

Wyznaczanie wartości współczynnika przewodzenia ciepła wybranych materiałów ceramicznych

I. Część teoretyczna

1.1. Procesy cieplne zachodzące w czasie krzepnięcia wlewka ze szczególnym uwzględnieniem pracy cieplnej zasypki

Wymagania jakie stawia użytkownik wyrobom lub półwyrobom hutniczym dotyczą przede wszystkim problemów jakości w aspekcie jednorodności składu chemicznego i odpowiednich własności mechanicznych. Natomiast producent oprócz spełnienia wymagań stawianych przez użytkownika winien otrzymać produkt w sposób jak najbardziej oszczędny, między innymi przy maksymalnym uzysku produkowanej stali. W przypadku stali uspokojonych uzysk ten uzależniony jest od sposobu i efektywności ocieplania nadstawkowej części wlewka.

Bezpośrednio po zalaniu stali do wlewnicy przy zetknięciu się pierwszej porcji metalu ze ścianką wlewnicy rozpoczyna się krystalizacja w warstwie powierzchniowej wlewka. Zakrzepła warstwa tworzy siatkę kryształków pomiędzy którymi dyfunduje ciekły metal. W tym stanie warstwa ta odznacza się dużą plastycznością oraz w zestawieniu z ciśnieniem ferostatycznym niską wytrzymałością. Powstające siły skurczowe nie potrafią oderwać jej od powierzchni wlewnicy. Szybko jednak temperatura powierzchni spada i wytrzymałość warstwy rośnie. Następuje moment gdy wytrzymałość odkształconej plastycznie warstwy zakrzepłej osiąga wartość równą ciśnieniu ferostatycznemu słupa ciekłego metalu. Powstają wówczas warunki do utworzenia się szczeliny pomiędzy powierzchnią wlewka i wlewnicy. O powstaniu szczeliny gazowej decydować będzie proces narastania i skurczu zakrzepłej warstwy wlewka. Od tego momentu odprowadzanie ciepła następowało będzie poprzez zakrzepłą warstwę wlewka, szczelinę powietrzną i wlewnicę do otoczenia. W zależności od intensywności tego procesu który zależał będzie między innymi od parametrów termofizycznych i geometrycznych poszczególnych podobszarów analizowanego układu i szybkości narastania zakrzepłej warstwy metalu będzie zmienna.

Natomiast metal znajdujący się w ocieplanej nadlewowej części wlewka będzie krzepł w odmiennych warunkach cieplnych. Traci on ciepło poprzez izolowane boczne ściany nadstawki lub wlewnicy do otoczenia, z górnej powierzchni metalu do otoczenia oraz poprzez podstawę nadlewu do wlewka. Straty ciepła przez powierzchnię boczną zależą od warstwy

materiału izolacyjnego, który ulega przegrzaniu na całej grubości, po czym ulega nagrzewaniu przylegająca do niej ścianka panczerza nadstawki lub wlewnicy (przy wlewnicach beznadstawkowych). W dalszym stadium procesu ciepło z głowy wlewka zostaje odprowadzone do otoczenia przez wymienione warstwy. Z tymi stratami ciepła, których wielkość uzależniona jest od własności termofizycznych warstwy materiału izolacyjnego związana jest warstwa materiału krzepnącego na ściankach bocznych nadlewu. Objętość ta zależy między innymi od czasu zasilania oraz własności izolacyjnych i grubości wyłożenia nadstawki.

Straty ciepła z górnej powierzchni głowy powierzchni wlewka uzależnione są od temperatury na zewnętrznej powierzchni zasypki, która decyduje o intensywności wypromieniowania ciepła do otoczenia. Wartość temperatury na zewnętrznej jej powierzchni przy określonej grubości warstwy zależy od własności termofizycznych materiału zasypki, a w szczególności od jej współczynnika przewodzenia ciepła.

