

Harald KANIA

Instytut Metalurgii Żelaza

Marian RACHWAŁSKI

Ferrostal Łabędy Sp. z o.o.

OPTYMALIZACJA PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH W CELU POPRAWY JAKOŚCI POWIERZCHNI WLEWKA CIĄGŁEGO O PRZEKROJU KOŁOWYM ODLEWANEGO ZE STALI C45

Artykuł poświęcony jest zagadnieniu poprawy jakości powierzchni wlewka ciągłego o przekroju \varnothing 170 mm odlewano ze stali C45. Poprawę jakości powierzchni można uzyskać sterując wartościami parametrów technologicznych odpowiedzialnych za intensywność smarowania naskórka wlewka w krystalizatorze. Na podstawie doświadczalnego odlewania wytopów ze stali średniowęglowej C45 stwierdzono, że istnieją zależności między parametrami mieszania elektromagnetycznego, właściwościami fizykochemicznymi zasyпки krystalizatorowej a intensywnością smarowania naskórka wlewka ciągłego.

Słowa kluczowe: COS, wlewek okrągły, zasyпка krystalizatorowa, smarowanie

OPTIMISATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS TO IMPROVE SURFACE QUALITY OF CONTINUOUS CAST ROUND BILLETS FROM C45 STEEL

The article is devoted to the issue of improvement in surface quality of continuous cast round billets of \varnothing 170 mm cast from C45 steel. The surface quality improvement can be obtained by control of process parameters responsible for intensity of round billets lubrication in the mould. Based on the experimental casting of heats from C45 medium-carbon steel it was found that there were relationships between the electromagnetic stirrer parameters, physicochemical properties of mould powder and intensity of round billet skin lubrication.

Key words: continuous casting, round billets, mould powder, lubrication

1. WPROWADZENIE

Podczas realizowanego w Instytucie Metalurgii Żelaza projektu rozwojowego nr N R07 0021 06 finansowanego przez NCBiR [1], prowadzono doświadczenia przemysłowe mające na celu zoptymalizowanie parametrów mieszania elektromagnetycznego wlewków ciągłych o przekroju \varnothing 170 mm. Dane literaturowe [2] wskazują, że mieszadła elektromagnetyczne usytuowane w obszarze krystalizatora (tzw. M-EMS), stwarzają największe możliwości oddziaływania na jakość wlewka ciągłego (Tab. 1). Prawidłowo dobrane wartości parametrów tych mieszadeł (natężenie i częstotliwość prądu wzbudnika, położenie względem menisku), zapewniają równomierny na całym obwodzie krystalizatora przepływ ciepła z ciekłego rdzenia wlewka ciągłego do wody chłodzącej ścianki krystalizatora. Mieszadła M-EMS należy zatem traktować jako jeden z ważniejszych czynników wpływających na proces smarowania naskórka i kształtowania się powierzchni wlewka ciągłego w krystalizatorze.

Innymi czynnikami odpowiedzialnymi za intensywność smarowania i jakość powierzchni wlewka ciągłego są:

- właściwości fizykochemiczne zasyпки krystalizatorowej,
- parametry oscylacji krystalizatora,
- prędkość odlewania,
- głębokość zanurzenia wylewów.

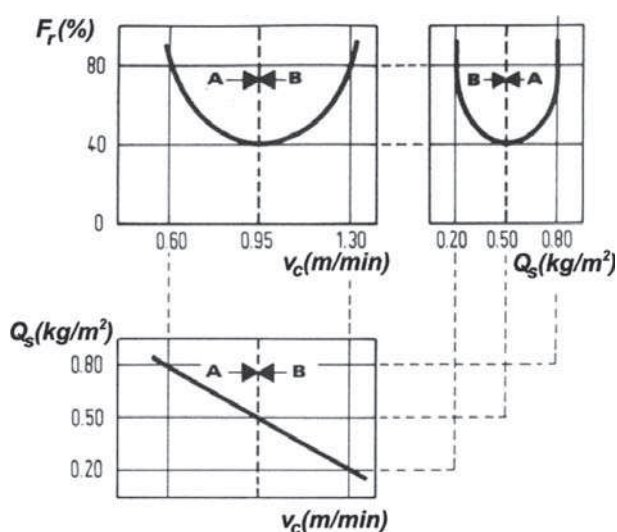
Jednym z kryteriów służących do oceny intensywności smarowania Q_s naskórka wlewka ciągłego są wyniki z pomiarów głębokości fazy ciekłej żużla krystalizatorowego d_p . Wyniki te pozwalają również określić stopień oddziaływania wybranego parametru technologicznego na proces smarowania powierzchni wlewka ciągłego.

Pomiary i analiza wyników tarcia w krystalizatorze przeprowadzona w pracy [3] wykazała, że istnieje związek pomiędzy prędkością odlewania a intensywnością smarowania (zużyciem zasyпки krystalizatorowej) oraz siłami tarcia w krystalizatorze.

Z przebiegu krzywych na rys. 1 wynikają następujące zależności:

Tabela 1. Wpływ oddziaływania rodzaju mieszadła elektromagnetycznego na eliminację wad wlewka ciągłego [2]
 Table 1. The influence of the effect of electromagnetic stirrer type on elimination of billets defects [2]

Wada wlewka	Rodzaj mieszadła		
	M-EMS	S-EMS	F-EMS
Zażuzlenia powierzchni wlewka	X		
Drobne pęcherzyki	X		
Wtrącenia podpowierzchniowe	X		
Pęcherze	X		
Przerwania i nieciągłości (pęknięcia) wlewka	X		
Struktura kolumnowa (zmniejszenie)	X	X	
Pęknięcia wewnętrzne	X	X	
Segregacja osiowa	X	X	X
Rzadziły poosiowe	X	X	X
Segregacja V			X



Rys. 1. Zależność pomiędzy tarcieniem F_r , intensywnością smarowania zasypki krystalizatorowej Q_s i prędkością odlewania v_c , [3]

Fig. 1. Relationship between friction F_r , intensity of mould powder lubrication Q_s and casting speed v_c , [3]

- część **A** – charakteryzuje zakres niższych prędkości odlewania w których zużycie zasypki rośnie $Q_s \uparrow$ (lepsze smarowanie), pomimo tego wskutek rosnącego naprężenia ścinającego żuźla zwiększa się tarcie $F_r \uparrow$,
- część **B** – charakteryzuje zakres wyższych prędkości odlewania w których zmniejsza się zużycie zasypki $Q_s \downarrow$ (gorsze smarowanie), co powoduje wzrost naprężenia ścinającego żuźla i tarcia $F_r \uparrow$.

