

Materiały 11. Konferencji
Informatyka w Technologii Metali

*KomPlasTech2004
Zakopane
11-14 stycznia 2004*

Optymalizacja procesów odlewania ciągłego i walcowania taśm w walcach-krystalizatorach

P. Sewastjanow¹, L. Dymowa²

¹Politechnika Częstochowska

²Politechnika Częstochowska

The optimization of continuous casting process combined with hot rolling in the roller-type crystallizers

Abstract

The process of combined continuous casting and hot rolling in the roller-type crystallizers makes it possible to get the thin metal bars without traditionally used disjoined process of casting, heating and rolling.

This integrated process is of perennial interest during last two decades because of its economical and ecological advantages. The issue of the day is the choice the optimal parameters of equipment used in such process simultaneously with optimization of technology. In the paper the method for deciding of this problem based on the synthesis of fuzzy sets theory and multiple objective optimization is proposed.

Słowa kluczowe: walczy-krystalizatory, optymalizacja wielokryterialna

WSTĘP

Proces technologiczny odlewania ciągłego i walcowania w walcach-krystalizatorach pozwala otrzymywać cienkie taśmy metalowe bez tradycyjnych

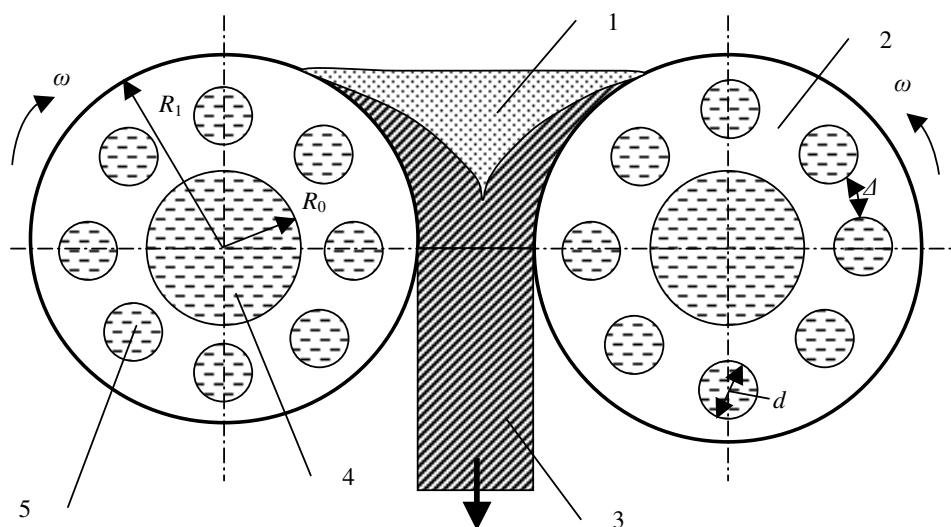
operacji odlewania, a następnie nagrzewania w piecu gorących lub chłodnych wlewków oraz ich walcowania. Dzieje się to dzięki połączeniu w jeden zespół technologiczny procesów odlewania (strefa krzepnięcia) i plastycznej deformacji wlewków (strefa odkształcania). Ekonomiczność i

ekologiczność rozważanego procesu odlewania ciągłego z jednoczesnym walcowaniem, w porównaniu z tradycyjnymi procesami technologicznymi, decydują o rosnącym zainteresowaniu tym nowym procesem [1,2].

Najważniejszymi i konstrukcyjnie najbardziej skomplikowanymi elementami urządzeń do jednoczesnego odlewania ciągłego i walcowania są walcokryształatory. Zapewniają one odprowadzanie ciepła z odlewu oraz określają charakter deformacji w strefie

odkształceń. Prędkość obrotu walców-kryształatorów bezpośrednio wpływa na wydajność procesu. Wymienione parametry decydują o aktualności zagadnienia doboru optymalnego reżymu pracy walców-kryształatorów z jednoczesną optymalizacją ich konstrukcji.

Rysunek 1 przedstawia schemat technologiczny procesu odlewania ciągłego z jednoczesnym walcowaniem w walcach-kryształatorach stopów miedzi i niektórych soli (np. chlorku miedzi).



Rys. 1. Schemat technologiczny procesu odlewania ciągłego z jednoczesnym walcowaniem w walcach-kryształatorach stopów miedzi i niektórych soli: 1 – faza ciekła, 2 – walec, 3 – taśma, 4 – otwór centralny, 5 – otwór dodatkowy.

