

Mariusz BORECKI

Instytut Metalurgii Żelaza im. St. Staszica

NUMERYCZNA SYMULACJA ROZTAPIANIA DRUTÓW ALUMINIOWYCH WPROWADZANYCH DO CIEKŁEJ STALI

Przedstawiono wyniki numerycznej symulacji roztapiania drutów aluminiowych wprowadzanych do ciekłej stali. Do obliczeń wykorzystano program Calco-MOS przeznaczony do symulacji ciągłego odlewania stali. Uznano, że proces ciągłego odlewania, czyli ciągłego krzepnięcia stali, jest odwrotny do procesu ciągłego roztapiania metalu, który ma miejsce podczas wprowadzania drutów do stali. W związku z tym program powinien dobrze modelować roztapianie drutów wprowadzanych do ciekłej stali. Właściwości termofizyczne niezbędne do obliczeń wyznaczono za pomocą programu JMatPro, a współczynnik wymiany ciepła między drutem, a warstwą zakrzepłej na nim stali wyznaczono eksperymentalnie korzystając z wyników doświadczeń laboratoryjnych i pomocniczego modelu numerycznego. Obliczenia wykonano dla drutów o średnicy 10 i 13 mm wprowadzanych do kadzi z różną prędkością w zakresie od 60 do 150 m/min w różnych temperaturach. Na tej podstawie wyznaczono czas i głębokość roztapiania się drutów w kadzi. Uzyskane wyniki porównano ze skutecznością odtleniania stali drutem aluminiowym, wprowadzanym do kadzi z różną prędkością w warunkach przemysłowych.

Słowa kluczowe: drut aluminiowy, odtlenianie, symulacja numeryczna

NUMERICAL SIMULATION OF ALUMINIUM WIRE MELTING DURING INTRODUCING TO LIQUID STEEL

The results of numerical simulation of melting the aluminium wires introduced into liquid steel are presented. For calculations the CalcoMOS software designed for simulation of continuous casting of steel was used. It was assumed that the process of continuous casting – or continuous solidification of steel is opposite to the process of continuous melting of metal, which takes place during the introduction of aluminium wires into liquid steel. Thus, the program should model the melting of aluminium wires introduced into liquid steel. The thermo-physical properties necessary for calculations were determined using JMatPro program and the coefficient of heat transfer between the wire and the solid steel layer on it was determined using the results of laboratory experiences and the auxiliary numerical model. The calculations were made for wires with diameters of 10 and 13 mm introduced into the ladle with different speed varying from 60 to 150 m/min and at different temperatures. Based on this, the time and depth of wire melting in the ladle were determined. The obtained results were compared to the effectiveness of deoxidizing the steel with aluminium wire introduced into ladle with different speeds under the industrial conditions.

Key words: aluminium wire, deoxidation, numerical simulation

1. WPROWADZENIE

Właściwa prędkość wprowadzania do kadzi dodatków w postaci drutów, zarówno litych jak i rdzeniowych, warunkuje pełne wykorzystanie zalet, jakie niesie ze sobą ta technologia. Najlepsze efekty uzyskuje się wówczas, gdy roztopienie drutu nastąpi w pobliżu dna kadzi. W praktyce produkcyjnej zagadnienie odpowiedniego doboru prędkości wprowadzania drutów w wielu przypadkach nie jest traktowane z należytą uwagą. Dotyczy to zwłaszcza drutów aluminiowych, które są powszechnie stosowane do końcowego, precyzyjnego odtleniania stali. W publikacjach poświęconych obliczeniom czasu roztapiania się drutów aluminiowych widoczne są duże rozbieżności odnośnie wpływu na ten proces parametrów technologicznych, takich jak: prędkość i kąt wprowadzania, średnica drutu, temperatura stali itp. Wszystkie te względy były przesłanką do podjęcia prac nad opracowaniem numerycznego

