

Materiały 11. Konferencji  
Informatyka w Technologii Metali

---

KomPlasTech2004  
Zakopane  
11-14 stycznia 2004

---

## **Wielokryterialna optymalizacja procesu odlewania ciągłego z jednoczesnym walcowaniem taśmy z chlorku miedzi**

L. Dymowa<sup>1</sup>, P. Sewastjanow<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Politechnika Częstochowska

<sup>2</sup>Politechnika Częstochowska

---

### **The multiple criteria optimization of CuCl bars continuous casting process with use of roller- type crystallizer**

#### **Abstract**

The process of CuCl bars continuous casting with using the mill roller-type crystallizer is considered. The aim of study is the estimation of acceptability of proposed project according to which the rollers of greater diameter would be used. As the best strategy the comparison of competing technologies in their optimal conditions has been chosen.

To embody this approach, the special software for numerical modeling and multiple criteria optimization were elaborated. The studies carried out with use of these software make it possible to change the best technology and equipment from the optimization viewpoint.

---

*Słowa kluczowe: proces ciągłego odlewania między walcami, optymalizacja wielokryterialna*

#### **WSTĘP**

Otrzymanie taśmy z chlorku miedzi zrealizowano za pomocą procesu ciągłego odlewania między walcami. Zastosowano walce z jednym otworem centralnym

służącym do chłodzenia, które na skutek niesymetryczności pracują w różnych warunkach cieplnych. Na rysunku 1 przedstawiono schemat technologiczny tego procesu.

Podstawowym parametrem, określającym

jakość procesu, jest względna grubość warstwy fazy ciekłej  $\delta$  na głębokości  $L$  od menisku zalewowego. Przy zbyt niskich wartościach  $\delta$  taśma nie zdąży ukształtować się (zakrzepnąć) przed momentem jej wyjścia ze strefy kontaktu z prawym walcem, zbyt szybko się ochładza i traci plastyczność, co jest przyczyną powstawania pęknięć. Natomiast przy zbyt dużych wartościach  $\delta$  zwykle na powierzchni gotowej taśmy pojawiają się wady w postaci „pęcherzów”.

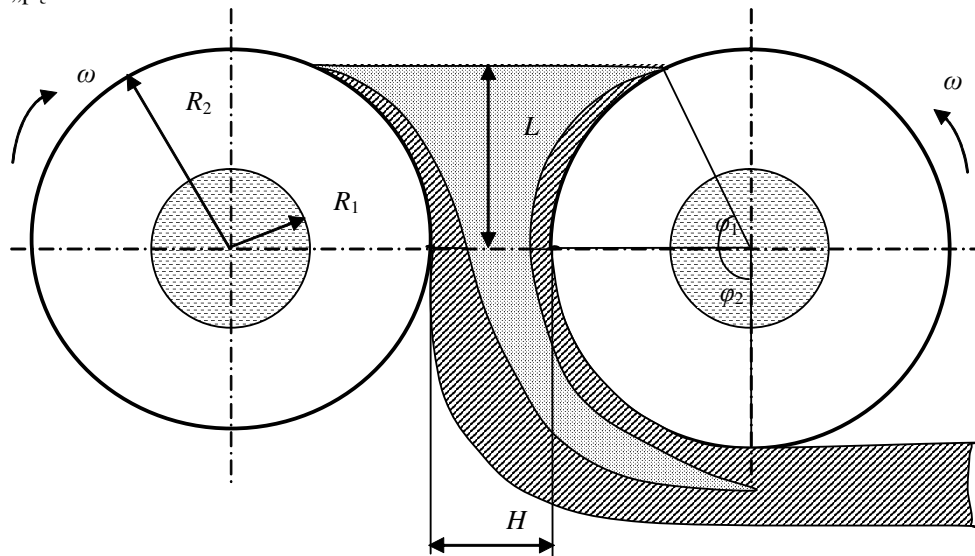
Zmiennymi parametrami procesu są:

$T_p$  – temperatura odlewania;

$V = \omega R_2$  – prędkość wyjścia gotowej taśmy;

$L$  – wysokość obszaru zalewowego.

