

WYMIANA (TRANSPORT) CIEPŁA

Trzy podstawowe mechanizmy transportu ciepła (wymiany ciepła):

1. **PRZEWODZENIE** - przekazywanie energii od jednej cząstki do drugiej, za pośrednictwem ruchu drgającego tych cząstek. Proces ten trwa dopóty, dopóki temperatura ciała nie zostanie wyrównana w całej rozpatrywanej objętości. Dotyczy to bezpośredniego kontaktu ciała z ciałem, części ciała z ciałem.
2. **PROMIENIOWANIE** - przekazywanie ciepła w postaci energii promieniowania, którego natura jest taka sama jak energii świetlnej. Energia cieplna przekształca się w energię promieniowania, przebywa określoną przestrzeń z prędkością światła, aby w innym miejscu przekształcić się całkowicie lub częściowo w energię cieplną.
3. **KONWEKCYJA (WNIKANIE)** - wiąże się z ruchem konwekcyjnym gazów lub cieczy, wywołanym bądź różnicą gęstości (różnicą temperatur), bądź przez wymuszenie czynnikami zewnętrznymi.

PRZEWODZENIE

Stan cieplny ciała określa temperatura. Miejsca geometryczne o jednakowej temperaturze tworzą **powierzchnie izotermiczne**, linie o jednakowej temperaturze tworzą **izotermy**.

Temperatura ciała zmienia się najszybciej w kierunku prostopadłym do izoterm.

Przewodzenie dotyczy głównie ciał stałych, gdyż to ciała stałe najlepiej przewodzą ciepło.

PODSTAWOWE DEFINICJE

NATĘŻENIE PRZEPLYWU CIEPŁA (STRUMIEŃ CIEPLNY) Q_*

ilość ciepła jaka przepływa przez dane ciało w jednostce czasu

$$Q_* = \frac{dQ}{dt} \left[\frac{\text{J}}{\text{s}} \right] = [\text{W}]$$

gdzie:

Q-ciepło,

t-czas,

GĘSTOŚĆ STRUMIENIA CIEPLNEGO q (OBCIĄŻENIE CIEPLNE)

natężenie przepływu ciepła odniesione do jednostki powierzchni (straty ciepła przypadające na jednostkę powierzchni)

$$q = \frac{Q_*}{A} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

gdzie:

