

Maciej MAJOR (orcid id: 0000-0001-5114-7932), **Mariusz KOSIŃ** (orcid id: 0000-0003-2683-7784)
Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

PARAMETRY CIEPLNO-WILGOTNOŚCIOWE NAROŻNIKA ŚCIANY ZEWNĘTRZNEJ WYKONANEJ W TECHNOLOGII SZKIELETOWEJ DREWNIANEJ I STALOWEJ

W artykule przedstawiono analizę porównawczą mostka cieplnego naroża ściany zewnętrznej wykonanego w technologii lekkiego szkieletu stalowego i technologii szkieletu drewnianego. Dodatkowo rozważono dwa przypadki obejmujące szkieletową konstrukcję z profili cienkościennych pełnych i Thermo. Na drodze symulacji komputerowej dokonano analizy cieplno-wilgotnościowej badanego złącza przegrody zewnętrznej. Obliczenia numeryczne wykonano w oparciu o MES z użyciem programu ANSYS.

Słowa kluczowe: lekkie stalowe konstrukcje szkieletowe, szkielet drewniany, rozkład temperatur, parametry cieplno-wilgotnościowe, mostek liniowy, metoda elementów skończonych, symulacja numeryczna

WPROWADZENIE

W literaturze przedmiotowej [1-5] można znaleźć wiele definicji i określić mostka cieplnego. Przytaczając normę PN-EN ISO 10211:2008 [3], mostek cieplny to obszar budynku, w której jednolity opór cieplny jest znacznie zmieniony przez:

- całkowite lub częściowe przebicie budynku przez materiał o innej przewodności cieplnej λ [W/(m·K)],
- zmianę grubości warstw materiału,
- różnicę między zewnętrznymi i wewnętrznymi powierzchniami przegród, tak jak to ma miejsce w przypadku połączeń np. ściana - strop, ściana - podłoga czy ściana - dach.

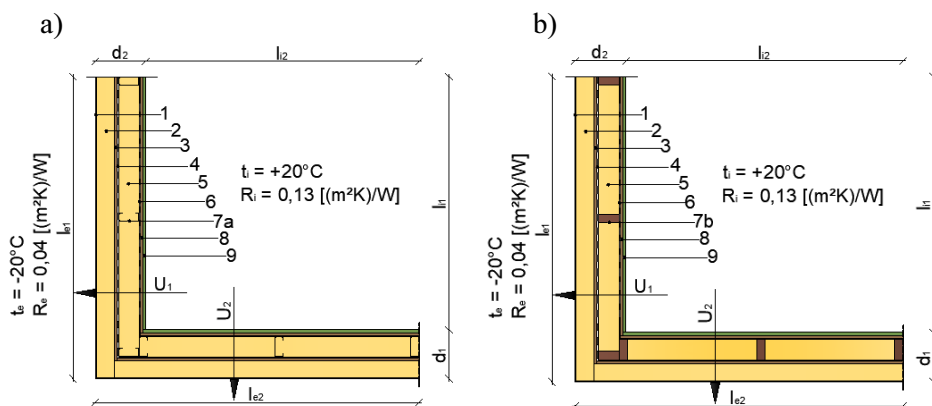
Z występowaniem mostków cieplnych wiąże się zwiększone przenikanie ciepła, które powoduje powiększenie strat ciepła z budynku, co w konsekwencji generuje wzrost kosztów eksploatacyjnych. Dodatkowo od strony wewnętrznej przegrody występuje ryzyko tworzenia kondensacji pary wodnej, która może prowadzić do szeregu procesów destrukcyjnych przegrody.

1. CHARAKTERYSTYKA PRZEGRÓD PRZYJĘTYCH DO ANALIZY TERMICZNEJ

Celem opracowania było określenie i porównanie charakterystyki ochrony cieplnej naroża ściany zewnętrznej, sprawdzenie wystąpienia kondensacji pary

wodnej i rozwoju pleśni na wewnętrznej stronie przegrody przez ścianę wykonaną w technologii lekkiego szkieletu stalowego oraz szkieletowej drewnianej.

