

Strefy kompozytowe otrzymywane *in situ* w stalowych odlewach bijaków do kruszarek

Composite zones obtained *in situ* in steel casts of crushing mill beaters

Bartosz Opitek^{1*}, Ewa Olejnik^{1,2}, Janusz Lelito¹

¹AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Odlewnictwa, ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków, Polska

²INNERCO sp. z o.o., ul. Jadwigi Majówny 43a, 30-298 Kraków, Polska

¹AGH – University of Science and Technology, Faculty of Foundry Engineering, ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków, Poland

²INNERCO sp. z o.o., ul. Jadwigi Majówny 43a, 30-298 Kraków, Poland

*Corresponding author: bartek3185@wp.pl

Received: 13.09.2018. Accepted in revised form: 30.11.2018.

© 2018 Instytut Odlewnictwa. All rights reserved.

DOI: 10.7356/iod.2018.15

Streszczenie

Prezentowana praca miała na celu uzyskanie elementu bijaka do kruszarki wykorzystywanego w warunkach dużego zużycia ściernego oraz pracującego pod wysokimi naciskami. Wytworzono, metodą SHSB, lokalną strefę kompozytową składającą się z bardzo twardego węgliku tytanu – TiC. Umieszczone w przygotowanej wcześniej formie odlewniczej wypraski zostały zalane ciekłym metalem, którego ciepło spowodowało zainicjowanie reakcji *in situ* tworzenia się węgliku tytanu. Otrzymany w ten sposób odlew poddano badaniom. Wykonano analizę składu fazowego na dyfraktometrze rentgenowskim – XRD. Dodatkowo przeprowadzono badania na elektronowym mikroskopie skaningowym – SEM w celu określenia kształtu, wielkości i rozmieszczenia TiC. W efekcie przeprowadzonych prac i badań otrzymano materiał wysokiej jakości zgodny z oczekiwaniami.

Słowa kluczowe: MMCs, TiC, *in situ*, lokalne wzmocnienie, mikrostruktura, kruszarka

Abstract

The aim of the presented study was to obtain the element of a crushing mill beater reinforced with a composite zone, working under the conditions of high abrasive wear as well as high pressures. By means of the SHSB method, a local composite zone was created consisting of very hard titanium carbide – TiC. The moulded pieces prepared beforehand in the casting mould were filled with liquid metal, whose heat caused the initiation of an *in situ* reaction – the formation of titanium carbide. The cast obtained in this way was subjected to tests. An analysis of the physical composition was performed on an X-ray diffractometer – XRD. Additionally, investigations with the use of a scanning electron microscope SEM were carried out in order to determine the shape, size and distribution of TiC. As a result of the conducted research, a high quality material was obtained, which was in line with the authors' expectations.

Keywords: MMCs, TiC, *in situ*, local reinforcement, microstructure, crushing mill

1. Wstęp

Większość prac nad kompozytami o osnowie metalowej (MMCs) skupia się na otrzymaniu materiałów będących najlepszą wypadkową właściwości mechanicznych i użytkowych. Obecnie coraz bardziej popularną metodą produkcji kompozytów MMCs jest technologia wytwarzania *in situ*. W prosty sposób pozwala otrzymać kompozyt o osnowie metalowej i wzmocnieniu opartym

1. Introduction

A majority of studies devoted to metal matrix composites (MMCs) aims to obtain materials which are the best resultant of the mechanical and functional properties. At present, a more and more popular method of producing MMC composites is the *in situ* technology, which, in a simple way, makes it possible to obtain a composite with a metal matrix and a reinforcement based on

na metalurgii proszków. Jest to bardzo atrakcyjna metoda ze względu na łatwość produkcji i niskie koszty oraz dużą produktywność, przy jednoczesnej dużej czystości wytworzonych materiałów [1–5].

