

BADANIA I STUDIA – RESEARCH AND STUDIES

Zofia Laskowska*

NUMERYCZNA ANALIZA ODPORNOŚCI OGNIOWEJ USZCZELNIENIA PRZEJŚĆ RUR METALOWYCH PRZEZ PRZEGRODY

W artykule omówiono model numeryczny dotyczący określania kryterium izolacyjności ogniowej uszczelnienia przejść rur metalowych przez przegrody wraz z algorytmem obliczeń. Przedstawiono wyniki analizy numerycznej.

1. Wprowadzenie

Artykuł został opracowany na podstawie pracy naukowo-badawczej prowadzonej w latach 2007–2008 w Zakładzie Badań Ogniowych ITB.

Celem pracy było opracowanie modelu obliczeniowego przepływu ciepła przez rury metalowe z izolacją z wełny mineralnej wraz z warunkami początkowym i warunkami brzegowymi, pozwalającego na określenie rozkładu temperatury w izolowanych i nieizolowanych rurach metalowych wraz z uszczelnieniem przy przejściu tych rur przez przegrody (ściany i stropy).

Podjęcie pracy było rezultatem licznych zapytań i zleceń ze strony projektantów oraz wykonawców o uszczelnienia przejść rur metalowych przez ściany i przegrody. Przeprowadzane modernizacje wielu budynków z uwagi na zmianę ich przeznaczenia wymagają rozwiązań uszczelnienia przejść instalacji, których nie obejmują aprobaty techniczne. Przeprowadzenie badań odporności ogniowej uszczelnień przejść rur niepalnych przez przegrody jest kosztowne i czasochłonne. Zleceniodawcy są zainteresowani szybkim opracowaniem klasyfikacji w zakresie odporności ogniowej uszczelnienia przejść rur niepalnych w modernizowanych i nowo projektowanych budynkach.

W badaniach odporności ogniowej, mimo przewidywań, nie można określić wszystkich możliwych rozwiązań, które mogą wystąpić w praktyce.

*dr inż. – Zakład Badań Ogniowych, Instytut Techniki Budowlanej

Zadaniem uszczelnień przejść rur metalowych jest przede wszystkim zapobieżenie przewodzenia ciepła przez materiał rury i jej izolację oraz uszczelnienie przejścia rury przez przegrodę: ścianę lub strop.

Określenie odporności ogniowej uszczelnienia przejść rur metalowych przez ściany i stropy związane jest z określeniem kryteriów szczelności i izolacyjności ogniowej [1], [2]. O ile kryterium szczelności ogniowej jest związane z pojawieniem się płomienia i szczelin, które można wyeliminować przez odpowiednie rozwiązanie uszczelnień wokół rury, to kryterium uzyskania izolacyjności ogniowej wiąże się z przekroczeniem przyrostu temperatury o 180°C w ściśle określonych punktach rozwiązania uszczelnienia. W pracy, w analizie numerycznej wykorzystane zostało to kryterium temperaturowe, przy uwzględnieniu zmiany właściwości fizycznych materiałów (betonu, wełny mineralnej, stali) w funkcji temperatury.

W artykule omówiono model numeryczny, dotyczący określania kryterium izolacyjności ogniowej uszczelnienia przejść rur metalowych przez przegrody wraz z algorytmem obliczeń oraz podano wyniki analizy numerycznej.

Porównanie wyników z analizy numerycznej i doświadczalnej zostanie przedstawione w odrębnym artykule.

2. Analiza numeryczna

2.1. Założenia

Zadanie trójwymiarowe przewodzenia ciepła w obszarze: przegroda betonowa, rura stalowa, izolacja zostało sprowadzone – z uwagi na osiową symetrię – do dwuwymiarowego przewodzenia ciepła. Jest to obarczone pewnym błędem, ale w przypadku jakościowej oceny wystarczające.

