

Andrzej GOŁDASZ, Zbigniew MALINOWSKI, Agnieszka CEBO-RUDNICKA, Beata HADAŁA

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej

## WPLYW DODATKOWEGO CHŁODZENIA NAROŻY NA ROZKŁAD NAPRĘŻEŃ I ODKSZTAŁCEŃ WE WLEWKU ODLEWANYM W SPOSÓB CIĄGŁY

*W pracy przedstawiono trójwymiarowy model naprężeń i odkształceń powstających we wlewkach odlewanych w sposób ciągły. Rozwiązanie uzyskano metodą elementów skończonych. Analizowano wpływ dodatkowego chłodzenia naroży na rozkład naprężeń i odkształceń powstających we wlewkach odlewanych w urządzeniu COS. Przeprowadzono również analizę wpływu tego chłodzenia pod kątem możliwości powstawania pęknięć w strefie naroży. Obliczenia pęknięcia prowadzono z zastosowaniem powszechnie wykorzystywanego w tym celu kryterium Lathama. Analizowano proces odlewania wlewków kwadratowych o wymiarach 160×160 mm ze stali o zawartości węgla 0,84%.*

*Słowa kluczowe:* ciągle odlewane stali, naprężenia i odkształcenia, metoda elementów skończonych

## INFLUENCE OF ADDITIONAL COOLING OF THE STRAND CORNERS ON STRAIN AND STRESS DISTRIBUTION IN THE CONTINUOUSLY CAST STRAND

*Three dimensional model of the stress and strain field in the continuously cast strand has been presented. The finite element method has been employed in the thermo-mechanical model. The influence of the additional rapid cooling of the strand corners on the strain and stress field has been investigated. The investigations of the additional cooling were focused on the fracture development at strand corners caused by high temperature gradients. Latham fracture criterion has been used in the finite element model of the fracture development. The computations have been performed for continuous casting of the 160×160 mm square strand made of steel having 0,84% of carbon.*

*Key words:* continuous casting of steel, stresses and strains, finite element method

### 1. WSTĘP

Ciągłe odlewane stali to obecnie najpopularniejszy proces produkcji półwyrobów stalowych z ciekłej stali dostarczanej do krystalizatora z kadzi pośredniej. Jednym z głównych celów procesu ciągłego odlewania stali jest wyprodukowanie półwyrobu o jak najwyższych parametrach jakości powierzchni. Z drugiej strony ciągła potrzeba zwiększania wydajności linii produkcyjnej poprzez zwiększenie prędkości odlewania, wymaga bardziej intensywnego chłodzenia pasma. Rezultatem takich działań jest rozwój naprężeń cieplnych oraz tendencja do powstawania pęknięć powierzchniowych we wlewkach ciągłych [1]. Modyfikację mikrostruktury w warstwie przypowierzchniowej można uzyskać poprzez zastosowanie dodatkowego chłodzenia natryskowego o określonych parametrach [2]. Taka modyfikacja może prowadzić do powstania struktury drobnoziarnistej i zapobiega powstawaniu nowych i propagacji istniejących pęknięć [3].

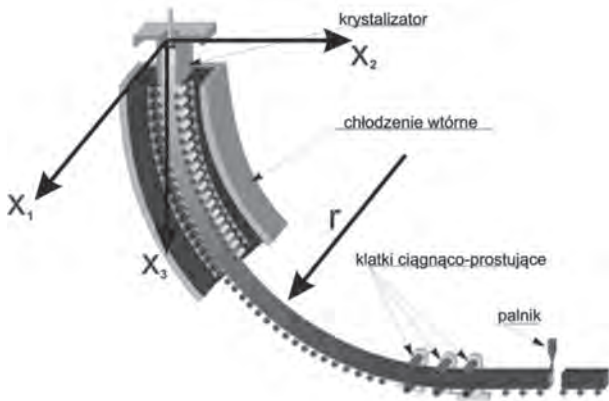
Modelowanie numeryczne procesu ciągłego odlewania stali jest szczególnie utrudnione m.in. ze względu na zmiany stanu skupienia stali. Wyznaczanie pola temperatury we wlewkach ciągłych jest stosunkowo szeroko opisane w literaturze [4, 5], przy czym dalszy postęp wiąże się z poprawą dokładności wyznaczonego pola temperatury oraz ze skracaniem czasu obliczeń

[6]. Dużo bardziej skomplikowanym zagadnieniem jest natomiast określenie naprężeń powstających podczas krzepnięcia, szczególnie w strefie przejściowej przy współistnieniu fazy ciekłej i stałej, jak również w zakrzepniętej stali w wysokich temperaturach [7–9].