ZAGADNIENIE OPTIMALIZACJI

Zagadnienie wielokryterialnej optymalizacji rozwiązywano z

wykorzystaniem metod teorii zbiorów rozmytych [3,4]. W tym celu opracowany został pakiet programów komputerowych, opracowany przez autorów, w którego skład weszły następujące moduły:

1. Model matematyczny procesów cieplnych w odlewie i w walcach-krystalizatorach. Do obliczenia pól temperatur stosuje się metodę różnic skończonych.

2. **Model matematyczny naprężeń w walcach-krystalizatorach.** Do obliczenia pól naprężeń stosuje się metodę elementów skończonych.

3. **Analiza regresyjna danych otrzymanych z eksperymentów numerycznych.**

Ponieważ wykorzystanie modeli wymienionych w punktach 1 i 2 do rozwiązywania zadań optymalizacji związane jest ze zbyt dużymi nakładami czasu pracy komputera, zastosowano podejście dwuetapowe. Najpierw przeprowadzono serię eksperymentów numerycznych na modelach matematycznych z wykorzystaniem metod planowania eksperymentu. Następnie wyniki eksperymentów obrabiano według metody opracowanej przez Sevastianova i Tumanova [5], która wykorzystując idee analizy regresyjnej prowadzi do otrzymania modeli nieliniowych.

4. **Współczynniki względnej ważności.**

Ilościowe oceny współczynników względnej ważności otrzymano na podstawie macierzy parzystych lingwistycznych porównań ważności lokalnych kryteriów i ograniczeń zgodnie z metodą opracowaną przez Chu, Kalaba, Springarna [6].

5. **Funkcje użyteczności.** Dla formalizacji lokalnych kryteriów i ograniczeń używano funkcji użyteczności, wzrastających od zera do

jedności przy zmianie parametru jakości w zakresie od wartości niedopuszczalnych do wartości pożądanых (najlepszych).

6. Optymalizacja kryterium globalnego.

Jakość procesu odlewania ciągłego z jednoczesnym walcowaniem oszacowana została według następujących kryteriów lokalnych:

D – rozszerzenie cieplne średnicy walca, które wpływa na grubość gotowej taśmy;

T – temperatura powierzchni walca przy wejściu do strefy nagrzewania, która określa jakość powierzchni taśmy;

N – liczba obrotów walca liczona od momentu początku odlewania do osiągnięcia stacjonarnego reżymu pracy;

Sterującymi parametrami technologicznymi procesu są:

$V = \omega R_1$ – prędkość walcowania;

G – zużycie wody chłodzącej;

Zmienne parametry konstrukcyjne to:

R_0 – promień otworu centralnego;

R_1 – promień walca;

d – średnicy otworów dodatkowych;

Δ – odstępy między otworami dodatkowymi.

Redukcja modeli, zawartych w modułach 1 i 2, po obróbce regresyjnej danych eksperymentu numerycznego, wykonanej za pomocą modułu 3, doprowadziła do otrzymania trzech wielomianów nieliniowych:

$$T = f_T(R_0, R_1, d, \Delta/d, V, G),$$

$$D = f_D(R_0, R_1, d, \Delta/d, V, G),$$

$$N = f_N(R_0, R_1, d, \Delta/d, V, G) \quad (1)$$

Funkcje użyteczności kryteriów jakości lokalnych przedstawiono na rysunku 2. Funkcje użyteczności mają oczywisty sens fizyczny. Funkcja użyteczności prędkości walcowania μ_V (rys. 2a) rośnie wraz ze wzrostem V , ponieważ im większa jest prędkość walcowania, tym większa staje się wydajność procesu. Funkcja użyteczności zużycia wody chłodzącej μ_G (rys. 2b) spada wraz ze wzrostem G , ponieważ zwiększenie zużycia wody nie jest pożądane. Gwałtowny spadek funkcji użyteczności rozszerzenia cieplnego średnicy walca μ_D (rys. 2c), w wąskim obszarze D , wynika z ograniczeń technologicznych narzuconych na grubość gotowej taśmy. Funkcja użyteczności temperatury powierzchni walca przy wejściu do strefy nagrzewania μ_T (rys. 2d) określona została na podstawie danych otrzymanych podczas badania możliwości przylepiania się materiału taśmy do walców przy powiększeniu T .