Zakres pracy obejmował wykonanie analizy numerycznej z wykorzystaniem MES naroża przegrody pionowej zbudowanej z kształowników cienkościennych pełnych, kształowników cienkościennych Thermo oraz drewnianych. Do analizy przyjęto przegrody dziewięciowarstwowe (rys. 1), których elementy nośne różnią się od siebie.



Rys. 1. Modele obliczeniowe analizowanych przegród: a) w technologii lekkiego szkieletu stalowego, b) w technologii szkieletu drewnianego; 1 - tynk cienkowarstwowy gr. 0,5 cm; 2 - wełna mineralna gr. 16 cm, 3 - płyta cementowo-drzazgowa gr. 1,2 cm, 4 - folia paroprzepuszczalna, 5 - wełna mineralna 140 cm, 6 - folia paroizolacyjna, 7a) - profil stalowy pełny/Thermo C 140 gr. 0,15 cm, 7b) - profil drewniany gr. 14 cm, 8 - płyta cementowo-drzazgowa gr. 1,2 cm, 9 - płyta g-k gr. 1,25 cm

1.1. Parametry cieplne analizowanych przegród

Charakterystykę materiałową dla analizowanych rozwiązań narożników przegrody zewnętrznej przedstawiono w tabeli 1. Ze względu na znikomy wpływ w obliczeniach dane odnośnie do folii paroprzepuszczalnej i paroizolacyjnej zostały pominięte.

Postępując zgodnie z poniższym algorytmem, na drodze symulacji komputerowej wyznaczono współczynnik przenikania ciepła $U \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$ dla analizowanych rozwiązań naroży [6]:

- obliczenie wartości średniej składowej poziomej gęstości strumienia ciepła odpowiednio dla części złącza q_1 i $q_2 \text{ [W/m}^2\text{]}$,
- obliczenie współczynnika przenikania ciepła na podstawie:

$$U_1 = q_1 / (t_i - t_e) \text{ [W/(m}^2\text{K)]} \quad (1)$$

$$U_2 = q_2 / (t_i - t_e) \text{ [W/(m}^2\text{K)]} \quad (2)$$

gdzie:

q_1, q_2 - grubość warstwy $\text{[W/m}^2\text{]}$;

t_i, t_e - temperatura wewnętrzna wg [7] i zewnętrzna [8].

Tabela 1. Dane materiałowe analizowanych przegród

Lp.	Rodzaj materiału	Grubość d [m]	Współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(m·K)]
1	Tynk cienkowarstwowy	0,0045	0,7
2	Włna mineralna	0,16	0,035
3	Płyta cementowo-drzazgowa	0,012	0,215
4	Folia paroprzepuszczalna	-	-
5	Profil cienkościenny pełny/ Thermo C140/profil drewniany	0,0015 ¹⁾ ; 0,14 ²⁾	50 ³⁾ ; 0,16 ⁴⁾
6	Włna mineralna	0,09	0,035
7	Folia paroizolacyjna	-	-
8	Płyta cementowo-drzazgowa	0,012	0,215
7	Płyta gipsowo-kartonowa	0,0125	0,25

Grubość: ¹⁾ profili cienkościennych, ²⁾ profili drewnianych. Współczynnik przewodzenia ciepła dla: ³⁾ profili cienkościennych, ⁴⁾ profili drewnianych

1.2. Założenia obliczeniowe

Na podstawie [7] przyjęto wewnętrzną temperaturę $t_i = +20^\circ\text{C}$, natomiast wg [8] projektową temperaturę zewnętrzną $t_e = -20^\circ\text{C}$. Do analizy MES przyjęto współczynniki przejmowania ciepła po stronie wewnętrznej dla przepływu: poziomego po stronie wewnętrznej $h_i = 7,69$ [W/(m²·K)] i po stronie zewnętrznej $h_e = 25$ [W/(m²·K)], które stanowią odwrotność oporów R_{si} , R_{se} [(m²·K)/W] [5, 9]. Do obliczeń minimalnej temperatury na wewnętrznej stronie przegrody t_{\min} [°C] oraz czynnika temperaturowego f_{Rsi} [-] stosuje się warunki brzegowe wg [10], które wynoszą $R_{si} = 0,13$ [(m²·K)/W] dla ram i okien, a w pozostałych przypadkach $R_{si} = 0,25$ [(m²·K)/W].

