
PRACE

**Instytutu Ceramiki
i Materiałów Budowlanych**

Scientific Works
of Institute of Ceramics
and Building Materials

Nr 34
(lipiec–wrzesień)

Prace są indeksowane w BazTech i Index Copernicus

ISSN 1899-3230

Rok XI

Warszawa–Opole 2018

IZABELA MAJCHROWICZ*

JÓZEF BARAŃSKI**

JERZY WITEK***

HARALD KANIA****

Powłoki ograniczające utlenianie powierzchni wlewków stalowych w trakcie studzenia i nagrzewania

Słowa kluczowe: wlewki stalowe, zgorzelina, powłoka ochronna, zwilżalność.

W pracy przedstawiono wyniki badań nad możliwością zmniejszenia ilości zgorzeliny powstającej na powierzchni wlewków ciągłych podczas dwóch cykli produkcyjnych stali, a mianowicie ciągłego odlewania i ogrzewania wsadu (wlewków COS) do procesu walcowania. Cel ten starano się osiągnąć poprzez zastosowanie powłoki ceramicznej. Cztery powłoki wykonane z dwóch zawiesin i dwóch zoli kwasu krzemowego nałożono na powierzchnię wlewka stalowego. Powłoki nakładano w temperaturze otoczenia lub na płytki ogrzane do 850°C, następnie powlekane płytki ogrzewano do 1250°C. Pierwsza metoda symulowała warunki procesu obróbki plastycznej, podczas gdy druga – warunki procesu ciągłego odlewania.

Określono zwilżalność stali przez zawiesiny i zole kwasu krzemowego w temperaturze pokojowej oraz w 850 i 1250°C za pomocą mikroskopu wysokotemperaturowego. Badania wykazały, że najlepsze wyniki (najmniejszą grubość zgorzeliny) uzyskano w przypadku zastosowania zawiesiny otrzymanej na bazie sproszkowanego szkła kwarcowego oraz zoli kwasu krzemowego napylnych na zimny wlew. W przypadku zawiesiny, napylenie jej w temperaturze pokojowej spowodowało, że była ona trwała i nie uległa odspojeniu, jak w przypadku zawiesiny napyłonej w 850°C. Z kolei napylenie zoli na zimno, dało w wyniku zdecydowanie cieńszą warstwę zgorzeliny i powłoki.

* Mgr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Materiałów Ogniotrwałych w Gliwicach, i.majchrowicz@icimb.pl

** Mgr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Materiałów Ogniotrwałych w Gliwicach, j.baranski@icimb.pl

*** Mgr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Materiałów Ogniotrwałych w Gliwicach, j.witek@icimb.pl

**** Dr inż., Instytut Metalurgii Żelaza w Gliwicach, hkania@imz.pl

1. Wstęp

Procesy stalownicze w zależności od etapu produkcyjnego generują w mniejszej lub większej ilości szereg żelazonośnych materiałów odpadowych (pyły, mułki, szlamy, zgorzelina itp.). Częściowo są one składowane na hałdach, zanieczyszczając środowisko naturalne lub podlegają recyklingowi poprzez ich zawracanie do ponownego obiegu produkcyjnego jako zamienniki materiałów wsadowych (np. rudy żelaza). Aby zmniejszyć ilość składowanych materiałów odpadowych, poszukuje się efektywnych metod ich utylizacji, lub zgodnie z ideą „czystszej produkcji” ich eliminacji u „źródła”, czyli podczas procesu wytwórczego. Koncepcja przeprowadzonych prac badawczych przedstawionych w niniejszym artykule, zakładała obniżenie ilości tworzenia się materiału odpadowego podczas dwóch cykli produkcji stali, mianowicie w procesie ciągłego odlewania i nagrzewania wsadu (wlewków COS) do procesu walcowania [1–2].

Wspólnym dla obydwu procesów materiałem odpadowym jest zgorzelina tworząca się na powierzchni wlewka ciągłego. Powstawanie zgorzeliny na skutek utleniania powierzchni wlewka ciągłego w procesie COS, a następnie podczas jego nagrzewania do procesów przeróbki plastycznej (walcowanie, kucie), powoduje znaczne ubytki materiałowe i konieczność utylizacji dużej ilości materiału odpadowego. Informacje uzyskane w jednej z krajowych hut wskazują, że straty materiałowe na skutek powstawania zgorzeliny w procesie ciągłego odlewania stali wynoszą ok. 2,5 kg na tonę wyprodukowanej stali. Można zatem oszacować, że typowa minihuta produkująca w skali roku 350 tys. t surowej stali, generuje ok. 875 t materiału odpadowego w postaci zgorzeliny. Przyjmuje się, że zgorzelina powstała tylko w operacjach obróbki plastycznej, powoduje straty w ilości 7–10% w ogólnej ilości produkcji stali na świecie. Powstające w ten sposób straty materiałowe w skali całego hutnictwa są więc ogromne.

Zmniejszenie tworzenia się zgorzeliny nawet w niewielkim stopniu, pozwoliłoby na uzyskanie ogromnych oszczędności ekonomicznych i ekologicznych.

Jak wskazują doświadczenia prowadzone w różnych ośrodkach naukowo-badawczych, odporność metalu na korozję (utlenianie) można zwiększyć przez zastosowanie powłok ceramicznych lub kompozytowych [3]. Pośród wielu powłok tlenkowych [2–7], zastosowanie krzemionki wydaje się być bardzo obiecujące ze względu na jej wysoką odporność korozyjną i na ścieranie [4, 10–13].