modelu, które pozwoliłyby zweryfikować dane zawarte w poszczególnych publikacjach i jednocześnie określić parametry konieczne do prawidłowego zaprojektowania technologii odtleniania stali drutem aluminiowym w warunkach krajowych stalowni. Wobec braku na rynku komercyjnych programów dedykowanych do symulacji procesu wprowadzania drutu do ciekłej stali, który można określić jako proces ciągłego roztapiania metalu, podjęto próbę przystosowania do tego celu programu dedykowanego do modelowania procesu ciągłego odlewania metali, czyli odwrotnego, niż ma miejsce w przypadku drutów wprowadzanych do ciekłej stali. Oba procesy różnią się w pewnych elementach na tyle istotnie, że dostosowanie programu dedykowanego do procesu ciągłego odlewania wymagało pewnych uproszczeń, ale nie miały one wpływu na samą istotę symulowanego procesu. Obecność na rynku zaawansowanych i rozbudowanych programów komercyjnych do modelowania procesów COS uzasadnia takie postępowanie

pod warunkiem odpowiedniego przystosowania programu do liczenia zjawisk odwrotnych niż te, do których został stworzony.

Do obliczeń wykorzystano komercyjne oprogramowanie CalcoMOS, przeznaczone głównie do symulowania procesu ciągłego odlewania stali i innych metali. Program charakteryzuje się dużą swobodą pod względem definiowania problemu, a zarazem uwzględnia wiele parametrów i czynników wpływających na proces, które można zadeklarować wprost lub w postaci funkcji zależnej od temperatury, czasu lub miejsca. Pozwoliło to na opracowanie elastycznego i przydatnego dla celów technologicznych narzędzia do określania głębokości, na jakiej roztopi się drut aluminiowy wprowadzany do ciekłej stali podczas obróbki kadziowej, w różnych warunkach produkcyjnych. Należy zaznaczyć, że idea zastosowania programu do zadania odwrotnego niż pierwotnie założony była konsultowana z twórcami oprogramowania, którzy potwierdzili zasadność takiego zastosowania.

2. NUMERYCZNY MODEL ROZTAPIANIA DRUTÓW ALUMINIOWYCH

2.1. OPROGRAMOWANIE CALCOMOS

Program CalcoMos jest produktem szwajcarskiej firmy Calcom (obecnie stanowiącej część międzynarodowej firmy ESI Group z siedzibą w Paryżu), którego podstawowym zastosowaniem jest numeryczne symulowanie procesu ciągłego odlewania metali w oparciu o metodę elementów skończonych – FE (Finite Elements), a także bardziej złożone obliczenia (np. makrostruktury krzepnącego wlewka) tzw. metodą CA-FE będącej połączeniem algorytmów: automatu komórkowego (CA – Cellular Automata) i elementów skończonych (FE – Finite Elements) [1, 2].

Oprogramowanie CalcoMOS to zestaw modułów obliczeniowych (wymiana ciepła, przepływ cieczy, transport fazy stałej, krystalizacja, segregacja i inne). Omawiana wersja programu umożliwia obliczenia w dwóch wymiarach. Istnieje jednak możliwość zdefiniowania zadania w układzie osiowo-symetrycznym, co w przypadkach roztopiania drutu umożliwia zadowalające oddanie trójwymiarowej rzeczywistości.

Zdefiniowanie zadania obliczeniowego w systemie CalcoMOS wymaga następujących kolejnych czynności:

- określenia układu współrzędnych (kartezjański, biegunowy),
- zadeklarowania wymiarów obiektu i określenia sposobu jego zdefiniowania,
- zdefiniowania występujących w modelu domen (obszarów o wspólnych parametrach odnośnie ruchu i właściwości termofizycznych) i ewentualnych poddomen (np. wydzielonych obszarów w ramach jednej domeny dla których pożądane jest np. zastosowanie odmiennych parametrów siatki) oraz wykreślenia ich za pomocą narzędzi modułu preprocesora systemu CalcoMOS,
- określenia i oznaczenia granic między domenami, do których będą przypisane właściwe warunki brzegowe,
- wyboru rodzaju, charakterystyki i gęstości siatki dla poszczególnych domen i poddomen,

