

Wpływ zawartości Sn na odporność korozyjną stopów żelaza

Effect of Sn content on corrosion resistance of iron

Karina Jagielska-Wiaderek¹, Henryk Bala¹, Dorota Denis-Brewczyńska²

¹ Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Katedra Chemii, Al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa, Polska

² Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Katedra Ekstrakcji i Recykulacji Metali, Al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa, Polska

¹ Czestochowa University of Technology, Faculty of Production Engineering and Materials Technology, Chemistry Department, Al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa, Poland

² Czestochowa University of Technology, Faculty of Production Engineering and Materials Technology, Department of Metals Extraction and Recirculation, Al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa, Poland

E-mail: karina@wip.pcz.pl

Received: 8.08.2016. Accepted in revised form: 31.03.2017.

© 2017 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iod.2017.01

Streszczenie

W pracy scharakteryzowano odporność na korozję kwasową sześciu stopów żelaza zawierających dodatki od 0,007 do 1,03% wag. cyny. Stopy te uzyskano przez przetapianie w piecu Tammana czystego żelaza (99,98% Fe) z dodatkami spektralnie czystej cyny. Otrzymane wytopy poddano badaniom odporności na korozję kwasową, wykonując przyśpieszony test na korozję atmosferyczną, badania elektrochemiczne oraz pomiary szybkości korozji (określane z analizy roztworów korozyjnych na zawartość Fe²⁺). Wykonane pomiary elektrochemiczne pokazują, że zarówno w środowisku kwasu siarkowego, jak i zakwaszonego siarczanu sodu obecność 0,007–1,03% Sn w żelazie nie wykazuje istotnego wpływu na szybkość korozji badanych stopów. Uzyskane wartości i_{kor} (wyznaczone na drodze ekstrapolacji do E_{kor} , jak i na podstawie R_p), w granicach ich błędów pomiarowych, można uznać za niezależne od zawartości cyny w stopie. Obserwuje się jednak wpływ obecności cyny na przebieg korozji atmosferycznej w kwaśnej mgie solnej – szybkość ta ulega zmniejszeniu w miarę wzrostu zawartości Sn w analizowanych próbkach.

Słowa kluczowe: cyna, odlewnicze stopy Fe-Sn, szybkość korozji, korozja atmosferyczna

Abstract

The study characterizes the acid corrosion resistance of six iron alloys containing additions from 0.007 to 1.03 wt.% of tin. The alloys were obtained by way of remelting in a Tamman furnace made of pure iron (99.98% Fe) with additions of spectrally pure tin. The obtained melts underwent studies of acid corrosion resistance by means of an atmospheric corrosion test, electrochemical tests and corrosion rate measurements (determination from the analysis of the corrosion solutions in respect of the Fe²⁺ content). The performed electrochemical measurements show that both in the environment of sulfuric acid and acidified sodium sulfate, the presence of 0.007–1.03% Sn in the iron does not exhibit a significant effect on the corrosion rate of the examined alloys. The obtained values of i_{cor} (determined by way of extrapolation to E_{cor} and based on R_p), within their measurement error, can be treated as independent of the tin content in the alloy. However, one can observe the effect of the presence of tin on the course of atmospheric corrosion in the acid salt spray – this rate is reduced with an increase of the Sn content in the analyzed samples.

Keywords: tin, Fe-Sn casting alloys, corrosion rate, atmospheric corrosion

1. Wstęp

Cyna należy do metali najdawniej używanych przez człowieka. Z kopalnictwem cyny ściśle wiąże się zastosowanie tego metalu w metalurgii i odlewnictwie. Swoje zastosowanie znajduje przede wszystkim zarówno jako wierzchnia warstwa na elementach ze stali, żeliwa, miedzi i jej stopów, jak i jako składnik różnego rodzaju stopów powszechnie używanych w przemyśle [1]. Dzięki swojej nietoksyczności cyna jest używana w przemyśle spożywczym jako warstwa pokrywająca mająca bezpośredni kontakt z żywnością. Jak podają statystyki, roczna światowa produkcja tego surowca wynosi ponad 300 tys. ton, a w perspektywie 2017 r. zwiększy się jeszcze o około 65 tys. ton [2].

