

Agata SOREK, Harald KANIA

Instytut Metalurgii Żelaza

## WPŁYW SMAROWANIA NA JAKOŚĆ POWIERZCHNI WLEWKÓW CIĄGŁYCH

*Istotnym czynnikiem wpływającym na jakość powierzchni wlewków ciągłych są zjawiska fizyczne, chemiczne i mechaniczne zachodzące w strefie przymeniskowej krystalizatora COS. Do zjawisk tych możemy między innymi zaliczyć „smarowanie” powierzchni wlewka ciągłego w krystalizatorze. Powszechnie stosowaną metodą smarowania powierzchni wlewka jest stosowanie zasypek krystalizatorowych. Zасыпки w kontakcie z ciekłą stalą tworzą ciekłą fazę żużlową która jest czynnikiem smarującym. W artykule scharakteryzowano proces smarowania powierzchni wlewka w procesie ciągłego odlewania stali. Przedstawiono wyniki badań przemysłowych wpływu stosowanej zasypki na jakość powierzchni otrzymywanych wlewków ciągłych.*

*Słowo kluczowe: smarowanie, zasypka krystalizatorowa, znaki oscylacyjne, jakość*

## INFLUENCE OF LUBRICATION ON SURFACE QUALITY OF CONTINUOUS CASTING INGOTS

*The physical, chemical and mechanical phenomena which take place in the near-meniscus zone of continuous casting mold are the significant factors influencing the quality of CC ingot and especially the quality of its surface. Such phenomena include, but are not limited to, the lubrication of ingot surface in the COS mold. Application of mold powders is the commonly used lubrication method. Mold powders form the liquid slag phase in contact with liquid steel. This slag phase is a lubricant agent. In this article, the lubrication of ingot surface in continuous casting was characterized. The paper presents the results of industrial studies on the influence of powders on surface quality of continuous casting ingots.*

*Keywords: lubrication, mold powder, oscillation marks, quality*

### 1. SMAROWANIE POWIERZCHNI WLEWKA W PROCESIE COS

Istotnym czynnikiem wpływającym na jakość wlewka ciągłego a zwłaszcza jakość jego powierzchni jest „smarowanie” w krystalizatorze. Krzepnięcie wlewka ciągłego rozpoczyna się w krystalizatorze utworzeniem naskórka i jego wzrostem w miarę wyciągania i przejścia do strefy chłodzenia wtórnego. Zmianie stanu skupienia towarzyszy skurcz zakrzepłej stali oraz odkształcenia, będące odwzorowaniem kształtu powierzchni przekroju poprzecznego krystalizatora, jego oscylacji i działania wewnętrznych naprężeń w stali, a także zmiennego ciśnienia ferrostatycznego dopływającej stale ciekłej stali [1].

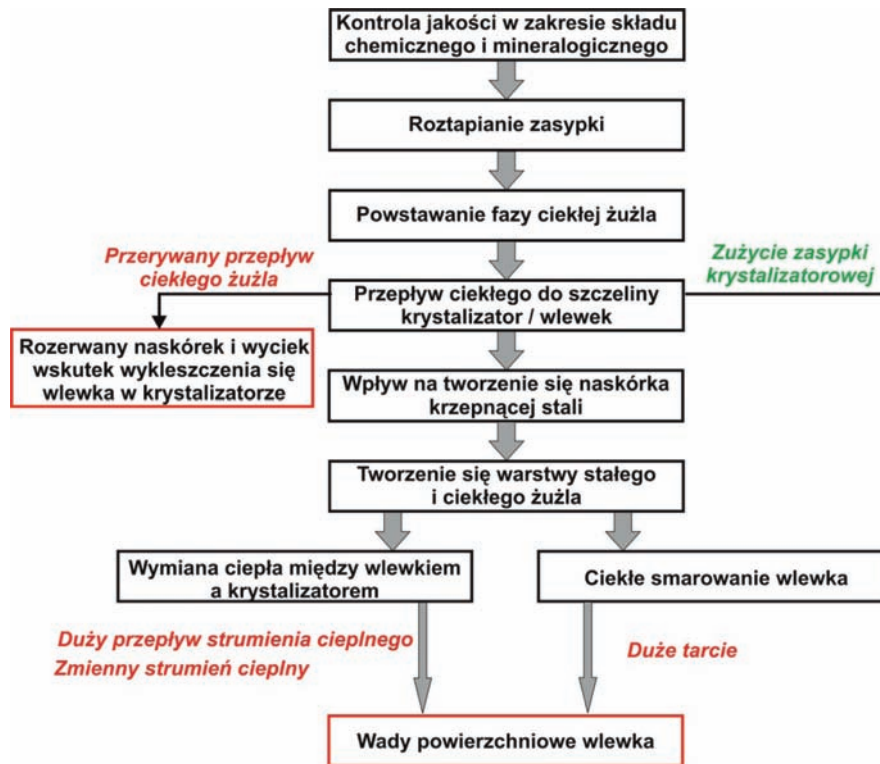
Wlewek ciągły podczas COS narażony jest na obciążenia mechaniczne spowodowane tarciem krystalizatora, siłami wyciągania, wyrzuceniem, zginaniem i prostowaniem. Obok naprężeń mechanicznych występują naprężenia cieplne. Jeżeli zostanie w wyniku naprężeń cieplno-mechanicznych przekroczona granica plastyczności danego gatunku stali w skrzepniętej strukturze naskórka wlewka wystąpić mogą wady w postaci mikropęknięć podpowierzchniowych. Dlatego tak istotne jest poznanie wszystkich czynników i ich wzajemnych relacji na kształtowanie się stabilności strukturalnej wlewka ciągłego podczas jego krzepnięcia i studzenia.

