

dr inż. ANDRZEJ GOŁDASZ, prof. dr hab. inż. ZBIGNIEW MALINOWSKI,
dr inż. BEATA HADAŁA, dr inż. MARCIN RYWOTYCKI
Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
agoldasz@metal.agh.edu.pl

Modelowanie pola naprężeń we wlewkę odlewanym w sposób ciągły

Stress field modeling in the continuously cast strand.

Streszczenie

W pracy przedstawiono trójwymiarowy model naprężeń i odkształceń powstających we wlewkę odlewanym w sposób ciągły. Model uwzględnia odkształcenia i naprężenia powodowane wyginaniem pasma w czasie ruchu po łuku krystalizatora i nierównomiernym polem temperatury. Rozwiązanie uzyskano metodą elementów skończonych. Testy modelu przeprowadzono dla trzech wariantów uwzględniających: tylko wyginanie pasma, tylko nierównomierne pole temperatury, łączny skutek wyginania pasma i nierównomiernego pola temperatury. Testy wykazały istotny wpływ obu czynników na rozkład naprężeń i odkształceń.

Abstract

Three dimensional model of the stress and strain fields in the continuously cast strand has been developed. The model predicts strains and stresses resulting from non uniform temperature field and the strand bending while moving along the arc of the casting machine. Three tests considering: only strand bending, only non uniform temperature field, both strand bending and non uniform temperature field have been performed. The tests have shown essential effect of both factors on the strain and stress fields.

Słowa kluczowe: ciągłe odlewanie stali, naprężenia, metoda elementów skończonych,

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

Wstęp

Modelowanie numeryczne procesu ciągłego odlewania stali jest trudne ze względu na zmiany stanu skupienia stali. Stal przechodzi z fazy ciekłej do stałej w wyniku intensywnego chłodzenia w krystalizatorze i strefach chłodzenia wtórnego. Wyznaczanie pola temperatury we wlewkę ciągłym jest stosunkowo szeroko opisane w literaturze [1-3]. Istotna jest jednak dokładność uzyskanego pola temperatury i czas obliczeń [4]. Na dokładność rozwiązania ma

wpływ model numeryczny i sposób wprowadzania warunków brzegowych. Dużo bardziej skomplikowanym zagadnieniem jest jednak określenie naprężeń powstających podczas krzepnięcia, szczególnie w strefie przejściowej przy współistnieniu fazy ciekłej i stałej, jak również w zakrzepniętej stali w wysokich temperaturach. Opracowanie pełnego modelu termomechanicznego ciągłego odlewania wymaga uwzględnienia wzajemnych interakcji pomiędzy procesami związanymi z wymianą ciepła i odkształceniami jakim poddawany jest zaginany i odginany wlewki ciągły, oraz naprężeniami tworzącymi się podczas intensywnego chłodzenia [5-7].

Model naprężeń i odkształceń

Wlewki ciągły w urządzeniu do odlewania stali odkształca się wskutek działania naprężeń cieplnych i mechanicznych wywołanych systemem rolek prowadzących. Rolki te kształtują ruch wlewki po łuku krystalizatora, powodując jego zaginanie i odginanie. W miejscach styku rolki z wlewkiem występują lokalne odkształcenia, które nie są uwzględniane w opracowanym modelu naprężeń. Nie uwzględniono również zmian pola naprężeń wynikających z odkształcenia powierzchni wlewki pod wpływem ciśnienia hydrostatycznego słupa ciekłej stali. Pomijając lokalne odkształcenia wlewki powodowane naciskiem rolek i naciskiem słupa stali ruch wlewki ciągłego można opisać za pomocą pola prędkości:

$$v_1 = 0 \quad (1)$$

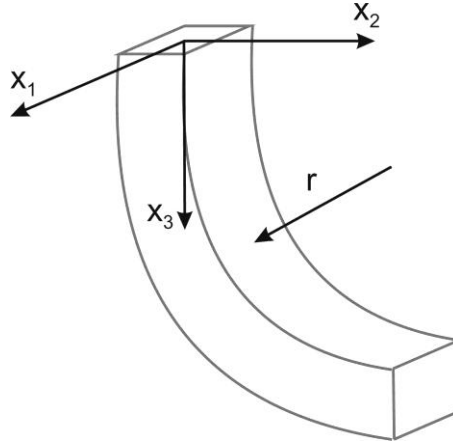
$$v_2 = \omega r \cos \varphi \quad (2)$$

$$v_3 = -\omega r \sin \varphi \quad (3)$$

W przyjętym układzie współrzędnych kierunek x_1 jest skierowany wzdłuż osi rolek prowadzących. Założono, że w tym kierunku wlewki nie przemieszcza się. Współrzędna x_2 jest równoległa do powierzchni pasma opuszczającego łuk krystalizatora, a współrzędna x_3 skierowana jest zgodnie z kierunkiem działania siły grawitacji. Początek układu współrzędnych przyjęto w środku symetrii lustra stali, rys. 1. Zmienną r oznaczono promień łuku po którym porusza się punkt materialny.

Prędkość kątowna ω punktu materialnego poruszającego się po łuku o promieniu r obliczana jest ze wzoru:

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



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

Fig. 1. Scheme of the coordinate system assumed for calculations of the stress and deformation tensors of the continuously cast strand.

Kąt φ_z związany jest z kątem łuku krystalizatora φ wzorami:

$$\varphi_z = \begin{cases} \varphi \in \left(0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{4}\right) \\ \frac{\pi}{2} - \varphi \in \left(\frac{\pi}{4} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (5)$$

Przez ω_s oznaczono prędkość kątową punktu położonego w osi symetrii pasma, a przez ω_o oznaczono prędkość kątową punktu materialnego na wejściu do łuku krystalizatora.

Współrzędne cylindryczne r, φ, z związane są ze współrzędnymi kartezjańskimi x_1, x_2, x_3 równaniami:

$$x_1 = z \quad (6)$$

$$x_2 = r_o \cos \varphi - R_k \quad (7)$$

$$x_3 = r_o \sin \varphi + L_k \quad (8)$$

Przez R_k oznaczono średni promień łuku urządzenia COS. Długość części prostej wlewka przed wejściem do łuku krystalizatora oznaczono przez L_k . Promień punktu materialnego w płaszczyźnie wejścia do łuku oznaczono przez r_o .

Różniczkując pole prędkości otrzymujemy składowe tensora prędkości deformacji d_{ij} wynikające z ruchu wlewka ciągłego w urządzeniu COS:

$$\frac{\partial v_2}{\partial x_k} = -\frac{\partial \omega}{\partial x_k} r \sin \varphi - \frac{\partial r}{\partial x_k} \omega \sin \varphi - \frac{\partial \varphi}{\partial x_k} \omega r \cos \varphi, \quad k = 2,3 \quad (9)$$

$$\frac{\partial v_3}{\partial x_k} = -\frac{\partial \omega}{\partial x_k} r \cos \varphi + \frac{\partial r}{\partial x_k} \omega \cos \varphi - \frac{\partial \varphi}{\partial x_k} \omega r \sin \varphi, \quad k = 2,3 \quad (10)$$

Przyrosty tensora odkształcenia $\Delta\varepsilon_{ij}$ powodowane sprężysto plastycznym wygięciem pasma i odkształceniami cieplnymi wywołanymi nierównomiernym polem temperatury można obliczyć ze wzoru:

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \Delta\tau d_{ij} + \Delta\varepsilon_{ij}^c \quad (11)$$

Tensor odkształceń spowodowany zaginaniem i odginaniem pasma oraz nierównomiernym polem temperatury wyznaczano sumując przyrosty tensora odkształcenia od płaszczyzny menisku stali do płaszczyzny odcięcia wlewka ciągłego:

$$\varepsilon_{ij}^{\tau+\Delta\tau} = \Delta\varepsilon_{ij} + R_{ik}\varepsilon_{kl}^{\tau}R_{jl} \quad (12)$$

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

$$R_{ij} = \delta_{ij} + \sin(\Delta\tau\omega_{ij}) \quad (13)$$

gdzie: δ_{ij} jest tensorem jednostkowym.