Coraz częściej prowadzone są badania na kompozytach MMCs otrzymywanych metodą *in situ* na osnowie staliwa wzmocnianych fazą ceramiczną. Ponieważ nie zawsze wymaga się od materiałów wysokich właściwości w całej objętości tylko na powierzchniach roboczych, dlatego wytwarza się powierzchnię materiałów wzmocnianą lokalną strefą kompozytową. Dodatkowymi zaletami lokalnych wzmocnień kompozytowych są dłuższy okres użytkowania i unikalna kombinacja różnych właściwości, jak np. wytrzymałość, ciągliwość, twardość, odporność na ścieranie [6–9]. Wzmocnianie drogimi cząstkami następuje w konkretnych, wymaganych miejscach, co powoduje możliwość wytwarzania odlewów o bardziej skomplikowanych kształtach i odpowiednich wymiarach. Jako wzmocnienie najczęściej stosuje się węgliki, np.: węgiel tytanu (TiC), węgiel wolframu (WC) oraz węgiel cyrkonu (ZrC). Inne wzmocnienia to także tlenki, azotki, borki. TiC jest najpopularniejszym węglikiem, ponieważ stanowi doskonałą wypadkową pomiędzy właściwościami a swoją ceną. Jego twardość (ponad 3000 HV), wysoka temperatura topnienia (3067°C), gęstość (4,93 g/cm³), wysoka stabilność termiczna i chemiczna, dobra zwilżalność, małe cząstki i bardzo dobra jakość połączenia pomiędzy zbrojeniem a matrycą są bardzo pomocne w celu poprawienia wytrzymałości kompozytu [10–11]. Matrycę stanowi zwykle staliwo jako podstawowy, najtańszy stop metali z dobrymi właściwościami mechanicznymi.

Badania przeprowadzone na kompozytach MMCs wytwarzanych *in situ* z lokalnymi wzmocnieniami TiC również wykazują znaczny wzrost właściwości. Strefa kompozytowa wytworzona w podobnych badaniach zawierająca TiC jest znacznie twardszym materiałem od hartowanego staliwa manganowego [12]. Charakteryzuje się ona bardzo małymi cząstkami TiC (1 μm). W innych badaniach potwierdzono także dużą twardość materiału, a dodatkowo doskonałe połączenie małych cząstek TiC z matrycą [13]. Wszystkie badane kompozyty charakteryzują się jednak występowaniem porowatości.

Celem przeprowadzonych badań było wytworzenie metodą *in situ* strefy kompozytowej w odlewie stalowym bijaków do kruszarek.

2. Metoda badań i wyniki

Celem przeprowadzonych badań było wytworzenie strefy kompozytowej w odlewie bijaka kruszarki oraz analiza składu fazowego mikrostruktury w celu określenia jej morfologii.

Odlew elementu bijaka do kruszarki to materiał, od którego oczekuje się wysokich właściwości mechanicz-

powder metallurgy. It is a very attractive method owing to its ease of the production process, low costs and high productivity, with a simultaneous high purity of the produced materials [1–5].

More and more often, investigations are performed on MMC composites obtained by the *in situ* method with a cast steel matrix, reinforced with a ceramic phase. As materials are not often required to exhibit high properties in their whole volume, but rather only on their working surfaces, the materials' surface is produced with a local composite zone reinforcement. Additional advantages of local composite reinforcements are a longer operation time and a unique combination of different properties, such as strength, ductility, hardness and abrasion resistance [6–9]. Reinforcement with expensive particles is applied in specific required spots, which makes it possible to produce casts of complicated shapes and specific dimensions. The most commonly applied reinforcement is constituted by carbides, e.g. titanium carbide (TiC), tungsten carbide (WC) and zirconium carbide (ZrC). Other reinforcements are also: oxides, nitrides and borides. TiC is the most popular carbide because it constitutes a perfect resultant of its properties and its price. Its hardness (over 3000 HV), high melting point (3067°C), density (4.93 g/cm³), high thermal and chemical stability, good wettability, small particles and very good quality of the reinforcement-matrix bond are very useful in the improvement of the composite's strength [10–11]. The matrix is usually constituted by cast steel, as the basic cheapest metal alloy with good mechanical properties.

The studies performed on MMC composites produced *in situ* with local TiC reinforcements also demonstrate a significant increase of their properties. The composite zone produced in similar investigations containing TiC is a much harder material than quenched manganese cast steel [12]. It characterizes in very small TiC particles (1 μm). Other studies have also confirmed the high hardness of this material and, additionally, an excellent bond between the small TiC particles and the matrix [13]. All the examined composites, however, exhibit the presence of porosity.

The aim of the performed research was to apply the *in situ* method to create a composite zone in a steel cast of a crushing mill beater.

