

Badanie sprawności cieplnej pieca indukcyjnego

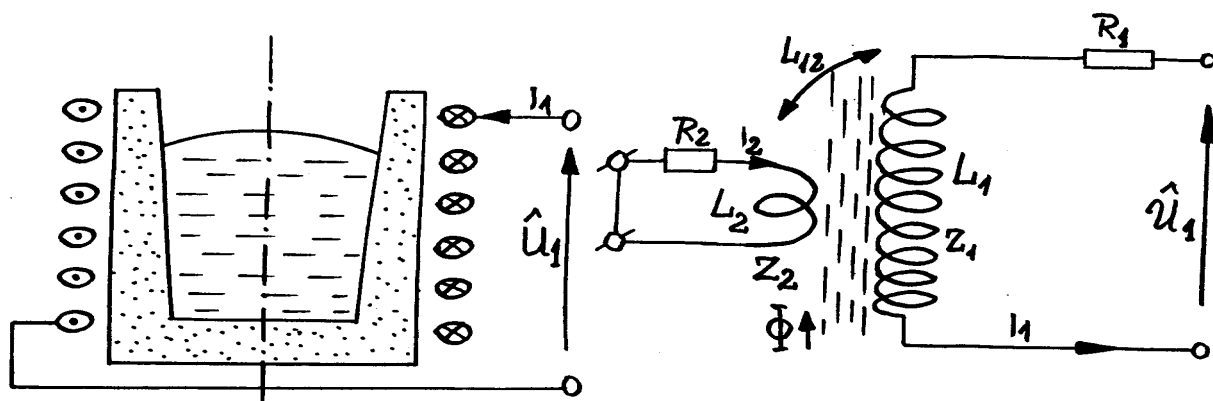
Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową i zasadą działania pieca indukcyjnego oraz obliczenie sprawności cieplnej

I Podstawy teoretyczne

Piec indukcyjny bezrdzeniowy jest jednym z rodzajów pieców stosowanych do produkcji stali oraz powszechnie stosowany w produkcji metali kolorowych. Pojemność pieców waha się w granicach od 50 kg do 15 Mg.

Z punktu widzenia elektrycznego piec indukcyjny jest specjalnym typem transformatora wysokiej częstotliwości pracującym w stanie zwarcia. Uzwojeniem pierwotnym transformatora jest cewka indukcyjna wykonana z rury miedzianej chłodzonej wodą. Cewka nawinięta jest wokół tygla, wewnątrz którego znajduje się przetapiana stal. Metal w tyglu stanowi wtórne uzwojenie transformatora traktowane jak jeden zwój zwarty a jednocześnie spełnia rolę rdzenia transformatora. Przetopiony metal jako uzwojenie wtórne transformatora tworzy obwód zamknięty dla przepływu prądów wysokiej częstotliwości, natomiast jako rdzeń tworzy obwód dla przepływu strumienia magnetycznego. Na rys. 1 przedstawiono schematycznie cewkę indukcyjną wraz z tygłem i metalem, a obok schemat elektryczny równoważnego obwodu zastępczego.



Rys 1. Schemat poglądowy oraz równoważny obwód elektryczny pieca indukcyjnego.

R_1, L_1 - rezystancja i indukcyjność własna cewki (wzbudnika),

R_2, L_2 - rezystancja i indukcyjność własna wsadu,

$L_{1,2}$ - indukcyjność wzajemna cewka - wsad,

Z_1 - liczba zwojów wzbudnika,

Z_2 - liczba zwojów wsadu,

Φ - strumień magnetyczny indukowany w metalu

I_1 - prąd zasilający,

I_2 - prądy wirowe.

W wyniku przepływu prądu I_1 w uzwojeniu pierwotnym, powstaje w rdzeniu zmienny strumień magnetyczny, który z kolei indukuje w uzwojeniu wtórnym (wsad metaliczny) siłę elektromotoryczną E równą:

$$E = 4,44 * Z_2 * f * \Phi_{\max} \quad (1)$$

gdzie:

Z_2 - liczba zwojów uzwojenia wtórnego

f - częstotliwość w [Hz]

$\Phi_{\max}$ - strumień magnetyczny [Wb]

Pod wpływem powstającej siły elektromagnetycznej E w uzwojeniu wtórnym przepływa prąd I_2 o bardzo dużym natężeniu (prądy wirowe). Prąd ten przepływa wewnątrz wsadu metalicznego o rezystancji R_2 powoduje wydzielanie dużej ilości ciepła. Ilość wydzielonego ciepła określona jest regułą Joule'a-Lentza i obliczamy ją ze wzoru:

$$\theta = R * I^2 * t \quad (2)$$

gdzie:

R - rezystancja [Ω]

I - natężenie prądu [A]

t - czas [s]

stanowiąc główną drogę do prowadzącą w konsekwencji do roztopienia wsadu.