A-powierzchnia,

$$\text{Natężenie przepływu ciepła } Q_* = q \cdot A \text{ [W]}$$

Przewodzenie ciepła jest USTALONE gdy

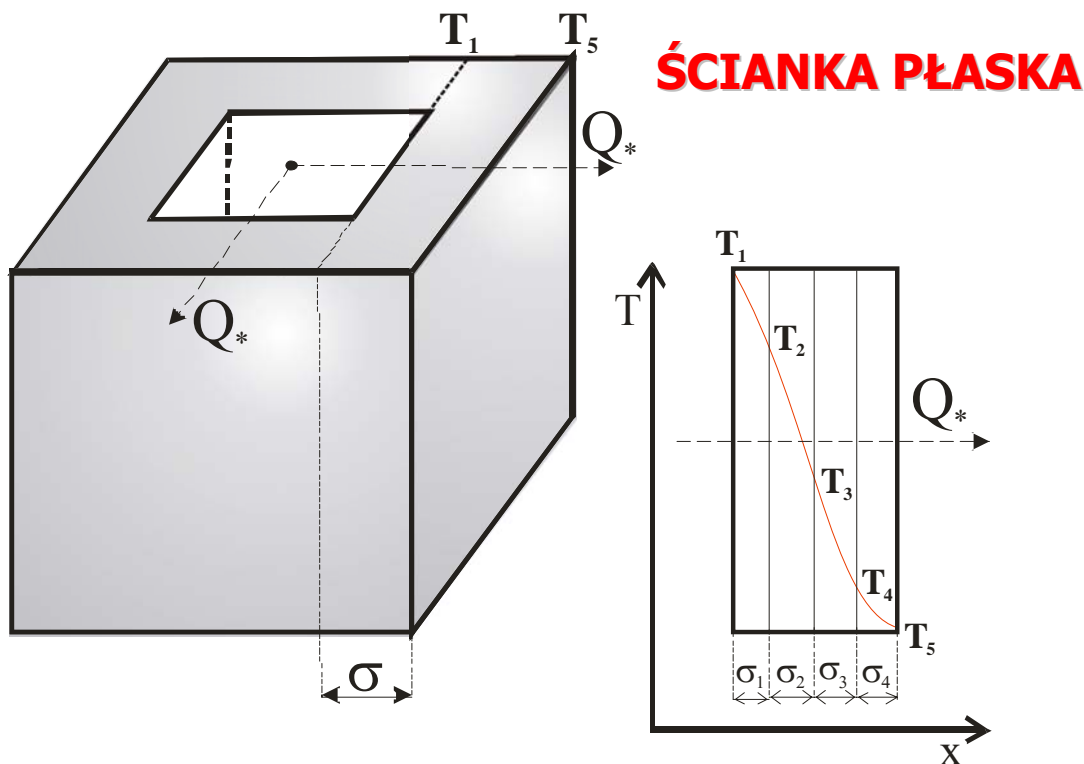
$dQ/dt = \text{const}$ lub

$$Q_{*1} = Q_{*2} = Q_{*3}$$

Przewodzenie ciepła jest NIEUSTALONE gdy

$dQ/dt \neq \text{const}$ lub

$$Q_{*1} \neq Q_{*2} \neq Q_{*3}$$



ŚCIANKA PŁASKA

Ścianka płaska jednowarstwowa:

gęstość strumienia cieplnego $q = \frac{\lambda}{\sigma} \cdot (T_1 - T_2)$ [W/m²]

temperatura $T_1 >$ temperatury T_2

gdzie:

σ -grubość warstwy (ścianki),

natężenie przepływu ciepła $Q_* = \frac{\lambda \cdot A}{\sigma} \cdot (T_1 - T_2)$ [W]

Całkowita ilość przewodzonego ciepła przez ciało:

$$Q = q \cdot A \cdot t \text{ [J]}$$

Ścianka płaska wielowarstwowa:

natężenie przepływu ciepła $Q_* = \frac{A \cdot (T_1 - T_2)}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\sigma_i}{\lambda_i}}$ [W]

gęstość strumienia cieplnego $q = \frac{(T_1 - T_2)}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\sigma_i}{\lambda_i}}$ $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$

PRZEWODZENIE CIEPŁA – ŚCIANKA PŁASKA

Opór termiczny

Opór termiczny definiujemy jako stosunek różnicy temperatur (na powierzchni ograniczających warstwę materiału, warstwę powietrza lub przegrodę) do gęstości strumienia ciepłego q .

Wielkość ta określa „opór” jaki stawia dany materiał przemieszczającemu się ciepłu.

Ścianka jednowarstwowa

$$R = \frac{\sigma}{\lambda} = \frac{\Delta T}{q} \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{deg}}{W} \right]$$

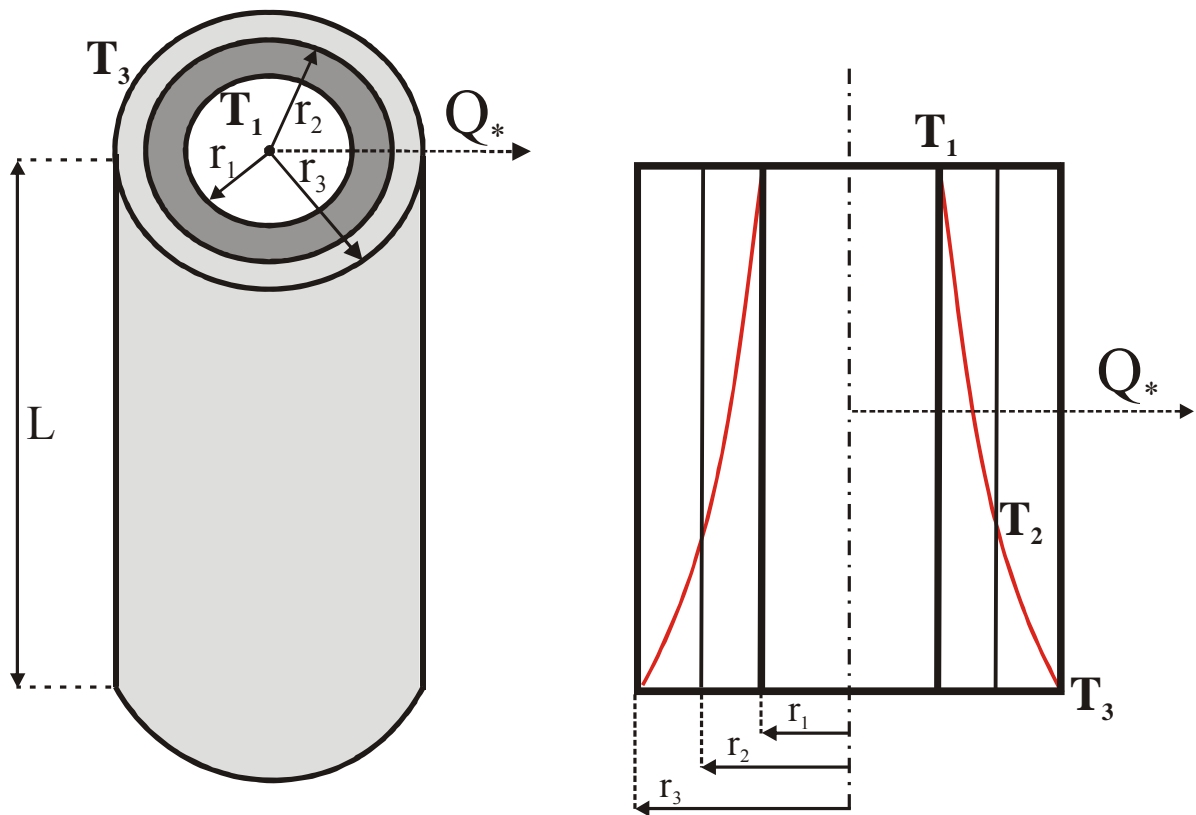
W przypadku ścianek jednowarstwowych (jednofazowych) wartość oporu termicznego jest tym większa im ścianka jest grubsza i im gorzej przewodzi ciepło.