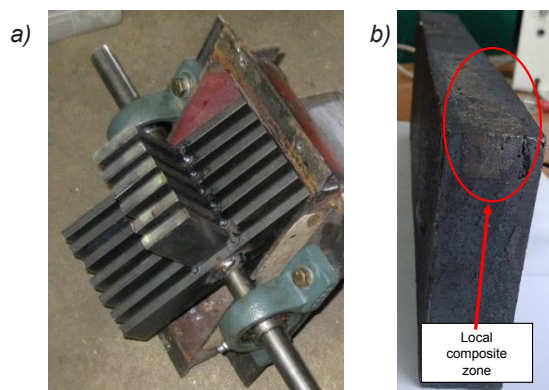
2. Test method and results

The aim of the performed studies was the creation of a composite zone in a crushing mill beater cast and an analysis of the microstructure phase composition in order to determine its morphology.

A cast of the element of a crushing mill beater is a material expected to exhibit high mechanical proper-

nych, takich jak: duża twardość, odporność na zużycie ścierne, odporność na obciążenia dynamiczne. Podjęto próbę wytworzenia odlewu z lokalną strefą kompozytową, składającą się z węgla tytanu – TiC w osnowie stalowej. Przykład wykorzystania takich elementów w kruszarkach oraz sam element z widoczną lokalną strefą kompozytową jest pokazany na [rysunku 1](#).

ties, such as: high hardness, abrasion wear resistance and dynamic load resistance. An attempt was made to produce a cast with a local composite zone consisting of titanium carbide TiC in a cast steel matrix. An example of the use of such elements in crushing mills and the element itself with a visible local composite zone has been shown in [Figure 1](#).



Rys. 1. Widok kruszarki z zamocowanymi elementami do kruszenia (a), element kruszarki wraz z otrzymaną lokalną strefą kompozytową (b)

Fig. 1. Image of a crushing mill with assembled crushing elements (a), element of a crushing mill with the obtained local composite zone (b)

Jako stop bazowy otrzymanego odlewu bijaka zastosowano staliwo niestopowe o niskiej zawartości węgla, charakteryzujące się wysoką odpornością na obciążenia dynamiczne. Jest to bardzo często wykorzystywany stop w tego typu materiałach ze względu na niską cenę w stosunku do właściwości mechanicznych i możliwości użytkowych. W celu polepszenia odporności materiału na ścieranie wytworzono lokalnie dodatkową fazę wzmacniającą, którą stanowił węgiel tytanu (strefa kompozytowa). W wyniku reakcji atomu tytanu (Ti) z atomem węgla (C) powstaje bardzo twarda cząstka TiC. Proces wykonano, posługując się wysokotemperaturową reakcją *in situ*, w której energia potrzebna do inicjacji reakcji jest dostarczana poprzez wysoką temperaturę ciekłego stopu. Powstały w ten sposób element kruszarki o odpowiednim kształcie i właściwościach nie wymaga dodatkowych czynności i jest gotowy do pracy.

Pierwszym etapem pracy było przygotowanie wypraski z węgla tytanu. W tym celu odważono odpowiednią ilość wymaganych składników tytanu i węgla. Mieszanka substratów TiC została przygotowana w stosunku atomowym 1 : 1 według reakcji (1):



Oznacza to, że na 12,0116 gram C potrzebne jest 47,867 gram Ti. Dodatkowo konieczne jest zastosowanie wypełniacza w postaci czystego proszku żelaza w ilości 10%. Dokładna masa wypełniacza została wyliczona w oparciu o równania (2) i (3).

As the base alloy of the obtained beater cast, non-alloy cast steel with a low carbon content was used, characterizing in high dynamic load resistance. It is an alloy which is very frequently applied in such type of materials, owing to its low price in respect of its mechanical properties and utilitarian capabilities. In order to improve the material's abrasion resistance, an additional local reinforcing phase was created, constituted by titanium carbide (composite zone). As a result of the reaction of a titanium atom (Ti) with a carbon atom (C), a very hard particle TiC is created. The process was carried out by means of a high temperature *in situ* reaction, in which the energy needed for the initiation of the reaction is provided by the high temperature of the liquid alloy. The crushing mill element formed in this way, with the appropriate shape and properties, does not require additional steps and is ready for work.

The first stage of investigations was the preparation of the moulded piece from titanium carbide. To that end, the proper amount of the required components, i.e. titanium and carbon, was weighed. The mixture of the TiC substrates was prepared in the atomic ratio 1 : 1, according to reaction (1):



This means that, for 12.0116 gram C, we need 47.867 gram Ti. Additionally, it is necessary to use a filler in the form of pure iron powder in the amount of 10%. The precise mass of the filler was calculated based on Equations (2) and (3).

$$47,867 \text{ [g] Ti} + 12,0116 \text{ [g] C} = 59,8786 \text{ [g] TiC} \quad (2)$$

$$59,8786 \text{ [g]} \times 10\% = 5,98786 \text{ [g] Fe} \quad (3)$$

Do dalszych badań wyliczoną masę żelaza, stanowiącą wypełniacz wypraski, zaokrąglono do 6 gram. Wypraski wytworzono, posługując się powszechnie dostępnymi proszkami tytanu, grafitu i żelaza o wysokiej czystości wynoszącej 99,99%.