### 2. MODEL NAPRĘŻEŃ I ODKSZTAŁCEŃ

Wlewek ciągły w urządzeniu do odlewania stali odkształca się wskutek działania naprężeń cieplnych i mechanicznych wywołanych systemem rolek prowadzących. W modelu numerycznym pole naprężeń wyznaczono z zastosowaniem modelu sprężysto-plastycznego. Uwzględniono odkształcenia i naprężenia cieplne wynikające z niejednorodnego pola temperatury oraz odkształcenia i naprężenia powodowane zaginaniem i odginaniem wlewka ciągłego. Pole naprężeń i odkształceń wyznaczono metodą elementów skończonych dla wlewka ciągłego krzepnącego w krystalizatorze, stygniętego w układach chłodzenia wtórnego aż do strefy odcinania wsadu. Schemat układu współrzędnych przyjętych do obliczeń naprężeń i odkształceń wlewka ciągłego przedstawiono na rys. 1.

W celu określenia odkształceń powodowanych zaginaniem i odginaniem pasma, ruch pasma opisano polem prędkości:



Rys. 1. Schemat układu współrzędnych przyjętych do obliczeń naprężeń i odkształceń wlewka ciągłego

Fig. 1. Schematic diagram of the coordinate system employed in the calculations of stresses and strains of the continuously cast strand

$$v_x = 0 \quad (1)$$

$$v_y = -\omega r \sin \varphi \quad (2)$$

$$v_z = \omega r \cos \varphi \quad (3)$$

Prędkość kątową punktu materialnego poruszającego się po łuku o promieniu  $r$  obliczano ze wzoru:

$$\omega = \omega_0 + \frac{8}{\pi}(\omega_s - \omega_0)\varphi_z \quad (4)$$

gdzie:

$$\varphi_z = \varphi \in \left(0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{4}\right)$$

$$\varphi_z = \frac{\pi}{2} - \varphi \in \left(\frac{\pi}{4} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}\right)$$

Przez  $\omega_0$  oznaczono prędkość kątową punktu materialnego na wejściu do łuku krystalizatora,  $\omega_s$  jest prędkością kątową punktu położonego w osi symetrii pasma.

Różniczkując pole prędkości otrzymano tensor prędkości deformacji:

$$d_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

oraz tensor chwilowej prędkości obrotowej:

$$\omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

Tensor odkształceń spowodowany zaginaniem i odginaniem pasma wyznaczano sumując przyrosty odkształcenia od płaszczyzny menisku stali do końca kęsiska:

$$\varepsilon_{ij}^{\tau+\Delta\tau} = \Delta\varepsilon_{ij} + R_{ik} \varepsilon_{kl}^{\tau} R_{jl} \quad (7)$$

W analogiczny sposób obliczano tensor naprężenia:

$$\sigma_{ij}^{\tau+\Delta\tau} = \Delta\sigma_{ij} + R_{ik} \sigma_{kl}^{\tau} R_{jl} \quad (8)$$

Przez  $\Delta\tau$  oznaczono czas niezbędny do przejścia punktu materialnego między sąsiednimi płaszczyznami elementów w przekroju poprzecznym pasma. Tensor obrotów obliczano ze wzoru:

$$R_{ij} = +\delta_{ij} \sin(\Delta\tau w_{ij}) \quad (9)$$

gdzie:  $\delta_{ij}$  jest tensorem jednostkowym.

Przyrost tensora odkształcenia  $\Delta\varepsilon_{ij}$  wynika ze sprężysto plastycznego wygięcia pasma i odkształceń cieplnych spowodowanych nierównomiernym polem temperatury:

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \Delta\tau d_{ij} + \Delta\varepsilon_{ij}^e$$

Odkształcenia cieplne obliczano stosując metodykę opisaną w pracy [10]. Zastosowanie znalazła metoda wariacyjna pozwalająca na określenie zależności pomiędzy siłami i przemieszczeniami. Zależności między przyrostami naprężeń i odkształceń określano na podstawie równań Prandtla-Reussa. Pole temperatury wyznaczano wg zależności szczegółowo opisanych m.in. w pracy [6]. Do analizy pęknięcia zastosowano kryterium Lathama [11].