W Japonii w latach 80. prowadzone były badania przez zespół Hisao Odashima [14–15] pokrywania w temperaturze ok. 1000–1300°C powierzchni płaskich wlewków ciągłych inhibitorem zabezpieczającym przed dalszym utlenianiem. Zastosowany wówczas inhibitor składał się z mieszaniny ogniotrwałego proszku SiO_2 , Al oraz koloidalnej miki związanej z nawęgloną krzemionką. Inhibitorem tym pokrywano z pozytywnym skutkiem różne gatunki stali (np. stali perytek-

tycznych, stali CORTEN, stali stopowych o zawartości 9% Ni i stali wysoko-stopowej w gatunku 304). Utworzone wówczas powłoki chroniły wlewki ciągle przed korozją gazową podczas nagrzewania wlewków do walcowania oraz łatwo dawały się usunąć na zbijaczu zgorzeli.

Aby powłoka antykorozyjna naniesiona na powierzchnię wlewka ciągłego spełniała swoje zadanie, powinna szczelnie zabezpieczyć całą powierzchnię tego wlewka. Doświadczenia przemysłowe wskazują, że uzyskanie w 100% szczelnego pokrycia powierzchni wlewka jest praktycznie niemożliwe. Pełne zablokowanie procesów utleniania jest niezwykle trudne, ponieważ powierzchnia wlewka po wyjściu z krystalizatora COS jest pokryta, w większej lub mniejszej ilości, żużlem krystalizatorowym, powstałym z roztopionej zasytki i wypływających wtrąceń niemetalicznych, a następnie w komorze chłodzenia wtórnego narażona jest na działanie natrysku wodnego lub wodno-powietrznego. Zanieczyszczenia żużlowe osadzone na powierzchni wlewka uniemożliwiają uzyskanie pełnego, szczelnego pokrycia wlewka ciągłego. W takim przypadku tworzenie się cienkiej warstwy zgorzeli może być czynnikiem sprzyjającym w „samoistnym czyszczeniu” powierzchni wlewka z nagromadzonych zanieczyszczeń powstałych w procesie ciągłego odlewania stali.

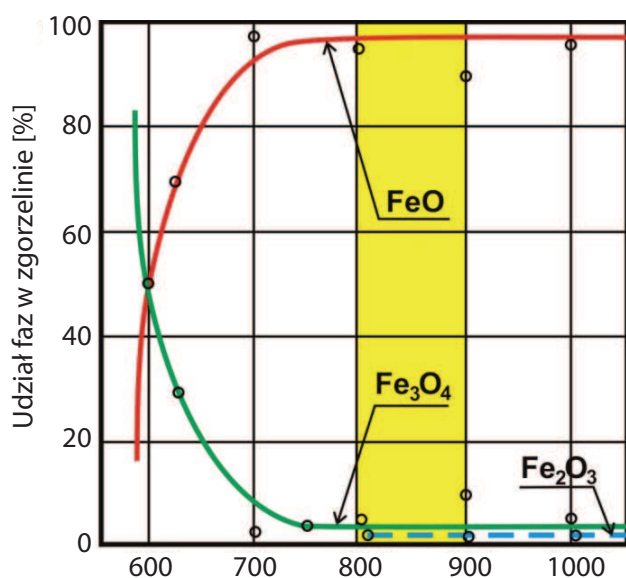
W przeprowadzonych badaniach założono, że skoro nie można całkowicie zahamować procesów utleniania powierzchni wlewka (zablokować dyfuzji tlenu), natomiast zgorzelina powstała w procesie COS może być czynnikiem korzystnym dla jakości wlewka ciągłego, to po pokryciu powłoką zgorzelina powinna charakteryzować się następującymi właściwościami:

- tworzyła jak najcieńszą warstwę na wlewkach podczas odlewania ciągłego i chroniła go antykorozyjnie do momentu dalszego przerobu (walcowania, kucia);
- zabezpieczała powierzchnię wlewka przed nadmiernym utlenianiem podczas jego nagrzewania przed walcowaniem (lub innymi procesami przeróbki plastycznej);
- gwarantowała dobrą przyczepność tzn. taką, przy której zgorzelina nie będzie odpadać w piecu grzewczym;
- dawała się łatwo usunąć (przez zbijacz zgorzeli) po nagrzaniu wsadu do walcowania.

Przyjęte założenia przedstawiają wysoki stopień trudności, ponieważ już sam fakt uzyskania dobrej przyczepności zgorzeli, a później jej łatwe usunięcie może się wzajemnie wykluczać.

Z analizy danych literaturowych [16–20] wynikało, że najefektywniejsze pokrywanie czynnikami (powłokami) blokującymi proces dyfuzji tlenu do powierzchni i w głąb wlewka ciągłego, powinno prowadzić się w zakresie temperatury 750–1050°C, tj. wówczas, gdy wlewek ciągły opuszcza komorę chłodzenia wtór-

nego. Jak wynika z ryciny 1, powyżej temperatury 600°C zgorzelina składa się głównie z wistytu (FeO), a więc fazy tlenkowej żelaza o najniższym stopniu utlenienia, która bezpośrednio przylega do metalu (powierzchni wlewka COS). W środowisku pary wodnej (komorze chłodzenia wtórnego) możemy również uzyskać niewielką ilość magnetytu (Fe_3O_4), co nie jest czynnikiem korzystnym z powodu tworzenia się zgorzeliny dwuwarstwowej. Pomimo tego nanoszenie warstwy antykorozyjnej w wymienionym zakresie temperatury wydaje się być ze względów technicznych najlepszym rozwiązaniem (odpowiada to złotemu obszarowi na ryc. 1).