Ścianka wielowarstwowa

$$R = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\sigma_i}{\lambda_i} = \frac{\Delta T}{q} \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{deg}}{W} \right]$$

W przypadku ścianek wielowarstwowych na opór termiczny składają się grubości i przewodnictwa cieplne poszczególnych warstw w ścianie.

ŚCIANKA CYLINDRYCZNA



Przewodzenie ciepła przez ściankę cylindryczną:

natężenie wymiany ciepła (strumień cieplny)

$$Q_* = \frac{\pi \cdot L \cdot (T_1 - T_2)}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\lambda_i} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \quad [\text{W}]$$

gęstość strumienia cieplnego

$$q = \frac{Q_*}{A} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

PRZEWODZENIE opiera się na **prawie FOURIERA** mówiącym o ilości ciepła przewodzonego przez powierzchnię **A** prostopadłą do kierunku ruchu ciepła:

$$dQ = -\lambda \cdot A \cdot \text{grad}T \cdot (d\tau)$$

gdzie:

T-temperatura,

λ -współczynnik przewodzenia ciepła,

τ -czas,

podstawiając za:

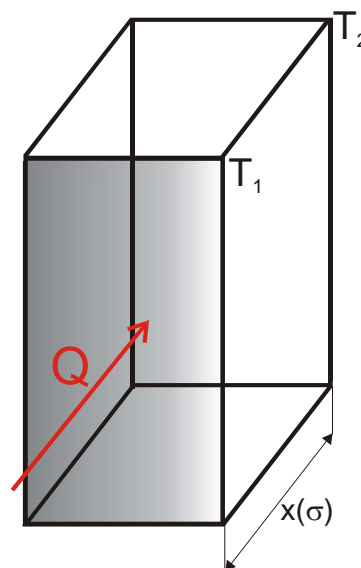
$$\text{grad}T = dT/dx$$

otrzymujemy:

$$dQ = -\lambda \cdot A \cdot (dT/dx) \cdot (d\tau)$$

gdzie:

x (σ)-grubość warstwy,



dalej:

$$dQ/d\tau = Q_*$$

zakładamy $dQ/d\tau = const$ – ustalone przewodzenie ciepła

otrzymujemy:

$$Q_* = -\lambda \cdot A \cdot (dT/dx) \quad [\text{W}]$$

rozważając dalej:

$$Q_* = q \cdot A$$

stąd:

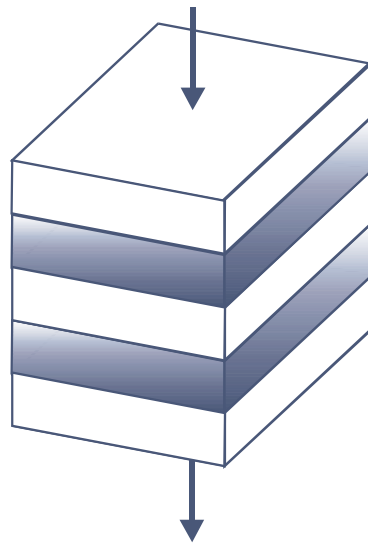
$$q = -\lambda \cdot (dT/dx) \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

Z powyższych równań wynika, że:

$$\lambda = -\frac{dQ/d\tau}{A \cdot (dT/dx)} \quad \left[\frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot \text{deg}/\text{m})} = \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{deg}} \right]$$

zatem **współczynnik przewodzenia ciepła (λ)** jest to ilość ciepła przewodzona przez ciało o powierzchni 1m², grubości ścianki 1m, gdy różnica temperatur pomiędzy przeciwległymi ściankami wynosi 1deg, w ciągu 1s.

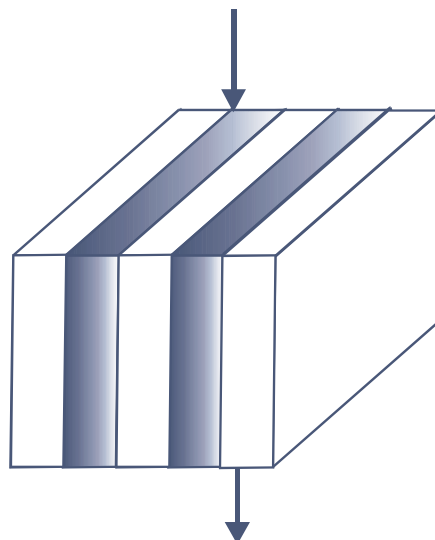
WSPÓŁCZYNNIK PRZEWODZENIA CIEPŁA MATERIAŁÓW WIELOFAZOWYCH (KOMPOZYTÓW) MODEL SZEREGOWY



Przewodzenie w kierunku prostopadłym do warstw
(model szeregowy):

$$\lambda = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 \cdot V_2 + \lambda_2 \cdot V_1}$$

MODEL RÓWNOLEGŁY



Przewodzenie w kierunku równoległym do warstw
(model równoległy):

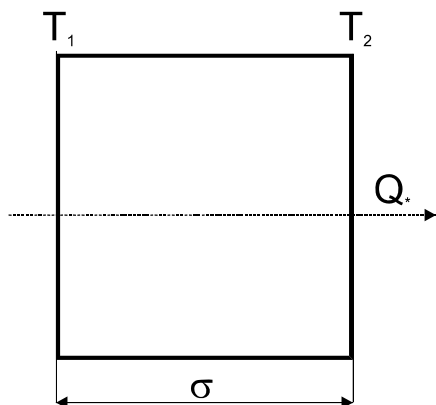
$$\lambda = \lambda_1 \cdot V_1 + \lambda_2 \cdot V_2$$

gdzie:

V_1, V_2 – udziały objętościowe składników kompozytu,

ZADANIA

ZADANIE 1



Dane:

$$\sigma = 0,2 \text{ m}$$

$$\lambda = 0,252 \text{ [W/m}\cdot\text{deg]}$$

$$A = 3,5 \text{ m}^2$$

$$T_1 = 300^\circ\text{C}$$

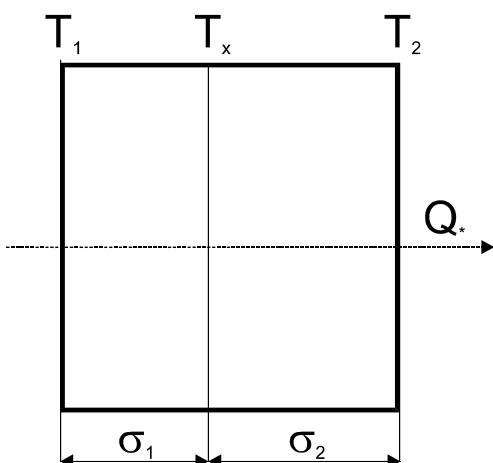
$$T_2 = 275^\circ\text{C}$$

Obliczyć natężenie przepływu ciepła, gęstość strumienia ciepłego, opór termiczny oraz wyznaczyć izotermę, dla której temperatura ścianki będzie równa 280°C .

