

Zygmunt KLISIEWICZ

Andrzej MENCEL

Instytut Metalurgii

Politechnika Śląska

MODEL MATEMATYCZNY PROCESU ODAZOTOWANIA  
CIEKŁEGO METALU W PRÓŻNIOWYM PIECU INDUKCYJNYM

**Streszczenie.** Badania nad odazotowaniem ciekłego metalu w próżniowym piecu indukcyjnym umożliwiły ocenę wpływu istotnych czynników technologicznych na obniżenie zawartości azotu w stopie Fe - Ni 42. Opracowano ponadto model matematyczny tego procesu.

## 1. WSTĘP

Obniżenie ciśnienia w procesach wytwarzania stali stanowi jeden ze skutecznych środków oddziaływania na jakość otrzymywanej stali, poprzez usuwanie z niej rozpuszczonych gazów - wodoru, tlenu i azotu (w większości przypadków wpływających ujemnie na własności użytkowe gotowych wyrobów). Brak jest dotychczas wyczerpujących kryteriów teoretycznych i praktycznych, które pozwoliłyby przewidywać efekty i skuteczność odgazowania ciekłej stali w próżni.

W celu znalezienia najbardziej charakterystycznych cech procesu odgazowania, określono model matematyczny odazotowania ciekłego metalu w próżniowym piecu indukcyjnym.

Model ten pozwala na optymalny dobór parametrów technologicznych. Uwzględnia kryteria konstrukcyjne pieca próżniowego, a także bardzo istotny wpływ składu chemicznego na proces odgazowania.

## 2. ANALIZA STATYSTYCZNA PROCESU ODAZOTOWANIA WYTOPÓW W PRÓŻNIOWYM PIECU INDUKCYJNYM

Na podstawie opracowań literaturowych można określić czynniki technologiczne w najbardziej istotny sposób kształtujące stopień odazotowania [1, 2, 3, 4, 5].

W dokonywanych podziałach procesu przechodzenia azotu z ciekłego metalu, poprzez granicę podziału faz, do fazy gazowej za najwolniejszy proces cząstkowy uznaje się stadium dyfuzji oraz za najistotniejszą i decydującą

cą drogę zmniejszenia zawartości azotu zwiększenie powierzchni właściwej podziału faz. Wobec powyższego w prowadzonych wytopach stopu FeNi42 w próżniowym piecu indukcyjnym wyodrębniono parametry, decydujące o odgazowaniu pęcherzykowym.

Do analizy zjawiska odazotowania użyto metody regresji wielokrotnej.

Zmienną zależną - stopień odazotowania - określano w funkcji następujących parametrów: czasu odgazowania, temperatury kąpieli metalowej, ciśnienia w komorze pieca, spadku zawartości węgla w stopie, zmiany zawartości tlenu całkowitego, zawartości początkowej węgla i azotu.

W obliczeniach zastosowano standardowy program do analizy statystycznej XDS2, wprowadzony wraz z macierzą obserwacji danymi z 25 wytopów FeNi42 w próżniowym piecu indukcyjnym VSG-30 do maszyny cyfrowej Odra 1325. Tok obliczeń w programie statystycznym był tak skonstruowany, że wybrano równanie regresji wielokrotnej najlepiej opisujące proces odazotowania. Wyboru dokonano według wartości współczynników cząstkowych korelacji wielokrotnej. Równanie to przedstawia się następująco:

$$\frac{[N_0] - [N]}{[N_0]} \cdot 100\% = 4,12 [\% C_0] + 0,032 [\Delta O] + 0,17 [\% N_0]. \quad (1)$$

W celu znalezienia odpowiedzi na pytanie, w jaki sposób, poprzez parametry sterowalne procesu, nie uwzględnione w równaniu (1), możemy uzyskać najefektywniejsze odazotowanie wykonano serię wytopów Fe armco w piecu VSG-30.

Dla uzyskania matematycznego opisu zjawiska, w postaci liniowego modelu matematycznego, metodą analizy statystycznej należałoby wykonać bardzo dużą liczbę doświadczeń. Aby uniknąć powyższego, zastosowano technikę planowania eksperymentu [6], pozwalającą w planowaniu dwupoziomym przeprowadzić minimalną serię doświadczeń. Dla 3 zmiennych (temperatury kąpieli metalowej, ciśnienia w komorze pieca oraz zmiany zawartości węgla w Fe armco, regulowanej intensywnością gotowania się kąpieli, w zależności od ilości wprowadzonego do komory pieca argonu) plan eksperymentu całkowitego zawiera 8 doświadczeń ( $2^3$ ).