Ryc. 1. Wpływ temperatury na fazowy skład zgorzeliny tlenkowej na żelazie [16]

2. Metodyka badań

Do doświadczeń przygotowano cztery prekursory powłok. Dwa z nich były zawiesinami sproszkowanego szkła kwarcowego i ogniotrwałej gliny mielonej w wodzie, bez i z dodatkiem proszku tlenku glinu. Dwa pozostałe stanowiły dostępne na rynku zole kwasu krzemowego. Skład zawiesin przedstawiono w tabeli 1, a skład chemiczny oraz własności zawiesin i zoli kwasu krzemowego zobrazowano w tabeli 2.

T a b e l a 1

Składniki zawiesin [%]

Składnik	Zawiesina 1	Zawiesina 2
Szkło kwarcowe	60,6	49,6
Proszek Al_2O_3	–	12,4
Gлина mielona	3,0	5,0
Woda	36,4	33,0

Ź r ó d ł o: Tab. 1–3 – opracowanie własne.

Tabela 2

Właściwości fizykochemiczne zawiesin i zoli kwasu krzemowego

Oznaczenie powłoki	A	B	C	D
Parametry	zawiesina 1	zawiesina 2	zol kwasu krzemowego 1	zol kwasu krzemowego 2
Analiza chemiczna [%]				
Straty prażenia	36,5	33,0	69,8	59,5
SiO ₂	61,6	51,9	29,8	40,0
Al ₂ O ₃	1,27	14,4	–	–
Na ₂ O	–	–	0,34	0,42
Lepkość [MPa·s]	1016	1080	109	200
Gęstość [g/cm ³]	1,66	1,80	1,20	1,29

Doświadczenia nanoszenia powłok prowadzono odwzorowując z możliwie największą dokładnością warunki przemysłowe.

Próbki w postaci płytek o wymiarach 100 x 100 mm i grubości 20 mm odcięto z przemysłowych wlewków ciągłych odlanych w gatunku stali S335J2, otrzymanych z jednej krajowej huty. Skład chemiczny płytek przedstawiono w tabeli 3. Indeks cał. przy Al oznacza sumę Al metalicznego i Al w związkach, przy czym Al metaliczny stanowił min. 80% Al_{cał.}

Tabela 3

Skład chemiczny płytek stalowych [% mas.]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al _{cał.}	V
0,17	1,25	0,29	0,016	0,005	0,07	0,08	0,14	0,01	0,016	0,017

Zawiesiny i zole kwasu krzemowego napyłano pistoletem na sprężone powietrze w następujący sposób:

- w pierwszej kolejności, na płytki zimne, sprawdzając ich przyczepność do podłoża,
- w drugiej kolejności symulując warunki przemysłowe.

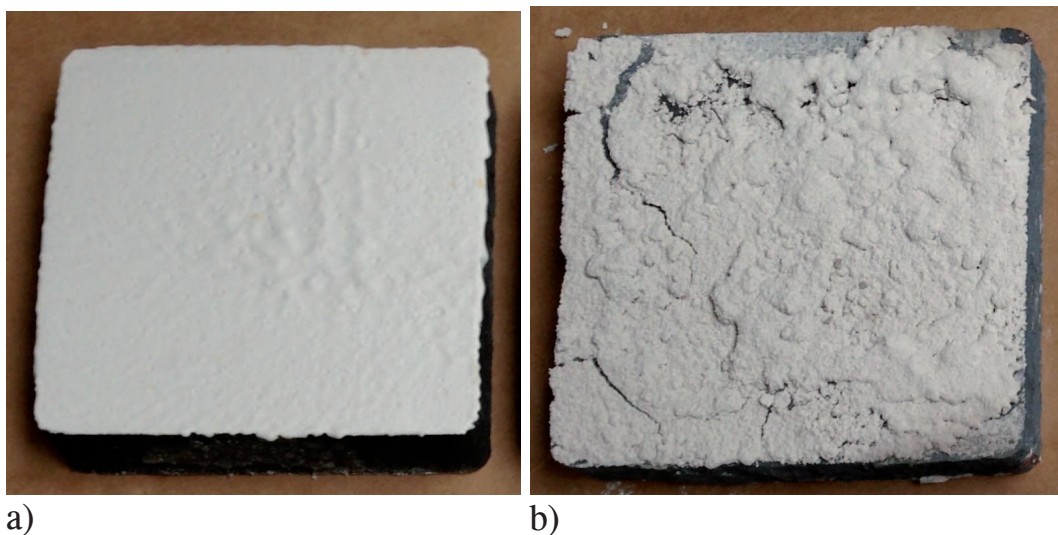
Warunki procesu ciągłego odlewania stali symulowano, nagrzewając w laboratoryjnym piecu elektrycznym płytki do temperatury 850°C (temperatura powierzchni wlewka po wyjściu z komory chłodzenia wtórnego). Po wyjęciu płytek z pieca, ich powierzchnię pokrywano zawiesinami i zolami kwasu krzemowego za pomocą pistoletu na sprężone powietrze. Następnie **symulowano warunki procesu przeróbki plastycznej**; płytki pokrywano w temperaturze otoczenia powłokami antykorozyjnymi, a następnie ogrzewano je do temperatury 1250°C (temperatura początku walcowania).