Do stali cyna dostaje się najczęściej ze złomu, jej rozpuszczalność w ciekłym żelazie jest praktycznie nieograniczona, jednak wraz ze spadkiem temperatury drastycznie maleje [3]. Metal ten w stopach żelaza powoduje kruchość stali zarówno na gorąco, jak i w temperaturach pokojowych. Jej negatywny wpływ na właściwości stali wynika nie tylko z jej wydzielenia się na granicach ziaren czy też tworzenia niskotopliwych związków międzymetalicznych podczas krzepnięcia, ale również z oddziaływania z innymi szkodliwymi pierwiastkami pochodzącymi ze złomu – w szczególności z miedzią. Przy braku możliwości usunięcia cyny podczas konwencjonalnej obróbki cieplnej stali jej obecność może stawać się problemem. Większe powinowactwo żelaza do tlenu niż cyny w zakresie temperatur procesów stalowniczych uniemożliwia usunięcie jej przez utlenianie [4]. Odcynowaną stal uzyskać można przez zastosowanie jednej z dwóch metod: ługowania chemicznego lub metody elektrolitycznej [5–7]. Niestety, w Polsce huty nie dysponują technologią umożliwiającą odcynowanie stali, przez co złom przez nie wykorzystywany często zawiera podwyższone ilości Sn. Należy zauważyć, że obecność cyny wprowadzanej wraz ze złomem do ponownego przetworzenia może stwarzać nie tylko problemy technologiczne, ale również wpływać na odporność korozyjną odlewanych stali. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań nad wpływem ilości cyny obecnej w stopach żelaza na odporność korozyjną tych materiałów.

2. Metodyka badań, badany materiał

Przedmiot badań stanowiły próbki żelaza zawierające różne ilości cyny. Stopy Fe-Sn wytapiano w piecu Tammana w atmosferze ochronnej argonu ($p_{Ar} = 1,3$ bar), do ich sporządzenia wykorzystano cynę spektralnie czystą oraz żelazo o czystości 99,98%. Proces nagrzewania do temperatury 1550°C trwał 90 min, następnie wytrzymały próbki w tej temperaturze przez 15 min, po czym chłodzono je razem z piecem przez 120 min. Wytopy prowadzono w tyglach alundowych. Do badań korozyjnych wykorzystano próbki żelaza zawierające odpowiednio

1. Introduction

Tin is one of the oldest metals used by man. Tin mining is strictly connected with the use of this metal in metallurgy and casting. It is mostly applied both as the surface layer of elements of steel, cast iron, copper and its alloys, as well as a component of different types of alloys commonly used in the industry [1]. Owing to its non-toxicity, tin is used in the gastronomic industry as the coating layer being in direct contact with food. According to statistics, the annual global production of this material is over 300 thousand tons, and in 2017, it will increase by about 65 thousand tons [2].

Tin usually gets inside steel from scrap. Its solubility in liquid iron is practically unlimited; however, with a drop in temperature, it decreases drastically [3]. In iron alloys, this metal causes brittleness of steel both at high and room temperatures. Its negative effect on the properties of steel results from the precipitation or formation of low-melting intermetallic compounds at the grain boundaries, as well as from the interaction with other harmful elements coming from the scrap, especially with copper. In view of the fact that it is impossible to eliminate the tin during the conventional thermal treatment of steel, its presence may become a problem. Higher affinity of iron to oxygen than tin in the temperature range of steelmaking processes makes it impossible to eliminate it by way of oxidation [4]. Detinned steel can be obtained by way of applying one of two methods: chemical leaching or electrolysis [5–7]. Unfortunately, in Poland, steelworks do not have the technology to detin steel, and so, the scrap used there often contains elevated amounts of Sn. It should be noted that the presence of tin introduced together with scrap reprocessing cannot only create technological problems but also affects the corrosion resistance of the cast steels. This study presents the results of investigations into the effect on the amount of tin present in iron compounds on the corrosion resistance of these materials.

2. Test methodology, test material

The test objective was to introduce iron samples containing different amounts of tin. The Fe-Sn alloys were melted in a Tamman furnace in a protective atmosphere of argon ($p_{Ar} = 1.3$ bar); for their preparation, spectrally pure tin and iron of purity 99.98% were used. The heating process to the temperature of 1550°C lasted 90 min, and then the samples were held at this temperature for 15 min, followed by their cooling together with the furnace for 120 min. The melts were performed in alundum crucibles. For the corrosion tests, iron samples containing (wt. %): 0.007; 0.018; 0.031; 0.100, 0.990 and 1.030% Sn were used. Metallographic observations were made by means of an optical microscope on samples etched in 3% nitral solution.