Ponadto:

- 1) tak dobrać współczynnik przewodzenia ciepła żeby $\Delta T = 45^\circ\text{C}$;
- 2) obliczyć całkowite ciepło przewodzone przez tą ściankę w ciągu 1s ?

ZADANIE 2



Dane:

$$\sigma_1 = 0,5 \text{ m}$$

$$\sigma_2 = 0,2 \text{ m}$$

$$\lambda_1 = 2 \text{ [W/m}\cdot\text{deg]}$$

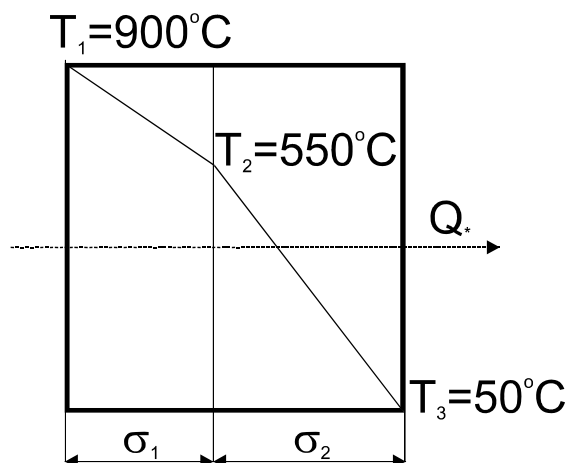
$$\lambda_2 = 0,07 \text{ [W/m}\cdot\text{deg]}$$

$$T_1 = 2500^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 200^\circ\text{C}$$

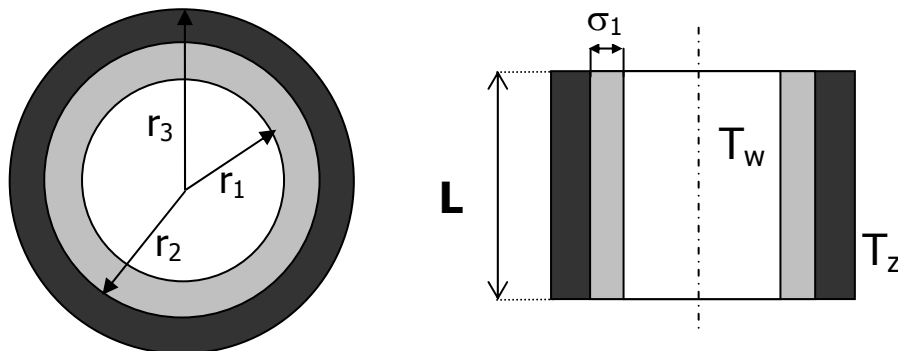
Obliczyć natężenie przepływu ciepła wiedząc, że $A = 2 \text{ m}^2$. Obliczyć gęstość strumienia ciepłego dla tej ścianki, opór termiczny oraz wyznaczyć temperaturę T_x . Następnie dobrać grubość warstwy drugiej tak, żeby T_2 wynosiła 80°C oraz wyznaczyć izotermę gdzie temperatura ścianki wynosi 2000°C ?

ZADANIE 3



Określić minimalną grubość ściany paleniska, jeśli wiadomo, że ściana składa się z dwóch warstw: wewnętrznej z cegły szamotowej i zewnętrznej z cegły czerwonej, straty ciepłe 1 m^2 ściany wynoszą $1,2 \text{ kW}$. Współczynniki przewodzenia ciepła obu materiałów są następujące: cegła szamotowa $\lambda_1 = 1,3 \text{ W/m}\cdot\text{deg}$, cegła czerwona $\lambda_2 = 0,5 \text{ W/m}\cdot\text{deg}$. Temperaturowy przekrój przez ścianę przedstawiono na rysunku.

ZADANIE 4



Dany jest rurociąg, którego podstawowe parametry są następujące:
 $r_1 = 0,1 \text{ m}$ $r_3 = 0,5 \text{ m}$ $\sigma_1 = 0,05 \text{ m}$
 $\lambda_1 = 3,8 \text{ [W/m}\cdot\text{deg]}$ $\lambda_2 = 0,05 \text{ [W/m}\cdot\text{deg]}$
 $L = 2 \text{ m}$

Temperatura wewnętrznej ścianki wynosi 500°C , zaś zewnętrznej 50°C . Wyznaczyć natężenie przepływu ciepła na drodze przewodzenia i temperaturę na połączeniu warstw. Następnie dobrać grubość warstwy izolacji tak, żeby temperatura powierzchni zewnętrznej rury wynosiła 20°C .

