



Badanie zwilżania ciekłym cynkiem blach stalowych po obróbce plastycznej

Investigations of liquid zinc wetting of steel sheets after plastic treatment

(1) Leszek Klimek^{1*}, (2) Sebastian Lipa¹, (3) Konrad Dybowski¹, (4) Radomir Atraszkiewicz¹,
(5) Adam Rylski¹, (6) Dominik Sankowski², (7) Rafał Wojciechowski², (8) Marcin Bąkała²

¹ Politechnika Łódzka, Instytut Inżynierii Materiałowej, ul Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź, Poland

² Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej, ul Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, Poland

Informacje o artykule

Zgłoszenie: 22.06.2016

Recenzja: 31.10.2016

Akceptacja: 16.12.2016

Wkład autorów

- (1) Koncepcja, założenia, opracowanie artykułu
- (2) Przygotowanie próbek do badań, opracowanie artykułu
- (3) Opracowanie składu kąpieli i parametrów procesu cynkowania
- (4) Opracowanie składu kąpieli i parametrów procesu cynkowania
- (5) Opracowanie wyników badań zwilżalności
- (6) Opracowanie metodyki badań
- (7) Wykonanie badań zwilżalności
- (8) Wykonanie badań zwilżalności

Streszczenie

Niniejsza praca powstała w ramach realizacji projektu badawczego mającego na celu opracowanie i wdrożenie technologii recyklingu poprodukcyjnych odpadów taśmy stalowej. W ramach prowadzonych prac wykonano procesy oczyszczania blach metodami obróbki strumieniowo-ścierniej, a następnie tak oczyszczone blachy poddawano procesowi walcowania. Po procesie walcowania nakładano, metodą zanurzeniową, powłokę cynkową. W pracy przedstawiono wpływ gniotu podczas obróbki plastycznej na zwilżanie powierzchni blach stalowych ciekłym cynkiem. Badaniom poddano blachy obrobione ścierniwem Al₂O₃, które zostały potem poddane walcowaniu z różnymi gniołami (20, 40, 60 i 80%). Na tak przygotowanych próbkach przeprowadzono badania na specjalnie zaprojektowanym stanowisku dynamiki zwilżania metodą meniskograficzną umożliwiającą wykonanie kompleksowych badań własności dynamicznych powierzchni – napięcia powierzchniowego oraz zwilżalności. Z przeprowadzonych badań wynika, że najlepsza zwilżalność osiągana jest dla próbek o gniole 20%, dla których graniczny kąt zwilżania wynosi ok. 60°. Im większy gnioł, tym gorsza zwilżalność blach stalowych ciekłym cynkiem. Można zauważyć, że jeszcze tylko dla próbki z gniołem 40% zarejestrowano kąt zwilżania poniżej 90° (wynosił on około 80°). Można powiedzieć, że tylko te próbki były zwilżane ciekłym cynkiem. Dla pozostałych dwóch zarejestrowane wartości kąta zwilżania były znacznie powyżej 90° przyjętych, jako granica przejścia z braku zwilżania do zwilżania. Reasumując uzyskane wyniki badań, można stwierdzić, że zwiększenie stopnia zgniotu podczas procesu walcowania zmniejsza zwilżalność obrobionej powierzchni ciekłym cynkiem.

Słowa kluczowe: obróbka plastyczna, walcowanie blach, cynkowanie zanurzeniowe, przygotowanie powierzchni, zwilżalność

Article info

Received: 22.06.2016

Reviewed: 31.10.2016

Accepted: 16.12.2016

Authors' contribution

- (1) Concept, assumptions, article preparation
- (2) Sample preparation for testing, article preparation

Abstract

This paper was elaborated within a research project aiming at the development and implementation of a recycling technology for post-production steel sheet waste. In the research, processes of sheet cleaning were performed by vapour blasting treatment methods. Next, the sheets cleaned in this way underwent rolling. After the rolling process, a zinc coating was applied by means of the wetting balance method. The study presents the effect of the draft during plastic treatment on the wetting on the surface of steel sheets by liquid zinc. The tests were conducted on sheets treated with an Al₂O₃ abrasive material, which then underwent rolling with different drafts (20, 40, 60 and 80%). The samples prepared in this way were examined on a specially designed test station for the wetting dynamics by the meniscographic method, which enables complex examinations

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 42 631 30 30; e-mail: leszek.klimek@p.lodz.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 42 631 30 30; e-mail: leszek.klimek@p.lodz.pl

- (3) Preparation of bath composition and zinc-coating process parameters
- (4) Preparation of bath composition and zinc-coating process parameters
- (5) Preparation of wettability testing results
- (6) Methodology of testing
- (7) Wettability testing
- (8) Wettability testing

of the dynamic properties of the surface – surface tension and wettability. The performed investigations demonstrated that the best wettability is obtained for the samples with the 20% draft, for which the contact angle equals about 60°. The higher the draft, the worse the wettability of the sheets by liquid steel zinc. One can notice that the sample with the 40% draft was only one more to exhibit the wetting angle below 90° (it equaled about 80°). One can say that only these samples were wetted by the liquid zinc. For the remaining two, the recorded wetting angle values were much above 90°, which was assumed as the boundary of transfer from no wettability to wettability. To sum up, the obtained results demonstrate that the increase of the draft degree during the rolling process decreases the wettability of the treated surface by liquid zinc.

Keywords: plastic treatment, sheet rolling, hot dip zinc coating, surface preparation, wettability

1. WPROWADZENIE

Efektorem wielu procesów produkcyjnych są odpady taśmy stalowej. Są to głównie odpady z tzw. blachy czarnej, często skorodowanej, jak również oksydowane. Mogą one zostać poddane recyklingowi nawet na skalę przemysłową bez konieczności poddawania ich procesowi metalurgicznemu. Po odpowiednim przygotowaniu odpady te mogą zostać przetworzone do gotowych produktów, takich jak np. profile i kształtowniki zimnocięte. Aby jednak w pełni zapewnić ich wykorzystanie, powinny być zabezpieczone antykorozyjnie. Dla tego typu wyrobów najczęściej stosowanym zabezpieczeniem jest powłoka cynkowa nanoszona metodą ogniową. Metoda ta znana już od wielu lat, ciągle udoskonalana, pozwala na uzyskiwanie szczelnej powłoki cechującej się niskimi kosztami produkcji, dobrą ochroną przed działaniem różnych środowisk agresywnych oraz dobrą przyczepnością do podłoża [1–4]. Technologia cynkowania zanurzeniowego opiera się na wytworzeniu na powierzchni elementów stalowych powłoki poprzez zanurzenie elementów w kąpeli cynkowej.

