

mgr inż. AGNIESZKA CEBO - RUDNICKA, prof. dr hab. inż. ZBIGNIEW  
MALINOWSKI, dr inż. ANDRZEJ GOŁDASZ, dr inż. MARCIN RYWOTYCKI  
Akademia Górniczo-Hutnicza  
Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej  
Katedra Techniki Ciepłej i Ochrony Środowiska  
Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
cebo@agh.edu.pl

## **Zastosowanie kryteriów pęknięcia do analizy powstawania pęknięć wlewka ciągłego**

*Application of fracture criterions to cracks prediction of the continuously cast strand*

### **Streszczenie**

W pracy przedstawiono analizę wybranych kryteriów pęknięcia w zastosowaniu do procesu ciągłego odlewania wlewków. Obliczenia numeryczne wykonano dla czterech kryteriów. W analizie uwzględniono odkształcenia i naprężenia cieplne wynikające z niejednorodnego pola temperatury, oraz odkształcenia i naprężenia wynikające z zaginania i odginania wlewka ciągłego. Pole naprężeń i odkształceń wyznaczono metodą elementów skończonych dla wlewka ciągłego krzepnącego w krystalizatorze, stygnącego w układach chłodzenia wtórnego i w powietrzu, aż do strefy odcinania.

### **Abstract**

The analysis of the cracks formation criterions in application to continuously cast strand has been performed. The analysis was taken on the ground of numerical calculations for four selected fracture criterions. The thermal strains and stresses which result from nonuniform temperature field were included in analysis. Also strains and stresses which are caused by bending and unbending of the cast strand were taken into account. Finite element method was used to compute the stress and strain field in the whole continuous casting line.

**Słowa kluczowe:** kryteria pęknięcia, ciągłe odlewanie stali

**Key words:** fracture criterions, continuous casting of steel

## **Wprowadzenie**

Proces ciągłego odlewania stali jest podstawowym sposobem wytwarzania wlewków stalowych. Posiada on wiele zalet do których zaliczyć można dużą wydajność, oszczędność energii, względnie niskie koszty produkcji oraz zadowalającą jakość półwyrobów. Krzepnięcie stali, który zachodzi podczas ciągłego odlewania jest procesem nierównowagowym cechującym się dużą szybkością chłodzenia [4]. Może to prowadzić do powstawania defektów w odlewanym wlewkowi, takich jak pęknięcia powierzchniowe i wewnętrzne. Za powstawanie pęknięć we wlewkowi ciągłym odpowiedzialne są również zmiany składu chemicznego stali powodowane przepływem ciekłej fazy i segregacją pierwiastków. Wszystkie te czynniki łączą się z technologią odlewania i parametrami chłodzenia w rezultacie wpływają na powstające w krzepnącym metalu naprężenia i odkształcenia. Z tych powodów powstawanie pęknięć wewnętrznych oraz powierzchniowych jest bardzo trudne do modelowania. Jednak z punktu widzenia poprawy efektywności procesu ciągłego odlewania stali możliwość przewidywania powstawania pęknięć jest istotnym zagadnieniem, które już na etapie projektowania procesu pozwala określić miejsca w których mogą pojawić się pęknięcia.

Przewidywanie pęknięcia materiału zwykle wymaga określenia pól naprężeń i odkształceń powstających w materiale w wyniku obciążeń mechanicznych i cieplnych. Następnym krokiem jest wybór odpowiedniego kryterium pęknięcia, które pozwoli określić moment i miejsce zniszczenia materiału. Analiza dostępnych w literaturze kryteriów pęknięcia pozwala na wyodrębnienie czterech grup kryteriów. Do pierwszej z nich można zaliczyć kryteria w których powstawanie pęknięć prognozowane jest na podstawie pola naprężeń [4]. Do drugiej grupy należy zaliczyć kryteria oparte na parametrach wyznaczanych z pola odkształceń [1]. Trzecią grupę stanowią kryteria wykorzystujące energię odkształcenia [6]. Do czwartej grupy można zaliczyć wszystkie inne metody. Wytypowanie właściwego kryterium jest zagadnieniem trudnym i wymaga rozważenia danych jakie są dostępne przy analizie procesu ciągłego odlewania.