W analogiczny sposób obliczano tensor naprężenia:

$$\sigma_{ij}^{\tau+\Delta\tau} = \Delta\sigma_{ij} + R_{ik}\sigma_{kl}^{\tau}R_{jl} \quad (14)$$

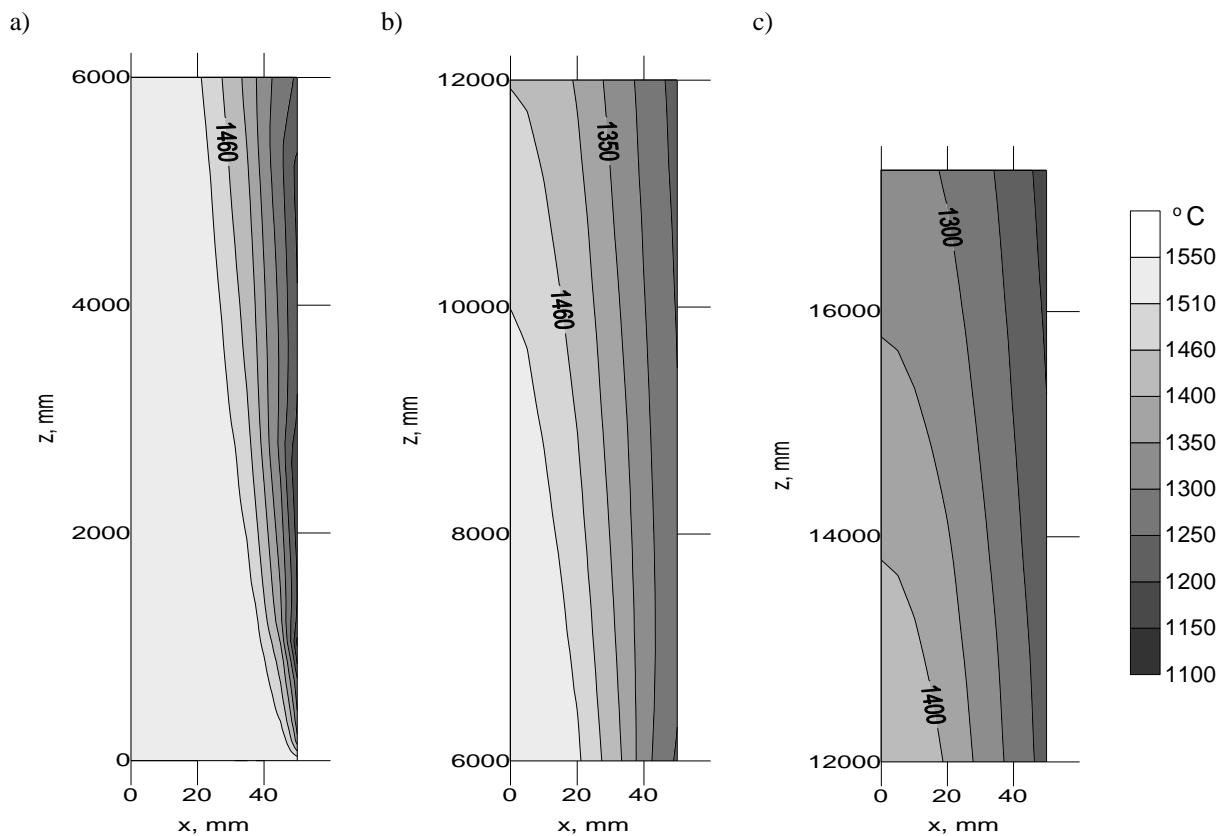
Związki przyrostów tensora naprężenia $\Delta\sigma_{ij}$ z przyrostami tensora odkształcenia $\Delta\varepsilon_{ij}$ oraz metodę wyznaczania odkształceń cieplnych $\Delta\varepsilon_{ij}^c$ przedstawiono w pracy [8]. Metodę wyznaczania pola temperatury wlewka ciągłego opisano w pracy [4]. Rozwiązanie otrzymano metodą elementów skończonych w przestrzeni 3D.