Za pomocą mikroskopu wysokotemperaturowego firmy Leitz przeprowadzono pomiary kąta zwilżalności stali przez zawiesiny i zole kwasu krzemowego

w temperaturze 850 i 1250°C oraz temperaturze pokojowej (po wystudzeniu próbek). Ocena pokrycia poszczególnych powłok na płytkach stalowych uzupełniono badaniami metalograficznymi.

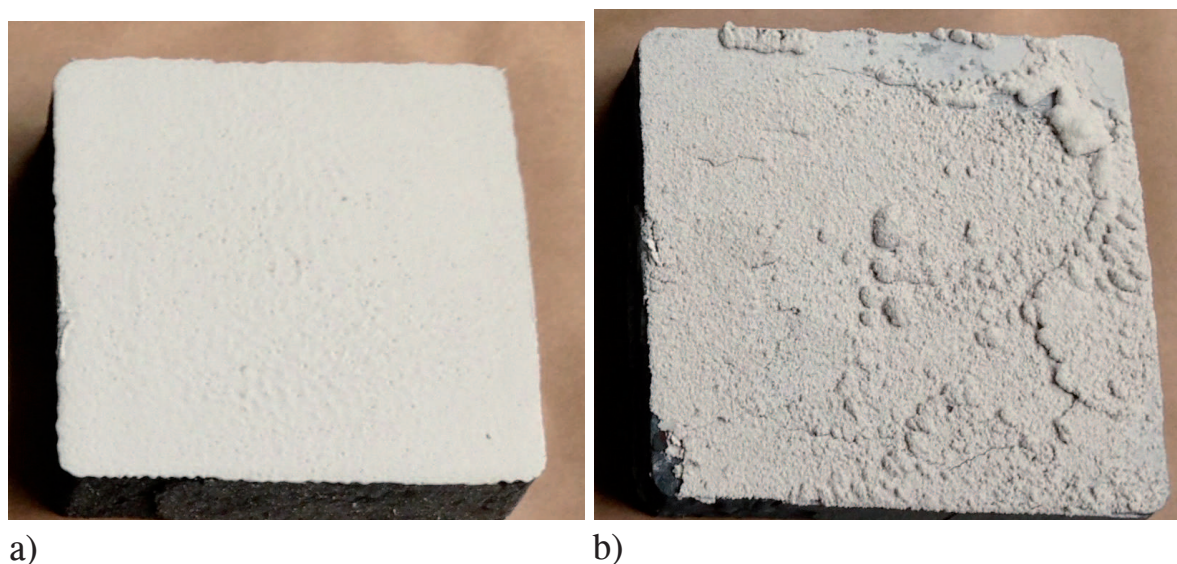
3. Wyniki badań

Na rycinach 2–4 przedstawiono płytki po napyleniu powłokami w temperaturze otoczenia i w temperaturze 850°C.



Źródło: Ryc. 2–9 – opracowanie własne.

Rys. 2. Płytki pokryte powłoką A: a) na zimno, b) w temperaturze 850°C



Rys. 3. Płytki pokryte powłoką B: a) na zimno, b) w temperaturze 850°C



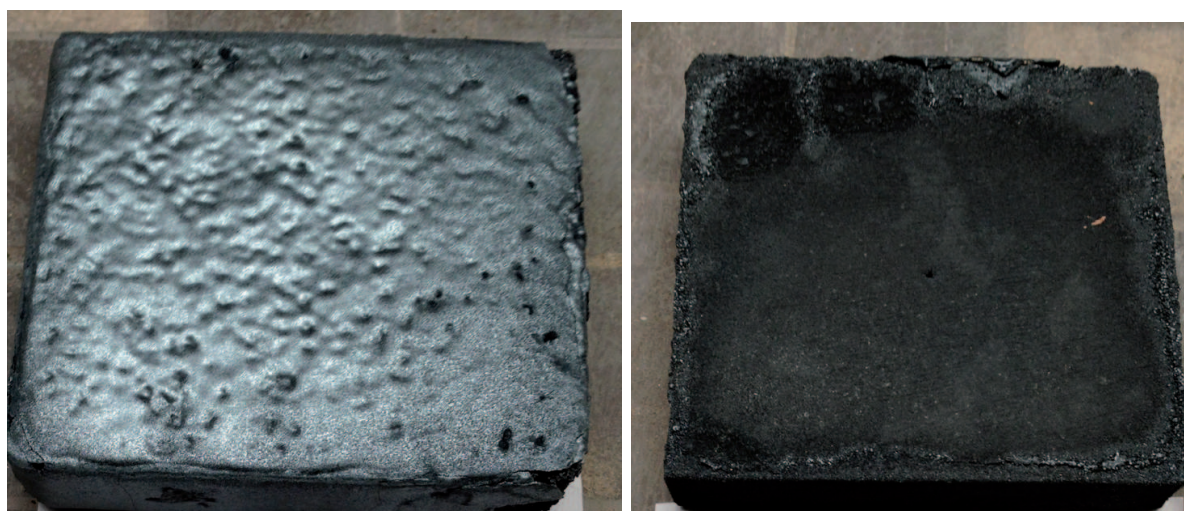
a)

b)

Ryc. 4. Płytki napyłone w temperaturze 850°C: a) powłoka A, b) powłoka B

Powłoki A i B napyłone na zimno były gładkie, jednorodne i dobrze przylegały do podłoża. Te same powłoki napyłone na powierzchnię gorącą płytki (850°C) nie tworzyły zwartej, jednorodnej powłoki, lecz były chropowate, prawdopodobnie w wyniku szybkiego odparowania wody z powłoki po zetknięciu się z nagrzanym podłożem próbki oraz wskutek utworzenia się zgorzeliны podczas nagrzewania płytek do założonej temperatury.