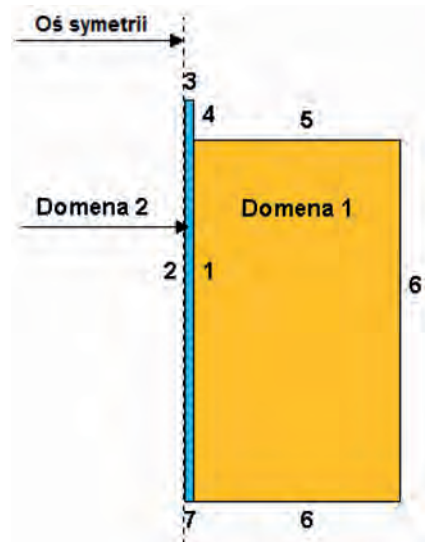
- połączenia poddomen (o ile je zdefiniowano), co pozwoli traktować je pod względem fizycznym jak jedną całość, ale odmiennie pod względem programowym (różne parametry siatki i/lub różny zakres obliczeń),
- określenia w plikach konfiguracyjnych warunków początkowych, warunków brzegowych pomiędzy domenami oraz na zewnętrznej granicy symulowanego układu, a także parametrów opisujących właściwości poszczególnych domen.

2.2. CHARAKTERYSTYKA MODELU ROZTAPIANIA ALUMINIOWYCH DRUTÓW

Model kadzi wraz z wprowadzającym do niej drutem skonstruowano w taki sposób, aby zminimalizować ilość obliczeń, które co prawda odzwierciedlają rzeczywistość, ale nie wpływają istotnie na zjawiska będące zasadniczym celem modelowania. Do tego typu zjawisk zaliczyć należy wymianę ciepła pomiędzy ciekłą stalą i wymurówką kadzi lub też pomiędzy stalą i żużłem. Jednakże nadając poszczególnym granicom odmienny identyfikator stworzono możliwość rozbudowy modelu w przyszłości.

Stosownie do wspomnianych już wymagań stawianych przez oprogramowanie CalcoMOS w modelu roztopiania drutu Al zadeklarowano następujące cechy:

- układ współrzędnych – biegunowy (obiekt osiowo-symetryczny),
- wymiary modelu – wysokość 4000 mm, szerokość 1500 mm,
- domeny – dwie: drut i ciekła stal (rys. 1),
- granice zewnętrzne modelu i między domenami – siedem granic z zastosowaniem różnych typów warunków brzegowych (rys. 1).



Rys. 1. Schematyczna budowa modelu roztopiania drutu
Fig. 1. Schematic structure of wire melting model

Tworzony z myślą o stosowaniu do ciągłego odlewania metali program nie przewiduje wymiany masy między domenami, czyli mieszania (rozcieńczania) się składników zawartych w odrębnych domenach. W związku z tym zastosowano konstrukcję modelu niewymagającą wymiany masy między domenami. Aluminium wprowadzane w postaci drutu od góry jest następnie, po przebyciu całej wysokości kadzi, odprowadzane przez

Tablica 1. Ważniejsze parametry termofizyczne dla wybranych temperatur zastosowane w obliczeniach symulacyjnych.