### 3. OBLICZENIA NUMERYCZNE

Symulacje numeryczne wykonano dla odlewania wlewów ciągłych o przekroju kwadratowym 160×160 mm ze stali o zawartości węgla 0,84%; 2,1% manganu; 1,74% krzemu i 1,54% kobaltu. Na podstawie składu chemicznego dobrano właściwości termofizyczne odlewanej stali [12]. Przyjęto następujące temperatury: solidusu 1380°C, likwidusu 1450°C, początku i końca przemiany w stanie stałym odpowiednio: 810°C i 730°C. Chłodzenie wtórne realizowane jest w 3 strefach o łącznej długości 4,5 m. Dodatkowe chłodzenie naroży, składające się z 12 dysz o ograniczonym zasięgu zastosowane celem ograniczenia powstawania mikropęknięć w warstwie przypowierzchniowej jest usytuowane za strefą chłodzenia wtórnego. Badano wpływ dodatkowego chłodzenia naroży na powstawanie naprężeń i odkształceń w odlewonym paśmie COS. W tablicy 1 zebrano przyjęte do obliczeń wartości gęstości strumienia wody w poszczególnych wariantach obliczeniowych.

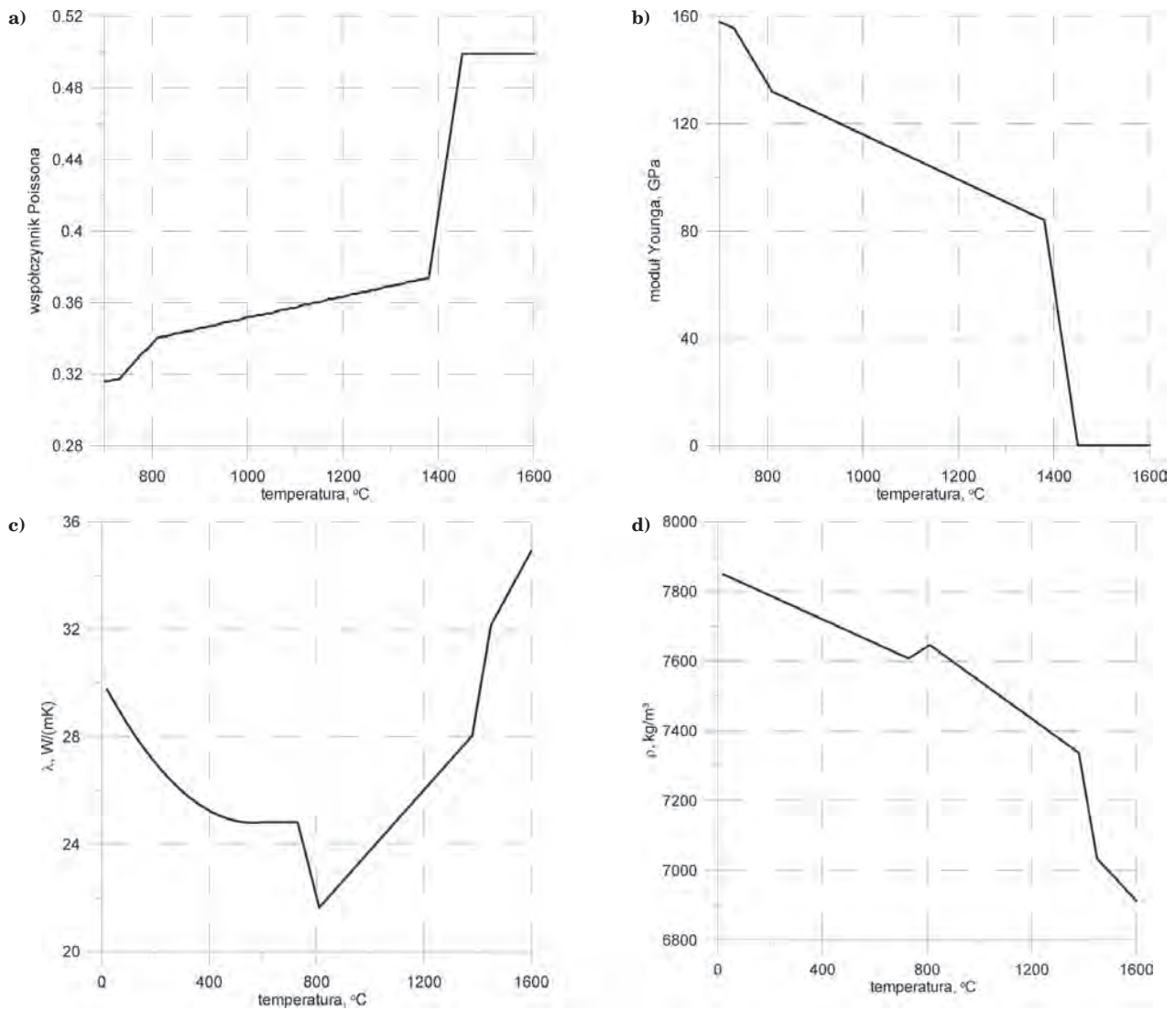
Tablica 1. Gęstość strumienia wody w poszczególnych wariantach obliczeń

