnicy.

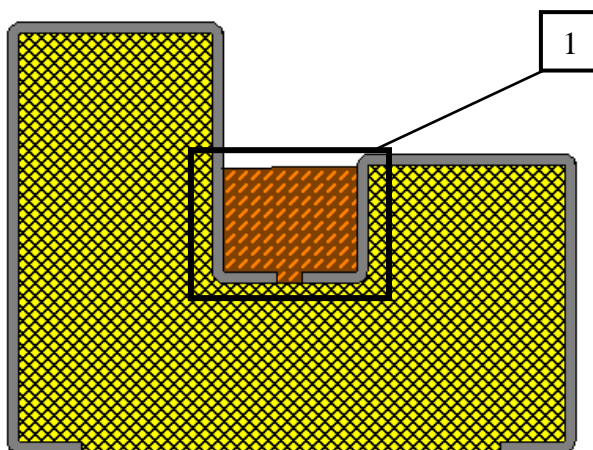


Rys. 12. Przekrój poprzeczny ościeżnicy. 1) Kształtownik wrębowy, 2) Kształtownik przylgowy, 3) Połączenie poliuretanowe, 4) Wypełnienie poliuretanem [opracowania własne]

Aby przerwać ciągłość blachy, która tworzy mostek termiczny i powoduje przemarzanie, opracowano trzy koncepcje połączeń kształowników stalowych lub aluminiowych, różniących się względem siebie sposobem połączenia kształownika wrębowego i przylgowego. Ważne było opracowanie kształtu zoptymalizowanego pod kątem możliwości wykonania go metodą gięcia na zimno. W modelu numerycznym, w celu poprawnego liczenia użyto każdorazowo analogicznego modelu skrzydła drzwiowego.

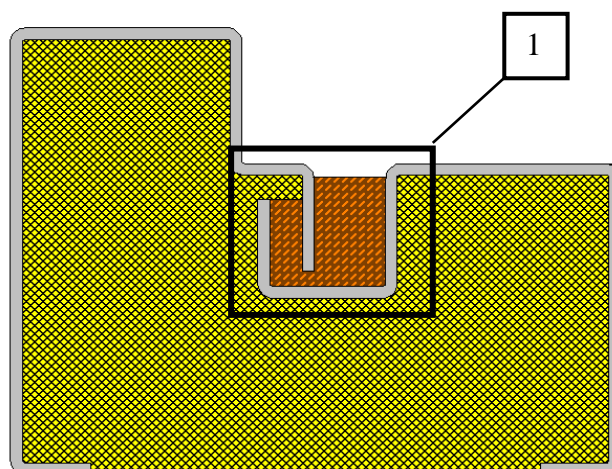
Zaprojektowane przekroje koncepcji ościeżnic przedstawiono poniżej:

Koncepcja A- Koncepcja A składa się z dwóch kształowników połączonych materiałem poliuretanowym w punkcie 1 przekroju, przedstawionym na Rys. 13. Oznaczony przekrój profilu jest wypełniony poliuretanem.



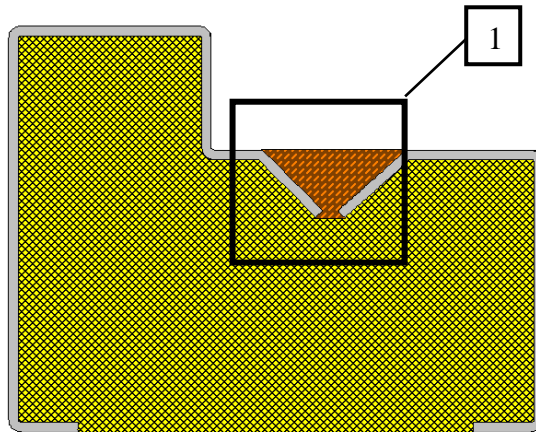
Rys. 13. Koncepcja A przekroju profilu ościeżnicowego. 1) Miejsce łączenia blach poliuretanem [opracowania własne]

Koncepcja B- składa się z dwóch kształowników połączonych w punkcie 1 (Rys. 14). Połączenie zostało zaprojektowane na zakładkę w celu zwiększenia powierzchni łączenia poliuretanem.



Rys. 14. Koncepcja B przekroju profilu ościeżnicowego 1) Miejsce łączenia blach poliuretanem [opracowania własne]

Koncepcja C- składa się z dwóch kształtowników połączonych w punkcie przekroju poliuretanem, oznaczonym numerem 1 na Rys. 15.



Rys. 15. Koncepcja C przekroju profilu ościeżnicowego 1) Miejsce łączenia blach poliuretanem [opracowania własne]

Przedstawione koncepcje (A, B i C) umożliwiły przeprowadzenie szybkiej i wiarygodnej analizy przenikalności termicznej, kluczowego etapu w projektowaniu optymalnego przekroju profilu ościeżnicy drzwiowej. Dzięki wykorzystaniu oprogramowania symulacyjnego BISCO, możliwe było precyzyjne określenie współczynnika przenikania ciepła (U_f) oraz identyfikacja potencjalnych mostków termicznych. Otrzymane wyniki przyczyniły się do opracowania konstrukcji o ulepszonych właściwościach termoizolacyjnych, co znacząco wpływa na efektywność energetyczną finalnego produktu. Opracowane warianty przetestowano z zastosowaniem trzech gęstości poliuretanu, łączącego kształtowniki oraz dwóch rodzajów materiałów kształtowników: stali DX51D [35] oraz stopu aluminium 6061 [44]. W celu ułatwienia analizy wyników, w tabeli 6 przedstawiono oznaczenia poszczególnych koncepcji, z uwzględnieniem zastosowanych materiałów.

Tabela 6. Tabela koncepcji możliwych rozwiązań konstrukcyjno- materiałowych

Lp.	Koncepcja	Gęstość poliuretanowego rdzenia [kg/m³]	Materiał zewnętrznej warstwy	Oznaczenie
1	A	33	Stal DX51D	A30S
2		33	Aluminium 6061	A30A
3		600	Stal DX51D	A600S
4		600	Aluminium 6061	A600A
5		1200	Stal DX51D	A1200S
6		1200	Aluminium 6061	A1200A
7	B	33	Stal DX51D	B30S
8		33	Aluminium 6061	B30A
9		600	Stal DX51D	B600S
10		600	Aluminium 6061	B600A
11		1200	Stal DX51D	B1200S
12		1200	Aluminium 6061	B1200A
13	C	33	Stal DX51D	C30S
14		33	Aluminium 6061	C30A
15		600	Stal DX51D	C600S
16		600	Aluminium 6061	C600A
17		1200	Stal DX51D	C1200S
18		1200	Aluminium 6061	C1200A

3.2.2. Opracowanie próbek połączenia przekładki termicznej ościeżnicy wykorzystanych do badań wytrzymałościowych

Na podstawie zaprojektowanych koncepcji ościeżnic określono najsłabszy punkt przekroju poprzecznego, czyli połączenie blachy i poliuretanu (oznaczony numerem 3 na rysunku 12). W celu określenia wytrzymałości połączeń poszczególnych koncepcji przygotowano trzy próbki każdej analizowanej koncepcji o wymiarach 50 mm x 120 mm, które następnie poddano badaniom wytrzymałościowym (Rys.16).



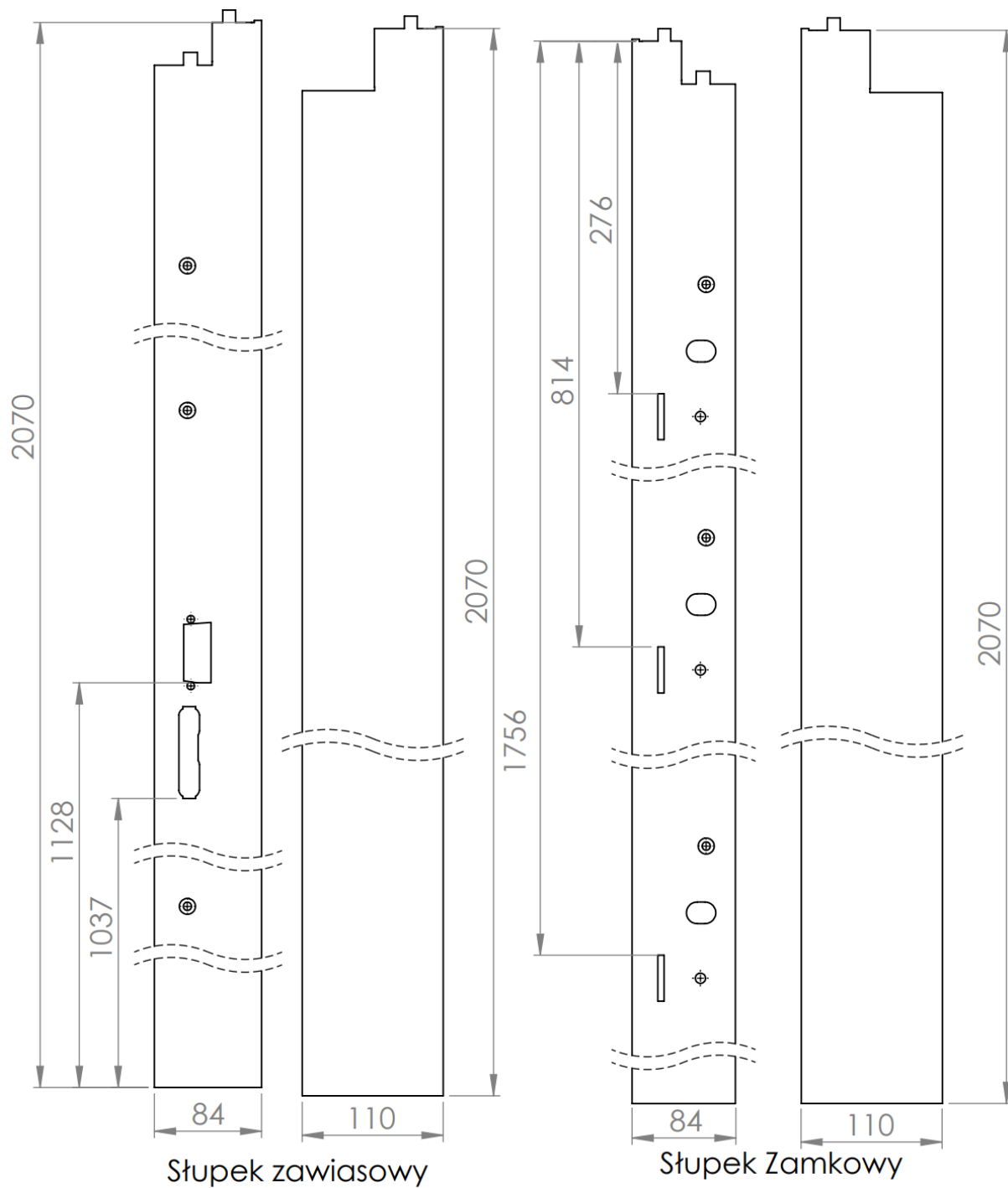
Rys. 16. Przekrój przygotowanych próbek od lewej: 1) Próbka C30S, 2) Próbka A600S
3) Próbka A1200S [opracowania własne]

3.2.3. Wykonane prototypy ościeżnicy

Na podstawie projektu profilu ościeżnicy wykonano dokumentację profilu zamkowego (projektując punkty ryglowe), zawiasowego (projektując punkty mocowania zawiasów) oraz naproże. Następnie z blach DX51D oraz 6061 o grubości 1,2 mm wykrojono na wykrawarce Trumpf TruPunch 1000 (Rys. 17), wykroje ościeżnic (Rys. 18).



Rys. 17. Proces wykrawania formatek profili ościeżnicowych



Rys. 18. Wykroje profili ościeżnicy drzwi [opracowania własne]

Po wykrojeniu formatki ościeżnicy, następnym kluczowym etapem procesu produkcji było precyzyjne gięcie blachy. Operacja ta odbywa się na krawędziarce VIMERCATI, współpracującej z robotem KUKA KR150 (Rys. 19), co zapewnia wysoką dokładność i powtarzalność procesu gięcia profilu zamkowego, nadproża i zawiasowego (Rys. 20). Automatyzacja tego etapu produkcji gwarantuje nie tylko najwyższą jakość wykonania, ale także optymalizację czasu pracy oraz redukcję ewentualnych błędów wynikających z ręcznej obróbki.

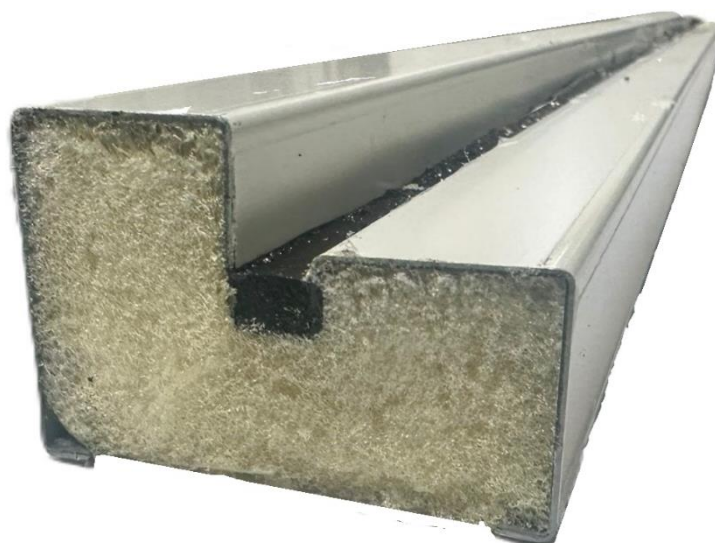


Rys. 19. Proces krawędziowania formatek ościeżnic. Krawędziarka VIMERCATI, KUKA KR150



Rys. 20. Krawędziowane profile ościeżnicy [opracowania własne]

Po zakończeniu procesu krawędziowania profile zostały umieszczone w specjalnie przygotowanej formie zapewniającej ich właściwe ułożenie i zbazowanie względem siebie. Następnie przystąpiono do aplikacji poliuretanu zastosowanego jako przekłada termiczna. Proces przeprowadzono metodą ręcznego spieniania z wykorzystaniem pneumatycznego mieszalnika. Dozowanie spienionego poliuretanu realizowano przy użyciu dyszy aplikacyjnej, która umożliwiała kontrolowane wprowadzenie materiału do rowka łączącego profile. Proces ten przebiegał etapowo, aby zapewnić równomierne rozprowadzenie substancji w rowku łączącym. Po utwardzeniu materiału (5 minut). Profil wypełniono poliuretanem o gęstości 33 kg/m^3 (Rys.21).



Rys. 21. Wypełniony poliuretanem profil ościeżnicy drzwiowej [opracowania własne]

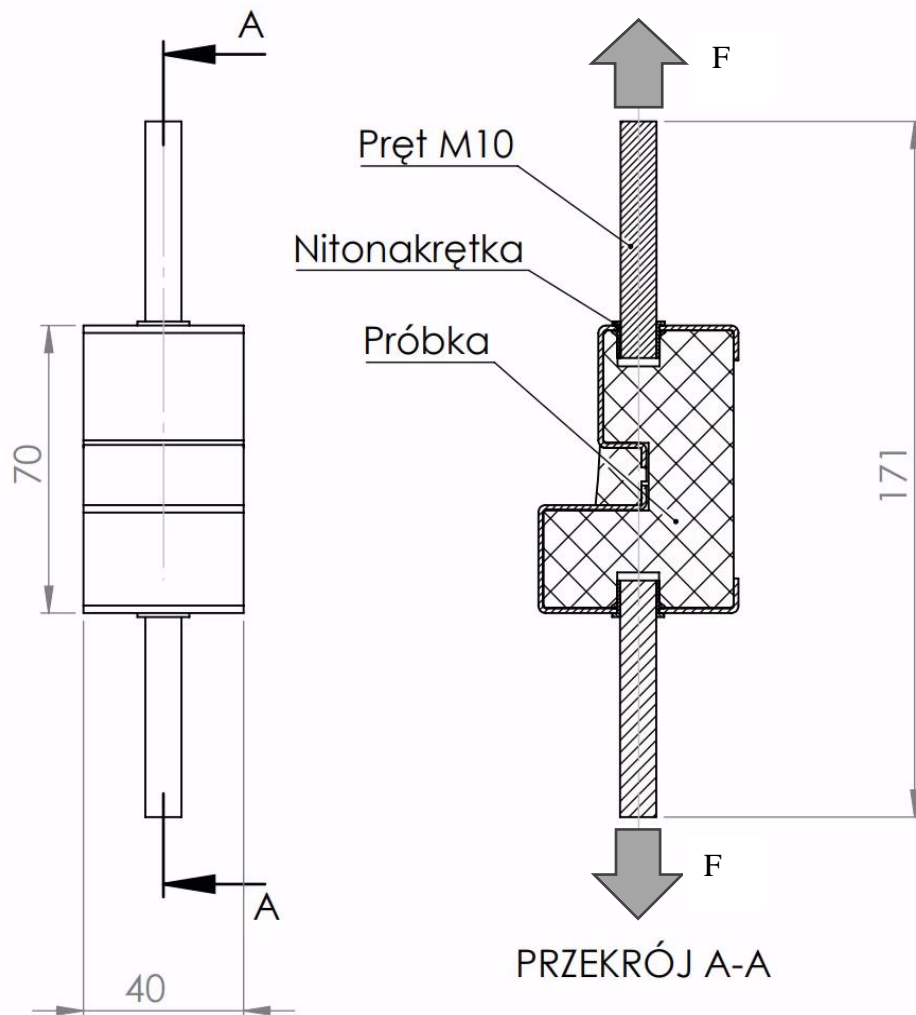
Następnie zmontowano wykonane profile słupka zamkowego, ryglowego i nadproża, po czym zamontowano złożoną ościeżnicę w ramie badawczej. Po zamontowaniu ościeżnicy w ramie badawczej, styki pomiędzy ramą a ościeżnicą uszczelniono przy użyciu silikonu w celu zapewnienia szczelności i wyeliminowania wpływu nieszczelności na wyniki badań. (Rys. 22).



Rys. 22. Złożone skrzydło z ościeżnicą w ramie badawczej

3.2.4. Przygotowanie próbek ościeżnicy do badań wytrzymałości na rozciąganie

Z profilu ościeżnicowego w koncepcji A1200S przygotowano próbki o szerokości 40 mm, wykorzystując w tym celu pilę taśmową. Analogiczne próbki wykonano również z profilu ościeżnicy, który był poddany badaniom obejmującym wielokrotne otwieranie i zamykanie skrzydła. Następnie, za pomocą wiertarki pionowej, wykonano w próbkach otwory montażowe, w których osadzono nitonakrętki pełniące funkcję symulowanego mocowania zawiasowego (Rys. 23). W kolejnym etapie badań w nitonakrętki wkręcono pręty gwintowane M10, co umożliwiło precyzyjne zamocowanie próbek w szczękach maszyny wytrzymałościowej.



Rys. 23. Przekrój poprzeczny próbki ościeżnicy [opracowania własne]

3.3. Metodyka badań

W badaniach przeprowadzono analizę własności fizycznych i mechanicznych wykonanych próbek i prototypów, badanie przenikalności termicznej wykonano z wykorzystaniem oprogramowania BISCO. Pozostałe badania, takie jak wytrzymałość ościeżnicy na rozciąganie, rozszerzalność termiczna, wodoszczelność oraz odporność na obciążenie wiatrem, przeprowadzono w laboratoriach Wydziału MT lub w macierzystej Firmie.

3.3.1. Badania przenikalności termicznej drzwi

Badanie przenikalności termicznej wykonano metodą obliczeniową z uwagi na dużą liczbę projektowanych konstrukcji oraz możliwość wykonania obliczeń zgodnie z obowiązującą normą. Badania rozpoczęto od wykonania symulacji komputerowej w programie BISCO. Moduł ten, oparty na metodzie elementów skończonych, jest przeznaczony do obliczania współczynników przenikalności termicznej przekrojów ram okien i drzwi. W celu wyznaczenia współczynnika przenikalności termicznej analizowanych konstrukcji, na podstawie sparametryzowanych i zamodelowanych przekrojów drzwi, wykonano symulację rozkładu temperatur w przekroju. W tabeli 7 przedstawiono liniowy współczynnik przenikalności termicznej materiałów oraz w tabeli 8 przyjęte warunki brzegowe, zgodnie z parametrami użytymi w obliczeniach, sparametryzowanymi na podstawie normy [9,11,80-84].

$$U_f = \frac{L_f^{2D} - U_p * b_p}{b_f}$$

gdzie:

U_f - współczynnik przenikania ciepła przez ramę [W/(m²*K)];

L_f^{2D} - liniowy współczynnik ciepła ramy, obliczony przy użyciu dwuwymiarowej analizy elementów skończonych;

U_p - współczynnik przenikania ciepła przez panel drzwi;

b_p - pole powierzchni panelu;

b_f - pole powierzchni ramy.

Tabela 7. Tabela współczynników przenikalności termicznej materiałów użytych do badań [11]

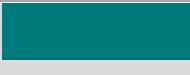








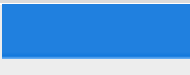
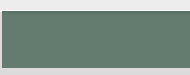
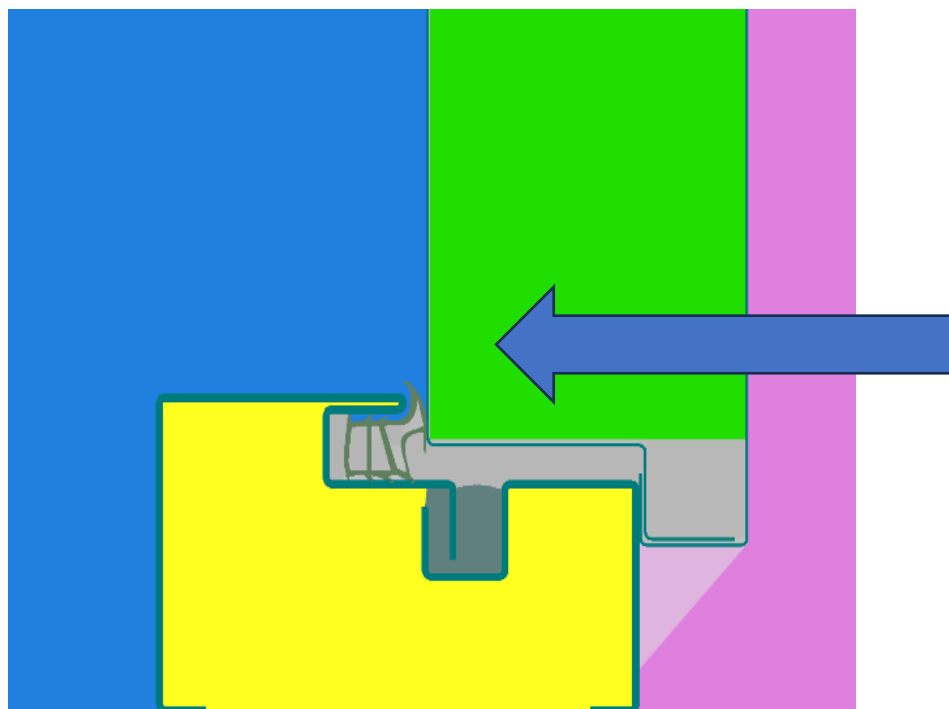
Material	Liniowy współczynnik przenikalności termicznej [W/mK]	Kolor użyty na przekroju obliczeniowym
Stal	50	
Aluminium	160	
Poliuretan 33kg/m³	0,022	
Poliuretan 600kg/m³	0,12	
Poliuretan 1200kg/m³	0,25	
Poliuretan 33kg/m³	0,022	
Uszczelka EPDM	0,25	
Wypełnienie skrzydła drzwiowego EPS	0,04	

Tabela 8. Warunki brzegowe przyjęte w badaniach [11]

Warunki brzegowe	Liniowy współczynnik przenikalności termicznej [W/mK]	Kolor użyty na przekroju obliczeniowym
Powietrze wewnętrzne w temperaturze 22°C	7,7	
Powietrze zewnętrzne w temperaturze 0°C	25	
Powietrze w pustkach termicznych	Określone przez program	