Obliczenia numeryczne

Opracowany model naprężeń testowano na przykładzie odlewania wlewków ciągłych o przekroju kwadratowym ze stali o zawartości węgla C 0,11%, manganu Mn 1,53% i krzemu Si 0,35%. Na podstawie składu chemicznego dobrano właściwości termofizyczne odlewanej stali. Temperaturę solidusu przyjęto 1460°C, likwidusu 1510°C, temperatury początku i końca przemiany w stanie stałym przyjęto odpowiednio: 890°C i 720°C. Uwzględniono zależność modułu Younga i współczynnika Poissona od temperatury. Przyjęto, że pasmo prowadzone jest po łuku o średnim promieniu 6 m z prędkością odlewania 3,3 m/min. Chłodzenie wtórne realizowane jest w 3 strefach o łącznej długości 4,5 m. Testy modelu przeprowadzono dla 3 wariantów uwzględniających:

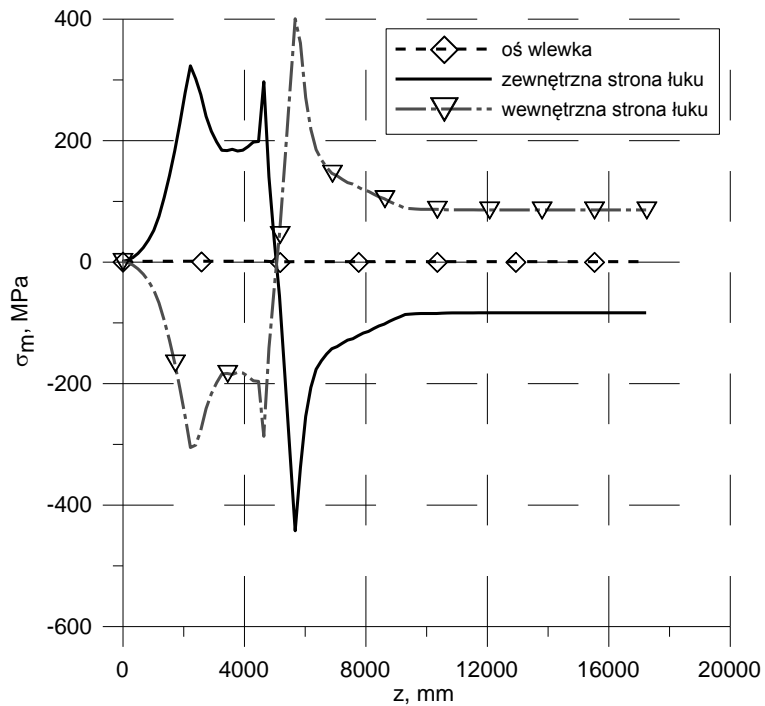
- Wariant I - zaginanie i odginanie wlewka bez naprężeń cieplnych,
- Wariant II - wyłącznie skutek naprężeń cieplnych
- Wariant III – naprężenia i odkształcenia cieplne oraz od zaginanie i odginanie wlewka

Wybrane testy umożliwiają ocenę poprawności działania modeli zastosowanych do wyznaczania naprężeń cieplnych oraz mechanicznych oddzielnie i łącznego skutku tych dwóch czynników. Na rys. 2 przedstawiono pole temperatury w przekroju wzdłużnym wlewka otrzymane za pomocą modelu wymiany ciepła przedstawionego w pracy [4]. Wykresy wykonano po wyprostowaniu i podzieleniu wlewka na 3 odcinki. Na mapach temperatury zaznaczono izotermę temperatury solidusu. Wyniki obliczeń intensywności odkształceń oraz naprężenia średniego przedstawiono na rysunkach od 3 do 7. W przypadku naprężenia średniego wyniki wyprowadzono dla charakterystycznych punktów: w osi wlewka i narożach po wewnętrznej i zewnętrznej stronie łuku. Intensywność odkształcenia przedstawiono w 2 wybranych przekrojach poprzecznych: po wyjściu z krystalizatora i po wyprostowaniu wlewka.