Zasypka izolacyjna w pierwszym etapie przegrzewa się na całą grubość, następnie temperatura jej zewnętrznej powierzchni wzrasta do pewnej wartości odpowiadającej stanowi ustalonemu, w którym odprowadzenie ciepła z nadlewu do otoczenia odbywa się na drodze przewodzenia przez warstwę zasypki. Straty ciepła tą drogą są więc równe ilości ciepła zaakumulowanego w zasypce oraz wypromieniowanego z jej zewnętrznej powierzchni do otoczenia w okresie dochodzenia układu do stanu ustalonego i w okresie odprowadzania ciepła w stanie ustalonym.

Zasypka izolacyjno-egzotermiczna pobiera z głowy wlewka pewną ilość ciepła, aż do osiągnięcia w dolnej części temperatury zapłonu. Wydzielające się ciepło reakcji egzotermicznej jest częściowo zużywane do podniesienia temperatury pozostałej objętości zasypki nie objętej do tego momentu wymianą ciepła i doprowadzenie do reakcji egzotermicznej w całej objętości zasypki. Częściowo jest ono przekazywane metalowi głowy wlewka oraz wypromieniowywane z zewnętrznej powierzchni zasypki do otoczenia. Po zakończeniu reakcji egzotermicznej i obniżeniu temperatury zewnętrznej powierzchni zasypki do wartości odpowiadającej stanowi ustalonemu, ciepło z głowy wlewka zostaje odprowadzane analogicznie jak w przypadku zasypki izolacyjnej, na drodze przewodzenia przez przereagowaną warstwę zasypki. Straty ciepła zależą więc od ilości ciepła pobranego, do zapoczątkowania reakcji egzotermicznej oraz od ilości wypromieniowanej do otoczenia w stanie ustalonym przy równoczesnym odzysku pewnej ilości ciepła reakcji egzotermicznej.

Stosowanie zasypki o dużej wydajności cieplnej oraz dobrych własnościach izolacyjnych po reakcji egzotermicznej, wraz z zastosowaniem materiału izolującego boczną powierzchnię

głowy wlewka o wysokiej wytrzymałości mechanicznej i niskim współczynniku przewodzenia ciepła pozwala otrzymać jamę skurczową zlokalizowaną w całości w nadlewie. Wielkość nadlewu wlewka można określić w sposób analityczny sporządzając bilans cieplny jego głowy. Bilans ten można opracować znając między innymi własności termofizyczne stosowanej do ocieplania zasypki izolacyjnej lub izolacyjno-egzotermicznej.

1.2. Ogólna charakterystyka metody określania współczynnika przewodzenia ciepła zasypek λ_z

Do pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła zastosowano w ćwiczeniu metodę ustalonego radialnego przepływu ciepła. W metodzie tej próbkę badanej zasypki umieszcza się w ażurowym cylindrze z blachy stalowej i nagrzewa od wewnątrz elementem grzewczym znajdującym się w osi próbki.

Wartość współczynnika przewodzenia ciepła dla badanej warstwy zasypki w warunkach ustalonego promieniowego przepływu ciepła ujmuje zależność (równanie Fouriera, nagrzewanie nieskończenie długiego pręta):

$$\lambda = \frac{P_U \cdot \ln\left(\frac{r_j}{r_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (T_i - T_j)} \quad (1)$$

gdzie:

- P_U – ciepło wydzielone przez element grzewczy na długości l (moc użyteczna prądu zasilającego równa $0,75 P_Z$),
- $P = U \cdot I$ – całkowita moc prądu zasilającego,
- l – wysokość badanej próbki równa długości części grzewczej sylitu,
- T_i, T_j – wartość temperatury rejestrowanej w stanie ustalonym w badanej próbce przez termoelementy umieszczone w odległościach r_i, r_j od osi aparatury pomiarowej.