Schemat wpływu zasypek krystalizatorowych na jakość powierzchni wlewka ciągłego przedstawiono na rys. 1.

Podczas procesu ciągłego odlewania stali zewnętrzna powierzchnia miedzianych ścianek krystalizatora chłodzona jest wodą, natomiast wewnętrzna smarowana jest olejem lub ciekłym żużlem pochodzącym z zasypki krystalizatorowej w celu zmniejszenia tarcia między nimi oraz by zapobiec przywieraniu tworzącego się naskórka do ścianek roboczych krystalizatora. Do smarowania stosuje się: oleje pochodzenia naturalnego (olej rzepakowy), mineralnego lub syntetycznego (przy odlewaniu wlewków ciągłych wylewami dozatorowymi stali o niskich wymaganiach jakościowych) oraz zasypkę krystalizatorową wprowadzaną bezpośrednio na powierzchnię ciekłej stali w krystalizatorze (przy odlewaniu wlewków z wylewami zanurzeniowymi).

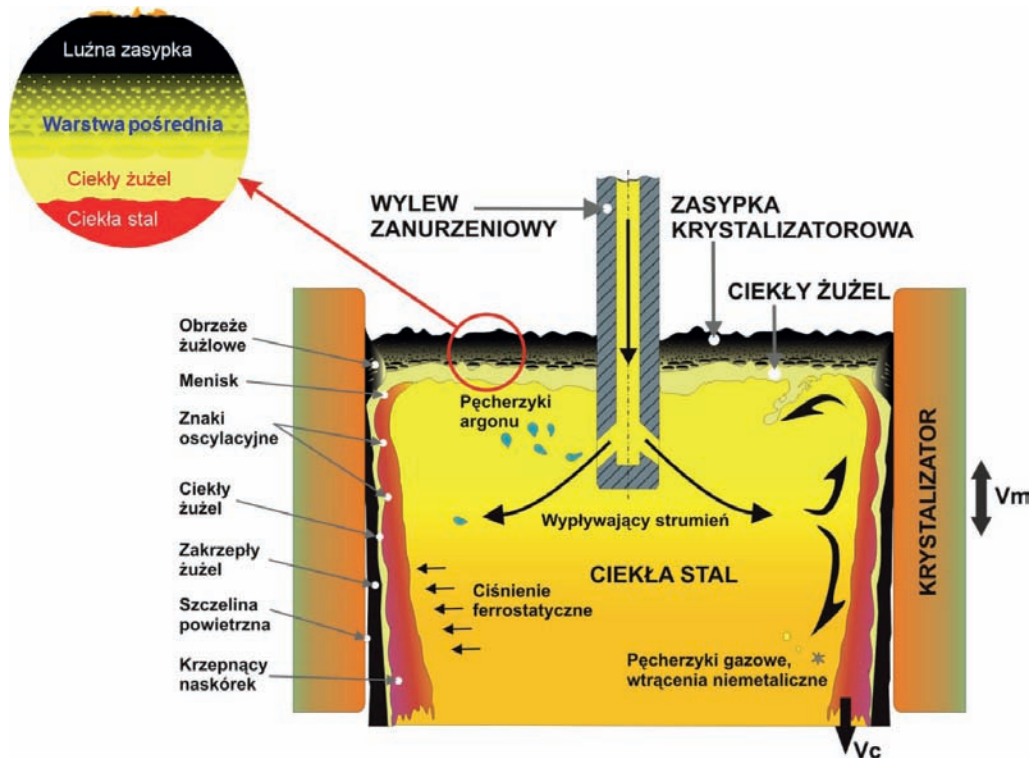
### 2. ZASYPKA KRYSZALIZATOROWA

Zasypka krystalizatorowa stosowana przy odlewaniu z wylewami zanurzeniowymi musi posiadać odpowiednie właściwości smarne. Właściwości fizykochemiczne zasypki krystalizatorowej i parametry technologiczne COS dla określonego gatunku stali, wpływają na sposób smarowania powierzchni naskórka wlewka ciągłego tworzącego się w krystalizatorze i przepływ ciepła na jego obwodzie. Zasypki krystalizatorowe wprowadzane



Rys. 1. Jakościowy wpływ zasyпки krystalizatorowej na powierzchnię wlewka ciągłego [5]

Fig. 1. Processes, functions of mold powders and their influence on surface quality of slabs [5]



Rys. 2. Model budowy trójstrefowej warstwy zasyпки na powierzchni ciekłej stali w krystalizatorze COS

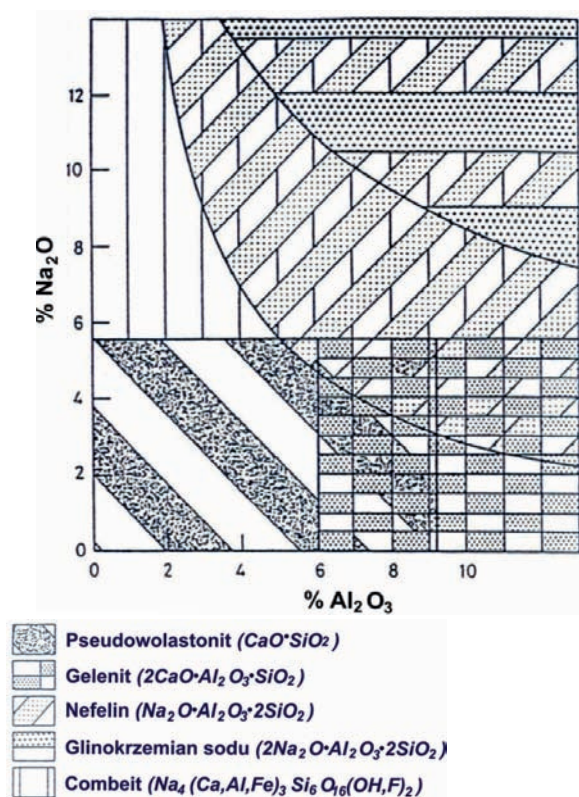
Fig. 2. Three-layer model of mold powder on surface of molten steel in the COS mould

są od góry do krystalizatora na powierzchnię ciekłej stali, po czym po roztopieniu i utworzeniu żużla, stopniowo przemieszczają się w dół krystalizatora (rys. 2).