Table 1. Water flow density employed in the simulation

Nazwa	Prędkość odlewania, mm/s	Gęstość strumienia wody w poszczególnych rzędach dysz, l/(s·m <sup>2</sup> )				
Wariant I	26,667	9	2,5	2	0,7	0
Wariant II						5

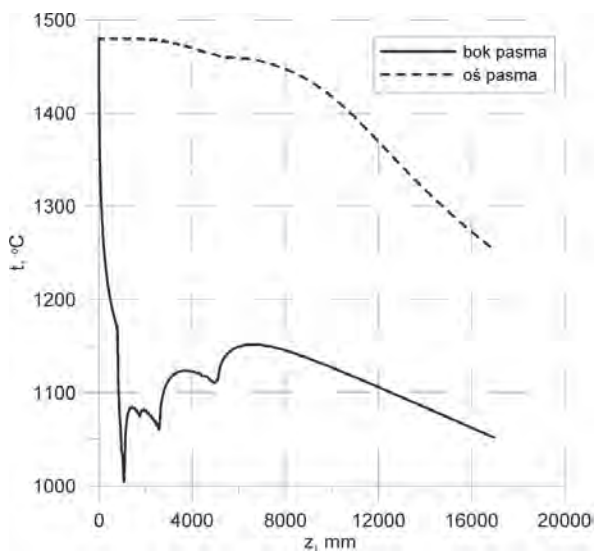
Do obliczeń rozkładu temperatury oraz pola naprężeń i odkształceń dobrano odpowiednie własności termofizyczne i mechaniczne stali. Wybrane wykresy właściwości termofizycznych przedstawiono na rys. 2.

Wybrane testy umożliwiają ocenę wpływu dodatkowego chłodzenia naroży na rozkład temperatury, której nierównomierność może decydować w dużej mierze o powstawaniu naprężeń cieplnych. Na wykresach przedstawiono rozkład temperatury w punktach charakterystycznych na długości pasma w poszczególnych wariantach obliczeń. Rys. 3 przedstawia rozkład temperatury punktów znajdujących się w osi i na ścianie bocznej pasma. Lokalne oddziaływanie dodatkowego chłodzenia ujmuje rys. 4, przedstawiający rozkład temperatury naroża pasma. Przekrój poprzeczny pasma za strefą chłodzenia wtórnego i na wyjściu z urządzenia COS przedstawiono na rys. 5. Przeprowadzono również



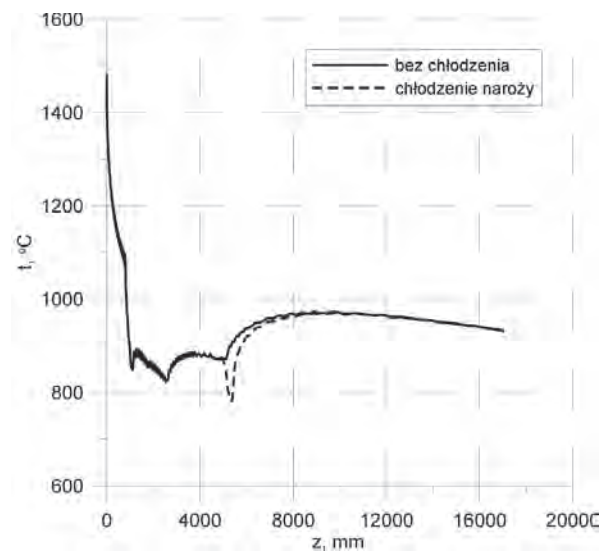
Rys. 2. Właściwości termofizyczne przyjęte do obliczeń: a) współczynnik Poissona, b) moduł Younga, c) współczynnik przewodności cieplnej, d) gęstość

Fig. 2. Thermo-physical properties employed in the calculations: a) Poisson ratio, b) Young modulus, c) thermal conductivity coefficient, d) density