Oprócz opisanych funkcji użyteczności brano również pod uwagę ograniczenia narzucone na wymiary elementów konstrukcji:

$$\mu_{R_0}, \mu_{R_1}, \mu_d, \mu_{\Delta/d},$$

powiązanych z możliwością wytwarzania i wytrzymałością konstrukcji, oraz kryterium związanym z otrzymaniem taśmy o pożądanej jakości μ_N . Współczynniki względnej ważności kryteriów i ograniczeń, otrzymane w module 4 przedstawione są w tablicy 1.

Do rozwiązywania zagadnienia optymalizacji używano trzech sposobów agregacji kryteriów lokalnych [7,8]: maksymalnego pesymizmu (2), addytywnego (3) oraz multiplikatywnego (4):

$$D_1 = \min \{ \mu(x_1)^{\alpha_1}, \mu(x_2)^{\alpha_2}, \dots, \mu(x_N)^{\alpha_N} \} \quad (2)$$

$$D_2 = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i \mu(x_i)}{N}, \quad (3)$$

$$D_3 = \prod_{i=1}^N \mu(x_i)^{\alpha_i} \quad (4)$$

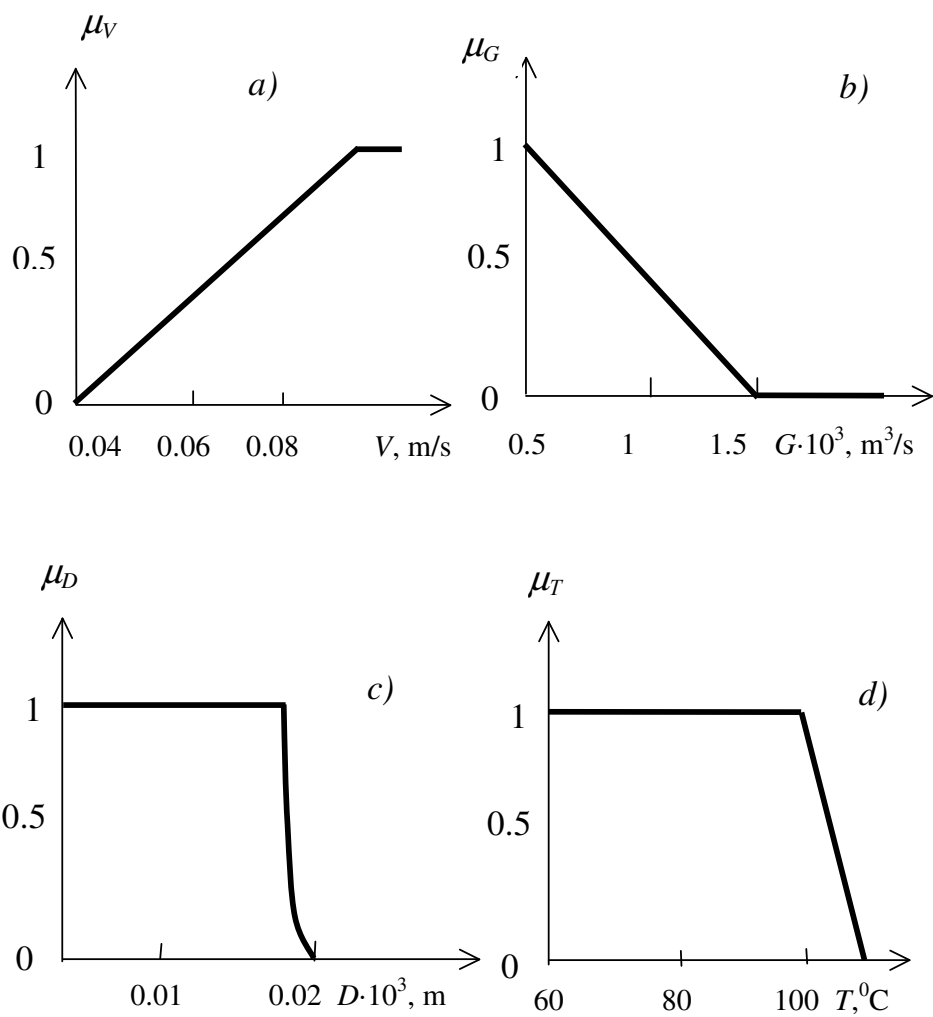
gdzie $X = (x_1, \dots, x_k)$ - wektor parametrów jakości.