Ciekły żużel powstały w wyniku roztopienia zasyпки krystalizatorowej tworzy na powierzchni ciekłej stali, warstwę ciekłego żużla zasilającą przestrzeń pomiędzy

krystalizatorem a wlewkem odlewanej stali i smaruje nowoutworzony naskórek [6]. Stosowane w praktyce stalowniczej zasyпки krystalizatorowe (izolacyjno-smarująco-rafinacyjne) są mieszaninami tlenków, węglanów, fluorków i węgla w postaci proszkowanej lub granulowanej. Receptura większości produkowanych

i stosowanych zasypek krystalizatorowych oparta jest na dwóch podstawowych składnikach  $\text{SiO}_2$  i  $\text{CaO}$  stanowiących zazwyczaj ok. 70% mieszanki zasypki z kilku procentowym dodatkiem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Małe ilości  $\text{MgO}$  mogą występować w zamian  $\text{CaO}$  i tlenków alkalicznych. Do grupy dodatków upłynniających (obniżających temperatury topnienia i zmniejszających lepkość) należą tlenki ziem alkalicznych oraz fluor wprowadzany do zasypek w postaci fluorków:  $\text{MnO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{LiF}$ . Przy odlewaniu stali wysokostopowych do składu zasypek krystalizatorowych wprowadza się również tlenki  $\text{TiO}_2$  i  $\text{ZrO}_2$ . Najpowszechniej stosowanym regulatorem szybkości roztopiania zasypek krystalizatorowych jest węgiel w wolnej postaci. Jako nośnik wolnego węgla stosuje się grafit, sadzę lub mielony koks. Skład chemiczny zasypki powinien być projektowany w oparciu o składniki mineralne (rys. 3).

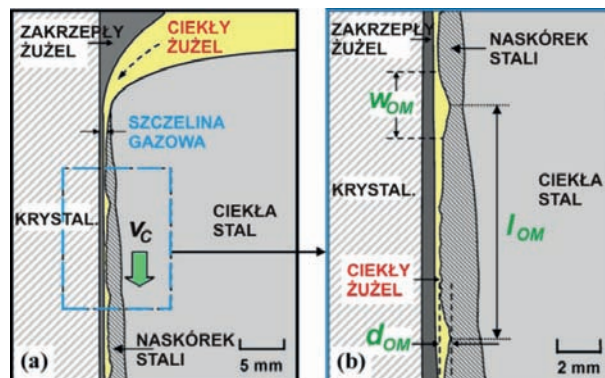


Rys. 3. Diagram składu mineralogicznego komercyjnej zasypki krystalizatorowej o zasadowości  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,0$  [6]

Fig. 3. Diagram of mineralogical composition of commercial mold powder with alkalinity of  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,0$  [6]

Skład mineralogiczny produkowanych zasypek jest najczęściej chroniony patentami i stanowi tajemnicę wytwórcy. Własności zasypek zależą przede wszystkim od ich składu chemicznego, mineralogicznego, granulometrycznego oraz technologii ich wytwarzania. Stan wymieszania składników zasypki, temperatura, czas i sposób jej suszenia lub prażenia ma duży wpływ ich na właściwości fizyczne. Ze względu na bezpośredni kontakt zasypki z powierzchnią ciekłej stali w krystalizatorze wpływa ona na zmianę właściwości powierzchniowych stali oraz pełni rolę czynnika smarującego. Istota smarującego działania ciekłego żużla krystalizatorowego, polega na jego spływaniu ponad meniskiem ciekłej stali w szczelinę między krzepnącym naskórkiem wlewka i ścianką krystalizatora. Spływając,

przy współdziałaniu ruchu oscylacyjnego krystalizatora, oddziela powierzchnię wlewka od ścianki krystalizatora zmniejszając jednocześnie tarcie pomiędzy tymi powierzchniami. Smarowanie wlewka ciągłego i ścianek krystalizatora wymaga dostarczenia odpowiedniej ilości ciekłego żużla do szczeliny gazowej (rys. 4) o odpowiedniej lepkości  $\eta$  i temperaturze krzepnięcia  $T_{sol}$ . W zależności od zasadowości (stosunek  $B_0 = \text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) i składu chemicznego zasypki krystalizatorowej, ciekły żużel krzepnie w różnych temperaturach. Im większa jest zasadowość zasypki ( $B_0 > 1$ ) tym wyższa jest temperatura krzepnięcia żużla krystalizatorowego.



Rys. 4. Przepływ ciekłego żużla w szczelinie gazowej tj. pomiędzy ścianką krystalizatora a krzepnącym wlewkiem ciągłym [7]

Fig. 4. The flow of molten slag in the gap between the wall of casting mold and solidifying billet [7]

Ciekły żużel tworzy powłokę na ścianie krystalizatora, stanowiącą zarówno barierę termiczną dla ciepła emitowanego przez wlewek jak i smarowanie jego naskórka. Powłoka żużlowa składa się z trzech warstw:

- szklistej  $d_g$ ,
- krystalicznej  $d_c$ ; których grubość wynosi ok. 2 mm i które przemieszczają się z krystalizatorem,
- ciekłej  $d_l$  (o grubości około 0,1 mm) przemieszczającej się z odlewaniem wlewkiem.