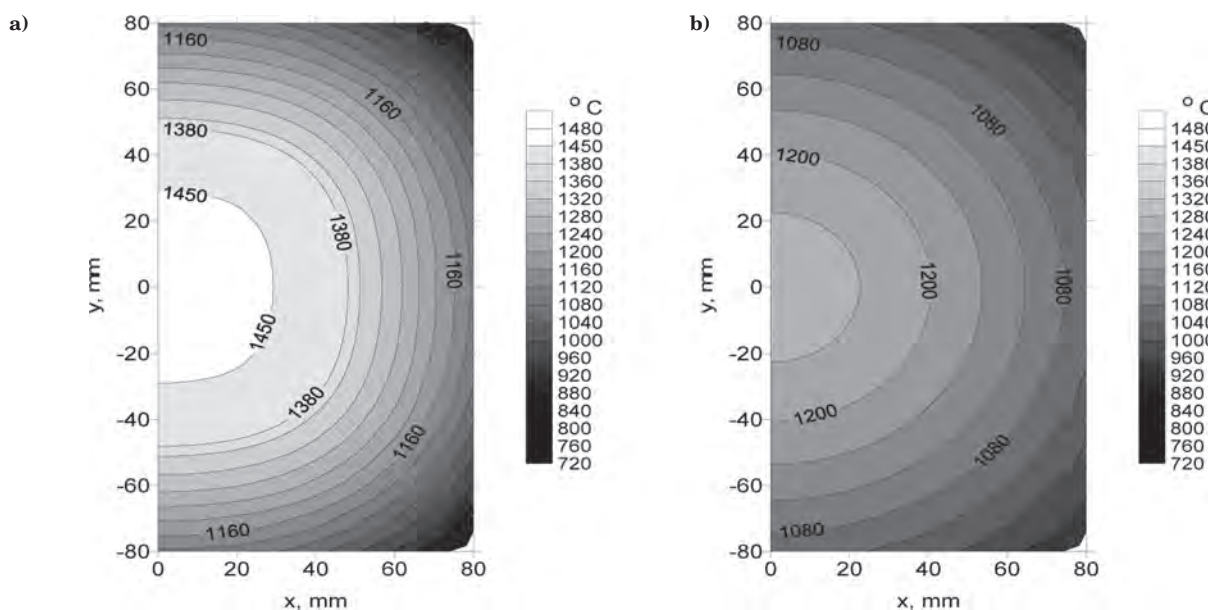
Rys. 3. Rozkład temperatury w charakterystycznych punktach wlewka ciągłego

Fig. 3. Temperature distributions at selected points of the continuously cast strand



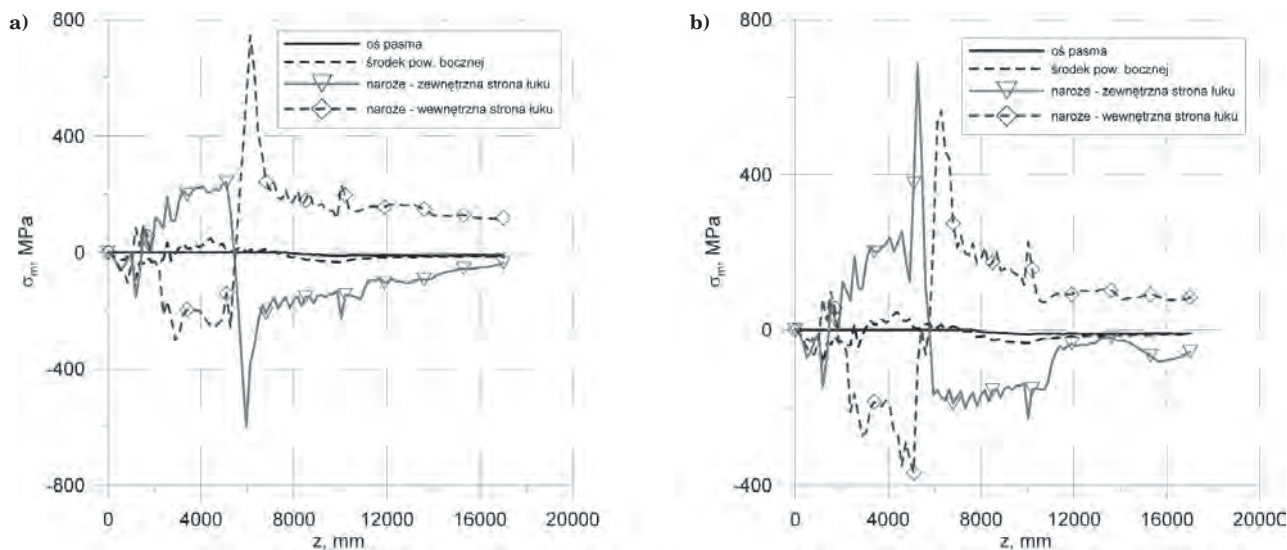
Rys. 4. Rozkład temperatury naroża wlewka ciągłego

Fig. 4. Temperature distributions at the corner of the continuously cast strand



Rys. 5. Pole temperatury w przekroju poprzecznym pasma COS: a) po strefie chłodzenia wtórnego, b) na wyjściu z urządzenia COS

Fig. 5. Temperature field at the cross section of the continuously cast strand: a) after the secondary cooling zone, b) at the exit of CC machine



Rys. 6. Rozkłady naprężenia średniego w charakterystycznych punktach wlewka ciągłego: a) bez chłodzenia naroży, b) z dodatkowym chłodzeniem naroży