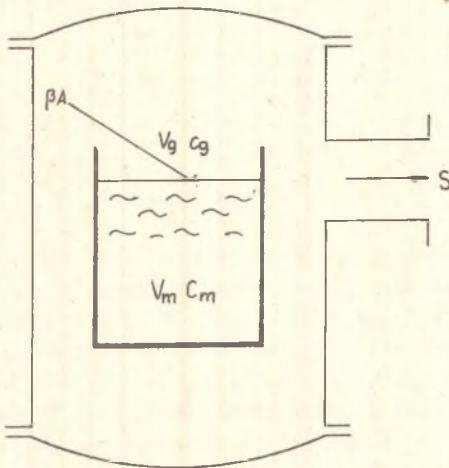
Za pomocą programu XDS2 i maszyny cyfrowej Odra 1325 uzyskano równanie

$$\frac{[N_0] - [N]}{[N_0]} \cdot 100\% = -31,9 + 0,21 [T] - 6,15 [\log p] + 3,93 [\% \Delta C]. \quad (2)$$

W równaniu tym największy stopień odazotowania odpowiada przyrostom temperatury oraz silnym spadkom ciśnienia. Równania (1) i (2) pozwalają na przeprowadzenie procesu rafinacji, przy optymalnie dobranych parametrach.

### 3. SCHEMAT PROCESU ODGAZOWANIA CIEKŁEGO METALU W INDUKCYJNYM PIECU PRÓŻNIOWYM

Skuteczność odgazowania ciekłego metalu zależy nie tylko od założonych parametrów początkowych i końcowych, lecz także od szeregu procesów cząstkowych, które będą określać przebieg procesu odgazowania ciekłej stali w indukcyjnym piecu próżniowym.



Rys. 1. Schemat układu odgazowania ciekłego metalu w indukcyjnym piecu próżniowym

W zbiorniku  $m$ , objętość ciekłego metalu  $V_m$  powierzchni zbiornika  $m$ , a objętość gazu w komorze próżniowej  $V_g$  powierzchni zbiornika  $g$ . Ponadto określono, że opory istniejące podczas procesu odgazowania odpowiadają oporom przepływu cieczy ze zbiornika  $m$  do zbiornika  $g$ .

W oparciu o powyższy przedstawiony model należy określić czas, po jakim w zbiorniku ustali się stężenie rozpuszczonego gazu w kąpielu metalowej  $[c_m]$  przy danym poziomie  $[c_{m0}]$  i  $c_g$  oraz danym przepływie.

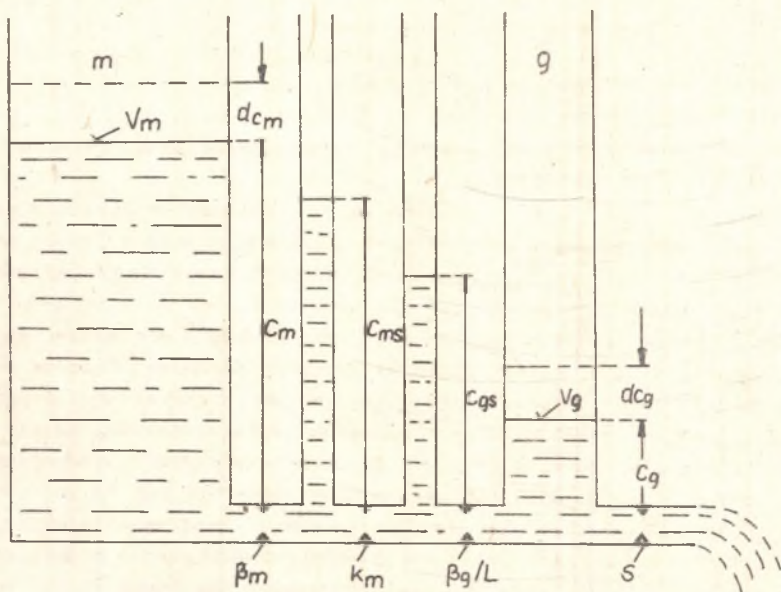
Rozpatrując ubytek rozpuszczonej ilości gazu w wytopie podczas bardzo krótkiego przedziału czasu  $dt$ , otrzymano iloczyn  $V_m \cdot d[c_m]$ . Zmianie  $d[c_m]$  odpowiada w modelu zmiana poziomów.

Opór, który zmiana poziomów musi pokonać, przedstawiono na rys. 2 jako zwężenie przekroju. Powoduje to spadek ciśnienia w złączach pomiędzy zbiornikami  $m$  i  $g$ . Podczas procesu rafinacji ciekłego metalu spadek stężenia zachodzi nierównomiernie. Obrazuje to rys. 3.