Przyjmując, że w normalnych warunkach warstwa szklista to głównie ta część, która krzepnie w pierwszym momencie odlewania. Późniejsze zmiany strumienia cieplnego lub żużla krystalizatorowego podczas odlewania będą modyfikować tylko warstwy krystaliczną i ciekłą. Stabilność powłoki żużlowej może być utrzymana tylko przez stałe dostarczanie ciekłego żużla do przestrzeni między krystalizatorem i wlewkiem, a jest to kontrolowane głównie głębokością warstwy ciekłego żużla  $d_p$  znajdującego się na powierzchni ciekłej stali w krystalizatorze [10]. Powszechnie uważa się, że aby zapewnić dobre smarowanie naskórka wlewka stalowego, głębokość ciekłego żużla  $d_p$  powinna przekraczać długość skoku ruchu oscylacyjnego krystalizatora. Często można spotkać zalecenie utrzymywania tej głębokości na poziomie większym od 10 mm [6]. Część ekspertów zaleca aby głębokość ciekłego żużla  $d_p$  wynosiła minimum 1,3 razy wielkość skoku oscylacji ( $d_p = 1,3s$ ). W zależności od warunków odlewania, zastosowanej zasypki i przekroju krystalizatora, głębokość ciekłego żużla może zmieniać się w zależności od sytuacji od 15 do 30 mm (wlewki o dużym przekroju poprzecznym np. płaskie) lub od 6 do 12 mm (wlewki o mały przekroju poprzecznym np. kw. 100, 120 mm) [11]. Od głębokości warstwy ciekłego żużla  $d_p$  zależy zarówno ilość ciekłego

żuźła infiltrującego do przestrzeni pomiędzy krystalizatorem a wlewkiem ciągłym, jak i liczba wtrąceń niemetalicznych przetransportowanych z ciekłej stali do ciekłej fazy żuźlowej. Parametrem regulującym sposób smarowania krystalizatora jest wielkość zużycia zasyпки krystalizatorowej, która związana jest z grubością tzw. ciekłego filmu  $d_l$  (cienkiej warstwy ciekłej zasyпки), jak również z głębokością znaku oscylacyjnego (OM).

Wolf [8] zwrócił uwagę, że zużycie zasyпки można wyrazić:

- $Q_t$  – ilością zużytej zasyпки wyrażoną w kg/t, lub
- $Q_s$  – ilością zużytej zasyпки na jednostkę powierzchni krystalizatora,  $\text{kg/m}^2$  – określana również jako „intensywność smarowania” ścianek krystalizatora.

Do obliczania intensywności smarowania  $Q_s$  zastosuje się równania empiryczne opracowane na podstawie analizy wpływu rzeczywistych parametrów odlewania na jakość wlewką COS lub wyprowadzonych w oparciu o wyniki regresji analizy statystycznej.

Jednym z pierwszych równań empirycznych jest zaproponowany przez Wolfa wzór, określający wpływ prędkości odlewania  $v_c$  i lepkości  $\eta_{1300}$  żuźła krystalizatorowego na intensywności smarowania  $Q_s$ . W celu uzyskania optymalnych warunków smarowania Wolf zaproponował następującą relację między tymi parametrami:  $\eta v_c^2 = 5 \pm 2 \text{ dPas} (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$ , natomiast Ogibayashi ze współ. ustalili że:  $\eta v_c = 2,5 \pm 1 \text{ dPas} (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$ .

Relacje te można przekształcić do następujących równań:

$$\text{Wolf: } Q_{s1} = \frac{0,7}{\eta^{0,5} v_c} \quad (1)$$

$$\text{Ogibayashi: } Q_{s2} = \frac{0,6}{\eta v_c} \quad (2)$$

Wielu autorów publikacji proponuje równania empiryczne zawierające jako składowe różne parametry oddziaływania (prędkość odlewania, lepkość dynamiczną żuźła, czas kroku wstecznego, częstotliwość oscylacji, skok itd.) na wielkość zużycia zasyпки  $Q_s$ . Jednakże, równanie empiryczne intensywności smarowania  $Q_s$  zaproponowane przez Wolfa w pracy [8] wydaje się ujmować najpełniej wszystkie składowe procesu COS.

Równanie to można przedstawić w następującej postaci:

$$Q_{s3} = \left( \frac{T_{pow}}{T_{top}} \right) \left( \frac{l_{kr}}{v_c} \right) \left( \frac{\eta^{0,5} s^{-0,25} f_{osc}^{0,25} v_c^{0,25}}{7,7} \right) \quad (3)$$

gdzie:

- $K$  – stała krzepnięcia,  $\text{mm/min}^{0,5}$  (do obliczeń przyjmuje się wartość sprawdzoną w doświadczeniach przemysłowych  $K' = 0,251$ ) [8],
- $T_{pow}$  – temperatura powierzchni wlewką po wyjściu z krystalizatora,  $^{\circ}\text{C}$
- $T_{top}$  – temperatura topnienia żuźła krystalizatorowego,  $^{\circ}\text{C}$
- $l_{kr}$  – długość czynna krystalizatora, m
- $\eta_{1300}$  – lepkość dynamiczna żuźła krystalizatorowego w temp.  $1300^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$
- $s$  – skok krystalizatora, m
- $f_{osc}$  – częstotliwość oscylacji krystalizatora,  $\text{cykli/min}$
- $v_c$  – prędkość odlewania,  $\text{m/min}$

Poprzez optymalizację parametrów oscylacji i prawidłowy dobór zasyпки krystalizatorowej w zależności od odlewanej gatunku stali, można ograniczyć