Najniższa wartość siły tarcia F_r w krystalizatorze wskazuje na osiągnięcie optymalnego smarowania Q_s naskórka wlewka przy określonej prędkości odlewania. Oznacza to, że w zależności od prędkości odlewania zmienia się intensywność smarowania, która nie powinna być ani zbyt duża ani zbyt mała, ponieważ w obydwu przypadkach wzrasta naprężenie ścinające żuźla krystalizatorowego, co w efekcie prowadzi do wzrostu tarcia w szczelinie gazowej.

Powyższy przykład dowodzi, że optymalne wartości parametrów technologicznych wpływających na proces smarowania, powinny być określone dla nominalnej prędkości odlewania ustalonej przez producenta urządzenia COS.

Z uwagi na to, że w pracy badawczej [1] nie prowadzono pomiarów fizycznych sił tarcia F_r , jak miało to

miejsce w pracy [3], postanowiono je obliczyć na podstawie równania (1). Natomiast do określenia wpływu poszczególnych parametrów na intensywność smarowania wlewka $\varnothing 170$ mm, wykorzystano wyniki z pomiarów topografii powierzchni wlewka, tj. głębokości znaków oscylacyjnych d_{OM} .

$$F_r = \frac{\eta_s v_r s_A}{d_p} \quad (1)$$

gdzie:

- η_s – lepkość dynamiczna zasypki, Puaz
- v_r – prędkość względna ruchu krystalizatora względem wlewka, m/min
- d_p – głębokość fazy ciekłej żuźla krystalizatorowego, mm
- s_A – stosunek pola powierzchni do objętości wlewka w krystalizatorze, m^{-1} .

W pracy przyjęto również założenie, że do oceny intensywności smarowania naskórka nie będzie brana pod uwagę głębokość zanurzenia wylewu (SEN) w krystalizatorze z powodu jego postępującej erozji podczas odlewania i związanej z tym konieczności kilkukrotnej zmiany położenia w krystalizatorze. Właściwie ustalona głębokość zanurzenia wylewu powinna być zbieżna z intensywnością wypływania strumienia ciekłej stali z kadzi pośredniej (prędkością odlewania), co teoretycznie pozwala na uzyskanie w miarę stabilnych warunków cieplnych przy powierzchni metalu w krystalizatorze. Co prawda warunki produkcyjne nie zawsze pozwalają na ścisłe przestrzeganie tych zaleceń, tym niemniej w czasie prowadzonych doświadczeń istnieje możliwość ich chwilowego ustawienia na założonym poziomie, dlatego przyjęto, że dla każdego wariantu eksperymentu są one stałe.

2. BADANIA WŁASNE

Występujące okresowo problemy z uzyskaniem wymaganej jakości powierzchni wlewków okrągłych $\varnothing 170$ mm odlewanych ze stali C45, spowodowały konieczność przeanalizowania wspólnie z technologami huty istniejącej technologii odlewania i podjęcia działań mających na celu optymalizację wartości niektórych parametrów. Skład chemiczny stali C45 zamieszczono w tabeli 2, natomiast bieżące parametry odlewania wlewków okrągłych $\varnothing 170$ mm dla tej stali przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 2. Skład chemiczny stali C45, % mas.

Table 2. Chemical composition of C45 steel, % wt.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Sn	As	Pb
0,45	0,70	0,20	0	0,020	0,15	0	0	0,018	0	0	0
0,49	0,80	0,30	0,025	0,030	0,20	0,25	0,25	0,025	0,030	0,005	0,003

Tabela 3. Parametry odlewania stali C45 we wlewki Ø 170 mm

Table 3. Parameters of C45 steel casting into Ø 170 mm round billets

Zasypka krystalizatorowa:	Zasypka granulowana firmy Metallurgica – gatunek Scorialit SPH-C 189/E1
Nominalna prędkość odlewania:	$v_C = 1,7$ m/min
Parametry oscylacji:	skok $s = 5$ mm
	współczynnik oscylacji $cpm = 105$
	częstotliwość $f_{osc} = 172$ cykli/min (c/min)
Parametry M-EMS:	natężenie 260 A
	częstotliwość 4,5 Hz
Przepływ wody w krystalizatorze	1650 l/min

2.1. ANALIZA STOSOWANEJ TECHNOLOGII ODLEWANIA

Krok 1 – pomiar głębokości fazy ciekłej żuźla krystalizatorowego i znaków oscylacyjnych wlewka ciągłego

Pomiar głębokości ciekłego żuźla krystalizatorowego jest prostym sposobem kontroli *intensywności smarowania* naskórka wlewka ciągłego. Najczęściej stosowany jest podczas testów nowych zasypek oraz ocenie ich przydatności do odlewania określonego gatunku stali i przekroju wlewka. Pomiar głębokości fazy ciekłej żuźla w krystalizatorze wykonuje się za pomocą dwóch drutów: stalowego i miedzianego równocześnie wprowadzanych pod powierzchnię żuźla do ciekłej stali. W ciekłej stali następuje stopienie drutu stalowego, natomiast w ciekłym żuźlu – drutu miedzianego. Miarą głębokości fazy ciekłej żuźla krystalizatorowego (d_p) jest różnica długości pomiędzy stopionymi końcówkami obydwu drutów. W tabeli 4 zamieszczono wyniki pomiarów głębokości ciekłego żuźla jakie uzyskano przy stosowaniu standardowych parametrów technologicznych.

Przyjmuje się, że aby zapewnić dobre smarowanie naskórka wlewka stalowego, głębokość ciekłego żuźla d_p w krystalizatorze powinna przekraczać długość skoku ruchu oscylacyjnego. Często można spotkać zalecenie utrzymywania tej głębokości na poziomie większym od 10 mm [4]. Według części ekspertów, głębokość warstwy ciekłego żuźla d_p nie powinna być nigdy mniejsza niż skok oscylacji, podczas gdy inni zalecają, aby głębokość ta wynosiła minimum 1,3 razy skok oscylacji. W zależności od warunków odlewania, zastosowanej zasypki i formatu krystalizatora, głębokość warstwy ciekłego żuźla może zmieniać się w zależności od sytuacji od $d_p = 15 \div 30$ mm (*wlewki płaskie*), od $d_p = 6 \div 12$ mm (*małe wlewki < kw. 160 mm*) [5].