Jakość powstałej powłoki zależy od wielu czynników takich, jak skład chemiczny stali, skład kąpeli, sposób przygotowania powierzchni, warunki nakładania i inne. Jeśli chodzi o skład stali, to największy wpływ ma zawartość krzemu i fosforu. Jeżeli zawartość Si w stali jest większa od 0,04% mas i suma dodatków Si+2,5P zawarta jest w granicach 0,09–0,2 % mas, to występuje tzw. efekt Sandelina przejawiający się nadmierną grubością, pękaniem i odwarstwianiem powłoki od podłoża [5–10]. W celu ogra-

1. INTRODUCTION

A product of many production processes is steel strip waste, which is mainly the so-called black plate waste, often corroded, as well as oxidized. It can undergo recycling, even at the industrial scale, without the necessity of its undergoing a metallurgical process. After a proper preparation, this waste can be processed into ready products, such as: cold-formed profiles and sections. However, in order to fully take advantage of its potential in further use, it should be protected from corrosion. For this type of products, the most frequently applied protection is a zinc coating applied by the hot dip coating method. This method, known for many years, has been constantly perfected, allowing to obtain a hermetic coating characterizing in low production costs, a good protection from the operation of various aggressive environments and a good adhesion to the substrate [1–4]. The technology of hot dip zinc coating is based on the formation of a coating on the surface of steel elements, by way of submerging the elements in a zinc bath.

The quality of thus produced coat depends on a number of factors, such as the chemical composition of the steel, the composition of the bath, the method of preparing the surface, method of application, etc. In regard to the composition of steel, the quality of a coat is most affected by the content of silicon and phosphorus. If the content of Si in steel is greater than 0.04% and the sum of Si+2.5P lies within the range from 0.09% to 0.2%, then the Sandelin effect occurs, which manifests itself by excessive coat depth, its cracking and ex-

niczenia niekorzystnych zjawisk obecnie stosuje się różnego rodzaju kąpiele [11]. I tak na rynku pojawiły się takie produkty jak: WEGAL stop cynku z Al, Sn, Ni, i Mn [12]; Galveko [13,14] stop cynku z Ni, Sn, Bi; oraz Magnelis, kąpiel cynkowa z domieszką Al i Mg.

Na cynkowanie elementów stalowych istotne znaczenie ma również stan i przygotowanie powierzchni. W procesach recyklingu odpadów są one najpierw oczyszczane z produktów korozji, a także resztek powłok, którymi były wcześniej pokryte. Kolejnym procesem jest walcowanie blachy na odpowiednią grubość. W zależności od początkowej grubości blachy odpadowej i żądanej końcowej grubości wyrobu należy zastosować podczas walcowania różne gnioty i ewentualną obróbkę cieplną (wyżarzanie rekrytalizujące).

Mikrostruktura wytworzonej powłoki powstaje w wyniku złożonych zjawisk fizykochemicznych tj. procesów dyfuzji, jak również zjawisk rozpuszczania metali w cieczy. W ostatnich czasach prowadzonych jest wiele badań dotyczących początkowych zjawisk zachodzących podczas procesów metalizacji kąpielowej [15–17]. Zasadniczy wpływ na przebieg i wynik procesów cynkowania ma również tzw. zwilżalność powierzchni. Jest ona bardzo istotnym elementem, decydującym o przebiegu wszystkich wysokotemperaturowych procesów metalurgicznych, a także dotyczy tworzenia trwałych połączeń różnych faz, tak jak np. podczas cynkowania. W pierwszym etapie kontaktu elementu stalowego z ciekłą kąpielą cynkową następuje, bowiem zwilżanie powierzchni ciała stałego przez ciekły cynk [18]. Po zakończeniu procesu rozplywu cieczy ustala się stan równowagi, któremu odpowiada określony kąt zwilżania Θ . Procesowi rozplywania cieczy po powierzchni ciała stałego towarzyszą różne procesy chemiczne, takie jak rozpuszczanie podłoża w cieczy bądź powstawanie nowej fazy [19]. W zależności od wartości kąta zwilżania, wyróżnia się trzy podstawowe przypadki: pełne zwilżanie, gdy kąt przyjmuje wartości bliskie zera, częściowe zwilżanie przy kącie Θ z przedziału $0 < \Theta < 90^\circ$ oraz brak zwilżania, gdy kąt Θ przyjmuje wartości z przedziału $90 < \Theta < 180^\circ$. Im kąt Θ mniejszy (lepsza zwilżalność) tym łatwiej z nakładaniem powłok ochronnych oraz z zapewnieniem

foliation from the base surface [5–10]. Various baths are used in order to reduce the adverse phenomena [11]. And so, the following products appeared on the market: WEGAL – an alloy of zinc with Al, Sn, Ni and Mn [12]; Galveko [13, 14] – and alloy of zinc with Ni, Sn, Bi; and Magnelis – a zinc bath with admixture of Al and Mg.

Zinc coating of steel elements is also influenced by the state and preparation of the surface. In the process of waste recycling, it is first cleaned of corrosion products as well remains of the coating with which it was covered earlier. The following process is rolling the sheet into a pro-per thickness. Depending on the initial thickness of the waste sheet and the required final thickness of the product, one should apply different drafts during the rolling process, as well as, possibly, a thermal treatment (recrystallizing annealing).

The microstructure of the coat is the product of complex physical processes, such as diffusion and dissolving metals and liquid. There have been many studies conducted recently regarding initial phenomena during the processes of bath metal coating [15–17]. The course and outcome of the process of zinc-coating is also affected by the surface wettability. It is a very important element that determines the course of all high-temperature metallurgical processes, as well as about creating lasting connections of different phases, such as when zinc coating. In the first stage of contact of a steel item with the zinc bath, the solid surface is wetted by liquid zinc [18]. After the process of liquid spreading, the state of equilibrium is established with a specific wetting angle Θ . The process of liquid spreading over the solid surface is accompanied by various chemical processes, such as dissolving of the base material in the liquid or formation of a new phase [19]. Depending on the wetting angle, three situations can be identified: full wetting, when the angle takes the values close to zero, partial wetting at the angle Θ within the range of $0 < \Theta < 90^\circ$ and no wetting when angle Θ lies in the range of $90 < \Theta < 180^\circ$. The smaller the Θ angle (better wettability) the easier it is to apply a protective coat and to ensure effective protection against corrosion. When there is no wetting ($\Theta > 90^\circ$) a coat cannot be applied from a liquid metal bath. Under ideal conditions (smooth and clean surface of the base, lack of chemical interaction between

wyższej jakości ochrony przed korozją. W przypadku braku zwilżalności (kąt $\Theta > 90^\circ$) niemożliwe jest nałożenie powłoki z ciekłej kąpieli metalowej. W idealnych warunkach (gładka i czysta powierzchnia podłoża, brak oddziaływań chemicznych między fazami) kąt zwilżania nie powinien ulegać zmianie w czasie procesu metalizacji. W rzeczywistości jak podają prace Mosera i in. obserwuje się z reguły obniżenie wartości kąta zwilżania z czasem kontaktu [20].

Biorąc pod uwagę, jak istotną rolę odgrywa zwilżalność powierzchni elementu ciekłym metalem w formowaniu powłoki celowe wydaje się być jej określanie dla różnego stanu powierzchni po procesie walcowania. W związku z tym, jako cel pracy postawiono zbadanie wpływu gniotu zastosowanego podczas procesu walcowania blachy na zwilżanie jej powierzchni ciekłym cynkiem.