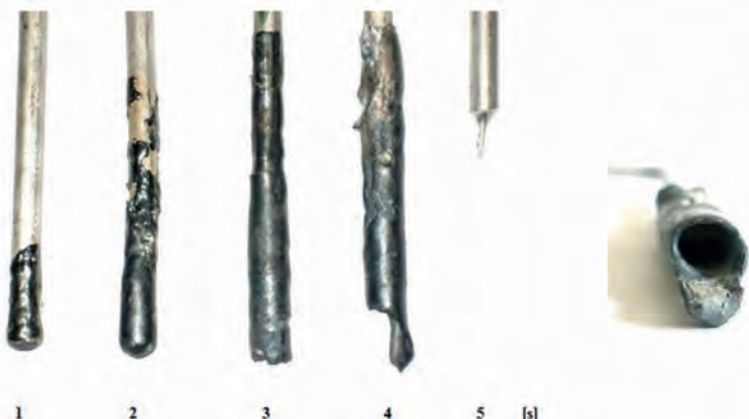
Table 1. Major thermo-physical properties applied in calculations for selected temperatures

Parametr	Aluminium		Stal	
	wartość	w temp. [°C]	wartość	w temp. [°C]
Gęstość [kg/m ³]	2726 2400	20 700	7856 6959	20 1600
Przewodność cieplna [W/mK]	218,1 88,9	20 700	52,7 35,2	20 1600
Ciepło właściwe [J/m ³ K]	2 476 925 2 803 357	20 700	3 509 409 5 740 433	20 1600
Lepkość [kg/m·s]	0,00292752 0,00123113	550 700	0,0063436 0,0058716	1550 1600
Solidus		544		1493
Likwidus		655		1532

jej dno (rys. 1). Zastosowane do obliczeń parametry odnoszące się do aluminium i stali, takie jak ułamek objętościowy fazy stałej, ciepło właściwe, przewodność cieplna, gęstość i lepkość wyznaczone zostały w funkcji temperatury za pomocą programu JMatPro 4.0, opracowanego przez brytyjskie firmy Thermotech Ltd. i Sente Software Ltd. (tablica 1).

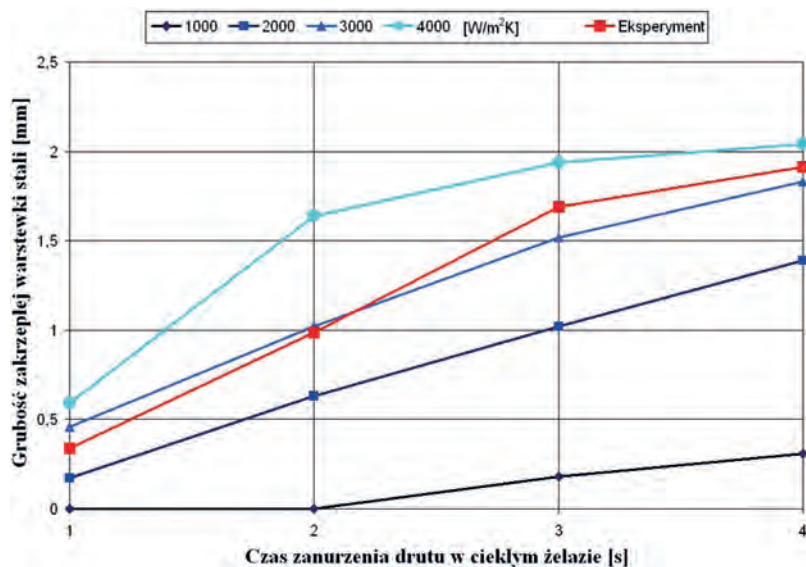
Najważniejszym i jednocześnie najtrudniejszym do ustalenia parametrem był współczynnik wymiany ciepła pomiędzy drutem i zakrzepłą na nim warstwą stali. Na tej granicy zachodzi wymiana ciepła w warunkach kontaktu niedoskonałego dwóch ciał w stanie stałym.

W takich warunkach, złożonej wymiany ciepła według różnych mechanizmów (przewodzenie, radiacja), należy się liczyć z silną zależnością współczynnika wymiany ciepła od konkretnych warunków (czystość powierzchni drutu, temperatura stali). W związku z tym wartość współczynnika wymiany ciepła została oszacowana eksperymentalnie, z wykorzystaniem pomocniczego modelu oraz wyników eksperymentu fizycznego (rys. 2). Przedstawione na (rys. 3) dane wskazują, że przy współczynniku wymiany ciepła wynoszącym ok. 3000 W/m²K program generuje wyniki bliskie rzeczywistości.