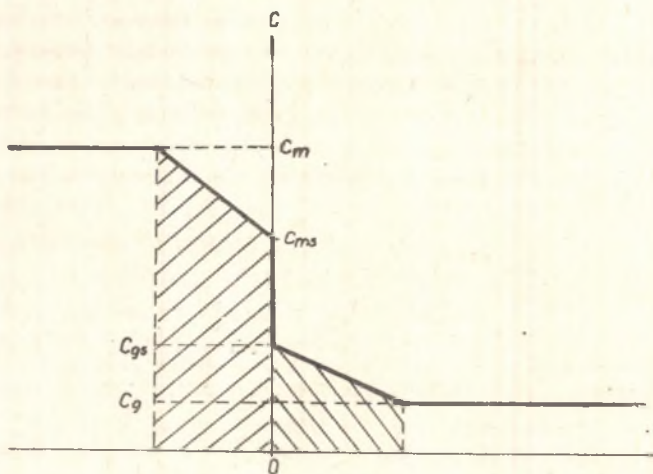
Stężenie  $[c_m]$  w ciekłym metalu jest jednakowe na skutek konwekcyjnego mieszania się metalu. Wewnątrz cienkiej warstwy dyfuzyjnej stężenie spada

Podstawowy układ odgazowania ciekłego metalu w indukcyjnym piecu próżniowym przedstawiono na rysunku 1.

W tyglu pieca indukcyjnego znajduje się ciekły metal  $V_m$ , w którym jest rozpuszczony gaz  $[c_m]$ . Podczas procesu odgazowania w komorze próżniowej o objętości  $V_g$  znajduje się gaz  $[c_g]$ , który jest usuwany przez pompy o wydajności  $S$ . Zakłada się, że podczas procesu odgazowania temperatura ciekłego metalu jest stała, a tygiel wykonany jest z materiału niereagującego z kąpielą metalową. Na rys. 2 przedstawiono hydrodynamiczny model procesu odgazowania, w którym przez analogię stężenia gazu rozpuszczonego w kąpielu  $[c_m]$  odpowiada wysokości słupa cieczy w



Rys. 2. Hydrodynamiczny model procesu odgazowania



Rys. 3. Zmiana stężenia gazu w pobliżu powierzchni granicznej ciekłej metal - faza gazowa

do  $[c_{me}]$ , gdzie po reakcji przejścia gazu przez warstwę graniczną, stężenie produktów reakcji spada do wartości  $\{c_{gs}\}$ , natomiast po stronie gazowej warstwy granicznej do wartości  $\{c_g\}$ .

Zmiana stężenia od wartości  $[c_{ms}]$  do wartości  $\{c_{gs}\}$  obrazuje tworzenie produktów gazowych bezpośrednio na granicy faz.

#### 4. MODEL MATEMATYCZNY PROCESU ODAZOTOWANIA

Jak wynika z poprzednio prowadzonych rozważań, proces rafinacji ciekłej stali pod obniżonym ciśnieniem można podzielić na pojedyncze etapy [7, 8], które ujęto w następujący schemat:

$$\begin{aligned}
 [N] \frac{A \cdot \beta_m \cdot [N] \cdot dt}{-A \cdot \beta_m [N_g] \cdot dt} [N_g] \frac{A \cdot k_m \cdot \{N_s\} \cdot dt}{A \cdot k_g \cdot \{N_s\} \cdot dt} \{N_s\} \\
 \{N_s\} \frac{A \cdot \beta_g \cdot \{N_s\} \cdot dt}{-A \cdot \beta_g \cdot [N] \cdot dt} [N]
 \end{aligned} \quad (3)$$

Pierwszym etapem są procesy przenoszenia rozpuszczonych gazów o stężeniu  $[N]$ , wewnątrz wytopu, do stężenia  $[N_g]$  w granicznej warstwie fazowej i odwrotnie. W przedziale czasu  $dt$  ze stężenia  $[N]$  przenosi się ilość składników proporcjonalną do stężenia  $[N]$  i wielkości powierzchni granicznej  $A$ . W tym samym przedziale czasu w odwrotnym kierunku przenoszona ilość gazu jest proporcjonalna do stężenia  $[N_g]$  i wielkości  $A$  powierzchni warstwy granicznej. Wielkość  $\beta_m$  jest współczynnikiem przenoszenia gazu w objętości wytopu. Aby szybkość przenoszenia gazu w obu kierunkach była jednakowa, współczynnik  $\beta$  jest dla obu tych kierunków ten sam.