ZADANIE 5

Z dużym przybliżeniem cegła dziurawka jest przykładem kompozytu warstwowego złożonego z warstw cegły (ciała stałego) i warstw porów. Wyznaczyć współczynniki przewodzenia ciepła w kierunku równoległym i prostopadłym do warstw, wiedząc, że:

$V_{\text{ciała stałego}} = 78\%$ $\lambda_{\text{ciała stałego}} = 0,2 \text{ W/m}\cdot\text{deg}$
 $V_{\text{porów}} = 22\%$ $\lambda_{\text{porów}} = 0,001 \text{ W/m}\cdot\text{deg}$

ZADANIE 6

Obliczyć natężenie przepływu ciepła na drodze przewodzenia przez ściankę szamotową o powierzchni 10m^2 i grubości 200mm , jeżeli temperatury wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni ściany wynoszą odpowiednio 800°C i 40°C . Współczynnik przewodzenia ciepła szamotu wynosi $0,7 \text{ W/m}\cdot\text{deg}$.

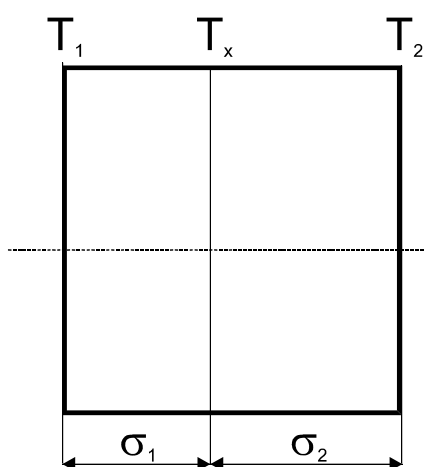
ZADANIE 7

Jaka jest temperatura wewnętrznej powierzchni ściany o grubości 210mm , wykonanej z kształtek bazaltowych, jeżeli straty ciepłne ściany od powierzchni zewnętrznej do otoczenia wynoszą 840 W/m^2 , a temperatura zewnętrznej powierzchni ściany równa jest 40°C . Współczynnik przewodzenia ciepła bazaltu wynosi $2,8 \text{ W/m}\cdot\text{deg}$.

ZADANIE 8

Ściana igloo zbudowana jest z desek o grubości $\sigma_1 = 0,02$ m, warstwy ziemi $\sigma_2 = 0,15$ m i warstwy śniegu. Współczynniki przewodzenia ciepła wynoszą odpowiednio: $\lambda_1 = 0,2$ W/(m K), $\lambda_2 = 0,5$ W/(m deg), $\lambda_3 = 0,4$ W/(m deg). Obliczyć gęstość strumienia cieplnego, dopuszczalną grubość σ_3 warstwy śniegu, jeżeli temperatura powierzchni desek wewnątrz igloo wynosi $T_1 = 10^\circ\text{C}$, temperatura wewnętrznej powierzchni śniegu jest równa temperaturze topnienia lodu a temperatura zewnętrznej powierzchni śniegu wynosi $T_4 = -40^\circ\text{C}$. Wyznaczyć również temperaturę na połączeniu warstwy desek i ziemi oraz opór termiczny poszczególnych warstw w ścianie.

ZADANIE 9



Dane:

$$T_1 = 1000^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 70^\circ\text{C}$$

$$\sigma_1 = 0,5 \text{ m}$$

$$\sigma_2 = 0,6 \text{ m}$$

$$\lambda_1 = 1 \text{ [W/m}\cdot\text{deg]}$$

$$\lambda_2 = 0,45 \text{ [W/m}\cdot\text{deg]}$$

Przewodzenie ciepła ustalone $Q_{*1} = Q_{*2}$.

Obliczyć strumień cieplny, gęstość strumienia cieplnego i opór termiczny dla tej ścianki. Następnie wyznaczyć temperaturę T_x ? Powierzchnia tej ścianki wynosi 1 m^2 .