Prądy te nie są regularne, lecz występują w formie strumieni kolistych, wirujących w płaszczyznach prostopadłych do pionowej osi cewki i stąd nazywają się prądami wirowymi. Prądy te nie obejmują całej masy wsadu, lecz płyną w obrębie jego zewnętrznej warstwy przyległej do ściany tygla, przy czym istnieje stopniowe przejście od strefy obojętnej (nie objętej prądami wirowymi) do strefy maksymalnych gęstości prądu (rys. 2). Powyższy nierównomierny rozkład gęstości prądu jest wynikiem zjawiska naskórkowości. Grubość powierzchniowej warstwy wsadu (metal), w której gęstość prądu osiąga dużą wartość, nazywa się głębokością przenikania. Głębokość przenikania strumienia magnetycznego oblicza się ze wzoru:

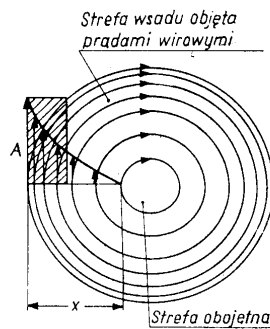
$$\delta = 5030 * \sqrt{\frac{\rho}{f * \mu}} \text{ cm} \quad (3)$$

gdzie:

ρ - oporność właściwa wsadu, $\text{om} * \text{cm}$,

μ - przenikalność magnetyczna wsadu,

f - częstotliwość prądu, okr/s .



Rys. 2 Rozkład gęstości prądu (A) we wsadzie metalicznym w piecu indukcyjnym.

Częstotliwość prądu uzależniona jest od pojemności pieca i oporności właściwej wsadu. Minimalna częstotliwość prądu, $f_{\min}$ w odniesieniu do danej pojemności (lub średnicy) pieca i określonego rodzaju wsadu wyznacza się z wzoru:

$$f_{\min} = 25 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{s}{d^2} \quad (4)$$

gdzie:

s - powierzchnia boczna tygła załadowanego wsadem, cm^2 ,
d - średnica wewnętrzna tygła (wsadu), cm.

Z wzoru wynika, że w miarę zwiększania pojemności pieca zmniejsza się częstotliwość prądu zasilającego. Moc energii elektrycznej, która we wsadzie przemienia się w ciepłą, określa wzór (słuszny przy wielkich częstotliwościach)

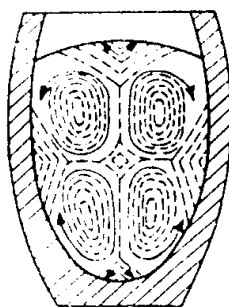
$$P = 2 \cdot (I_1 \cdot n)^2 \cdot \frac{d}{h} \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu \cdot f \cdot 10^{-9}} \quad (5)$$

gdzie:

I_1 - natężenie prądu w cewce, A,
n - liczba zwojów cewki.

Jak wynika z wzoru, moc cieplna indukujących się we wsadzie prądów wirowych jest proporcjonalna do kwadratów amperozwojów cewki oraz pierwiastka kwadratowego z oporności właściwej wsadu, jego przenikalności magnetycznej i częstotliwości prądu zasilającego cewkę. W czasie nagrzewania wsadu stalowego powyżej punktu Curie moc cieplna zmniejsza się znacznie, ponieważ stal traci wówczas dobre własności magnetyczne i przenikalność ($\mu=1$).