Różnica przenoszonych ilości gazu w obu kierunkach, w przedziale czasu  $dt$ , jest równa odebranej z wytopu ilości rozpuszczonego gazu  $V_m \cdot d[N]$ . Stąd można napisać

$$V_m \cdot d[N] = A \cdot \beta_m ([N] - [N_g])dt. \quad (4)$$

W ten sam sposób można przedstawić następny etap - przenoszenie powstających produktów reakcji z warstwy granicznej do fazy gazowej

$$- V_m \cdot d[N] = A \cdot \beta_g (\{N_s\} - [N])dt. \quad (5)$$

Kolejny etap - reakcje adsorpcji i desorpcji można przedstawić następująco

$$- V_m \cdot d[N] = A(k_m [N_g] - k_g \cdot \{N_s\})dt. \quad (6)$$

Przy tych reakcjach współczynnik proporcjonalności  $k$  nie jest jednakowy ponieważ wykonuje dla każdego kierunku inną wartość. W przypadku hetero-

genicznej równowagi gazowej zmiana zawartości gazu w wytopie  $V_m \cdot d[N] = 0$ . Wtedy szybkość reakcji w obu kierunkach jest jednakowa.

W przypadku równowagi możemy zapisać następującą proporcję współczynników

$$\frac{k_g}{k_m} = \frac{[N_s]}{[N_s]} \quad (7)$$

Prawa strona równania (7) jest określana jako współczynnik rozpuszczalności Ostwalda

$$L = \left( \frac{[N_s]}{[N_s]} \right) \text{ równowaga.} \quad (8)$$

Przy niezbyt wielkich odchyleniach od stanu równowagi można napisać

$$\frac{k_g}{k_m} = L. \quad (9)$$

Eliminując stężenia  $[N_s]$  i  $\{N_s\}$  z równań (4, 5, 6) otrzymujemy

$$-V_m \cdot d[N] = A \cdot \beta \cdot ([N] - L \cdot \{N\}) \cdot dt. \quad (10)$$

W przypadkach ogólnych, w których interesują nas wszystkie czynniki mające wpływ na odazotowanie, stężenie  $\{N\}$  w zbiorniku indukcyjnego pieca próżniowego zależy nie tylko od wydzielania azotu z wytopu, lecz także od wydajności ssącej pomp pieca oraz objętości jego komory.

Wydajność ssąca pomp jest wprawdzie zależna od ciśnienia panującego w danym momencie procesu w komorze próżniowego pieca indukcyjnego; jednak przy zastosowanych uproszczeniach obliczeń przyjęto ją za stałą.

Ilość gazu w komorze pieca będzie równa

$$-V_m \cdot d[N] = S \cdot \{N\} \cdot dt - V_g \cdot \{N\}. \quad (11)$$

W połączeniu z równaniem (8) otrzymano układ równań różniczkowych, które zawierają jako zmienne tylko  $[N]$ ,  $\{N\}$  i  $t$ .

Różniczkową postać przebiegu zmian stężeń pokazano na schemacie (równania 12-29).

Schemat procesu odazotowania ciekłej stali w próżniowym piecu indukcyjnym

$$V_m \cdot [N] \frac{\beta \cdot A ([N] - L \cdot \{N\})}{\quad} \quad V_g \cdot \{N\} \frac{S \cdot \{N\}}{\quad} \quad (12)$$

ciekły metal

komora próżniowa

$$-V_m \cdot d[N] = \beta \cdot A([N] - L \cdot \{N\})dt = V_g \cdot \{N\} + S \cdot \{N\} \cdot dt$$

zmniejszenie stężenia azotu w ciekłym metalu      ilość azotu wydzielonego z ciekłego metalu podczas odgazowania      ilość azotu w komorze tego przez pompy próżniowe

(13)

Eliminując  $[N]$  z układu równań, otrzymano:

$$\frac{d^2 \{N\}}{dt^2} + \left( \frac{\beta \cdot A}{V_m} + \frac{S}{V_g} + \frac{\beta \cdot A \cdot L}{V_g} \right) \frac{d\{N\}}{dt} + \left( \frac{S \cdot \beta \cdot A}{V_m \cdot V_g} \right) \{N\} = 0. \quad (14)$$

Eliminując  $\{N\}$ , otrzymano

$$\frac{d^2 [N]}{dt^2} + \left( \frac{\beta \cdot A}{V_m} + \frac{\beta \cdot A \cdot L}{V_g} + \frac{S}{V_g} \right) \frac{d[N]}{dt} + \left( \frac{\beta \cdot A}{V_m} \right) [N] = 0. \quad (15)$$