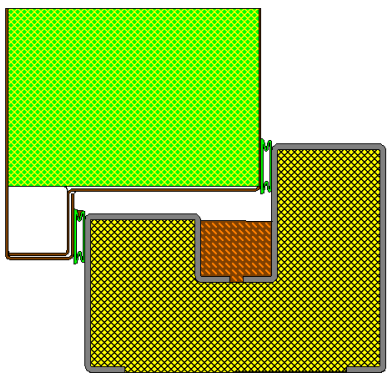
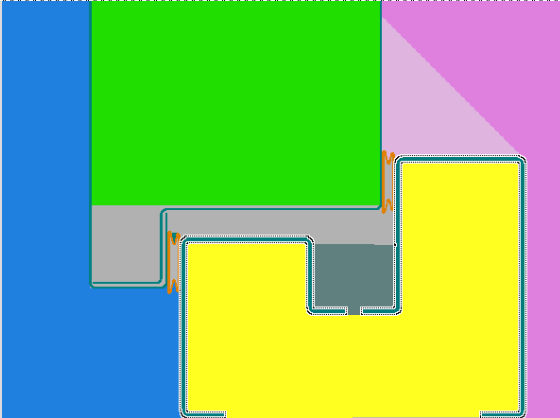
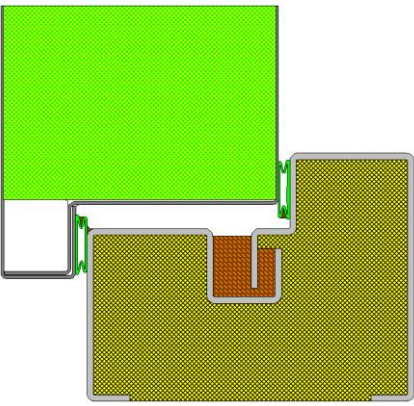
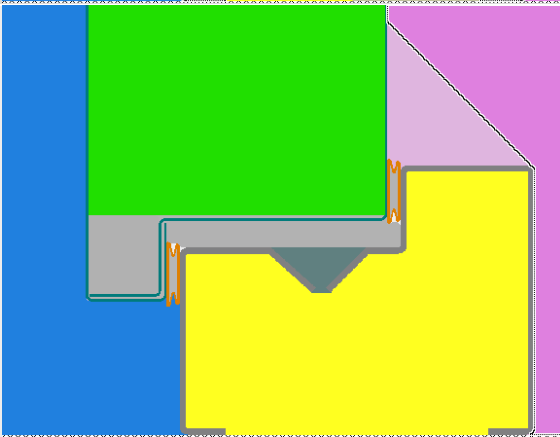
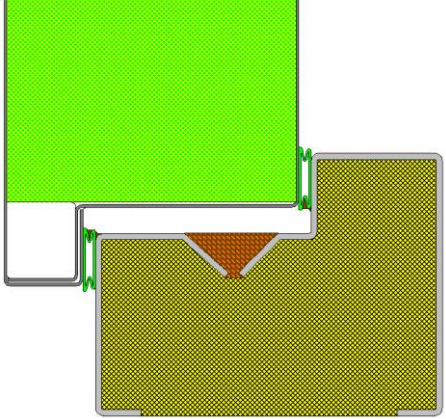
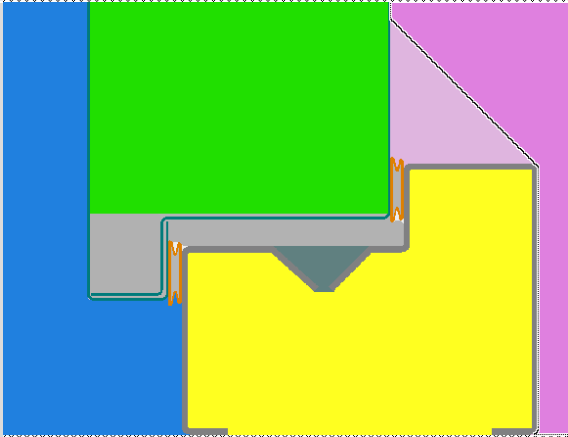
Niebieska strzałka na rysunku 24 przedstawia kierunek przepływu ciepła. Kolory użyte do oznaczenia poszczególnych materiałów oraz warunków brzegowych przekroju odpowiadają oznaczeniom przedstawionym w tabelach 7 i 8 oraz korelują ze schematem przekroju poprzecznego ościeżnicy [85].



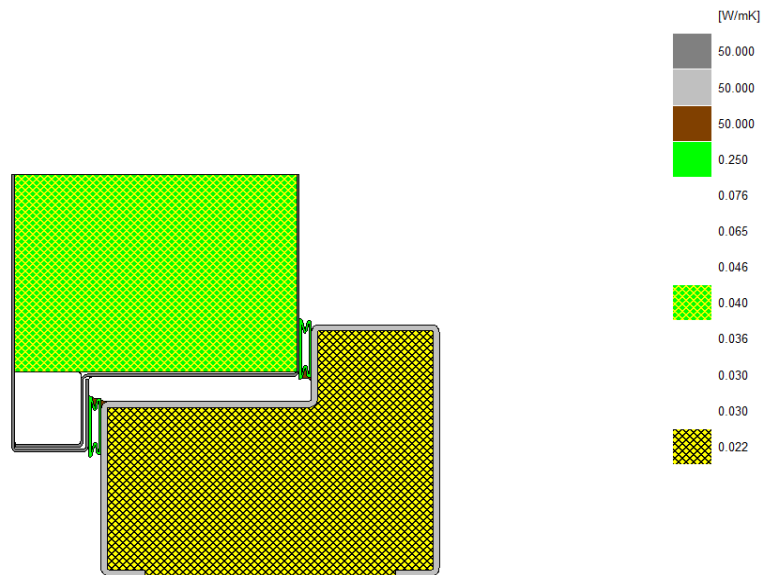
Rys. 24. Kierunek przepływu ciepła na przekroju ościeżnica-skrzydło [opracowania własne]

Przeprowadzone symulacje komputerowe umożliwiły identyfikację optymalnego rozwiązania konstrukcyjno-materiałowego, które pozwoliło na opracowanie modelu systemu spełniającego założone kryteria. Głównym kryterium stanowi wartość współczynnika przenikania ciepła poniżej $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$. W tabeli 9 przedstawiono przekroje wykonane z materiałów opisanych w tabeli 7, zwizualizowane za pomocą oprogramowania BISCO.

Tabela 9. Przekroje z przypisanymi materiałami

Typ przekroju u	Przekrój złożenia profili ościeżnicy i skrzydła	Przekrój złożenia profili ościeżnicy i skrzydła z przypisanym materiałem
TYP A		
TYP B		
TYP C		

W celu porównania wyników obliczeń przenikalności termicznej koncepcji z przekładką termiczną wykonano analizę numeryczną aktualnie produkowanego przekroju ościeżnicy (Rys. 25) wykonanej z blachy stalowej DX51D oraz stopu aluminium 6061.



Rys. 25. Przekrój poprzeczny ościeżnicy stalowej [opracowania własne]

W celu wyznaczenia współczynników przenikalności termicznej drzwi U_d obliczono współczynniki przenikalności termicznej przekrojów próg-skrzydło oraz panel. Obliczenia wykonano dla drzwi o wymiarach 1000x2080, typowego rozmiaru stosowanego w budownictwie jednorodzinny. Pomiar współczynnika przenikalności dla drzwi wykonano zgodnie wg wzoru [9,11]:

$$U_d = \frac{\sum A_P U_P + \sum A_F U_F}{\sum A_t \sum A_F}$$

w którym:

U_D - współczynnik przenikania ciepła drzwi;

A_P - pole powierzchni panelu nieprzezroczystego drzwi;

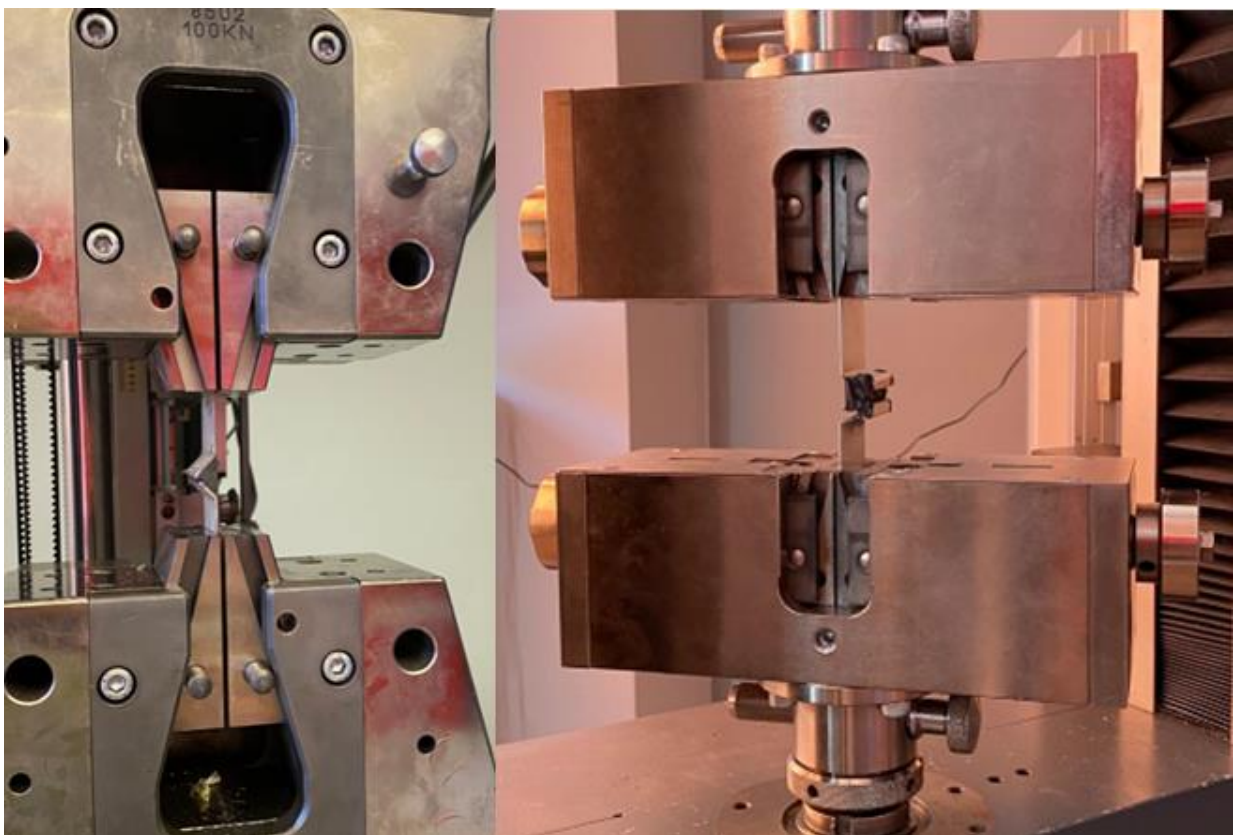
A_F -pole powierzchni ramy;

U_P - współczynnik przenikania ciepła panelu nieprzezroczystego drzwi;

U_F - współczynnik przenikania ciepła ramy.

3.3.2. Wpływ zastosowania przekładki na wytrzymałość na rozciąganie przekroju poprzecznego profilu ościeżnicy

Celem badania było porównanie wpływu zmiany gęstości poliuretanowej przekładki termicznej oraz zmiany kształtu połączenia ościeżnicy na wytrzymałość połączenia (Rys. 25). Do badań zastosowano próbki o wymiarach 40 x 180 mm z wypełnieniem poliuretanowym o gęstości 33, 600 oraz 1200kg/m³. Badania wykonano na próbkach ze stali ocynkowanej DX51 oraz poliuretanu. Nie badano próbek aluminiowo-poliuretanowych, biorąc pod uwagę, że celem weryfikacji było wyłącznie określenie wytrzymałości połączenia poliuretanowego.

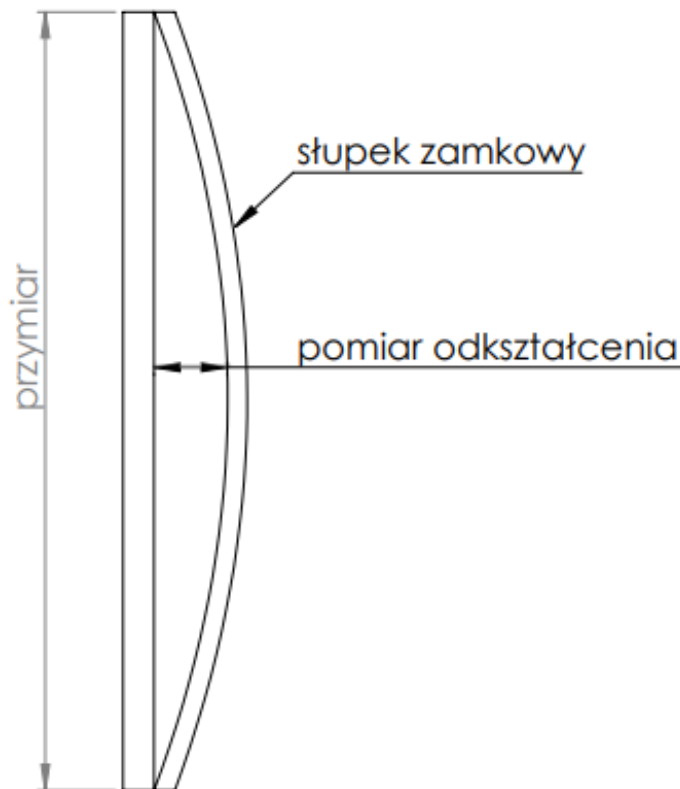


Rys. 26. Próba rozciągania połączeń

Badania wytrzymałości na rozciąganie wykonano na maszynie wytrzymałościowej ZWICK Z100 zgodnie z normą [86]. Każdy typ przekroju badano trzykrotnie. Zadana siła wstępna wynosiła 2 MPa.

3.3.3. Badanie rozszerzalności termicznej zaprojektowanego profilu

W celu określenia właściwości użytkowych profili ościeżnicowych przeprowadzono badania rozszerzalności termicznej zaprojektowanego profilu. Przygotowano cztery próbki ościeżnicy, które wytypowano na podstawie uprzednio wykonanych wyników badań wytrzymałości na rozciąganie. Badanie miało na celu symulację warunków, w jakich mogą znajdować się drzwi zewnętrzne podczas typowego letniego dnia w Polsce, kiedy są narażone na bezpośrednie działanie promieni słonecznych i mogą nagrzewać się do temperatury około 60°C. Aby wiernie odwzorować warunki słoneczne, skonstruowano stanowisko pomiarowe, w którym zewnętrzną stronę drzwi poddano nagrzewaniu, używając lamp UV umieszczonych w odległości 80 cm od powierzchni drzwi. Podczas eksperymentu drzwi były nagrzewane do temperatury 64°C, co miało na celu nie tylko odzwierciedlenie rzeczywistych warunków, ale także zapewnienie niewielkiego zapasu bezpieczeństwa, uwzględniającego potencjalne wahania intensywności nagrzewania w realnym środowisku. Czas ekspozycji wynosił 4 godziny, co odpowiada średniemu czasowi narażenia drzwi na intensywne działanie promieni słonecznych w ciągu dnia.

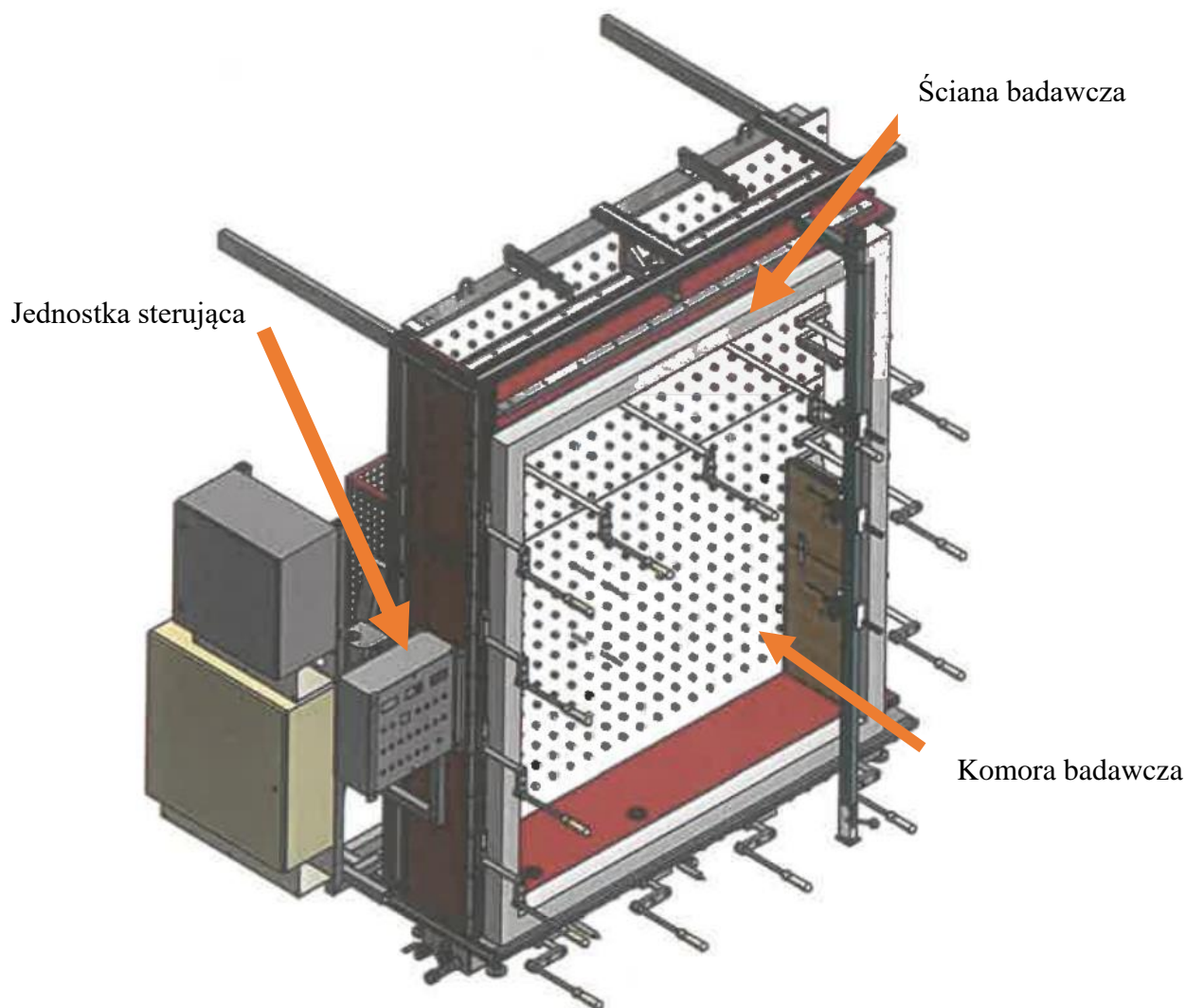


Rys. 27. Schemat pomiaru wybożenia słupka ościeżnicy [opracowania własne]

Pomiar odkształcenia profilu ościeżnicy przeprowadzono w temperaturze 24, 44 oraz 64°C. Badania wykonano na próbkach słupka zamkowego ościeżnicy A600S, A1200S, A600A, A1200S, wykorzystując przymiar wzorcowy o długości 2070 mm, który przykładano wzdłuż analizowanego elementu (Rys.27). W środkowym punkcie słupka zamkowego wykonano trzykrotny pomiar wybożenia za pomocą szczelinomierza o zakresie pomiarowym 0,1–2 mm, a uzyskane wyniki uśredniono. Po każdej serii pomiarowej przeprowadzono próbne otwarcie i zamknięcie skrzydła drzwiowego w celu weryfikacji funkcjonalności konstrukcji.

3.3.4. Badania wodoszczelności, obciążenia na wiatr

Badania wodoszczelności, przepuszczalności powietrza, obciążenia na wiatr wykonano w komorze powietrzno-deszczowej (Rys. 28).



Rys. 28. Schemat ścianki badawczej [87]

Do ściany badawczej komory zamontowano próbkę drzwi (Rys. 27). Badanie wodoszczelności polegało na równomiernym natryskiwaniu wodą wewnętrznej strony drzwi umieszczonych na ścianie badawczej. Ilość wody użytej w metodzie A to $2\text{l}/\text{min}/\text{m}^2$, a w metodzie B $1\text{l}/\text{min}/\text{m}^2$ [15]. Badanie umożliwia określenie wodoszczelności zaprojektowanej konstrukcji zarówno dla drzwi otwieranych na zewnątrz jak i do środka budynku.

Badanie odporności na wiatr polega na stopniowym obciążeniu próbki drzwi (Rys. 29) narastającym ciśnieniem i sprawdzeniu ugięcia skrzydła lub ościeżnicy [13].



Rys. 29. Zmontowana próbka drzwi do badań wodoszczelności

3.3.5. Odporność na wielokrotne otwieranie i zamykanie drzwi

Celem badania jest ocena zdolności okien i drzwi do zachowania pełnej funkcjonalności po wielokrotnym otwieraniu i zamykaniu. Analiza obejmuje zarówno mechanizmy (zawiasy, regulacja języczka zamka), jak i elementy konstrukcyjne (ościeżnica, skrzydło drzwiowe).

Badanie przeprowadzono na drzwiach jednoskrzydłowych z samozamykaczem, zamontowanych na specjalnej ścianie badawczej. Przed rozpoczęciem testu drzwi zostały pięciokrotnie otwarte i zamknięte w celu weryfikacji ich prawidłowego działania [88].

Badanie rozpoczęto od pomiaru:

- masy ruchomego elementu (skrzydła drzwiowego);
- promienia i kąta obrotu krawędzi przymykowej skrzydła;
- pomiaru sił operacyjnych (siła lub moment potrzebny do przekręcenia klucza w zamku w kierunku zamykania i otwierania drzwi, siła lub moment obrotowy potrzebny do otwarcia drzwi przy użyciu klamki) [89];
- wielkości szczelin przylgowych;
- czasu zamykania ruchomego elementu skrzydła z udziałem samozamykacza.

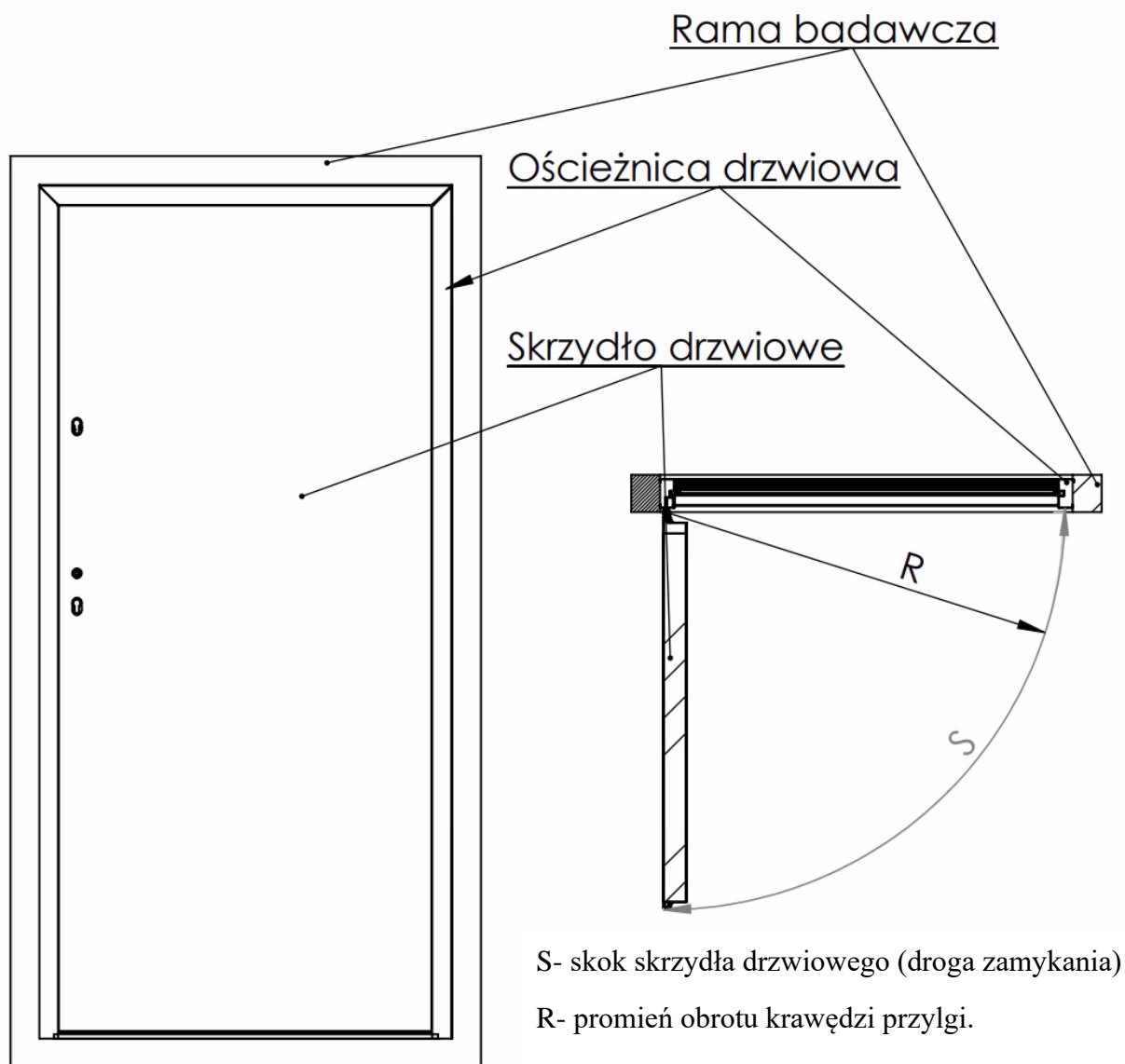
W trakcie badań (po 25%, 50% oraz 75% wykonanych cykli) sprawdzono:

- promień i kąt obrotu krawędzi przymykowej skrzydła;
- pomiar sił operacyjnych (czyli siłę lub moment potrzebny do przekręcenia klucza w zamku, w kierunku zamykania i otwierania drzwi, siła lub moment obrotowy potrzebny do otwarcia drzwi przy użyciu klamki)[89];

Po zakończeniu badania wykonano pomiary:

- masy ruchomego elementu (drzwi);
- promienia i kąta obrotu krawędzi przymykowej skrzydła;
- pomiaru sił operacyjnych (siła lub moment potrzebny do przekręcenia klucza w zamku, w kierunku zamykania i otwierania drzwi, siła lub moment obrotowy potrzebny do otwarcia drzwi przy użyciu klamki) [89];
- wielkości szczelin przylgowych;
- czasu zamykania ruchomego elementu skrzydła z udziałem samozamykacza.