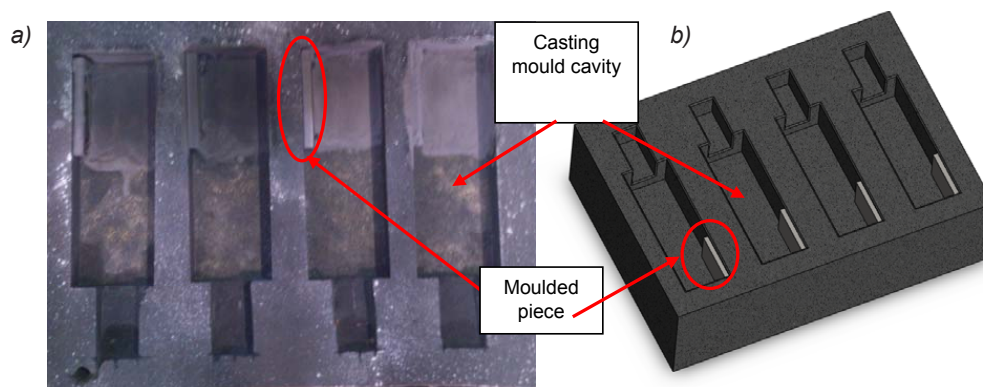
Składniki wypraski poddano dokładnemu mieszaninowi przez 24 godziny bez dostępu powietrza. Kolejną czynnością było przygotowanie wyprasek o wymiarach $15 \times 10 \times 100$ mm. Mieszanina proszków została umieszczona w przygotowanej matrycy i poddana prasowaniu pod ciśnieniem 400 MPa. Wykonane w ten sposób wypraski następnie wysuszono w temperaturze pokojowej i umieszczono w formie odlewniczej w miejscu części roboczej. Przygotowane do zalania ciekłym metalem formy odlewnicze wraz z umieszczonymi wewnątrz wypraskami pokazują [rysunek 2](#).

$$47.867 \text{ [g] Ti} + 12.0116 \text{ [g] C} = 59.8786 \text{ [g] TiC} \quad (2)$$

$$59.8786 \text{ [g]} \times 10\% = 5.98786 \text{ [g] Fe} \quad (3)$$

For further studies, the calculated iron mass, constituting the filler of the moulded piece, was rounded off to 6 grams. The moulded pieces were made with the use of commonly applied titanium, graphite and iron powders of high purity equalling 99.99%.

The components of the moulded piece were thoroughly mixed for the time of 24 hours without air access. The following step was the preparation of moulded pieces with the dimensions $15 \times 10 \times 100$ mm. The powder mixture was placed in the prepared matrix and subjected to pressing under the pressure of 400 MPa. The moulded pieces made in this way were then dried at room temperature and placed in a casting mould in its working section. The casting moulds prepared to be filled with the liquid metal together with the moulded pieces placed in their mould cavities have been shown in [Figure 2](#).



Rys. 2. Widok formy odlewniczej wraz z umieszczonymi wypraskami gotowe do zalania ciekłym metalem (a), projekt gotowej formy odlewniczej wraz z umieszczonymi wypraskami wykonanej w programie SolidWorks (b)
Fig. 2. Image of a casting mould with moulded pieces ready to be filled with liquid metal (a), design of a casting mould with moulded pieces made in the SolidWorks program (b)

Staliwo stopiono w piecu indukcyjnym średniej częstotliwości typu IMSK-10 type (*Inductal Gelingen*, Niemcy). Następnie wypełniono wnękę formy odlewniczej wraz z umieszczonymi wypraskami ciekłym stopem o temperaturze 1625°C . Otrzymane odlewy po zakrzepnięciu i ostudzeniu pocięto dla otrzymania próbek do badań. Zostały one następnie poddane szlifowaniu i polerowaniu.