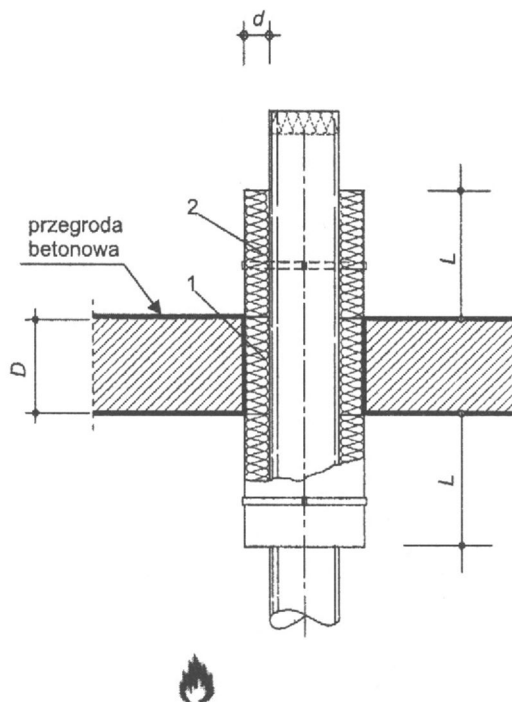
Rozpatrzono zatem dwukierunkowe przewodzenie ciepła w obszarze: przegroda betonowa, rura stalowa, izolacja z wełny mineralnej przy nagrzewaniu z jednej strony, zgodnie z rysunkiem 1.

Założono:

- a) przejmowanie ciepła przez promieniowanie i konwekcję od strony nagrzewanej,
- b) wymianę ciepła pomiędzy przegrodą, rurą i izolacją a powietrzem od strony nienagrzewanej,
- c) przyjęto właściwości fizyczne materiałów: betonu, stali i izolacji w funkcji temperatury.

Analizę odporności ogniowej uszczelnienia przejść rur metalowych przez przegrody ograniczono do spełnienia kryterium izolacyjności ogniowej, tj. do uzyskania przyrostu temperatury o 180°C na izolacji w odległości 25 mm od przegrody, na rurze w odległości 25 mm od izolacji oraz na samym uszczelnieniu wokół rury.

- 1 – rura,
 2 – izolacja z wełny mineralnej,
 d – grubość izolacji,
 D – grubość przegrody,
 L – długość izolacji powyżej
 i poniżej stropu
 1 – pipe,
 2 – pipe insulation,
 d – insulation thickness
 D – wall/floor thickness,
 L – insulation length above
 and below floor



Rys. 1. Obszar przewodzenia ciepła
 Fig. 1. Area of heat transfer

2.2. Model przewodzenia ciepła

Pola temperatury w obszarze określonym na rysunku 1 można opisać równaniem

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

- gdzie: T – temperatura,
 λ_x, λ_y – anizotropowe współczynniki przewodności cieplnej zależne od temperatury i współrzędnych przestrzennych,
 ρ, c – gęstość i ciepło właściwe zależne od współrzędnych przestrzennych,
 x, y – prostokątny układ współrzędnych kartezjańskich,
 t – czas.

Warunek początkowy zdefiniowany jest przez rozkład temperatury w rozpatrywanym obszarze w czasie $t = 0$ danej jako znana funkcja x i y :

$$T(x, y, 0) = f(x, y) \quad \text{dla } t = 0 \quad (2)$$

Warunki brzegowe:

- znana temperatura na części Γ_T brzegu obszaru w dowolnej chwili zdefiniowanej jako znana funkcja zmiennych x, y, t ,
- znany strumień ciepła na części Γ_q brzegu obszaru zdefiniowanego w postaci:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n}(x, y, t) = q_n(x, y, t) \quad x, y \in \Gamma_q \quad (3)$$

gdzie: q_n – strumień ciepła na części Γ_q brzegu obszaru,

n – normalna do brzegu Γ_q ,

λ – współczynnik przewodności cieplnej,

Γ_q – część brzegu obszaru, na którym znany jest strumień ciepła,

- konwekcyjny warunek brzegowy dla przypadku swobodnej konwekcji zdefiniowany w postaci:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n}(x, y, t) = \alpha (T_\theta - T_s) \quad (4)$$

gdzie: α – współczynnik przejmowania ciepła,

T_θ – znana temperatura otoczenia,

T_s – temperatura na brzegu obszaru,

Γ_α – część brzegu obszaru, na której jest zadany konwekcyjny warunek brzegowy,

- radiacyjny warunek brzegowy, zdefiniowany następująco:

$$q_r(x, y, t) = V_k C_0 \left[\frac{1}{\frac{1}{\epsilon_r} - 1} \right] (T_R^4 - T_s^4) \quad x, y \in \Gamma_r \quad (5)$$

gdzie: V_k – kątowy współczynnik promieniowania,

C_0 – stała Stefana – Boltzmana,

ϵ_r – współczynnik emisyjności spalin,

ϵ_s – współczynnik emisyjności powierzchni brzegu,

T_r – bezwzględna temperatura spalin,

T_s – bezwzględna temperatura powierzchni brzegu,

Γ_r – część brzegu obszaru, na którym zadany jest radiacyjny warunek brzegowy; brzeg obszaru Γ równy jest sumie brzegów $\Gamma_T, \Gamma_q, \Gamma_\alpha, \Gamma_r$.