Analizę numeryczną wykonano przy użyciu programu ANSYS opartego na metodzie elementów skończonych [11-13]. Analiza przeprowadzona została przy założeniu jednorodności i izotropii materiałów, z jakich wykonane są poszczególne warstwy.

2. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

W celu weryfikacji uzyskanych współczynników przenikania ciepła dokonano sprawdzenia na drodze analitycznej. Największa różnica w obliczonym analitycznie i numerycznie współczynnika przenikania ciepła U [W/(m²·K)] wynosiła 4%.

Dla liniowego współczynnika przenikania ciepła Ψ [W/(m·K)] założono wysokość naroża równą 1 m. Dzięki temu po obliczeniu wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła można mnożyć jego wartość przez długość mostka [14].

Wartość strumienia ciepła Φ [W] przepływającego przez złącze dla każdego z rozpatrywanych wariantów obliczono przy użyciu metod numerycznych (tab. 2). W tabeli 3 zestawiono parametry cieplne analizowanych przegród.

Tabela 2. Wartości całkowitych strumieni ciepła Φ dla analizowanych wariantów naroży ściany

Całkowity strumień ciepła Φ [W] przepływający przez złącze	Grubość ocieplenia 16 cm
Profil pełny	15,485
Profil Thermo	15,236
Profil drewniany	12,337

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że wartość współczynnika przenikania ciepła U [$W/(m^2 \cdot K)$] jest najkorzystniejsza dla konstrukcji szkieletowej drewnianej. Niemniej jednak dla pozostałych rozpatrywanych konstrukcji współczynnik U [$W/(m^2 \cdot K)$] charakteryzuje się dużo niższą wartością od podanych w [7]. Różnica pomiędzy profilem cienkościennym pełnym a profilem cienkościennym Thermo wynosi ok. 2%. Biorąc pod uwagę otwory o niewielkiej powierzchni w profilu Thermo i uproszczoną siatkę elementów skończonych modelu numerycznego, można przypuszczać, że zbudowanie bardziej złożonej siatki jeszcze bardziej zmniejszyłoby tę różnicę.

Analizując pozostałe parametry cieplne rozpatrywanych naroży, również najkorzystniej wypada konstrukcja szkieletowa drewniana. Wartość strumienia ciepła Φ [W] (tab. 2) dla profili drewnianych jest o 20% mniejsza niż w przypadku profili cienkościennych. Natomiast porównując między sobą profile stalowe, różnica między nimi wynosi niespełna 1,5%.