Celem przeprowadzonych badań była ocena racjonalności planowanego w zakładzie produkcyjnym przejścia na walcze o większej średnicy. Średnica stosowanych walców wynosiła 190 mm, natomiast średnica nowych walców miała wynosić 240 mm.



Rys. 1. Schemat technologiczny procesu ciągłego odlewania między walcami.

Oczywistym jest, że jedynie słusnym podejściem do wspomaganego podejmowania decyzji w tej sprawie jest porównanie ze sobą konkurencyjnych technologii w warunkach ich optymalnego

funkcjonowania. Zagadnienie sprowadza się więc do poszukiwania optimum w przestrzeni czynników  $T_p$ ,  $V$  i  $L$ .

## FORMALIZOWANIE ZAGADNIENIA OPTIMALIZACJI

Dla rozwiązania dwóch wymienionych wyżej zagadnień optymalizacji wielokryterialnej wykorzystany został pakiet programów komputerowych, opracowany przez autorów.

Zagadnienie optymalizacji wielokryterialnej rozwiązywano z wykorzystaniem metod teorii zbiorów rozmytych [1,2]. W składzie pakietu programów są następujące moduły:

1. **Model matematyczny procesów cieplnych w odlewie i w walcach-kryształizatorach.** Do obliczenia pól temperatur zastosowano metodę różnic skończonych.

2. **Model matematyczny naprężeń w walcach- kryształizatorach.** Do obliczenia pól naprężeń zastosowano 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 według metody opracowanej przez Sevastianova i Tumanova [3], 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 [4].

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 pożądaných (najlepszych).

### 6. Optymalizacja kryterium globalnego.

Wykorzystanie modeli, zawartych w modułach 1 i 2, do rozwiązania zadania optymalizacji wymaga zbyt dużych nakładów czasu pracy komputera. Dlatego w celu redukcji modeli matematycznych procesów cieplnych w odlewie i w walcach oraz naprężeń w walcach przeprowadzono, dla dwóch wartości średnic walców, dwie serie eksperymentów numerycznych z zastosowaniem modeli matematycznych, zawartych w modułach 1 i 2. Po obróbce regresyjnej danych eksperymentów numerycznych według modułu 3 otrzymano wielomiany nieliniowe, które przedstawiają zależności zmiennych wyjściowych, określających jakość procesu -  $\delta$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ , od zmiennych niezależnych  $T_p$ ,  $V$  i  $L$ .  $T_1$ ,  $T_2$  są tutaj temperaturami powierzchni lewego i prawego walca przed wejściem do strefy zalewowej.

Na przykład, dla walca o średnicy 190 mm, dla grubości warstwy fazy ciekłej  $\delta$ , otrzymano wielomian potęgi drugiej:

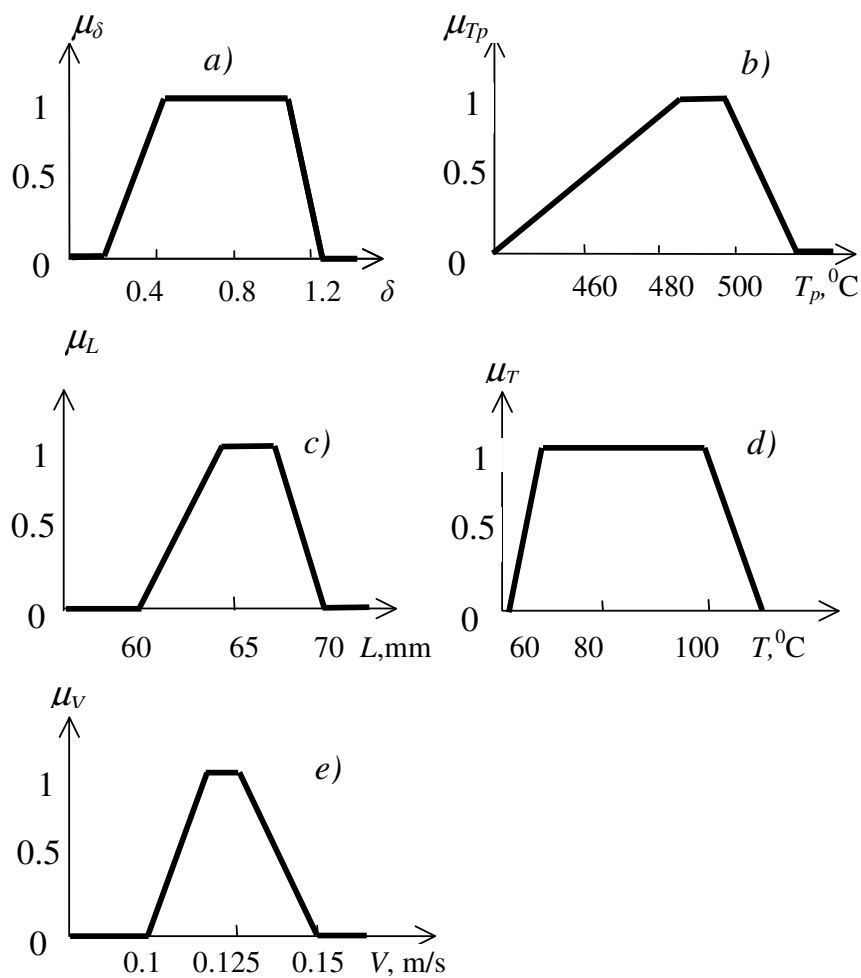
$$\delta = 0.141 + 2.68 \cdot (V - 0.1) + 1.446 \cdot 10^{-3} \cdot (T_p - 480) - 6.01 \cdot 10^{-3} \cdot (L - 52) - 17.96 \cdot (V - 0.1)^2 - 2.12 \cdot 10^{-6} \cdot (T_p - 480)^2 - 6.21 \cdot 10^{-6} \cdot (L - 52) \cdot (T_p - 480) \quad (1)$$

Maksymalny błąd obliczania  $\delta$  na podstawie zależności (1), w porównaniu z wynikami, otrzymanymi za pomocą modeli podstawowych (moduły 1 i 2), wynosi 5%.

Zależności  $T_1 = f_{T_1}(T_p, V, L)$  i  $T_2 = f_{T_2}(T_p, V, L)$  dla walców o średnicach 190 mm i 240 mm są również wielomianami potęgi drugiej.

Funkcje użyteczności kryteriów jakości

lokalnych i ograniczeń zmiennych parametrów procesu przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Funkcje użyteczności kryteriów lokalnych i ograniczeń.

Kształt funkcji użyteczności grubości warstwy fazy ciekłej  $\mu_\delta$  (rys. 2a) wyjaśnia się wzrostem liczby braków w skutku powstawania na powierzchni taśmy pęknięć przy zbyt niskich wartościach  $\delta$  oraz zwiększeniem liczby braków w skutku powstawania „pęcherzów” na powierzchni gotowej taśmy przy zbyt wysokich wartościach  $\delta$ . Przedział wartości maksymalnych funkcji użyteczności temperatur powierzchni walców  $\mu_T$  przy wejściu do strefy zalewowej (rys. 2d) określony został na podstawie danych, otrzymanych z badań nad możliwościami przylepiania się materiału taśmy do walców przy powiększeniu  $T$ . Kształty funkcji użyteczności temperatury zalewnia  $\mu_{T_p}$  i wysokości obszaru zalewowego  $\mu_L$  (rys. 2b i 2c) określone zostały na podstawie ograniczeń technologicznych i konstrukcyjnych. Wzrost funkcji użyteczności prędkości wyjścia gotowej taśmy  $\mu_V$  (rys. 2e) przy małych prędkościach odzwierciedla pożądaną wzrost wydajności procesu, natomiast dalszy wzrost prędkości  $V$ , na skutek różnych przyczyn, doprowadzi do pogorszenia się jakości taśmy. Współczynniki względnej ważności kryteriów i ograniczeń, otrzymane w module 4, przedstawione są w tablicy 1.