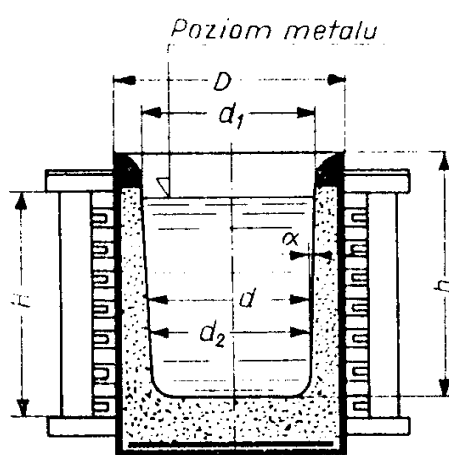
W piecach indukcyjnych wielkiej częstotliwości cewka i metal ciekły w tyglu stanowią dwa współosiowe przewodniki. W przewodnikach tych prądy płyną w kierunkach przeciwnych co powoduje odpychanie się przewodników, wskutek czego następuje podnoszenie się środkowej części kąpeli. W wyniku tego zjawiska (zjawisko elektrodynamiczne) powierzchnia kąpeli metalowej w tyglu przybiera kształt meniska wypukłego (rys. 3). Podnoszenie się kąpeli wywołuje ruch wirowy, który przyspiesza dokładne wymieszanie kąpeli, z czym łączy się wyrównywanie jej składu chemicznego i temperatury oraz przyspieszenie przebiegu procesów chemicznych i odgazowania metalu.



Rys. 3. Kształt powierzchni i ruchy wirowe kąpielii metalowej w piecu indukcyjnym.

1. Zasadnicze wymiary pieca indukcyjnego

Do zasadniczych wymiarów pieca indukcyjnego należy zaliczyć wymiary tygla ogniotrwałego i cewki (rys. 4). Właściwy dobór tych wymiarów wywiera decydujący wpływ na trwałość wyłożenia tygla oraz na sprawność pieca. Z punktu widzenia trwałości tygla jego ściany powinny być jak najgrubsze. Zwiększenie jednak ich grubości powoduje większe rozproszenie strumienia magnetycznego, co z kolei przyczynia się do zmniejszenia sprawności pieca. Wobec tego przy doborze grubości ścian tygla należy baczyc, aby nie wykraczała ona poza minimalną grubość, niezbędną do zapewnienia tyglowi wystarczającej trwałości. Wysokość i średnicę tygla dobiera się z punktu widzenia zapewnienia optymalnych warunków pracy pieca. Ze względu na znaczne ciśnienie ferrostatyczne metalu i intensywniejsze nagrzewanie się ścian w dolnej części tygla, tygle pieców indukcyjnych zbieżne są ku dołowi. W celu uzyskania dużej sprawności pieca wysokość cewki powinna być zbliżona do wysokości tygla i równa jego średnicy. Na pracę pieca, poza wymiarami tygla, ma jeszcze duży wpływ położenie cewki względem tygla. Stwierdzono w praktyce, że najkorzystniejsze jest takie usytuowanie, aby środek ciężkości kąpielii metalowej w tyglu leżał nieco powyżej środka geometrycznego cewki. Uzyskuje się wówczas niezbyt wypukły menisk i wystarczająco intensywne wirowanie kąpielii, która jednak nie zmniejsza trwałości wyłożenia ogniotrwałego tygla.



Rys. 4. Zasadnicze wymiary tygla i cewki pieca indukcyjnego wielkiej częstotliwości.

Zasadnicze wymiary pieca indukcyjnego dobiera się zależnie od wymaganej pojemności:

$$V = \frac{\pi * d^2}{4} * h = \frac{G}{\gamma} \quad (6)$$

gdzie:

G - ciężar kąpieli, kg,
 d - średnica tygla, m,
 γ - ciężar właściwy kąpieli, kg/m^3 ,
 h - wysokość tygla, m.