3. Dyskusja wyników

W ramach przeprowadzonej pracy wykonano badania mikrostruktury strefy kompozytowej wytworzonej w odlewie bijaka kruszarki. Wykorzystano dyfraktometr rentgenowski Kristalloflex 4H (*X-ray diffraction – XRD*) firmy Siemens, przy promieniowaniu $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0,1548$ nm). Badania przeprowadzono pod napię-

The cast steel was melted in a medium frequency induction furnace type IMSK-10 (*Inductal Gelingen*, Germany). Next, the casting mould cavity with the moulded pieces was filled with the liquid alloy of 1625°C . The obtained casts, after solidification and cooling, were cut into test samples, which were then ground and polished.

3. Discussion of results

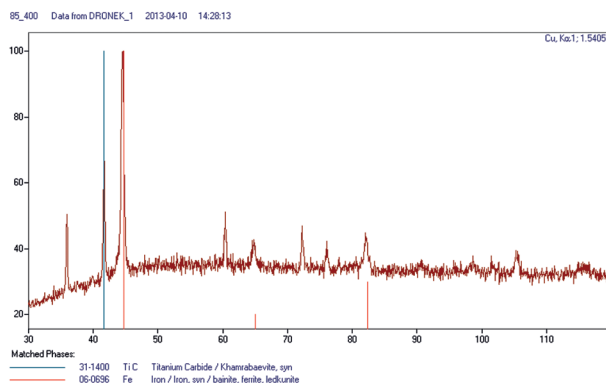
Within the performed studies, microstructural tests of the composite zone created in a crushing mill beater were conducted by means of an X-ray diffractometer Kristalloflex 4H (*X-ray diffraction – XRD*) by Siemens, with the radiation $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0.1548$ nm). The examinations were carried out with the voltage of 30 kV and

ciem 30 kV i prądem 20 mA. Badania mikrostruktury wykonano na skaningowym mikroskopie elektronowym SU-70 marki Hitachi. Użyto elektronów wstecznie rozproszonych (*Backscattered electrons – BSE*) oraz elektronów wtórnych (*Secondary electrons – SE*).

Wyniki badań dyfrakcji rentgenowskiej XRD zamieszczono na [rysunku 3](#). Pozwalają one jednoznacznie określić skład fazowy otrzymanej lokalnej strefy kompozytowej. Mikrostruktura składa się z ferrytycznej osnowy żelaza (αFe) oraz fazy wzmacniającej w postaci TiC.

the current of 20 mA. The microstructural tests were performed on a scanning electron microscope SU-70 by Hitachi. Backscattered electrons (BSE) as well as secondary electrons (SE) were used.

The results of the X-ray diffraction tests XRD have been shown in [Figure 3](#). They make it possible to determine the precise phase composition of the obtained local composite zone. The microstructure consists of a ferritic iron matrix (αFe) and a reinforcing phase in the form of TiC.



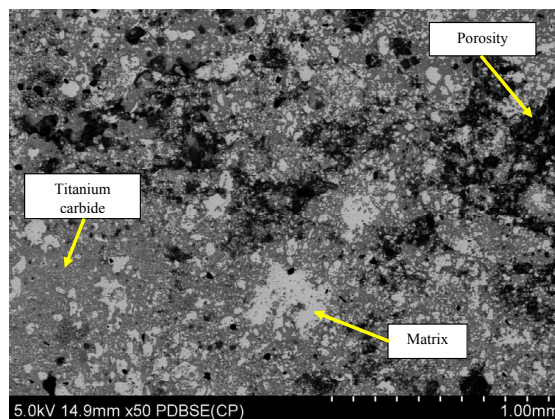
Rys. 3. Wyniki badań dyfrakcji rentgenowskiej strefy kompozytowej typu TiC-Fe wytworzonej in situ w odlewie ze staliwa
Fig. 3. Results of X-ray diffraction tests of a TiC-Fe type composite zone made in situ in a steel cast

Szczegółową analizę mikrostruktury pod względem morfologii strefy oraz rozkładu węglików w niej otrzymanych uzyskano za pomocą badań na skaningowym mikroskopie elektronowym SEM. Wyniki tych badań przy różnych powiększeniach zamieszczono na [rysunkach 4–8](#).