Tabela 3. Parametry cieplne analizowanych przegród zewnętrznych

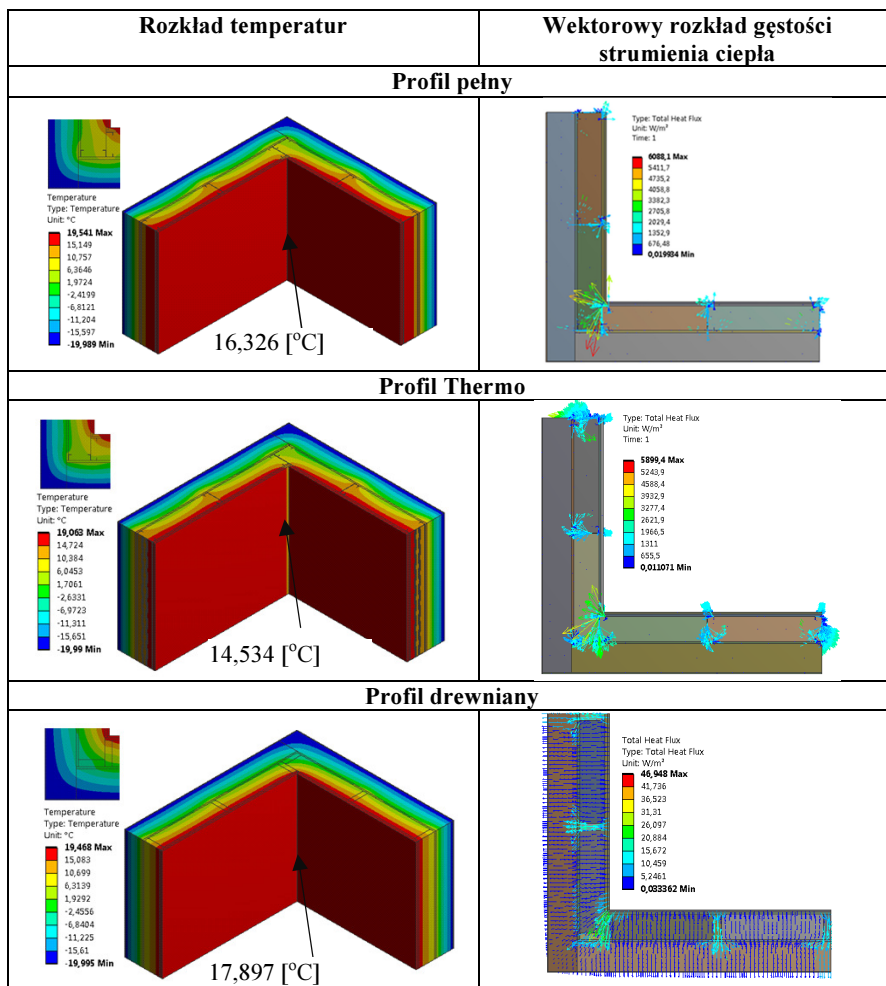
Lp.	Charakterystyczne parametry cieplne narożnika ściany zewnętrznej	Grubość ocieplenia 16 cm
1	Współczynnik przenikania ciepła U [$W/(m^2 \cdot K)$] poszczególnych części złącza	Profil pełny $U_1; U_2$ 0,138
		Profil Thermo $U_1; U_2$ 0,141
		Profil drewniany $U_1; U_2$ 0,121
2	Liniowy współczynnik sprzężenia cieplnego L^{2D} [$W/(m \cdot K)$] $L^{2D} = \frac{\Phi}{l \cdot (t_i - t_e)}$	Profil pełny L^{2D} 0,387
		Profil Thermo L^{2D} 0,381
		Profil drewniany L^{2D} 0,308
3	Liniowy współczynnik przenikania ciepła (po wymiarach wewnętrznych) Ψ_i [$W/(m \cdot K)$] $\Psi_i = L^{2D} - (l_{i1} \cdot U_1 + l_{i2} \cdot U_2)$	Profil pełny Ψ_i 0,065
		Profil Thermo Ψ_i 0,059
		Profil drewniany Ψ_i 0,030
4	Liniowy współczynnik przenikania ciepła (po wymiarach zewnętrznych) Ψ_e [$W/(m \cdot K)$] $\Psi_e = L^{2D} - (l_{e1} \cdot U_1 + l_{e2} \cdot U_2)$	Profil pełny Ψ_e -0,027
		Profil Thermo Ψ_e -0,033
		Profil drewniany Ψ_e -0,049
5	Współczynnik temperaturowy $f_{Rsi,obl}$ $f_{Rsi,obl} = \frac{t_{s,min} - t_e}{t_e - t_i}$	Profil pełny 0,858
		Profil Thermo 0,862
		Profil drewniany 0,914

Gdzie: Φ - strumień ciepła przepływającego przez złącze; t_i , t_e - temperatura wewnętrzna i zewnętrzna [$^{\circ}C$]; l_1 , l_2 - wymiary wewnętrzne [m]; l_{e1} , l_{e2} - wymiary zewnętrzne [m]; $t_{s,min}$ - min. temperatura dla narożnika [$^{\circ}C$].