Rys. 2. Druty aluminiowe zanurzone w ciekłym żelazie o temp. 1600°C na czas od 1 do 5 sekund

Fig. 2. Aluminium wires dipped in liquid iron at 1600°C for duration from 1 to 5 seconds



Rys. 3. Obliczona grubość zakrzepłej na drucie warstwy stali oraz grubość określona w wyniku eksperymentu fizycznego

Fig. 3. Calculated thickness of steel layer solidified on wire and thickness determined as a result of physical experiment

3. WYNIKI OBLICZEŃ MODELOWYCH

3.1. ZAKRES OBLICZEŃ I OBRÓBKA WYNIKÓW

Obliczenia symulacyjne wykonywano dla drutów aluminiowych o dwóch, najczęściej spotykanych w krajowych stalowniach średnicach, to znaczy 10 i 13 mm. Dla każdej z tych średnic obliczenia wykonano w trzech temperaturach 1570°C, 1600°C i 1630°C, co odpowiada przegrzaniu stali o ok. 40°C, 70°C i 100°C. Obliczenia dla każdego z tych wariantów wykonano dla 10 różnych prędkości wprowadzania drutu (od 60 do 150 m/min, co 10 m/min). W sumie wykonano 60 symulacji.

Wyniki obliczeń odczytywano z ekranu postprocesora, określając głębokość na jakiej nastąpił:

- początek roztopienia aluminium,
- koniec roztopienia aluminium,
- koniec roztopienia zakrzepłej na drucie warstwy stali.

Przykładowy fragment ekranu postprocesora, na którym można zauważyć początek roztopiania się aluminium (zaznaczony czerwoną linią) zaprezentowano na (rys. 4).



Rys. 4. Wyniki obliczeń – początek roztopiania się aluminium.

Fig. 4. Results of calculations – beginning of aluminium melting

Dla różnych parametrów procesu obliczono głębokość roztopienia się drutu. W przypadku, gdy drut nie roztopił się przed dotarciem do dna kadzi, obliczonej głębokości nadawano wartość ujemną, która wskazu-

je w jakiej odległości „pod dnem kadzi” roztopiłby się drut. Jest to z technologicznego punktu widzenia użyteczny parametr, który wskazuje odpowiednią korektę technologii wprowadzania drutu (np. zmniejszenie szybkości wprowadzania drutu lub zmniejszenie jego średnicy).

3.2. REZULTATY OBLICZEŃ

Przykładowe wyniki obliczeń dla drutu o średnicy 10 mm wprowadzanego do stali o temperaturze 1600°C zamieszczono w (tabl. 2). Przy największych prędkościach warstewka zakrzepła na drucie nie roztopiła się nawet na głębokości 4 metrów (wysokość modelu) stąd brak wartości w tych przypadkach. Na (rys. 5) przedstawiono wpływ temperatury i prędkości wprowadzania drutu o średnicy 10 mm na czas jego całkowitego roztopienia się. Podobne tendencje wystąpiły w przypadku drutów o średnicy 13 mm.

Z obliczeń wynika również, że temperatura stali i prędkość wprowadzania drutu najsilniej wpływają na czas roztopiania się warstewki stali zakrzepłej na drucie, słabiej wpływają na czas końca roztopienia aluminium, a w niewielkim tylko stopniu wpływają na czas, w którym aluminium zaczyna się roztopiać (tabl. 2).