Schemat badania odporności drzwi na wielokrotne otwieranie i zamykanie przedstawiono na Rys. 30.



Rys. 30. Schemat pomiaru skoku oraz promienia krawędzi obrotu przylgi [opracowania własne]

Skok skrzydła drzwiowego s (droga zamykania) obliczono wg wzoru:

$$s = \alpha \frac{2\pi R}{360} [mm]$$

gdzie:

α - kąt obrotu krawędzi przylgi skrzydła [$^{\circ}$];

R- promień obrotu krawędzi przylgi (szerokość przylgi mierzona od osi obrotu).

Prędkość zamykania skrzydła drzwiowego [v] została obliczona wg wzoru:

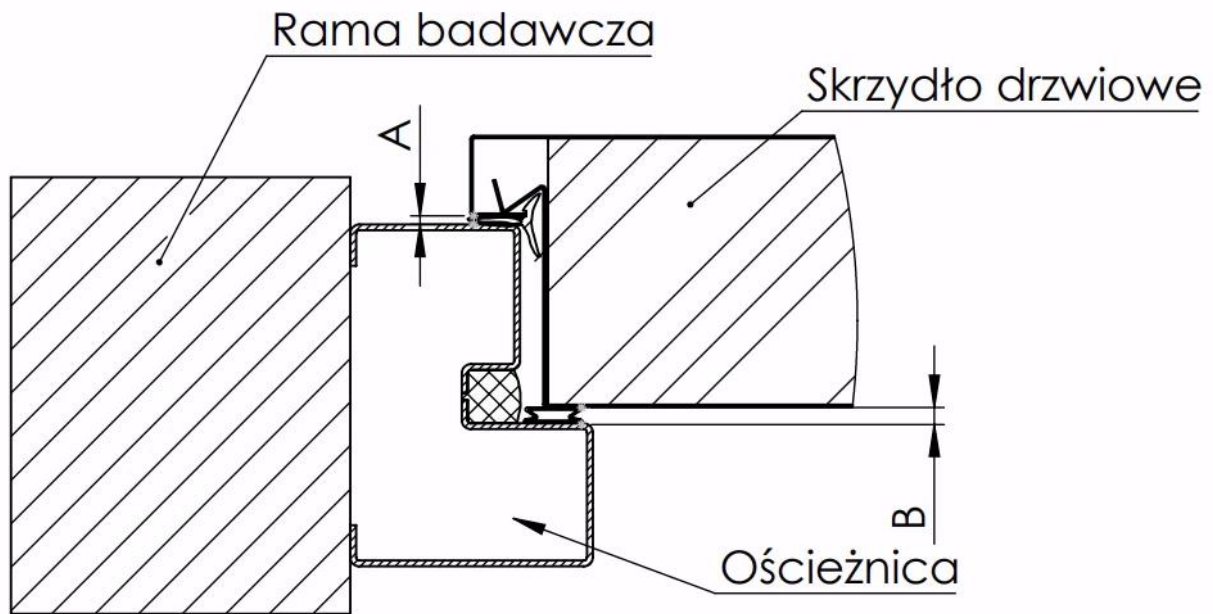
$$v = \frac{s}{t} \left[\frac{mm}{s} \right]$$

gdzie:

t- czas zamknięcia skrzydła drzwiowego [s];

Pomiar wielkości szczelin przylgowych.

Pomiary szerokości szczelin między skrzydłem i ościeżnicą wykonano w punktach A oraz B (Rys.31). Na każdym z boków skrzydła wykonano po trzy pomiary w odstępach nie większych niż 750mm, rozmieszczonych równomiernie po obwodzie skrzydła drzwiowego. Badania przeprowadzono dwukrotnie- przed rozpoczęciem i po zakończeniu cyklu obejmującego 100 000 operacji otwierania i zamykania skrzydła. Wyniki uzyskane przed oraz po zakończeniu cykli eksploatacyjnych porównano w celu oceny zmian szczelności konstrukcji [89].



Rys. 31. Szczeliny pomiarowe pomiędzy ościeżnicą a skrzydłem oznaczono literą A oraz B [opracowania własne]

Dane wejściowe do badań odporności na wielokrotne otwieranie i zamykanie przedstawiono w tabeli 10.

Tabela 10. Dane wejściowe do badań odporności na wielokrotne otwieranie i zamykanie

Liczba wykonanych cykli	100 000
Masa skrzydła przed badaniem/po badaniu	M=34,3/ 34,3kg
Ciężar skrzydła drzwiowego przed badaniem/ po badaniu	G=336,48/ 336,48N
Prędkość zamykania skrzydła drzwiowego przed i po badaniu	V=0,35m/s
Promień i kąt obrotu krawędzi przylgowej skrzydła po wykonaniu 25% cykli	R ₁ =980mm A=90°
Promień krawędzi przylgowej skrzydła po wykonaniu 50% cykli	R ₂ =980mm
Promień krawędzi przylgowej skrzydła po wykonaniu 75% cykli	R ₂ =980mm
Promień i kąt obrotu krawędzi przylgowej skrzydła po wykonaniu 100% cykli	R ₁ =980mm A=90°
Skok skrzydła przed badaniem/ po badaniu	S=1711/1711mm

3.3.6. Przydatność materiału przekładki termicznej

Przydatność materiału przekładki termicznej ocenia się na podstawie szeregu badań, które mają na celu określenie jego właściwości mechanicznych oraz trwałości w zróżnicowanych warunkach środowiskowych. W ramach tych badań analizuje się m.in. zachowanie materiału po zanurzeniu w wodzie, ekspozycji na działanie wilgoci [90].

Badania właściwości materiału po zanurzeniu w wodzie obejmują początkowe określenie wytrzymałości na rozciąganie poprzeczne w temperaturze pokojowej (RT). W cel wyznaczenia wytrzymałości na rozciąganie użyto próbki opisane w rozdziale 3.2.4. Szybkość rozciągania wynosiła 5mm/min. Następnie kolejne 3 próbki ościeżnicy umieszczono w wodzie o temperaturze (23 ± 2)°C na okres 1000 godzin [90]. Po zakończeniu ekspozycji próbki przechowywano przez 24 godziny w temperaturze pokojowej. Badania właściwości materiału po zanurzeniu w wodzie obejmują początkowe określenie wytrzymałości na rozciąganie poprzeczne w temperaturze pokojowej. Wartość wytrzymałości na rozciąganie każdej próbki do badań powinna być obliczana według następującego wzoru:

$$Q = \frac{F_{max}}{l}$$

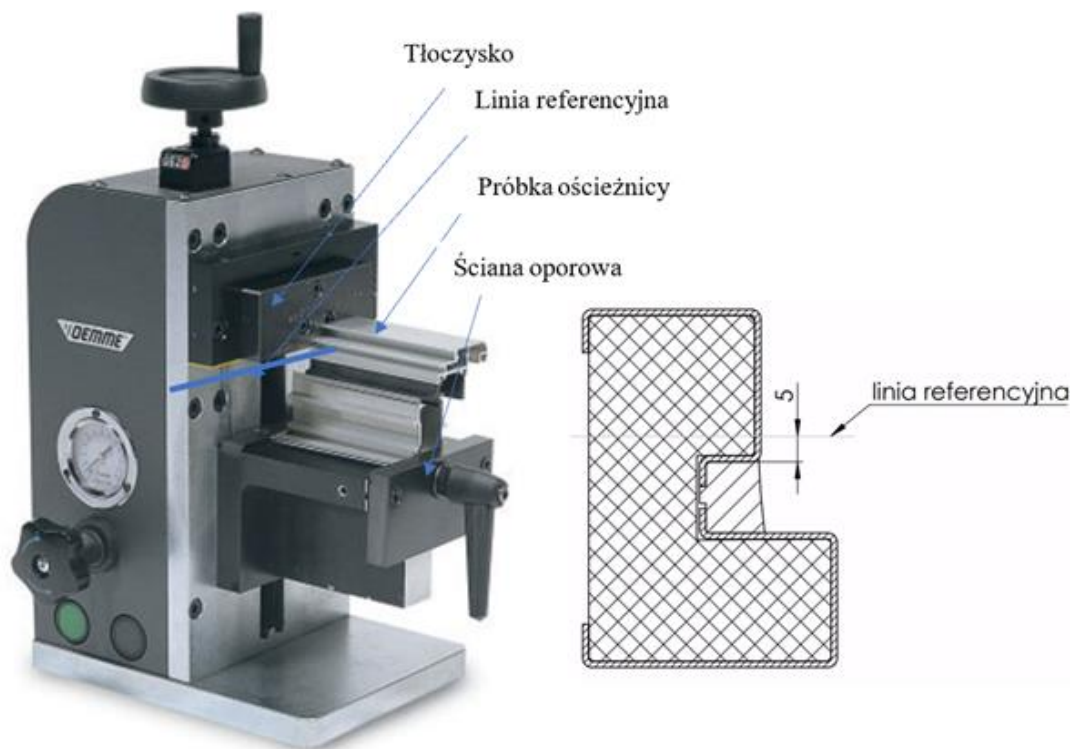
gdzie:

- Q – wytrzymałość na rozciąganie (N/mm);
- F_{\max} – maksymalne obciążenie rozciągające (N);
- l – długość próbki do badań (mm).

3.3.7. Wytrzymałość na ścinanie

Badanie wytrzymałości na ścinanie pozwala na ocenę zdolności połączenia między metalowymi elementami profilu i poliuretanową przekładką do przenoszenia obciążeń, co ma istotne znaczenie dla bezpieczeństwa oraz trwałości użytkowania. W celu wykonania badań wytrzymałościowych na ścinanie wzdłużne przygotowano trzy próbki profilu ościeżnicy o długości 100mm [90].

W celu wyznaczenia wytrzymałości na ścinanie T , umieszczono próbkę zmontowaną pomiędzy ścianą oporową na tłoczysku w urządzeniu badawczym (Rys. 32).



Rys. 32. Urządzenie badawcze OEMME AS250M/ Przekrój próbki badanej [opracowania własne]

Siły powinny być przenoszone do kształtownika przez tłoczysko, która zapewnia równomierne rozłożenie obciążenia na przekrój profilu. Tłoczysko nie może mieć kontaktu z przekładką termiczną.

Wartość wytrzymałości na ścinanie każdej próbki obliczono wg wzoru [69]:

$$T = \frac{F_{max}}{l}$$

gdzie:

T- wytrzymałość na ścinanie (N/mm);

F_{max} – maksymalne obciążenie ścinające (N);

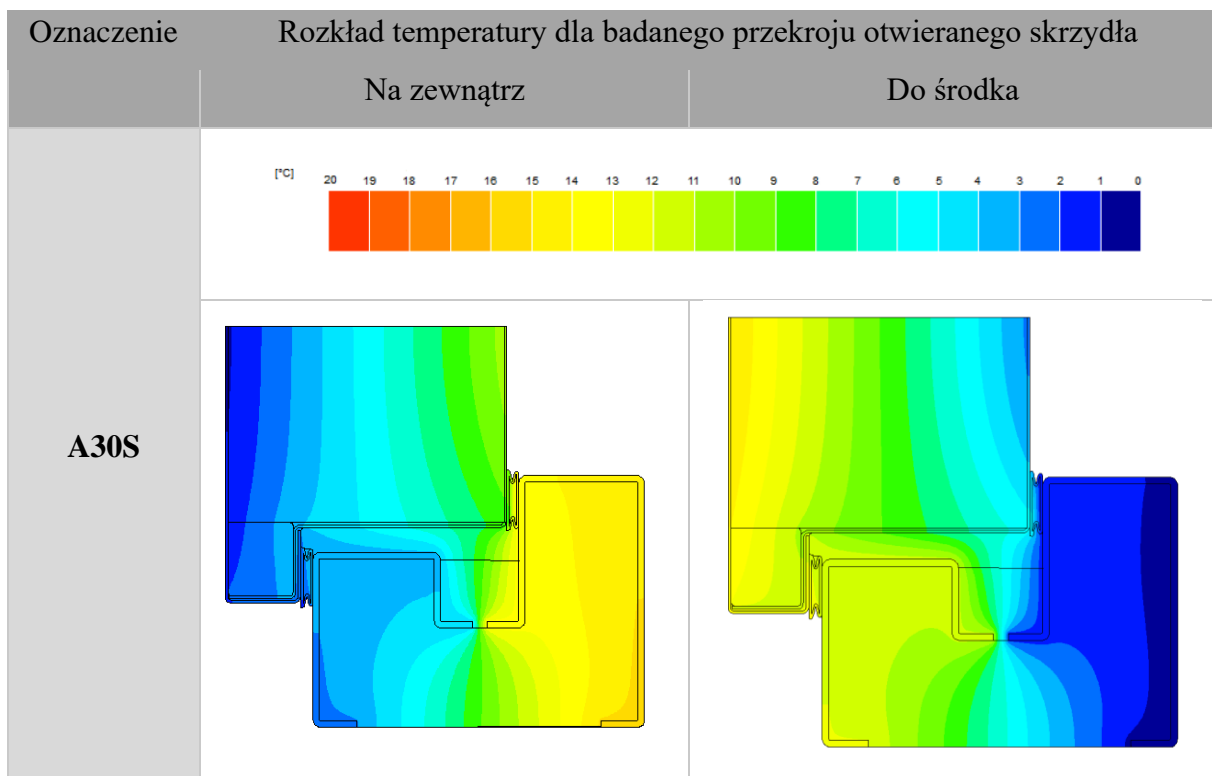
l- długość próbki do badań (mm).

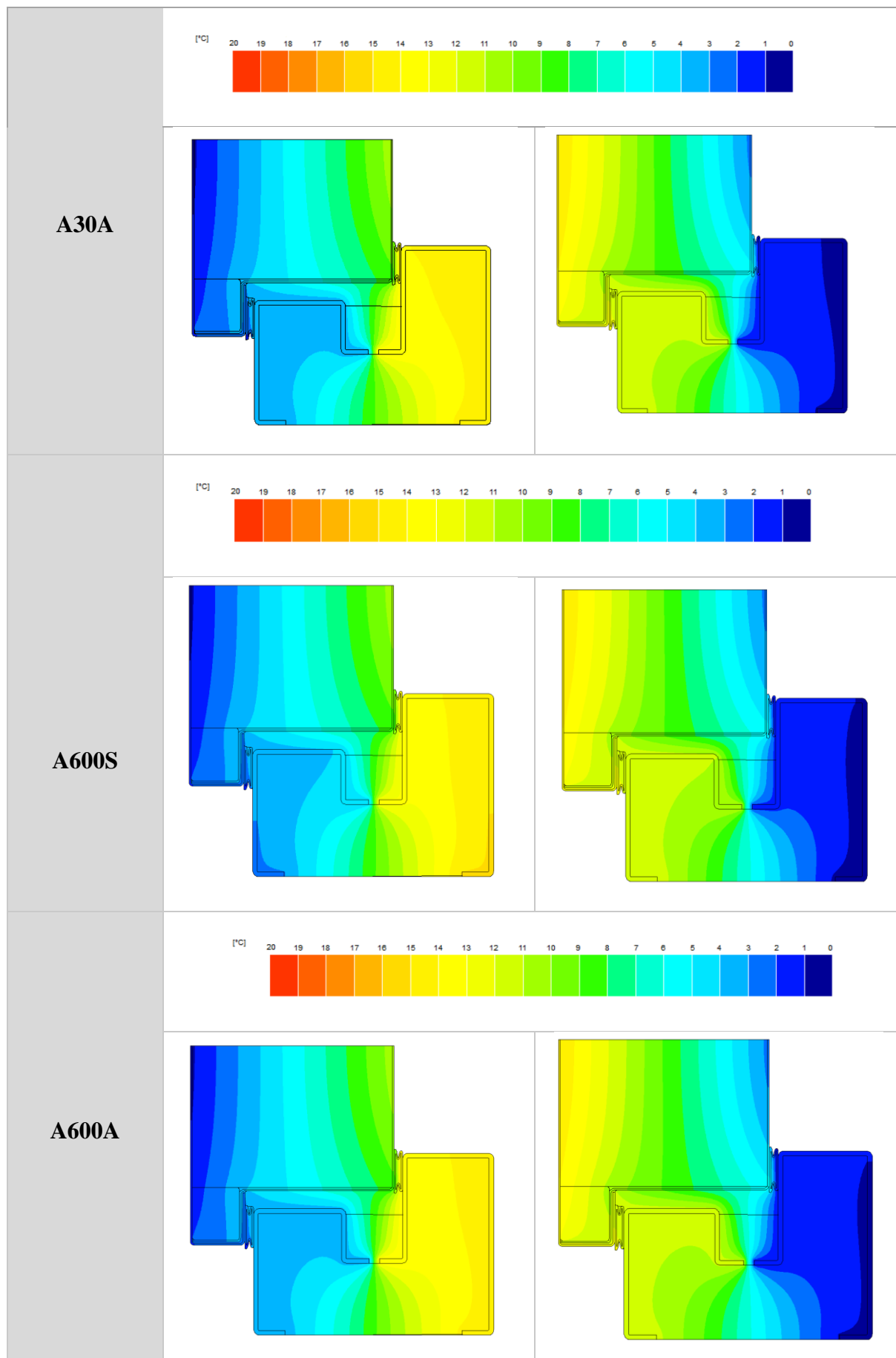
4. Wyniki badań i ich omówienie

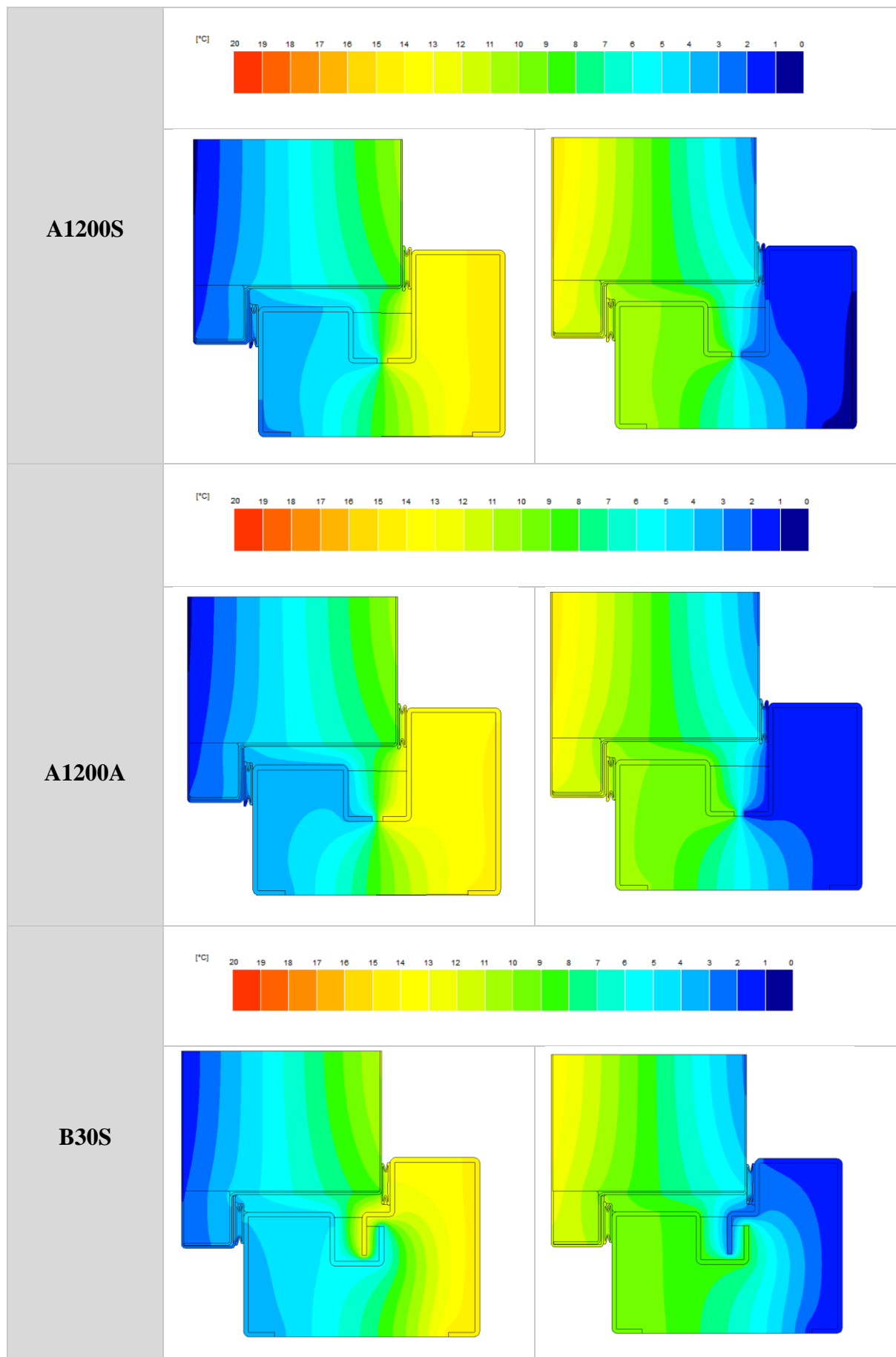
4.1. Badania przenikalności termicznej drzwi

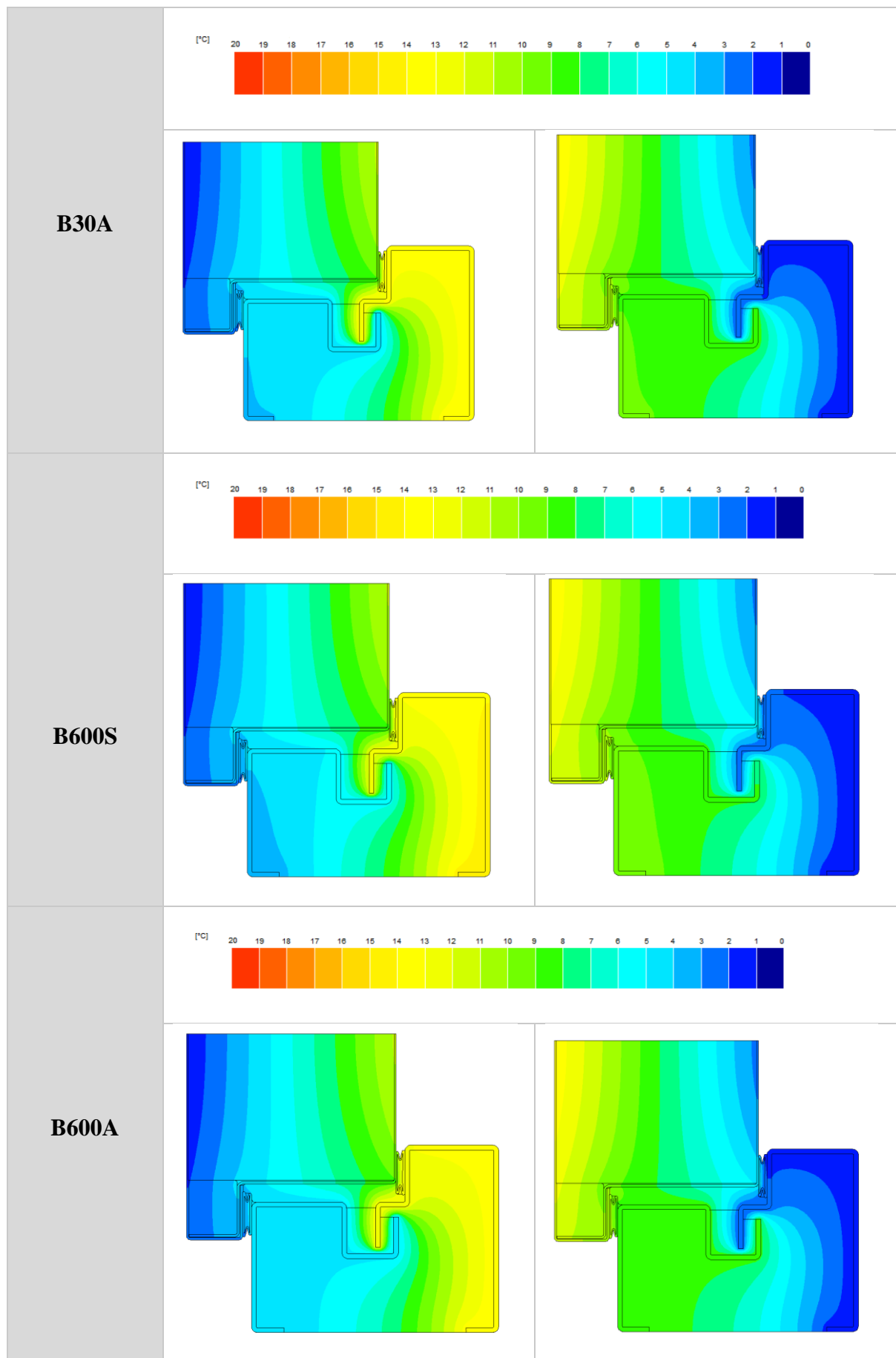
Celem analizy przenikalności termicznej było określenie parametrów przenikania ciepła U_f dla zaprojektowanych koncepcji ościeżnic oraz na ich podstawie, wyznaczenie współczynnika przenikalności termicznej drzwi U_d . W celu szybszej i wielopłaszczyznowej analizy różnych wariantów materiałowo-konstrukcyjnych, pierwszy etap badań wykonano z wykorzystaniem analizy numerycznej przy użyciu programu BISCO. Obliczenia przekrojów wskazały, które z zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych zapewniają wartość współczynnika przenikania ciepła na poziomie poniżej **1,3 W/m²K**, (zgodnie z obowiązującym rozporządzeniem), co jednocześnie potwierdza ich efektywność w kontekście izolacyjności termicznej i zgodności z wymaganiami regulacyjnymi. W tabeli 11 przedstawiono rozkład temperatur w przekrojach poprzecznych analizowanych koncepcji. Zakres temperatur został określony od 0 do 20°C zgodnie z normą [10].