Tablica 1. Współczynniki względnej ważności kryteriów i ograniczeń

Wskaźnik jakości	Oznaczenie współczynnika względnej ważności	Wartość współczynnika względnej ważności
$\delta$	$\alpha_1$	1.69
$T_p$	$\alpha_2$	0.27
$T_1$	$\alpha_3$	1.66
$T_2$	$\alpha_4$	1.66
$L$	$\alpha_5$	0.31
$V$	$\alpha_6$	0.25

Do rozwiązania zagadnień optymalizacji użyto trzech sposobów agregacji kryteriów lokalnych: maksymalnego pesymizmu, addytywnego oraz multiplikatywnego. W obu przypadkach dla średnic walców 190 mm i 240 mm najlepsze wyniki dały kryteria globalne maksymalnego pesymizmu. Zagadnienie optymalizacji kryterium globalnego maksymalnego pesymizmu  $D$  sformułowane zostało w następujący sposób:

$$(T_p, V, L)_{\text{opt}} = \arg \max_{L, V, T_p} (\min(\mu_\delta^{\alpha_1}(\delta(T_p, V, L)), \mu_{T_p}^{\alpha_2}(T_p), \mu_{T_1}^{\alpha_3}(T_1(T_p, V, L)), \mu_{T_2}^{\alpha_4}(T_2(T_p, V, L)), \mu_L^{\alpha_5}(L), \mu_V^{\alpha_6}(V)))$$

$$V, L)), \mu_L^{\alpha_5} (L), \mu_V^{\alpha_6} (V)), \quad (2)$$

### WYNIKI WIELOKRYTERIALNEJ OPTIMALIZACJI

W tablicy 2 przedstawiono wyniki rozwiązania zadań optymalizacji dla średnic walców 190 mm i 240 mm.

Tablica 2. Wartości lokalnych kryteriów jakości w punktach optimum

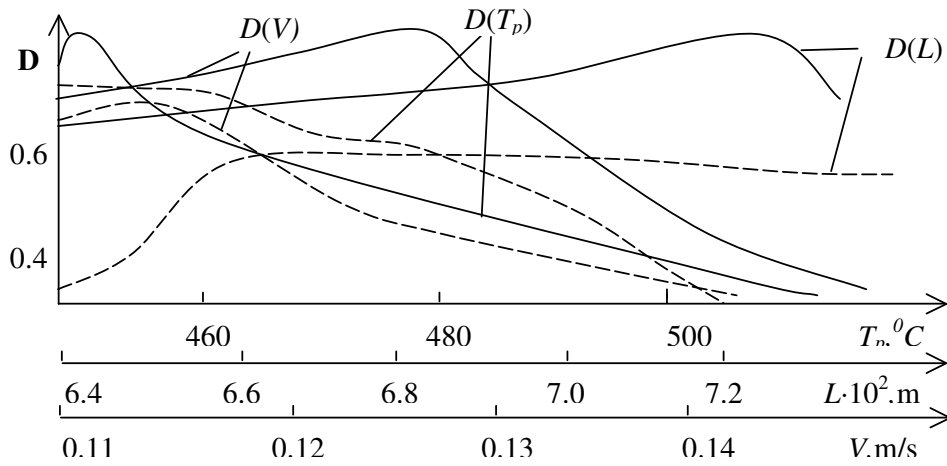
Wskaźnik jakości	Walce o średnicy 190 mm	Walce o średnicy 240 mm
$\mu_\delta$	1	1
$\mu_{T_p}$	0.66	0.29
$\mu_{T_1}$	1	0.81
$\mu_{T_2}$	0.70	0.81
$\mu_L$	0.19	0.31
$\mu_V$	0.25	0.75