Fig. 6. Average stress distributions at selected points of the continuously cast strand: a) without corners cooling, b) with additional corners cooling

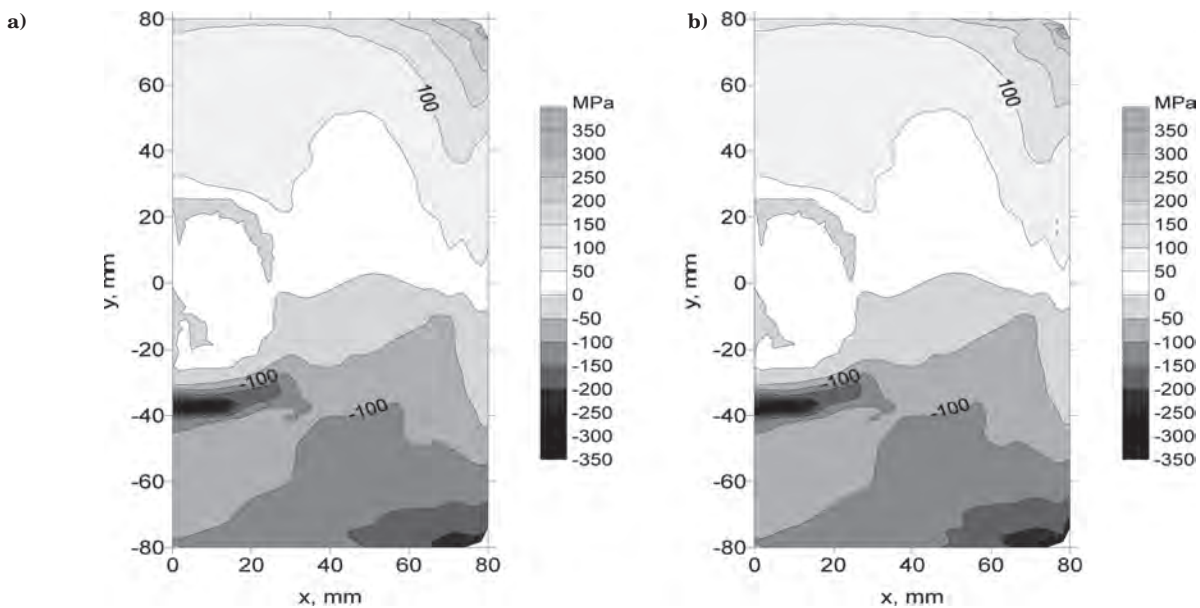
analizę wpływu chłodzenia naroży na pole naprężeń i odkształceń. Wyniki obliczeń naprężenia średniego zobrazowano na rys. 6. Rozkłady wartości naprężenia średniego ujęto w charakterystycznych punktach: w osi wlewka i narożach po wewnętrznej i zewnętrznej stronie łuku. Dodatkowo przedstawiono rozkład naprężenia średniego w wybranym przekroju poprzecznym znajdującym się po strefie chłodzenia wtórnego (rys. 7) oraz wyniki analizy pęknięcia (rys. 8).

Rozkład temperatury w charakterystycznych punktach wlewka ciągłego wskazuje na prawidłowe prowadzenie procesu odlewania. Pasma całkowicie można uznać za zakrzepnięte po 11 m długości metalurgicznej, co jest zgodne z praktyką odlewania wlewów ciągłych. Dodatkowe chłodzenie (rys. 4) powoduje obniżenie tem-

peratury naroży w strefie oddziaływania natrysku do wartości ok. 790°C, co może być niewystarczające do uzyskania drobnego ziarna w strefie naroży przy powierzchni pasma.