Z otrzymanych w hucie pomiarów głębokości fazy ciekłej żuźla krystalizatorowego wynika, że smarowanie naskórka wlewka praktycznie nie istnieje lub jest nieznaczne. Potwierdzeniem tego spostrzeżenia może być duża różnica temperatury wody wpływającej do wpływającej z krystalizatora $\Delta T = 9,5^\circ\text{C}$, która świadczy o nadmiernym nagrzewaniu się ścianek krystalizatora w wyniku tarcia pomiędzy przesuwającym się w dół wlewkiem a ściankami oscylującego krystalizatora.

Krok 2 – obliczenie siły tarcia

W pracy [6] wykonano pomiary siły tarcia podczas odlewania wlewków Ø 150 mm dla różnych gatunków stali. Na podstawie badań stwierdzono, że zmiana siły tarcia jest bardzo regularna i mieści się w zakresie od -1 do +2 kN w zależności od oscylacji krystalizatora. Symbol siły tarcia jest ujemny lub dodatni w zależności od kierunku poruszającego się krystalizatora. Dodatnią siłę tarcia zinterpretowano jako siłę powodującą rozciąganie powierzchni naskórka wlewka, co w konsekwencji może prowadzić do wad powierzchniowych. Z drugiej strony ujemna siła tarcia odpowiada za wywieranie nacisku na powierzchnię wlewka, co jest konieczne do zamknięcia (zgrzania) wad powierzchniowych podczas czasu kroku wyprzedzenia (t_N). Podczas tych badań dla niektórych wariantów prób stwierdzono, że poziom siły tarcia może osiągać wartości dodatnie do 5 kN, gdy krystalizator jest w górnym położeniu [6].

Podstawiając do równania (1) bieżące wartości parametrów odlewania uzyskano następujący wynik siły tarcia:

$$F_r = 7,5 \text{ kN}$$

gdzie:

- lepkość dynamiczna zasypki $\eta_{1300} = 5,5$ Puaz,
- grubość warstwy ciekłego żuźla $d_p = 3$ mm,
- stosunek pola powierzchni do objętości wlewka w krystalizatorze $s_A = 47,1 \text{ m}^{-1}$
- różnica pomiędzy średnią prędkością krystalizatora a prędkością odlewania: $v_r = v_m - v_c = 0,085$ m/min.

Tabela 4. Wartości parametrów odlewania i wyniki pomiaru głębokości ciekłego żuźla uzyskane dla dotychczasowej technologii

Table 4. Values of casting parameters and results of liquid slag depth measurement obtained for the current technology

Gatunek zasypki krystal.	Przepływ wody w krystal.	Prędkość odlewania, v_C	ΔT krystal.	Oscylacja krystalizatora			M-EMS		Głębokość ciekłego żuźla d_p
				s	cpm	f_{osc}	Natężenie	Częstot.	
Sc 189/E1	1653 l/min	1,6 m/min	$9,5^\circ\text{C}$	5 mm	105	172 c/min	260 A	4,5 Hz	2÷3 mm

Obliczone wartości dla naszego przypadku przekroczyły znacznie wartości przedstawione w pracy [6].

Dlatego przyjęto dwuwariantowe postępowanie dla poprawy istniejącego stanu.

2.2. DZIAŁANIA ZMIERZAJĄCE DO POPRAWY JAKOŚCI POWIERZCHNI

Wariant I – zmiana zasypki krystalizatorowej

Analiza właściwości fizykochemicznych zasypek krystalizatorowych stosowanych w hucie przeprowadzona w oparciu o atesty producentów wykazała, że do odlewania stali C45 we wlewki okrągłe korzystniejsza będzie zmiana zasypki z dotychczas stosowanej Scorialit SPH-C 189/E1 na zasypkę Scorialit SPH-C 176/ALS 9. Nowy gatunek zasypki charakteryzuje się wyższą zasadowością i mniejszą przewodnością cieplną. Zasypka ta ponadto cechuje się wyższą wartością lepkości dynamicznej od zasypki dotychczas stosowanej.

Właściwości fizykochemiczne obydwu zasypek zamieszczono w tabeli 5.

Głównym czynnikiem, który zdecydował o wyborze zasypki Scorialit SPH-C 176/ALS 9 do testów przemysłowych, była zbliżona wartość lepkości dynamicznej do wartości optymalnej, która wynosi $\eta_s = 7,4$ Puaz dla wlewków $\varnothing 170$ mm.

Do ustalenia optymalnej lepkości żużła krystalizatorowego posłużyło przekształcone równanie empiryczne Ogi-bayashi'ego do obliczania intensywności smarowania Q_s :

$$\eta_s = \frac{0,6}{Q_s \cdot v_c} \quad (2)$$

Natomiast za wartość Q_s podstawiono wynik obliczeń z innego równania empirycznego opracowanego w pracy [7], wyprowadzonego na podstawie rezultatów doświadczeń przeprowadzonych na 30 urządzeniach COS:

$$Q_s = \frac{2}{(s_A - 5)} \quad (3)$$

Do obliczenia parametrów fizycznych wykorzystano następujące równania:

1) ilość fazy krystalicznej żużła (NBO/T) [7]:

$$NBO/T = \frac{2X_{CaO} + 2X_{BaO} + 2X_{CaF_2} + 2X_{Na_2O} + 2X_{Al_2O_3} + 6X_{Fe_2O_3} + (2X_{MgO} + 2X_{MnO})}{X_{SiO_2} + 2X_{Al_2O_3} + X_{TiO_2} + 2X_{B_2O_3} + (X_{MgO} + X_{MnO})} \quad (4)$$

gdzie:

X – ułamek molowy składników żużła krystalizatorowego.

Punkt graniczny (przejściowy) występuje dla wartości $NBO/T = 2,0$. Poniżej tego punktu żużel jest całkowicie szklisty lub o bardzo słabym procencie skryształizowania.