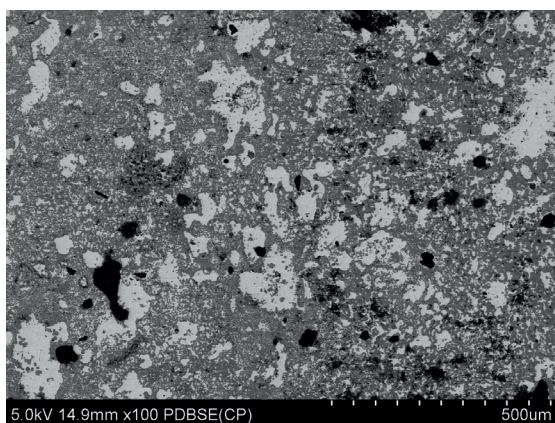
Na [rysunkach 4 i 5](#) pokazano mikrostrukturę strefy kompozytowej przy powiększeniu odpowiednio 50× i 100×. Widoczne obszary o kolorze białym stanowią osnowę, którą w tym przypadku jest faza pierwotna αFe , obszary o kolorze szarym to cząstki TiC, natomiast kolor czarny świadczy o niepożądanym obecności w tym obszarze mikrostruktury porowatości. Na podstawie analizy tych zdjęć można stwierdzić, że reakcja syntezy zaszła prawidłowo i do końca, nie pozostawiając resztek składników wypraski w postaci proszków tytanu i grafitu objawiających się obecnością dodatkowych faz w mikrostrukturze. Ponadto można zauważyć równomierny rozkład węglików tytanu w mikrostrukturze osnowy strefy kompozytowej, co wpływa korzystnie na odporność na ścieranie tej części odlewu. Obecna w strukturze strefy kompozytowej porowatość, która jest wynikiem wydzielających się gazów podczas reakcji syntezy, wpływa niekorzystnie na właściwości mechaniczne odlewu. Podsumowując, można stwierdzić, że strefa kompozytowa powinna w zdecydowany sposób poprawić właściwości mechaniczne i użytkowe elementów bijaków do kruszarek.

A detailed microstructural analysis in respect of the zone's morphology as well as the distribution of the carbides obtained in it was performed by means of a scanning electron microscope SEM. The results of these tests with different magnifications have been presented in [Figures 4–8](#).

[Figures 4 and 5](#) show the microstructure of the composite zone with the magnification of 50× and 100×, respectively. The visible white areas constitute the matrix, which, in their case, is a primary phase αFe ; the grey areas are TiC particles, whereas the black colour proves the undesirable presence of porosity in this microstructure area. Based on the analysis of these images, it can be stated that the synthesis reaction was proper and complete, leaving no residue of the moulded piece components in the form of titanium or graphite powders, which would reveal themselves by the presence of additional phases in the microstructure. Also, one can notice a uniform distribution of titanium carbides in the microstructure of the composite zone matrix, which positively affects the abrasion resistance of this section of the cast. The porosity present in the composite zone microstructure, which is a result of the precipitation of gases during the synthesis reaction, has a negative effect on the mechanical properties of the cast. Summing up, it can be established that the composite zone should significantly improve the mechanical and functional properties of the elements of crushing mill beaters.



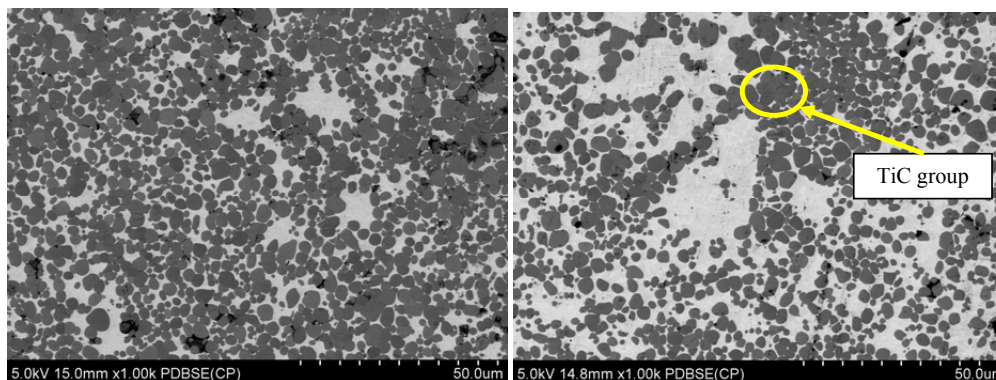
Rys. 4. Mikrostruktura strefy kompozytowej typu TiC-Fe wytworzonej in situ w odlewie ze staliwa przy powiększeniu 50×
Fig. 4. Microstructure of a TiC-Fe type composite zone created in situ in a steel cast, magnification 50×