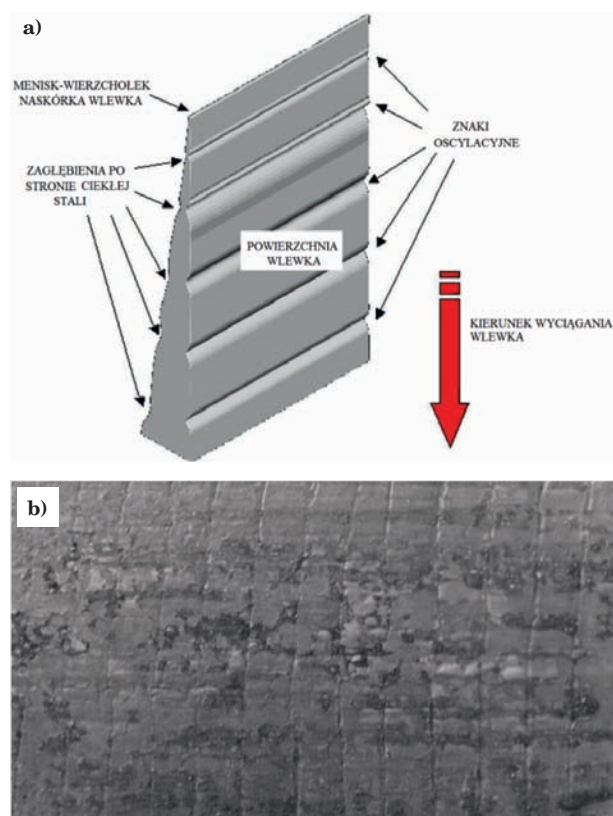
tarcie, a tym samym naprężenia w naskórku wlewką ciągłego. Do odlewania wlewką COS przyjmuje się, że parametr  $Q_s$  powinien osiągać wartości  $Q_s \approx 0,3 \text{ kg/m}^2$ . Oczywiście wartości optymalne  $Q_s$  dla każdego urządzenia COS, należy ustalić doświadczalnie w zależności od stosowanego asortymentu stali, przekroju krystalizatora i parametrów odlewania.

Brak procesu smarowania w krystalizatorze urządzenia COS prowadzi do powstawania tarcia i silnej destabilizacji powstającego naskórka wlewką ciągłego oraz może być jednym z najpoważniejszych powodów powstawania wad powierzchniowych i podpowierzchniowych wlewką, łącznie z wystąpieniem awarii na urządzeniu w postaci wycieków stali na skutek przewrzenia ciągłości naskórka.

## 2. BADANIA WPŁYwu ZASYPKI KRYSZALIZATOROWEJ NA JAKOŚĆ POWIERZCHNI WLEWKĄ CIĄGŁEGO

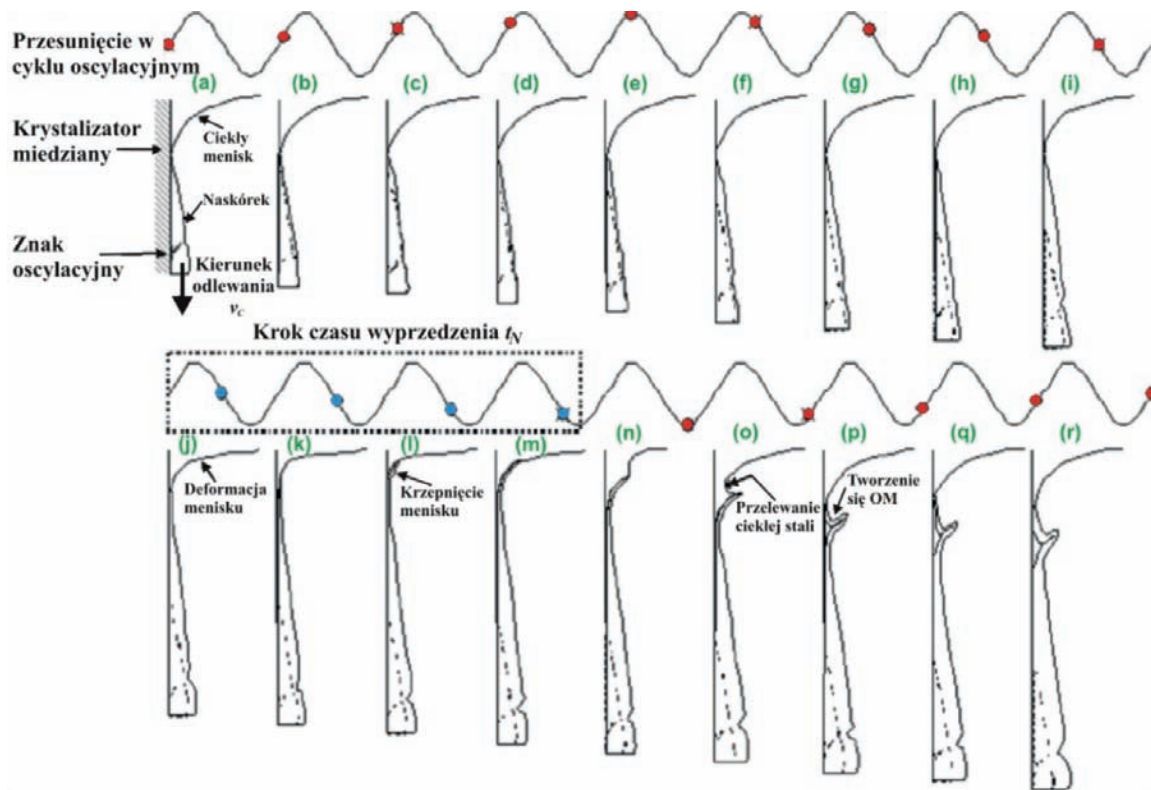
Istotnym czynnikiem wpływającym na jakość powierzchni otrzymywanych wlewką ciągłych w procesie COS jest zastosowana w krystalizatorze zasyпка. Potwierdzają to wyniki przeprowadzonych doświadczeń przemysłowych, mających na celu określenie wpływu stosowania różnych gatunków zasyпки krystalizatorowej na charakter znaków oscylacyjnych uzyskanych na powierzchni wlewką ciągłych.