2) procent skryształizowania żużła [8]:

$$\% \text{ skryształizowania żużła} = 141,1 (NBO/T) - 284,0 \quad (5)$$

3) zastępcza przewodność cieplna λ_{sys} w temperaturze 1200°C dla zasypki krystalizatorowej, (W/mK) [9]:

$$\lambda_{sys(1200^\circ C)} = 2,03 - 0,459 \left(\frac{\% "CaO"}{\% "SiO_2"} \right) + - 0,1695\%FeO - 0,0348\%Al_2O_3 \quad (6)$$

gdzie:

$$\% "CaO" = \%CaO + \%MgO + \%MnO\% + \%K_2O + \%Na_2O + \%LiO_2$$

$$\% "SiO_2" = \%SiO_2 + \%B_2O_3$$

Wytopy doświadczalne z zastosowaniem nowej zasypki krystalizatorowej

Realizacja wytopów doświadczalnych przebiegała w ten sposób, że na jednej żyłce odlewanie odbywało się pod nową zasypką – Scorialit SPH C 176/ALS 9, natomiast na dwóch pozostałych żyłkach pod zasypką dotychczasową – Scorialit SPH C 189/E1. W czasie odlewania prowadzono pomiary głębokości fazy ciekłej żużła krystalizatorowego oraz pomiary termowizyjne powierzchni wlewków po wyjściu z komory chłodzenia wtórnego na żyłkach 2 i 3. Z odlanych wlewków pobrano odcinki, które po piaskowaniu poddano pomiarom topografii powierzchni i badaniom metalograficznym.

Tabela 5. Właściwości fizykochemiczne zasypek krystalizatorowych firmy Metallurgica

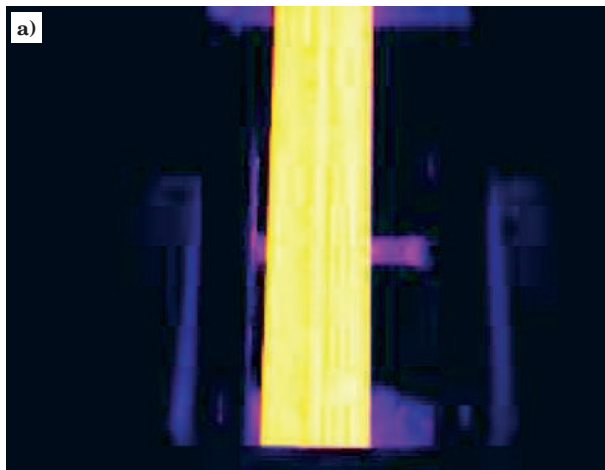
Table 5. Physicochemical properties of Metallurgica mould powders

	Gatunek zasypki Scorialit (Se)	SPH-C 189/E1	SPH-C 176/ALS 9	Jednostka
Analiza chemiczna	SiO ₂	31,0 ÷ 33,0	27,5 ÷ 29,5	% mas.
	CaO + MgO	19,5 ÷ 21,5	30,0 ÷ 32,0	% mas.
	Al ₂ O ₃	4,5 ÷ 6,0	5,0 ÷ 6,5	% mas.
	Na ₂ O + K ₂ O	10,0 ÷ 12,0	2,0 ÷ 3,5	% mas.
	Fe ₂ O ₃	1,0 ÷ 2,5	2,0 ÷ 3,0	% mas.
	MnO	< 0,1	2,5 ÷ 4,0	% mas.
	C _{wolny}	18,0 ÷ 20,5	16,0 ÷ 18,0	% mas.
	CO ₂	5,5 ÷ 6,5	5,5 ÷ 6,5	% mas.
	C _{całkowity}	20,0 ÷ 22,0	17,5 ÷ 19,5	% mas.
	F	4,0 ÷ 5,0	1,0 ÷ 2,0	% mas.
	H ₂ O _{600°C}	< 0,8	< 1,0	% mas.
Zasadowość	CaO/SiO ₂	0,53 ÷ 0,65	0,99 ÷ 1,11	-
Właściwości fizyczne	Gęstość nasypowa, ρ_m	0,50 ÷ 0,70	0,70 ÷ 0,90	kg/dm ³
	Temperatura płynięcia, T_{soft}	1000 ± 30	1070 ± 30	°C
	Temperatura topienia, T_{fluid}	1080 ± 20	1140 ± 20	°C
	Lepkość dynamiczna w temperaturze 1300°C, η_{1300}	5,6	7,2	Puaz
	¹⁾ Ilość fazy krystalicznej żużła, NBO/T	1,84	1,65	-
	²⁾ Procent skryształizowania żużła, %	-24,2	-51,4	%
³⁾ Zastępcza przewodność cieplna, $k_{sys(1200^\circ C)}$	1,85	1,72	W/mK	

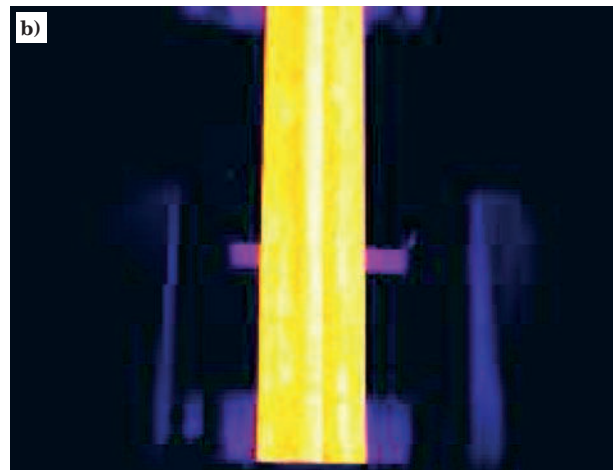
Tabela 6. Parametry odlewania I serii wytopów doświadczalnych

Table 6. Casting parameters of the 1st series of experimental heats

Nr żyły	Gatunek zasyпки	Prędkość odlewania v_c m/min	Przepływ wody w krystal. l/min	Oscylacja krystalizatora			M-EMS	
				s mm	cpm	f_{osc} c/min	Natężenie A	Częstotliwość Hz
2	Sc 189/E1	1,9	1657	5	105	199	260	4,5
3	Sc 176/ALS 9	1,9	1655	5	105	199	260	4,5



Zasyпка: Scorialit SPH C 189/E1



Zasyпка: Scorialit SPH C 176/ALS 9

Rys. 2. Termogramy obrazujące powierzchnię wlewka na żyłę nr II (a) i nr III (b) wychodzącej z komory chłodzenia wtórnego
 Fig. 2. Thermograms of round billet surface on strand no. II (a) and no. III (b) coming out of the secondary cooling zone

Parametry odlewania wytopów testowych zamieszczono w tabeli 6.