Rozwiązanie:

$$[N] = C_1 \cdot \exp(k_1 \cdot t) + C_2 \cdot \exp(k_2 \cdot t), \quad (16)$$

$$\{N\} = C_3 \cdot \exp(k_1 \cdot t) + C_4 \cdot \exp(k_2 \cdot t), \quad (17)$$

$$k_1 = -\frac{1}{2} \left[ \frac{\beta \cdot A}{V_m} + \frac{\beta \cdot A \cdot L}{V_g} + \frac{S}{V_g} + \sqrt{\left( \frac{\beta \cdot A}{V_m} + \frac{\beta \cdot A \cdot L}{V_g} + \frac{S}{V_g} \right)^2 - 4 \left( \frac{\beta \cdot A \cdot S}{V_m \cdot V_g} \right)} \right] \quad (18)$$

$$k_2 = -\frac{1}{2} \left[ \frac{\beta \cdot A}{V_m} + \frac{\beta \cdot A \cdot L}{V_g} + \frac{S}{V_g} - \sqrt{\left( \frac{\beta \cdot A}{V_m} + \frac{\beta \cdot A \cdot L}{V_g} + \frac{S}{V_g} \right)^2 - 4 \left( \frac{\beta \cdot A \cdot S}{V_m \cdot V_g} \right)} \right] \quad (19)$$

$$C_1 = -[N] \cdot \left[ -k_2 - (1 - L \cdot \{N\} / [N_0]) \cdot \beta \cdot A / V_m \right] / (k_2 - k_1), \quad (20)$$

$$C_2 = [N_0] \cdot \left[ -k_1 - (1 - L \cdot \{N_0\} / [N_0]) \cdot \beta \cdot A / V_m \right] / (k_2 - k_1), \quad (21)$$

$$C_3 = -\{N_0\} \cdot \left[ -k_2 + ([N_0] / \{N_0\}) - L - S / \beta \cdot A \right] \cdot \beta \cdot A / V_g / (k_2 - k_1), \quad (22)$$

$$C_4 = \{N_o\} \cdot \left[ -k_1 + \left( \frac{[N_o]}{\{N_o\}} - L - S/\beta \cdot A \right) \cdot \beta \cdot A/V_g \right] / (k_2 - k_1). \quad (23)$$

Przybliżone rozwiązanie dla warunków  $L \ll \frac{S}{\beta \cdot A} \gg \frac{V_g}{V_m}$

$$k_1 = -S/V_g \quad (24)$$

$$k_2 = -\beta \cdot A/V_m \quad (25)$$

$$C_1 = 0 \quad (26)$$

$$C_2 = [N_o] \quad (27)$$

$$C_3 = \{N_o\} - [N_o] \cdot \beta \cdot A/S \quad (28)$$

$$C_4 = [N_o] \cdot \beta \cdot A/S \quad (29)$$

Rozwiązując równanie różniczkowano je po czasie, eliminując wszystkie człony zawierające  $[N]$  i  $\{N\}$ , otrzymując liniowe jednorodne równania II stopnia ze stałymi współczynnikami.

Stałe  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  i  $C_4$  określono z warunków początkowych. Dla molowego stężenia ciekłego metalu  $[N]$  i molowego stężenia w przetrzeniu nad metalem  $\{N\}$  oraz czasu  $t = 0$  otrzymano równania od (18) do (23). Przy zastosowaniu tych równań można obliczyć przebieg zmian stężenia i ciśnienia podczas procesu odgazowania.

Przybliżone obliczanie tych równań pozwala na uzyskanie zależności wyrażonych przez równania (24) i (29). Są one podobne do opisanych wcześniej - pod warunkiem, że szybkość odgazowania jest określana jedynie przez wymianę mas a nie przez szybkość odpompowywania.

Na rys. 4 przedstawiono obliczone krzywe przebiegu odazotowania, przy zmiennych pozostałych parametrach procesu. Dla wszystkich krzywych, gdzie  $t = 0$ , stężenie azotu w wytopie  $[N] = [N_o]$  a stężenie w fazie gazowej  $\{N\} = 0$ . Przypadek graniczny określono krzywą "a" odpowiadającą  $S \rightarrow \infty$  i  $\{N\} = 0$ . Przypadek ten określa równanie (30)

$$[N] = [N_o] \cdot \exp(-t \cdot \beta \cdot A/V_m). \quad (30)$$

Zależność czasową przedstawiono jako stosunek czasu trwania procesu odgazowania do czasu stałej wymiany masy. Odpowiada to stosunkowi objętości metalu do iloczynu współczynnika wymiany masy razy powierzchnia metalu. Dwa bezwymiarowe parametry, od których zależy przebieg odgazowania,



$$-V_m \cdot d[N] = \beta \cdot A([N] - L \cdot \{N\})dt = V_g \cdot \{N\} + S \cdot \{N\} \cdot dt$$

zmniejszenie stężenia azotu w ciekłym metalu      ilość azotu wydzielonego z ciekłego metalu podczas odgazowania      ilość azotu w komórce      ilość azotu usuniętego przez pompy próżniowe