## **Model wymiany ciepła**

W procesie ciągłego odlewania stali występuje intensywna wymiana ciepła między odlewanym metalem, otoczeniem i urządzeniem COS. Modelowanie tego typu

transportu ciepła wymaga zbudowania złożonego modelu matematycznego. Szczególnie trudne jest określenie warunków brzegowych, różnych dla poszczególnych stref urządzenia COS. Warunki brzegowe oraz własności termofizyczne są zależne od temperatury ośrodka co zdecydowanie utrudnia otrzymanie prawidłowych rozwiązań. Istotnym jest również uwzględnienie konwekcyjnego transportu ciepła wynikającego z ruchu pasma i przepływu ciekłej stali. W zastosowanym rozwiązaniu model matematyczny obejmował wymianę ciepła w układzie wlewk ciągły - krystalizator COS – otoczenie. Pole temperatury kęsiska w czasie chłodzenia w krystalizatorze i poza nim wyznaczone zostało przy pomocy stacjonarnego rozwiązania równania Fouriera – Kirchhoffa. W równaniu wymiany ciepła uwzględniono ruch masy oraz ciepło krzepnięcia w postaci wewnętrznego źródła ciepła. Opis modelu matematycznego wymiany ciepła przedstawiono w pracy [3].

### **Model naprężeń**

W modelu numerycznym zastosowanym do analizy powstawania pęknięć wlewka ciągłego pole naprężeń wyznaczono z zastosowaniem modelu sprężysto-plastycznego. Uwzględniono odkształcenia i naprężenia cieplne wynikające z niejednorodnego pola temperatury oraz odkształcenia i naprężenia powodowanego zaginaniem i odginaniem wlewka ciągłego. W modelu pominięto grawitacyjne oddziaływanie słupa ciekłej stali, nie uwzględniano również lokalnych zmian pola odkształceń i naprężeń w strefie działania rolek. Pole naprężeń i odkształceń wyznaczono metodą elementów skończonych dla wlewka ciągłego krzepnącego w krystalizatorze, stygnącego w układach chłodzenia wtórnego aż do strefy odcinania wsadu. Opis modelu naprężeń i odkształceń przedstawiono w pracy [2].

### **Kryteria pęknięcia**

Do analizy prognozowania pęknięć wlewka ciągłego wybrano cztery kryteria pęknięcia:

#### **Kryterium pracy odkształcenia plastycznego**

$$C_{EP} = \int_0^t \dot{\bar{\epsilon}} \cdot \bar{\sigma} dt \quad \text{dla } \sigma_m > 0 \quad (1)$$

gdzie:  $\dot{\bar{\epsilon}}$  - intensywność prędkości odkształceń,

$\bar{\sigma}$  - intensywność naprężeń.

Kryterium to zakłada, że pęknięcie materiału nastąpi w momencie, gdy energia odkształcenia będzie większa od wartości krytycznej  $C_{EP}$ . Wzięto pod uwagę tylko energię odkształcenia plastycznego w punktach dla których naprężenie średnie przyjmowało wartości dodatnie - rozciągające.

### Kryterium Rice'a i Tracy'ego

$$C_{RT} = \bar{\varepsilon} \exp\left(-\frac{3}{2} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}\right) \quad (2)$$

gdzie:

$\sigma_m$  – naprężenie średnie,

$\bar{\varepsilon}$  - intensywności odkształceń.

Kryterium Rice'a i Tracy'ego [1] przewiduje zniszczenie materiału w momencie gdy parametr  $C_{RT}$  przekroczy wartość maksymalną intensywności odkształcenia  $\bar{\varepsilon}_f$  wyznaczonego w próbie jednoosiowego rozciągania.