2. METODYKA BADAŃ

Badania zwilżalności wykonano metodą meniskograficzną na zaprojektowanej i wykonanej w Instytucie Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej, zintegrowanej platformie do automatycznego pomiaru zwilżalności i napięcia powierzchniowego lutów w wysokich temperaturach. Stanowi ona zautomatyzowane stanowisko badawcze umożliwiające wykonanie kompleksowych badań własności dynamicznych powierzchni – napięcia powierzchniowego oraz zwilżalności ciekłych lutów w zakresie temperatur do 1000°C z zastosowaniem różnego rodzaju atmosfer technicznych [21–23].

2.1. Metoda pomiarowa

Rozkład sił działających na pionową płytkę i układ pomiarowy przed i po częściowym zanurzeniu przedstawiono na rys. 1. Wyznaczenie wielkości siły kapilarnej następuje poprzez pomiar różnicy wielkości sił działających na układ mierzący.

phases) wetting angles should not change as the metallisation process continues. In reality, as Moser et al show in their work, usually the values of wetting angle are lowering together with time of contact [20].

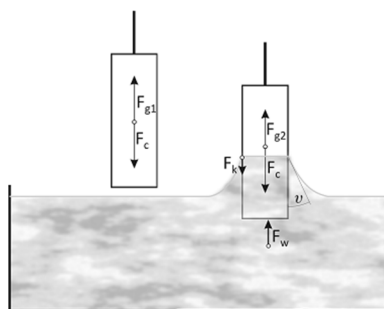
Taking into consideration the significance of the role of wettability of the element's surface by a liquid metal in the formation of the coating, it seems reasonable to determine the former for different states of the surface after the rolling process. And so, the aim of this paper is to examine the effect of the draft used during sheet rolling on the wettability of the surface by liquid zinc.

2. TEST METHODOLOGY

Wettability tests were performed by the meniscographic method on an integrated platform for automatic measurements of wettability and surface tension of solders at high temperatures, designed and manufactured at the Institute of Applied Computer Science of the Lodz University of Technology. The platform constitutes an automated research station allowing for complex examinations of the dynamic properties of the surface – the surface tension and the wettability of liquid solders in the temperature range of up to 1000°C – with the use of various types of technical atmospheres [21–23].

2.1. Measurement method

Distribution of forces that act on a vertical plate and the measurement system before and after partial dipping is shown in Fig. 1. The capillary force is determined by measurement of the difference between the forces that act on the measuring system.



Rys. 1. Rozkład sił działających na pionową płytkę
Fig. 1. Distribution of forces acting on a vertical plate

Etap przed zanurzeniem:

- siła rejestrowana przez układ pomiarowy przed zanurzeniem, skierowana w górę: F_{g1} ;
- siła grawitacji: F_c

$$\sum_{i=1}^{i=n} F_{iy} = F_{g1} - F_c = 0 \quad (1)$$

Etap po zanurzeniu:

- siła rejestrowana przez układ mierzący po zanurzeniu, skierowana w górę: F_{g2} , przy czym $F_{g2} > F_{g1}$;
- siła wyporu: F_w ;
- siła kapilarna zwilżania: F_k .

Możliwe są dwa przypadki:

1. $0 \leq \theta \leq 90^\circ$, wtedy F_k jest skierowana w dół,
2. $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, wtedy F_k jest skierowana w górę.

W dalszych rozważaniach założono przypadek I, dla którego suma rzutów wszystkich działających sił na oś OY wynosi:

$$\sum_{i=1}^{i=n} F_{iy} = F_{g2} + F_w - F_c - F_k = 0 \quad (2)$$

W stanie stacjonarnym (θ jest kątem równowagowym θ_0), dla którego powierzchnia czołowa próbki znajduje się na głębokości z_b w odniesieniu do poziomej powierzchni lustra cieczy siła działająca na układ mierzący wynosi:

$$F_{g2} - F_{g1} = F_k - F_w \quad (3)$$

W dalszej części pracy przyjęto, iż

$$F_{g2} - F_{g1} = F_M \quad (4)$$

Wartość siły wyporu dla danej geometrii próbki i głębokości zanurzenia wynosi:

$$F_w = P_p \rho g z_b \quad (5)$$

Gdzie: P_p – pole przekroju poprzecznego próbki, ρ – gęstość badanego ciekłego metalu, g – przyspieszenie ziemskie, z_b – głębokość zanurzenia.

Before dipping:

- An upward force registered by the measuring system before dipping: F_{g1}
- The downward gravitation force: F_c

$$\sum_{i=1}^{i=n} F_{iy} = F_{g1} - F_c = 0 \quad (1)$$

After dipping:

- an upward force registered by the measuring system after dipping: F_{g2} , while $F_{g2} > F_{g1}$;
- buoyancy, directed upwards: F_w ;
- wetting capillary force: F_k ;

There are two possible models:

1. $0 \leq \theta \leq 90^\circ$, then F_k is directed downwards,
2. $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, then F_k is directed upwards.

Model I was taken for further considerations, for which the sum of the projections of all the forces on the OY axis is:

$$\sum_{i=1}^{i=n} F_{iy} = F_{g2} + F_w - F_c - F_k = 0 \quad (2)$$

In the steady state (θ is an equilibrium angle θ_0), for which the head surface of a sample is at the depth of z_b relative to the horizontal surface of the liquid plate, the force which acts on the measuring system is:

$$F_{g2} - F_{g1} = F_k - F_w \quad (3)$$

Further in the paper it is assumed that

$$F_{g2} - F_{g1} = F_M \quad (4)$$

The buoyancy for the specific sample geometry and dipping depth is:

$$F_w = P_p \rho g z_b \quad (5)$$

Where: P_p – cross-section area of a sample, ρ – density of the liquid metal under study, g – gravitational acceleration, z_b – dipping depth.

Wartość siły kapilarnej F_k wynosi:

$$F_k = O_p \sigma_{LV} \cos \theta_0 \quad (6)$$

Gdzie: O_p – obwód próbki, σ_{LV} – napięcie powierzchniowe cieczy na granicy ciecz – gaz, θ_0 – równowagowy kąt zwilżania.

Po przekształceniach kapilarna siła zwilżania F_k jest określona zależnością:

$$F_k = \frac{F_M + P_p \rho g z_b}{O_p} \quad (7)$$

2.2. Dynamika formowania się menisku cieczy

Pośród sił rozważanych w poprzednim akapicie, tylko siła kapilarna F_K zależy od czasu, gdyż kąt zwilżania przy kontakcie ciała stałego z cieczą zmienia się od wartości bliskiej 180° do wartości równowagowej θ_0 .

Siła wyporu zmienia się proporcjonalnie w czasie od 0 do wartości maksymalnej wynikającej z zadanej głębokości na jaką zanurzona jest próbka. Aby jednak rozważyć wszystkie składowe niezależnie, należy przyjąć, iż siła wyporu wcześniej osiąga wartość równowagową niż kapilarna siła zwilżania. Wykres zależności kapilarnej siły zwilżania od czasu w cyklu zanurzania – wyjmowania płytki przedstawiono na rys. 2 (wykres ma charakter poglądowy, długości poszczególnych odcinków, kąty nachylenia, itp. przyjęto arbitralnie).