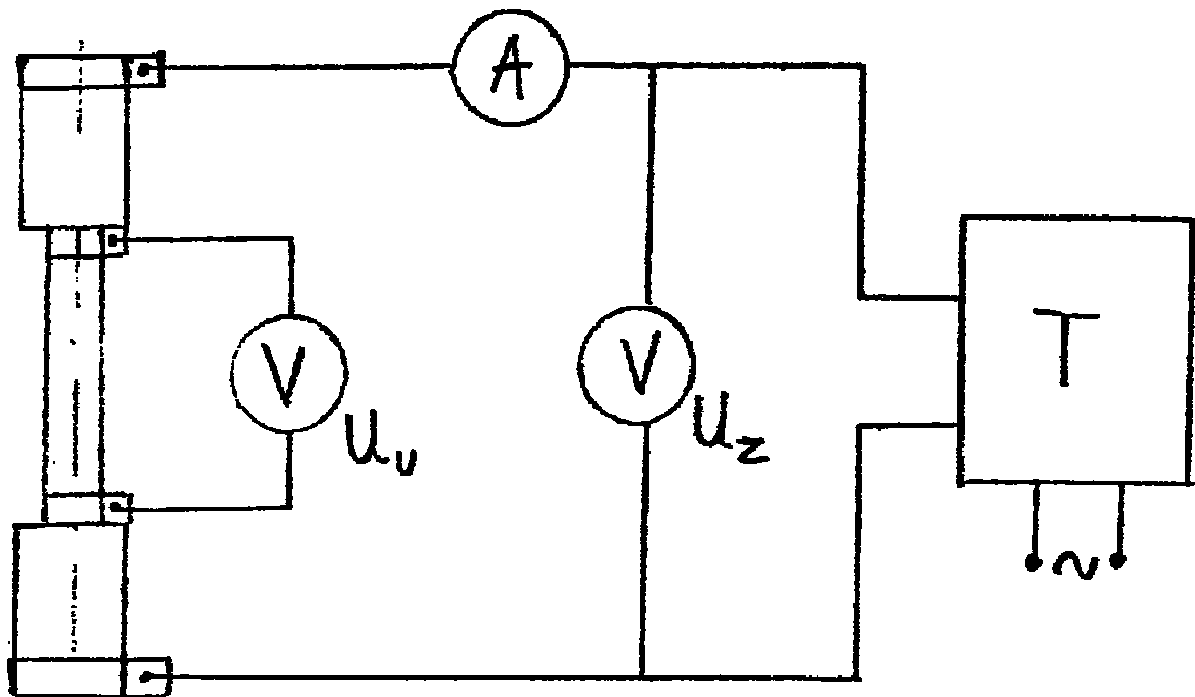
W przypadku gdy ciepło wydzielane jest na drodze przepływu prądu elektrycznego równanie (1) będzie miało postać:

$$\lambda_{ij} = \frac{0,75 \cdot U \cdot I \cdot \ln\left(\frac{r_j}{r_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (T_i - T_j)} \quad (2)$$

gdzie:

U, I – napięcie i natężenie prądu zasilającego.

W celu określenia jaka część mocy prądu zasilającego silit jest zużywana na nagrzewanie badanego materiału, należy przeprowadzić cechowanie użytych do badania sylitów. Cechowanie przeprowadza się podłączając do końcówek sylitu prąd. zasilający różnej mocy ($I \cdot U_z$), przy równoczesnym odczytywaniu mocy prądu wydzielonej w części grzewczej ($I \cdot U_v$). Schemat układu pomiarowego do cechowania sylitów przedstawia rys. 1 (zasady wymiany ciepła str. 155, Słomska, Pawlik: Tech. C.)



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego do cechowania sylitów.