Nieliniowe, niestacjonarne, dwuwymiarowe przewodzenie ciepła w czasie $t + \Delta t$ dla dyskretyzowanego obszaru, wynikające z bilansu ciepła w węzłach, opisane jest równaniem:

$$\underline{C}(T) \dot{\underline{T}}_{t+\Delta t} + \underline{K}(T) \underline{T}(t) = \underline{Q}(t) \quad (6)$$

gdzie: $\underline{C}(T)$ – globalna macierz pojemności cieplnej,

$\underline{K}(T)$ – globalna macierz przewodności cieplnej,

- $\underline{T}(t)$ – wektor wartości temperatury w węzłach,
 $\underline{Q}(t)$ – wektor zewnętrznych źródeł ciepła,
 t – czas.

Aproksymując

$$\underline{C}_{t+\Delta t} \cong \underline{C}_t, \underline{K}_{t+\Delta t} \cong \underline{K} \quad (7)$$

oraz eliminując pochodną po czasie (według schematu Eulera, tzn. przyjmując liniową zmianę temperatury na kroku Δt)

$$\dot{\underline{T}}_{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (\underline{T}_{t+\Delta t} - \underline{T}_t) \quad (8)$$

otrzymuje się:

$$\left[\frac{1}{\Delta t} \underline{C}_t + \underline{K}_t \right] (\underline{T}_{t+\Delta t} - \underline{T}_t) + \underline{K}_t \underline{T}_t = \underline{Q}_{t+\Delta t} \quad (9)$$

Równanie przyrostowe przewodzenia ciepła wyprowadza się z równania (9), odejmując stronami wyrażenie $\underline{K}_t \underline{T}_t$. Otrzymuje się:

$$\underline{K}_t \Delta \underline{T}_t = \underline{Q}_{t+\Delta t} - \underline{F}_t^k \quad (10)$$

gdzie: $\Delta \underline{T}_t = \underline{T}_{t+\Delta t} - \underline{T}_t$

$$\underline{K}_t = \frac{1}{\Delta t} \underline{C}_t + \underline{K}_t$$

$$\underline{F}_t^k = \underline{K}_t \underline{T}_t$$

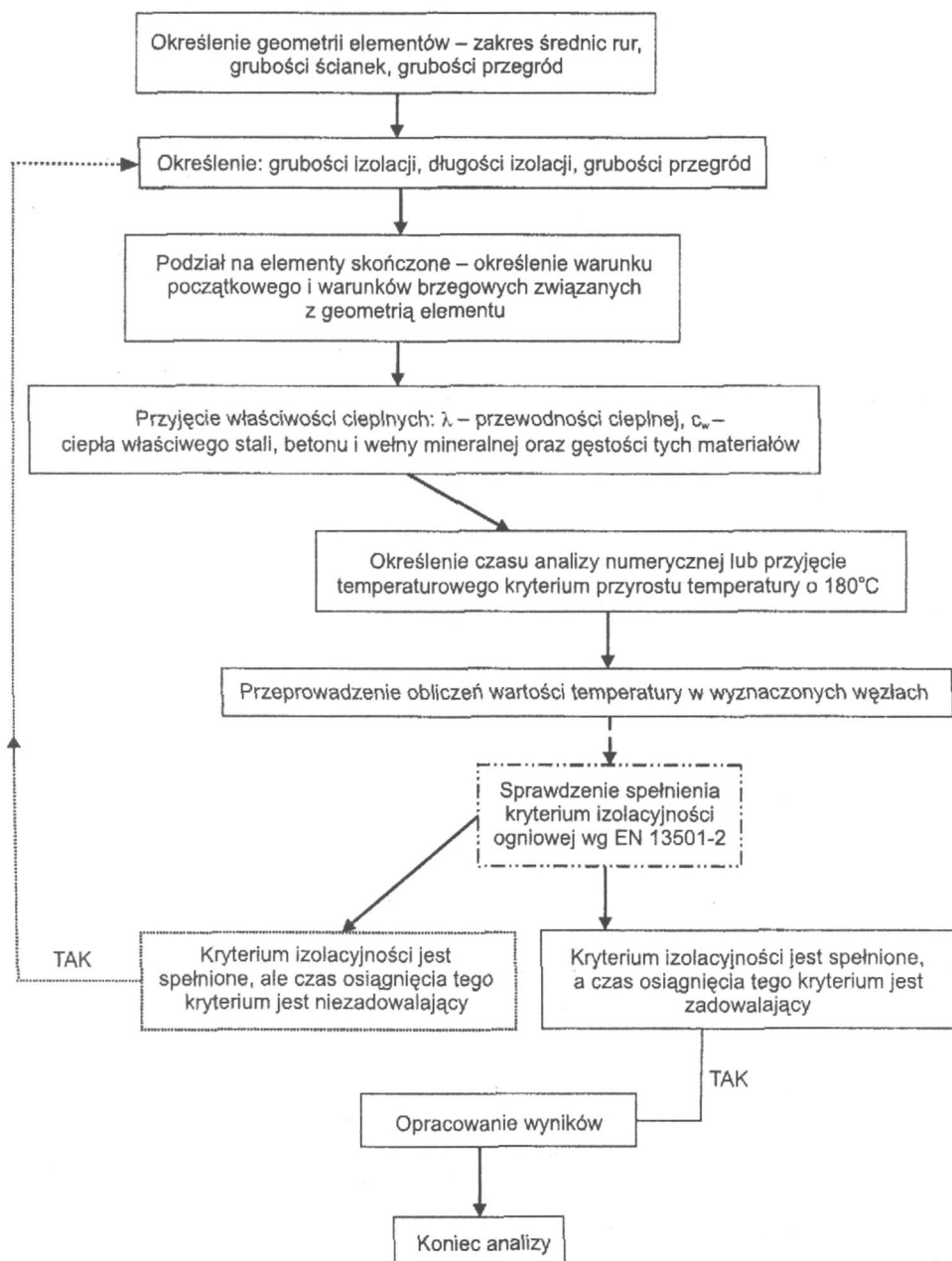
Po rozwiązaniu równania (9) oblicza się wartości temperatury w węzłach w czasie $t + \Delta t$ z zależności:

$$\underline{T}_{t+\Delta t} = \underline{T}_t + \Delta \underline{T}_t \quad (11)$$

Temperatury $\underline{T}_{t+\Delta t}$ otrzymane z równań (10) i (11) są tylko aproksymacją aktualnych wartości temperatury w czasie $t + \Delta t$, z uwagi na linearyzację równania (9). Błąd wynikający z linearyzacji zmniejszany jest przez iteracyjne rozwiązanie równania przewodzenia ciepła.

3. Algorytm obliczeń

Algorytm obliczeń został przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Algorytm obliczeń numerycznych
Fig. 2. Computation algorithm

Warunek początkowy i warunki brzegowe

W analizie numerycznej przyjęto:

1) warunek początkowy – 20°C,

2) warunki brzegowe w zależności od strony nagrzewania:

a) strona nagrzewana – przejmowanie ciepła przez promieniowanie i konwekcję,

• α_c – konwekcyjny współczynnik przejmowania ciepła równy: 25 (W/m² · C) – w przypadku nagrzewania według krzywej standardowej, przy czym dla innych krzywych nagrzewania będzie inny, np. 50 (W/m² · C) – w przypadku krzywej węglowodorowej,

• współczynnik emisyjności wynosi:

– dla strefy pożarowej $\epsilon_f = 0,8$,

– dla powierzchni materiału elementu $\epsilon_m = 0,625$,

• $5,67 \cdot 10^{-8}$ – stała Stefana – Boltzmana (W/m² · C⁴).

b) strona nienagrzewana – oddawanie ciepła przez przegrodę, rurę i izolację rury do powietrza.

Dane do obliczeń

Do analizy numerycznej przyjęto następujące właściwości cieplne (wg Eurokodu [3], [4]): λ – przewodność cieplna, c_w – ciepło właściwe stali, betonu i wełny mineralnej oraz gęstość ρ tych materiałów:

– stałe (niezależne od temperatury) gęstości: stali, betonu i wełny mineralnej równe odpowiednio 7850, 2300 i 45 kg/m³,