### Zmodyfikowane kryterium Rice'a i Tracy'ego

Modyfikacja kryterium (2) polegała na wyznaczeniu krytycznej wartości parametru  $C_{RM}$  w postaci sumy przyrostów prawej strony kryterium (2) w punktach dla których naprężenie średnie przyjmowało wartości dodatnie.

$$C_{RM} = \sum \Delta \bar{\varepsilon} \exp\left(-\frac{3}{2} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}\right) \quad \text{dla } \sigma_m > 0 \quad (3)$$

### Kryterium Lathama

$$C_{LO} = \int_0^t \sigma_{\max} \cdot \dot{\bar{\varepsilon}} dt \quad \text{dla } \sigma_m > 0 \quad (4)$$

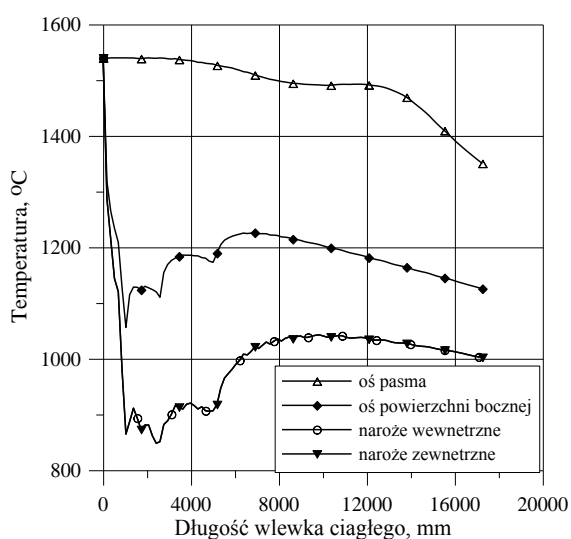
gdzie  $\sigma_{\max}$  - naprężenie maksymalne.

Kryterium Lathama [5] zakłada, że pęknięcie pojawi się w momencie, gdy praca odkształcenia wykonana przez maksymalne naprężenie rozciągające przekroczy wartość krytyczną  $C_{LO}$ .

Wartości krytyczne parametrów  $C_{EP}$ ,  $C_{RT}$ ,  $C_{RM}$ ,  $C_{LO}$  można wyznaczyć z wyników próby jednoosiowego rozciągania. Jest to istotne w przypadku wykonywania analizy pęknięcia dla konkretnego gatunku stali odlewanej w agregacie COS. Wymaga jednak przeprowadzenia prób rozciągania w szerokim zakresie temperatury w tym bliskich temperatury solidus.

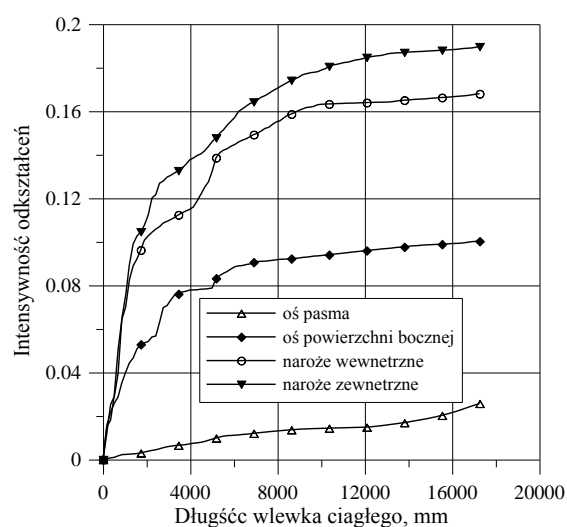
## Analiza kryteriów pęknięcia

Analizę kryteriów pęknięcia przeprowadzono dla wlewka ciągłego o przekroju kwadratowym 160 mm x 160 mm, odlewane ze stali o zawartości: C=0.1%, Mn=1.7%, Si=0.39%, Cr=3.0%, Ni=0.2%. Na rysunkach od 1 do 4 przedstawiono rozkłady: temperatury (rys.1), intensywności odkształceń (rys.2), intensywności naprężeń (rys. 3), oraz naprężenia średniego (rys.4) w charakterystycznych punktach wlewka ciągłego. Wybrane wielkości występują w kryteriach pęknięcia i mają istotny wpływ na wyznaczone wartości parametrów:  $C_{EP}$ ,  $C_{RT}$ ,  $C_{RM}$ ,  $C_{LO}$ . Największe odkształcenia i naprężenia występują w narożach wlewka. W tych miejscach występują także dodatnie wartości naprężenia średniego (rys.4). Są to naprężenia rozciągające, które mogą sprzyjać powstawaniu pęknięć. Natomiast w osi wlewka w całym zakresie odkształcenia i naprężenia mają niewielkie wartości.