(13)

Eliminując  $[N]$  z układu równań, otrzymano:

$$\frac{d^2 \{N\}}{dt^2} + \left( \frac{\beta \cdot A}{V_m} + \frac{S}{V_g} + \frac{\beta \cdot A \cdot L}{V_g} \right) \frac{d\{N\}}{dt} + \left( \frac{S}{V_m} \cdot \frac{\beta \cdot A}{V_g} \right) \{N\} = 0. \quad (14)$$

Eliminując  $\{N\}$ , otrzymano

$$\frac{d^2 [N]}{dt^2} + \left( \frac{\beta \cdot A}{V_m} + \frac{\beta \cdot A \cdot L}{V_g} + \frac{S}{V_g} \right) \frac{d[N]}{dt} + \left( \frac{\beta \cdot A}{V_m} \right) [N] = 0. \quad (15)$$

Rozwiązanie:

$$[N] = C_1 \cdot \exp(k_1 \cdot t) + C_2 \cdot \exp(k_2 \cdot t), \quad (16)$$

$$\{N\} = C_3 \cdot \exp(k_1 \cdot t) + C_4 \cdot \exp(k_2 \cdot t), \quad (17)$$

$$k_1 = -\frac{1}{2} \left[ \frac{\beta \cdot A}{V_m} + \frac{\beta \cdot A \cdot L}{V_g} + \frac{S}{V_g} + \sqrt{\left( \frac{\beta \cdot A}{V_m} + \frac{\beta \cdot A \cdot L}{V_g} + \frac{S}{V_g} \right)^2 - 4 \left( \frac{\beta \cdot A}{V_m} \cdot \frac{S}{V_g} \right)} \right] \quad (18)$$

$$k_2 = -\frac{1}{2} \left[ \frac{\beta \cdot A}{V_m} + \frac{\beta \cdot A \cdot L}{V_g} + \frac{S}{V_g} - \sqrt{\left( \frac{\beta \cdot A}{V_m} + \frac{\beta \cdot A \cdot L}{V_g} + \frac{S}{V_g} \right)^2 - 4 \left( \frac{\beta \cdot A}{V_m} \cdot \frac{S}{V_g} \right)} \right] \quad (19)$$

$$C_1 = -[N] \cdot \left[ -k_2 - (1 - L \cdot \{N\} / [N_0]) \cdot \beta \cdot A / V_m \right] / (k_2 - k_1), \quad (20)$$

$$C_2 = [N_0] \cdot \left[ -k_1 - (1 - L \cdot \{N\} / [N_0]) \cdot \beta \cdot A / V_m \right] / (k_2 - k_1), \quad (21)$$

$$C_3 = -\{N_0\} \cdot \left[ -k_2 + ([N_0] / \{N_0\}) - L - S / \beta \cdot A \right] \cdot \beta \cdot A / V_g / (k_2 - k_1), \quad (22)$$

$$C_4 = \{N_0\} \cdot \left[ -k_1 + \left( \frac{[N_0]}{\{N_0\}} - L - S/\beta \cdot A \right) : \beta \cdot A/V_g \right] / (k_2 - k_1). \quad (23)$$

Przybliżone rozwiązanie dla warunków  $L \ll \frac{S}{\beta \cdot A} \gg \frac{V_g}{V_m}$

$$k_1 = -S/V_g \quad (24)$$

$$k_2 = -\beta \cdot A/V_m \quad (25)$$

$$C_1 = 0 \quad (26)$$

$$C_2 = [N_0] \quad (27)$$

$$C_3 = \{N_0\} - [N_0] \cdot \beta \cdot A/S \quad (28)$$

$$C_4 = [N_0] \cdot \beta \cdot A/S \quad (29)$$

Rozwiązując równanie różniczkowano je po czasie, eliminując wszystkie człony zawierające  $[N]$  i  $\{N\}$ , otrzymując liniowe jednorodne równania II stopnia ze stałymi współczynnikami.