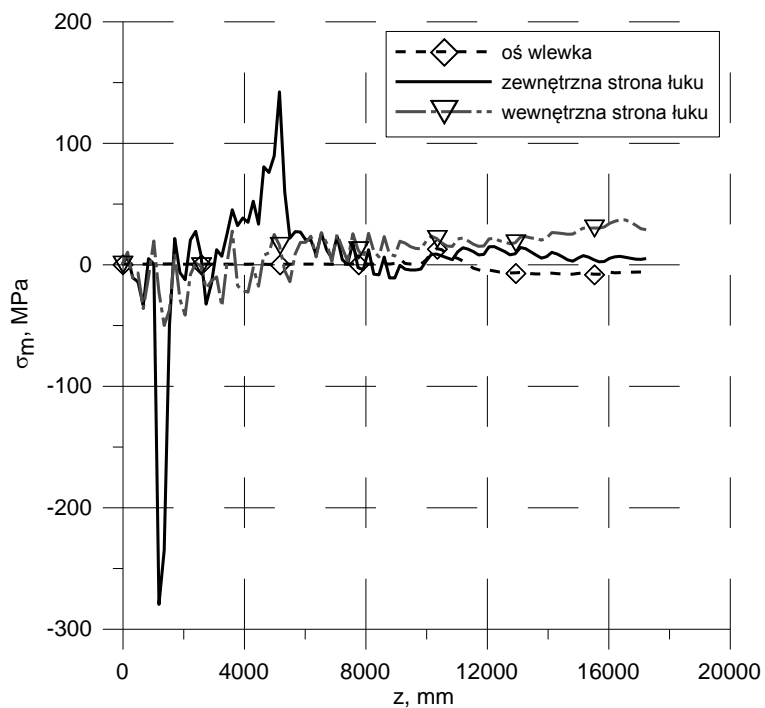
Rys. 2. Pole temperatury w przekroju wzdłużnym dla kolejnych fragmentów wlewka ciągłego.

Fig. 2. Temperature fields in the longitudinal section of the continuously cast strand for subsequent parts of the strand.



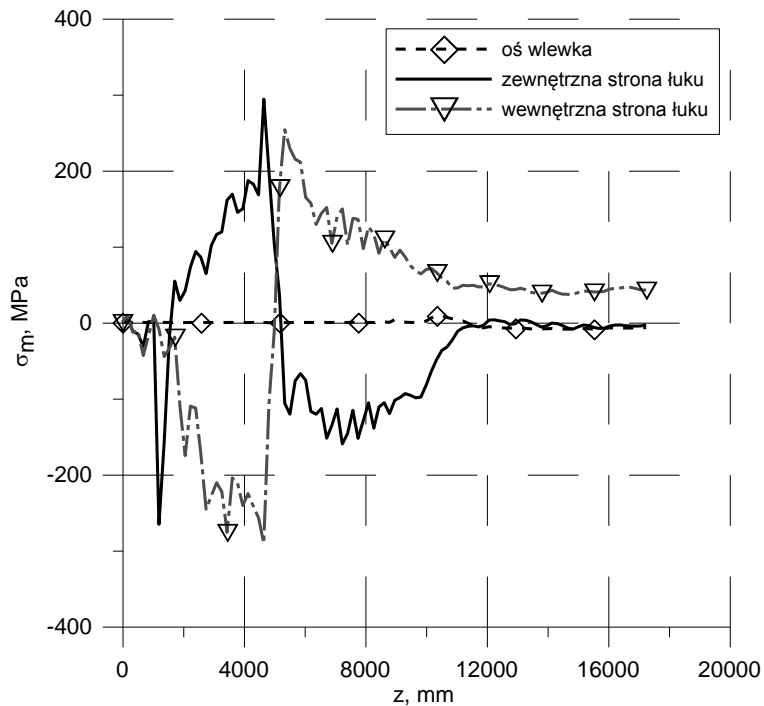
Rys. 3. Rozkłady naprężenia średniego w charakterystycznych punktach wlewa ciąglego wynikające z wyginania pasma.