The capillary force F_k is:

$$F_k = O_p \sigma_{LV} \cos \theta_0 \quad (6)$$

Where: O_p – sample circumference, σ_{LV} – surface tension on the liquid-gas boundary, θ_0 – equilibrium wetting angle.

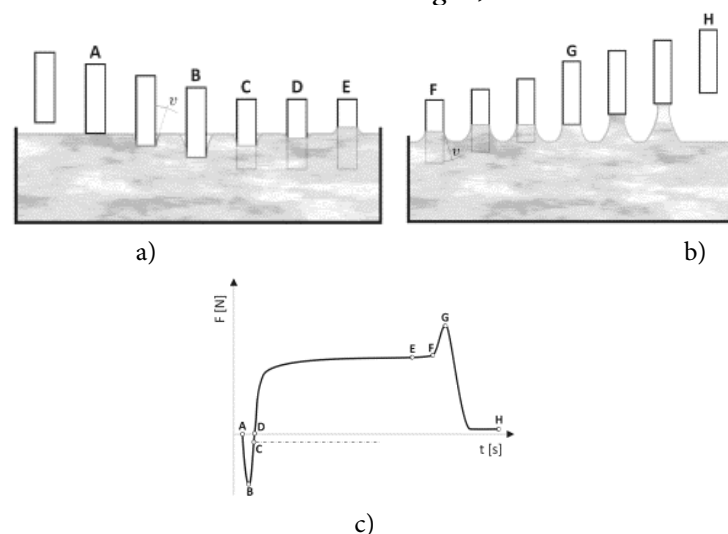
After transformations, the capillary wetting force F_k is determined by the following relationship:

$$F_k = \frac{F_M + P_p \rho g z_b}{O_p} \quad (7)$$

2.2. Dynamics of formation of the liquid meniscus

Of the forces considered in the previous paragraph, only the capillary force F_K is time-dependent, as the wetting angle when a solid is in contact with liquid changes from near 180° to the equilibrium value θ_0 .

The buoyancy changes in proportion in time from 0 to the maximum value which is a consequence of the depth to which the sample is dipped. However, in order to consider all the components independently, it must be assumed that the buoyancy reaches its equilibrium value before the capillary wetting force does. The diagram of the relationship between the wetting force and time in the plate dipping – withdrawing cycle is shown in Fig. 2 (the diagram is shown as an illustration only – the lengths of different sections, angles, etc. are taken arbitrarily).



Rys. 2. Wykres zależności siły zwilżania od czasu w cyklu zanurzania – wynurzania próbki, a) etap zanurzania próbki, b) etap wynurzania próbki, c) zależność siły zwilżania od czasu.

Fig. 2. The diagram of the relationship between the wetting force and time in the plate dipping – withdrawing cycle a) sample dipping stage, b) sample withdrawing stage, c) wetting capillary force vs time

Na początku eksperymentu w punkcie A ma miejsce kontakt powierzchni czołowej próbki z cieczą. W trakcie dalszego zanurzania próbki na odcinku A – C działa siła wyporu (zmieniana liniowo z głębokością zanurzenia). Jednocześnie następuje ugięcie powierzchni cieczy i uformowanie zakrzywionego w dół menisku. Kąt zwilżania θ zwiększa swoją wartość, aż do uzyskania przez niego minimalnej wartości (punkt B) bliskiej 180° , w tym samym czasie ma miejsce dalsze zanurzenie próbki w cieczy. Etap ten odzwierciedla czas inkubacji zwilżania, Zaczynają się tworzyć więzy pomiędzy atomami obu faz, tworzy się granica międzyfazowa SL. Koniec etapu zanurzania płytki ma miejsce w punkcie C. Odcinek C – E to progresja zwilżania. Kąt θ maleje aż do wartości równowagowej θ_0 , którą osiąga w punkcie E. Na tym odcinku siła wyporu jest stała, wartość siły kapilarnej rośnie, osiągając zero w punkcie D, w którym kąt zwilżania jest równy 90° . Od punktu D kąt zwilżania θ jest kątem ostrym, aż do osiągnięcia wartości granicznej w punkcie E. W punkcie E rozpoczyna się etap wyjmowania płytki. W punkcie G następuje koniec zwilżania powierzchni bocznej próbki. W punkcie H koniec eksperymentu.

Przedstawiony wykres jest wyidealizowany, ale uwzględniający wszystkie czynniki. W rzeczywistości odcinek BC może być bardzo mały lub wręcz nałożyć się na AB. Jeśli utworzą się jakieś fazy międzymetaliczne na powierzchni próbki to odcinek DE nie musi być poziomy. Odcinek EF może być nieliniowy, bo FK może się zmieniać na skutek histerezy zwilżania.

2.3. Metodyka badań

Badaniom poddano próbki o wymiarach $0,8 \times 8 \times 40$ mm wykonane ze stali S355 MC przeznaczonej do walcowania. Skład chemiczny tej stali przedstawiono w tab. 1. Przed procesem walcowania zostały one oczyszczone metodą obróbki strumieniowo-ściernej z zastosowaniem materiału ściernego w postaci Al_2O_3 przy ciśnieniu roboczym 4 MPa.

At the beginning of the experiment, there is a contact of the sample head surface with the liquid. When a sample is further dipped the buoyancy acts along section A – C (which changes linearly with the dipping depth). At the same time, the liquid surface bends and a meniscus curved downwards is formed. The wetting angle θ increases until it reaches the minimum value (point B), close to 180° ; at the same time, the sample is further dipped in liquid. This stage reflects the time of wetting incubation; bonds between atoms of both phases start to form and the phase boundary SL is formed. The stage of plate dipping ends at point C. Section C – E is wetting progression. Angle θ decreases until it reaches the equilibrium value θ_0 at point E. At this stage, the buoyancy is constant, the capillary force increases and it reaches zero at point D, where the wetting angle is 90° . From point D onwards, the wetting angle θ is an acute angle, until it reaches the limiting value at point E, when the stage of the plate removal starts. The stage of wetting the side surface of the plate ends at point G. The experiment ends at point H.

The diagram presented here is idealised, but it takes into account all the factors. In reality, the BC section can be very short, or it can even coincide with AB. If any inter-metallic phases are formed on the sample, then the DE section does not have to be horizontal. The EF section can be non-linear, because FK can change as a result of the wetting hysteresis.

2.3. Test methodology

The tests were performed on $0,8 \times 8 \times 40$ mm samples made of steel S355 MC, designed for rolling. The chemical composition of the steel is presented in Tab. 1. Before the rolling process, they were cleaned by the vapour blasting method with the use of an abrasive material in the form of Al_2O_3 , with the working pressure of 4 MPa.