Obserwacja wzrokowa wlewków wychodzących z komory chłodzenia wtórnego i wlewków przemieszczających się na chłodni, uwidoczniła różnicę w ilości zakrzepłego żużla krystalizatorowego przyklejonego do powierzchni wlewków (Rys. 2).

Krok 3 – pomiar termowizyjny powierzchni wlewków

Pomiary termowizyjne prowadzone na powierzchni wlewków wychodzących z komory chłodzenia wtórnego i wlewków na chłodni, wykazały różnicę w temperaturze powierzchni wlewków na poszczególnych żyłach. Powierzchnia wlewków odlewanych pod zasypką standardową – Scorialit SPH C189/E1 była o ok. 10°C niższa od powierzchni wlewków odlewanych pod nową zasypką.

Tabela 7. Wartości parametrów technologicznych jakie uzyskano w wytopach doświadczalnych dla gatunku zasyпки krystalizatorowej

Table 7. Values of process parameters obtained in experimental heads for specific grade of mould powder

Gatunek zasyпки krystalizatorowej	Scorialit SPH C189/E1	Scorialit SPH C176/ALS9
Głębokość ciekłego żużla d_p , mm	*3 ÷ 4 mm	13 ÷ 14 mm
ΔT krystalizatora, °C	9,1	6,6
Siła tarcia F_r , kN	7,5	2,2
Lepkość dynamiczna zasyпки η_{1300} , Puaz	5,6	7,2

* – zmniejszenie głębokości zanurzenia wylewów w krystalizatorze zwiększyło głębokość fazy ciekłej żużla krystalizatorowego do $d_p = 7$ mm

Jak wynika z wartości parametrów przedstawionych w tabeli 7, zamiana zasyпки krystalizatorowej z gatunku Scorialit SPH C189/E1 na Scorialit SPH C176/ALS9 spowodowała zmianę warunków smarowania powierzchni wlewków ciągłych. Przy takich samych parametrach odlewania na obydwu żyłach, uzyskano różne wartości głębokości ciekłego żużla w krystalizatorze. Zastosowanie zasyпки Scorialit SPH C176/ALS9 zwiększyło zasilenie szczeliny gazowej w ciekły żużel, co znacząco poprawiło smarowanie naskórka wlewka i obniżyło tarcie do $F_r = 2,2$ kN. Niższa przewodność cieplna tej zasyпки spowodowała, że uzyskano pomiędzy analizowanymi żyłami, różnicę w przyroście temperatury wody chłodzącej krystalizator (ΔT) o ok. 2°C.

Krok 4 – pomiar topografii powierzchni odcinków wlewków

Pomiary topografii powierzchni przeprowadzono na opiaskowanych odcinkach pobranych z wlewków $\varnothing 170$ mm przy użyciu profilometru Form Talysurf 50 firmy Taylor Hobson Ltd.

Wyniki pomiarów topografii powierzchni wlewków odlanych pod zasypką Scorialit SPH C176/ALS9 wskazały, że głębokość znaków oscylacyjnych zmniejszyła się ok. 20% w stosunku do wlewków odlewanych pod zasypką Scorialit SPH C189/E1.

Wartości średnie z pomiarów poszczególnych próbek skonfrontowano w wyniku obliczeń na teoretyczną głębokość znaku oscylacyjnego. Do obliczania teoretycznej głębokości znaku oscylacyjnego (d_{OM}) zastosowano następujące równanie empiryczne [10]:

$$d_{OM} = 600 (s/f_{osc})^{0,5} \quad (7)$$

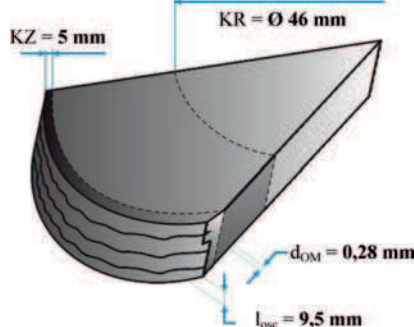
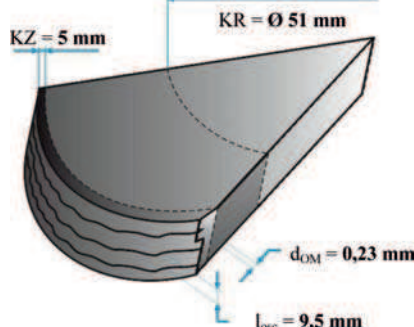
gdzie:

s – skok krystalizatora, mm,

f_{osc} – częstotliwość oscylacji krystalizatora, Hz.

Tabela 8. Wyniki pomiarów i badań charakteryzujących jakość wewnętrzną i zewnętrzną wlewków odlanych w I serii doświadczeń

Table 8. Measurement and test results of internal and external quality of round billet in the 1st series of experiments

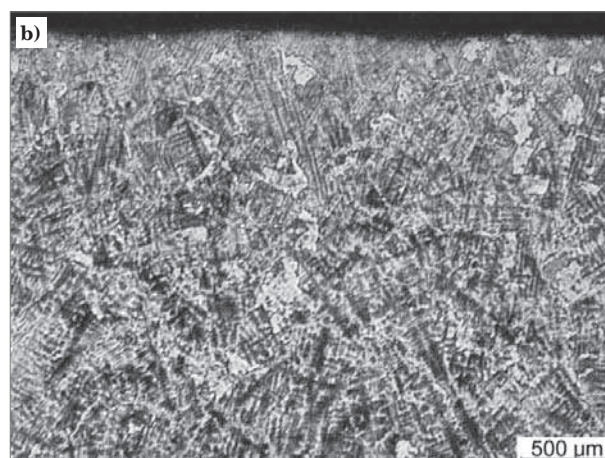
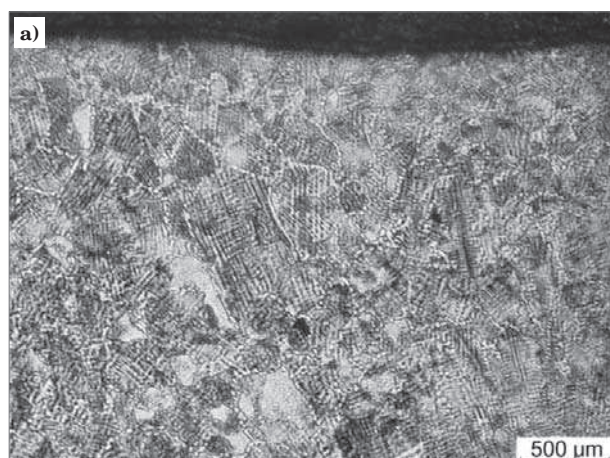
<p>Zasyпка SPH C189/E1 Mould powder SPH C189/E1</p>	
<p>Zasyпка Scorialit SPH C176/ALS9 Mould powder Scorialit SPH C 176/ALS 9</p>	
<p>Oznaczenia: KZ – strefa kryształów zamrożonych; KR – strefa kryształów równoosiowych, d_{OM} – głębokość znaku oscylacyjnego, l_{osc} – podziałka znaku oscylacyjnego</p>	