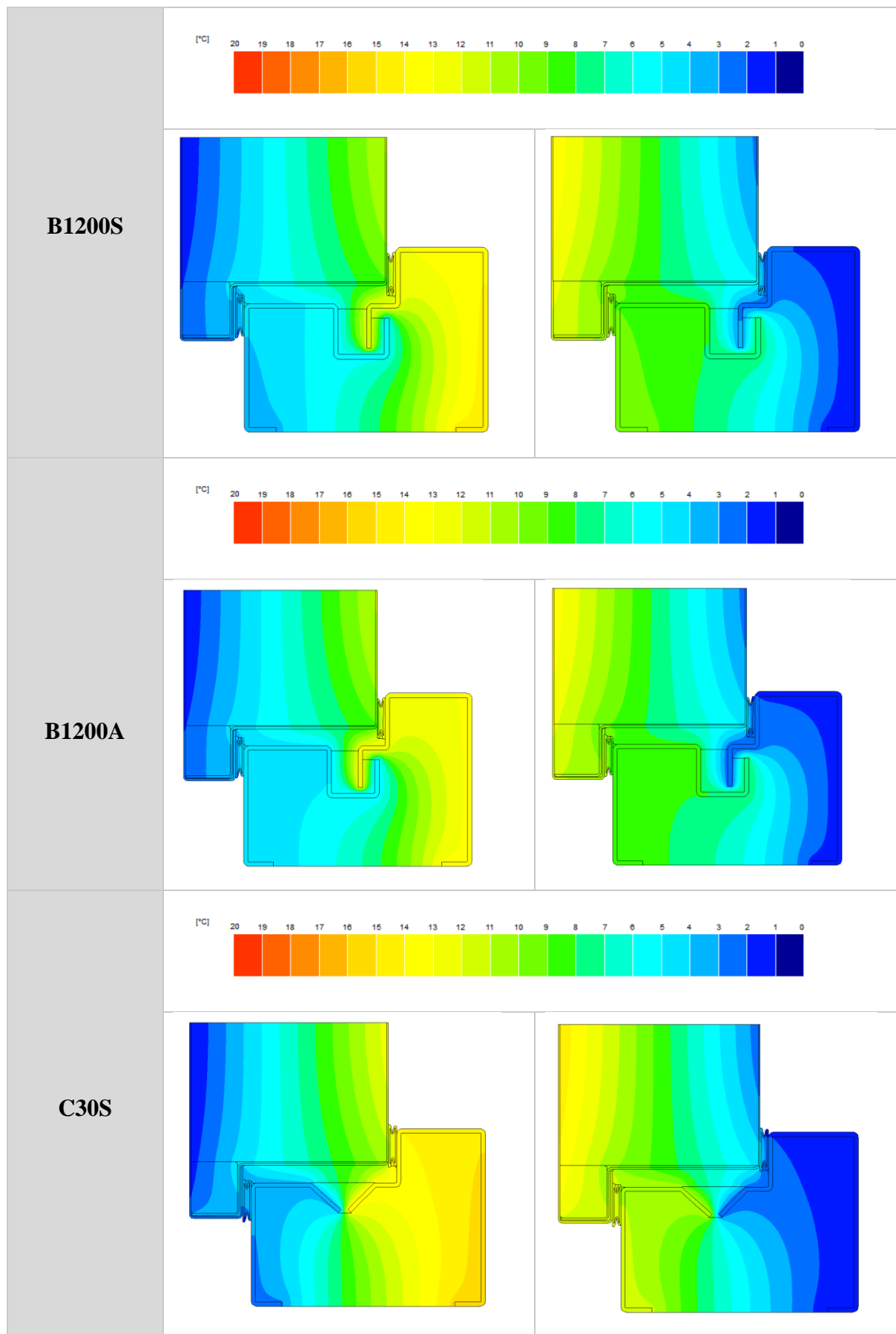
Tabela 11. Rozkłady temperatury zaprojektowanych przekrojów dla drzwi otwieranych na zewnątrz i do środka



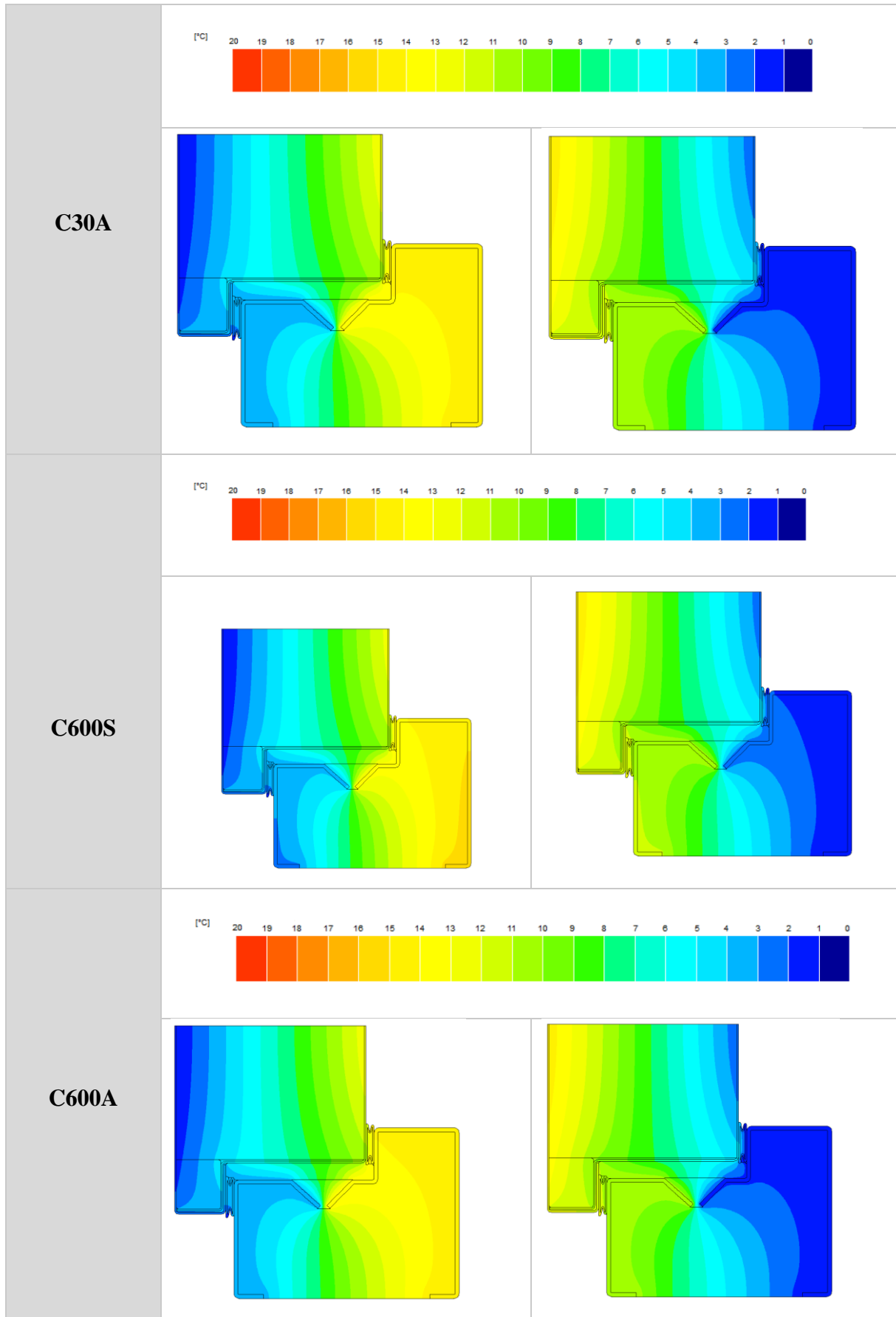


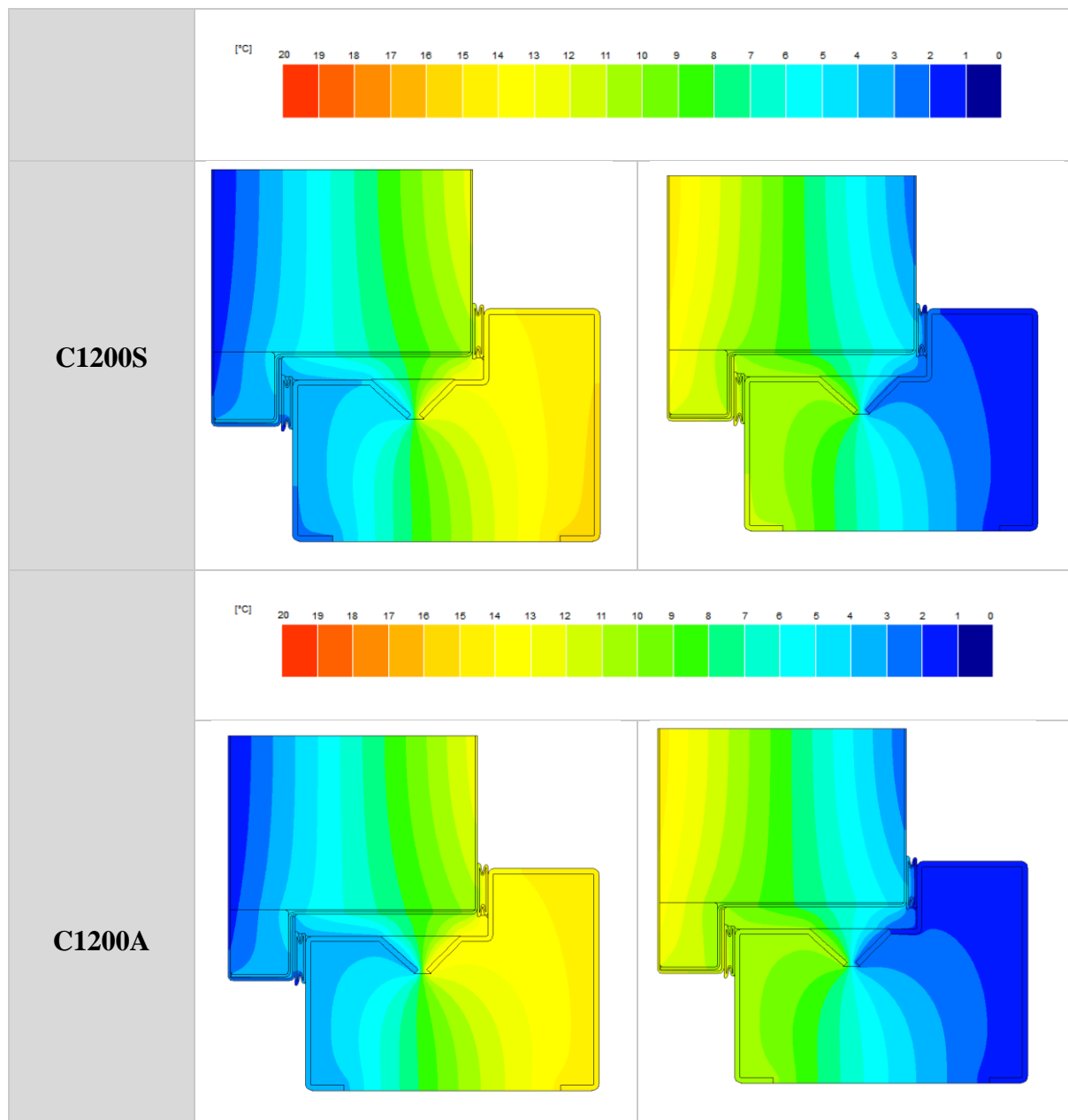






Badania własności użytkowych nowo zaprojektowanej ościeżnicy o obniżonym współczynniku przenikalności termicznej





Poniżej przedstawiono zestawienie wyników przenikalności termicznej dla przekrojów ościeżnicy U_f otwieranych do wewnątrz oraz na zewnątrz (Tabela 12).

Tabela 12. Zestawienie wyników analizy przenikalności termicznej dla przekrojów ościeżnica-skrzydło

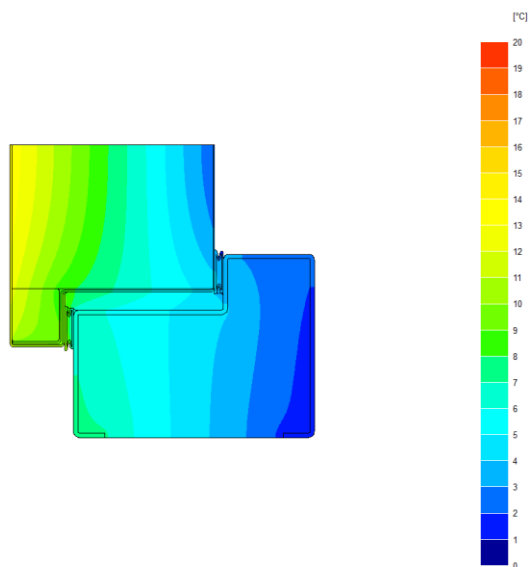
Typ ościeżnicy [W/(m ² ·K)]						
	A30S	A30A	A600S	A600A	A1200S	A1200A
Otwierane nazew.	2,886	3,01	2,92	3,051	3,337	3,64
Otwierane do wew.	2,928	2,995	2,944	3,027	3,29	3,456

Typ ościeżnicy [W/(m ² ·K)]						
	B30S	B30A	B600S	B600A	B1200S	B1200A
Otwierane nazew.	3,795	3,994	3,828	4,091	3,973	4,508
Otwierane do wew.	3,436	3,522	3,455	3,6	3,990	4,470
Typ ościeżnicy [W/(m ² ·K)]						
	C30S	C30A	C600S	C600A	C1200S	C1200A
Otwierane nazew.	2,942	3,021	2,97	3,058	3,421	3,605
Otwierane do wew.	3,198	3,338	3,241	3,391	3,397	3,701

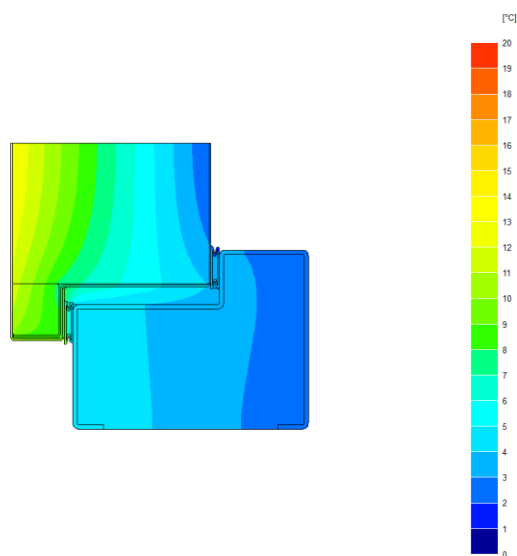
Na podstawie otrzymanych wyników symulacji numerycznej, przedstawionych w tabeli 12, stwierdzono, że wraz ze wzrostem gęstości poliuretanu rośnie wartość współczynnika U_f , co bezpośrednio wynika z wyższego współczynnika przenikalności termicznej poliuretanu. Różnice te jednak nie są na tyle istotne, aby na tym etapie badań wykluczyć którykolwiek z zastosowanych typów poliuretanu. Analizując wyniki pod kątem rodzaju profilu ościeżnicy, zauważono, że dla kształtów ościeżnic A i C, z uwagi na pozycjonowanie przekładki na środku przekroju (oznaczonej numerem 1 odpowiednio na Rys. 13 i 15), osiągnięto zbliżone wartości U_f , zarówno dla drzwi otwieranych na zewnątrz, jak i do wewnątrz. W przypadku kształtu B obliczono, że współczynnik U_f dla drzwi otwieranych do wewnątrz jest o 10-12% niższy w porównaniu współczynnika dla drzwi otwieranych na zewnątrz. Jest to związane z kształtem profili, które zachodzą do wewnątrz przekroju kompozytu, generując dodatkowe promieniowanie ciepłe wewnątrz profilu. W celu porównania wyników oraz oceny zasadności zastosowanych koncepcji przekładki termicznej, przeprowadzono analizę numeryczną aktualnie produkowanego profilu ościeżnicy, wykorzystując stosowane materiały, tj. stal DX51D oraz stop aluminium 6061. Obliczone współczynniki U_f zostały przedstawione w tabeli 13. Na podstawie analizy stwierdzono, że zastosowanie innowacyjnej koncepcji eliminacji mostka termicznego za pomocą poliuretanowej przekładki termicznej pozwoliło obniżyć współczynnik przenikalności cieplnej ościeżnicy nawet o 50% w porównaniu do współczynnika przenikalności cieplnej tradycyjnej ościeżnicy stalowej.

Tabela 13. Współczynniki przenikalności typowej ościeżnicy wykonanej ze stali i stopu aluminium 6061

Material	Drzwi otwierane na zewnątrz [W/(m ² ·K)]	Drzwi otwierane do środka [W/(m ² ·K)]
Stal DX51D	$U_f=4,54$	$U_f=3,9$
Aluminium 6061	$U_f=4,83$	$U_f=4,36$



Rys. 33. Rozkład temperatur dla ościeżnicy stalowej



Rys. 34. Rozkład temperatur dla ościeżnicy aluminiowej

Na podstawie porównania rozkładu temperatur w przekrojach profili (Tabela 11) z wynikami przedstawionymi na rysunkach 33 i 34 można stwierdzić, że zastosowana przekładka termiczna istotnie zmniejsza zarówno przewodzenie, jak i promieniowanie ciepłe

w elementach stalowych oraz aluminiowych. W przypadku braku materiału izolacyjnego na przekroju poprzecznym ościeżnicy metalowej elementy wykazują wysokie przewodnictwo cieplne, co powoduje znaczne straty energii cieplnej na powierzchni drzwi. Proces ten skutkuje szybkim wychładzaniem się wewnętrznych warstw ościeżnicy oraz kondensacją wilgoci co negatywnie wpływa na efektywność energetyczną całego systemu.

Zastosowanie przekładki termicznej skutkuje wyraźnym obniżeniem temperatury metalu, co potwierdza skuteczność izolacji w ograniczeniu przewodzenia ciepła. Jednocześnie, redukcja emisji promieniowania cieplnego prowadzi do znacznego zmniejszenia strat energii, co bezpośrednio przekłada się na poprawę parametrów izolacyjności termicznej i wzrost efektywności energetycznej drzwi w porównaniu do konstrukcji bez przekładki termicznej.

Tabela 14. Zestawienie współczynników przenikalności termicznej dla drzwi (Ud).

Oznaczenie koncepcji	Kierunek otwierania drzwi	
	Drzwi otwierane do wewnątrz [$W/m^2 \cdot K$]	Drzwi otwierane na zewnątrz [$W/m^2 \cdot K$]
A30S	1,143	1,150
A30A	1,165	1,162
A600S	1,138	1,153
A600A	1,172	1,168
A1200S	1,222	1,214
A1200A	1,226	1,244
B30S	1,303	1,240
B30A	1,339	1,255
B600S	1,309	1,243
B600A	1,356	1,269
B1200S	1,335	1,338
B1200A	1,429	1,423
C30S	1,153	1,198
C30A	1,167	1,223
C600S	1,158	1,206
C600A	1,173	1,232
C1200S	1,237	1,233
C1200A	1,270	1,287

Na podstawie analizy wyników przenikalności cieplnej odrzucono koncepcję typu B (wyniki w tabeli 14 oznaczone kolorem czerwonym) z uwagi na zbyt wysoką obliczoną wartość współczynnika przenikalności termicznej, dla tego rozwiązania, przekraczającą $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Wysoka wartość tego współczynnika była bezpośrednio związana z zaproponowanym kształtem profili, który jak się okazało sprzyjał generowaniu promieniowania ciepłego wewnątrz przekroju profilu. Można to zauważyć w modelach B30S, B30A, B600S, B600A, B1200S oraz B1200A, gdzie rozkład temperatury prezentowany w tabeli 11 wskazuje na niską efektywność termiczną tego rozwiązania.

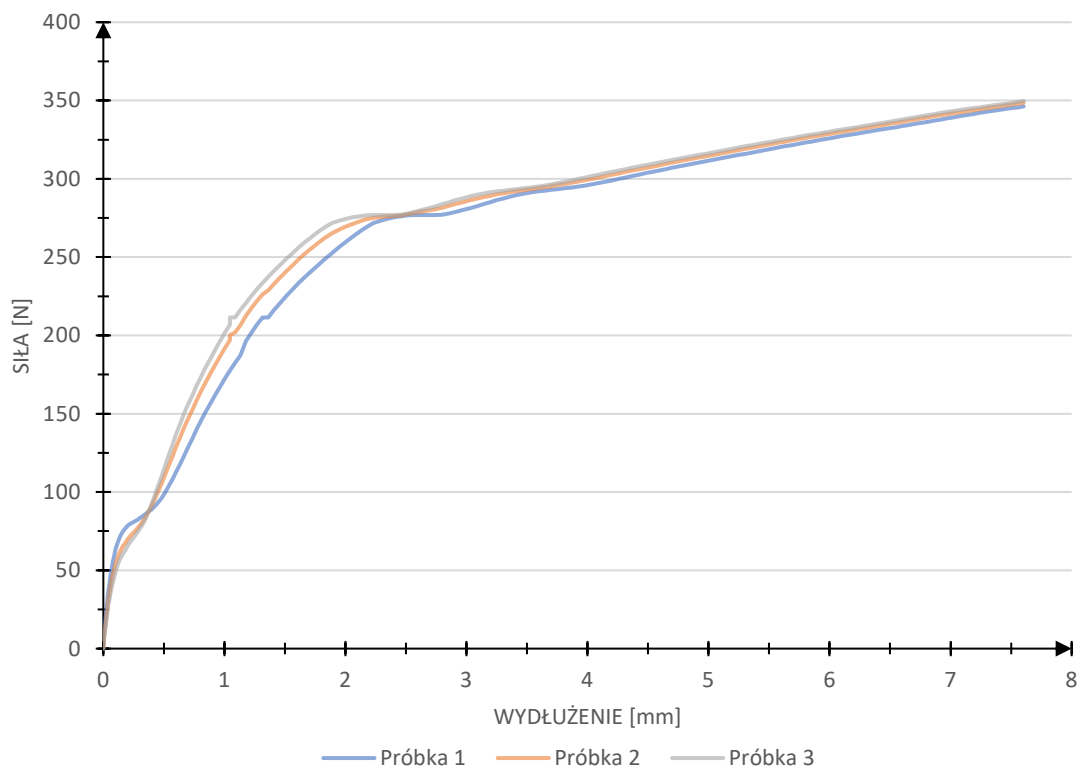
Otrzymane wyniki przenikalności cieplnej jednoznacznie wykluczają koncepcję typu B z dalszych badań, ponieważ nie spełnia ona wymaganych parametrów termicznych. W związku z tym do kolejnych etapów ewaluacji wytypowano konstrukcje ościeżnic A oraz C, dla których współczynniki przenikalności cieplnej utrzymują się poniżej progu $1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (tabela 15). Kolorem zielonym oznaczono koncepcję wyróżniającą się najniższym współczynnikiem przenikalności przekroju, natomiast kolorem niebieskim próbkę o najwyższym poziomie tego wskaźnika. Rozwiązania te wykazują lepsze właściwości izolacyjne w porównaniu do koncepcji B, co czyni je bardziej obiecującymi wariantami do dalszych analiz oraz potencjalnego wdrożenia.