Rys. 1. Rozkłady temperatury w charakterystycznych punktach wlewka ciągłego

Fig. 1. Temperature distributions at selected points of the continuously cast strand



Rys. 2. Rozkłady intensywności odkształceń w charakterystycznych punktach wlewka ciągłego

Fig. 2. Distribution of the effective strain at selected points of the continuously cast strand

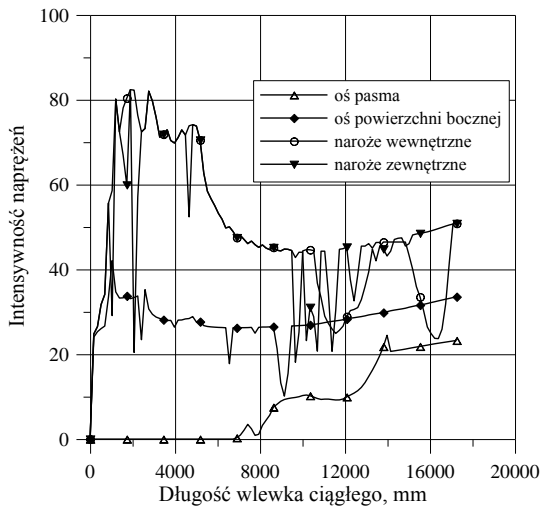
Podobnie zmienia się intensywności naprężeń (rys.3). Największe wartości występują w narożach, między 2 a 3 m długości wlewka, gdzie intensywność naprężeń osiąga około 80 MPa. Na tej długości naroża wlewka mają najniższą temperaturę (rys.1). Naprężenie średnie w przypadku naroża zewnętrznego przyjmuje w tym obszarze wartości dodatnie, które sprzyjają rozwojowi pęknięć. W okresie wyrównywania pola temperatury, po 6 m, gdzie ma miejsce chłodzenie w powietrzu,

następuje zmniejszenie intensywności naprężeń w narożach do około 50 MPa. Natomiast w osi wlewka intensywności naprężeń wzrasta do około 20 MPa na wyjściu z maszyny COS (rys.3).

Wyznaczone wartości wybranych kryteriów pęknięcia potwierdzają, że obszarami najbardziej narażonymi na powstawanie pęknięć są naroża wlewka ciągłego. Kryterium Rice'a i Tracy'ego nie daje możliwości prawidłowego określenia obszarów niebezpiecznych. Wartości tego kryterium dla naroża zewnętrznego wlewka ciągłego są znacznie większe niż wartości w osi pasma i dla naroża wewnętrznego. Niestety na krzywych tego kryterium występują piki (rys. 5), które utrudniają prawidłową interpretację otrzymanych wyników. Problem ten znika po zmodyfikowaniu kryterium Rice'a i Tracy'ego. Wyniki obliczeń kryterium pracy odkształcenia oraz kryterium Latahm'a wskazują jako obszar najbardziej zagrożony odcinek między pierwszym i piątym metrem naroża zewnętrznego (rys. 7, 8), gdzie następuje zginanie wlewka. W przypadku naroża wewnętrznego niebezpieczny obszar to wyjście z krystalizatora (około 1m), a następnie strefa odginania wlewka, między 5 i 8 m. W tych strefach krzywe pracy odkształcenia oraz pracy maksymalnego naprężenia, wyznaczone dla naroży wlewka, charakteryzują się gwałtownym wzrostem. Podobny obszary niebezpieczne przewiduje zmodyfikowanego kryterium Rice'a i Tracy'ego (rys. 6). Taki przebieg krzywych jest uzasadniony zarówno obciążeniami cieplnymi jak i mechanicznymi.