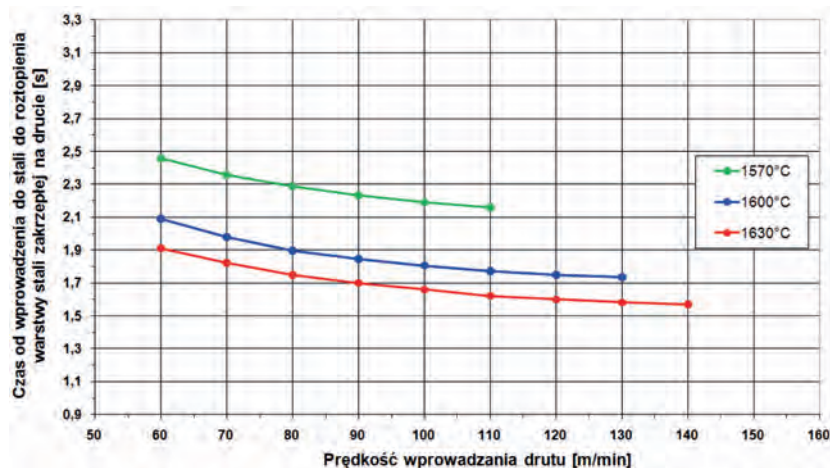
4. WERYFIKACJA PRZEMYSŁOWA MODELU

Celem zweryfikowania obliczeń modelowych wykonano serię prób przemysłowych. Drut o średnicy 10 mm wprowadzany był zgodnie ze zwyczajową praktyką do kadzi stalowniczej za wyjątkiem prędkości wprowadzania, która była zmieniana w zakresie od 60 do 150 m/min. Podczas prób mierzono aktywności tlenu w stali bezpośrednio przed wprowadzeniem aluminium, a następnie po wprowadzeniu i jednoczasowym mieszanju argonem. Na tej podstawie dla każdego wytopu obliczono średni spadek aktywności tlenu na 1 kg glinu wprowadzonego na tonę stali przy danej prędkości wprowadzania drutu. Wyniki prób przemysłowych zestawiono z wynikami obliczeń modelowych (rys. 6). Oddalenie od dna (przybierające wartość ujemną w przypadku

Tablica 2. Wyniki obliczeń dla drutu o średnicy 10 mm – temperatura stali 1600°C

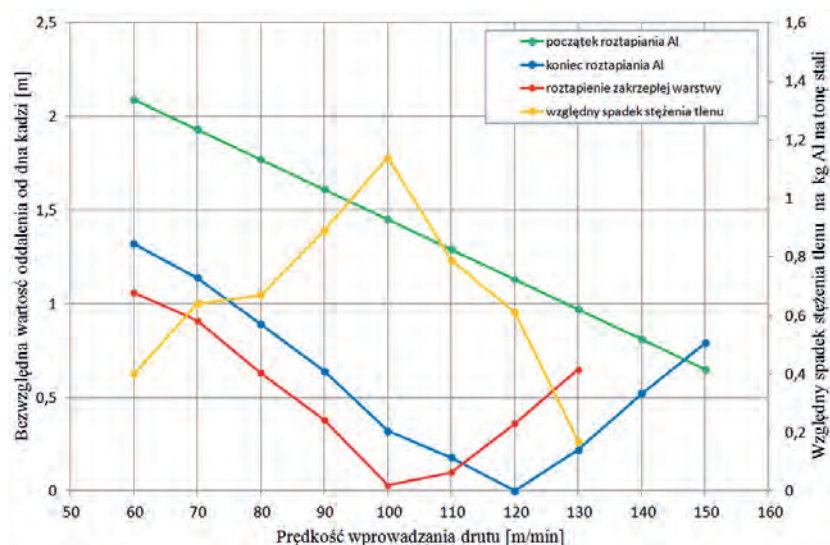
Table 2. Calculation results for wire with diameter of 10 mm – steel temperature 1600°C