Tabela 15. Tabela koncepcji rozwiązań przekrojów ościeżnic przyjęta do dalszych badań

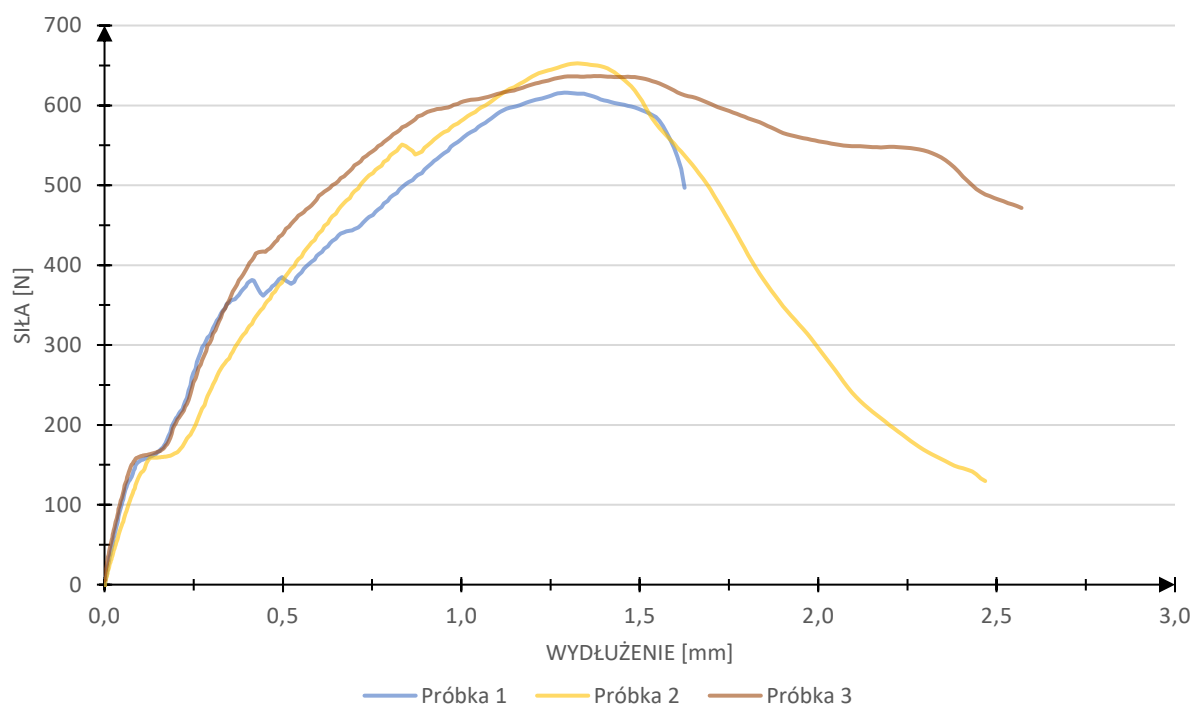
Oznaczenie	Drzwi otwierane do wewnątrz [W/m ² K]	Drzwi otwierane na zewnątrz [W/m ² K]
A30S	1,143	1,150
A30A	1,165	1,162
A600S	1,145	1,153
A600A	1,172	1,168
A1200S	1,222	1,214
A1200A	1,226	1,244
C30S	1,153	1,198
C30A	1,167	1,223
C600S	1,158	1,206
C600A	1,173	1,232
C1200S	1,237	1,233
C1200A	1,270	1,287

4.2. Wpływ zastosowania przekładki na wytrzymałość na rozrywanie przekroju poprzecznego profilu ościeżnicy

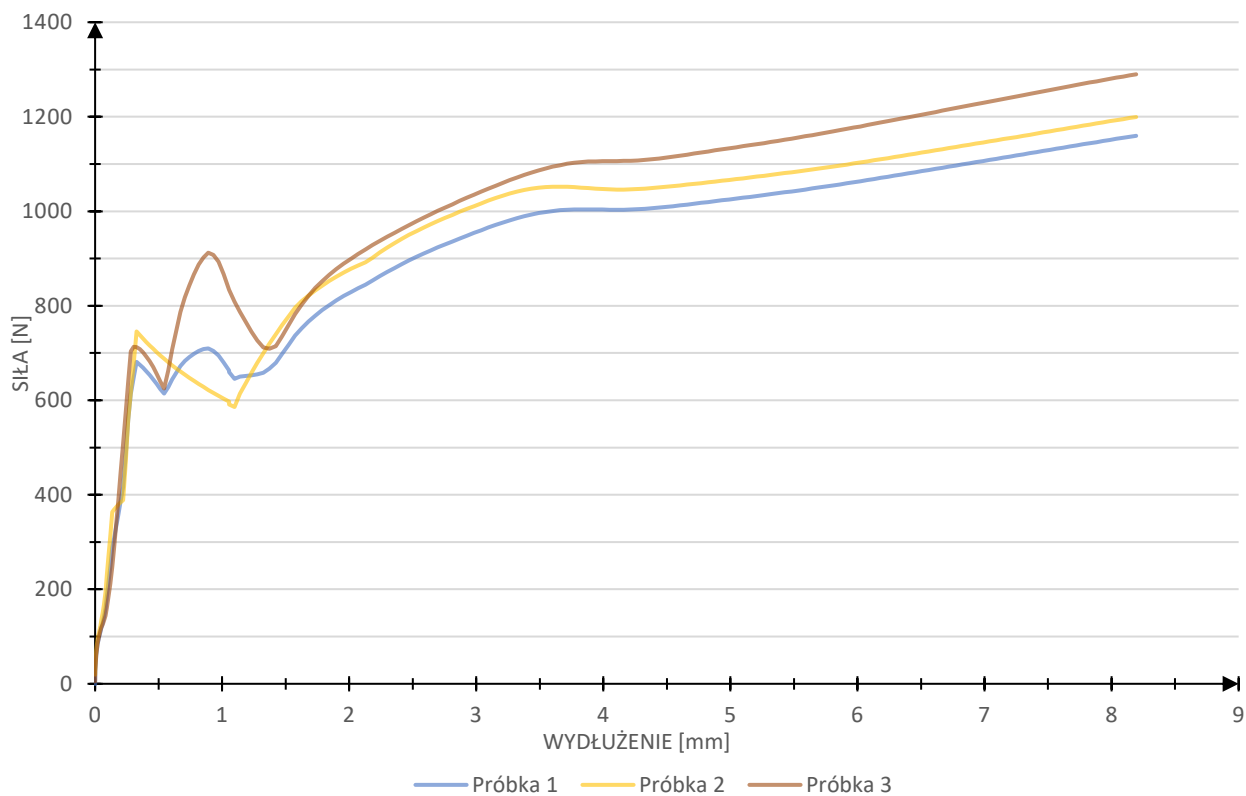
Celem badania było określenie wpływu zmiany gęstości poliuretanowej przekładki termicznej, zastosowanej w ościeżnicy, na wytrzymałość połączenia elementów blaszanych. Poniżej przedstawiono wykresy z wykonanych badań na rozciąganie dla próbek wykonanych zgodnie z koncepcją typu A (Rys.35, 36, 37).



Rys. 35. Wykres rozciągania próbki wykonanej zgodnie z koncepcją A, z zastosowaniem poliuretanu o gęstości 30 kg/m^3



Rys. 36. Wykres rozciągania próbki wykonanej zgodnie z koncepcją A, z zastosowaniem poliuretanu o gęstości 600 kg/m³



Rys. 37. Wykres rozciągania próbki wykonanej zgodnie z koncepcją A, z zastosowaniem poliuretanu o gęstości 1200 kg/m³

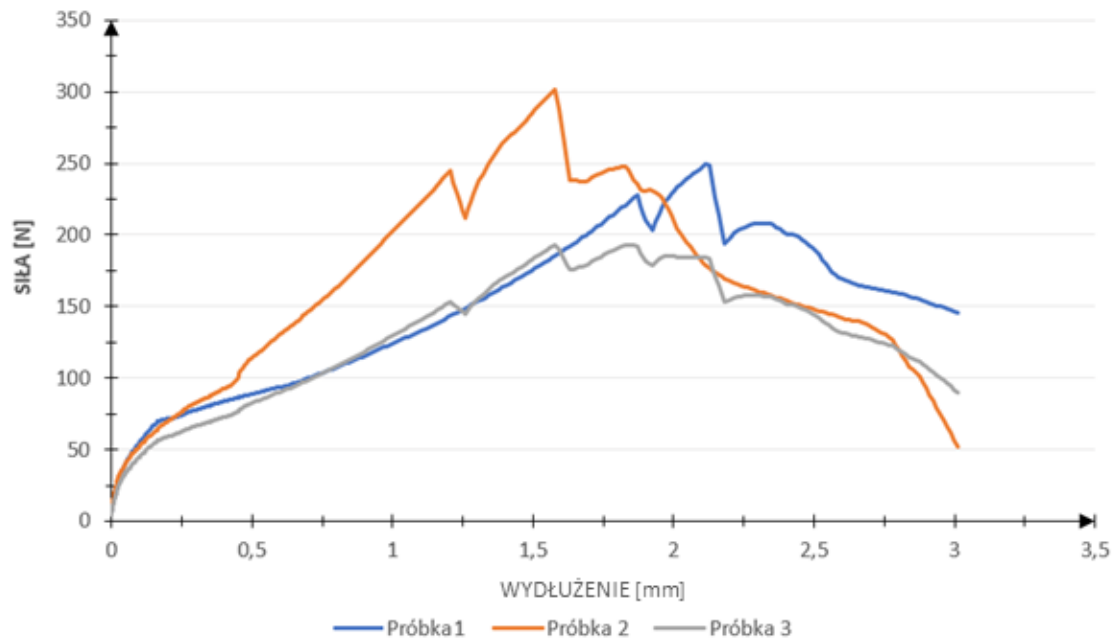


Rys. 38. Próbkki A1200 po rozciąganiu [opracowania własne]

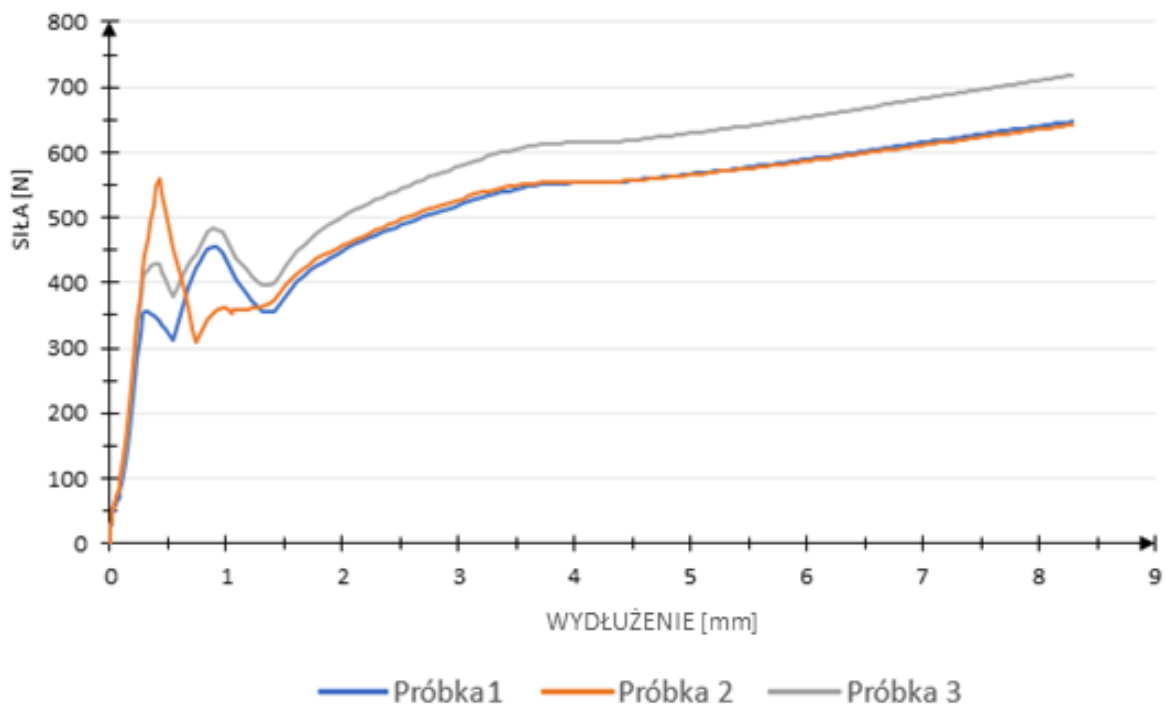
Na podstawie przeprowadzonych badań wytrzymałościowych połączenia typu A stwierdzono, że próbki o gęstości poliuretanu 33 kg/m^3 (A30S) osiągają niską wytrzymałość na rozciąganie, wynoszącą jedynie 80 N. Wynika to z komórkowej struktury pianki, zawierającej liczne puste przestrzenie wypełnione powietrzem, co znacznie ogranicza zdolność materiału do przenoszenia obciążeń. Również w przypadku próbek gdzie użyto poliuretanu o gęstości 33 kg/m^3 nie udało się wyznaczyć granicy plastyczności, dlatego ocenę właściwości mechanicznych oparto wyłącznie na wytrzymałości na rozerwanie.

Dla próbek A600S i A1200S (odpowiedni Rys. 36, 37) wyraźnie widoczna jest granica, po której następuje zerwanie połączenia, przy czym siła niezbędna do uszkodzenia tych próbek przekracza odpowiednio 158 N i 932 N. Porównanie otrzymanych wyników siły zrywającej otrzymanych dla powyższych próbek z wynikami siły zrywającej charakterystycznej dla drewna sosnowego, powszechnie stosowanego w stolarce budowlanej (wartość 140 N), wskazuje, na przewagę analizowanych przypadków. Zwiększenie gęstości poliuretanu przekłada się na zmniejszenie liczby pęcherzyków powietrznych i bardziej zwartą strukturę, co skutkuje wyższą wytrzymałością analizowanych połączeń.

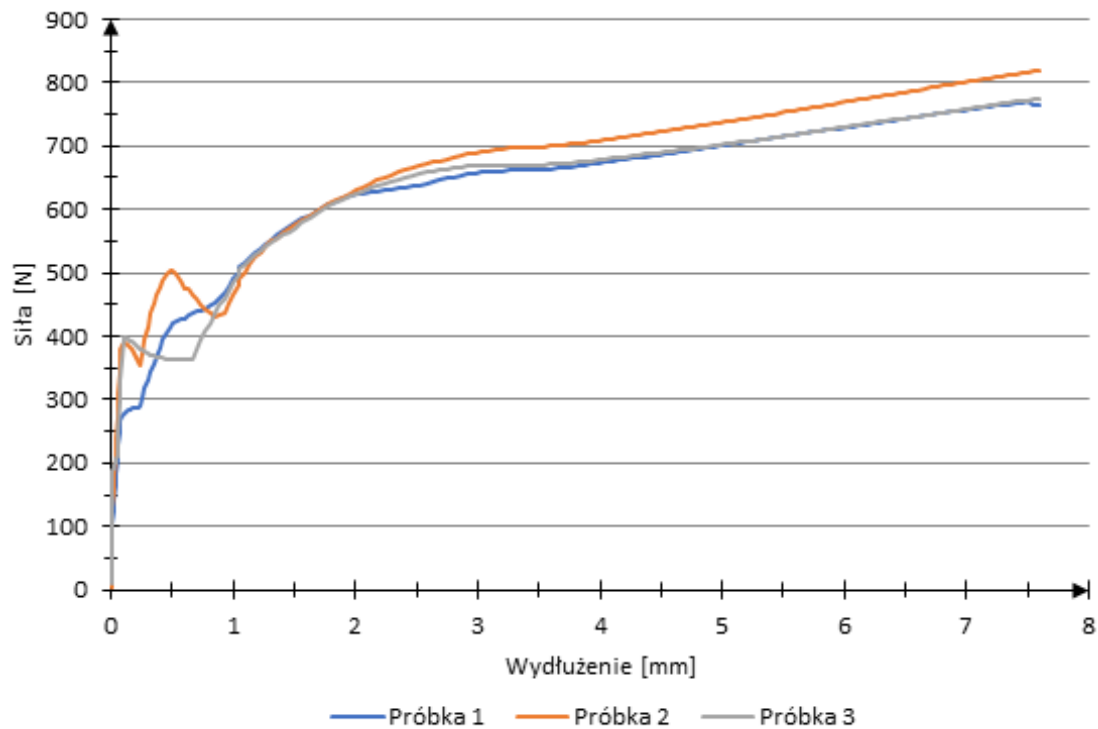
Analogiczne badania przeprowadzono dla typu połączenia C (Rys 39,40,41).



Rys. 39. Wykres rozciągania próbki wykonanej zgodnie z koncepcją C, z zastosowaniem poliuretanu o gęstości 33 kg/m³

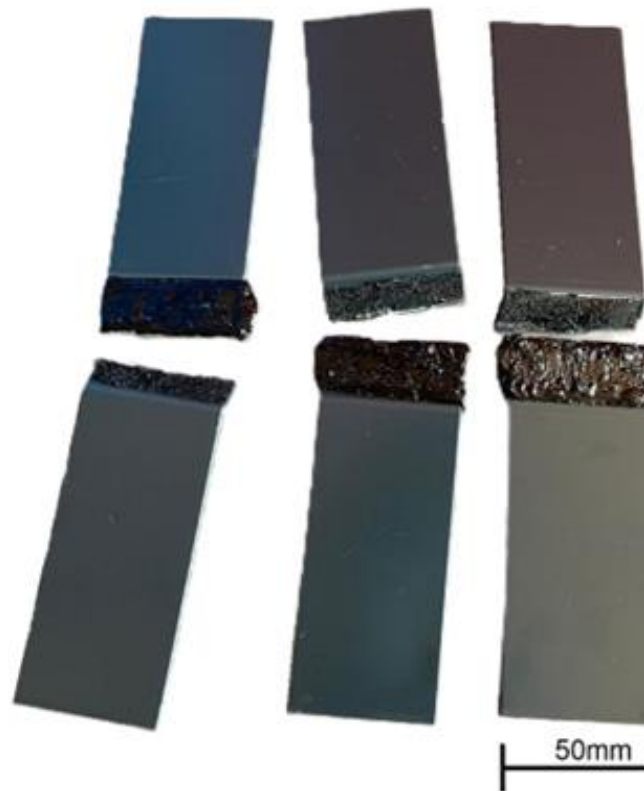


Rys. 40. Wykres rozciągania próbki wykonanej zgodnie z koncepcją C, z zastosowaniem poliuretanu o gęstości 600 kg/m³



Rys. 41. Wykres rozciągania próbki wykonanej zgodnie z koncepcją C, z zastosowaniem poliuretanu o gęstości 1200 kg/m³

Na podstawie przeprowadzonych badań wytrzymałościowych stwierdzono, że połączenie o oznaczeniu C cechuje się niskimi wartościami wytrzymałościowymi niezależnie od zastosowanej gęstości poliuretanu. Wyniki jednoznacznie wskazują, że proponowane połączenie typu C wykazuje niewystarczającą wytrzymałość na rozciąganie. Stwierdzono, że kluczowym czynnikiem wpływającym na ten wynik jest kształt przekroju połączenia, który ogranicza powierzchnię styku blachy z materiałem. W porównaniu do połączeń oznaczonych jako A, powierzchnia styku w połączeniu C jest znacznie mniejsza, co bezpośrednio osłabia jego zdolność do przenoszenia obciążeń.



Rys. 42. Próbkki koncepcji C po próbach rozciągania [opracowania własne]

Można zatem przyjąć, że spośród proponowanych rozwiązań konstrukcyjnych przekrojów A oraz C, koncepcja przekroju C została pominięta w dalszych badaniach z uwagi na osiągnięte niskie właściwości wytrzymałościowe. Wyniki jednoznacznie wskazują, że połączenie oparte na przekroju C nie spełniało wymagań wytrzymałościowych, co dyskwalifikuje je jako rozwiązanie konstrukcyjne do dalszych badań i potencjalnych zastosowań.

W przypadku przekroju A wyeliminowano próbki o oznaczeniach A30S oraz A30A, charakteryzujące się najniższą gęstością poliuretanu, ze względu na ich niewystarczającą wytrzymałość na rozciąganie. Na podstawie analizy wyników badań do dalszych prac badawczych wybrano jeden przekrój (A) oraz dwie gęstości poliuretanu: 600 i 1200 kg/m³, które wykazały lepszą wytrzymałość w porównaniu do wytrzymałości poliuretanu o gęstości 33 kg/m³ oraz drewna sosnowego. Te próbki dzięki zwartej strukturze komórkowej i wyższym wartościom wytrzymałościowym od drewna, mogą zapewnić osiągnięcie pożądanych rezultatów w dalszych testach oraz optymalizacji konstrukcji.

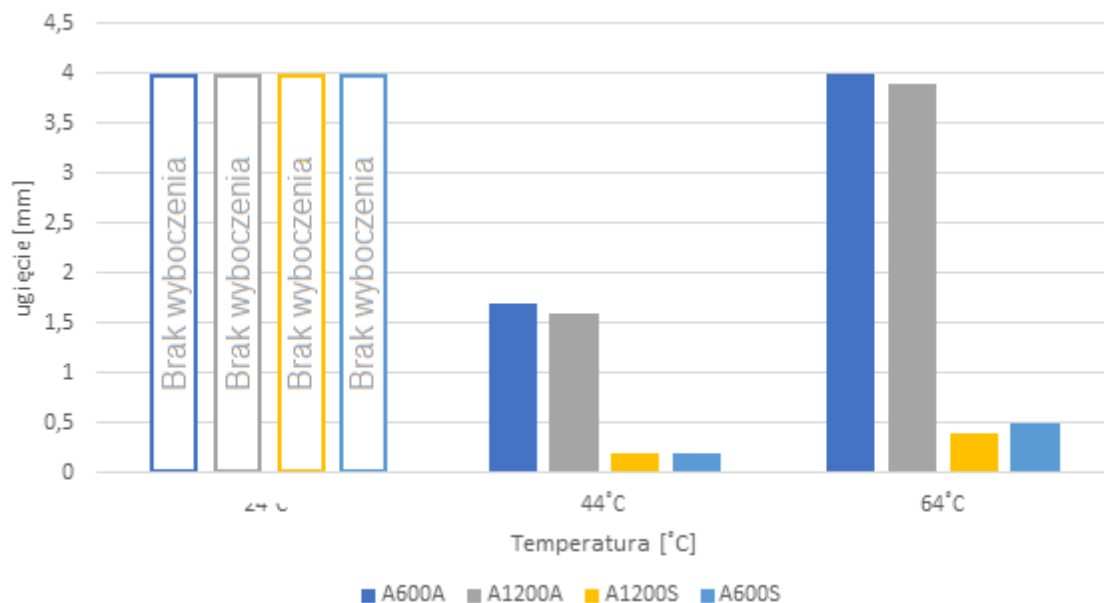
4.3. Badanie rozszerzalności termicznej zaprojektowanego profilu

Przeprowadzone badania na stanowisku pomiaru rozszerzalności termicznej miały na celu analizę zachowania materiałów pod wpływem wzrostu temperatury, ze szczególnym uwzględnieniem wyboczenia profilu drzwi. W ramach tych badań dokonano precyzyjnych pomiarów odkształceń profilu, co pozwoliło na ocenę stopnia deformacji, jakie mogą wystąpić podczas eksploatacji drzwi w warunkach podwyższonej temperatury. Analiza tych deformacji była kluczowa dla oceny funkcjonalności drzwi, zwłaszcza pod kątem ich odporności na odkształcenia mogące negatywnie wpłynąć na prawidłowe działanie mechanizmów zamykania i otwierania.