(% wag.): 0,007; 0,018; 0,031; 0,100, 0,990 oraz 1,030% Sn. Obserwacje metalograficzne prowadzono na mikroskopie optycznym na próbkach trawionych 3% roztworem nitalu.

Na przygotowanych odlewach wykonano testy grawimetryczne, polegające na okresowym ważeniu próbek poddanych działaniu agresywnego środowiska mgły solnej. Ekspozycję próbek prowadzono w aerozolu wytworzonym z 5% roztworu NaCl w 0,1M CH₃COOH, w temperaturze 35°C (zgodnie z PN-H-04624:1976 [8]). Ze względu na zróżnicowaną przyczepność produktów korozji wytworzonych w mgle solnej do podłoża metalicznego, powierzchnie badanych próbek (po każdorazowym z 4-godzinnych cykli ekspozycyjnych w tym środowisku i przed każdym ważeniem) szczołtkowano do stałej masy, w związku z czym mierzono ubytki masy próbek w funkcji czasu. Łączny czas wytrzymywania próbek w atmosferze mgły solnej wyniósł 25 godzin.

Badania zawartości jonów żelaza po różnych czasach ekspozycji w 1M H₂SO₄ oznaczono metodą atomowej spektroskopii absorpcyjnej (ASA), stosując spektrometr Solar 939 (Unicam).

Potencjokinetyczne krzywe polaryzacji badanych materiałów wykreślono dla elektrod w postaci wirujących dysków o powierzchni roboczej 0,25 cm². Badania wykonano w roztworach argonowanych (každorazowo 100 ml) 1M H₂SO₄ oraz w 0,5M Na₂SO₄ zakwaszonym do pH = 4, a jako prędkość obrotową dysku wybrano 12 obr·s⁻¹. Dla wykreślenia pełnych charakterystyk polaryzacyjnych zastosowano skanowanie potencjału od wartości $E_{pocz} = -700$ mV do $E_{końc} = +1800$ mV z prędkością 10 mV·s⁻¹. W celu uwidocznienia wpływu zawartości Sn w żelazie na wartość szybkości korozji (i_{kor}) zastosowano węższe zakresy potencjałów ($E_{pocz} = -700$ mV do $E_{końc} = -400$ mV) oraz wolniejszy skaning potencjału: 0,10 mV·s⁻¹. Wszystkie badania potencjokinetyczne wykonywano w temperaturze 25 ± 0,1°C, a wartości potencjałów elektrodowych wyrażono względem elektrody chlorosrebrowej, dla której $E_{AgCl/Ag}^0 = 222$ mV. Každorazowo przed wykreśleniem krzywej potencjokinetycznej, w celu ustalenia się potencjału stacjonarnego badanych próbek, wytrzymywano je przez 30 min w roztworze korozyjnym.

3. Dyskusja wyników

Przykładowe zdjęcia mikrostruktury stopu Fe-Sn przedstawiono na rysunku 1. Spośród wszystkich próbek różniących się zawartością cyny wybrano charakterystyczne obrazy dla próbki o minimalnej (0,007%) oraz maksymalnej (1,03%) zawartości Sn.

Jak wykazały badania metalograficzne, stopy przy wszystkich analizowanych zawartościach Sn wykazywały gruboziarnistą strukturę ferrytyczną (rys. 1). Na rysunku 2 przedstawiono wyniki przyspieszonych testów na kinetykę korozji atmosferycznej dla próbek żelaza

The prepared casts underwent gravimetric tests, consisting in periodical weighing of the samples exposed to the aggressive operation of the environment of salt spray. The sample exposition was performed in aerosol made of 5% NaCl solution in 0.1M CH₃COOH, at 35°C (according to PN-H-04624:1976 [8]). Due to the diversified adhesion of the corrosion products made in the salt spray to the metallic substrate, the surfaces of the examined samples (after each 4-hour exposition cycle in this environment and before each weighing) were brushed to a solid mass; and so, the mass losses of the samples were measured as a function of time. The total time of holding the samples in the atmosphere of salt spray was 25 hours.

