ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1978

Seria: ENERGETYKA z. 68 Nr kol. 564

Edward KOSTOWSKI
Janusz STEFANIK

Instytut Techniki Cieplnej

NIEKTÓRE ZAGADNIENIA CIEPLNE OPTYMALIZACJI PROCESU NAGRZEWANIA METALU

Streszczenie. Podano rozwiązanie dla szczególnego przypadku (nagrzewanie wsadu idealnego o wyrównanej temperaturze) oraz rozwiązanie przybliżone dla tego przypadku. Omówiono możliwość optymalizacji cieplnej procesu nagrzewania w piecu wgłębnym i wskazano na występujące ograniczenia. Opisano wpływ uwzględnienia powstawania zgorzeliny na wyniki obliczeń cieplnych i podano wyniki przykładowych obliczeń.

1. Wstęp

Różnego rodzaju piece grzewcze, a zwłaszcza piece wgłębne, należą do bardziej energochłonnych urządzeń w hutnictwie. Z tego powodu duże znaczenie ma oszczędna gospodarka energią, dla której najprostszym miernikiem jest wskaźnik zużycia energii chemicznej paliwa (ciepła) na jednostkę masy podgrzanego metalu. W rozważaniach optymalizacyjnych należy również uwzględnić takie czynniki jak koszt utlenionej stali oraz czas nagrzewania, określający koszty użytkowania pieców i urządzeń. W wielu przypadkach, zwłaszcza przy analizie nagrzewania wsadu w piecach wgłębnych, występują różne dodatkowe ograniczenia, które znacznie zawężają zakres możliwych rozwiązań. Przeprowadzanie wymienionych analiz wymaga opracowania odpowiednich modeli matematycznych zjawisk nagrzewania, dzięki którym można badać wpływ różnych czynników na końcowe efekty tego procesu. Istotną cechą tych modeli powinna być wierność w odtwarzaniu procesów rzeczywistych a z drugiej strony prostota ułatwiająca analizę i interpretację otrzymanych wyników.

2. Minimalne zużycie paliwa podczas nagrzewania metalu

W zależności od grubości nagrzewanego metalu oraz warunków przepływu ciepła, jego temperatura może być mniej lub więcej wyrównana. Miarą tych czynników jest liczba Biota; w idealnym przypadku, gdy $Bi \to 0$ temperatura całego metalu jest jednakowa. W tym przypadku analiza jest ułatwiona, istnieją jednak różne podejścia. Butkowski i współpracownicy [1 2] oraz

Tajc [3] otrzymują rozwiązania wynikające z zasady optimum Pontriagina, jednak wymaga to wielu założeń upraszczających, jeśli chodzi o przepływ ciepła w komorze pieca.

Inne podejście [4, 5] wykorzystuje pojęcie "chwilowej sprawności termicznej" pieca definiowanej następująco:

$$\bar{\eta}_t = \frac{\dot{Q}_m}{\dot{P}\, W_d}, \tag{1}$$

gdzie oznaczono:

$\dot{Q}_m$ - strumień ciepła docierający do metalu,

$\dot{P}$ - strumień paliwa,

W_d - wartość opałowa paliwa.

Analiza przeprowadzona dla pieca wgłębnego [4] wykazała, że dla każdej temperatury metalu istnieje taki strumień paliwa, przy którym $\bar{\eta}_t$ osiąga maksimum. Jego położenie i wysokość zależą od takich czynników, jak straty ciepła do otoczenia, jakość rekuperacji ciepła, nadmiar powietrza itp. Dla ustalonych warunków, ze wzrostem temperatury metalu optymalny strumień paliwa (przy którym $\bar{\eta}_t$ osiąga maksimum) zwiększa się.

Zużycie paliwa podczas nagrzewania metalu można obliczyć następująco:

$$P = \int_0^{\tau_g} \dot{P}(\tau)\, d\tau, \tag{2}$$

przy czym metal pochałania ilość ciepła

$$Q_m = W_d \int_0^{\tau_g} \bar{\eta}_t\, \dot{P}(\tau)\, d\tau. \tag{3}$$

Dla wsadu o wyrównanej temperaturze można zastosować podstawienie

$$\dot{Q}_m\, d\tau = dQ_m = W_m\, dT_m \tag{4}$$

dzięki czemu całkę (2) można przekształcić do postaci

$$P = \frac{W_m}{W_d} \int_{T_{mp}}^{T_{mk}} \frac{dT_m}{\bar{\eta}_t}. \tag{5}$$

We wzorach (4) i (5) oznaczono:

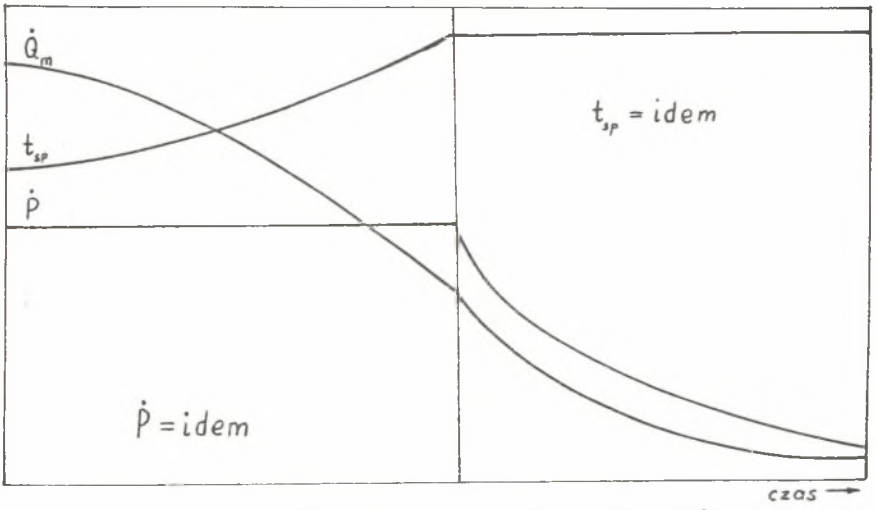
T_m - temperatura metalu (p - początkowa, k - końcowa),

W_m - pojemność cieplna nagrzewanego metalu.

Jeżeli straty ciepła $\dot{Q}_o$ są stałe lub zależą od temperatury metalu, to zużycie paliwa będzie minimalne dla procesu przechodzącego przez maksymalne chwilowe sprawności termiczne. Taki proces przebiegałby przy wzrastającym strumieniu paliwa. Dla założonego modelu pieca można rozwiązanie całki (5) otrzymać dość łatwo metodą różnicową. Można również wyznaczyć przybliżone optimum, tzn. założyć nagrzewanie przy stałym strumieniu paliwa i wyznaczyć taką jego wartość, dla której sprawność całego procesu jest największa [5]. Optymalne w tym przypadku rozwiązanie jest tylko nieznacznie gorsze jeśli chodzi o zużycie paliwa, ale prowadzenie nagrzewania przy $\dot{P}$ = idem jest znacznie łatwiejsze.

3. Nagrzewanie wsadu w piecu wgłębnym

W tym przypadku mamy do czynienia z reguły z tzw. "wsadem grubym" [6], dla którego Bi > 0,5. W zależności od początkowej temperatury wsadu i gatunku stali istnieją różne dodatkowe ograniczenia determinujące przebieg procesu. Najbardziej typowym jest jednak proces dwustopniowy (rys.1). Faza nagrzewania (podgrzewania) prowadzona jest przy stałym strumieniu paliwa $\dot{P}_o$, zwykle odpowiadającym maksymalnej mocy cieplnej pieca. Po osiągnięciu temperatury kontrolnej strumień paliwa jest zmniejszany tak, aby temperatura w piecu była stała. Następuje wówczas wyrównywanie się tempe-



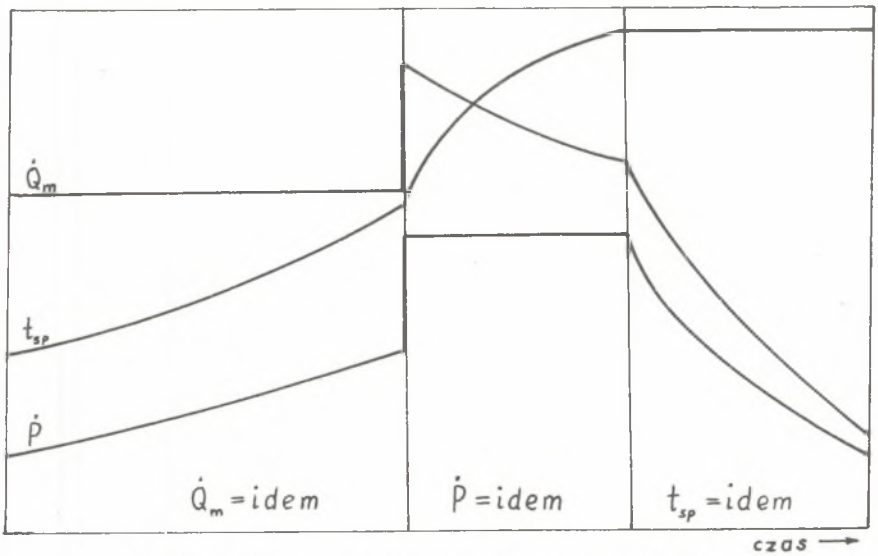
Rys. 1. Dwustopniowy proces nagrzewania stali

ratur we wlewku, zaś czas trwania tej fazy (wygrzewania) jest uzależniony od przyjętych różnic temperatur we wsadzie. W analizie obliczeniowej może to być np. różnica średnich temperatur powierzchni i osi wlewków.