Głównym celem badania było określenie zakresu temperatur, w którym dochodzi do takiego odkształcenia profilu, które uniemożliwia prawidłowe funkcjonowanie zamka. Wyniki badań są niezbędne dla zrozumienia granicznych wartości temperaturowych, przy których drzwi mogą utracić swoje właściwości użytkowe, co ma istotne znaczenie zarówno w aspekcie projektowym, jak i w kontekście ich zastosowań w środowiskach o zmiennych warunkach temperaturowych. Przeprowadzono trzykrotne badanie dla każdego typu ościeżnicy, a w poniższej tabeli przedstawiono uśrednione wyniki na podstawie uzyskanych danych.

Tabela 16. Wyniki pomiarów odkształceń ościeżnicy pod wpływem temperatury

Temperatura ościeżnicy [°C]	Typ ościeżnicy			
	A600A	A600S	A1200A	A1200S
	Wartość odkształcenia [mm]			
24	0	0	0	0
44	1,7	0,2	1,6	0,1
64	5	0,5	4,8	0,3



Rys. 43. Wykres ugięcia ram pod wpływem temperatury

Na podstawie wyników badań (Rys.43) stwierdzono, że ościeżnica stalowa w skrajnych temperaturach występujących w sezonie letnim ulega maksymalnemu ugięciu na poziomie 0,5mm, które nie wpływają na jej funkcjonalność. Wynika to z relatywnie niskiego współczynnika liniowej rozszerzalności termicznej stali ($12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$). Natomiast ościeżnica aluminiowa ulega wyboczeniu na poziomie 1,5mm na długości 2m przy temperaturze 44°C, co skutkuje utratą funkcjonalności, uniemożliwiającą bezproblemowe otwieranie drzwi, co jest charakterystyczną wadą stolarki aluminiowej. Stwierdzone zjawisko wynika z wyższego współczynnika liniowej rozszerzalności termicznej aluminium, wynoszącego $24 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, który jest istotnie wyższy w porównaniu z współczynnikiem liniowej rozszerzalności termicznej stali. Przeprowadzona analiza rezultatów wykazała ponadto, że zastosowanie przekładki termicznej wykonanej z poliuretanu o podwyższonej gęstości prowadzi do nieznacznego zmniejszenia odkształceń ościeżnic aluminiowych oraz stalowych. Zaobserwowany efekt jest konsekwencją zwiększonej sztywności samej przekładki termicznej z poliuretanu o wyższej gęstości, która ogranicza swobodę odkształceń termicznych badanych elementów konstrukcyjnych.

Na podstawie uzyskanych wyników badań, koncepcję wykorzystującą aluminium należy definitywnie odrzucić. Materiał ten, ze względu na swoją wysoką rozszerzalność termiczną, nawet przy zastosowaniu przekładki termicznej o gęstości 1200 kg/m³, nie zapewnia

wystarczającej redukcji odkształceń termicznych, by utrzymać pełną funkcjonalność konstrukcji drzwi.

Przeprowadzone badania pozwoliły na opracowanie prototypu ościeżnicy, który spełnia założenia pracy doktorskiej. Prototyp charakteryzuje się odpowiednimi właściwościami wytrzymałościowymi oraz niskim współczynnikiem przenikania ciepła, poniżej zakładanej wartości 1,3 W/m²K. Rozwiązanie to zapewnia równowagę między stabilnością wymiarową i efektywnością energetyczną, stanowiąc istotny krok w kierunku finalizacji projektu.

Tabela 17. Porównanie badanych własności na podstawie przeprowadzonych badań wybranych koncepcji

Kierunek otwierania		A600S	A1200S
Współczynnik przenikalności przekroju ramy U_f	Na zewnątrz	2,92[W/(m ² ·K)]	3,337[W/(m ² ·K)]
	Do środka	2,944[W/(m ² ·K)]	3,640[W/(m ² ·K)]
Współczynnik przenikalności przekroju drzwi U_d	Na zewnątrz	1,145 [W/(m ² ·K)]	1,222[W/(m ² ·K)]
	Na do środka	1,153[W/(m ² ·K)]	1,276[W/(m ² ·K)]
Wytrzymałość na zrywanie		150N	450N
Ugięcie ramy		0,2mm	0,1mm

Na podstawie analizy właściwości przedstawionych w tabeli 17, do dalszych badań wybrano koncepcję A1200S, która charakteryzuje się znacząco wyższą wytrzymałością na rozciąganie w porównaniu z wytrzymałością na rozciąganie koncepcji A600S. Ten wybór bezpośrednio przekłada się na zwiększenie nośności ościeżnic oraz poprawę ich zdolności do przenoszenia obciążeń eksploatacyjnych. Należy podkreślić, że różnice w współczynnikach przenikalności termicznej analizowanych rozwiązań są minimalne, rzędu tysięcznych części, co czyni je nieistotnymi z punktu widzenia praktyki inżynierskiej.

4.4. Badanie wytrzymałości drzwi na wielokrotne otwieranie i zamykanie skrzydła

Wyniki pomiarów sił operacyjnych wykonywanych przed, w trakcie i po badaniach odporności na wielokrotne otwieranie i zamykanie zamieszczono w tabelach 18-19 [68].

Tabela 18. Wartość siły potrzebnej do otwarcia drzwi do kąta 90 stopni na poszczególnych etapach badania

Etap pomiaru	Siła potrzebna do przemieszczenia skrzydła [N]				Klasa wg PN-EN 12217:2015
	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	Wartość średnia	
Przed badaniem	13	13	13	13	Klasa 3
Po 25% cykli	13	13	13	13	Klasa 3
Po 50% cykli	13	13	13	13	Klasa 3
Po 75% cykli	13	13	13	13	Klasa 3
Po 100% cykli	13	13	13	13	Klasa 3

Tabela 19. Wartość minimalna siły potrzebnej do otwarcia drzwi przy użyciu klamki

Etap pomiaru	Siła potrzebna do przemieszczenia skrzydła [N]				Klasa wg PN-EN 12217:2015
	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3	Wartość średnia	
Przed badaniem	38	38	38	38	Klasa 3
Po 25% cykli	37	38	38	38	Klasa 3
Po 50% cykli	38	37	37	37	Klasa 3
Po 75% cykli	38	38	37	38	Klasa 3
Po 100% cykli	37	38	37	37	Klasa 3

Po wykonaniu 100 000 cykli otwierania i zamykania skrzydła drzwiowego zgodnie z procedurą [69], stwierdzono, że badane elementy – skrzydło oraz ościeżnica – zachowały pierwotną geometrię. Podczas oględzin nie zaobserwowano uszkodzeń ani pęknięć przekładki poliuretanowej, które mogłyby powstać w wyniku uderzeń skrzydła o ościeżnicę w trakcie cyklicznych zamknięć. Uzyskane wyniki badań nie wskazują na pogorszenie właściwości

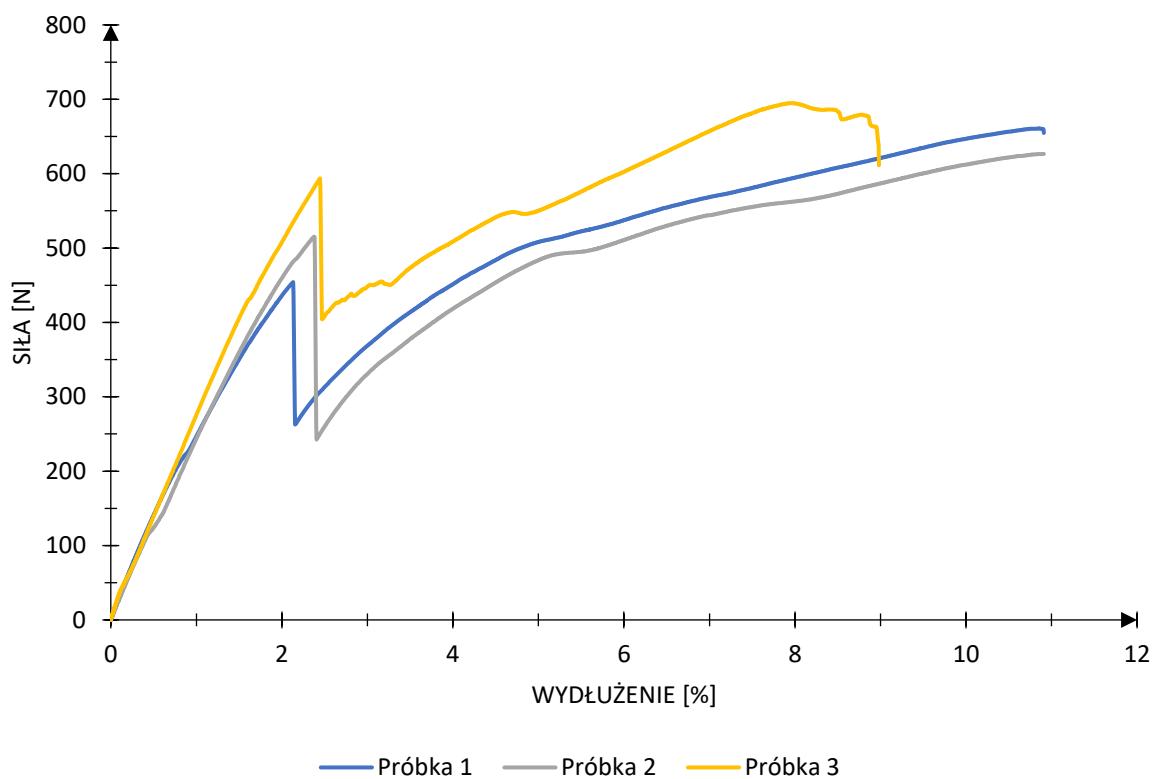
funkcjonalnych badanego układu. Zaobserwowane zmniejszenie siły wymaganej do otwarcia drzwi było efektem zużycia rygła ościeżnicy (elementu odpowiadającego za domykanie i blokowanie skrzydła w pozycji zamkniętej). Wskutek powtarzających się cykli zamykania i otwierania nastąpiło stopniowe ścieranie powierzchni styku rygła ze skrzydłem, co zmniejszyło opory mechaniczne podczas otwierania (Rys. 44).



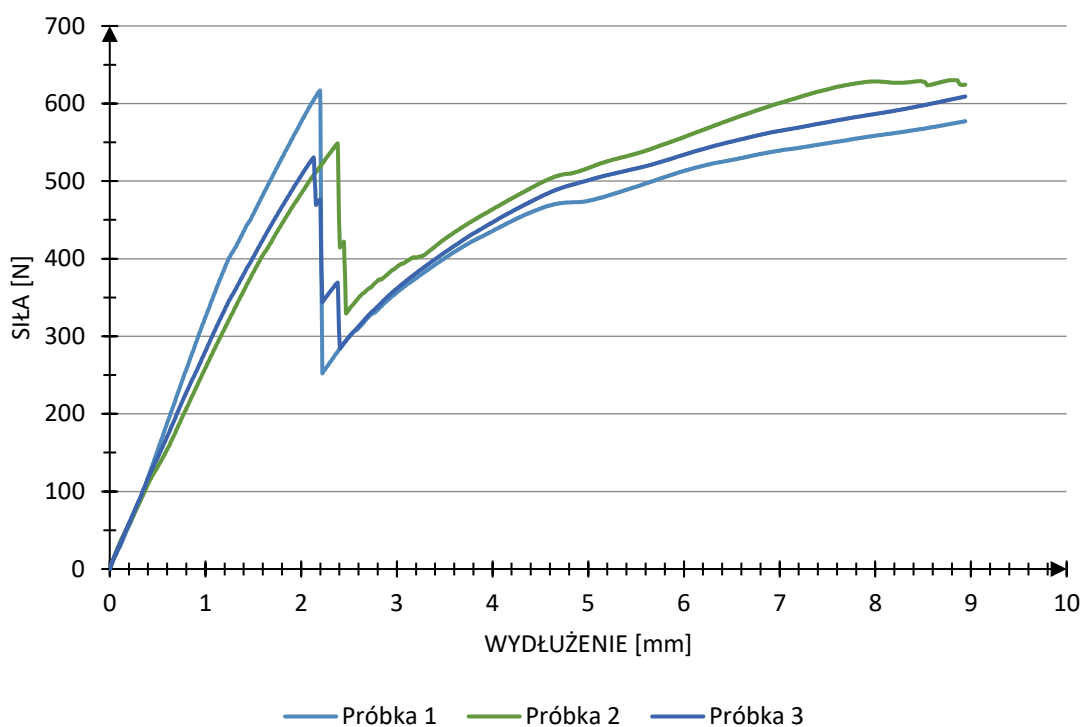
Rys. 44. Zużycie mechanizmu regulacji jęczyczka odpowiedzialnego za zamknięcie skrzydła drzwiowego

4.5. Badanie wytrzymałości przekroju poprzecznego ościeżnicy

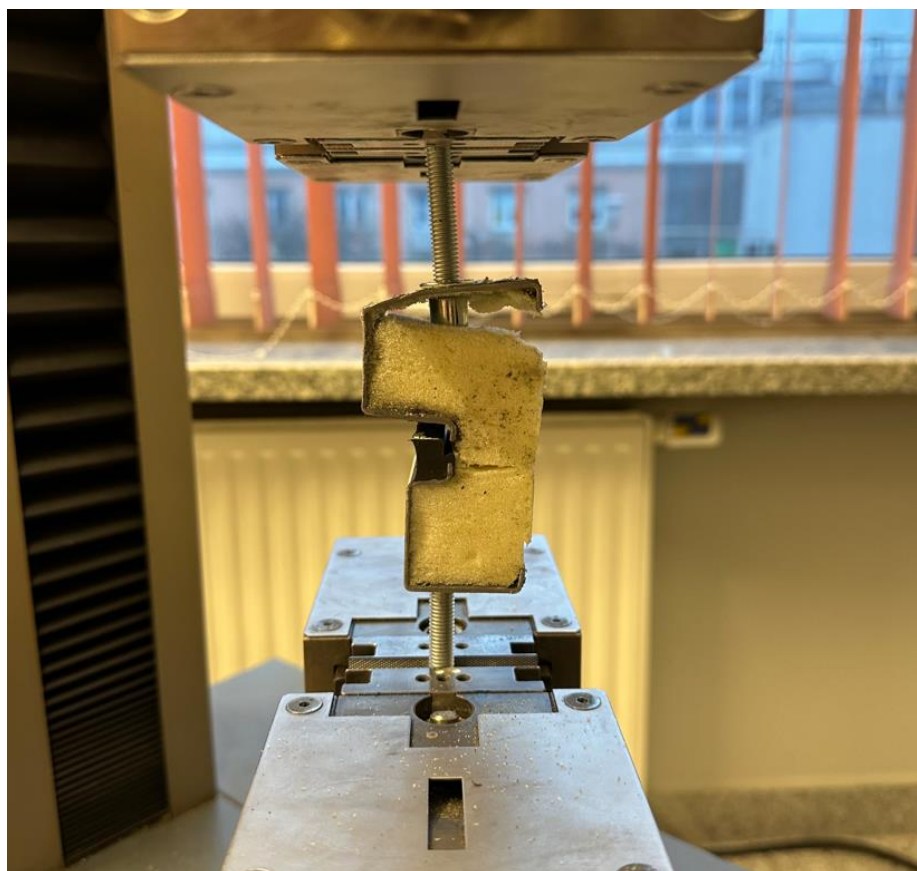
Celem przeprowadzonych badań było porównanie wytrzymałości na rozciąganie przekrojów konstrukcyjnych przed i po testach eksploatacyjnych, symulujących cykliczne otwieranie i zamykanie drzwi. Badanie to miało na celu określenie wpływu powtarzających się obciążeń dynamicznych na integralność połączeń poliuretanowych stosowanych w konstrukcji drzwi. W szczególności, zwrócono uwagę na możliwość wystąpienia mikropęknięć lub delaminacji połączenia wynikających z drgań i przeciążeń generowanych podczas zamykania skrzydła drzwiowego. Na rysunkach 45-47 przedstawiono wyniki analizy.



Rys. 45. Wykres rozciągania przekroju poprzecznego ościeżnicy przed badaniem drzwi w warunkach cyklicznego otwierania i zamykania drzwi



Rys. 46. Wykres rozciągania przekroju poprzecznego ościeżnicy po badaniu drzwi w warunkach cyklicznego otwierania i zamykania drzwi

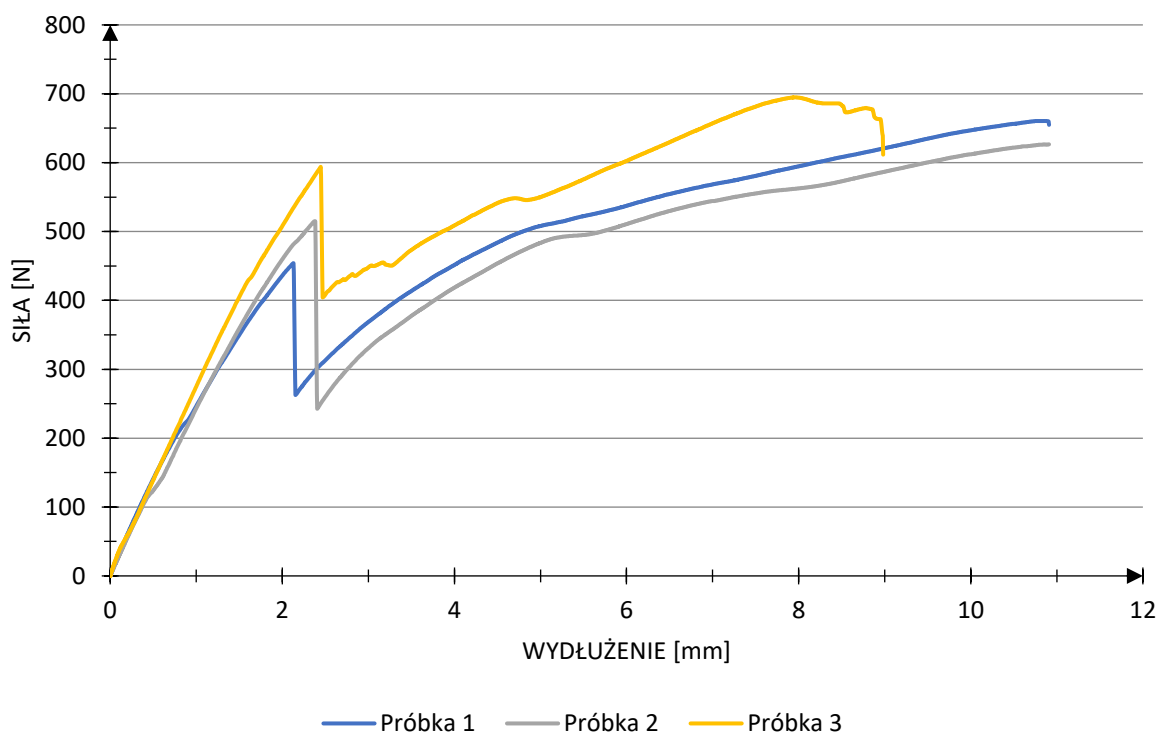


Rys. 47 Widok próbki po badaniu wytrzymałości na rozciąganie

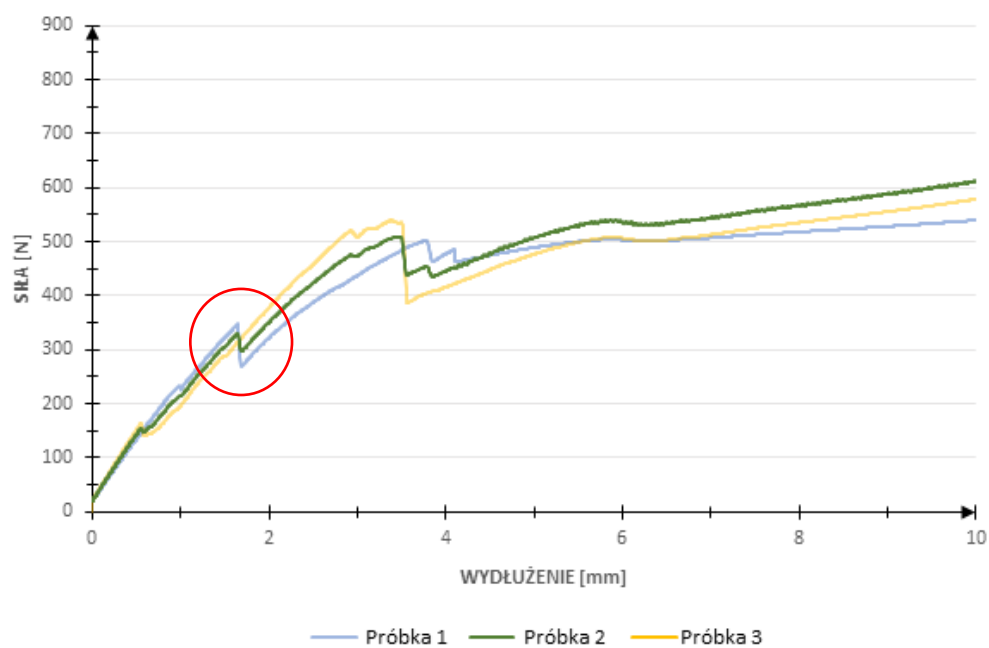
Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że połączenie poliuretanowe zachowało integralność strukturalną i nie uległo uszkodzeniu w trakcie symulacji obejmującej 100 000 cykli otwierania oraz zamykania drzwi. Drgania powstające podczas uderzenia skrzydła o ościeżnicę nie wpłynęły negatywnie na integralność profilu. Potwierdza to zbliżona wartość siły koniecznej do rozciągania oraz podobny kształt uzyskanej krzywej rozciągania.

4.6. Badanie wytrzymałości na rozciąganie po zanurzeniu w wodzie

Celem badania jest ocena wpływu oddziaływania wody na wytrzymałość na rozciąganie profilu z przekładką termiczną poprzez analizę jego właściwości mechanicznych po uprzednim zanurzeniu w wodzie. Badanie ma na celu symulację długotrwałych warunków eksploatacyjnych.



Rys. 48. Wykres rozciągania przekroju poprzecznego ościeżnicy przed starzeniem



Rys. 49. Wykres rozciągania przekroju poprzecznego ościeżnicy po starzeniu



Rys. 50 Widok próbki po badaniu wytrzymałości na rozciąganie po starzeniu

Badania przeprowadzone po długotrwałym zanurzeniu próbek w wodzie wskazywały na ogólną tendencję do obniżenia maksymalnych wartości siły, szczególnie w przypadku próbki odpowiadającej próbce nr 3. Mimo zaobserwowanego spadku (ok. 50N) wytrzymałości, przebieg krzywych siła-wydłużenie, pozostały zbliżone do charakterystyk uzyskanych przed zanurzeniem, co sugeruje brak istotnych zmian w strukturze materiału (Rys.48,49).

Na wykresach można również zaobserwować niewielki uskok, wynikający z odspojenia blachy od warstwy poliuretanu, co zostało zaznaczone na rysunku 49 oraz 50.