Znaki oscylacyjne to charakterystyczne „wgłębienia” tworzące się na całej powierzchni wlewką ciągłego (rys. 5), otrzymanego w procesie ciągłego odlewania stali.



Rys. 5. Znaki oscylacyjne na powierzchni wlewką ciągłego: a) schemat, b) widok rzeczywisty [13, 14]

Fig. 5. Oscillation marks on ingot surfaces: a) diagram, b) real view of the ingot [13, 14]



Rys. 6. Mechanizm tworzenia się OM w cyklu oscylacyjnym krystalizatora [15]

Fig. 6. Formation mechanism of OM in the mold oscillation cycle [15]

Znaki oscylacyjne OM i towarzyszące im w warstwie podpowierzchniowej zawiązki tworzą się w miejscu, gdzie powierzchnia ciekłej stali dotyka ścianki krystalizatora w wyniku wielu złożonych zmieniających się w czasie, wzajemnie zależnych zjawisk fizycznych przy menisku. Powstawanie OM przypisywane jest zjawisku przelewania się ciekłej stali nad meniskiem w czasie ruchu oscylacyjnego krystalizatora – rys. 6. Przelewanie się ciekłej stali nad meniskiem odbywa się podczas zmiany kształtu menisku, spowodowanej wzrostem ciśnienia ciekłego żużla w szczelinie odlewniczej w wyniku ruchu wstecznego  $t_p$  krystalizatora. Turbulentny przepływ strumienia stali powoduje na powierzchni krystalizatora wynoszenie ciekłego metalu w rejon menisku wraz z różnymi ilościami chwilowo ukierunkowanych strumieni ciepła. Sposób krzepnięcia w rejonie menisku zależy od miejscowego przegrzania ciekłego metalu, dostępności i usytuowania zarodków krystalizacji, łatwości ich tworzenia się i wzrostu, oraz zakresu krzepnięcia stali ( $T_{likw} - T_{sol}$ ). Krystalizator lub obrzeże żużlowe mogą oddziaływać wzajemnie z meniskiem i naskórką podczas czasu kroku wstecznego  $t_p$ , szczególnie gdy jest on duży. Gwałtowne zmiany w gradencie temperatury spowodować mogą ciepłą deformację wierzchołka naskórka, która zależy od właściwości mechanicznych stali i zakresu wahań poziomu menisku w stosunku do wierzchołka naskórka.

Te procesy równocześnie określają kształt i wielkość znaku oscylacyjnego i zawiązki w warstwie podpowierzchniowej wlewka ciągłego. Jednym z głównych czynników wpływających na głębokość znaków oscylacyjnych jest gatunek zastosowanej zasympki krystalizatorowej, czyli rodzaj zastosowanego czynnika smarującego. W celu określenia wpływu stosowanej zasympki krystalizatorowej na jakość powierzchni wlewka cią-

głego wykonano pomiary głębokości znaków oscylacyjnych na powierzchni wlewka w zależności od zastosowanej zasympki.



Rys. 7. Granulowana zasympka krystalizatorowa zastosowana w procesie ciągłego odlewania stali

Fig. 7. Casting powder used in continuous casting processes

Badania przeprowadzono na trójżyłowym urządzeniu COS (rys. 8), podczas odlewania stali 31Mn4 o następującym składzie chemicznym: C = 0,29%, Mn = 0,90%, Si = 0,30%, P = 0,02%, S = 0,012%, Cu = 0,30%. Parametry procesu odlewania zamieszczono w tablicy 1.

Stal odlewano na trzech żyłach we wlewki o przekroju 140×165 mm. W trakcie odlewania wytopu doświadczalnego ze stali 31Mn4, jednocześnie wprowadzono do krystalizatora na dwóch żyłach zasympki krystalizatorowe różniące się właściwościami fizykochemicznymi (tabl. 2). Na żyłę nr 1, dozowano do krystalizatora na powierzchnię ciekłej stali zasympkę Scorialit SPH-C 411-81/E, natomiast na żyłę nr 2 wprowadzono zasympkę Accutherm ST-SP/521-GL1. Z odlanych wlewów ciągłych, pobrano odcinki (rys. 9), z których wykonano próbki (rys. 10) do badań i analizy kształtu



Rys. 8. Widok urządzenia COS

Fig. 8. View of CC device



znaków oscylacyjnych. Badania wykonano za pomocą mikroskopu skaningowego HITACHI S-3400 N.

Wyniki badań w postaci obrazów mikroskopowych znaków oscylacyjnych na powierzchni wlewków oraz ich wymiarów ilustrują rys. 11 i 12.