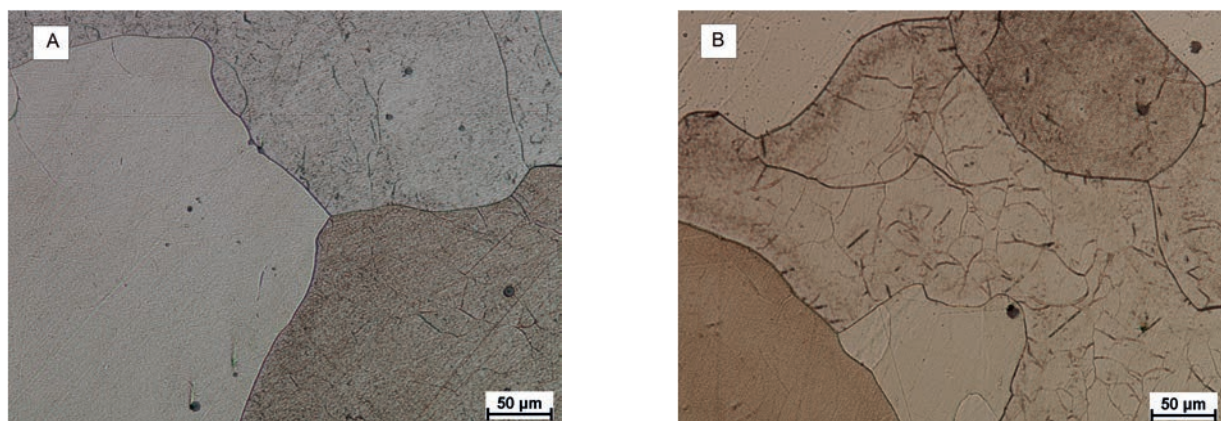
The content of iron ions after different exposition times in 1M H₂SO₄ was determined by the method of atomic absorption spectroscopy (AAS), with the use of the spectrometer Solar 939 (Unicam).

The potentiokinetic polarization curves of the examined materials were determined for the electrodes in the form of rotating disks of the working surface of 0.25 cm². The tests were performed in argonized solutions (each time 100 ml) 1M H₂SO₄ and in 0.5M Na₂SO₄ acidified to pH = 4, and 12 obr·s⁻¹ was selected as the rotational speed of the disk. For the determination of full polarization characteristics, potential scanning was applied from the value of $E_{start} = -700$ mV to $E_{end} = +1800$ mV at the rate of 10 mV·s⁻¹. In order to demonstrate the effect of the content of Sn in the iron on the value of corrosion rate (i_{cor}), narrower potential ranges were applied ($E_{start} = -700$ mV to $E_{end} = -400$ mV) as well as a slower potential scanning: 0.10 mV·s⁻¹. All the potentiokinetic tests were conducted at 25 ± 0.1°C, and the values of the electrode potentials were expressed in respect of the silver-chloride electrode, for which $E_{AgCl/Ag}^0 = 222$ mV. Each time, before drawing the potentiokinetic curve, in order to determine the stationary potential of the tested samples, the latter were held in a corrosion solution for 30 min.

3. Discussion of results

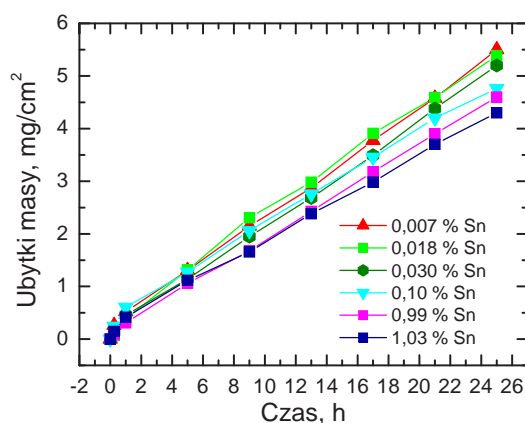
Exemplary images of the microstructure of the Fe-Sn alloy are presented in Figure 1. From among all the samples differing in the content of tin, characteristic images were selected for the sample of the minimal (0.007%) and maximal (1.03%) Sn content.

As was demonstrated by the metallographic tests, the alloys with all the analyzed Sn contents exhibited a coarse-grained ferritic structure (Fig. 1). Figure 2 shows the results of accelerated tests of the kinetics of atmospheric corrosion for iron samples of different Sn contents. The dependences $\Delta m/S = f(t)$ presented in the Figure for all the analyzed samples of the Fe-Sn alloy exhibit rectilinearity. The slopes of the respective straight lines are the measure of the corrosion rate in the discussed time range.