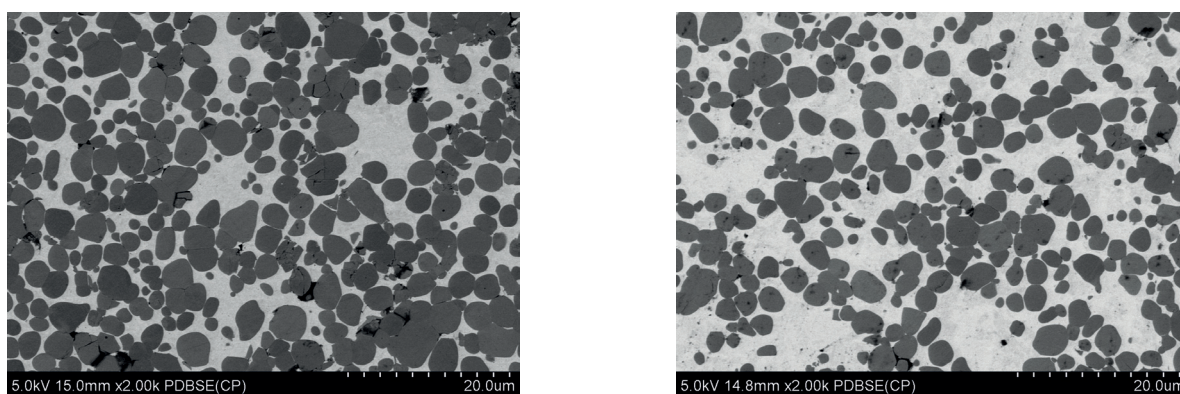
Rys. 5. Mikrostruktura strefy kompozytowej typu TiC-Fe wytworzonej in situ w odlewie ze staliwa przy powiększeniu 100×
Fig. 5. Microstructure of a TiC-Fe type composite zone created from cast steel, magnification 100×

Analizę morfologii wytworzonych w wyniku syntezy węglków tytanu w strefie kompozytowej przeprowadzono na skaningowym mikroskopie elektronowym przy powiększeniu 1000× (rys. 6), 2000× (rys. 7) i 5000× (rys. 8). Morfologia cząstek TiC charakteryzuje się w większości przypadków owalnym kształtem, często zbliżonym do kulistego. Taki kształt TiC pozwala stwierdzić, że właściwości mechaniczne materiału będą najlepsze z możliwych do osiągnięcia w tym przypadku. W niektórych miejscach strefy kompozytowej zaobserwowano aglomeraty węglków. Takie skupiska w obszarach strefy kompozytowej wpływają korzystnie na właściwości mechaniczne tych obszarów odlewu z uwagi na zwiększenie sztywności kształtującej twardość strefy. Prowadzić to może do sytuacji, w której obszary zawierające aglomeraty węglka tytanu posiadać będą właściwości mechaniczne zbliżone nawet do tych, jakie posiada sam węgiel tytanu. Obszary te nie występują jednak równomiernie i można zaobserwować miejsca bez wydzielań TiC o słabszych właściwościach. Dokonano również pomiaru wielkości węglków tytanu. Ich wielkość wahała się w przedziale od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów.

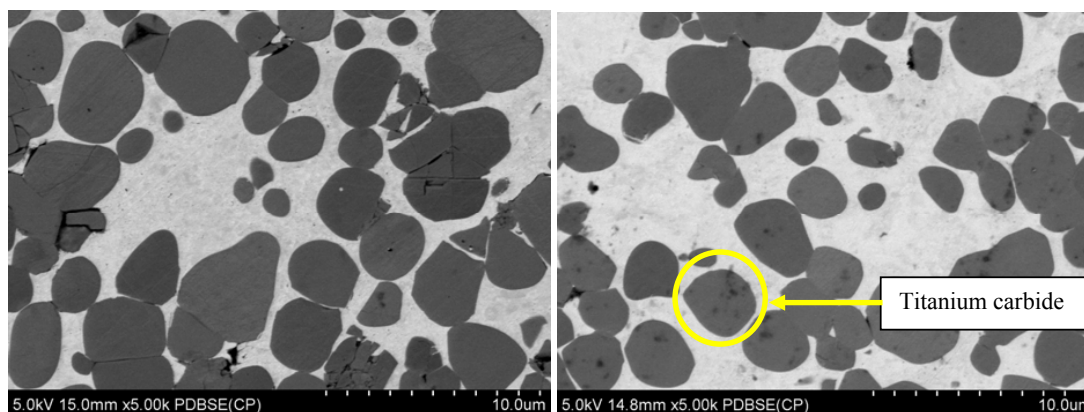
The analysis of the morphologies created as a result of a titanium carbide synthesis in the composite zone was performed on a scanning electron microscope with the magnification of 1000× (Fig. 6), 2000× (Fig. 7) and 5000× (Fig. 8). The morphology of the TiC particles characterizes, in most cases, in an oval shape, often similar to a circular one. Such a shape of TiC enables the statement that the mechanical properties of the material will be the best of those possible to obtain in this case. In some areas of the composite zone, carbide agglomerates were observed. Such clusters in the composite zone areas positively affect the mechanical properties of these areas of the cast, owing to the increase of rigidity, which shapes the hardness of the zone. This can lead to a situation when the area containing titanium carbide agglomerates exhibit mechanical properties which are similar even to those demonstrated by titanium carbide itself. Such areas, however, do not occur uniformly and we can observe zones without TiC precipitates, which exhibit weaker properties. Also, a measurement of the size of titanium carbides was performed. Their size varies within the scope from a few to a few tens of micrometers.