– współczynnik przewodności cieplnej i ciepła właściwego materiałów w funkcji temperatury:

a) stali

Należy przyjąć następujące zależności charakteryzujące zmianę właściwości cieplnych stali w funkcji temperatury:

$$c_s = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} T_s - 1,69 \cdot 10^{-3} T_s^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} T_s^3, \text{ J/kgK, dla } 20 \leq T_s \leq 600^\circ\text{C},$$

$$c_s = 666 - \frac{13002}{T_s - 738}, \text{ J/kgK, dla } 600 < T_s \leq 735^\circ\text{C}$$

$$c_s = 545 - \frac{17820}{T_s - 731}, \text{ J/kgK, dla } 735 < T_s \leq 900^\circ\text{C} \quad (12)$$

$$c_s = 650, \text{ J/mK, dla } 900 < T_s \leq 1200^\circ\text{C}$$

$$\lambda_s = 54 - 3,33 \cdot 10^{-2} T_a, \text{ W/mK, dla } 20 \leq T_s < 800^\circ\text{C} \quad (13)$$

$$\lambda_s = 27,3, \text{ W/mK, dla } 800 < T_s \leq 1200^\circ\text{C}$$

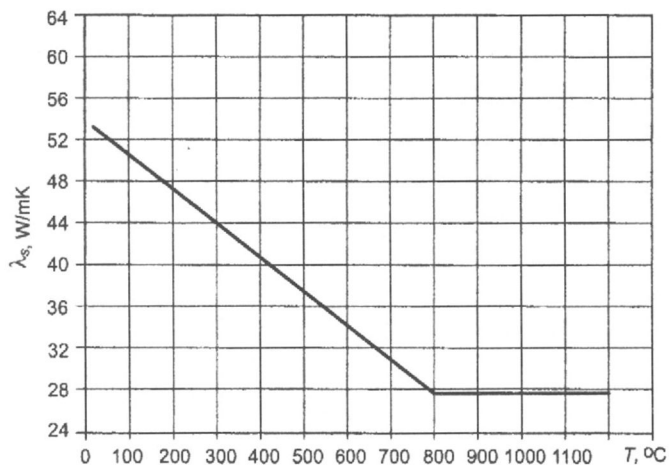
gdzie: ρ_s – gęstość stali,

λ_s – przewodność cieplna stali,

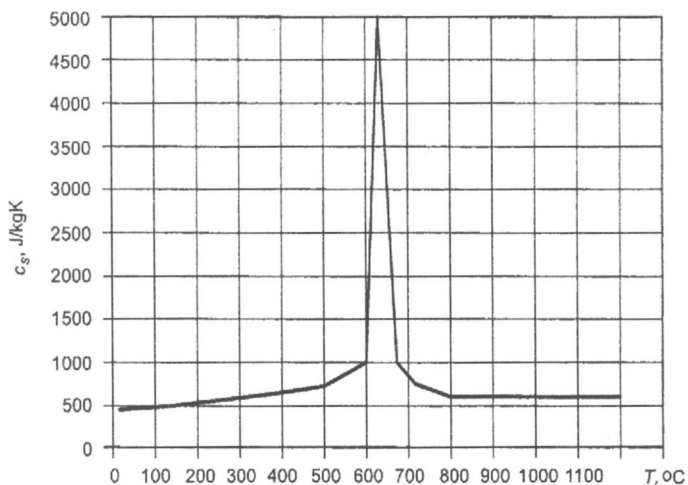
c_s – ciepło właściwe stali,

T_s – temperatura stali, C.

Zmianę przewodności cieplnej stali λ_s w funkcji temperatury przedstawiono na rysunku 3, a ciepła właściwego stali c_s na rysunku 4.



Rys. 3. Zmiana przewodności cieplnej stali λ_s w funkcji temperatury
 Fig. 3. Change of steel thermal conductivity λ_s as a function of temperature



Rys. 4. Zmiana ciepła właściwego c_s stali w funkcji temperatury
 Fig. 4. Change of steel specific heat c_s as a function of temperature

b) betonu

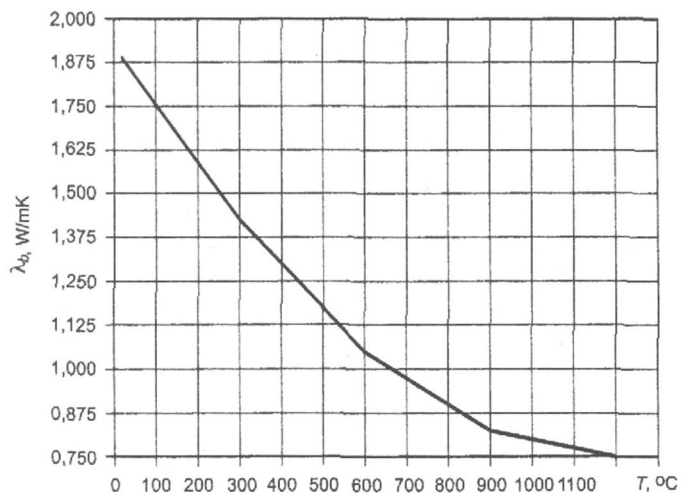
Należy przyjąć następujące zależności charakteryzujące zmiany właściwości cieplnych betonu (wg Eurokodu [5]) w funkcji temperatury:

$$c_b = 900 + 80 \left(\frac{T_b}{120} \right) - 4 \left(\frac{T_b}{120} \right)^2, \text{ J/kgK}, \quad \text{dla } 20 \leq T_b \leq 1200^\circ\text{C} \quad (14)$$

$$\lambda_b = 2 - 0,24 \left(\frac{T_b}{120} \right) + 0,012 \left(\frac{T_b}{120} \right)^2, \text{ W/mK}, \quad \text{dla } 20 \leq T_b \leq 1200^\circ\text{C}, \quad (15)$$

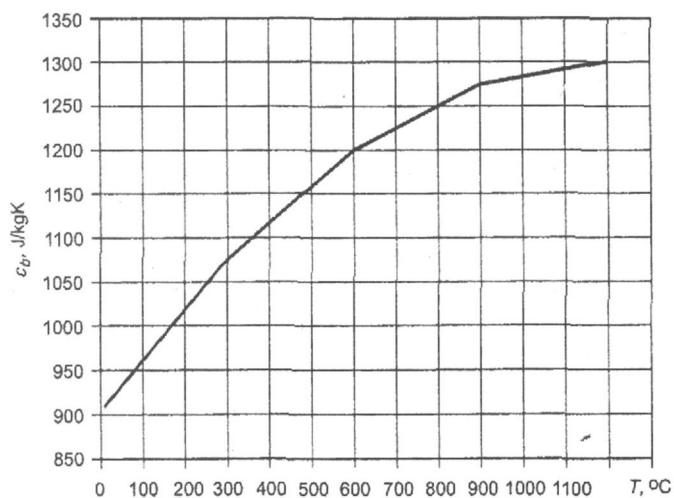
gdzie: c_b – ciepło właściwe betonu, λ_b – przewodność cieplna betonu,
 T_b – temperatura betonu, °C.

Zmianę przewodności cieplnej betonu w funkcji temperatury zilustrowano na rysunku 5, a ciepła właściwego na rysunku 6.



Rys. 5. Zmiana przewodności cieplnej λ_b betonu zwykłego

Fig. 5. Change of concrete thermal conductivity λ_b as a function of temperature



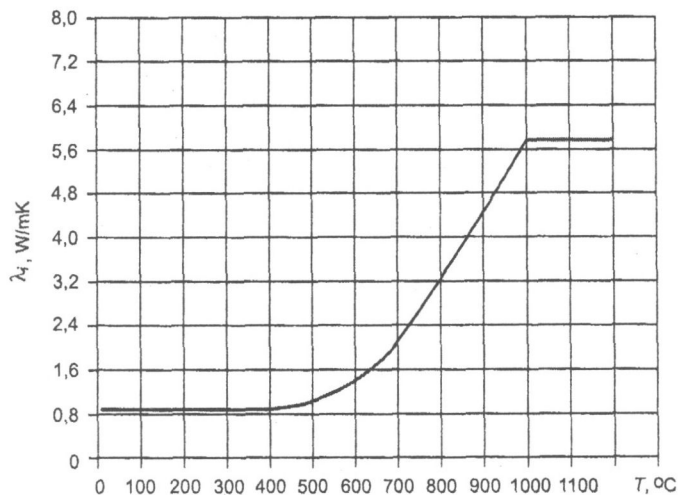
Rys. 6. Zmiana ciepła właściwego c_b betonu zwykłego

Fig. 6. Change of concrete specific heat c_b as a function of temperature

c) izolacji – wełny mineralnej

Przyjęte do obliczeń zmiany właściwości wełny mineralnej:

- gęstość $g = 45 \text{ kg/m}^3$,
- współczynnik rozszerzalności cieplnej $\alpha = 6 \times 10^{-7}$,
- współczynnik przewodzenia ciepła w funkcji temperatury – rys. 7,
- ciepło właściwe $c = \text{J/kgK}$.