Rys. 1. Mikrostruktura stopów Fe-Sn o zawartości odpowiednio 0,007% Sn (A) i (B) 1,030% Sn

Fig. 1. Microstructure of Fe-Sn alloys of 0.007% (A) and 1.030% (B) Sn content



Rys. 2. Wyniki przyspieszonych grawimetrycznych testów na korozję atmosferyczną w mgle solnej dla stopów Fe-Sn o różnej zawartości Sn

Fig. 2. Results of accelerated gravimetric tests of atmospheric corrosion in salt spray for Fe-Sn alloys with different Sn contents

o różnej zawartości Sn. Przedstawione na rysunku zależności $\Delta m/S = f(t)$ dla wszystkich analizowanych próbek stopu Fe-Sn wykazują prostoliniowość. Nachylenia odpowiednich prostych są miarą szybkości korozji w rozpatrywanym zakresie czasu.

Jak wynika z rysunku 2, zróżnicowana zawartość Sn (z przedziału 0,007–1,03%) w próbkach żelaza nieznacznie wpływa na szybkość jego korozji atmosferycznej. Szybkość ta systematycznie wzrasta od 4,0 mg/(cm²·doba) dla żelaza zawierającego 1,03% Sn przez 4,7 mg/(cm²·doba) dla 0,10% Sn do 5,3 mg/(cm²·doba) dla żelaza o najmniejszej zawartości Sn – 0,007%.

Analiza zawartości jonów żelaza w roztworze pokorozyjnym (1M H₂SO₄ – rys. 3) wykazała, że najszybsze przechodzenie jonów do roztworu korozyjnego obserwuje się dla próbki o zawartościach Sn najmniejszych: 0,007–0,018%. Wzrost udziału Sn w stopie z 0,007% do 1,03% nieco spowolnił proces rozpuszczania Fe.

Jak wynika z wykreślonych krzywych polaryzacji (rys. 4(A)), najistotniejsze różnice w ich przebiegu obserwuje się w zakresie przejścia materiału w stan pasywny. Pod-

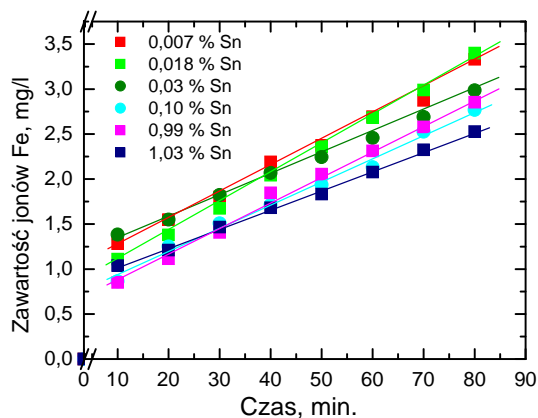
As can be inferred from Figure 2, the diversified Sn content (in the range of 0.007–1.03%) in the samples of iron slightly affects the rate of its atmospheric corrosion. This rate systematically increases from 4.0 mg/(cm²·24 h) for the iron containing 1.03% Sn, through 4.7 mg/(cm²·24 h) for the iron with 0.10% Sn, to 5.3 mg/(cm²·24 h) for the iron with the lowest Sn content – 0.007%.

The analysis of the iron ion content in the corrosive solution (1M H₂SO₄ – Fig. 3) showed that the fastest transfer of ions into the corrosive solution is observed for the sample with the lowest Sn contents: 0.007–0.018%. The increase of the Sn content in the alloy from 0.007% to 1.03% slightly lowered the rate of the Fe dissolution.

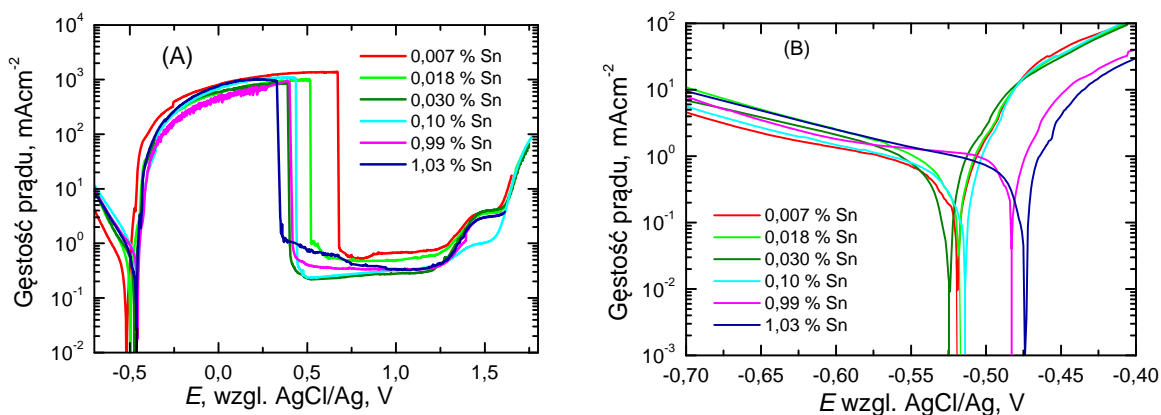
As can be inferred from the drawn polarization curves (Fig. 4(A)), the most important differences in their course are observed in the range of the material transition into the passive state. The elevated Sn content facilitates the transition into the passive state of the analyzed iron samples, which was reflected in a lowered critical passivation potential (E_{cp}). The val-