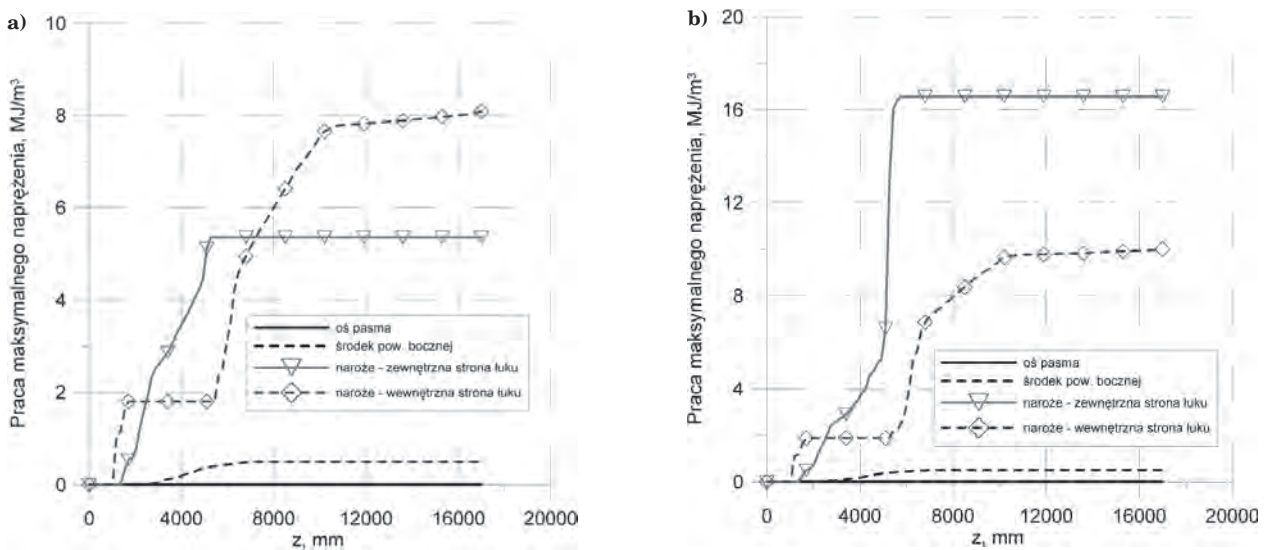
Dodatkowe chłodzenie naroży ma charakter lokalny i nie wpływa znacząco na pole temperatury w przekroju poprzecznym pasma (rys. 5). Po strefie chłodzenia wtórnego obszar ciekłej stali znajduje się w osi pasma i stanowi w przybliżeniu okrąg o średnicy 60 mm. W strefie odcinania w osi wlewka dominuje zakres temperatury 1240÷1280 °C, czyli blisko 100 °C poniżej temperatury solidusu, co wskazuje na prawidłowy przebieg procesu odlewania.

Maksymalne wartości rozciągające i ściskające naprężenia średniego zanotowano w przypadku wariantu



Rys. 7. Rozkład naprężenia średniego w przekroju poprzecznym wlewka ciągłego po strefie chłodzenia wtórnego: a) bez chłodzenia naroży; b) z dodatkowym chłodzeniem naroży

Fig. 7. Average stress distributions at the cross section of the continuously cast strand after the secondary cooling zone: a) without corners cooling, b) with additional corners cooling



Rys. 8. Wyniki obliczeń kryterium Lathama: a) bez chłodzenia naroży; b) z dodatkowym chłodzeniem naroży

Fig. 8. Results of calculations of the Latham criterion: a) without corners cooling, b) with additional corners cooling

bez chłodzenia naroży (rys. 6) i wynoszą one od -600 do blisko 800 MPa. Zastosowanie chłodzenia naroży skutkuje obniżeniem tych wartości do zakresu -400 do 700 MPa. Zarówno w przypadku osi pasma, jak i powierzchni bocznej pasma, nie zanotowano nadmiernych wartości naprężenia średniego. Analizując z kolei rozkład naprężenia średniego w przekroju poprzecznym pasma (rys. 7), podobnie jak w przypadku rozkładu temperatury, widać, że wpływ dodatkowego chłodzenia można uznać za lokalny. Niewielkie różnice usytuowane są jedynie w strefie naroży, tzn. pojawia się zakres wartości naprężenia średniego -250÷-300 MPa w przypadku naroża znajdującego się po zewnętrznej stronie łuku i 300÷350 MPa dla naroża wewnętrznego.

Prowadząc analizę możliwości powstania ewentualnych pęknięć należy nadmienić, że dopiero przepro-

wadzenie próby jednoosiowego rozciągania w szerokim zakresie temperatury może dostarczyć wiarygodnej informacji dotyczącej przekroczenia plastyczności metalu. Bez tych informacji możemy jedynie prognozować ewentualne miejsca powstawania pęknięć i jak widać na rys. 8 pokrywają się one z typowymi miejscami powstawania wad powierzchniowych w praktyce przemysłowej. Są to miejsca znajdujące się na wyjściu z krystalizatora oraz na długości około 5 m, czyli na końcu strefy chłodzenia wtórnego. W przypadku naroża znajdującego się po wewnętrznej stronie łuku, praca maksymalnego naprężenia osiąga w obu analizowanych przypadkach podobne wartości bliskie  $8 \text{ MJ/m}^3$ . Blisko dwukrotnie wyższe wartości pracy maksymalnego naprężenia zaobserwowano w przypadku naroża zewnętrznego po zastosowaniu dodatkowego chłodzenia.

Znacznie niższe wartości pracy wystąpiły w wariancie bez chłodzenia naroży, około  $5,5 \text{ MJ/m}^3$ . Tak duże różnice mogą wynikać z dużego gradientu temperatury występującego po zastosowaniu chłodzenia naroży.