2. Wyłożenie ogniotrwałe pieca indukcyjnego

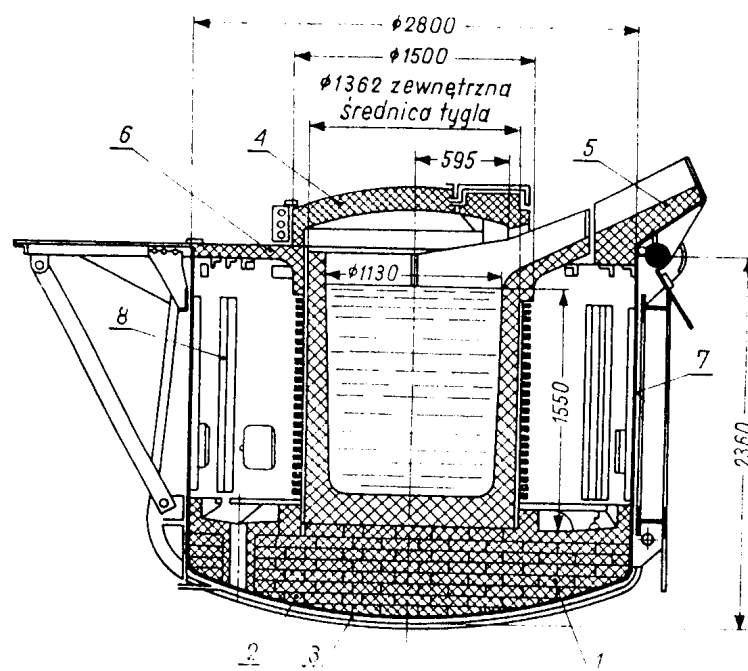
W piecach o bardzo małej pojemności tygiel ubija się poza piecem i gotowy wstawia do cylindra. W piecach o średniej i dużej pojemności tygiel ubija się bezpośrednio w cylindrze cewki. W piecach o średniej i dużej pojemności tygiel ubija się bezpośrednio w cylindrze cewki.

Tygły kwaśne wykonywane są przeważnie z kwarcytu a o zawartości powyżej 95 % SiO_2 i max 1 do 3 % domieszek Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO i MgO . Masa do ubijania składa się z mielonego kwarcytu o następującym składzie ziarnowym (sitowym): 65 % ziarn 2 - 3 mm, 15 - 23 % ziarn 0,75 - 1 mm i 12 - 20 % ziarn poniżej 0,75 μm oraz z kwasu borowego, stanowiącego materiał wiążący, w ilości 1 - 2 % w stosunku do ciężaru masy. Kwas borowy można zastąpić krzemianem sodu lub gliną ogniotrwałą.

Tygły zasadowe wykonuje się zwykle z proszku magnezytowego. W celu osiągnięcia dużej tygli zasadowych trzeba dobrać materiał o odpowiednim składzie i ziarnowym oraz odpowiednie materiały wiążące. Magnezyty stosowane do tego celu powinny zawierać powyżej 85 % MgO , do 5 % CaO , do 4 % SiO_2 , do 2 % F_2O_3 oraz 1 % Al_2O_3 . Wymagany skład ziarnowy jest następujący: 35 % ziarn 2 - 3 mm, 65 % ziarn do 2 mm. W skład masy w charakterze materiału wiążącego wchodzić może kwas borowy w ilości 7 - 8 % albo żużel metalurgiczny czy czyste mielone szkło. Jakość tygli zasadowych, ze względu na małą odporność materiałów magnetycznych na zmiany temperatury, nie jest zadowalająca. Jak wykazuje praktyka, trwałość tygli magnezytowych można zwiększyć przez stosowanie do mas kilku gatunków magnezytów o odpowiedniej ziarnistości. Dobrą trwałość wykazują np. tygły wykonane z mieszanki magnezytów austriackich i greckich z dodatkiem kwasu borowego, żużla i piasku w ilości do 5 %.

Ubijanie tygla następuje za pomocą młotów pneumatycznych, przy czym najpierw ubija się trzon, a potem ściany. Trzon ubija się warstwami o grubości 50 - 75 mm. Do ubijania ścian służy wzornik (szablon) spawany z blachy (o grubości 5 - 7 mm) o wymiarach dostosowanych do wymaganych wewnętrznych wymiarów tygli. Nowy tygiel należy suszyć ok. 6 h gazem oraz nagrzewać 4 - 5 h pod prądem o zwiększanym stopniowo napięciu. W celu dobrego spieczenia pierwszy wytop przeprowadza się przy obniżonej mocy. Stopień zużycia tygla kontroluje się po każdym wytopie przez mierzenie średnicy wewnętrznej i wysokości tygla.

Trwałość tygla zależy od wielu czynników, z których najważniejsze są: rodzaj materiałów ogniotrwałych i jakość wykonanego tygla, rodzaj procesu, charakter żużla, gatunek wytapianej stali i technologia wytapiania. Trwałość tygli kwarcowych wynosi przeciętnie 25 - 50 i niekiedy dochodzi do 100 wytopów. Trwałość tygli magnezytowych wynosi przeciętnie 20 - 30 wytopów. Wyłożenie ogniotrwałe pieca indukcyjnego o pojemności 8 ton przedstawia rys. 5.