Tablica 1. Dane techniczno-technologiczne procesu oraz urządzenia COS

Table 1. Technical and technological information about continuous casting process

Wymiary krystalizatora	
szerokość	$a = 165 \text{ mm}$
grubość	$b = 140 \text{ mm}$
długość czynna	$l_{hr} = 710 \text{ mm}$
Parametry oscylacji	
współczynnik oscylacji	$cpm = 105$
skok	$s = 5 \text{ mm}$
częstotliwość	$f_{osc} = 200 \text{ cykli/min}$
czas kroku wyprzedzenia krystalizatora	$t_N = 0,088 \text{ s}$
czas kroku wstecznego krystalizatora	$t_P = 0,212 \text{ s}$
teoretyczna podziałka znaków osc.	$l_{OM} = 9,52 \text{ mm}$
Parametry procesu	
prędkość odlewania	$v_C = 1,91 \text{ m/min}$
gatunek stali	31Mn4
temperatura likwidus	$T_{likw} = 1502^\circ\text{C}$
temperatura solidus	$T_{sol} = 1401^\circ\text{C}$

W oparciu o wartości parametrów odlewania wytopu i właściwości fizyczne zastosowanych w doświadczeniach zasypki krystalizatorowych obliczono na podstawie równania (3) jednostkowe zużycie zasypki  $Q_{S5}$ , które wynosi dla:

- zasypki Scorialit SPH-C 411-81/E  $Q_{S5} = 0,15 \text{ kg/m}^2$
- zasypki Accutherm ST-SP/521-GL1  $Q_{S5} = 0,13 \text{ kg/m}^2$

Tablica 2. Skład chemiczny oraz właściwości zasypki krystalizatorowych zastosowanych w badaniach [14]

Table 2. Chemical composition and properties of the casting powders used in the research [14]

Skład chemiczny, %	Scorialit SPH-C 411-81/E	Accutherm ST-SP/521-GL1
Zasadowość $B_0 = \text{CaO/SiO}_2$	0,82÷0,94	0,55÷0,65
SiO <sub>2</sub>	25,0÷27,0%	29,3÷32,3%
CaO + MgO	23,0÷25,0%	-
CaO	-	17,1÷20,1%
MgO	-	0,9÷1,9%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,0÷11,5%	4,3÷5,8%
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	4,0÷5,5%	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,5÷4,0%	< 1,5%
Na <sub>2</sub> O	-	8,3÷9,8%
K <sub>2</sub> O	-	< 1,0%
Li <sub>2</sub> O	-	< 0,3%
$C_{całkowity}$	18,0÷20,0%	21,1÷23,6%
F	4,5÷6,0%	5,0÷6,0%
Gęstość nasypowa	0,55±0,75 kg/dm <sup>3</sup>	0,68±0,98 kg/dm <sup>3</sup>
Temperatura zmiękczenia	1140±30°C	1010±15°C
Temperatura topnienia	1210±20°C	1060±15°C
Temperatura płynności	1250±20°C	1085±15°C
Lepkość (1300°C)	8,1 Puaz	4,6 Puaz

Wyższa wartość jednostkowego zużycia zasypki  $Q_{S5}$  uzyskana przez zasypkę Scorialit SPH-C 411-81/E wskazuje, że polepszone zostały warunki smarowania powierzchni wlewków ciągłych w krystalizatorze. Lepsze warunki smarowania powierzchni wlewków pozwoliły na zmniejszenie długości i głębokości znaków oscylacyjnych.



Rys. 9. Widok przekrojów poprzecznych wlewków ciągłych

Fig. 9. View of ingot cross-section



Rys. 10. Próbkki stali do badań

Fig. 10. Steel test samples

Zasyпка Scorialit SPH-C 411-81/E w porównaniu do zasyпки Accutherm ST-SP/521-GL1 charakteryzuje się znacznie wyższą temperaturą topnienia (o 150°C) i prawie dwukrotnie większą lepkością. Zasadowość obydwu zasypek wynosi  $B_0 < 1$ . Jednakże zasadowość zasyпки Scorialit SPH-C 411-81/E jest wyższa od zasyпки Accutherm ST-SP/521-GL1 i może w zależności od proporcji składników mineralogicznych danej partii w dostawie, osiągać wartości charakterystyczne dla zasypek obojętnych  $B_0 \approx 1$ , co skutkować może możliwością powstawania niewielkiej ilości fazy krystalicznej żużla krystalizatorowego. Faza krystaliczna żużla tworzącego skrzepłą warstwę w szczelinie odlewniczej, powoduje zmniejszenie wielkości przepływu strumienia cieplnego decydującego o krzepnięciu naskórka wlewka.

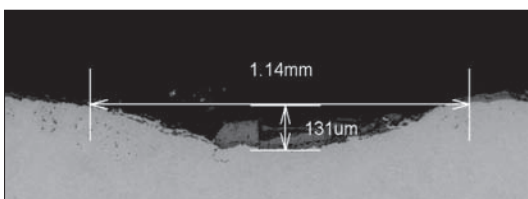
Wyniki badań wskazują, że w przypadku odlewania wlewków 165×140 mm ze stali średniowęglowej z pod-

wyższą zawartością manganu (31Mn4), należy stosować zasyпки krystalizatorowe łagodzące intensywność przepływu strumienia cieplnego w krystalizatorze, o podwyższonej lepkości i zasadowości w zakresie  $B_0 = 0,9 \div 1,1$ .

### 3. WNIOSKI

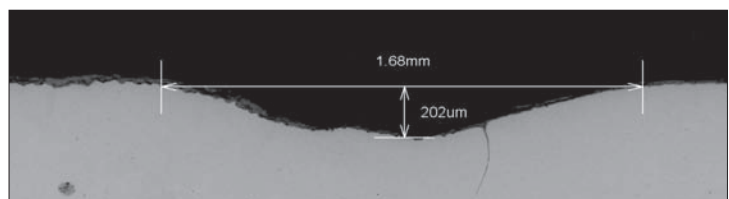
Na podstawie wykonanych badań wpływu zastosowanej zasyпки krystalizatorowej w krystalizatorze urządzenia COS na charakter znaków oscylacyjnych na powierzchni wlewka można sformułować następujące wnioski:

1. właściwości utworzonej z roztopionej zasyпки krystalizatorowej warstwy zakrzepłego żużla wpływają na przepływ ciepła w szczelinie odlewniczej pomiędzy ciekłym rdzeniem wlewka ciągłego a wodą chłodzącą krystalizator. Wpływa to na sposób powstawania i wymiary geometryczne znaków oscylacyjnych na powierzchni wlewka ciągłego,
2. wyniki przeprowadzonych badań przemysłowych wskazują, że dzięki zastosowaniu nowego gatunku zasyпки o większej zasadowości  $B_0$ , lepkości i temperaturze topnienia (Scorialit SPH-C 411-81/E) poprawione zostały warunki smarowania powierzchni wlewków odlewanych ze stali średniowęglowej z podwyższonym manganem. Uzyskano krótsze i płytsze znaki oscylacyjne, bez pęknięć powierzchni wlewka, niż w przypadku stosowania standardowej zasyпки (Accutherm ST-SP/521-GL1) dla tej grupy stali,
3. w przypadku odlewania wlewków 165×140 mm ze stali średniowęglowej z podwyższoną zawartością manganu (31Mn4), należy stosować zasyпки krysta-



Rys. 11. Obraz mikroskopowy znaków oscylacyjnych na powierzchni wlewka odlanego przy zastosowaniu zasyпки Scorialit SPH-C 411-81/E [13]

Fig. 11. Microscopic image of oscillation marks on the surface of ingot cast with the use of Scorialit SPH-C 411-81/E casting powder [13]



Rys. 12. Obraz mikroskopowy znaków oscylacyjnych na powierzchni wlewka odlanego przy zastosowaniu zasyпки Accutherm ST-SP/521-GL1 [13]

Fig. 12. Microscopic image of oscillation marks on the surface of ingot cast with the use of Accutherm ST-SP/521-GL1 casting powder [13]

lizatorowe łagodzące intensywność przepływu strumienia cieplnego w krystalizatorze (o zasadowości

w zakresie  $B_0 = 0,9 \div 1,1$  i nieznacznie podwyższonej lepkości).

#### LITERATURA

1. Mills K.C., Fox A.B.: Review of Flux Performance and Properties, 4<sup>th</sup> European Continuous Casting Conference, 14-16 October 2002, Proceedings, v. 1, s. 345-359
2. Kudliński Z.: Technologie odlewania stali, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2006
3. [http://www.mishimakosan.com/english/businesses/electroforming\\_02.html](http://www.mishimakosan.com/english/businesses/electroforming_02.html) 7.01.2013
4. Mamro K: Zjawiska w krystalizatorze maszyny COS i ich wpływ na metalurgiczną jakość wlewka ciągłego, Materiały szkoleniowe Huty Baildon, 1999
5. Mills K.C.: The performance of casting powders, Steel Technol. Int. 1994, s. 161-166.
6. Machingawuta N.C., Grieveson P.: Constitution of continuous casting fluxes, 3<sup>rd</sup> International Conference on MOLTEN SLAGS AND FLUXES, 27-29 June 1988, University of Strathclyde, Glasgow, s. 182-189.
7. Shin H.J, Kim S.H., Thomas B.G., Lee G.G., Park J.M., Sengupta J: Measurement and prediction of lubrication, powder consumption, and oscillation mark profiles in ultra-low carbon steel slabs, ISIJ International, 2006, v. 46, n. 11, s. 1635-1644.
8. Wolf M.: Mould powder consumption – a useful criterion?, 2<sup>th</sup> European Continuous Casting Conference, 1994 Dusseldorf, s. 78-85.
9. Soares R.B., Vilela A.C.F.: Mould powders – a review and the billet casting, 3<sup>rd</sup> European Conference on Continuous Casting, 1998, October 20÷23, s. 1003-1006,
10. 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](http://www.ariel.ac.il/sites/conf/mmt/MMT-2000/papers/208-217.doc)
11. Badri A., Natarajan T.T., Snyder C.C., Powers K.D., Mannion F.J., Cramb A.W.: A Mold Simulator for the Continuous Casting of Steel: Part I. The Development of a Simulator, Metallurgical and Materials Transactions B, vol. 36 b, s. 355-371, June 2005
12. Zuba G., Stadelmeier P., Freiseisen W.: Stell formation and behaviour studied by a two dimensional model of the meniscus region, 4<sup>th</sup> European Continuous Casting Conference, 14-16 October 2002, International Convention Centre Birmingham, vol. 1, s. 139-148
13. Sorek A., Kudliński Z.: „Wpływ zasypki krystalizatorowej na jakość powierzchni wlewków ciągłych”, Hutnik-Wiadomości Hutnicze, nr.11, s. 631-635, 2010 r.
14. Sorek A.: „Rola strefy przymeniskowej w krystalizatorze COS w kształtowaniu jakości powierzchni stalowego wlewka ciągłego”, Praca doktorska, Katowice, 2011
15. Badri A., Natarajan T.T., Snyder C.C., Powers K.D., Mannion F.J., Byrne M., Cramb A.W.: A Mold Simulator for the Continuous Casting of Steel: Part II The formation of oscillation marks during the continuous casting of low carbon steel, Metallurgical and Materials Transactions B, vol. 36 b, s. 373-383, June 2005
16. Sengupta J., Brian G. Thomas: Visualizing hook and oscillation mark formation in continuously cast ultra-low carbon steel slabs. The Minerals, Metals & Materials Society, JOM, 2006, <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0612/Sengupta/Sengupta-0612.html> 7.05.2010
17. Takeuchi E., Brimacombe J.K.: The Formation of Oscillation Marks in the Continuous Casting of Steel Slabs. Metallurgical and Materials Transactions B, vol. 15B, September 1984, pp. 493-509
18. Pinheiro C.A.M., Samarasekera I.V., Brimacombe J.K., Howes B., Gussias O.: Mould heat transfer and continuously cast quality with mould flux lubrication. Part 2, Ironmaking and Steelmaking, vol. 27, no. 2, s.144-159, 2000