#### 4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono model numeryczny naprężeń i odkształceń powstających wskutek zaginania i odginania pasma COS. Analizowano wpływ dodatkowego chłodzenia naroży na rozkład temperatury oraz naprężenia średniego. Przeprowadzono również analizę pęknięcia mającą na celu wytypowanie miejsc szczególnie narażonych na występowanie wad powierzchniowych. Obliczenia prowadzono na stacji roboczej z procesorem Intel Core i7 940. Czas obliczeń wyniósł 3,5 godziny dla jednego wariantu obliczeń.

Celem dodatkowego chłodzenia naroży jest modyfikacja mikrostruktury w warstwie przypowierzchniowej. Osiąga się to poprzez chwilowe obniżenie temperatury

i jej późniejszy powrót do wartości bliskiej początkowej. W analizowanym przypadku obniżono temperaturę do wartości około  $790^\circ\text{C}$ , co może być niewystarczające. Jednak nawet taki spadek temperatury może powodować zwiększoną podatność na pęknięcie w strefie naroży, na co wskazuje wysoka wartość pracy maksymalnego naprężenia, w przypadku naroża znajdującego się po zewnętrznej stronie łuku.

***Publikacja została opracowana na podstawie pracy wykonanej w projekcie badawczym rozwojowym nr N R07 0008 04 pt. „Opracowanie podstaw przemysłowych technologii kształtowania struktury i właściwości wyrobów z metali i stopów z wykorzystaniem symulacji fizycznej i numerycznej” finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, realizowanym przez Instytut Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica w Gliwicach (koordynator), Akademię Górniczo-Hutniczą, Politechnikę Częstochowską, Politechnikę Śląską i Politechnikę Warszawską.***

#### LITERATURA

1. Gołdasz A., Hadała B., Cebo-Rudnicka A., Malinowski Z.: Wpływ warunków chłodzenia na krzepnięcie pasma COS. Hutnik Wiadomości Hutnicze, 2011, r. 78, nr 4, s. 289-295.
2. Marcisz J., Mazur A., Adamczyk M.: Modyfikacja struktury w celu poprawy plastyczności warstwy przypowierzchniowej stalowych wlewków ciągłych metodą kontrolowanego chłodzenia natryskowego. Prace Instytutu Metalurgii Żelaza, 2010, nr 1, s. 83-89.
3. Garbarz B., Żak A., Marcisz J., Ochab K., Rachwański M.: Struktura warstwy przypowierzchniowej wlewków ciągłych ze stali niskowęglowej i możliwości jej modyfikacji. Materiały II Międzynarodowej Konferencji Ciągłe Odlewanie Stali, Krynica 2004, s. 81-89.
4. Gonzalez M., Goldschmit M.B., Assanelli A.P., Berdaguer E. F., Dvorkin E.N., Modeling of the Solidification Process in a Continuous Casting Installation for Steel Slabs, Metallurgical and Materials Transactions B, vol. 34, no. 4, 2003, pp. 455-473.
5. Meng Y., Thomas B.G., Heat-Transfer and Solidification Model of Continuous Slab Casting: CON1D, Metallurgical and Materials Transactions B, vol. 34B, 2003, pp. 685-705.
6. Hadała B., Malinowski Z., Accuracy of the finite element solution to steady convection-diffusion heat transport equation in continuous casting problem, Computer Methods in Materials Science, vol. 9, no. 2, 2009, pp. 302-308.
7. Thomas B. G., Modeling of the continuous casting of steel – past, present and future, 59th Electric Furnace Conference Proceedings, Phoenix, Iron & Steel Society, 2001, pp. 3-30.
8. Thomas B.G., Samarasekera I.V., Brimacombe J.K., Mathematical model of the thermal processing of steel ingots, part II stress model, Metallurgical and Materials Transactions B, vol. 18, no. 1, 1987, pp. 131-147.
9. Liu B.C., Kang J.W., Xiong S.M., A study on the numerical simulation of thermal stress during the solidification of shaped castings, Science and Technology of Advanced Materials, vol. 2, 2001, pp. 157-164.
10. Malinowski Z.: Numeryczne modele w przeróbce plastycznej i wymianie ciepła, AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2006.
11. Hadała B., Cebo-Rudnicka A., Malinowski Z., Gołdasz A.: The influence of thermal stresses and strand bending on surface defects formation in continuously cast strands. Archives of Metallurgy and Materials, 2011, vol. 56, iss. 2, pp. 367-377.
12. Ying-chun Wang, Da-yong Li, Ying-hong Peng, Li-guang Zhu: Computational modeling and control system of continuous casting process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, vol. 33, pp. 1-6.