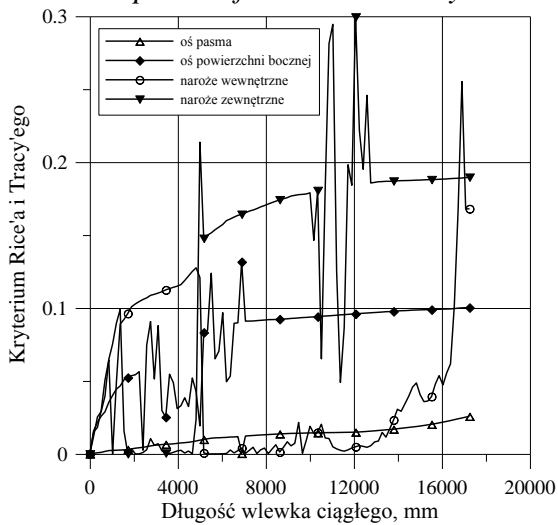
## **Podsumowanie**

Przeprowadzone obliczenia wartości wybranych kryteriów pęknięcia pozwoliły określić obszary narażone na powstawanie pęknięć wlewka ciągłego. Dużą skutecznością w identyfikacji stref sprzyjających powstawaniu i rozwojowi pęknięć charakteryzują się kryteria: Latham, pracy odkształcenia i zmodyfikowane kryterium Rice'a i Tracy'ego. Obliczenia numeryczne wykonane przy użyciu tych kryteriów wskazały te same obszar powstawania pęknięć, jak te znane z praktyki przemysłowej. Aby stwierdzić czy w danym obszarze w odlewanym wlewku powstaną pęknięcia, konieczne jest wykonanie prób rozciągania w celu określenia krytycznych wartości parametrów charakteryzujących wytrzymałość materiału dla poszczególnych kryteriów pęknięcia.



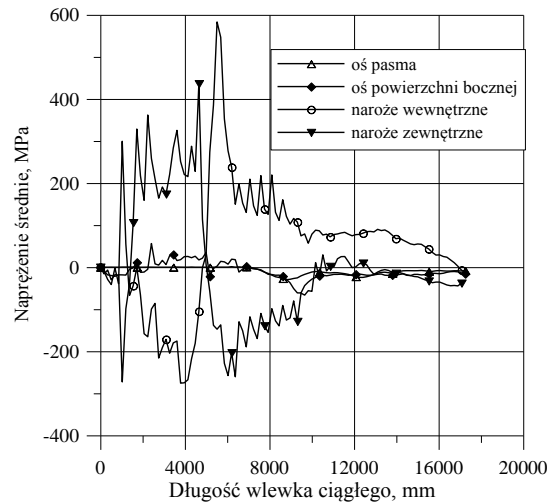
Rys. 3. Rozkłady intensywności naprężeń w charakterystycznych punktach wlewka ciąglego

Fig. 3. Distributions of the effective stress at selected points of the continuously cast strand



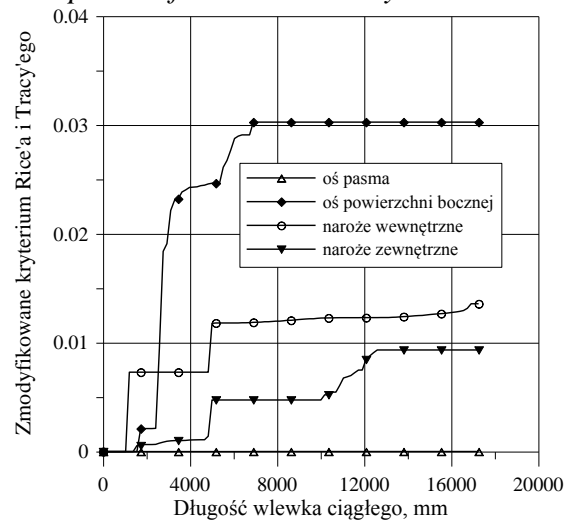
Rys. 5. Wyniki obliczeń kryterium Rice'a i Tracy'ego