Tab. 1. Skład chemiczny badanej stali
Tab. 1. Chemical composition of the examined steel

Zawartość pierwiastków % wagowe / <i>Element content % wt.</i>										
C	Si	Mn	P	Cr	V	Cu	Al	Ni	S	Fe
0,09	0,013	0,8	0,012	0,015	0,07	0,03	0,035	0,015	0,015	Reszta / <i>Residue</i>

Próbki podzielono na pięć grup. Grupę pierwszą stanowiły próbki referencyjne – bez zgniotu, pozostałe cztery grupy poddano walcowaniu z następującymi gniotami – 20%, 40%, 60% i 80%. Po procesach walcowania parametr chropowatości Ra wynosił odpowiednio – 2,1; 1,7; 1,5 i 1,4 μ m.

Tak przygotowane próbki zostały odtłuszczone i przeprowadzono na nich test zwilżania ciekłym cynkiem. Czystość cynku użytego do badań – 99,995%. Testy przeprowadzono w temperaturze 430 °C, w obecności atmosfery redukującej (argon oraz wodór) i ochronnej (azot). Próbki były wygrzewane powyżej lustra ciekłego cynku przez czas 60 sekund, następnie zanurzone ze stałą prędkością na głębokość 5 mm, a następnie wyjmowane z kąpieli. Całkowity czas rejestrowania wynosił 100 s, ponieważ realizowane w praktyce czasy cynkowania mieszczą się w tym zakresie.

3. WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

Napięcie powierzchniowe Zn wyznaczono na podstawie empirycznej zależności podanej przez [24]. Wszystkie eksperymenty przeprowadzono w temperaturze 430°C. Wyznaczona wartość napięcia powierzchniowego dla tej temperatury wynosi 0,725 N/m.

W oparciu o ww. wartość wykreślono charakterystyki zmian kąta zwilżania w funkcji czasu dla wszystkich badanych próbek. Wyniki zarejestrowanych zwilżalności oraz wyznaczone na podstawie kąty zwilżania dla poszczególnych wariantów gniotu przedstawiono na rys. 3–6.

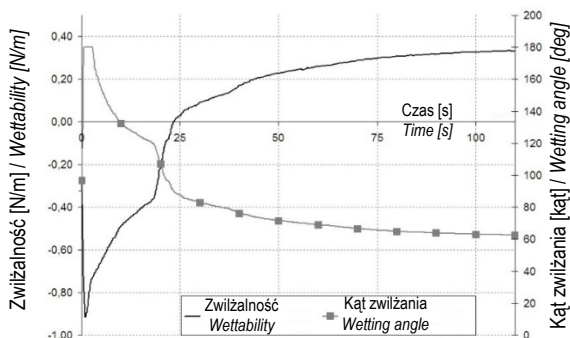
The samples were divided into five groups. The first group was constituted by reference samples, without draft, and the remaining four groups underwent rolling with the following drafts: 20%, 40%, 60% and 80%. After the rolling processes, the roughness parameter Ra equaled: 2,1; 1,7; 1,5 and 1,4 μ m, respectively.

The samples prepared in this way were degreased and then underwent a wetting test with liquid zinc. The purity of the zinc used in the tests was 99,995%. The tests were performed at the temperature of 430 °C, in the presence of a reducing atmosphere (argon or hydrogen) and a protective atmosphere (nitrogen). The samples were annealed above the mirror of liquid zinc for the time of 60 seconds, and then they were submerged at a constant rate to the depth of 5 mm, after which they were removed from the bath. The total recording time was 100 s, as the practically implemented zinc coating times are within this range.

3. TEST RESULTS AND DISCUSSION

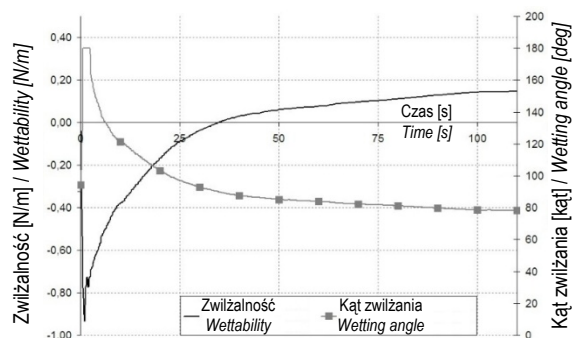
The surface tension of Zn was determined based on the empirical relation given in [30]. All the experiments were performed at the temperature of 430 °C. The determined value of the surface tension for this temperature equals 0,725 N/m.

On the basis of the above value, the characteristics of the changes of the wetting angle in the function of time were determined for all the examined samples. The results of the recorded wettabilities and the determined wetting angles for the particular draft variants are presented in Fig. 3–6.



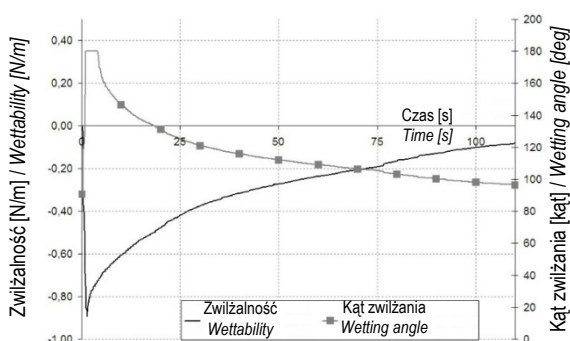
Rys. 3. Dynamika zmian napięcia powierzchniowego oraz kątów zwilżania próbek walcowanych gniotem 20%

Fig. 3. Dynamics of the changes of surface tension and wetting angles of samples rolled with 20% draft



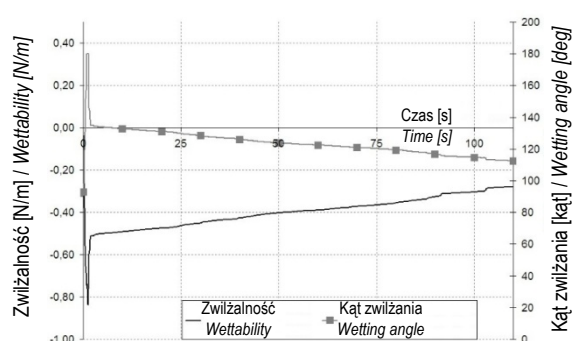
Rys. 4. Dynamika zmian napięcia powierzchniowego oraz kątów zwilżania próbek walcowanych gniotem 40%

Fig. 4. Dynamics of the changes of surface tension and wetting angles of samples rolled with 40% draft



Rys. 5. Dynamika zmian napięcia powierzchniowego oraz kątów zwilżania próbek walcowanych gniotem 60%

Fig. 5. Dynamics of the changes of surface tension and wetting angles of samples rolled with 60% draft