To samo odnosi się do wyliczonych liniowych współczynników ciepła Ψ [$W/(m \cdot K)$] (tab. 3). I tak, przykładowo, wartość liniowego współczynnika ciepła

po wymiarach zewnętrznych Ψ_e [W/(m·K)] dla szkieletu drewnianego jest aż ok. 44% korzystniejsza od pozostałych.

Tabela 4. Rozkład temperatury i wektorowy rozkład gęstości strumienia ciepła analizowanych naroży



Oprócz parametrów ciepłych określono charakterystykę wilgotnościową rozpatrywanych naroży według [11]. W wyniku obliczeń numerycznych otrzymano wartości minimalne temperatury t_{\min} [°C] na wewnętrznej powierzchni przegrody mostka termicznego. Minimalna temperatura dla przegrody w konstrukcji szkieletowej drewnianej wynosi $t_{\min} = 16,6^{\circ}\text{C}$ i jest o ok. 13% wyższa od konstrukcji stalowych. Na podstawie zależności (3) obliczono współczynnik temperaturowy:

$$f_{Rsi,obl} = \frac{t_{si,min} - t_e}{t_i - t_e} \quad (3)$$

gdzie:

$t_{si,min}$ - temperatura minimalna na wewnętrznej powierzchni przegrody mostka termicznego [$^{\circ}\text{C}$],

t_e - temperatura powietrza zewnętrznego [$^{\circ}\text{C}$],

t_i - temperatura powietrza wewnętrznego [$^{\circ}\text{C}$].

Wartość czynnika temperaturowego dla analizowanych konstrukcji zestawiono w tabeli 3. Według [7], wartość krytyczna współczynnika temperaturowego $f_{Rsi,kryt}$ wynosi 0,72. Jak widać, w przypadku analizowanych złączy wartości $f_{Rsi,obl}$ są większe od wartości krytycznej $f_{Rsi,kryt}$, tak więc nie występuje ryzyko występowania kondensacji na wewnętrznej powierzchni przegrody.

Numeryczną analizę termiczną przeprowadzono w programie ANSYS. W tabeli 4 podano rozkład temperatur oraz wektorowy rozkład gęstości strumienia ciepła dla rozpatrywanych wariantów naroża ściany. W miejscach usytuowania słupków konstrukcyjnych można zaobserwować znaczną różnicę między elementami drewnianymi i cienkościennymi. Natomiast porównując rozkład gęstości strumienia ciepła pomiędzy narożnikiem wykonanym z profili pełnych i Thermo, nie dostrzega się widocznych zmian. Dla profili Thermo w narożu widoczne jest pasmo niższej temperatury ($15,5^{\circ}\text{C}$) w porównaniu do pozostałych rozwiązań. I tak w narożu od strony wewnętrznej dla technologii szkieletowej drewnianej temperatura wnosi $17,9^{\circ}\text{C}$, a w narożu wykonanym z profili cienkościennych pełnych temperatura wynosi $16,3^{\circ}\text{C}$.

PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że konstrukcja analizowanego naroża w technologii lekkiego szkieletu stalowego zarówno dla profili pełnych, jak i Thermo wykazuje gorsze parametry cieplno-wilgotnościowe w porównaniu z konstrukcją drewnianą. Przykładowo całkowity liniowy współczynnik przenikania ciepła całego złącza Ψ_e [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] dla konstrukcji w technologii szkieletu drewnianego jest korzystniejszy o ok. 45% od konstrukcji wykonanej w technologii lekkiego szkieletu stalowego z profili pełnych. To samo odnosi się do czynnika temperaturowego $f_{Rsi,obl}$, który charakteryzuje się lepszym parametrem od rozwiązań z elementami cienkościennymi.