wyższa zawartość Sn ułatwia przejście w stan pasywny analizowanych próbek żelaza, co uwidoczniło się obniżeniem krytycznego potencjału pasywacji (E_{kp}). Wartości E_{kp} wahają się od 670 mV dla żelaza zawierającego 0,007% Sn do 330 mV dla 1,03% Sn, czyli jego wartość zmniejszyła się o 340 mV. Niewielkiemu zmniejszeniu uległy również wartości i_{kp} ; różnica w wielkości krytycznego prądu pasywacji pomiędzy próbkami Fe o najmniejszej i największej zawartości cyny sięga $440 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$.

ues of E_{cp} vary from 670 mV for the iron containing 0.007% Sn to 330 mV for 1.03% Sn, which means that its value decreased by 340 mV. A slight decrease was also observed for the values of i_{cp} ; the difference in the value of the critical passivation potential between the Fe samples of the lowest and highest tin content reaches $440 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$.



Rys. 3. Zmiana stężenia jonów Fe po ekspozycji w roztworze korozyjnym ($1\text{M H}_2\text{SO}_4$)
Fig. 3. Change in Fe ion concentration after exposition to corrosive solutions ($1\text{M H}_2\text{SO}_4$)



Rys. 4. Potencjodynamiczne krzywe polaryzacji badanych stopów Fe-Sn dla szerokiego zakresu potencjałów (A) oraz wąskiego, obszaru przejścia katodowo/anodowego (B) wykonane w $1\text{M H}_2\text{SO}_4$
Fig. 4. Potentiodynamic polarization curves of the examined Fe-Sn alloys for a wide (A) and narrow range of potentials, area of cathodic/anodic transfer (B) made in $1\text{M H}_2\text{SO}_4$

W celu określenia szybkości korozji, na podstawie wykreślonych krzywych polaryzacji – rysunek 4(B), wyznaczono gęstości prądu korozyjnego i_{kor} . Gęstości te zostały wyznaczone przez ekstrapolację prostoliniowych odcinków anodowych krzywych polaryzacyjnych o nachyleniu 30 mV/dekadę do potencjału korozyjnego (E_{kor}). Wyniki zebrano w tabeli 1.

Jak widać z przedstawionych w tabeli 1 wyników, wpływ zawartości Sn na wyznaczone metodą ekstrapolacji wartości i_{kor} jest niewielki. Szybkość korozji waha się od $0,20 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ dla próbki o najmniejszej

In order to determine the corrosion rate, based on the drawn polarization curves – Figure 4(B), the corrosion current densities i_{kor} were determined by way of extrapolation of rectilinear sections of the anodic polarization curves with the slope of 30 mV/decade to the corrosion potential (E_{cor}). The results are compiled in Table 1.

As we can see in the results presented in Table 1, the effect of the Sn content on the values of i_{kor} determined by the extrapolation method is small. The corrosion rate varies from $0.20 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ for the sample with the low-

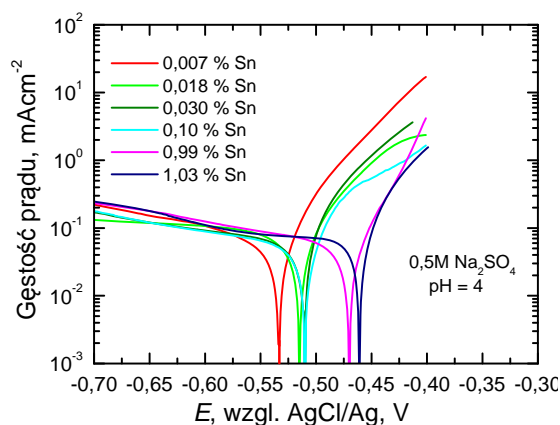
Tabela 1. Najważniejsze parametry określające odporność korozyjną stopu Fe-Sn w 1M H₂SO₄ odczytane z krzywych polaryzacji przedstawionych na rysunku 4(A i B)