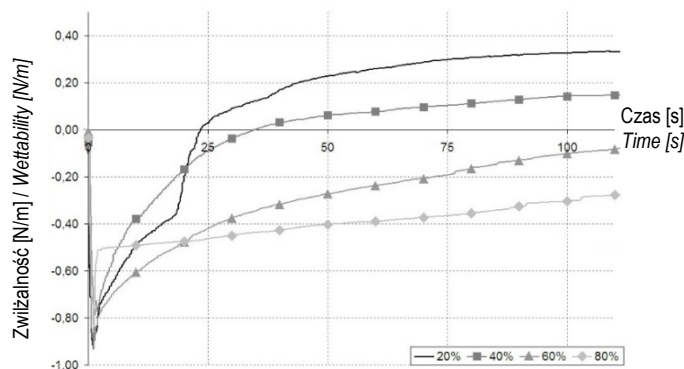


Rys. 6. Dynamika zmian napięcia powierzchniowego oraz kątów zwilżania próbek walcowanych gniotem 80%

Fig. 6. Dynamics of the changes of surface tension and wetting angles of samples rolled with 80% draft

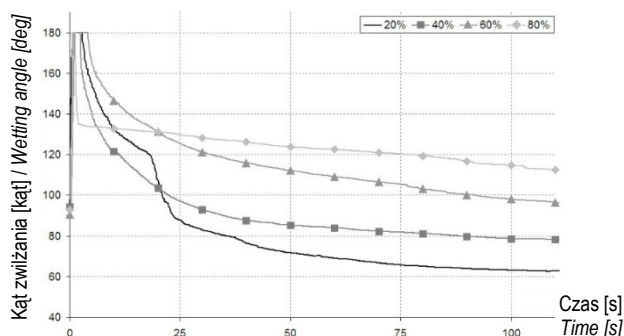
Na rys. 7 przedstawiono zbiorcze wykresy napięcia powierzchniowego dla wszystkich wariantów gniotu, natomiast na rys. 8 odpowiada im zbiorcze wykresy kątów zwilżania.

Fig. 7 shows the global diagrams of the surface tension for all the draft variants, whereas Fig. 8 presents the corresponding global diagrams of the wetting angles.



Rys. 7. Dynamika zmian zwilżalności w funkcji czasu dla poszczególnych wariantów gniotu

Fig. 7. Dynamics of the wettability in the function of time for the particular draft variants



Rys. 8 Dynamika zmian kąta zwilżania θ w funkcji czasu dla poszczególnych wariantów gniotu

Fig. 8. Dynamic of the wetting angle θ in the function of time for the particular draft variants

Z przedstawionych wykresów wynika, że najlepsza zwilżalność osiągana jest dla próbek o gniocie 20%, dla których graniczny kąt zwilżania wynosi ok. 60° . Im większy gniot, tym gorsza zwilżalność blach stalowych ciekłym cynkiem. Można zauważyć, że jeszcze tylko dla próbek z gniotem 40% zarejestrowano kąt zwilżania poniżej 90° (wynosił on około 80°). Można powiedzieć, że tylko te próbki były zwilżane ciekłym cynkiem. Dla pozostałych dwóch zarejestrowane wartości kąta zwilżania wynosiły odpowiednio: dla gniotu 60% – około 98° , a dla gniotu 80% – około 115° , a więc znacznie powyżej 90° przyjętych jako granica przejścia z braku zwilżania do zwilżania. Dla ostatnich dwóch próbek można zauważyć, że nie nastąpiło jeszcze całkowite ustabilizowanie się kąta zwilżania w badanym czasie. Jednak charakter krzywej wskazuje, że już zaczyna się ona wypłaszczać, a więc zmiany zwilżalności nie powinny różnić się zdecydowanie od zarejestrowanych po czasie 100 s.

Analizując przedstawione wykresy, można zestawiać podstawowe parametry procesu charakteryzujące dynamikę procesu zwilżania (tab. 2).

The presented diagrams suggest that the best wettability is obtained for the samples with the 20% draft, for which the critical wetting angle equals about 60° . The higher the draft, the worse the wettability of the steel sheets by liquid zinc. One can notice that only for the samples with the 40% draft the recorded wetting angle was below 90° (it equaled about 80°). We can say that only these samples were wetted by the liquid zinc. For the remaining two samples, the recorded values of the wetting angle equaled: about 98° for the 60% draft and about 115° for the 80% draft, which is much over 90° , being the temperature assumed as the no wetting – wetting boundary. For the last two samples, one can notice an incomplete stabilization of the wetting angle at the examined time. However, the character of the curve suggests that its steepness is already beginning, and so the wettability changes should not differ much from the ones recorded after the time of 100 s.

In the analysis of the presented diagrams, one can compile the basic parameters of the process which characterize the dynamics of the wetting process (Tab. 2).

Tab. 2. Wyznaczone parametry eksperymentu zanurzeniowego próbek

Tab. 2. Determined parameters of the hot dip zinc coating experiment

Opis parametru / Parameter description	Parametr / Parameter	Gniot / Draft			
		20%	40%	60%	80%
Czas kontaktu / Contact time	t_c	0	0	0	0
Czas osiągnięcia maksymalnej wartości kąta zwilżania [s] Time of reaching the maximal wetting angle value [s]	$t_{\theta_{max}}$	0,6	0,6	1,0	0,8
Czas przekroczenia kąta 90° [s] Time of exceeding the 90° angle [s]	$t_{\theta_{90}}$	23,4	34,6	—	—
Czas osiągnięcia 90% maksymalnej siły zwilżania [s] Time of reaching the maximal wetting force 90% [s]	$t_{90\%}$	73,9	—	—	—
Czas całkowity [s] / Total time [s]	t_f	100	100	100	100

Opis parametru / <i>Parameter description</i>	Parametr <i>Parameter</i>	Gniot / <i>Draft</i>			
		20%	40%	60%	80%
Maksymalna zwilżalność [N/m] / <i>Maximal wettability [N/m]</i>	W_{max}	0,334	0,432	0,758	0,161
Szybkość zwilżania / <i>Wettability rate</i>	$(t_{905} - t_c)/(t_F - t_c)$	0,739	1,278	2,271	2,643

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzono szereg eksperymentów dotyczących zwilżania ciekłym cynkiem blach stalowych po walcowaniu z różnym gniotem. Zaprezentowano wybrane przebiegi siły zwilżania i kąta zwilżania dla tak przygotowanych próbek. Stopień zgniotu blachy podczas procesu walcowania ma wpływ na zwilżanie jej powierzchni ciekłym cynkiem. Zauważono, że wzrost gniotu powoduje pogorszenie zwilżania. Zmiana kąta zwilżania może być również spowodowana zmianą chropowatości powierzchni. Jednak jak wykazały wcześniejsze badania [25] wydaje się, że zdecydowanie istotniejszym parametrem jest swobodna energia powierzchni, a ta rośnie wraz ze zgniotem. Zestawienie prezentowanych wyników z otrzymanymi wcześniej dla blach bez zgniotu daje możliwość ciekawych porównań [26]. O ile blacha w stanie bez zgniotu i bez obróbki powierzchniowej wykazuje tylko niewiele lepszą zwilżalność (kąt zwilżania około 70°), to już obróbka strumieniowo-ścierna powierzchni w zmniejsza go do wartości 15–30° w zależności od zastosowanych parametrów obróbki i wielkości użytego ziarna materiału ściernego. Inaczej wygląda porównanie uzyskanych wyników z próbkami poddanymi procesowi śrutowania, a więc także z powierzchnią po zgniciu. W tym przypadku uzyskano wartości kątów zwilżania około 85°. Wynik ten potwierdza wcześniejszy wniosek o negatywnym wpływie zgniotu na zwilżalność blach stalowych ciekłym cynkiem.