Rozpatrując natomiast konstrukcję naroża wykonaną z profili cienkościennych pełnych i Thermo, różnica między parametrami cieplno-wilgotnościowymi jest mniejsza. Porównując liniowy współczynnik przenikania ciepła po wymiarach zewnętrznych Ψ_e [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$], lepszymi parametrami charakteryzuje się naroże ściany wykonane z profili Thermo. W przypadku czynnika temperaturowego $f_{Rsi,obl}$ spełnione są wymagania stawiane przez [7], a różnica między nimi wynosi ok. 0,5%.

W miejscach występowania mostków cieplnych należy dążyć do ograniczenia ich niekorzystnego wpływu na straty ciepła i ryzyko wystąpienia kondensacji. W tym celu należy szczególną uwagę zwrócić na odpowiednio kształtowane układy materiałowe w danym złączu, jak też nie dopuścić do powstawania szczelin pomiędzy izolacją cieplną a elementami konstrukcyjnymi.

Wykonana analiza potwierdza przydatność numerycznych programów obliczeniowych bazujących na MES. Przykładowo dzięki nim można na etapie projektowym dokonać oceny rozwiązań technologiczno-konstrukcyjnych niezwykle istotnych na etapie eksploatacji

LITERATURA

- [1] Kołodziejczyk S., Fizyka konstrukcji budowlanych, PWN, Łódź 1962.
- [2] Bogosławski W.N., Procesy ciepłno-wilgotnościowe w budynkach, Arkady, Warszawa 1985.
- [3] PN-EN ISO 10211:2008 Mostki ciepłne w budynkach. Strumienie ciepła i temperatury powierzchni. Obliczenia szczegółowe.
- [4] PN-EN ISO 14683:2008 Mostki ciepłne w budynkach. Liniowy współczynnik przenikania ciepła. Metody uproszczone i wartości orientacyjne.
- [5] Pawłowski K., Projektowanie przegród zewnętrznych w świetle aktualnych warunków technicznych dotyczących budynków, Grupa Medium, Warszawa 2016.
- [6] Gołaś A., Ryś M., Gajda R., Badanie własności termoizolacyjnych okien z wykorzystaniem metody elementów skończonych, Modelowanie Inżynierskie 2011, 41, 91-98.
- [7] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz.U. z 2002 r., Nr 75, poz. 690.
- [8] PN-EN 12831:2006 Instalacje ogrzewcze w budynkach. Metoda obliczania projektowego obciążenia ciepłnego.
- [9] PN-EN ISO 6946:2008 Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór ciepłny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.
- [10] PN-EN ISO 13788:2003 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku. Temperatura powierzchni wewnętrznej umożliwiająca uniknięcie krytycznej wilgotności powierzchni wewnętrznej kondensacji. Metody obliczania.
- [11] ANSYS Mechanical APDL Thermal Analysis Guide. 2013.
- [12] Madenci E., Guven I., The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®, Springer, 2007.
- [13] Major M., Kosiń M., Modelowanie rozkładu temperatur w przegrodach zewnętrznych wykonanych z użyciem lekkich konstrukcji stalowych, Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym 2016, 2(18), 55-60.

THERMAL AND HUMIDITY PARAMETERS OF EXTERNAL WALLS IN WOOD AND STEEL SKELETON TECHNOLOGY

The paper presents a comparative analysis of the thermal bridges of the external wall made of light steel skeleton technology and wood skeleton technology. In addition, two cases have been considered including a skeletal structure made of thin and thermo-thin profiles. On the computer simulation made the thermal and humidity analysis of the analyzed of the external wall. Numerical calculations are based on FEM using ANSYS.

Keywords: lightweight steel framing, wooden skeleton, temperature distribution, thermo-humidity parameters, thermal bridge, finite element method, numerical simulation