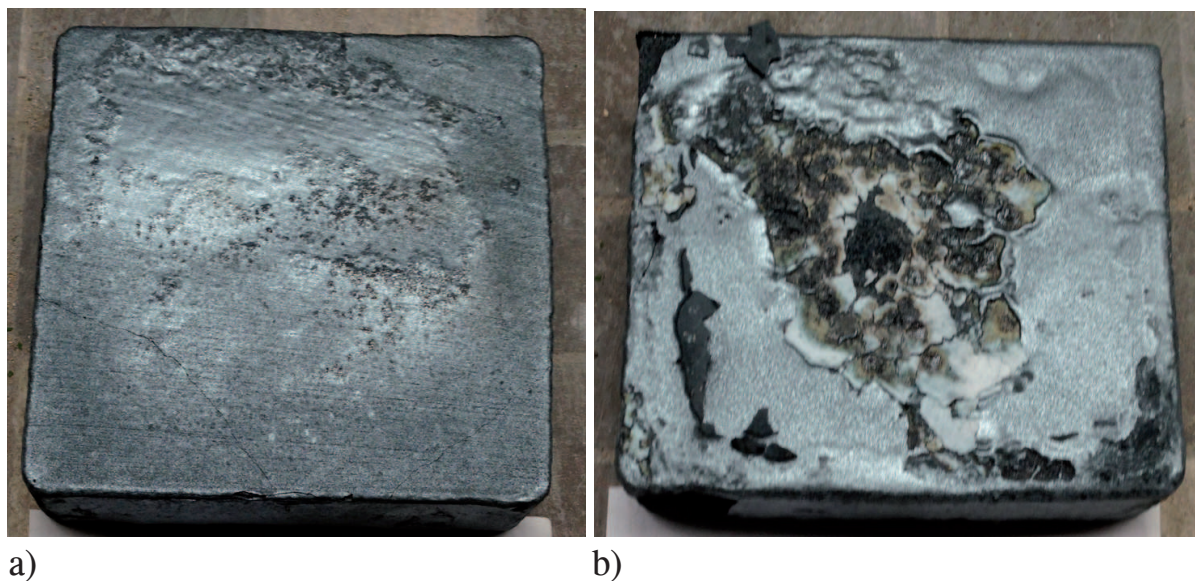
Na rycinach 5–7 przedstawiono próbki nagrzane do temperatury 1250°C (początku walcowania). Próbki te wcześniej pokryto powłokami A i B w temperaturze otoczenia.



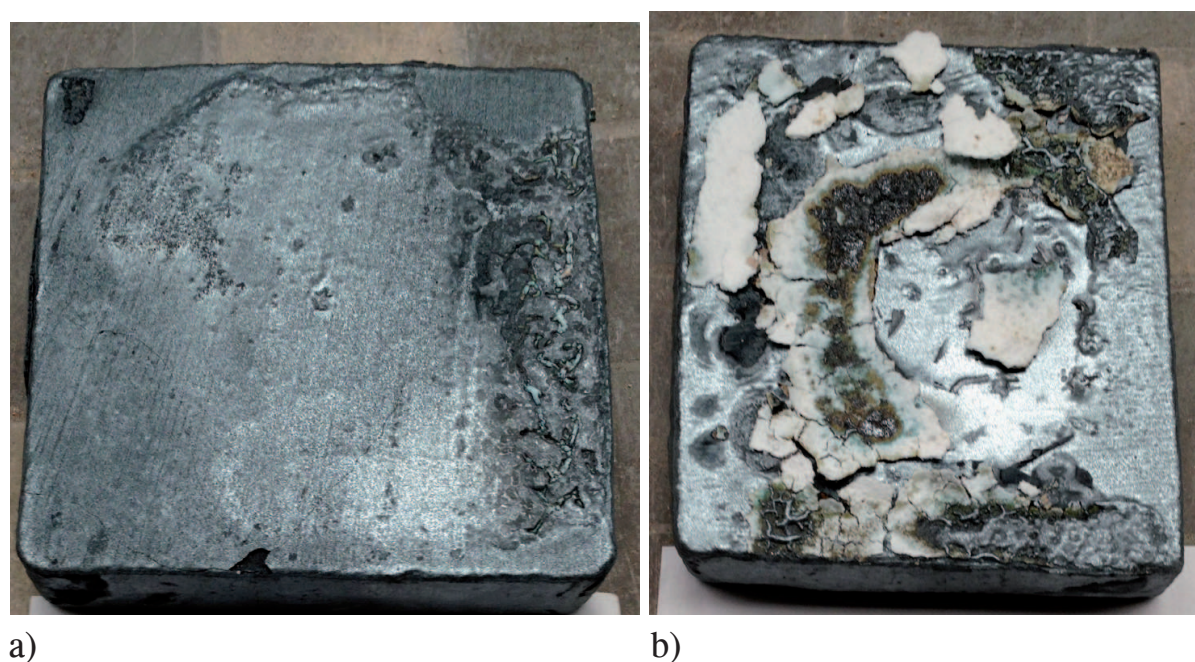
a)

b)