Fig. 3. Average stress distributions at selected points of the continuously cast strand resulting from bending of the strand.

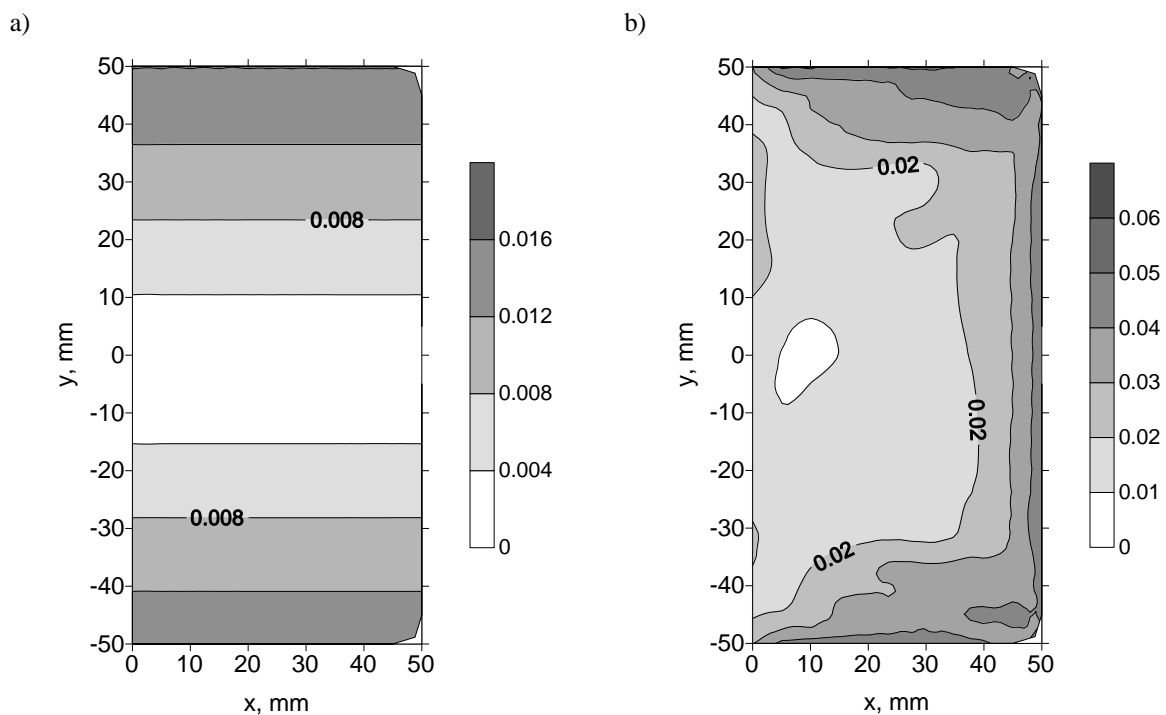


Rys. 4. Rozkłady naprężenia średniego w charakterystycznych punktach wlewa ciąglego wynikające z nierównomiernego pola temperatury.