Po podstawieniu wartości parametrów odlewania do równania (7) stwierdzono, że teoretyczna wartość głębokości znaku oscylacyjnego wynosi $d_{OM} = 0,25$ mm. Jest zatem wartością pośrednią pomiędzy wynikiem uzyskanym z wlewków odlanych pod nową zasypką ($d_{OM} = 0,23$ mm), a wlewkami odlanymi pod zasypką dotychczas stosowaną ($d_{OM} = 0,28$ mm).

Krok 5 – badania metalograficzne wlewków

Badania metalograficzne wykazały, że wielkość strefy kryształów zamrożonych we wlewkach odlanych na żyłę 2 i 3 jest jednakowa. Średnia wielkość tej strefy wynosi około 5 mm. Wlewki odlane na żyłę 2 i 3 różniły się między sobą wielkością dendrytów w obszarze przypowierzchniowym, co przedstawiono na przykładzie rys. 3.

We wlewkach odlanych pod zasypką Scorialit SPH C189/E1 dendryty główne i ich gałęzie są silnie rozdrobnione w porównaniu do wlewka odlanego pod zasypką Scorialit SPH C176/ALS9. Oznaczać to może, że nowa zasyпка Scorialit SPH C176/ALS9 zastosowana do odlewania wlewków $\varnothing 170$ mm ze stali C45, pomimo uzyskania bardzo dobrej jakości powierzchni wlewków ciągłych i znacznie korzystniejszych warunków smarowania w krystalizatorze od dotychczas stosowanej zasyпки Scorialit SPH C189/E1, tworzy zbyt dużą ilość żużla krystalizatorowego. Tak duża ilość tworzącego się żużla w krystalizatorze z zasyпки Scorialit SPH C176/ALS9 po osadzeniu się na powierzchni wlewka, staje się izolatorem nadmiernie blokującym przepływ ciepła do ścianek krystalizatora, powodując tym samym wzrost temperatury stali i rozrost dendrytów. Decydo-



Rys. 3. Struktura dendrytyczna w obszarze przypowierzchniowym wlewków z wytopów testowych: żyła II (a) i żyła III (b)

Fig. 3. Dendritic structure in the near-surface area of round billet from test heats: strand II (a) and strand III (b)

wać o tym może, również niższa wartość przewodności cieplnej żuźla tej zasyпки ($k_{\text{sys}(1200^{\circ}\text{C})} = 1,72 \text{ W/mK}$).

Przeprowadzone próby z nowym gatunkiem zasyпки krystalizatorowej wykazały, że uzyskano znaczną poprawę jakości powierzchni wlewków ciągłych i warunków smarowania ścianek krystalizatora. Jednakże nadmierny rozrost dendrytów w strefie podpowierzchniowej wlewka wskazał, że do odlewania stali C45 powinna być stosowana zasyпка o pośrednich właściwościach fizykochemicznych między gatunkiem Scorialit SPH C189/E1 a Scorialit SPH-C-176/ALS9. Bazowym składem chemicznym dla takiej zasyпки może być gatunek Scorialit SPH-C-176/ALS9 skorygowany o następujące składniki: podwyższenie dodatku Al_2O_3 i $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ o ok. 2÷3%, 1% zwiększenie Fe_2O_3 i F oraz wyeliminowanie ze składu MnO. W tabeli 9 zamieszczono przykład zmodyfikowanej zasyпки Scorialit SPH-C-176/ALS9.

Tabela 9. Proponowane właściwości fizykochemiczne zasyпки krystalizatorowej przeznaczonej do odlewania stali C45 we wlewki $\varnothing 170 \text{ mm}$

Table 9. Proposed physicochemical properties of mould powder for casting C45 steel into $\varnothing 170 \text{ mm}$ round billets

Analiza chemiczna, %mas.	
SiO ₂	~ 30,5
CaO + MgO (1,5%)	~ 25
Al ₂ O ₃	~ 8
Na ₂ O + K ₂ O	~ 9,5
Fe ₂ O ₃	~ 1,5
MnO	< 0,1
F	~ 3
Zasadowość: CaO/SiO ₂	0,8
Właściwości fizyczne	
Lepkość dynamiczna w temperaturze 1300°C, η_{1300}	5,6
Ilość fazy krystalicznej żuźla, NBO/T	1,76
Procent skryształizowania żuźla, %	-34,8
Zastępcza przewodność cieplna, $k_{\text{sys}(1200^{\circ}\text{C})}$	1,83

Wariant II – zmiana intensywności mieszania elektromagnetycznego

Drugim kierunkiem działań zmierzającym do poprawy jakości powierzchni wlewków $\varnothing 170 \text{ mm}$ ze stali C45, była zmiana parametrów mieszania M-EMS. Badania te miały na celu odpowiedzieć na pytanie: *czy odlewając stal pod dotychczasową zasypką krystalizatorową możliwe jest polepszenie warunków smarowania w wyniku zwiększenia intensywności mieszania elektromagnetycznego?* Na bazie wcześniejszych doświadczeń prowadzonych w hucie, opracowano z technologiami i kierownictwem zakres testów odlewania stali C45 ze zmienionymi wartościami natężenia i częstotliwości

Tabela 11. Parametry odlewania wytopów z II serii doświadczeń

Table 11. Casting parameters of the 2nd series of experimental heats

Testy w serii	Prędkość odlewania v_C	Przegrzanie stali pow. $T_{\text{likw.}}$	Przepływ wody w krystal.	Żyła nr	Parametry mieszadeł M-EMS		Głębokość ciekłego żuźla d_p
					natężenie	częstotliwość	
II	1,6 m/min	42°C	1656 l/min	1	300 A	5,5 Hz	10 mm
				2	300 A	2,5 Hz	8 mm
				3	260 A	2,5 Hz	2 ÷ 3 mm
I	1,9 m/min	14°C	1657 l/min	2	260 A	4,5 Hz	3 ÷ 4 mm

mieszadeł M-EMS. Program ten przedstawiono w tabeli 10.