W wyniku cechowania pewnej partii sylitów ustalono [1], że średnia wartość mocy wydzielonej w części grzewczej sylitu stanowi 75% mocy prądu, który jest doprowadzany do końcówek zasilających:

$$\left(\frac{P_U}{P_Z} \right)_{sr} \cong 0,75 \quad (2)$$

Wartości temperatury T_i , T_j mierzonej w odległości r_i , r_j od osi sylitu pozwalają określić na podstawie równania (2), wartość współczynnika przewodzenia ciepła badanej warstwy zasyпки. W celu określenia zależności funkcyjnej współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury niezbędna jest znajomość średniej temperatury warstwy zasyпки odpowiadającej zakresowi T_{ij} . Oblicza się ją jako średnią całkową z zależności:

$$\bar{T}_{ij} = \frac{T_i - T_j}{n_Z + 1} + T_j \quad (3)$$

gdzie:

n_Z – wykładnik paraboli opisującej pole temperatury w przekroju badanej próbki w stanie ustalonym.

Wartość składnika n_Z można wyznaczyć metodą planimetryczną na podstawie graficznego rozkładu temperatury w próbce, który to rozkład można uzyskać ze wskazań termopar T_1 , T_2 , T_3 , umieszczonych w badanej warstwie zasyпки. Wykładnik n_Z jest odzwierciedlony przez stosunek powierzchni nad krzywą parabolicznego rozkładu temperatury do powierzchni pod w/w krzywą. Wyniki prowadzonych badań wskazały, że średnia wartość wykładników parabolicznych opisujących rozkład temperatury w badanych próbkach wyniosła 1,2.

II. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest opanowanie umiejętności wyznaczania wartości współczynnika przewodzenia ciepła zasypek izolacyjnych na podstawie następujących pomiarów i obliczeń :

- pomiaru temperatury w badanej próbce zasyпки w różnych odległościach od elementu grzewczego,
- obliczenia współczynnika przewodzenia ciepła zasypek przy wykorzystaniu znanych rozwiązań matematycznych procesu promieniowego przepływu ciepła w czasie nagrzewania ciał klasycznych, przy ustalonych warunkach brzegowych i przy parabolicznym rozkładzie temperatury w badanej warstwie zasyпки.

III. Opis stanowiska badawczego

Schemat aparatury zastosowanej do oznaczenia współczynnika przewodzenia ciepła zasypek przedstawiono na rys. 2.

Urządzenie składa się z cylindra /5/ umocowanego na statywie. Cylinder wykonany jest z azurowej, stalowej, żaroodpornej blachy o grubości 1 mm. W celu zapewnienia dopływu tlenu do badanej zasypki /4/ wywiercono w nim otwory ϕ 2 mm, których łączna powierzchnia stanowi 50% całkowitej powierzchni bocznej próbki.

Powierzchnie czołowe cylindra zaizolowano krążkami /6/, które mają zapobiec osiowym stratom ciepła z zasypki. W osi cylindra montuje się centralny element grzewczy (sylit) /1/, wymiarach części grzewczej ϕ 8 x 180. Silit zasilany jest prądem jednofazowym poprzez autotransformator /T/. Napięcie doprowadza się do końcówek zasilających sylitu /2/ za pomocą zacisków /3/ znajdujących się na zewnętrznych powierzchniach wkładek izolacyjnych /6/. Moc prądu zasilającego mierzona jest za pomocą amperomierza i woltomierza. Wewnątrz badanego materiału (próbki zasypki) umieszcza się w rurkach kwarcowych termoelementy /8/, których położenie jest następujące:

T_1 – przy pow. sylitu,

T_2 – w środku warstwy badanej zasypki,

T_3 – przy ścianie zewnętrznej aparatu.