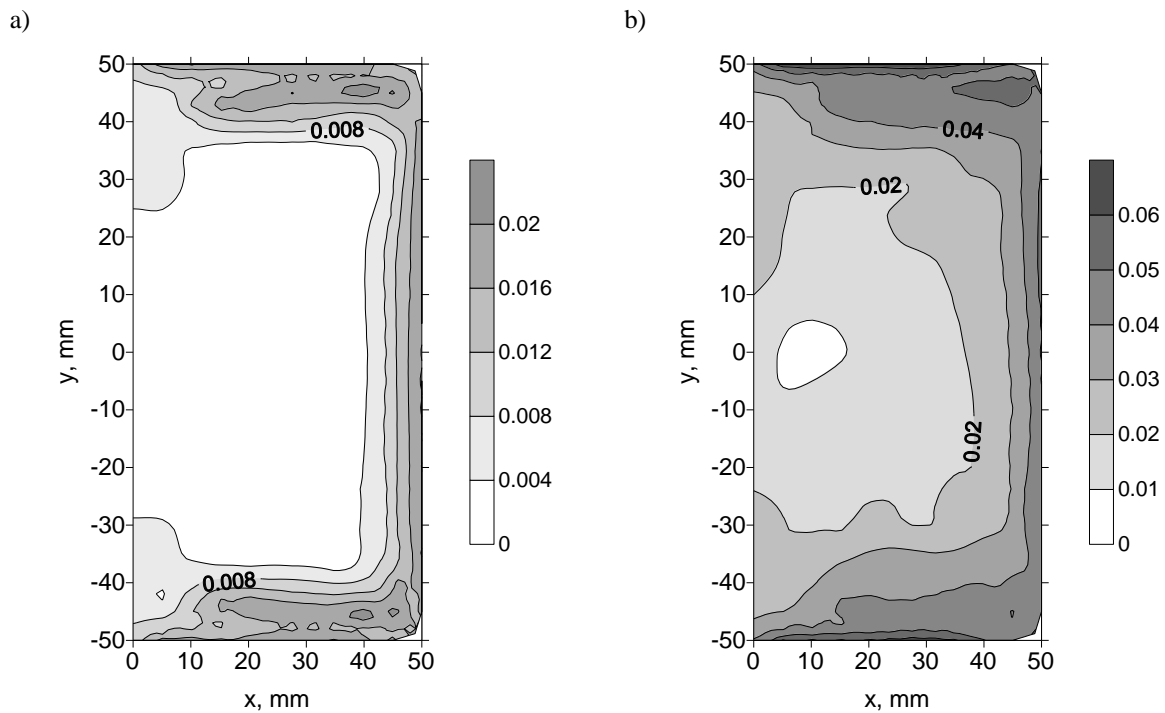
Fig. 4. Average stress distributions at selected points of the continuously cast strand resulting non uniform temperature field.



Rys. 5. Rozkłady naprężenia średniego w charakterystycznych punktach wlewka ciąglego wynikające z nierównomiernego pola temperatury i wyginania pasma.
 Fig. 5. Average stress distributions at selected points of the continuously cast strand resulting non uniform temperature field and the strand bending.



Rys. 6. Intensywność odkształcenia w przekroju poprzecznym wlewka ciąglego po wyprostowaniu pasma: a) odkształcenia wynikające z wyginania pasma, b) odkształcenia wynikające z nierównomiernego pola temperatury
 Fig. 6. Effective strain distributions in the cross section of the continuously cast strand after the strand straightening. a) deformations resulting from the strand bending. b) deformations resulting from non uniform temperature field.



Rys. 7. Intensywność odkształcenia w przekroju poprzecznym wlewka ciągłego wynikająca z nierównomiernego pola temperatury i wyginania pasma. a) po wyjściu z krystalizatora, b) po wyprostowaniu pasma.

Fig. 7. Effective strain distributions in the cross section of the continuously cast strand resulting from the strand bending and non uniform temperature field. a) below the mould, b) after the strand straightening.

Przedstawione na rys. 2 pole temperatury wskazuje, że strefa ciekłej stali kończy się w odległości około 10 m od lustra stali. Krzepnięcie w osi wlewka kończy się w odległości około 12 metrów. Po wyjściu z urządzenia COS w przekroju wlewka temperatura zmienia się od 1100 do 1350 °C. Pole temperatury wyznaczone z modelu wymiany ciepła zostało przyjęte do obliczeń odkształceń i naprężeń cieplnych.