Zintegrowana platforma do analizy właściwości dynamicznych powierzchni umożliwia ilościowe określenie procesu zwilżania. Znajomość w/w parametrów pozwala na porównanie uzyskanych wyników dla różnych wariantów przygotowania podłoża i parametrów procesu. Wyniki prezentowane w formie graficznej, rejestrowane w czasie rzeczywistym pozwalają na szybką analizę oraz optymalizację procesu. Zna-

4. SUMMARY

A series of experiments was performed concerning wetting by liquid zinc of steel sheets after rolling with different drafts. The selected courses of the wetting force and wetting angle were presented for the samples prepared in this way. The draft degree of the sheet during the rolling process has an effect on the wetting of its surface by liquid zinc. It was noticed that an increase of the draft causes a worsening of the wettability. The change of the wetting angle can also be caused by the change of the surface roughness. However, as it was demonstrated in previous studies [25], it seems that a much more important parameter is the surface free energy, and the latter increases together with the draft. Compiling the presented results with the ones obtained earlier for sheets without draft provides the possibility of interesting comparisons [26]. While the sheet in the state without draft or thermal treatment exhibits only a slightly better wettability (wetting angle of about 70°), a blasting treatment of the surface reduces the latter to the value of about 15–30°, depending on the applied treatment parameters and the size of the used abrasive material grain. The case is different when we compare the obtained results with the ones for the samples which underwent a shot blasting process, and so, also, those with the surface after draft. In this case, the obtained values of the wetting angles equaled about 85°. This result confirms the earlier conclusions about a negative effect of the draft on the wettability of steel sheets by liquid zinc.

The integrated platform for analyzing the dynamic properties of the surface allows for a quantitative description of the wetting process. The knowledge of the above parameters makes it possible to compare the results obtained for different variants of substrate preparation and process parameters. The results presented graphically, recorded in real time, provide the possibility to

jomość parametru $t_{90\%}/t_C$ umożliwia jednoznaczny ocenę dynamiki zwilżania.

PODZIĘKOWANIA

Badania przeprowadzono w ramach projektu GEKON1/05/213992/11/2014 współfinansowanego z środków NCBiR i NFOŚiGW.

LITERATURA

- [1] Kania H., P. Liberski, P. Podolski. 2006. "Corrosion resistance of the zinc coatings obtained in modified zinc baths". *Physico Chemical Mechanics of Materials* 5: 684–690.
- [2] Liberski P., P. Podolski, H. Kania, A. Gierek, J. Mendala. 2003. "Corrosion resistance of zinc coatings obtained in high-temperature baths". *Materials Science* 39 (5): 652–657.
- [3] Porter F.C. 1991. *Zinc Handbook: properties processing and use in design*. New York: Marcel Dekker.
- [4] Marder A.R. 2000. "The metallurgy of zinc-coated steel". *Progress in Materials Science* 45: 191–271.
- [5] Perlin J., J. Hofman, V. Leroy. 1981. "The influence of silicon and phosphorus on the commercial galvanization of mild steel". *Metall* 35 (9): 870–873.
- [6] Yasuhiko M. 1975. "Effect of C and P addition on the corrosion of steel by molten zinc". *Corrosion Engineering* 24 (4): 177–182.
- [7] Kopyciński D., E. Guzik. 2007. "The kinetics of zinc coating growth on hyper – sandelin steels and ductile cast iron". *Archives of Foundry Engineering* 7 (4): 105–110.
- [8] Liberski P. 2013. *Antykorozyjne powłoki zanurzeniowe*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [9] Huckshold M. 2009. "Improving design guidance to avoid cracking of galvanized structural steelwork. Session: Steel and Galvanizing. Paper 3." W mat. konf. *Proceedings 22th International Galvanizing Conference. EGGA, 2009, 1-6, Madrid*.
- [10] Liberski P., H. Kania, P. Podolski, A. Gierek. 2004. „Niektóre aspekty doskonalenia technologii cynkowania zanurzeniowego”. *Inżynieria Materiałowa* 2: 775–782.
- [11] Di Cocco V., F. Iacoviello, S. Natali. 2014. "Damaging micromechanisms in hot-dip galvanizing Zn based coatings". *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 70: 91–98.
- [12] Wesołowski J., W. Głuchowski. 2003. „Uniwersalna i oszczędnościowa powłoka cynkowa uzyskana w kąpieli Wegal.” W: *Materiały pokonferencyjne X Sympozjum Cynkowniczego*, Ustroń: 61–71.

quickly analyze and optimize the process. The knowledge of the parameter $t_{90\%}/t_C$ allows for a clear evaluation of the wetting dynamics.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was conducted within the project GEKON1/05/213992/11/2014 project, co-financed by NCBiR and NFOŚiGW.

REFERENCES

- [1] Kania H., P. Liberski, P. Podolski. 2006. "Corrosion resistance of the zinc coatings obtained in modified zinc baths". *Physico Chemical Mechanics of Materials* 5: 684–690.
- [2] Liberski P., P. Podolski, H. Kania, A. Gierek, J. Mendala. 2003. "Corrosion resistance of zinc coatings obtained in high-temperature baths". *Materials Science* 39 (5): 652–657.
- [3] Porter F.C. 1991. *Zinc Handbook: properties processing and use in design*. New York: Marcel Dekker.
- [4] Marder A.R. 2000. "The metallurgy of zinc-coated steel". *Progress in Materials Science* 45: 191–271.
- [5] Perlin J., J. Hofman, V. Leroy. 1981. "The influence of silicon and phosphorus on the commercial galvanization of mild steel". *Metall* 35 (9): 870–873.
- [6] Yasuhiko M. 1975. "Effect of C and P addition on the corrosion of steel by molten zinc". *Corrosion Engineering* 24 (4): 177–182.
- [7] Kopyciński D., E. Guzik. 2007. "The kinetics of zinc coating growth on hyper – sandelin steels and ductile cast iron". *Archives of Foundry Engineering* 7 (4): 105–110.
- [8] Liberski P. 2013. *Antykorozyjne powłoki zanurzeniowe*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [9] Huckshold M. 2009. "Improving design guidance to avoid cracking of galvanized structural steelwork. Session: Steel and Galvanizing. Paper 3." In conf. proceed. of *Proceedings 22th International Galvanizing Conference. EGGA, 2009, 1-6, Madrid*.
- [10] Liberski P., H. Kania, P. Podolski, A. Gierek. 2004. „Niektóre aspekty doskonalenia technologii cynkowania zanurzeniowego”. *Inżynieria Materiałowa* 2: 775–782.
- [11] Di Cocco V., F. Iacoviello, S. Natali. 2014. "Damaging micromechanisms in hot-dip galvanizing Zn based coatings". *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 70: 91–98.
- [12] Wesołowski J., W. Głuchowski. 2003. „Uniwersalna i oszczędnościowa powłoka cynkowa uzyskana w kąpieli Wegal.” In: *Materiały pokonferencyjne X Sympozjum Cynkowniczego*, Ustroń: 61–71.