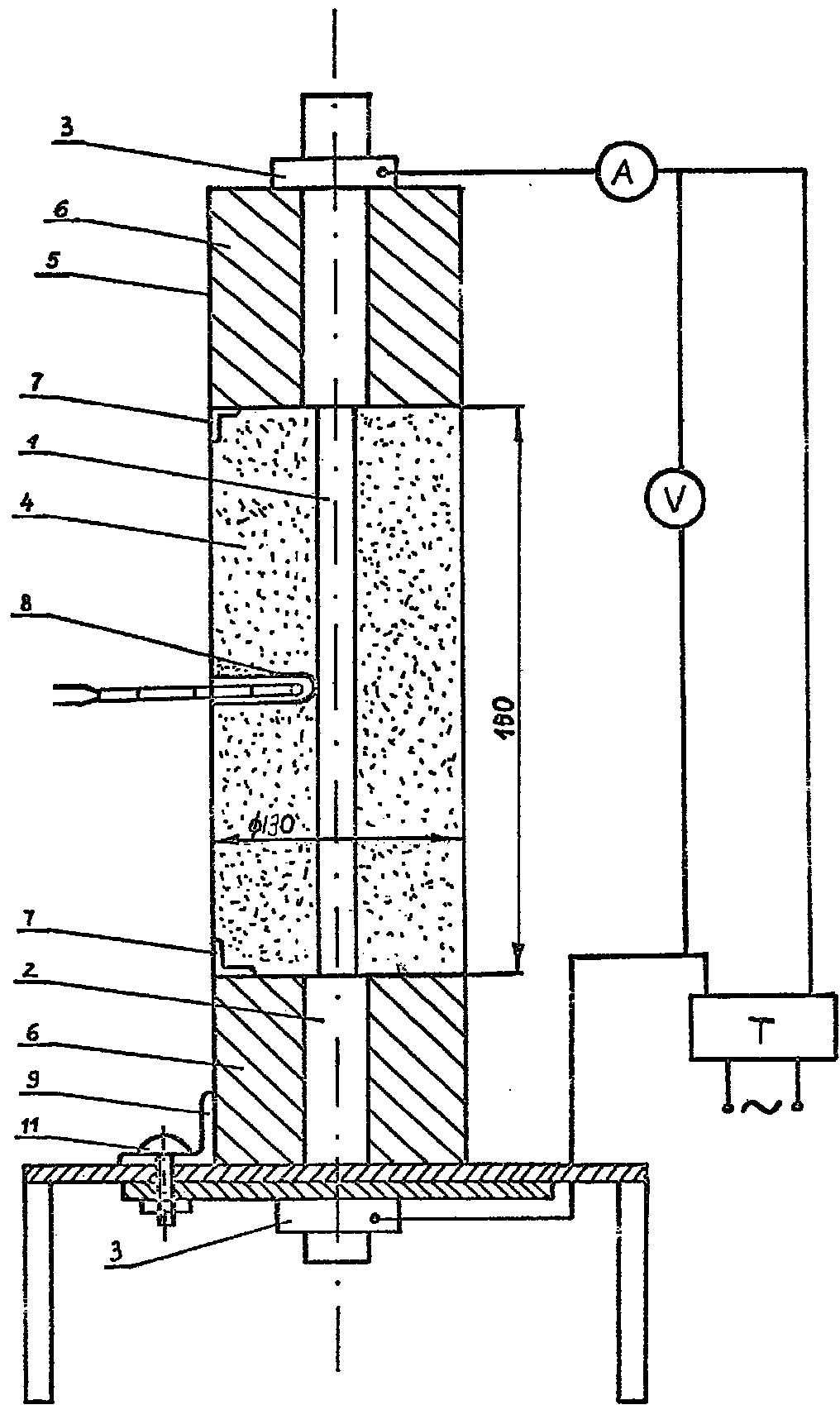
Do osłony termoelementów stosuje się rurki kwarcowe. Temperaturę mierzy się termoelementami PtRh10–Pt, mogącymi w sposób ciągły rejestrować temperaturę w zakresie 0 – 1700°C. Sposób rozmieszczenia termopar w badanej próbce zasypki przedstawiono na rys. 3. Są one umieszczone w następujących odległościach od osi aparatury:

$$r_1 = 12 \text{ mm}$$

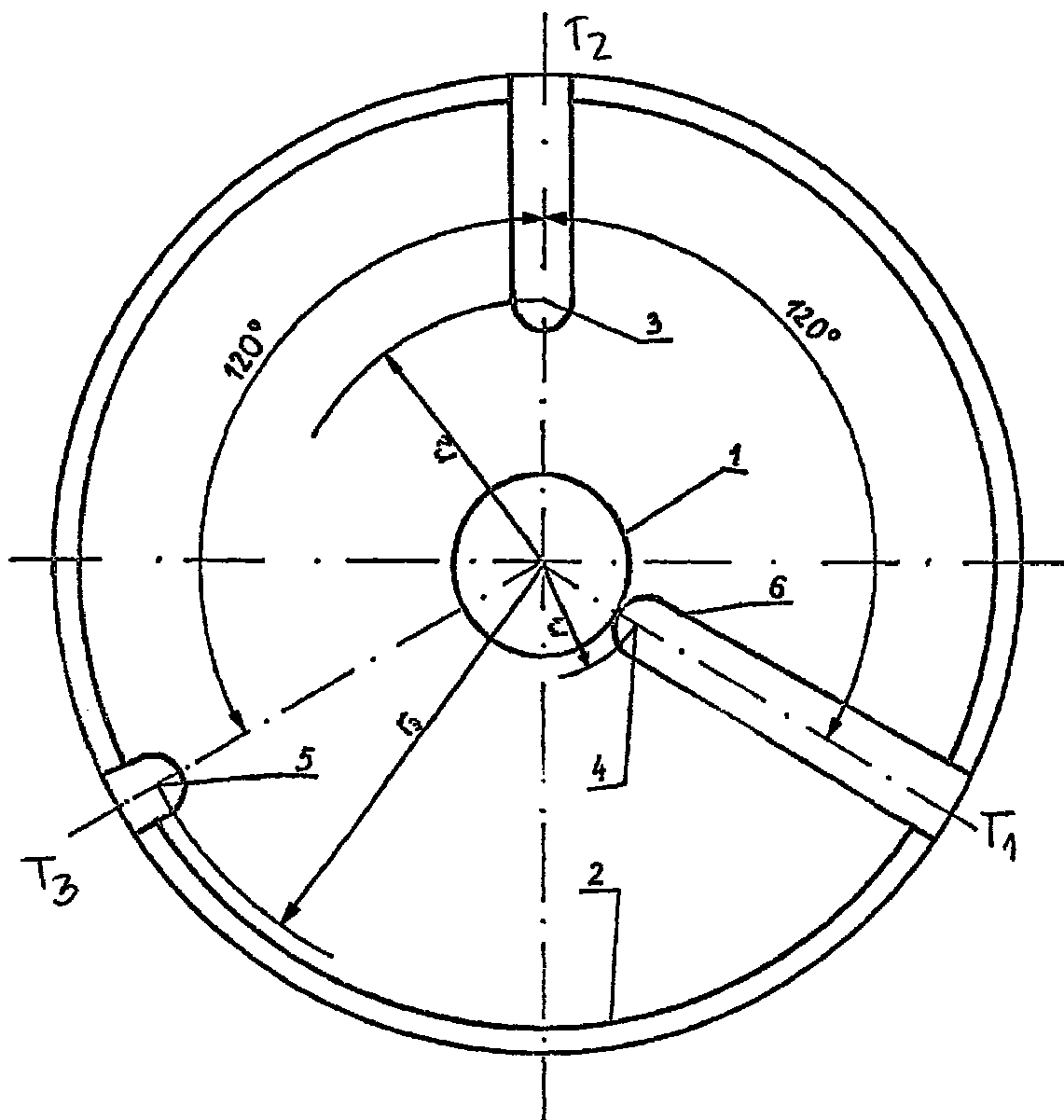
$$r_2 = 32 \text{ mm}$$

$$r_3 = 50 \text{ mm}$$

Temperaturę rejestruje się w sposób ciągły za pomocą 6-cio punktowego rejestratora.



Rys. 2. Schemat aparatury do pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła zasypek.