Ryc. 5. Próbki napyłone na zimno i nagrzane do temperatury 1250°C/2 h:
a) powłoką A, b) powłoką B



Ryc. 6. Płytki pokryte powłoką C: a) na zimno, b) w temperaturze 850°C i wystudzone; następnie nagrzane do temperatury 1250°C/2 h

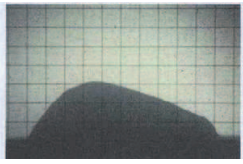
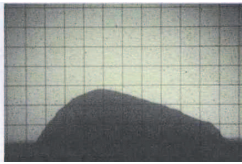
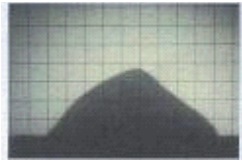
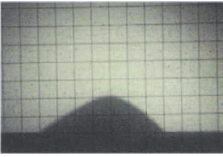
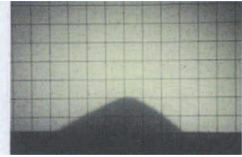
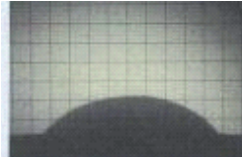
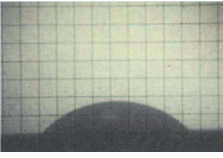
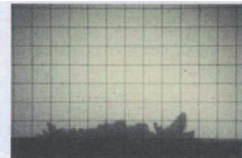

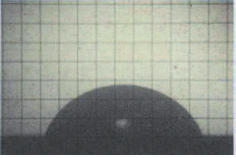
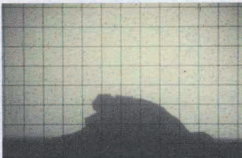
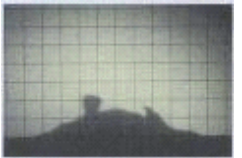


Ryc. 7. Płytki pokryte powłoką D: a) na zimno, b) w temperaturze 850°C i wystudzone; następnie nagrzane do temperatury 1250°C/2 h

Powłoka A wykonana z zawiesiny 1 utworzyła szklistą warstwę ściśle przylegającą do podłoża, co może świadczyć o częściowym nadtopieniu powłoki na powierzchni próbki. Powłoka B utworzona z zawiesiny 2 była matowa, prawdopodobnie dzięki temu, że zawierała w swoim składzie dodatkowo tlenek glinu, którego obecność zwiększyła temperaturę topienia powłoki. Powłoki C i D napyłone na zimno z zolu kwasu krzemowego 1 i 2 nie różniły się znacząco od siebie. Po ogrzewaniu utworzyły szklistą warstwę, cieńszą niż w przypadku

powłok A i B napylnych z zawiesin. Z kolei powłoki C i D napyłone na gorąco z zolu kwasu krzemowego 1 i 2 były niejednorodne, prawdopodobnie w wyniku obecności zgorzeli na ogrzonym podłożu w trakcie ich napyłania, której nie udało się w całości usunąć z powierzchni płytek.

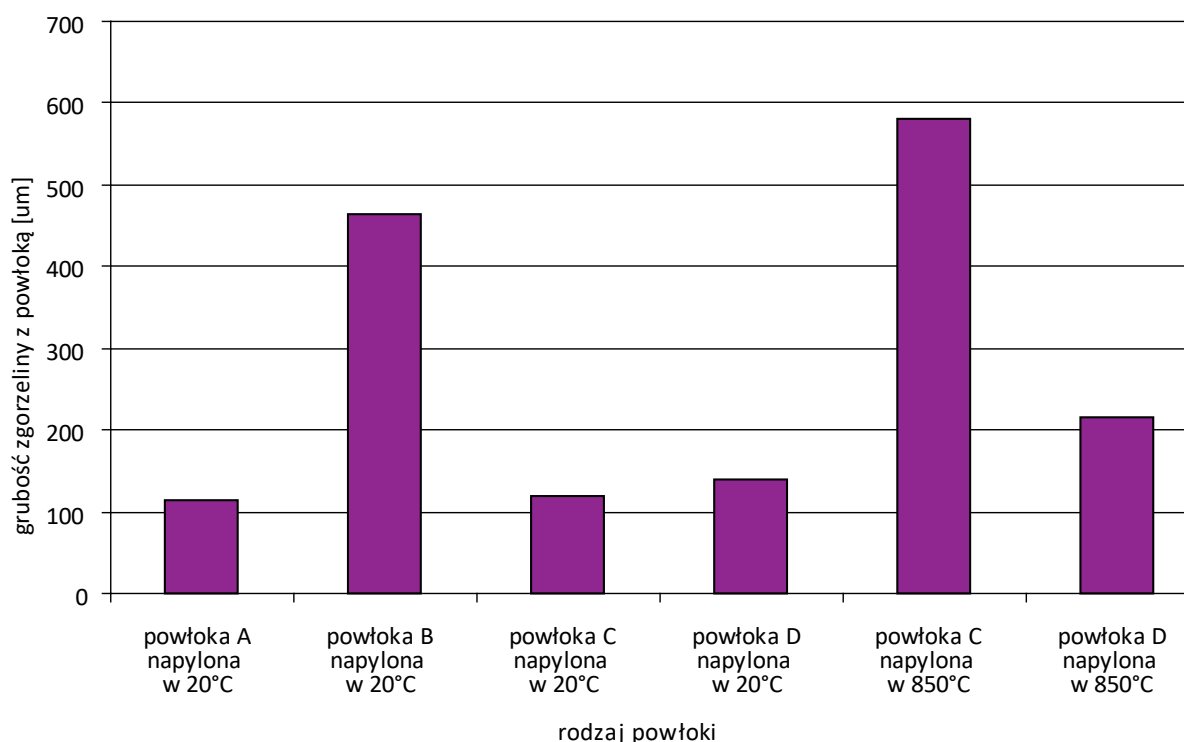
Na rycinie 8 przedstawiono obrazy z mikroskopu wysokotemperaturowego kropli powłok A–D, wykonanych z zawiesin i zoli kwasu krzemowego na podłożu stalowym w temperaturze pokojowej 850 i 1250°C wraz z wartością wyznaczonego kąta zwilżania.