Prędkość wprowadzania drutu	Głębokość			Czas po którym następuje		
	początku roztopienia aluminium	końca roztopienia aluminium	roztopienia warstewki stali	początek roztopienia aluminium	koniec roztopienia aluminium	roztopienie warstewki stali
[m/s]	[m]	[m]	[m]	[s]	[s]	[s]
60	1,11	1,85	2,09	1,110	1,850	2,090
70	1,27	2,07	2,31	1,089	1,774	1,980
80	1,43	2,29	2,53	1,073	1,718	1,898
90	1,59	2,53	2,77	1,060	1,687	1,847
100	1,75	2,76	3,01	1,050	1,656	1,806
110	1,91	2,99	3,25	1,042	1,631	1,773
120	2,07	3,24	3,50	1,035	1,620	1,750
130	2,23	3,48	3,76	1,029	1,606	1,735
140	2,39	3,72	–	1,024	1,594	–
150	2,55	3,99	–	1,020	1,596	–



Rys. 5. Czas roztapiania warstwy stali zakrzepłej na drucie w zależności od temperatury drutu i prędkości wprowadzania drutu

Fig. 5. Melting time of steel layer solidified on wire depending on steel temperature and speed of wire introduction



Rys. 6. Bezwzględna odległość od dna kadzi w jakiej roztapia się drut i względny spadek stężenia tlenu w stali podczas eksperymentów przemysłowych przy różnej prędkości wprowadzania drutu

Fig. 6. Absolute distance from bottom of the ladle in which wire is melting and relative decrease in oxygen concentration in steel during industrial experiments conducted at different speeds of wire introduction

zajścia zjawiska „pod dnem kadzi” jak w tablicy 2), wyrażono w liczbach bezwzględnych.

Z porównania tego wyniku, że głębokość na jakiej roztopi się drut według obliczeń modelowych jest skorelowany z efektywnością odtleniania stali podczas prób przemysłowych. Najlepszą efektywność odtleniania uzyskano dla prędkości, która według obliczeń modelowych, powinna zapewnić uwolnienie aluminium do kąpieli (w wyniku roztopienia się warstewki stali zakrzepłej na drucie) przy dnie kadzi, co pozwala uznać wyniki generowane przez model za bliskie rzeczywistości. W miarę zwiększania lub zmniejszania prędkości wprowadzania drutu efektywność odtleniania spada.

5. PODSUMOWANIE

Wykorzystując oprogramowanie stworzone głównie z myślą o numerycznej symulacji procesu ciągłego odlewania metali zdefiniowano model procesu wprowadzania drutu aluminiowego do ciekłej stali. Celem tego

było stworzenie narzędzia do wyznaczania właściwej prędkości wprowadzania drutu w zależności od warunków techniczno-technologicznych. Z zastosowaniem modelu wykonano 60 symulacji obejmujących średnice drutu 10 mm i 13 mm wprowadzanych do stali o różnej temperaturze i z zastosowaniem zmiennej prędkości wprowadzania. Z obliczeń wynika, że temperatura stali i prędkość wprowadzania drutu najsilniej wpływają na czas roztapiania się warstewki stali zakrzepłej na drucie, słabiej wpływają na czas końca roztapiania aluminium, a w niewielkim tylko stopniu wpływają na czas, w którym aluminium zaczyna się roztopiać.

Weryfikację wyników obliczeń modelowych wykonano bazując na zależności pomiędzy prędkością wprowadzania drutu (głębokością uwolnienia aluminium), a efektywnością odtleniania stali. Zestawienie wyników prób przemysłowych i obliczeń numerycznych wykazało dużą zgodność otrzymanych rezultatów. Najwyższy spadek stężenia tlenu w stali ma miejsce przy prędkości, która według modelu powoduje roztopienie się warstewki stali zakrzepłej na drucie przy dnie kadzi.

LITERATURA

1. Gandin Ch.-A., Rappaz M.: A coupled finite element-cellular automaton model for the prediction of dendritic grain structures in solidification processes, Acta metal. mater. Vol 42, nr 7, 1994, s. 2233–2246

2. Rappaz M., Gandin Ch.-A.: Probabilistic modeling of microstructure formation in solidification processes, Acta metal. mater. Vol 41, nr 2, 1993, s. 345–360