Tabela 10. Wartości parametrów M-EMS zastosowane w II serii odlewania wytopów testowych

Table 10. Values of M-EMS parameters used in the 2nd series of test heats casting

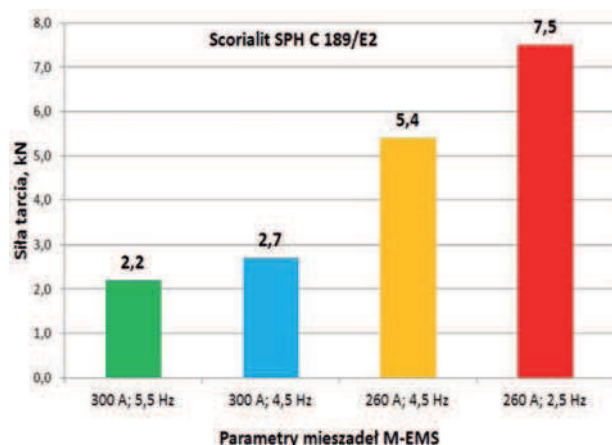
Format mm	Żyła 1		Żyła 2		Żyła 3	
	Hz	A	Hz	A	Hz	A
$\varnothing 170$ (C45)	5,5↑	300↑	2,5↓	300↑	2,5↓	260

Analogicznie jak miało to miejsce w I serii prób, podczas odlewania mierzono głębokość ciekłego żuźla w krystalizatorze oraz pobrano próbki z wlewków do pomiarów profilometrycznych i badań metalograficznych. Na wszystkich żyłach wytopy testowe odlewano pod zasypką Scorialit SPH C 189/E1.

Wyniki pomiarów, badań metalograficznych i wartości parametrów odlewania wytopów doświadczalnych pod zasypką Scorialit SPH C 189/E1 zamieszczono w tabelach 11 i 12.

Analizując makrostrukturę wlewków ciągłych odlanych pod zmiennymi parametrami mieszania elektromagnetycznego, zauważyć można duży wpływ temperatury odlewania na wielkość kształtowania się strefy kryształów równoosiowych. Odcinki pobrane z wlewków z I serii doświadczeń, podczas których odlewanie odbywało się z maksymalną dopuszczalną prędkością $v_C = 1,9 \text{ m/min}$, niskim przegrzaniem stali powyżej temperaturę likwidus wynoszącym 14°C i małej intensywności mieszania M-EMS (4,5 Hz / 260 A), uzyskały największy udział kryształów równoosiowych wynoszący $KR = 46$ i 51 mm. Natomiast wlewki odlane w II serii doświadczeń z przegrzaniem > 40°C w stosunku do $T_{\text{likw.}}$, miały nieco mniejszy udział kryształów równoosiowych, pomimo zwiększonej intensywności mieszania na dwóch żyłach. Potwierdziło to wcześniejsze spostrzeżenia, że czas oddziaływania prądów wirowych wytworzonych przez mieszadła M-EMS na urządzeniu COS o małym promieniu łuku $R = 6 \text{ m}$ jest zbyt krótki by znacząco mógł poprawić strukturę wewnętrzną wlewka ciągłego. Większy wpływ w takim przypadku odgrywa temperatura odlewania, ponieważ jej oddziaływanie na krzepnący wlewek odbywa się w dłuższym przedziale czasu /ciekły rdzeń wlewka/.

Przeprowadzone w II serii próby odlewania stali C45 z różnymi wartościami parametrów mieszania elektromagnetycznego ujawniły, że wpływają one istotnie na warunki cieplne wewnątrz krystalizatora, m.in. na proces roztapiania zasyпки i utworzony z niej ciekły żuźel. Odzwierciedleniem tego są wyniki zamieszczone w tabeli 11 i rys. 4, gdzie zamieszczono parametry odlewania z pomiarami głębokości ciekłego żuźla krystalizatorowego.



Rys. 4. Wpływ parametrów mieszania M-EMS na siłę tarcia w krystalizatorze

Fig. 4. The impact of M-EMS mixing parameters on friction force in the mould

Analiza cechy makrostruktury wlewków ciągłych \varnothing 170 mm w zależności od parametrów mieszania elektromagnetycznego (Tab. 12) pozwoliła stwierdzić, że najkorzystniejsze wartości M-EMS do odlewania wlewków \varnothing 170 mm ze stali C45 pod zasypką Scorialit SPH-C-189/E1 można uzyskać przy natężeniu prądu 300 A i częstotliwości 5,5 Hz. Wlewki odlane z takimi wartościami mieszania elektromagnetycznego, uzyskały najniższą średnią wartość głębokości znaków oscylacyjnych ($d_{OM} = 0,22$ mm) porównywalną do wyniku wlewków odlanych z I serii badawczej pod nową zasypką Scorialit SPH-C-176/AIS9.