Rys. 7. Zmiana przewodności cieplnej λ_t izolacji w funkcji temperatury
Fig. 7. Change of insulation thermal conductivity λ_t as a function of temperature

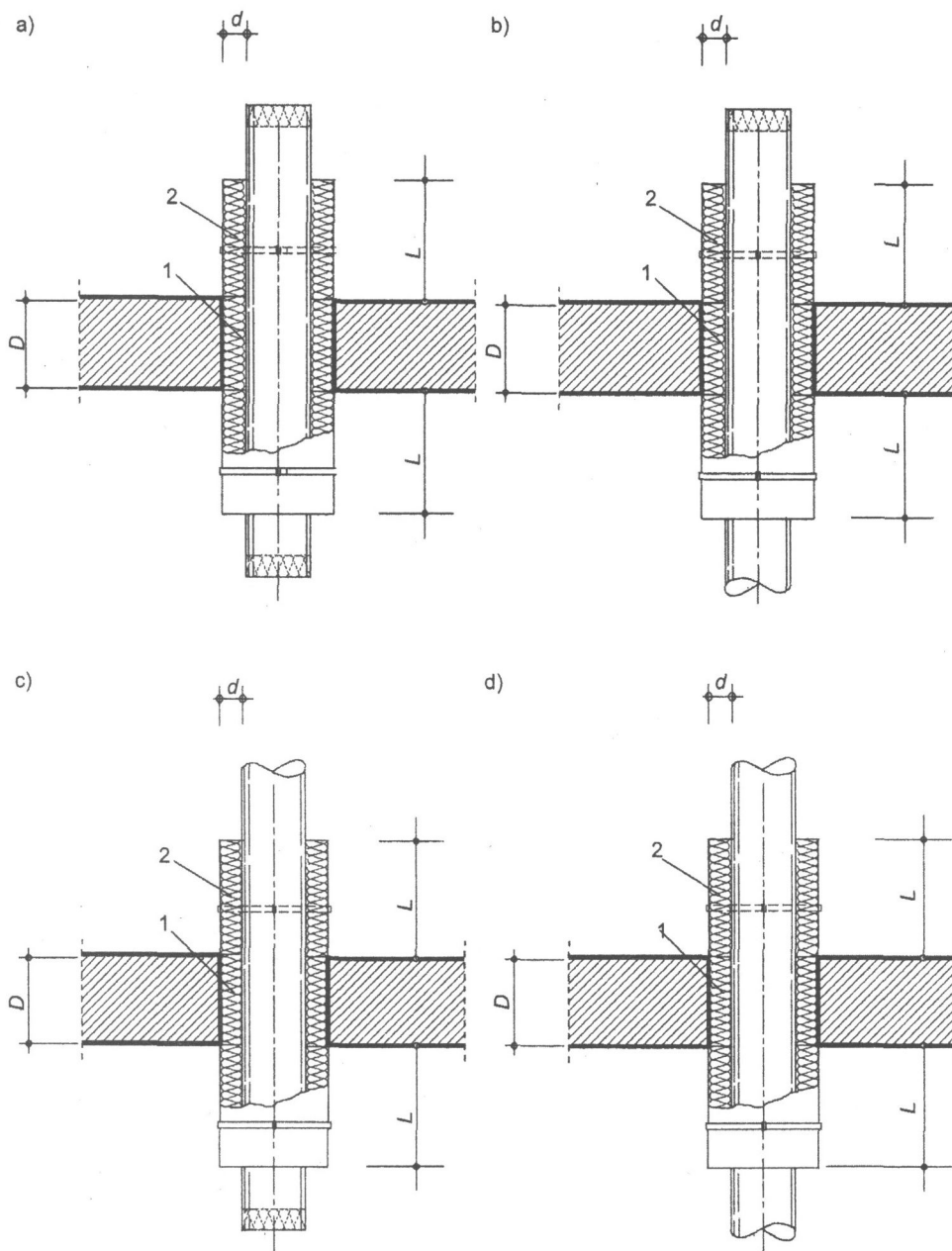
Analizę numeryczną przeprowadzono metodą elementów skończonych z wykorzystaniem programu DOTT.

3. Wyniki analizy numerycznej

Przeprowadzona została analiza rozkładu temperatury uszczelnień przejść dwunastu rur stalowych o średnicach 270,0 mm, 160,0 mm i 45,0 mm przez strop, o układzie zakończeń zilustrowanym na rysunku 8.

Długość wszystkich rur wynosiła 1,41 m. Rury zaizolowane zostały wełną mineralną gr. 40 mm na długości 1000 mm. W tabelicy 1 zestawiono przekroje rur oraz długości izolacji po stronie nagrzewanej i nienagrzewanej. Grubość płyt stropowych, betonowych wynosiła 180 mm i 190 mm.