Rodzaj próbki/temperatura	20°C	850°C	1250°C
Powłoka A (zawiesina 1)	$\Theta = 70^\circ$ 	$\Theta = 65^\circ$ 	$\Theta = 66^\circ$ 
Powłoka B (zawiesina 2)	$\Theta = 52^\circ$ 	$\Theta = 48^\circ$ 	$\Theta = 46^\circ$ 
Powłoka C (zol kwasu krzemowego 1)	$\Theta = 40^\circ$ 	Θ – nie oznaczono 	Θ – nie oznaczono 
Powłoka D (zol kwasu krzemowego 2)	$\Theta = 66^\circ$ 	$\Theta = 69^\circ$ 	Θ – nie oznaczono 

Ryc. 8. Obrazy i wyniki pomiarów kąta zwilżalności powłok A–D, uzyskane na podstawie badań w mikroskopie wysokotemperaturowym

Obserwacje pod mikroskopem wysokotemperaturowym wykazały, że w temperaturze 1250°C dla wszystkich powłok (A–D) zmienił się kształt kropli próbki. W przypadku powłoki A (zawiesina 1) zaobserwowano utworzenie „kopca”, natomiast powłoka B (zawiesina 2) utworzyła regularne półkole. Z kolei pozostałości powłok C i D (zole kwasu krzemowego 1 i 2) uległy rozsypaniu. Kąt zwilżania podłoża przez wszystkie próbki (powłoki A–D) był mniejszy niż 90°C, co świadczy o dobrym pokryciu podłoża powłoką w trakcie napyłania. Najmniejszym kątem zwilżania w temperaturze pokojowej, czyli największym rozplywem charakteryzowała się powłoka C (zol kwasu krzemowego 1). Z kolei największy kąt zwilżania posiadała powłoka A (zawiesina 1).

Na rycinie 9 przedstawiono grubość warstwy zgorzeliny i powłoki na próbkach pokrytych powłokami A–D po ogrzaniu do temperatury 1250°C i wystudzeniu do temperatury pokojowej.



Ryc. 9. Grubość zgorzeliny z powłoką po ogrzaniu do temperatury 1250°C i wystudzeniu do temperatury pokojowej

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że najmniejsza grubość zgorzeliny i powłoki występuje na próbkach pokrytych powłokami A, C i D (zawiesina 1 i zole kwasu krzemowego 1 i 2) napyłonych na zimno. Grubość powstałej warstwy zgorzeliny wraz z powłoką wynosi od 114 do 140 µm. Na podstawie tego wyniku można przypuszczać, że naniesienie powłok A, C i D na zimno prowadziło do ograniczenia utleniania podłoża.

4. Podsumowanie i wnioski

W ramach niniejszych badań powierzchnie stalowych próbek pokrywano powłokami antykorozyjnymi A, B, C i D. Powłoki te nanoszono na płytki w temperaturze otoczenia lub ogrzane do temperatury 850°C, po czym płytki z powłoką ogrzewano do temperatury 1250°C. Pierwszy sposób symulował warunki procesu przeróbki plastycznej, natomiast drugi – warunki procesu odlewania ciągłego. Wyniki przeprowadzonych doświadczeń wskazały, że opracowane w ramach badań powłoki antykorozyjne mogą skutecznie chronić powierzchnie stalowych wlewków ciągłych odlanych ze stali S335J2.

Najlepsze rezultaty (najmniejszą grubość zgorzeli i powłoki) uzyskano w przypadku zastosowania powłoki A otrzymanej na bazie sproszkowanego szkła kwarcowego oraz powłoki C i D (zoli kwasu krzemowego).

Badania wykazały, że najlepsze wyniki uzyskano dla powłok napylnych na zimno. Napylenie powłok w temperaturze pokojowej spowodowało, że były one trwałe i nie uległy odspojeniu, jak w przypadku powłok napylnych w 850°C. W związku z tym zaleca się, aby powłoki ochronne nanosić na zimne wlewki przed ich ogrzaniem do walcowania.

Aby jednoznacznie stwierdzić skuteczność badanych powłok w ochronie wlewków stalowych przed utlenianiem należy powyższe wyniki zweryfikować w próbach przemysłowych*.