Wyniki przedstawione na rys. 4, ujawniły dwie tendencje:

- pierwsza – (przewidywalna), że wyższe wartości natężenia prądu mieszania M-EMS zmniejszą siłę tarcia w krystalizatorze w wyniku wytworzenia większej głębokości cieplego żużla w krystalizatorze, oraz
- drugą tendencję (nie tak oczywistą), że niższa częstotliwość M-EMS rozszerzy obszar oddziaływania prądu

Tabela 12. Wyniki pomiarów i badań charakteryzujących jakość wewnętrzną i zewnętrzną wlewków odlanych w II serii doświadczeń

Table 12. Measurement and test results of internal and external quality of ingots cast in the 2nd series of experiments

Żyła 1		
Parametry oscylacji:	skok: 5 mm cpm: 105 częstotliwość: 172 c/min	
Parametry EMS:	natężenie: 300 A częstotliwość: 5,5 Hz	
Przegrzanie stali w stosunku do $T_{likw.}$: 42°C		
Prędkość odlewania: 1,64 m/min		
ΔT krystalizatora: 9,3°C		
Żyła 2		
Parametry oscylacji:	skok: 5 mm cpm: 105 częstotliwość: 172 c/min	
Parametry EMS:	natężenie: 300 A częstotliwość: 2,5 Hz	
Przegrzanie stali w stosunku do $T_{likw.}$: 42°C		
Prędkość odlewania: 1,64 m/min		
ΔT krystalizatora: 9,1°C		
Żyła 3		
Parametry oscylacji:	skok: 5 mm cpm: 105 częstotliwość: 172 c/min	
Parametry EMS:	natężenie: 260 A częstotliwość: 2,5 Hz	
Przegrzanie stali w stosunku do $T_{likw.}$: 42°C		
Prędkość odlewania: 1,64 m/min		
ΔT krystalizatora: 9,5°C		
Oznaczenia:		
KZ – strefa kryształów zamrożonych; KR – strefa kryształów równoosiowych, d_{OM} – głębokość znaku oscylacyjnego, l_{osc} – podziałka znaku oscylacyjnego		

dów wirowych we wlewk, natomiast wyższa wartość częstotliwości zawęzi (skupi) obszar oddziaływania mieszadeł M-EMS poprawiając warunki smarowania w krystalizatorze.

3. WNIOSKI

Badania i pomiary przeprowadzone w trakcie testów przemysłowych pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- Największy wpływ na wartość siły tarcia w krystalizatorze COS ma głębokość fazy ciekłego żużla utworzonego z roztopionej zasyпки krystalizatorowej.
- Właściwą głębokość ciekłego żużla w krystalizatorze uzyskać można poprzez optymalizację parametrów mieszania M-EMS lub zmianę właściwości fizykochemicznych zasyпки krystalizatorowej.

- Podwyższenie intensywności mieszania M-EMS zwiększa dopływ ciekłej stali o wyższej temperaturze do obszaru przymeniskowego, co korzystnie wpływa na roztopianie zasyпки i głębokość ciekłego żużla w krystalizatorze. Pozwala to poprawić warunki smarowania naskórka i jakość powierzchni wlewka ciągłego.
- Dobrą jakość powierzchni wlewków $\varnothing 170$ mm ze stali C45 uzyskać można polepszając smarowanie naskórka przez:
 - zwiększenie intensywności mieszania elektromagnetycznego (M-EMS), lecz wówczas powstaje ryzyko nadmiernej erozji wylewów zanurzeniowych, lub
 - zastosowanie zasyпки krystalizatorowej o zmodyfikowanych właściwościach fizykochemicznych.

Stosowane w obliczeniach parametry charakteryzujące ruch oscylacyjny krystalizatora:

Oznaczenie	Nazwa	Równanie	Jednostka
v_c	prędkość odlewania	-	m/min
s	skok	-	mm
cpm	współczynnik wyprzedzenia	-	-
f_{osc}	częstotliwość oscylacji krystalizatora	$f_{osc} = cpm v_c$ (3)	c/min (cykli/min)
v_m	średnia prędkość ruchu krystalizatora	$v_m = \frac{2sf_{osc}}{1000}$ (4)	m/min
v_r	względna prędkość pomiędzy wlewkem a krystalizatorem	$v_r = v_m - v_c$ (5)	m/min
t_N	czas kroku wyprzedzenia krystalizatora	$t_N = \frac{60}{\pi f_{osc}} \arccos\left(\frac{1000v_c}{\pi s f_{osc}}\right)$ (6)	s
t_P	czas kroku wstecznego krystalizatora	$t_P = \frac{60}{\pi f_{osc}} - t_N$ (7)	s
l_{osc}	teoretyczna podziałka znaku oscylacyjnego	$l_{osc} = \frac{1000v_c}{f_{osc}}$ (8)	mm

LITERATURA

1. Kania H. i zespół: „Zastosowanie symulacji fizycznej i numerycznej do opracowania podstaw technologicznych ciągłego odlewania wlewków stalowych o przekroju kołowym na urządzeniu o małym promieniu łuku”, Projekt rozwojowy nr N R07 0021 06, niepublikowane
2. Materiały konferencyjne: „Electromagnetic stirring for continuous casting”. Danieli Rotelec, Sympozjum – Huta Zawiercie 22.10.1993
3. Mairy B., Ramelot D., Dutrieux M., Deliege L., Nourricier M., Dellieu J.: Mould lubrication nad oscillation monitoring for optimizing continuous casting, 5th Proc. Technol. Conf., Detroit Meeting Measurement and Control Instrum., Iron and Steel Ind., 1985, n. 5, s. 101–114
4. Mills K.C.: The performance of casting powders, Steel Technol. Int. 1994, s. 161–166
5. Soares R.B., Vilela A.C.F.: Mould powders – a review and the billet casting, 3rd European Conference on Continuous Casting, 1998, October 20–23, s. 1003–1006
6. Valentin P., Bruch Ch., Horn C.: Friction Forces between Mould and Strand Shell during Billet Casting, Steel Research Int., 2004, v. 75, n. 10, s. 666–671
7. Mills K.C., Fox A.B. Bezerra M.A.: A logical approach to mould powder selection: www.ariel.ac.il/sites/conf/mmt/MMT-2000/papers/208-217.doc
8. Mills K.C.: The estimation of slag properties, Short course presented as part of Southern African Pyrometallurgy, 7 March 2011
9. Mills K.C., Fox A.B.: Review of Flux Performance and Properties, 4th European Continuous Casting Conference, 14–16 October 2002, Proceedings, v. 1, s. 345–359
10. Kulkarina M.S, Babub A.S.: Managing quality in continuous casting process using product quality model and simulated annealing.; www.dspace.library.iitb.ac.in/xmlui/bitstream/handle/10054/.../5256.pdf?..

W artykule wykorzystano wyniki pomiarów proflo-metrycznych wykonanych przez dr. inż. Marka Burdka oraz ocenę metalograficzną wlewków wykonaną przez dr. inż. Józefa Gawora.

Praca zrealizowana w ramach projektu rozwojowego nr N R07 0021 06.