Zgodnie z wynikami badań teoretycznych przeprowadzonych przez Sevastianova i Tumanova [5], kryterium globalne maksymalnego pesymizmu (2) przedstawiono w postaci

$$D_1(R_0, R_1, d, \Delta/d, V, G) = \min(\mu_{R_0}^{\alpha_1}(R_0), \mu_{R_1}^{\alpha_2}(R_1), \mu_d^{\alpha_3}(d), \mu_{\Delta/d}^{\alpha_4}(\Delta/d), \mu_G^{\alpha_5}(G), \mu_V^{\alpha_6}(V), \mu_T^{\alpha_7}(T(R_0, R_1, d, \Delta/d, V, G)), \mu_D^{\alpha_8}(D(R_0, R_1, d, \Delta/d, V, G)), \mu_N^{\alpha_9}(N(R_0, R_1, d, \Delta/d, V, G))). \quad (5)$$

W taki samy sposób przedstawione zostały kryteria globalne $D_2(R_0, R_1, d, \Delta/d, V, G)$ i $D_3(R_0, R_1, d, \Delta/d, V, G)$, jako funkcje sześciu zmiennych.

W rozwiązywaniu zadania optymalizacji użyto metody kwadratowej aproksymacji krokowej, opracowanej przez Sevastianova i Tumanova [5].



Rys. 2. Funkcje użyteczności kryteriów jakości lokalnych.

Tablica 1. Współczynniki względnej ważności kryteriów i ograniczeń

Wskaźnik jakości	R_1	R_0	G	V	d	Δ/d	T	D	N
Oznaczenie współczynnika względnej ważności	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9
Wartość współczynnika względnej ważności	0.45	0.34	0.40	0.45	0.39	0.38	0.89	5.25	0.45

WYNIKI WIELOKRYTERIALNEJ OPTYMALIZACJI

W tablicy 2 przedstawiono wyniki rozwiązania zadania optymalizacji.

Przedstawiono wartości lokalnych kryteriów jakości w punktach optimum dla trzech sposobów agregacji kryteriów lokalnych (2)-(4), tzn. w punktach, w których kryteria globalne D_1 , D_2 i D_3 mają największe z możliwych wartości.

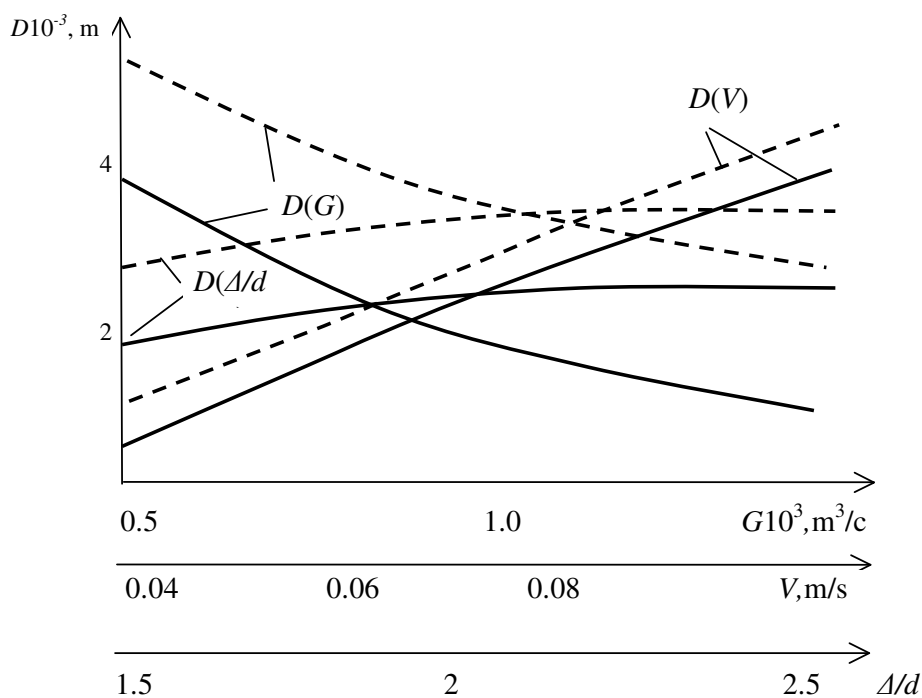
Tablica 2. Wartości lokalnych kryteriów jakości w punktach optimum