Literatura

- [1] Woźniak D., Kania H. i in., Badania nad powłokami ograniczającymi utlenianie wlewków stalowych w procesie ciągłego odlewania i przeróbki plastycznej, Sprawozdanie nr S0-0899 z 2015 r. (niepublikowane).
- [2] Majchrowicz I., Barański J., Badania nad opracowaniem powłok ograniczających utlenianie wlewków stalowych w trakcie obróbki cieplnej, Sprawozdanie nr 2N011S15/BS/2015 z 2015 r. (niepublikowane).
- [3] Adamczyk L., Pietrusiak A., Bala H., *Protective properties of PEDOT/ABA coatings deposited from micellar solution on stainless steel*, „Archives of Metallurgy and Materials” 2011, Vol. 56, s. 883–889.
- [4] Di Maggio R., Fedrizzi L., Rossi S., Scardi P., *Dry and wet corrosion behaviour of AISI 304 stainless steel coated by sol-gel ZrO₂-CeO₂ films*, „Thin Solid Films” 1996, Vol. 286, No. 1/2, s. 127–135.
- [5] Reddy I.N., Reddy V.R., Sridhara N., Rao V.S., Bhattacharya M., Bandyopadhyay P., Basavaraja S., Mukhopadhyay A.K., Sharma A.K., Dey A., *Development of SiO₂ based thin film on metal foils for space application*, „Ceramics International” 2013, Vol. 39, s. 8493–8498.

* Praca została sfinansowana ze środków na działalność statutową Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych.

- [6] Tomachuk C.R., Elsner C.I., Di Sarli A.R., Ferraz O.B., *Anti-corrosion performance of Cr⁺⁶-free passivating layers applied on electrogalvanized*, „Materials Chemistry and Physics” 2010, Vol. 119, s. 19–29.
- [7] Ćurković L., Otmačić Ćurković H., Salopek S., Majić Renjo M., Šegota S., *Enhancement of corrosion protection of AISI 304 stainless steel by nanostructured sol-gel TiO₂ films*, „Corrosion Science” 2013, Vol. 77, s. 176–184.
- [8] Atik M., Aegerter M.A., *Corrosion resistant sol gel ZrO₂ coatings on stainless steel*, „Journal of Non-Crystalline Solids” 1992, Vol. 147/148, s. 813–819.
- [9] Atik M., De Lima Neto P., Avaca L.A., Aegerter M.A., Zarzycki J., *Protection of 316L stainless steel against corrosion by SiO₂ coatings*, „Journal of Materials Science Letters” 1994, Vol. 13, s. 1081–1085.
- [10] Chęcmanowski J.G., Głuszek J., Masalski J., Krysztalkiewicz A., *Rola nanokrzemionki w preparatyce powłok SiO₂ otrzymywanych metodą zol-żel*, „Inżynieria Materiałowa” 2002, nr 5, s. 359–363.
- [11] Szalkowska E., Masalski J., Głuszek J., *Electrochemical evaluation of protective properties of two-component SiO₂-TiO₂ coatings obtained by sol-gel method*, „Inżynieria Materiałowa” 2002, Vol. 23, No. 5, s. 503–507.
- [12] Castro Y., Ferrari B., Moreno R., Duran A., *Corrosion behaviour of silica hybrid coatings produced from basic catalysed particulate sols by dipping and EPD*, „Surface and Coatings Technology” 2005, Vol. 19, s. 228–235.
- [13] Walczak M., *Charakterystyka powłok ceramicznych SiO₂ i SiO₂-TiO₂ otrzymywanych metodą zol-żel*, „Postępy Nauki i Techniki” 2011, nr 9, s. 80–90.
- [14] Odashima H., Kitayama M., Maeda S., *Characteristics of an Oxidation Inhibitor Composed of Refractory Powder-SiO₂- Al-Synthetic Mica-Colloidal-Coking Bond*, „ISIJ” 1984, Vol. 14, s. 1645–1651.
- [15] Odashima H., Kitayama M., Maeda S., *Antioxidation Mechanism of an Oxidation Inhibitor Composed of Refractory Powder-SiO₂- Al-Synthetic Mica-Colloidal-Coking Bond*, „ISIJ” 1984, Vol. 7, s. 733–740.
- [16] Dobrzański L., *Kształtowanie struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich i biomedycznych*, FORSURF, Gliwice 2009.
- [17] http://www.ztch.umcs.lublin.pl/materialy/cwiczenie_9.pdf (10.09.2018).
- [18] Mrowec S., Werber T., *Korozja gazowa metali*, „Śląsk”, Katowice 1975.
- [19] <http://home.agh.edu.pl/~xi/dokumenty/4.pdf> (10.09.2018).
- [20] Halusiak B., Boryc J., *Badania przyczepności zgorzeliny do podłoża stalowego dla różnych szybkości podgrzewania*, „Postępy Nauki i Techniki” 2012, nr 15, s. 186–193.

*IZABELA MAJCHROWICZ,
JÓZEF BARAŃSKI
JERZY WITEK
HARALD KANIA*

COATINGS LIMITING THE OXIDATION OF THE SURFACE OF STEEL
INGOTS DURING COOLING AND HEATING

Keywords: ingots, scale, coatings, wettability.

The paper presents results of investigations into the possibilities to reduce the amount of scale formed on the surface of continuous castings during two steel production cycles, namely continuous casting and heating of the batch (CC ingots) for the rolling process, using ceramic coatings. Four coatings made from two suspensions and two silicic acid sols were applied on the continuous castings surface. The coatings were applied onto the steel plates at ambient temperature, next the coated plates were heated to 1250°C or the coatings were applied onto the plates heated to 850°C. The first method simulated the conditions of the plastic processing process, while the second one – the conditions of the continuous casting process.

The wettability of steel by precursors at room temperature as well as at 850°C and 1250°C was measured with a high-temperature microscope produced by Leitz. The investigations have shown that the best results are obtained for cold-spray coatings, in which case cold-spraying of sols resulted in a significantly thinner layer of scale and coating.