Rys. 3. Rozkład punktów pomiaru temperatury w próbce zasypki

1 – element grzewczy /sylit/, 2 – azurowy cylinder, 3, 4, 5 – termopary mierzące temperaturę, 6 – zewnętrzna osłonka termopary.

IV. Przebieg ćwiczenia

Badaną zasypkę nagrzewa się przy różnej mocy prądu zasilającego. Ma to na celu otrzymanie większej ilości pomiarów co umożliwi określenie zależności funkcyjnej $\lambda_z = f(T)$. Regulację mocy prądu zasilającego przeprowadza się za pomocą autotransformatora /T/. Próbkę należy nagrzewać w stałej założonej mocy do osiągnięcia stanu ustalonego tzn. ustabilizowania się

temperatur T_1 , T_2 , T_3 . Następnie i można zwiększyć moc prądu zasilającego do określonej wartości i doprowadzić układ ponownie do stanu ustalonego.

Zaleca się wykonywanie pomiarów przy następujących mocach prądu zasilającego: 100, 150, 200, 250 i 300 W.

V. Opracowanie wyników

Na podstawie odczytów, określa się temperatury T_1 , T_2 , T_3 w warstwie badanej zasypki, przy różnej mocy prądu zasilającego. Dla temperatur T_i i T_j (np: T_1 , T_2) oblicza się średnią całkową temperaturę warstwy zasypki według wzoru (3). Jednocześnie dla tych temperatur oblicza się odpowiadającą wartość współczynnika przewodzenia ciepła λ_{ij} . Umożliwia to, po przeliczeniu wszystkich otrzymanych wyników pomiarów temperatury przy różnych mocach prądu zasilającego, określenie zależności współczynnika przewodzenia ciepła zasypki w funkcji temperatury.

Wzory robocze, do obliczania wartości współczynnika przewodzenia ciepła otrzymane po podstawieniu do wzoru (2) odpowiednich wartości składowych posiadają następującą postać:

– dla zakresu temperatury $T_1 - T_2$:

$$\lambda_{12} = \frac{0,75 \cdot P_z \cdot \ln\left(\frac{32}{12}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 0,18 \cdot (T_1 - T_2)} \quad (4)$$

– dla zakresu temperatury $T_1 - T_3$:

$$\lambda_{13} = \frac{0,75 \cdot P_z \cdot \ln\left(\frac{50}{12}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 0,18 \cdot (T_1 - T_3)} \quad (5)$$

– dla zakresu temperatury $T_2 - T_3$:

$$\lambda_{23} = \frac{0,75 \cdot P_z \cdot \ln\left(\frac{50}{32}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 0,18 \cdot (T_2 - T_3)} \quad (6)$$

Wyniki pomiarów i obliczeń należy umieścić w tabeli:

Moc prądu [W]	Temperatura [°C]			$\Delta T = T_i - T_j$			$\bar{T}_{ij} = \frac{T_i - T_j}{n + 1} + T_j$			λ_Z		
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₁ -T ₂	T ₁ -T ₃	T ₂ -T ₃	T ₁₂	T ₁₃	T ₂₃	λ_{12}	λ_{13}	λ_{23}
100												
150												
200												
250												
300												

Na podstawie wyników obliczeń określić dla badanej zasypki zależność $\lambda_Z = f(T)$, którą należy przedstawić w postaci graficznej. Obliczyć średnią wartość współczynnika λ_Z w badanym zakresie oraz określić wartość λ_Z w pomiarze którego warunki są najbardziej zbliżone do rzeczywistych warunków pracy cieplnej zasypki.

Literatura.

1. J. Starczewski: Praca doktorska (niepublikowana), AGH Kraków, 1983
2. W. Longa: Krzepnięcie nadlewów w formach piaskowych i metalowych. Wydawnictwo Śląsk
3. B. Gulajew: Teoria procesów odlewniczych, Warszawa, 1963