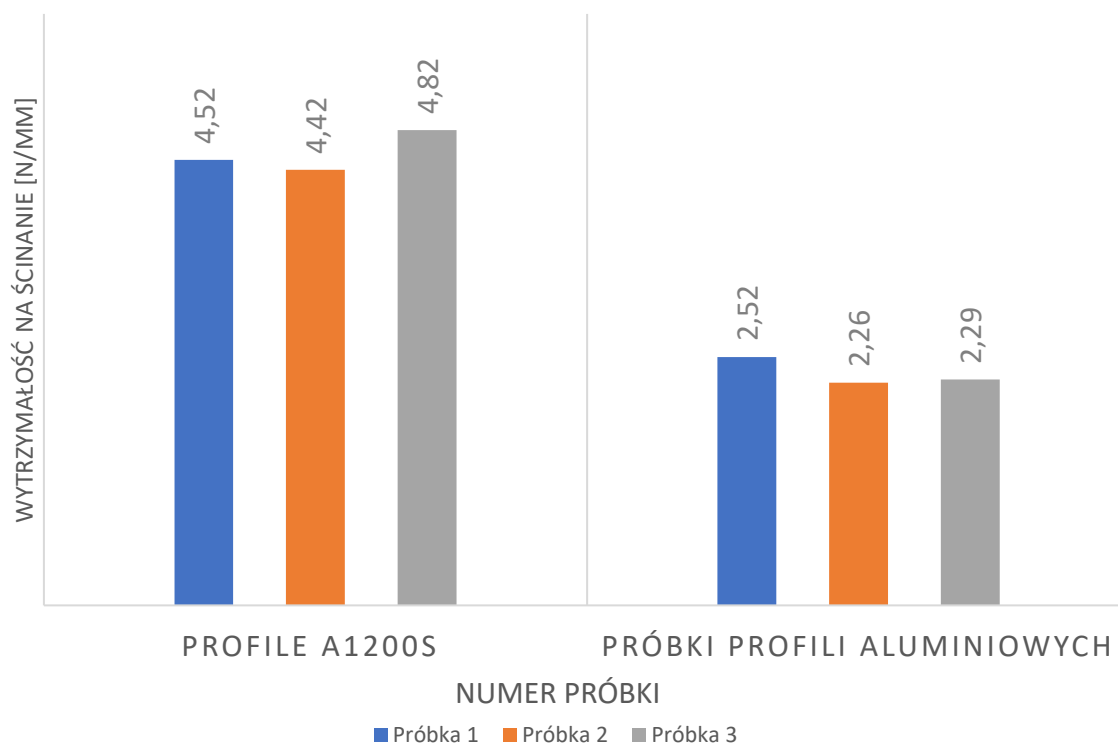
Na podstawie analizy uzyskanych wyników można stwierdzić, że połączenie poliuretanowe zastosowane w badanym profilu zachowuje korzystne właściwości wytrzymałościowe, również po ekspozycji w wodzie. Nie zaobserwowano oznak istotnej erozji (przebarwień) ani degradacji materiału, co potwierdza jego przydatność do zastosowań w warunkach podwyższonej wilgotności oraz okresowego kontaktu z wodą.

4.7.Badanie wytrzymałość na ścinanie przekładki termicznej

Konstrukcje budowlane, szczególnie w zakresie stolarki okiennej, drzwiowej i fasadowej, wymagają zastosowania materiałów o wysokiej efektywności termicznej oraz odpowiednich właściwościach mechanicznych. Istotnym elementem przekroju profilu jest przekładka termiczna, która pełni funkcję izolacyjną, jednocześnie zapewnia wymaganą integralność strukturalną połączenia. W związku z tym kluczowym aspektem oceny jakości przekładki termicznej jest jej odporność na obciążenia mechaniczne, w tym wytrzymałość na ścinanie. Badanie wytrzymałości na ścinanie przekładki termicznej polega na określeniu maksymalnej siły, jaką jest ona w stanie przenieść przed osiągnięciem granicy zniszczenia [70]. Wyniki tej analizy mają istotne znaczenie dla oceny trwałości i bezpieczeństwa stosowanych rozwiązań, ponieważ przekładka, oprócz funkcji termicznej, przenosi także obciążenia mechaniczne wynikające z eksploatacji oraz oddziaływania czynników zewnętrznych. Celem niniejszego badania jest określenie wartości siły ścinającej prowadzącej do uszkodzenia przekładki termicznej. W ramach badań wykonano pomiary na trzech próbkach profili stalowych typu A1200S oraz trzech próbkach ościeżnicy aluminiowej z zaciskaną poliamidową przekładką termiczną (Rys. 51), będącą standardowym rozwiązaniem dostępnym na rynku. Pozwoliło to na porównanie właściwości mechanicznych analizowanych rozwiązań konstrukcyjnych z właściwościami nowo opracowanego przekroju.



Rys. 51. Próbkę po badaniu wytrzymałości na ścinanie. Od lewej: próbka profilu A1200S, próbka ościeżnicy aluminiowej z przekładką poliamidu



Rys. 52. Wykres granicznej wartości na ścinanie wzdłużne ościeżnicy

Wyniki badań wykazały, że próbki ościeżnic typu A1200S charakteryzowały się istotnie wyższą wytrzymałością na ścinanie (4,4–4,8 N/mm w trzech seriach pomiarowych, rys. 52), w porównaniu do próbek aluminiowych profili ościeżnicowych, które wykazały zdecydowanie niższą odporność na ścinanie (2,2–2,5 N/mm). Kluczowym czynnikiem, który przyczynił się

do tak wyraźnego wzmocnienia przekroju w przypadku próbek A1200S, było zastosowanie poliuretanu. Trwałe połączenie tego materiału z powierzchnią blachy na całej szerokości przekroju poprzecznego zapewniło podwyższoną integralność strukturalną analizowanych elementów. Dzięki temu poliuretan efektywnie przenosił obciążenia ścinające, minimalizując ryzyko odkształceń i uszkodzeń.

W kontekście praktycznym, wyższa wytrzymałość na ścinanie ościeżnic A1200S przekłada się na zwiększoną odporność na obciążenia dynamiczne, takie jak uderzenia czy wibracje. To z kolei gwarantuje dłuższą żywotność drzwi i lepszą ochronę przed uszkodzeniami mechanicznymi, co jest szczególnie istotne w budynkach o wysokim natężeniu ruchu.

4.8. Opracowanie technologii procesu produkcyjnego ościeżnicy

Ostatnim etapem prac badawczo-rozwojowych było opracowanie technologii produkcji ościeżnicy. W celu optymalizacji procesu produkcyjnego przeprowadzono szczegółową analizę, której efektem było zaproponowanie rozwiązania polegającego na złożeniu ościeżnicy z dwóch krawędziowanych blach stalowych o grubości 1,2 mm. W profilu wrębowym wyprofilowano rowek wypełniony poliuretanem o gęstości 1200kg/m^3 , który łączy profil wrębowy z przylgowym. W ramach tych badań analizowano dwa alternatywne rozwiązania technologiczne umożliwiające produkcję profili ościeżnicy.

Profilowanie kształtu na profilarkach rolkowych – proces ten polega na stopniowym formowaniu blachy za pomocą szeregu rolek, które stopniowo zaginają materiał, aż do uzyskania pożądanego kształtu przekroju. Zaletami tego rozwiązania są wysoka wydajność i powtarzalność procesu. Główne wady to brak możliwości szybkiej zmiany kształtu produktu oraz wysoki koszt wdrożenia technologii.

Kształtowanie blach na hydraulicznych prasach krawędziowych – proces polega na nadawaniu kształtu blachy poprzez działanie siłą mechaniczną na określoną powierzchnię. Zaletami tego rozwiązania są możliwość szybkiej zmiany kształtu produktu oraz niskie koszty wdrożeniowe. Wadą jest jednak niska wydajność, ponieważ każdy proces gięcia musi być wykonywany osobno.

Po dogłębnej analizie zalet i wad dostępnych metod kształtowania elementów uznano, że optymalnym rozwiązaniem w produkcji zaprojektowanej ościeżnicy A1200S będzie wykorzystanie hydraulicznej prasy krawędziowej. Decyzja ta została podyktowana przede wszystkim wyjątkową elastycznością tej technologii, która umożliwia szybkie i efektywne modyfikacje produktu, co jest niezwykle istotne w procesie wdrażania innowacyjnych

rozwiązań, gdzie prognozowanie wolumenu sprzedaży może być obarczone wysokim stopniem niepewności.

Inwestycja w kosztowne, dedykowane linie produkcyjne na wczesnym etapie rozwoju produktu byłaby ryzykowna, z uwagi na znaczne ryzyko rynkowe. Elastyczność prasy krawędziowej pozwala na dynamiczne dostosowywanie skali produkcji do bieżących potrzeb rynku, co znacząco minimalizuje ryzyko finansowe.

Dodatkowo, hydrauliczna prasa krawędziowa oferuje szeroki zakres możliwości w zakresie kształtowania profili ościeżnic, co jest kluczowe przy produkcji elementów o złożonej geometrii. Umożliwia również stosowanie różnorodnych materiałów, co daje większą swobodę w doborze surowców. Wybór tej technologii wpisuje się w strategię zrównoważonego rozwoju, minimalizując straty materiałowe i energetyczne, co jest istotnym aspektem w kontekście współczesnych trendów w przemyśle.

W kolejnym etapie prac nad optymalizacją procesu produkcyjnego profilu A1200S, kluczowym zadaniem stała się synchronizacja i usprawnienie procesu przetwarzania poliuretanu. Aktualny czas gięcia ościeżnicy, wynoszący 4 minuty i 12 sekund, stanowi istotny punkt odniesienia dla dalszych działań. Aby osiągnąć wyższą efektywność produkcji, niezbędne było zharmonizowanie czasu łączenia profili za pomocą poliuretanu z cyklem gięcia. Zsynchronizowanie tych dwóch operacji pozwoliło na znaczące usprawnienie przepływu materiałów i procesów, co przełożyło się na wzrost ogólnej wydajności linii produkcyjnej.

Na podstawie karty technicznej przetwarzania poliuretanu o gęstości 1200 kg/m³ (DiPUR F4) wiadomo, że podwyższenie temperatury komponentów i formy skraca czas odformowania. Czas ten wynosi od 3 do 6 minut, w zależności od temperatury przetwarzania, która może wahać się od 10 do 80°C. W związku z tym przeprowadzono badania nad wpływem temperatury na czas odformowania poliuretanu w profilu, a wyniki przedstawiono w tabeli 20.

Tablica 20. Wpływ temperatury na czas reakcji sieciowania poliuretanu

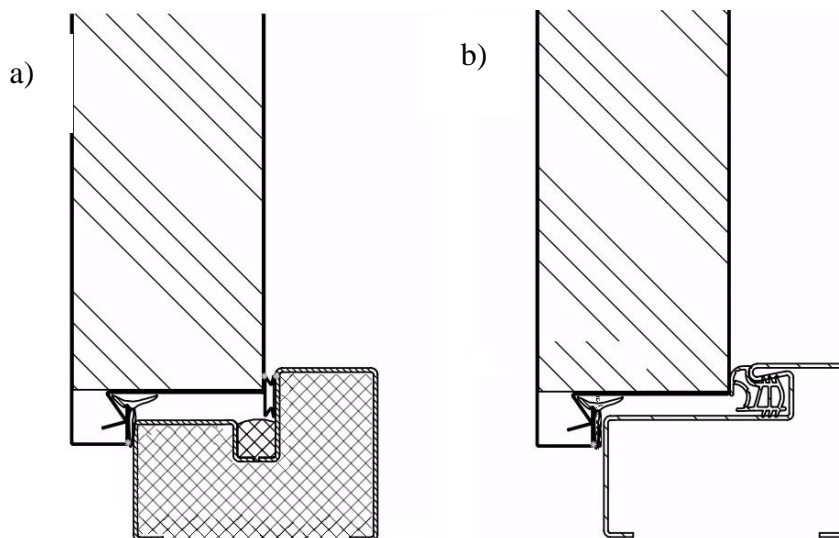
Temperatura komponentów, [°C]	Czas żelowania [s]	Czas utwardzenia [min]
20	80	6:12
30	73	5
40	62	4:3
50	54	3:40
60	Brak pomiaru	Brak pomiaru

Podwyższenie temperatury komponentów z 20 do 50°C skraca czas odformowania o 43%, co dowodzi, że graniczna wartość temperatury dla tego procesu powinna wynosić 50°C. W temperaturze 60°C reakcja zachodzi zbyt szybko, powodując żelowanie materiału już w komorze mieszającej, co czyni dalsze badania powyżej tej temperatury zbędnymi.

Na podstawie przeprowadzonych testów stwierdzono, że optymalny czas cyklu odformowania, zbliżony do czasu gięcia, osiąga się przy temperaturach przetwarzania wynoszących 40 i 50°C. Jednak, aby ograniczyć zużycie energii, zdecydowano się na realizację procesu w temperaturze 40°C. Pozwala to na zachowanie efektywności produkcji przy jednoczesnym obniżeniu kosztów ogrzewania formy. Zastosowanie niższej temperatury nie wpływa negatywnie na jakość wyrobu końcowego oraz sprzyja ekonomicznemu gospodarowaniu zasobami energii.

4.9. Porównanie prototypu ościeżnicy z aktualnie produkowanym produktem

Ostatnim etapem badań wdrożeniowych było określenie parametrów użytkowych ościeżnicy na profilu A1200S i porównanie jej z konkurencyjnymi rozwiązaniami. (Rys. 53) W tym celu dokonano przeglądu oferty marketów budowlanych. Na rynku dostępnych jest wiele modeli drzwi, różniących się jakością wykonania, parametrami technicznymi oraz ceną. W niniejszym porównaniu zestawiamy dwa rozwiązania: standardowe drzwi stalowe powszechnie dostępne w marketach budowlanych, wykonane w systemie o grubości 55 mm z wypełnieniem z polistyrenu ekspandowanego. Dzięki temu możliwe było zweryfikowanie skuteczności nowego projektu oraz jego przewagi technologicznej nad standardowymi drzwiami w systemie 55 mm.



Rys. 53. Porównanie przekrojów drzwi o grubości 55mm. a) ościeżnica A1200S, b) T55

Tablica 21. Porównanie wyników badań dla ościeżnicy A1200S oraz stalowej T55

Ocena własności użytkowych				
Metoda badawcza	Strona drzwi	Norma badawcza	Drzwi A1200S	Drzwi T55
Wodoszczelność	otwierane na zewnątrz	PN-EN-1027:2016-04	Klasa 2A	Klasa 2A
	otwierane do środka	PN-EN-1027:2016-04	Klasa 1A	Klasa 1A
Odporność na obciążenie wiatrem		PN-EN-12211:2016-04	Klasa C1	Klasa C1
Współczynnik przenikalności drzwi	otwieranych do środka	PN-EN ISO 10077-1:2007	1,2	1,4
	otwieranych na zewnątrz	PN-EN ISO 10077-1:2007	1,2	1,4

Jak można zauważyć nowa ościeżnica A1200S wyróżnia się na tle konstrukcji stalowej T55 ościeżnicy lepszymi właściwościami termoizolacyjnymi. Ościeżnica A1200S osiąga współczynnik przenikalności cieplnej na poziomie 1,2 W/m²K, co oznacza lepszą izolację termiczną w porównaniu do ościeżnicy T55, dla której współczynnik przenikalności cieplnej wynosi 1,4 W/m²K. Dzięki temu A1200S skuteczniej ogranicza straty ciepła, co przyczynia się do oszczędności energii i poprawy komfortu cieplnego w budynku a przede wszystkim spełnia wymogi rozporządzenia [5], osiągając warunek współczynnika przenikalności termicznej poniżej 1,3 W/m²K.

Pod względem odporności na obciążenie wiatrem oraz wodoszczelności, obie ościeżnice uzyskały porównywalne wyniki – klasa 2A dla drzwi otwieranych na zewnątrz oraz klasa 1A dla drzwi otwieranych do środka, co zapewnia odpowiednią ochronę przed działaniem wiatru i wody. Zarówno A1200S, jak i T55, osiągnęły klasę C1 w zakresie odporności na obciążenie wiatrem.

Ostatnim etapem porównania ościeżnic rozwiązania A1200S oraz T55 była analiza materiałowa metra bieżącego profilu.

Tablica 22. Analiza materiałowa profili ościeżnic.

	A1200S	T55
Stal [kg/mb]	1,79	2,03
Połączenie przekładki [kg/mb]	0,15	-
Wypełnienie profilu [kg/mb]	0,079	0,092

Na podstawie przeprowadzonej analizy kosztowej produktu w Tablicy 22. Stwierdzono, że konstrukcja ościeżnicy A1200S obniżyła zużycie stali o 12% w stosunku do profilu ościeżnicy T55. W konstrukcji A1200S dodatkowym kosztem jest poliuretan stanowiący przekładkę termiczną. Przyjmując cenę stali 4,7zł [91], oraz poliuretanu 9,3 zł [92]

Tablica 23. Analiza kosztowa profili.

	A1200S	T55
Stal [zł/mb]	8,4	9,5
Połączenie przekładki [zł/mb]	1,2	-
Wypełnienie profilu [zł/mb]	0,63	0,736
Suma [zł/mb]	10,25	10,27

Podsumowując, nowa ościeżnica A1200S to bardziej zaawansowane rozwiązanie, które dzięki lepszym właściwościom termoizolacyjnym pozwoli zapewnić wyższą efektywność energetyczną pomieszczeń. Choć pod względem odporności na warunki atmosferyczne oba przedstawione modele są na podobnym poziomie, to wyższa izolacyjność termiczna A1200S sprawia, że jest ona bardziej atrakcyjnym wyborem w wymagających zastosowaniach budowlanych, przy zachowaniu tych samych kosztów materiałowych (Tablica 23).

5. Podsumowanie

Obecne wymagania stawiane producentom drzwi stają się coraz bardziej rygorystyczne, co wprost wynika z regulacji Ministerstwa Transportu, Budownictwa i Gospodarki. Trendy w konstrukcji drzwi zmierzają w kierunku zwiększania grubości skrzydła i stosowania nowych materiałów, takich jak aluminium czy PVC, które muszą spełniać wyśrubowane normy dotyczące izolacyjności termicznej i wytrzymałości. Równocześnie, według raportu Centrum Analiz Branżowych, konsumenci coraz częściej wybierają tańsze rozwiązania, co skutkuje tym, że deweloperzy również zaczynają zwracać uwagę na niższe koszty.

W związku z rosnącymi kosztami materiałów budowlanych, rosnącą płacą minimalną, wzrostem kosztów energii oraz zmianą preferencji rynku, w stronę tańszych rozwiązań, kluczowe staje się stworzenie innowacyjnego produktu, który spełni zarówno wymagania regulacyjne, jak i oczekiwania klientów. W dobie ograniczania kosztów, konieczne jest opracowanie konstrukcji drzwi wejściowych o optymalnej relacji ceny do jakości, które zagwarantują odpowiednie parametry techniczne i użytkowe, a jednocześnie będą osiągalne w przystępnej cenie dla przeciętnego nabywcy.

Prezentowana praca, wskazany w niej cel badawczy i wykonany eksperyment udowadniają, że dobór odpowiednich materiałów inżynierskich, takich jak stal, poliuretan, czy kompozyty oraz technologii ich wytwarzania może stanowić klucz do sukcesu, w postaci nowego lepszego rozwiązania produktowego, o wysokiej izolacyjności termicznej, trwałości oraz odporności na warunki atmosferyczne, dodatkowo atrakcyjnego cenowo. Dzięki temu możliwe jest wytworzenie drzwi, które spełniają standardy związane z efektywnością energetyczną i trwałością, a jednocześnie są dostępne dla szerszego grona odbiorców, zarówno w segmencie deweloperskim, jak i detalicznym.

W niniejszej pracy przedstawiono zagadnienia związane z ościeżnicami stalowymi (tj. wysoka przenikalność termiczna oraz kondensacja wilgoci) oraz zaprezentowano istniejące rozwiązania, które pozwalają je zniwelować lub znacząco ograniczyć. Głównym celem przeprowadzonych badań było zaprojektowanie ościeżnicy o zredukowanym współczynniku przenikalności termicznej, co pozwoli na poprawę izolacyjności termicznej drzwi, a tym samym spełnienie rygorystycznych norm energetycznych (współczynnika przenikalności termicznej poniżej $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$). Dodatkowo zaprezentowane w dysertacji prace skupiły się na eliminacji mostków termicznych, które mogą znacząco wpłynąć na komfort cieplny oraz efektywność energetyczną całej konstrukcji.

Pierwszy etap prac polegał na opracowaniu prototypu ościeżnicy oraz zbadaniu różnych rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych. W szczególności skupiono się na wytypowaniu materiałów, które pozwoliłyby na znaczące obniżenie współczynnika przenikalności termicznej przekroju ościeżnicy. W tym celu przeanalizowano różnorodne materiały izolacyjne stosowane obecnie w budownictwie, które jednocześnie zachowują wymagania wytrzymałości oraz odporność na warunki atmosferyczne. W wyniku wykonanych prac obliczeniowo-projektowych z wykorzystaniem oprogramowania SOLIDWORKS opracowano serię prototypów, w których zastosowano różne kombinacje materiałowe, takie jak profile poliuretanowe, poliuretanowo-drewniane oraz poliuretanowo-stalowe (Rysunek 9).

Każda z 18 zaproponowanych koncepcji miała na celu przede wszystkim optymalizację izolacyjności termicznej ościeżnic. Profile poliuretanowe charakteryzowały się niskim współczynnikiem przewodzenia ciepła, co skutecznie zmniejszało przenikalność termiczną drzwi. Niestety z uwagi na niską gęstość poliuretanu (33kg/m^3), profile te nie spełniały wymagań dotyczących odpowiedniej sztywności, co ograniczało ich funkcjonalność w zastosowaniach konstrukcyjnych. Dlatego też zdecydowano się aby w kolejnych koncepcjach wprowadzono dodatki w postaci drewna i stali. Celem tych działań było wzmocnienie przekroju ościeżnicy, co miało zapewnić większą sztywność konstrukcji oraz poprawić jej trwałość. Choć zaproponowane rozwiązania (Rys. 9c) zwiększyły wytrzymałość, pojawiła się kwestia odpadów podczas obróbki profili, co negatywnie wpływało na zrównoważony rozwój i koszty operacyjne produkcji. W odpowiedzi na te wyzwania opracowano nową koncepcję, w której zastosowano kształtowniki stalowe (Rys. 10). Elementy te zostały wykrawane, gięte, a następnie łączone i wypełniane poliuretanem, tworząc monolityczny profil ościeżnicy. Takie podejście pozwoliło nie tylko na zmniejszenie ilości odpadów, ale także na zachowanie optymalnej sztywności konstrukcji oraz poprawę jej izolacyjności termicznej. W rezultacie udało się znacząco poprawić zarówno efektywność procesu produkcyjnego, jak i jakość finalnego produktu. Następnie tak opracowane przekroje prototypów poddano analizie numerycznej z wykorzystaniem oprogramowania BISCO, gdzie możliwe było określenie współczynników przenikalności termicznej.

Ustalono wpływ zarówno zastosowanych materiałów, jak i metody połączenia na współczynnik przenikalności termicznej ościeżnicy. Przeanalizowano 18 konfiguracji konstrukcyjno-materiałowych. Udowodniono, że promieniowanie cieplne wnikające w głąb przekroju konstrukcji prowadzi do pogorszenia parametrów izolacyjnych przekroju ościeżnica-

skrzydło. Dzieje się tak, ponieważ materiały o wysokim współczynniku przenikalności cieplnej wchodzi w kontakt z pustką powietrzną pomiędzy skrzydłem i ościeżnicą, co skutkuje emisją ciepła. Proces ten prowadzi do niekorzystnych zmian w rozkładzie temperatury, co przedstawiono w tabeli 11, a uzyskane wyniki (tabela 14) były podstawą do odrzucenia koncepcji B. Zauważono również istotny wzrost współczynnika przenikalności termicznej przy zastosowaniu kształtowników aluminiowych, co wprost wynika z wysokiego współczynnika przewodności cieplnej aluminium, wynoszącego $160 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

W kolejnym etapie badań, przeprowadzono analizę wytrzymałości na rozciąganie zaprojektowanych połączeń, wykonując szereg eksperymentów obejmujących wybrane warianty konstrukcyjno-materiałowe (tabela 15). Na podstawie wyników badań odrzucono rozwiązania o oznaczeniach A30S oraz A30A, ponieważ wykazywały one bardzo niskie wartości wytrzymałościowe, spowodowane niską wytrzymałością poliuretanu zastosowanego na połączeniu blach. Dodatkowo, analizując trzy koncepcje połączeń typu C, stwierdzono niskie wartości wytrzymałościowe wynikające z narażenia przekroju na jednoczesne zrywanie i ścinanie. Wyniki badań potwierdziły, że zwiększenie gęstości poliuretanu znacząco wpływa na wzrost wytrzymałości połączenia, przy jednoczesnym, jedynie nieznacznym pogorszeniu parametrów przenikalności termicznej badanego przekroju.