Rys. 5 Wyłożenie ogniotrwałe pieca indukcyjnego o pojemności 8 ton.

1 - cewka, 2 - tygiel, 3 - pokrywa, 4 - rynna wylewowa, 6 - pierścień szamotowy, 7 - płaszcz stalowy, 8 - ekran antymagnetyczny.

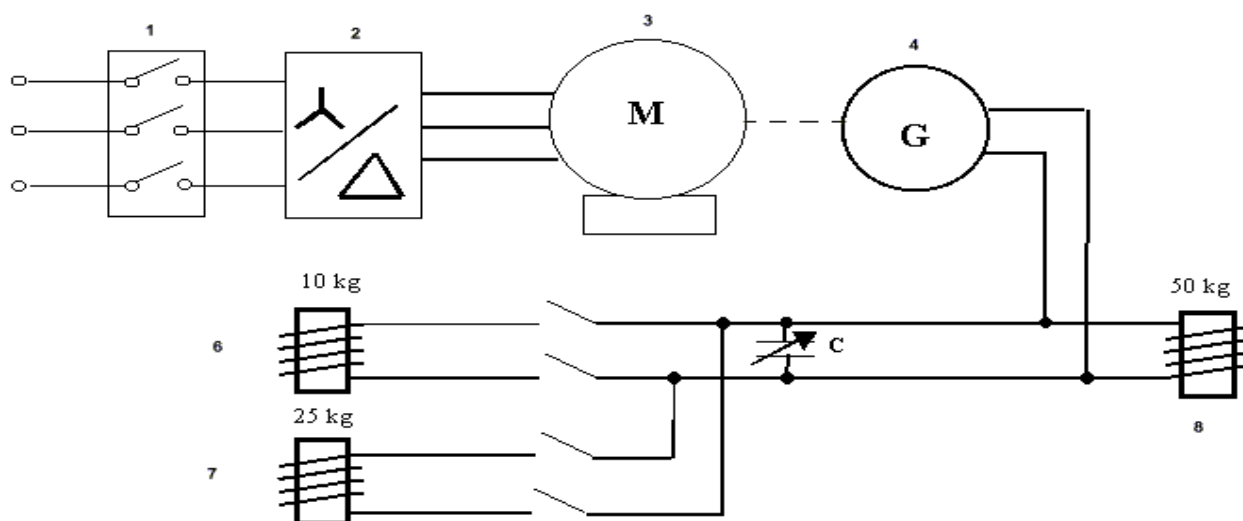
3. Cewka pieca indukcyjnego.

Cewka jest podstawowym elementem konstrukcji pieca indukcyjnego. Energia elektryczna przetwarzana we wsadzie na ciepło jest proporcjonalna do kwadratu liczby amperozwojów cewki. Cewkę wykonuje się z rur miedzianych o poprzecznym przekroju okrągłym, eliptycznym lub prostokątnym. Zastosowanie rur eliptycznych lub prostokątnych jest korzystniejsze, ponieważ nawinięta z nich cewka ma większą liczbę zwojów niż cewka o tej samej wysokości wykonana z rury okrągłej. Najczęściej cewka chłodzona jest wewnątrz wodą.

4. Płaszcz pieca indukcyjnego

Tygiel pieca wraz z cewką ustawiony jest zwykle na bloku szamotowym lub specjalnym członie wymurowanym z ogniotrwałych wyrobów szamotowych. Natomiast u góry uchwycony jest pierścieniem szamotowym złożonym ze specjalnych kształtek. Całość ujmującej konstrukcja stalowa wykonana z blach i belek nośnych. Część konstrukcji odpowiednio oddalona od cewki może być wykonana ze stali węglowej. Elementy konstrukcji natomiast znajdujące się w pobliżu cewki, a więc objęte polem magnetycznym, wykonuje się ze stali niemagnetycznej aby ustrzec je przed przegrzaniem podczas pracy pieca. W nowoczesnych piecach najczęściej stosuje się w tym celu ekrany antymagnetyczne w postaci blach z miedzi lub stali transformatorowej. Aby zmniejszyć straty ciepła oraz izolować metal od działania atmosfery, na tygiel nakłada się pokrywę szamotową.

II Schemat układu zasilającego laboratoryjne piece indukcyjne o pojemnościach 10,25,50kg



Rys.1 Schemat układu zasilającego laboratoryjne piece indukcyjne o pojemności 10, 25, 50 kg.