Fig. 5. Results of calculations of Rice and Tracy criterion



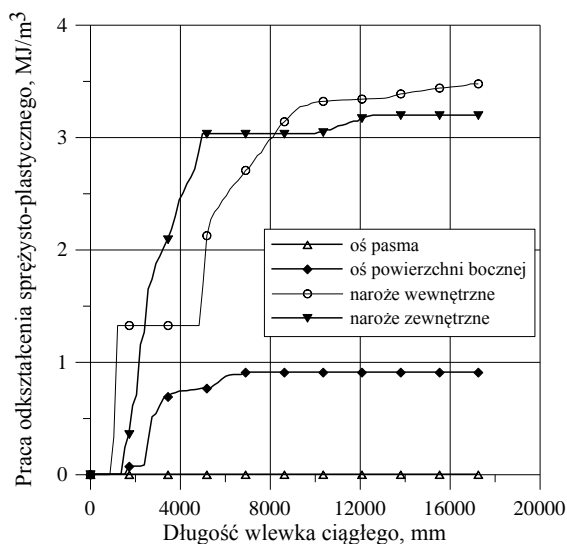
Rys.4. Rozkłady naprężenia średniego w charakterystycznych punktach wlewka ciąglego

Fig. 4. Average stress distributions at selected points of the continuously cast strand



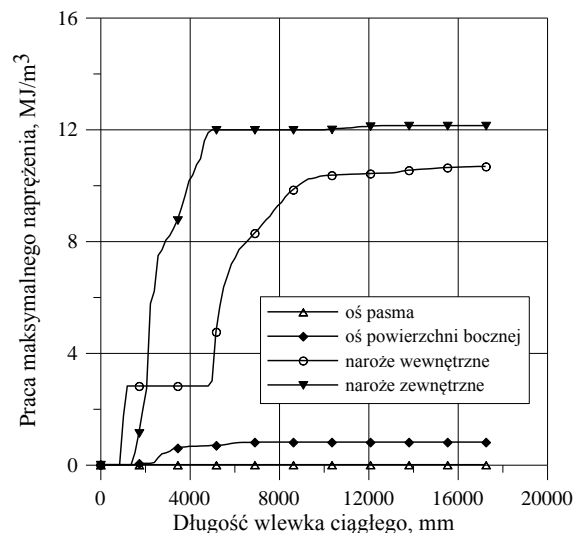
Rys. 6. Wyniki obliczeń zmodyfikowanego kryterium Rice'a i Tracy'ego

Fig. 6. Results of calculations of the modified Rice and Tracy criterion



Rys. 7. Wyniki obliczeń kryterium pracy odkształcenia sprężysto-plastycznego

Fig. 7. Results of calculations of strain criterion



Rys. 8. Wyniki obliczeń kryterium Latham'a

Fig. 8. Results of calculations of Latham's criterion

## Literatura

- [1]. Garrison Jr W. M.; Ductile fracture, J. Phys. Chem. Solids, 1987, 48, nr 11, 1035-1074
- [2]. Gołdasz A., Malinowski Z., Hadała B., Rywotycki M.; Modelowania pola naprężeń we wlewku odlewanym w sposób ciągły, XVII Konferencja Informatyki w Technologii Metali KomPlasTech 2010, w druku
- [3]. Hadała B., Malinowski Z.; Accuracy of the finite element solution to steady convection-diffusion heat transport equation in continuous casting problem. Informatyka w Technologii Materiałów, 9, 2009, no 2 302-307.
- [4]. Lee J.E., Yeo T.J., Oh K.H., Yoon J.K., Yoon U.K.; Prediction of cracks in continuously cast steel beam blank through fully coupled analysis of fluid flow, heat transfer and deformation behavior of solidifying shell, Metall. Trans. A, 2000, 31A, 225-237.
- [5]. Malinowski Z.; Numeryczne modele w przeróbce plastycznej i wymianie ciepła, Uczelniane Wydawnictwa Naukowe – Dydaktyczne, Kraków 2005
- [6]. Won Y.M., Yeo T.J., Seol D.J. Oh K.H.; A new criterion for internal crack formation in continuously cast steels, Metall. Trans. B, 2000, 31B, 779-794.

Praca wykonana w ramach projektu rozwojowego N R07 0018 04 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.