- [13] Beguin Ph., M. Bosschaerts, D. Dhaussy, R. Pankert, M. Gilles. 2000. *Galveco a solution for galvanizing reactive steel*. Berlin: Intergalva.
- [14] Pankert R., D. Dhaussy, Ph. Beguin, Mk. Gilles. 2003. *GALVECO – trzy lata obecności na rynku!*
- [15] Kopyciński D. 2010. "The shaping of zinc coating on surface steels and ductile iron casting". *Archives of Foundry Engineering* 10 (special issue 1): 463–469.
- [16] Liberski P., A. Tatarek, B. Mendala. 2014. "Investigation of the Initial Stage of Hot Dip Zinc Coatings on Iron Alloys with Various Silicon Contents. Solid State Phenomena". W mat. konf. Materiały TPMUM 2013, Katowice: 121–126.
- [17] Liberski P., A. Tatarek, J. Mendala. 2014. "Investigation of the initial stage of hot dip zinc coatings on iron alloys with various silicon contents." W mat. konf. XXI Conference on Technologies and Properties of Modern Utility Materials (TPMUM 2013), Ed. TTP, Solid State Phenomena 212: 121–126.
- [18] Marder A.M. 2000. "The metallurgy of zinc-coated steel". *Progress in Materials Science* 45: 191–271.
- [19] Missol W. 1973. *Energia rozdziału faz w metalach*. Katowice: Wydawnictwo Śląsk.
- [20] Moser Z., P. Fima, K. Bukat, J. Sitek, J. Pstruś, W. Gąsior, M. Kościelski, T. Gancarz. 2011. "Investigation of the effect of indium addition on wettability of Sn-Ag-Cu solders". *Soldering@Surface Mount Technology* 23 (1): 22–29.
- [21] Sankowski D., M. Bąkała, A. Albrecht, T. Koszmider, R. Wojciechowski, A. Rylski. 2008. "Metodologia automatycznego pomiaru dynamicznych własności powierzchni – lutowności oraz zwilżalności". *Inżynieria Materiałowa* 6: 1064–1067.
- [22] Nitkiewicz Z., M. Bąkała, R. Wojciechowski, A. Albrecht, A. Rylski. 2008. „Ocena wybranych parametrów lutowności lutow L-AG5P”. *Inżynieria Materiałowa* 6: 1068–1071.
- [23] Bąkała M., R. Wojciechowski. D. Sankowski, A. Rylski. 2015. "The wetting dynamics measurement system to research the properties and applications of modern materials". *Microtherm* 2015.
- [24] Falke W.L., A.E. Schwaneke, R.W. Nash. 1977. "Surface Tension of Zinc: The Positive Temperature Coefficient". *Metallurgical Transactions* 8B: 301–303.
- [25] Lipa S., L. Klimek, L. Dybowski, W. Szymański. 2015. „Wpływ właściwości mechanicznych blachy stalowej na stan powierzchni po obróbce strumieniowo-ściernej”. *Inżynieria Materiałowa* 6 (208): 464–467.
- [26] Cecotka M., K. Dybowski, L. Klimek, S. Lipa, A. Rylski, D. Sankowski, R. Wojciechowski, M. Bąkała. 2016. "Examination of wetting by liquid zinc of steel sheets following various kinds of abrasive blasting". *Arch. Metall. Mater.* 61 (2B): 169–174.
- [13] Beguin Ph., M. Bosschaerts, D. Dhaussy, R. Pankert, M. Gilles. 2000. *Galveco a solution for galvanizing reactive steel*. Berlin: Intergalva.
- [14] Pankert R., D. Dhaussy, Ph. Beguin, Mk. Gilles. 2003. *GALVECO – trzy lata obecności na rynku!*
- [15] Kopyciński D. 2010. "The shaping of zinc coating on surface steels and ductile iron casting". *Archives of Foundry Engineering* 10 (special issue 1): 463–469.
- [16] Liberski P., A. Tatarek, B. Mendala. 2014. "Investigation of the Initial Stage of Hot Dip Zinc Coatings on Iron Alloys with Various Silicon Contents. Solid State Phenomena". In conf. proceed. of Materiały TPMUM 2013, Katowice: 121–126.
- [17] Liberski P., A. Tatarek, J. Mendala. 2014. "Investigation of the initial stage of hot dip zinc coatings on iron alloys with various silicon contents." In conf. proceed. XXI Conference on Technologies and Properties of Modern Utility Materials (TPMUM 2013), Ed. TTP, Solid State Phenomena 212: 121–126.
- [18] Marder A.M. 2000. "The metallurgy of zinc-coated steel". *Progress in Materials Science* 45: 191–271.
- [19] Missol W. 1973. *Energia rozdziału faz w metalach*. Katowice: Wydawnictwo Śląsk.
- [20] Moser Z., P. Fima, K. Bukat, J. Sitek, J. Pstruś, W. Gąsior, M. Kościelski, T. Gancarz. 2011. "Investigation of the effect of indium addition on wettability of Sn-Ag-Cu solders". *Soldering@Surface Mount Technology* 23 (1): 22–29.
- [21] Sankowski D., M. Bąkała, A. Albrecht, T. Koszmider, R. Wojciechowski, A. Rylski. 2008. "Metodologia automatycznego pomiaru dynamicznych własności powierzchni – lutowności oraz zwilżalności". *Inżynieria Materiałowa* 6: 1064–1067.
- [22] Nitkiewicz Z., M. Bąkała, R. Wojciechowski, A. Albrecht, A. Rylski. 2008. „Ocena wybranych parametrów lutowności lutow L-AG5P”. *Inżynieria Materiałowa* 6: 1068–1071.
- [23] Bąkała M., R. Wojciechowski. D. Sankowski, A. Rylski. 2015. "The wetting dynamics measurement system to research the properties and applications of modern materials". *Microtherm* 2015.
- [24] Falke W.L., A.E. Schwaneke, R.W. Nash. 1977. "Surface Tension of Zinc: The Positive Temperature Coefficient". *Metallurgical Transactions* 8B: 301–303.
- [25] Lipa S., L. Klimek, L. Dybowski, W. Szymański. 2015. „Wpływ właściwości mechanicznych blachy stalowej na stan powierzchni po obróbce strumieniowo-ściernej”. *Inżynieria Materiałowa* 6 (208): 464–467.
- [26] Cecotka M., K. Dybowski, L. Klimek, S. Lipa, A. Rylski, D. Sankowski, R. Wojciechowski, M. Bąkała. 2016. "Examination of wetting by liquid zinc of steel sheets following various kinds of abrasive blasting". *Arch. Metall. Mater.* 61 (2B): 169–174.