Analizując przedstawione na rys. 3 rozkłady naprężenia średniego wynikające z wyginania pasma można zauważyć, że w osi pasma naprężenia nie występują. Powierzchnia wlewka od zewnętrznej strony łuku jest rozciągana do połowy długości łuku a następnie znak naprężenia średniego zmienia się na ściskający. Odwrotny przebieg ma naprężenie średnie od strony wewnętrznej łuku krystalizatora. Rozkład naprężeń jest symetryczny i typowy dla zginania pasma. Przedstawione na rys. 6a rozkłady intensywności odkształcenia są również symetryczne. Maksymalne wartości 0.016 intensywność odkształceń osiąga na powierzchni wlewka. Odkształcenia powodowane wyginaniem pasma nie osiągają wysokich wartości, ale powodują przejście powierzchni pasma w stan plastyczny. Nierównomierne pole temperatury powoduje dalszą deformację wlewka i intensywność odkształcenia osiąga maksymalnie około

0.06 w warstwach powierzchniowych, rys. 6. Ponieważ odkształcenia cieplne są zdecydowanie wyższe od wywołanych wyginaniem pasma, przedstawiony na rys. 7 łączny skutek obu czynników jest podobny do rozkładu intensywności odkształceń cieplnych, rys. 6. Przebieg naprężenia średniego jest jednak zdeterminowany wyginaniem pasma, w rezultacie przedstawione na rys. 4, naprężenie średnie wywołane nierównomiernym polem temperatury zmienia w pewnym stopniu końcowy rozkład naprężenia średniego, rys. 5, ale rozkład pozostaje podobny do wyniku uzyskanego z modelu wyginania pasma. Można to wyjaśnić, uplastycznieniem materiału w wyniku wyginania i dalszym płynięciem plastycznym bez istotnej zmiany rozkładu i wartości naprężenia średniego. Najwyższe wartości naprężenia średniego w przypadku naroży nie przekraczają wartości ± 400 MPa (rys. 5).

Podsumowanie i wnioski

Symulacje numeryczne wykonywano na stacji roboczej z procesorem Intel Core i7 940. Najdłuższy czas obliczeń nie przekraczał 3,5 godziny. W przypadku uwzględnienia tylko zaginania i odginania wlewka czas obliczeń wynosił około 0,5 minuty. Wyznaczenie pola temperatury zajmowało około 18 minut. Opracowany model odkształceń i naprężeń umożliwia prowadzenie obliczeń dla wielu wariantów, a tym samym powstają realne możliwości analizowania wpływu parametrów odlewania na pole temperatury, odkształceń i naprężeń.

Uzyskany rozkład naprężenia średniego w punktach charakterystycznych wykazuje poprawny przebieg zmian. Największy wpływ na naprężenie średnie ma odginanie i zaginanie wlewka ciągłego. Najwyższe wartości naprężenia średniego w tym przypadku osiągają około ± 400 MPa. Dominujący wpływ na rozkład intensywności odkształcenia wykazują naprężenia cieplne. Największym odkształceniom podlegają warstwy powierzchniowe wlewka. Strefy maksymalnych odkształceń zlokalizowane są przy powierzchni wlewka. W całym okresie krzepnięcia i stygnięcia wlewka najniższe wartości intensywności odkształcenia występują w osi wlewka. Wyznaczone rozkłady naprężeń i odkształceń w połączeniu z kryterium pęknięcia mogą być podstawą do analizy powstawania pęknięć w krzepnącym wlewku COS.

Literatura

- [1] Gonzalez M., Goldschmit M.B., Assanelli A.P., Berdagger 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.

- [2] Janik M., Dyja H., Modelling of three-dimensional temperature field inside the mould during continuous casting of steel, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 157-158, 2004, pp. 177-182.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Malinowski Z., *Numeryczne modele w przeróbce plastycznej i wymianie ciepła*, AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2006.

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