1 - wyłącznik główny, 2 - przełącznik gwiazda trójkąt (służący do włączenia urządzenia dużej mocy powyżej 20 kW), 3 - silnik 70 kW, 4 - generator, 5 - kondensator zmiennej częstotliwości, 6, 7, 8 - piece indukcyjne.

III Przebieg ćwiczenia

1. Zapoznanie się z budową i zasadą działania pieca indukcyjnego
2. Zapoznanie się z obsługą pieca
3. Przygotowanie materiału do przetopu
 - należy zważyć wsad.
4. Wykonanie przetopu
 - odmierzamy wskazania watomierza co 1 minutę

W naszym przypadku watomierz mierzy nam moc pobieraną przez silnik napędzający generator, aby uzyskać pomiar mocy dostarczonej przez sam układ piecowy do roztopienia wsadu, należy notować wskazania woltomierza V_i i amperomierza A_i również co 1 minutę, aż do momentu roztopienia wsadu. Z iloczynu $V_i * A_i$ otrzymujemy moc czynną P_{czi} [kW]:

$$P_{czi} = V_i * A_i \quad [\text{kW}] \quad (7)$$

następnie obliczamy Q_i ciepło zużyte w poszczególnych krokach czasowych do roztopienia wsadu ze wzoru:

$$Q_i = P_{czi} * t_i \quad [\text{kWh}] \quad (8)$$

gdzie:

P_{czi} - moc czynna w poszczególnych krokach czasowych [W]

t_i - czas [s]

Mając ciepło zużyte w poszczególnych krokach czasowych sumujemy je i obliczamy ilość ciepła potrzebną do roztopienia wsadu Q_R [kJ].

$$Q_R = \sum_{i=1}^n Q_i \quad [\text{kJ}] \quad (9)$$

Obliczenia przeprowadzić pamiętając że:

$$\begin{aligned} 1 \text{ kcal} &= 4,18 \text{ kJ} \\ 1 \text{ Ws} &= 1 \text{ J} \\ 1 \text{ kWh} &= 3600 \text{ kJ} \end{aligned}$$

5. Dla załadowanej masy złomu obliczyć teoretyczną ilość ciepła potrzebną do doprowadzenia stali od temperatury otoczenia do temperatury przegrzania 1550 °C

Obliczenie orientacyjnej ilości ciepła potrzebnej do roztopienia danej masy wsadu przeprowadzany wg zależności.

$$Q_{teoret} = M * \left[c_{\alpha} * (T_{Fe_{\beta}} - T_p) + c_{\beta} * (T_{Fe_{\beta}} - T_{Fe_{\alpha}}) + c_{\gamma} * (T_{Fe_{\gamma}} - T_{Fe_{\beta}}) + c_{\sigma} * (T_{Fe_{\sigma}} - T_{Fe_{\gamma}}) + c_c * (T_k - T_{Fe_{\sigma}}) + q \right] \quad [\text{kJ}] \quad (10)$$

gdzie:

M – ciężar wsadu w [kg]

$c_{\alpha} = 0,1080 \text{ kcal/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ - średnie ciepło wł. odmiany Fe_{α}

$c_{\beta} = 0,1722$ " " " " Fe_{β}

$c_{\gamma} = 0,1504$ " " " " Fe_{γ}

$c_{\sigma} = 0,1790$ " " " " Fe_{σ}

$c_c = 0,1459$ " " " " stanu ciekłego Fe

$q = 70 \text{ kcal/kg}$ - utajone ciepło topienia Fe

$T_p = 283 \text{ }^{\circ}\text{K}$

$T_{Fe_{\alpha}} = 1041 \text{ }^{\circ}\text{K}$

$T_{Fe_{\beta}} = 1183 \text{ }^{\circ}\text{K}$

$T_{Fe_{\gamma}} = 1663 \text{ }^{\circ}\text{K}$

$T_{Fe_{\sigma}} = 1803 \text{ }^{\circ}\text{K}$

$T_k = 1823 \text{ }^{\circ}\text{K}$

6. Na podstawie wyników uzyskanych z punktu 4 i 5 obliczyć sprawność cieplną przetopu ze wzoru:

$$\eta = \frac{Q_{teoret}}{Q_R} * 100\% \quad [\%] \quad (11)$$

7. Opracować sprawozdanie i wnioski końcowe