ZADANIE 10

Rura stalowa o średnicy 102/112 mm jest zaizolowana warstwą waty azbestowej o grubości $\sigma = 70$ mm. Różnica temperatur pomiędzy powierzchnią wewnętrzną a zewnętrzną wynosi 200°C . Obliczyć natężenie przepływu ciepła, jeżeli długość rury wynosi 15 m. Współczynniki przewodzenia ciepła wynoszą: $50 \text{ W/m}\cdot\text{deg}$ dla stali, zaś dla waty azbestowej $\lambda = 0,05 \text{ W/m}\cdot\text{deg}$.

ZADANIE 11

Ściana pieca składa się z trzech warstw. Wewnętrzną warstwę stanowi cegła ogniodoporna o grubości $\sigma_1 = 0,1$ m i współczynnika przewodzenia ciepła $\lambda_1 = 0,95 \text{ W/m}\cdot\text{deg}$. Środkową warstwą jest cegła zwykła o $\sigma_2 = 0,2$ m i $\lambda_2 = 0,65 \text{ W/m}\cdot\text{deg}$, zewnętrzną natomiast izolacja o $\sigma_3 = 0,06$ m i $\lambda_3 = 0,1 \text{ W/m}\cdot\text{deg}$. Pomiary temperatury wykazały, że temperatura wewnętrzna ściany wynosi 750°C , a ściany zewnętrznej 80°C . Obliczyć straty cieplne pieca z 1 m^2 powierzchni ściany oraz zakres temperatur, w jakim znajduje się warstwa cegły zwykłej.

ZADANIE 12

Stalowy rurociąg o średnicach $d_w/d_z = 100/110\text{mm}$ i współczynniku przewodzenia ciepła $\lambda_1 = 40\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ pokryto dwoma warstwami izolacji o grubości $\sigma_2 = \sigma_3 = 30\text{mm}$. Temperatura wewnętrznej powierzchni rurociągu $T_1 = 623\text{K}$ i zewnętrznej powierzchni izolacji $T_4 = 323\text{K}$. Określić natężenie przepływu ciepła Q^* , oraz temperaturę T_3 na styku izolacji, jeżeli warstwy przylegają do siebie. Ile będzie wynosić natężenie przepływu ciepła Q^* oraz temperatura T_3 , jeżeli warstwy izolacji zostaną zamienione w kolejności. Współczynniki przewodzenia ciepła izolacji wynoszą $\lambda_2 = 0,046\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $\lambda_3 = 0,11\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

ZADANIE 13

Dana jest ścianka wielowarstwowa ($A = 1 \times 2\text{ m}$). Przewodzenie ciepła ustalone.

Wiedząc, że:

$T_1 = 800^\circ\text{C}$	$\sigma_1 = 0,2\text{ m}$	$\lambda_1 = 25\text{ W/m}\cdot\text{deg}$
$T_2 = 799,4^\circ\text{C}$	$\sigma_2 = 0,1\text{ m}$	$\lambda_2 = 1,0\text{ W/m}\cdot\text{deg}$
$T_3 = 791,9^\circ\text{C}$	$\sigma_3 = 0,2\text{ m}$	$\lambda_3 = 0,02\text{ W/m}\cdot\text{deg}$
$T_4 = 40^\circ\text{C}$		

Obliczyć:

Natężenie przepływu ciepła Q^* ; gęstość strumienia cieplnego q , opór termiczny poszczególnych warstw w ściance jak również opór termiczny dla całej ścianki oraz znaleźć izotermę 100°C .

ZADANIE 14

Dany jest kompozyt warstwowy. Współczynnik przewodzenia ciepła λ_{II} dla tego kompozytu wynosi $0,872\text{ W/m}\cdot\text{deg}$. Udział objętościowy jednej z faz wynosi 18% zaś jej $\lambda = 4,3\text{ W/m}\cdot\text{deg}$. Wyznaczyć współczynnik przewodzenia ciepła dla drugiej z faz i zakwalifikować tą fazę do odpowiedniego rodzaju materiału? Wyznaczyć także λ dla przewodzenia ciepła w kierunku prostopadłym do warstw?

ZADANIE 15

Dana jest cylindryczna ścianka o długości $0,7\text{ m}$. Obliczyć natężenie przepływu ciepła dla tej ścianki przyjmując jej grubość $= 0,12\text{ m}$. Dobrać tak materiał (wyznaczyć współczynnik przewodzenia ciepła), żeby $\Delta T = 20^\circ\text{C}$? Przewodzenie ciepła ustalone.

Dane do zadania:

$\lambda = 0,04\text{ W/m}\cdot\text{deg}$ $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ $r_1 = 0,12\text{ m}$