Dla procesu dwustopniowego istnieje pewna możliwość manewru, polegająca na doborze mocy cieplnej pieca (czyli strumienia paliwa) w pierwszej fazie - im większa moc cieplna, tym krótszy czas tej fazy. Dłużej trwa jednak faza wyrównywania, ale czas całego procesu ulega skróceniu. Obszerniejszą analizę takiego procesu w przypadku nagrzewania wsadu gorącego (o temperaturze początkowej 800°C) przedstawiono w [7]. Okazało się, że w bardzo szerokim przedziale wartości P_o całkowity czas nagrzewania i sprawność termiczna procesu (zużycie ciepła) są prawie stałe. Największą sprawność i najkrótszy czas otrzymano by wówczas, gdyby już dla początku procesu temperatura spalin osiągnęła wartość kontrolną. Wniosek ten ma jedynie aspekt teoretyczny, gdyż początkowy strumień paliwa miałby wówczas wartość o około 80% większą od maksymalnej wydajności zainstalowanych palników. Obliczenia wykonane dla przyjętego modelu pieca pokazały również, że rekuperacja ciepła wpływa na zużycie paliwa (w przypadku gorszej rekuperacji wydłuża się czas nagrzewania), natomiast prawie nie wpływa na czas całego procesu.

3.1. Nagrzewanie stali wysokowęglowych lub stopowych

W przypadku wsadu gorącego nie ma istotnej różnicy w sposobie nagrzewania różnych gatunków stali. Wystąpią one dopiero dla wsadu zimnego, gdyż wówczas stosuje się ograniczoną szybkość nagrzewania określaną w różny sposób. Na rys. 2 przedstawiono jakościowy przebieg dla procesu, w którym



Rys. 2. Trzystopniowy proces nagrzewania stali

w pierwszej fazie strumień ciepła $\dot{Q}_m$ jest stały (i ograniczony). Niewielkie możliwości optymalizacji tkwią w tym przypadku w doborze maksymalnej mocy cieplnej w fazie II.

4. Wpływ tworzenia się zgorzeliny na proces nagrzewania wsadu

Podczas nagrzewania stali w piecach komorowych, około 1-2% masy wsadu ulega utlenieniu i przekształca się w zgorzelinę. Tworząca się zgorzelina utrudnia dopływ ciepła, ale jej powstawanie jest procesem egzotermicznym. Przyjmuje się na ogół, że oba efekty się równoważą i w obliczeniach pomija się wpływ zgorzeliny na proces nagrzewania. Nie można tego jednak zrobić w rozważaniach optymalizacyjnych, gdzie stosuje się ogólne kryteria ekonomiczne.

Proces tworzenia się zgorzeliny opisuje się zwykle równaniem:

$$\frac{dz}{d\tau} = \frac{k^2}{2\,z}. \tag{6}$$

Grubość z powstałej w czasie τ warstwy zgorzeliny wyznacza się z zależności:

$$z^2 = z_o^2 + \int_0^{\tau} k^2(\tau)\, d\tau, \tag{7}$$

(gdzie dla $\tau = 0$ przyjęto $z = z_o$).

Współczynnik utleniania k zależy od temperatury i składu chemicznego atmosfery pieca, przy czym najważniejszy jest udział tlenu. W praktyce przyjmuje się współczynnik utleniania tak, jak dla powstawania FeO; znana jest np. zależność [8]

$$k = \sqrt{\frac{(O_2)}{0{,}21}}\, \exp\left(-\frac{6044{,}29}{t} - 1{,}1513\right) \frac{cm}{s^{1/2}}, \tag{8}$$

gdzie:

t - temperatura gazu.

Uwzględnienie narastania zgorzeliny komplikuje równanie różnicowe przepływu ciepła dla powierzchni wsadu. Efekt cieplny reakcji tworzenia zgorzeliny uwzględnia się poprzez modyfikację temperatury ośrodka lub jako powierzchniowe źródło ciepła o znanej mocy [9].