Table 1. The most important parameters describing the corrosion resistance of Fe-Sn alloy in 1M H₂SO₄ read from the polarization curves shown in Figure 4(A and B)

Zawartość Sn / Sn content	E_{kor} , mV / E_{cor} , mV /	E_{kp} , mV / E_{cp} , mV /	i_{kp} , mA·cm ⁻² / i_{cp} , mA·cm ⁻²	R_p , Ω cm ² / R_p , Ω cm ²	i_{kor} , mA·cm ⁻² (ekstrapolacja) / i_{cor} , mA·cm ⁻² (extrapolation)
0,007	-519	670	1400	10,4	0,20
0,018	-517	500	970	9,8	0,20
0,030	-525	400	970	10,4	0,19
0,100	-514	440	990	9,0	0,30
0,990	-480	400	960	8,2	0,40
1,030	-470	330	960	8,3	0,35

zawartości Sn do 0,40 mA·cm⁻² dla ok. 1% Sn, aby dla próbki o zawartości > 1% znów zmaleć (0,35 mA·cm⁻²). Chcąc potwierdzić otrzymane wyniki, z wykreślonych krzywych polaryzacji wyznaczono opór polaryzacji, będący również miarą szybkości korozji. Jak wiadomo, dla potencjałów nieznacznie różniących się od potencjału korozyjnego ($E_{kor} = \pm 20$ mV), czyli w zakresie, w którym spełnione jest równanie Sterna-Hoara [9], gęstość prądu zewnętrznego jest liniową funkcją potencjału, a nachylenie odpowiednich prostych jest miarą oporu polaryzacji (R_p). Z kolei odwrotność R_p jest proporcjonalna do gęstości prądu korozyjnego. Wyznaczone w ten sposób wartości szybkości korozji badanego materiału potwierdzają nieznaczny wpływ zawartości Sn na korozję próbek żelaza. Drobiazgowo analizując otrzymane wartości, można by stwierdzić, że procesy korozyjne zachodzą nieco wolniej (większe wartości R_p) w przypadku stopów o niższych zawartościach Sn: 0,007–0,10%. Jednak z uwagi na niewielkie różnice w wartościach i_{kor} i R_p szybkości korozji analizowanych próbek należy uznać za porównywalne.

est Sn content to 0.40 mA·cm⁻² for about 1% Sn, while decreasing again for the sample with the > 1% content (0.35 mA·cm⁻²). In order to verify the obtained results, the polarization resistance was determined from the drawn polarization curves, which is also the measure of the corrosion rate. As we know, for potentials slightly differing from the corrosion potential ($E_{cor} = \pm 20$ mV), that is in the range in which the Stern-Hoar equation is fulfilled [9], the density of the external current is a linear function of the potential, and the slope of the respective straight lines is the measure of the polarization resistance (R_p). In turn, the inverse of R_p is proportional to the corrosion current density. The values of corrosion rate of the examined material determined in this way confirm the slight effect of the Sn content on the corrosion of the iron samples. Performing a detailed analysis of the obtained values, one could state that the corrosion processes are slightly slower (higher R_p values) in the case of the alloys with lower Sn contents: 0.007–0.10%. However, due to small differences in the values of i_{cor} and R_p , the corrosion rates of the analyzed samples should be treated as comparable.



Rys. 5. Potencjokinetyczne krzywe polaryzacji próbek Fe-Sn o różnej zawartości Sn, wykonane w 0,5M Na₂SO₄ o pH = 4

Fig. 5. Potentiokinetic polarization curves of Fe-Sn samples with different Sn contents, made in 0.5M Na₂SO₄ of pH = 4

Podobnie nie obserwuje się istotnego wpływu zawartości Sn z przedziału 0,007–1,03% na zachowanie się żelaza w roztworach mniej agresywnych. Na [rysunku 5](#) przedstawiono potencjokinetyczne krzywe polaryzacji badanego materiału wykonane w 0,5M Na₂SO₄ zakwaszonym do pH = 4, a wyznaczone na ich podstawie wartości szybkości korozji w [tabeli 2](#).