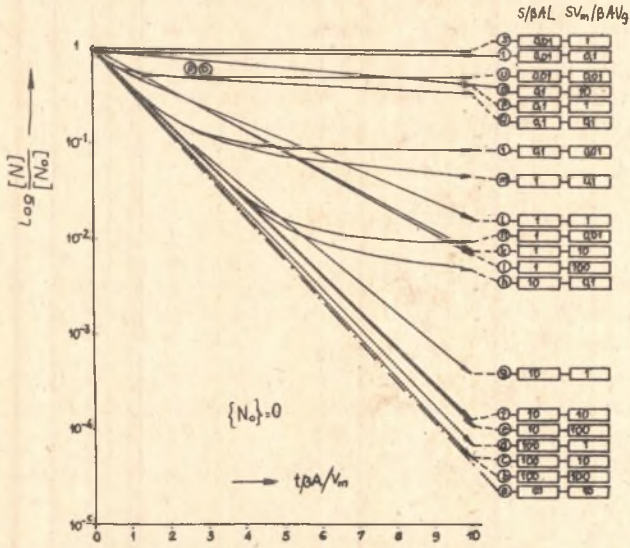
Stałe  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  i  $C_4$  określono z warunków początkowych. Dla molowego stężenia ciekłego metalu  $[N]$  i molowego stężenia w przetrzeniu nad metalem  $\{N\}$  oraz czasu  $t = 0$  otrzymano równania od (18) do (23). Przy zastosowaniu tych równań można obliczyć przebieg zmian stężenia i ciśnienia podczas procesu odgazowania.

Przybliżone obliczanie tych równań pozwala na uzyskanie zależności wyrażonych przez równania (24) i (29). Są one podobne do opisanych wcześniej - pod warunkiem, że szybkość odgazowania jest określana jedynie przez wymianę masy a nie przez szybkość odpompowywania.

Na rys. 4 przedstawiono obliczone krzywe przebiegu odazotowania, przy zmiennych pozostałych parametrach procesu. Dla wszystkich krzywych, gdzie  $t = 0$ , stężenie azotu w wytopie  $[N] = [N_0]$  a stężenie w fazie gazowej  $\{N\} = 0$ . Przypadek graniczny określono krzywą "a" odpowiadającą  $S \rightarrow \infty \{N\} = 0$ . Przypadek ten określa równanie (30)

$$[N] = [N_0] \cdot \exp(-t \cdot \beta \cdot A/V_m). \quad (30)$$

Zależność czasową przedstawiono jako stosunek czasu trwania procesu odgazowania do czasu stałej wymiany masy. Odpowiada to stosunkowi objętości metalu do iloczynu współczynnika wymiany masy razy powierzchnia metalu. Dwa bezwymiarowe parametry, od których zależy przebieg odgazowania,



Rys. 4. Zależność zawartości azotu od czasu odgazowania

zaznaczono po prawej stronie rys. 4. Jeden stanowi stosunek (S/β . AL), a drugi (S . V<sub>m</sub>/β . A . V<sub>g</sub>).

Gdy wartość tych parametrów zbliża się do ∞ otrzymuje się idealny przebieg procesu odgazowania. Po podstawieniu do tych dwu parametrów różnych wartości, wynikających z czynników konstrukcyjnych i technologicznych, otrzymano cały pęk krzywych opisujących cały zakres zmian parametrów odazotowania.

Z przebiegu krzywych na rys. 4 wynika, że dla przeprowadzenia efektywnego odgazowania muszą być spełnione następujące warunki:

$$t \cdot \beta \cdot A/V_m \gg 1. \tag{31}$$

Miarą tego warunku jest możliwie duży okres odgazowania w porównaniu z ilorazem V<sub>m</sub>/β . A, odpowiadający w przybliżeniu średniemu czasowi przebywania gazu w kąpielii,

$$S \cdot V_m/\beta \cdot A \cdot V_g \gg 1. \tag{32}$$

Iloraz V<sub>m</sub>/β . A musi być większy w porównaniu z ilorazem V<sub>g</sub>/S, który oznacza średni czas przebywania gazu w przestrzeni komory pieca,

$$S/\beta \cdot A \cdot L \gg 1. \tag{33}$$

Stosunek  $S/\beta$ . A musi być dużo więkzezy od współczynnika rozpuszczalności L. Powyższe warunki oznaczają, że układ jest oddalony od stanu równowagi.

Parametry A,  $V_m$ ,  $V_g$  i S są znane i mogą być swobodnie dobierane w ramach możliwości konstrukcyjnych. Natomiast parametry L i  $\beta$  są zależne od składu chemicznego kąpieli metalowej.

## 5. OMÓWIENIE WYNIKÓW I WNIOSKI

Przyjęta technologia rafinacji ciekłego metalu w próżniowym piecu indukcyjnym pozwoliła na wyodrębnienie zależności, mających istotny wpływ na stopień odazotowania.

Przeprowadzona analiza statystyczna doprowadziła do ilościowego scharakteryzowania czynników technologicznych, które opisano równaniami regresji wielokrotnej.