Wskaźnik jakości	μ_{R_1}	μ_{R_0}	μ_G	μ_V	μ_d	$\mu_{\Delta/d}$	μ_T	μ_D	μ_N
Wartości lokalnych kryteriów jakości w punktach optimum D_1	0.75	0.87	0.36	0.40	1	0.73	1	1	0.57
Wartości lokalnych kryteriów jakości w punktach optimum D_2	1	1	0.35	0.28	0.75	1	1	1	0.65
Wartości lokalnych kryteriów jakości w punktach optimum D_3	1	1	0.36	0.44	0.99	0.99	1	1	0.57

Na podstawie wyników optymalizacji, przedstawionych w tablicy 2, można wywnioskować, że wykorzystanie wszystkich trzech wzorów (2)-(4) dla kryteriów globalnych D_1 , D_2 i D_3 daje prawie takie same wartości kryteriów lokalnych i zapewnia jednakowe spełnienie najważniejszych kryteriów jakości μ_T i μ_D . Najlepszym, biorąc pod uwagę pozostałe

lokalne kryteria jakości (z punktu widzenia reszty lokalnych kryteriów jakości), jest globalne kryterium multiplikatywne D_3 .

Na rysunku 3 przedstawiono zależność rozszerzenia cieplnego walca D od niezależnych zmiennych G , V i Δ/d , w otoczeniu punktu optimum oraz w pobliżu centrum geometrycznego przestrzeni zmiennych niezależnych.



Rys. 3. Zależność rozszerzenia cieplnego walca od zmiennych G , V i Δ/d (linie ciągłe są otoczeniem punktu optimum, przerywane - otoczeniem centrum geometrycznego przestrzeni).

Na podstawie rysunku 3 można stwierdzić, że rozwiązanie zagadnienia optymalizacji jest efektywne i zapewnia znacznie mniejsze rozszerzenie cieplne walca w otoczeniu punktu optimum, niż w centrum geometrycznym przestrzeni zmiennych niezależnych G , V i Δ/d .

Analogiczne wyniki otrzymano dla pozostałych kryteriów jakości procesu odlewania ciągłego z jednoczesnym walcowaniem, tzn. dla temperatury powierzchni walca przy wejściu do strefy nagrzewania T i liczby obrotów walca od momentu początku odlewania do osiągnięcia stacjonarnego reżymu pracy – N .

LITERATURA

1. A. Beleńkij, Modelowanie matematyczne i optymalizacja procesów odlewu i walcowania metalów kolorowych, Metalurgia, Moskwa, 1983.
2. R. Roadman, H. Berman, L. Lalli, Application of a viscoplastic finite element model to the roll casting process, Aluminum, 60, 12, 1984, 911-914.
3. L. Dymowa, P. Sewastjanow, Metodologia rozwiązywania problemów modelowania, identyfikacji i wielokryterialnej optymalizacji w zarządzaniu jakością procesów metalurgicznych, Methodology of solution of joint problems of modeling, identification and multi-criterion optimization in quality control for metallurgical processes, Informatyka w Technologii Materiałów, Wydawnictwo Naukowe AKAPIT, 1, 3, 2003, 21-32.
4. P. Sevastjanow, Rozmyta optymalizacja wielokryterialna procesu obróbki cieplnej drutu zbrojeniowego po walcowaniu, Materiały 10. Konferencji Informatyka w technologii metali, Wisła-Jawornik 12-15 stycznia, 2003, 19-24.
5. P. Sevastianov, N. Tumanov, Multi-criteria identification and optimization of technological processes, Science and Engineering, Minsk, 1990. (In Russian).
6. Chu A., Kalaba R., Springarn R., A Comparison of two methods for determining the weights of belonging to fuzzy sets, J. of Optimization Theory and Applications, 27, 4, 1979, 531-538.
7. R. Yager, Fuzzy decision making including unequal objectives, Fuzzy Sets and Systems, 1, 2, 1978, 87 – 95.
8. H.J. Zimmerman, P. Zysno, Latent connectives in human decision making, Fuzzy Sets and Systems, 4, 1980, 37-51.