Tabela 2. Szybkości korozji żelaza o różnej zawartości Sn wyznaczone z krzywych polaryzacji wykonanych w 0,5M Na₂SO₄ ([rys. 5](#))

Table 2. Corrosion rate of iron with different Sn contents determined from polarization curves made in 0.5M Na₂SO₄ ([Fig. 5](#))

Zawartość Sn / Sn content	E_{kor} , mV / E_{cor} , mV	R_p , Ω cm ² / R_p , Ω cm ²	i_{kor} , mA · cm ⁻² (ekstrapolacja) / i_{cor} , mA · cm ⁻² (extrapolation)
0,007	-530	190	0,05
0,018	-515	183	0,04
0,030	-500	200	0,06
0,100	-500	185	0,04
0,990	-470	152	0,05
1,030	-460	128	0,06

Similarly, no significant effect of the Sn content from the range of 0.007–1.03% on the behaviour of iron in less aggressive solutions is observed. [Figure 5](#) shows the potentiokinetic polarization curves of the examined material made in 0.5M Na₂SO₄ acidified to pH = 4, while the corrosion rate values determined based on the former are presented in [Table 2](#).

4. Wnioski

1. Podwyższona zawartość Sn w stopach Fe-Sn wpływa na ich odporność na korozję atmosferyczną. Szybkość korozji atmosferycznej ulega zmniejszeniu w miarę wzrostu zawartości Sn w analizowanych próbkach.
2. Podwyższone zawartości Sn (0,99–1,03%) ułatwiają przejście badanego stopu w stan pasywny.
3. Zarówno w środowisku kwasu siarkowego, jak i siarczanu sodu trudno doszukać się istotnego wpływu zawartości Sn na uzyskane szybkości korozji badanego materiału. Wyznaczone wartości i_{kor} (jak i R_p) można uznać za niezależne od zawartości Sn w stopie.

Podziękowania

Publikacja powstała w oparciu o wyniki badań przeprowadzonych w Katedrze Chemii Politechniki Częstochowskiej realizowanych w ramach projektu statutowego finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Autorzy składają serdecznie podziękowania Panu Prof. dr. hab. inż. Włodzimierzowi Derdzie za cenną pomoc w przygotowaniu próbek.

4. Conclusions

1. An elevated Sn content in Fe-Sn alloys affects their resistance to atmospheric corrosion. The corrosion rate decreases with an increase of the Sn content in the analyzed samples.
2. Elevated Sn contents (0.99–1.03%) facilitate the transition of the examined alloy into the passive state.
3. In the environment of both sulfuric acid and sodium sulfate, there is no significant effect of the Sn content on the obtained corrosion rates of the examined material. The determined values of i_{cor} (as well as R_p) can be treated as independent of the Sn content in the alloy.

Acknowledgements

The publication has been created based on the results of the research performed at the Chemistry Department of the Czestochowa University of Technology realized within the frames of a statutory project financed by the Ministry of Science and Higher Education.

The authors would like to express their sincere thanks to Prof. Włodzimierz Derda PhD, Eng. for his valuable assistance in the preparation of the samples.

Literatura/References

1. Derda W., J. Siwka. 2014. Cyna w procesach metalurgii stali. W *Polska metalurgia w latach 2011–2014*, red. K. Świątkowski, 69–86. Kraków: Wydawnictwo Naukowe AKAPIT.
2. Smakowski T., R. Ney, K. Golas (red.). 2014. *Bilans gospodarki surowcami mineralnymi Polski i świata*. Warszawa: Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy.
3. Miettinen J. 2008. „Thermodynamic description of the Cu–Fe–Sn system at the Cu–Fe side”. *Calphad* 32 (3) : 500–505, DOI: 10.1016/j.calphad.2008.06.003.
4. Malkiewicz T. 1976. *Metaloznawstwo stopów żelaza*. Warszawa–Kraków: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
5. Jun W.S., P.S. Yun, E.C. Lee. 2004. „Leaching behavior of tin from Sn–Fe alloys in sodium hydroxide solutions”. *Hydrometallurgy* 73 (1–2): 71–80.
6. Kucharski M. 2010. *Recykling metali nieżelaznych*. Kraków: AGH.
7. Tuncuk A., V. Stazi, A. Akcil, E.Y. Yazici, H. Deveci. 2012. „Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydro-metallurgy in recycling”. *Minerals Engineering* 25 (1) : 28–37.
8. PN-H-04624:1976 Korozja metali – Badanie laboratoryjne przyspieszone w kwaśnej mgle solnej.
9. Shreir's Corrosion. 2010. *Polarization Resistance*. 4th Edition, 2, 1466–1467. UK: Elsevier – Acad. Press.