W celu określenia kolejnych właściwości użytkowych, zaprojektowano stanowisko do pomiaru odkształcenia słupka ościeżnicy pod wpływem zadanej temperatury. Aby zweryfikować, do jakiej temperatury mogą nagrzewać się drzwi w sezonie letnim w Polsce. Przeprowadzono eksperyment polegający na wystawieniu na ekspozycję słoneczną arkusza blachy w kolorze antracytu. Pozwoliło to na symulację rzeczywistych warunków nagrzewania drzwi oraz na ustalenie maksymalnej temperatury, jaką mogą osiągnąć podczas upalnych dni. Która posłużyła do ustalenia temperatury w jakiej badane będą profile ościeżnic. Następnie przygotowano stanowisko badawcze składające się z lamp UV umożliwiające nagrzanie skrzydła do 64°C (maksymalna uzyskana temperatura podczas ekspozycji blachy). Równocześnie zaprojektowano układ pomiarowy, pozwalający na monitorowanie wyboczenia profilu ościeżnicy pod wpływem wzrastającej temperatury, co umożliwiło ocenę stabilności termicznej konstrukcji. Badania rozpoczęto od pomiaru odkształcenia w temperaturze 24°C (temperatura otoczenia) następnie dokonano otwarcia oraz zamknięcia skrzydła drzwiowego w celu potwierdzenia prawidłowego zaryglowania drzwi. Kolejne pomiary odkształceń wykonywano przy wzroście temperatury o 20°C , co pozwoliło na analizę zmian zachodzących

w konstrukcji wraz ze stopniowym podnoszeniem temperatury. Podczas pomiaru wyboczenia oraz testów otwierania skrzydła drzwiowego ościeżnicy wykonanej z aluminium, w temperaturze 44°C, zaobserwowano znaczące pogorszenie funkcjonalności drzwi. Przy tej temperaturze doszło do wyraźnego wyboczenia profilu, co wymagało użycia dodatkowej siły do otwarcia drzwi. Wykazano, że wyboczenie profilu ościeżnicy jest bezpośrednią przyczyną sił oddziałujących na rygiel zamka. Deformacja słupka ościeżnicy wynikała bezpośrednio z rozszerzalności cieplnej aluminium, które pod wpływem ciepła ulegało odkształceniu. Wraz ze wzrostem temperatury problem ten się nasilał, a w temperaturze 64°C drzwi całkowicie utraciły swoją funkcjonalność. Nawet po zastosowaniu znacznej siły, otworzenie drzwi było trudne, a po ich otwarciu nie można było ich ponownie zamknąć, ze względu na trwałe odkształcenie ościeżnicy. Sytuacja ta wskazuje, że w wysokich temperaturach wyboczenie profilu staje się na tyle poważne, iż mechanizm zamykania i otwierania drzwi przestaje działać poprawnie. Wykazano również, że tego rodzaju zmiany nie miały charakteru trwałych odkształceń, gdzie element po obniżeniu temperatury do zadanej temperatury otoczenia (24°C) wracał do swojego pierwotnego stanu.

Na podstawie wyników badań stwierdzono również, że zastosowanie kształtowników z aluminium w konstrukcji ościeżnicy nie spełnia wymaganych kryteriów, szczególnie pod kątem odporności na zmiany temperatury. Stopy aluminium, mimo że charakteryzują się szeregiem korzystnych właściwości użytkowych i są powszechnie stosowane w aplikacjach budowlanych, w przypadku proponowanego rozwiązania wykazały znaczną podatność na wyboczenia w warunkach podwyższonej temperatury. Stanowi to poważne ograniczenie, zwłaszcza w przypadku drzwi zewnętrznych narażonych na bezpośrednie działanie promieni słonecznych. W związku z tym, ze względu na niewystarczające właściwości termiczne i stabilność wymiarową konstrukcji, koncepcja zastosowania kształtowników aluminiowych w projekcie została ostatecznie odrzucona.

W toku badań zweryfikowano również użytkowe właściwości drzwi, takie jak wodoszczelność oraz odporność na obciążenie wiatrem, zgodnie z obowiązującymi normami dla tego rodzaju konstrukcji. Istotnym etapem badań było porównanie wyników z aktualnie produkowanym produktem, aby sprawdzić, czy prace nad poprawą przenikalności termicznej nie wpłynęły negatywnie na pozostałe właściwości drzwi.

W końcowej fazie badań przeprowadzono szczegółową analizę możliwości wdrożenia zaprojektowanej konstrukcji do produkcji seryjnej. Skupiono się głównie na opracowaniu

i optymalizacji procesu gięcia kształtowników oraz przetwarzania poliuretanu, co stanowi kluczowy etap w technologii produkcji ościeżnic. Proces gięcia został zoptymalizowany w połączeniu z procesem przetwarzania poliuretanu, który koncentrował się głównie na zapewnieniu jednorodności struktury przekładki oraz stabilności jej parametrów termicznych i mechanicznych. Optymalizacja tych procesów była niezbędna do dostosowania produkcji do zasad Lean Manufacturing, co umożliwiło eliminację zbędnych strat oraz zwiększenie efektywności na wszystkich etapach wytwarzania. Uzyskana synchronizacja czasu cyklu z innymi operacjami produkcyjnymi pozwoliła na efektywne i ekonomiczne wdrożenie nowej konstrukcji, ograniczając przestoje oraz maksymalizując wydajność całego procesu technologicznego.

Ostatecznie, główny cel doktoratu wdrożeniowego został osiągnięty. Opracowano nowy profil ościeżnicy, który spełnia wymogi określone w rozporządzeniu Ministerstwa Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej dotyczące przenikalności termicznej drzwi pomiędzy przegrodą ogrzewaną i nieogrzewaną. Wymagania te są kluczowe dla poprawy efektywności energetycznej budynków, ponieważ właściwa izolacyjność drzwi znacząco wpływa na ograniczenie strat ciepła i zwiększenie efektywności energetycznej. Wprowadzenie nowej konstrukcji ościeżnicy na rynek przyniesie zatem korzyści nie tylko w kontekście lepszej wytrzymałości i trwałości produktu, ale również w zakresie poprawy standardów efektywności energetycznej, co jest istotnym elementem współczesnych wymogów zrównoważonego budownictwa. Dzięki temu innowacyjnemu rozwiązaniu możliwe będzie dostosowanie się do coraz bardziej restrykcyjnych norm energetycznych, jednocześnie zwiększając komfort użytkowników budynków poprzez zmniejszenie zużycia energii na ich ogrzewanie.

6. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz numerycznych oraz badań eksperymentalnych sformułowano następujące wnioski:

1. Udowodniono postawioną tezę pracy doktorskiej, że możliwe jest zaprojektowanie i wytworzenie nowego typu ościeżnicy stalowej o podwyższonych parametrach izolacyjnych, która umożliwi redukcję parametrów przenikalności termicznej drzwi przy jednoczesnym zachowaniu dotychczasowej grubości skrzydła drzwiowego, co w efekcie umożliwi stworzenie normatywnego i przystępnego cenowo produktu.
2. Zastosowanie poliuretanu w charakterze materiału izolacyjnego okazało się niezwykle obiecujące ze względu na jego niski współczynnik przewodności cieplnej. Wstępne badania wykazały jednak, że sam poliuretan o niskiej gęstości nie zapewnia wystarczającej sztywności konstrukcji.
3. Porównanie profili ościeżnicy, w których jako wzmocnienie zastosowano kształtowniki ze stali oraz stopu aluminium, wykazało że mimo szerokiego zastosowania w budownictwie, stopy aluminium nie spełniają wymagań funkcjonalnych w przypadku drzwi zewnętrznych narażonych na bezpośrednie działanie promieni słonecznych. Analizy przeprowadzone na stanowisku badawczym, umożliwiającym symulację warunków ekspozycji słonecznej, potwierdziły wyboczenia profili wzmocnionych kształtownikiem ze stopu aluminium na poziomie 4mm na długości 2m oraz wysoką rozszerzalność cieplną aluminium ($24 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), co uniemożliwiało zachowanie funkcjonalności drzwi w podwyższonych temperaturach.
4. Kluczowym elementem badań było zminimalizowanie mostków termicznych w miejscu styku ościeżnicy ze skrzydłem drzwiowym. Dowiedziono, że radiacyjne przenikanie ciepła do wnętrza profili prowadzi do zwiększenia współczynnika przenikalności cieplnej przekroju o ok. $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, zwłaszcza w przypadku zastosowania materiałów o wysokiej przewodności cieplnej. Wykorzystanie wypełnienia poliuretanowego oraz odpowiednie zaprojektowanych kształtowników stalowych pozwoliło na znaczne ograniczenie tej niekorzystnej wymiany ciepła. Jednocześnie potwierdzono, że zróżnicowana gęstość poliuretanu (33, 600 i $1200 \text{ kg}/\text{m}^3$) ma niewielki wpływ na finalny współczynnik przenikalności termicznej (na poziomie $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), przy jednoczesnym zauważalnym wzroście wytrzymałości na zrywanie, osiągającej wartość 120 N wraz ze wzrostem gęstości materiału.

5. Analiza procesu produkcyjnego na etapie projektowania profilu ościeżnicy umożliwiła jego optymalizację pod kątem produkcji seryjnej. Szczegółnej uwadze poddano możliwość zintegrowania cyklu gięcia kształtowników z jednoczesnym wypełnianiem ich poliuretanem, co usprawniło proces produkcyjny i pracochłonność procesu. Rozwiązanie to pozostaje w zgodzie z założeniami Lean Manufacturing, przyczyniając się do skrócenia czasu produkcji.
6. Wyniki porównawcze z istniejącym rozwiązaniem potwierdziły, że nowa konstrukcja ościeżnicy, z zastosowaniem poliuretanu jako przekładki termicznej i stali, spełnia normy przenikalności termicznej ($1,3\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) wyznaczone w rozporządzeniach Ministerstwa Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej. Jednocześnie przeprowadzone testy wodoszczelności i odporności na obciążenie wiatrem wykazały, że wprowadzone modyfikacje nie powodują obniżenia pozostałych (wodoszczelności, odporności na obciążenie wiatrem), istotnych właściwości użytkowych drzwi. Opracowana konstrukcja ościeżnicy umożliwia zatem ograniczenie strat ciepła, poprawę efektywności energetycznej budynków oraz utrzymanie korzystnego poziomu cen, co przekłada się na spełnienie kluczowych potrzeb współczesnego rynku budowlanego.

7. Bibliografia

1. Hołownia P., Wpływ przestrzennych mostków termicznych na podstawowe parametry fizyczne jednowarstwowych zewnętrznych przegród budowlanych *Czasopismo techniczne, Czasopismo Techniczne*, 83-90, 2007;
2. Żurawski J., Energooszczędna stolarka budowlana, *Izolacje V*, 46-48, 2008;
3. <https://www.wwf.pl/aktualnosci/nasze-budynki-podgrzewaja-klimat>,
dostęp:12.09.2024;
4. Aguilar-Santana J.L., Velasco-Carrasco M., Riffat S., Thermal Transmittance (U-value) Evaluation of Innovative Window Technologies, *Future Cities and Environment*, 6; pp.12,2020;
5. Dz.U. 2013 poz. 926 Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 5 lipca 2013 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie;
6. Czajka Z., Wymagania i badania niezbędne do oznakowania CE okien według zharmonizowanej normy europejskiej EN 14351-1. Część 1 Świat szkła; *Wydanie 5*, 73-75, 2007;
7. PN-EN 14351-1+A2_2016-10E Okna i drzwi Norma wyrobu, właściwości eksploatacyjne;
8. Czajka Z., Właściwości eksploatacyjne i klasyfikacja drzwi zewnętrznych, *Świat szkła* Nr 1, *Świat szkła*, 79-83, 2007;
9. PN-EN ISO 10077-1:2007, Ciepłne właściwości użytkowe okien, drzwi i żaluzji- Obliczanie współczynnika przenikania ciepła- Część 1: Postanowienia ogólne;
10. PN-EN ISO 10077-2:2017, Okna i drzwi - Norma wyrobu, właściwości eksploatacyjne - Część 1: Okna i drzwi zewnętrzne;
11. PN-EN ISO 12567-1:2010, Ciepłne właściwości użytkowe okien i drzwi – Określanie współczynnika przenikania ciepła metodą skrzynki grzejnej – Część 1: Kompletna okna i drzwi;
12. PN-EN 12210:2001 Okna i drzwi. Odporność na obciążenie wiatrem. Klasyfikacja;
13. PN-EN 12211:2001 Okna i drzwi. Odporność na obciążenie wiatrem. Metoda badania;
14. PN-EN 12208:2001 Okna i drzwi. Wodoszczelność. Klasyfikacja;
15. PN-EN 1027:2001 Okna i drzwi. Wodoszczelność. Metoda badania;
16. PN-EN 1191:2013-06 Okna i drzwi – Odporność na wielokrotne otwieranie i zamykanie;

17. <https://drzwimartom.pl/blog/rodzaje-oscieznic/> dostęp 11.08.2024;
18. <https://perfectstolarka.pl/blog/oscieznica-do-drzwi/> dostęp 11.08.2024;
19. Adamczyk-Królak I., Aerożele i pianki poliuretanowe - nowoczesne materiały termoizolacyjne w budownictwie, Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym 2(16) 2015;
20. <https://izosystems.pl/content/16-wspolczynniki-lambda>; dostęp: 21.03.2024;
21. Jaroschek Ch., Design of Injection Molded Plastic Parts, Hanser 2022;
22. Swinarew B., Poliuretany- nowoczesne wszechstronne materiały. Część I – charakterystyka ogólna, Przetwórstwo tworzyw T:20 nr 3, 2014;
23. Wirpsza Z.; „Polyurethanes, Chemistry, Technology and Applications”, Ellis Horwood, New York 1993;
24. <https://www.chemiaibiznes.com.pl/artykuly/coraz-bardziej-atrakcyjny-rynek-polioli> Dostęp 11.06.2014;
25. Ryszkowska J., Materiały poliuretanowe wytwarzanie z zastosowaniem surowców odnawialnych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2019;
26. Wirpsza Z., Poliuretany Chemia Technologia I Zastosowanie, WNT, 1991;
27. Prociak A, Rokicki G., Ryszkowska J., Materiały poliuretanowe, PWN 2016;
28. Królikowski W., Polimerowe kompozyty konstrukcyjne, PWN, 2012;
29. Dobrzański L., Podstawy Nauki o Materiałach i Metaloznawstwo, WNT Warszawa, 2002;
30. Piekarski B., Podstawy nauki o materiałach i inżynierii materiałowej, Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego, 2018;
31. Głowacka M., Landowski M., Łabanowski J., Współczesne materiały inżynierskie Wydawnictwo politechniki gdańskiej 2021;
32. Głowacka M., Metaloznawstwo, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 1996;
33. Dobrzański L., Metalowe materiały inżynierskie, WNT, 2024;
34. Blicharski M., Inżynieria materiałowa Stal, PWN, 2017;
35. PN-EN 10020:2003, Definicja i klasyfikacja gatunków stali;
36. PN-EN 10346:2015, Wyroby płaskie stalowe powlekane ogniowo w sposób ciągły do obróbki plastycznej na zimno;
37. Attique U., Ikramullah Butt S., Hussain S., Jaffery I., Zhang F., Hussain G., Formability characterization of steel tailor welded blanks formed through single point incremental

- forming, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 28, 1941-1956, 2024;
38. Bechler J., Lingbeek R., Grodotzki J., Tekkaya A. Erman, A novel method to characterize low-temperature brittle failure at various pre-strains, *Materials Research Proceedings*, Vol. 41, 930-939, 2024;
39. Novák V., Valeš M., Tatiček F., Šanovec J., Chrást'anský L., Analysis of forming capacity of HCT490X and DX57D depending on strain rate, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Eng.* Volume 1178, 2-21
40. João Ribeiro, Aldina Santiago, Constança Rigueiro, Damage model calibration and application for S355 steel, *Procedia Structural Integrity*, Volume 2, 656-663, 2016,
41. Xin H., Correia J., Veljkovic M., Three-dimensional fatigue crack propagation simulation using extended finite element methods for steel grades S355 and S690 considering mean stress effects, *Engineering Structures*, Volume 227, 111414, 2021;
42. <https://kmt.com.pl/drzwi-wejsciwowe/akcesoria/dodatki/oscieznice> dostęp 11.08.2024;
43. Orman M., Szopski K., Appel L., *Aluminium Poradnik*, WNT, 1967;
44. PN-EN 573-1:2006 Aluminium i stopy aluminium -- Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie -- Część 1: System oznaczeń numerycznych
45. Kenneth G. Conroy, Carmel B. Breslin, The electrochemical deposition of polyaniline at pure aluminium: electrochemical activity and corrosion protection properties, *Electrochimica Acta*, Volume 48, Issue 6, 721-732, 2003;
46. Kannan, V.S., Lenin, K., Srinivasan, D. *et al.* Analysis of Microstructural, Mechanical and Surface Properties of Aluminium Hybrid Composites Obtained Through Stir Casting. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, Volume 105, 733-744, 2024;
47. Arnoldt, A.R., Grohmann, L., Strommer, S. *et al.* Differential scanning calorimetry of age-hardenable aluminium alloys: effects of sample preparation, experimental conditions, and baseline correction. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Volume 149, 4425–4439, 2024;
48. Raju I., V.N.S.U. Viswanath Ammu, Kumar R. A., Chouhan R.N., Agnihotri A., Peripheral coarse grain formation in AA2024 and AA6063 aluminium alloys- A comparative study, *Materials Today: Proceedings*, Volume 113, 2024;

49. Engler O., Temperature-dependent yield strength of particle-containing non-heat-treatable aluminium sheet alloys, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 915, 2024;
50. Demirpolat H., Binali R., Kuntoğlu M., The influences of alloying elements and processing conditions on the machinability of wrought aluminium alloys: A literature review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E*. 2024;
51. Murugadoss, P., Jeyaseelan, C. Utilization of Silicon from Lemongrass Ash Reinforcement with ADC 12 (Al-Si alloy) Aluminium on Mechanical and Tribological Properties. *Silicon*, Volume 15, 1413-1428,2024;
52. Sathiyaseelan G., Bhagyanathan C., Srinath P., Gottmyers Melwyn J., Enhancing the strength and structure of Al-Si alloys for biomedical applications through the addition of Sr and Zr grain refiners on secondary AlSi7Mg aluminum alloys, *Chemical Physics Impact*, Volume 8,2024;
53. Saravana Kumar M., Vasumathi M., Rashia Begum S., Luminita M., Vlase S., Pruncu C. I., Influence of B4C and industrial waste fly ash reinforcement particles on the micro structural characteristics and mechanical behavior of aluminium (Al-Mg-Si-T6) hybrid metal matrix composite, *Journal of Materials Research and Technology*, p. 1201-1216, 2021;
54. Ahmed, H.M.; Ahmed, H.A.M.; Hefni, M.; Moustafa, E.B. Effect of Grain Refinement on the Dynamic, Mechanical Properties, and Corrosion Behaviour of Al-Mg Alloy. *Metals* **1**, *11*, 1825, 2021;
55. Dubey R. , Jayaganthan R., Ruan D., Gupta N.K., Jones N., Velmurugan R., Energy absorption and dynamic behaviour of 6xxx series aluminium alloys: A review, *International Journal of Impact Engineering*, Volume 172, 2023;
56. Zupanič F., Klemenc J., Steinacher M., Glodež S., Microstructure, mechanical properties and fatigue behaviour of a new high-strength aluminium alloy AA 6086, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 941,2023 *Journal of Materials Research and Technology*, , Volume 15, 2021;
57. Matthieu B., Lezaack, Aude S., Avoiding abnormal grain growth in thick 7XXX aluminium alloy friction stir welds during T6 post heat treatments, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 807, 2021;

58. Liu F., Zheng J, Chen X., Xu X. ,Chen B., Study on corrosion resistance of artificially aged 7075 aluminium alloy by using Cs-corrected STEM, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume 32, Issue 9, 2022;
59. Kwiatkowski T. Charakterystyka I Wykorzystanie Stopów Aluminium Oraz Taśm Węglowych W Budownictwie, Budownictwo B17, 2012;
60. Stanisław J., Skrzypek K., Przybyłowicz K., Inżynieria Metali I Technologie Materiałowe Wyd. 2, WNT, 2019;
61. PN-EN 573-3+A2:2024-06 Aluminium i stopy aluminium -- Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie -- Część 3: Skład chemiczny i rodzaje wyrobów;
62. <https://oknotest.pl/ranking-okien/ekookna/ecofutural> dostęp: 22,06,2024;
63. Kaczmarek W., Panasiuk J., Robotyzacja procesów produkcyjnych Wydawnictwo Naukowe PWN, 2017;
64. Michłowicz E., Smolińska K., Zwolińska B., Analiza możliwości poprawy funkcjonowania procesu produkcyjnego z wykorzystaniem metod lean TTS Technika Transportu Szynowego R.22, nr 12, 2015;
65. Kochański A, Cacko R., Czyżewski P., Nowe koncepcje w produkcji i wykorzystaniu profili stalowych Stal, Metale & Nowe Technologie , Nr 5-6, 2022;
66. Hui X., Wang X.: Forming quality analysis on the cold roll forming C-channel steel, Materials Science, Engineering 11 (10), 2018;
67. Roznowski M., Mirski T.: Method for obtaining steel sections and the steel section. PL225443, 2015;
68. Hirt G., Senge S.: Selected processes and modeling techniques for rolled products. Procedia Engineering, Vol.81, p.18, 2014;
69. Skarbiński M., Skarbiński J., Technologiczność konstrukcji maszyn, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1987;
70. Honczarenko J., Elastyczna automatyzacja wytwarzania. Obrabiarki i systemy obróbkowe, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2000
71. Rewilak J., Tokaj T., Procedura procesu zatwierdzania części do produkcji(PPAP) jako standard zapewnienia jakości dostawców (SQA) Zarządzanie Przedsiębiorstwem/ Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją, nr 2, s. 25-31,2012;
72. Herbuś K., Świder J., Zastosowanie technologii wirtualnej rzeczywistości w projektowaniu maszyn, Modelowanie inżynierskie 37, s. 141-146, 2009;

73. Honczarenko J. Wpływ nowoczesnych obrabiarek na technologiczność konstrukcji przedmiotów, *Mechanik*, R. 85, nr 1CD, Warszawa 2012;
74. Więcek-Janka E., Pawlicki J., Walkowski P. Przykład wprowadzania usprawnień w procesach produkcyjnych (analiza wybranego przypadku), *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Organizacja i Zarządzanie*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, nr 76, 271-282, 2018;
75. Tomczyk W. Aspekty ekologii w konstruowaniu i odnowie maszyn i urządzeń, *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, Sieć Badawcza Łukasiewicz - Poznański Instytut Technologiczny, Vol.50, nr 4, 45-47, 2005;
76. Narodowa Agencja Poszanowania Energii, Podręcznik typologii budynków mieszkalnych z przykładami z przykładami działań mających na celu zmniejszenie ich energochłonności. Warszawa, 2011. Dostęp online 12.02.2018 http://episcopo.eu/fileadmin/tabula/public/docs/brochure/PL_TABULA_TypologyBrochure_NAPE.pdf;
77. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2021/1119 z dnia 30 czerwca 2021 r. ustanawiające ramy dla osiągnięcia neutralności klimatycznej i zmieniające rozporządzenia (WE) nr 401/2009 i (UE) 2018/1999 („Europejskie prawo klimatyczne”);
78. <https://www.gov.pl/web/rozwoj-technologia/efektywnosci-energetycznej-budynkow> dostęp 11.08.2024;
79. Sękowski S., Szostkiewicz S., Świat tworzyw sztucznych, Wiedza Powszechna, 1965;
80. Bohajło A, Kołodziejczyk M. Modelowanie numeryczne parametrów lokalnych komfortu cieplnego w pomieszczeniu mieszkalnym, *Acta Mechanica et Automatica*, Vol.3 No.1 2009;
81. Janssens A., Van Den Bossche N., Buffel L., Arnold L. Thermal Optimization of Window Frames Energy Procedia Volume 78, 2015;
82. Awksientjuk J., Izolacyjność cieplna drzwi zewnętrznych i bram, *Świat Szkła* 9/2011;
83. <https://www.emvsystem.pl/poradnik/przenikalnosc-cieplna/> Dostęp 14.08.2024;
84. Van Den Bossche N., Thermal analysis of Curtain Wall Systems - a parametric study, Wall final, 2016;
85. Bisco 10.0w. User Manual, Physibel, Adegem, Belgium, 2012;
86. PN-EN ISO 6892-1:2020-05, Metale-Próba rozciągania- Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej;

87. Benutzerhandbuch, prüfanlage WWF, K. Schulten GmbH;
88. Czajka Z. Potrzebski D., Parametry techniczno-użytkowe drzwi zewnętrznych, Świat szkła, Tom 23, nr 3, 17-19, 2019;
89. PN-EN 12046-2:2001, Siły operacyjne -- Metoda badania -- Część 2: Drzwi;
90. PN-EN 14024:2024, Kształtowniki metalowe z przekładką termiczną -- Właściwości mechaniczne -- Wymagania, sprawdzenia i badania do oceny;
91. <https://hurtostal-blog.pl/aktualne-ceny-stali-w-polsce-w-lipcu-2024-roku/#:~:text=Ceny%20stali%20ocynkowanej%20wynosz%C4%85%20w,na%20swoj%C4%85%20odporno%C5%9B%C4%87%20na%20korozj%C4%99>. Dostęp: 14.09.24.
92. <https://www.tworzywa.pl/notowania/notowania-tworzyw-polska/> Dostęp: 14.09.24.