$\delta$ , mm	0.099	0.068
$T_1$ , °C	108.7	111.9
$T_2$ , °C	75.5	77
$D$	0.55	0.698

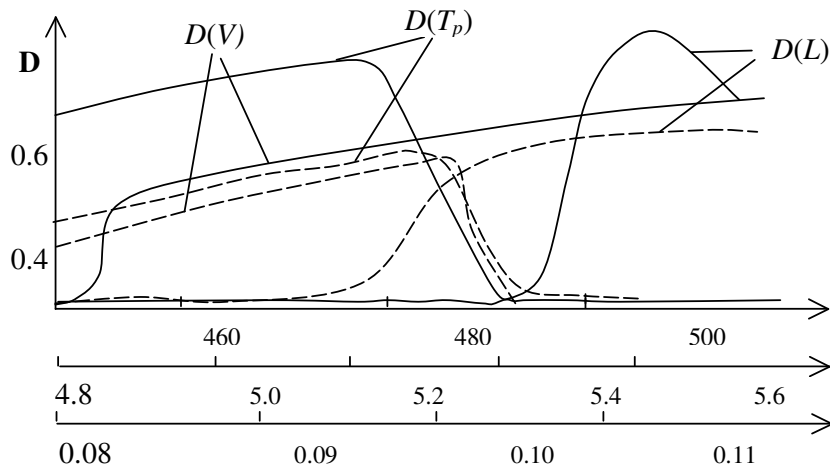
Przedstawiono wartości lokalnych kryteriów jakości w punktach optimum.

Jak widać z tablicy 2, walce o średnicy 240 mm zapewniają większą wartość kryterium globalnego  $D$  w punkcie optimum niż walce o średnicy 190 mm. Wariant technologii z walcami o średnicy 240 mm zapewnia dosyć wysoki poziom podstawowych kryteriów jakości  $\mu_\delta$ ,  $\mu_{T_1}$  i  $\mu_{T_2}$ , ale najważniejszą jego zaletą jest to, że daje on możliwość osiągnięcia wysokiej wartości kryterium lokalnego  $\mu_V$ , które określa wydajność procesu.

Krzywe ujmujące zależności kryterium globalnego od parametrów technologicznych w otoczeniu punktu optimum oraz w pobliżu centrum planu eksperymentu biernego, gdy wszystkie parametry znajdują się w centrach przedziałów ich dopuszczalnych wartości, przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3. Wpływ zmian wartości parametrów na kryterium globalne dla walców o średnicy 240 mm (linie ciągłe są otoczeniem punktu optimum, przerywane - otoczeniem centrum planu).



Rys. 4. Wpływ zmian wartości parametrów na kryterium globalne dla walców o średnicy 190 mm (linie ciągłe są otoczeniem punktu optimum, przerywane - otoczeniem centrum planu).

Z rysunków 3 i 4 wynika, że zastosowanie reżymów optymalnych daje możliwość zwiększenia efektywności procesu w obu przypadkach. Jednocześnie można zauważyć, że wartości kryterium globalnego dla walców o średnicy 240 mm są wyższe niż dla walców o średnicy 190 mm.

Przeprowadzone badania pozwoliły uzasadnić racjonalność przejścia na walce o średnicy 240 mm i znaleźć optymalne reżymy technologiczne produkowania taśmy z chlorku miedzi w nowych warunkach.

## LITERATURA

1. 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.
2. 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.
3. P. Sevastianov, N. Tumanov, Multi-criteria identification and optimization of technological processes, Science and Engineering, Minsk, 1990. (In Russian).
4. 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.