Z przeprowadzonych rozważań teoretycznych i praktycznych badań wynika:

- opisany model matematyczny procesu odazotowania pozwala, po spełnieniu pewnych warunków (wyrażonymi bezwymiarowymi parametrami  $(S/\beta \cdot A \cdot L)$  i  $(S \cdot V_m/\beta \cdot A \cdot V_g)$ ) na uzyskanie idealnego przebiegu procesu rafinacji w próżniowym piecu indukcyjnym,
- uzyskane wyniki praktyczne są zgodne z rozpatrywanym modelem matematycznym, który sprawdzono w warunkach posiadanego, próżniowego pieca indukcyjnego VSG-30,
- z otrzymanego równania regresji dla wytopów FeNi42 wynika silna zależność stopnia odazotowania od ilości powstających pęcherzyków CO (jest to wyrażane zmianą zawartości tlenu i węgla w czasie odgazowania),
- zaplanowanie ekperymentu odazotowania żelaza armco pozwoliło, również w postaci równania regresji, na znalezienie optymalnych parametrów procesu rafinacji (temperatury kąpieli i ciśnienia w komorze próżniowej) w próżniowym piecu indukcyjnym VSG-30.

## 6. UŻYWANE OZNACZENIA

- A - powierzchnia odgazowania  $[\text{cm}^2]$ .
- $[N]$  - stężenie azotu w ciekłej stali [ppm].
- $\left. \begin{matrix} [c_g] \\ [c_{gs}] \end{matrix} \right\}$  - stężenie składnika w fazie gazowej nad kąpielą metalową  $[\text{mol}/\text{cm}^3]$ .
- $[c_m]$  - stężenie rozpuszczonego składnika w ciekłej fazie metalowej  $[\text{mol}/\text{cm}^3]$ .
- $[c_{ms}]$  - stężenie rozpuszczonego składnika w granicznej warstwie fazy ciekłej  $[\text{mol}/\text{cm}^3]$ .
- $[c_{m0}]$  - stężenie początkowe rozpuszczonego składnika w ciekłej fazie metalowej  $[\text{mol}/\text{cm}^3]$ .

- $k_g$  - stała szybkość przenoszenia [cm/s].  
 $k_m$  - stała szybkość tworzenia gazu [cm/s].  
 $L$  - współczynnik rozpuszczalności Ostwalda.  
 $p$  - ciśnienie cząstkowe [at].  
 $S$  - wydajność pomp próżniowych [cm<sup>3</sup>/s].  
 $T$  - temperatura [K].  
 $t$  - czas odgazowania [s].  
 $\beta$  - współczynnik przenoszenia [cm/s].  
 $V_g$  - objętość komory próżniowego pieca indukcyjnego [cm<sup>3</sup>].  
 $V_m$  - objętość ciekłego metalu [cm<sup>3</sup>].

## LITERATURA

- [1] Klisiewicz Z.: Aspekty teoretyczne i praktyczne odwodorowania ciekłej stali w próżni. Hutnik nr 12, 1975, ss. 533-584, Hutnik nr 9, 1976, ss. 359-365.
- [2] Brazoduro L.: Poll. Tech. Finsider, 1974, nr 324, ss. 116-126.
- [3] Wahlster M.: Stahl u. Eisen 1972, nr 20, ss. 961-972.
- [4] Linczewski B.W.: Wakumacja indukcyjnaja pławka. Moskwa 1975.
- [5] Pehlke R., Elliotte J.: Trans. AIME, 1963, ss. 227, nr 4, ss. 545-558.
- [6] Mańczak K.: Technika planowania eksperymentu. Warezawa 1978.
- [7] Kraus T.: Podstawy teoretyczne próżniowego przetapiania (cz. I). Neue Hutte, r. 17, zeszyt 10, 1972, ss. 581-585.
- [8] Kraus T., Winkler O.: Requiriments for high-rate vacuum degassing od metal melts. High rate vacuum degas, ss. 44-49.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ДЕАЗОТИРОВАНИЯ ЖИДКОГО  
МЕТАЛЛА В ВАКУУМНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ

## Р е з ю м е

В статье излагаются исследования деазотирования жидкого металла в вакуумной индукционной печи, которые дают возможность оценки влияния существенных технологических факторов на снижение содержания азота в сплаве Fe-Ni 42. Кроме того приводится разработанную математическую модель этого процесса.

THE MATHEMATICAL MODEL OF THE LIQUID METAL DENITRIDIZING  
PROCESS PERFORMED IN THE VACUUM INDUCTION FURNACE

S u m m a r y

The research on the liquid metal denitridizing process performed in the vacuum induction furnace enabled the estimation of the influence of the essential technological factors upon lowering the nitride content in the Fe-Ni 42 alloy. Moreover, the mathematical model of this process has been worked out.