Wyniki analizy numerycznej zostały zestawione w tabelicy 2 odpowiednio dla rur z tabelicy 1.



Rys. 8. Układ zakończeń rur podczas badań odporności ogniowej – oznaczenia jak przy rysunku 1
 Fig. 8. Arrangement of pipes during fire resistance test – denotations as for Fig. 1

Tablica 1. Wymiary rur i długości izolacji na rurach
Table 1. Pipe sizes and insulation length on pipes

Nr rury	Średnica rury W mm	Grubość ścianki rury t mm	Grubość stropu mm	L1 poniżej stropu, mm (strona nagrzewana)	L2 powyżej stropu, mm (strona nienagrzewana)	Zakończenie rury (strona nagrzewana/strona nienagrzewana)
1	270	9,5	180	320	500	C/C
2	160	4,3	180	320	500	
3	45	4,8	180	320	500	
4	270	9,5	180	320	490	U/C
5	160	4,3	180	320	500	
6	45	4,8	180	320	500	
7	270	9,5	190	350	460	C/U
8	160	4,3	190	350	460	
9	45	4,8	190	300	510	
10	270	9,5	190	340	470	U/U
11	160	4,3	190	340	470	
12	45	4,8	190	340	470	

Tablica 2. Wartości temperatury uzyskane numerycznie po 60 minutach nagrzewania
Table 2. Numerical temperature values after 60' heating

Nr rury (tabl. 1)	Wartości temperatury, °C		Zakończenie rury (strona nagrzewana/strona nienagrzewana)
	2 ^o	3 ^d	
1			4
1	72	169	C/C ^a
2	75	98	
3	75	14	
4	80	72	U/C
5	75	93	
6	76	36	

Nr rury (tabl. 1)	Wartości temperatury, °C		Zakończenie rury (strona nagrzewana/strona nienagrzewana)
	2 ^c	3 ^d	
1	2 ^c	3 ^d	4
7	80	72	C/U ^b
8	75	93	
9	76	36	
10	300	525	U/U
11	261	581	
12	119	315	

^a rura zamknięta izolacją z wełny mineralnej
^b rura otwarta
^c temperatura na izolacji 25 mm od przegrody
^d temperatura na rurze 25 mm od izolacji

Do numerycznej analizy przewodzenia ciepła w obszarze: przegroda, rura, izolacja przyjęto rury jak dla weryfikacji doświadczalnej.

Z analizy wynika, że przy stałej grubości izolacji rury temperatura zależy od średnicy rury, grubości ścianki rury oraz sposobu zamknięcia rury. Największe wartości temperatury uzyskano w przypadku rur o największej średnicy oraz przy całkowitym otwarciu rury, gdzie właściwie należałoby rozważyć przepływ ciepła, a nie przewodzenie ciepła. Określenie szczegółowego wpływu na uzyskane wartości temperatury – geometrii rur, grubości izolacji, warunków nagrzewania – wymaga szerszej analizy numerycznej. Taka analiza pozwoliłaby na powiązanie długości i grubości otuliny ze średnicami rur, grubością ich ścianek i układem zakończenia rur oraz rozmieszczeniem rur w przegrodach.

Bibliografia

- [1] Kosiorek M., Laskowska Z.: Przejścia instalacyjne. *Materiały Budowlane* 3(415), 2007
- [2] Laskowska Z.: Temperatura uszczelnień przejść rur metalowych przez ściany i stropy w badaniach odporności ogniowej. *Prace Instytutu Techniki Budowlanej – Kwartalnik*, 3(147), 2008
- [3] PN-EN 1991-1-2 Oddziaływanie na konstrukcje. Część 12: Oddziaływanie ogólne. Oddziaływanie na konstrukcje w warunkach pożaru
- [4] PN-EN 1992-1-2 Design of Concrete Structures. Part 2: General Rules – Structural Fire Design
- [5] PN-EN 1995-1-2 Design of Timber Structures. Part 2: General Rules – Structural Fire Design

NUMERICAL ANALYSIS OF FIRE RESISTANCE OF THE METAL PIPE PENETRATION SEALS

Summary

The paper describes the numerical model for determination of fire insulation criterion of metal pipe penetration seals. The computation algorithm and the results of numerical analysis are presented.

Praca wpłynęła do Redakcji 15 IV 2010 r.