W celu zbadania wpływu powstającej zgorzeliny na rezultaty obliczeń procesu nagrzewania wsadu wykonano analizę porównawczą dla różnych przypad-

ków [10]. Wyniki obliczeniowe różnią się nieznacznie, przy czym czas całkowity, obliczony z uwzględnieniem tworzenia się zgorzeliny jest o około 1% dłuższy, zaś różnice pomiędzy odpowiednimi temperaturami dla końca procesu nie przekraczają kilku stopni. Różnice te podczas procesu są nieco większe, ale nie przekraczają kilkunastu stopni. Charakterystyczny jest mały wpływ warunków nagrzewania na obliczeniową ilość powstałej zgorzeliny. Można stąd wyciągnąć wniosek o dopuszczalności uproszczeń w modelu matematycznym procesów nagrzewania.

4.1. Wyniki przykładowych obliczeń

Dla zilustrowania powyższych wywodów przytoczono poniższe przykłady:

A. Nagrzewanie wlewka o rozmiarach 0,6 x 0,6 x 2,0 m od temperatury otoczenia (t_{ot} = 20°C) w piecu o temperaturze t_g = 1300°C, przy stałym współczynniku wnikania ciepła. Nagrzewanie kończy się, gdy $\Delta t = t_F - t_{os} < 50$ K.

Otrzymano następujące wyniki (w nawiasie dla procesu bez uwzględnienia zgorzeliny); indeksy oznaczają: F - średnia na powierzchni wsadu, v - średnia wlewka, os - średnia osi wlewka)

- czas trwania procesu τ = 310 (306) min
- końcowe temperatury t_F = 1237 (1240)

t_{os} = 1187 (1190) t_v = 1211 (1214) °C

masa zgorzeliny wynosiła 1,02% masy wlewka.

B. Nagrzewanie wlewków w piecu wgłębnym w procesie dwustopniowym

Przyjęto wlewki o rozmiarach 0,88 x 0,99 x 2,31 m (9 sztuk) ze stali niskowęglowej o początkowej temp. 20°C. Nagrzewanie odbywa się w piecu modelowym [4, 7], założono 9 wlewków, temperaturę kontrolną 1320°C oraz końcową różnicę temperatur Δt = 50 K.

Wyniki obliczeń:

czas nagrzewania: τ_g = 544 (536) min,

temperatury: t_F = 1300 (1302); t_v = 1273 (1275);

t_{os} = 1251 (1253) °C;

masa zgorzeliny wynosiła 1,3% masy wsadu.

LITERATURA

[1] Butkowskij A.G., Goldfarb E.M., Heskin E.S.: Izwiestia WTZ Czornaja Metałłurgia Nr 3, 1967, s. 173/177.

[2] Butkowskij A.G., Małyj S.A., Andrejew J.N.: Optimalnoje uprawlenije nagriewom metałła, Metałłurgia, Moskwa 1972.

[3] Tajc N.J. i inni: Izwiestia WTZ Czornaja met., Nr 4, 1974, s.164/167.

[4] Kostowski E.: Energetyka nr 49, 1973, s. 1/104.

[5] Kostowski E.: Minimalne zużycie paliwa podczas nagrzewania metalu (praca przygotowana do druku).

[6] Senkara T.: Obliczenia cieplne pieców grzewczych w hutnictwie żelaza, Śląsk, Katowice 1968.

[7] Kostowski E.: Gas-Wärme-International, 25, 1976, s. 607/610.

[8] Kazancev E.J., Lorang F.: Revue Universelle des Mines. 1964, nr 2, s.11.

[9] Szargut J.: Metody numeryczne w obliczeniach cieplnych pieców przemysłowych, Śląsk, Katowice 1977.

[10] Kostowski E., Stefanik J.: Model matematyczny nagrzewania wlewka z uwzględnieniem procesu tworzenia się zgorzeliny (praca zgłoszona do druku).

НЕКОТОРЫЕ ТЕРМИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ НАГРЕВА МЕТАЛЛА

Р е з ю м е

Даны точное и приблизительное решение для случая нагрева идеального металла с выравненной температурой. Описана возможность термической оптимизации этого процесса в нагревательном колодце и указаны существующие ограничения. Указано влияние окисления металла на результаты тепловых расчётов и приведены результаты примерных расчётов.

SOME THERMAL PROBLEMS OF METAL HEATING OPTIMIZATION

S u m m a r y

A solution for a particular case of heating of ideal furnace charge with equalized temperature and approximate solution for that case are given.

Following problems are also presented:

- possibility of thermal optimization of heating process in soaking pits, pointing out appearing limitations,
- influence of scale formation on the results of heating process calculations.