Rys. 6. Mikrostruktura strefy kompozytowej typu TiC-Fe wytworzonej in situ w odlewie ze staliwa przy powiększeniu 1000×
Fig. 6. Microstructure of a TiC-Fe type composite zone created in situ in a steel cast, magnification 1000×



Rys. 7. Mikrostruktura strefy kompozytowej typu TiC-Fe wytworzonej in situ w odlewie ze staliwa przy powiększeniu 2000×
Fig. 7. Microstructure of a TiC-Fe type composite zone created in situ in a steel cast, magnification 2000×



Rys. 8. Mikrostruktura strefy kompozytowej typu TiC-Fe wytworzonej in situ w odlewie ze staliwa przy powiększeniu 5000×
Fig. 8. Microstructure of a TiC-Fe type composite zone created in situ in a steel case, magnification 5000×

4. Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań oraz ich szczegółowej analizy można sformułować następujące wnioski:

1. Uzyskano oczekiwany skład fazowy w mikrostrukturze strefy kompozytowej, składającej się z fazy

4. Conclusions

As a result of the performed studies and their detailed analysis, the following conclusions can be drawn:

1. The expected phase composition was obtained in the microstructure of the composite zone. It con-

wzmacniającej w postaci TiC oraz osnowy, którą stanowiła faza α Fe.

2. Badania przeprowadzone na mikroskopie skaningowym SEM pozwoliły dokładnie przyjrzeć się mikrostrukturze strefy kompozytowej przy różnych powiększeniach. Węgiel tytanu jest rozmieszczony równomiernie w mikrostrukturze strefy kompozytowej, a czynnikiem negatywnym jest widoczna porowatość.
3. Wielkość wydzieleni węgla tytanu mieściła się w zakresie od 10 μ m do 50 μ m.
4. Zaproponowana technologia wytworzenia strefy kompozytowej jest łatwa i tania. Biorąc pod uwagę uzyskane efekty w postaci równomiernego rozmieszczenia węglików w mikrostrukturze, należy się spodziewać bardzo dobrych właściwości mechanicznych, szczególnie dużą twardość i odporność na ścieranie materiału.

sisted of a reinforcing phase in the form of TiC and a matrix constituted by a α Fe phase.

2. The investigations conducted on a scanning microscope SEM made it possible to closely observe the microstructure of the composite zone with different magnifications. Titanium carbide is distributed uniformly in the microstructure of the composite zone, while a negative factor is the visible porosity.
3. The size of titanium carbide precipitations was within the scope of 10 μ m to 50 μ m.
4. The proposed technology of creating a composite zone is easy and inexpensive. Taking into consideration the obtained effects in the form of a uniform distribution of carbides in the microstructure, we can expect the material to exhibit very good mechanical properties, especially high hardness and abrasion resistance.

Podziękowania

Autor składa podziękowania dr. Tomaszowi Tokarskiemu za wykonanie obrazowania mikrostruktury z wykorzystaniem SEM.

Acknowledgements

The author would like to thank Tomasz Tokarski D.Sc. for performing the microstructure imaging with the use of SEM.

Literatura/References

1. Wang Y., Z.Q. Zhang, H.Y. Wang, B.X. Ma, Q.C. Jiang. 2006. „Effect of Fe content in Fe-Ti-B system on fabricating TiB₂ particulate locally reinforced steel matrix composites”. *Materials Science and Engineering: A* 422 (1–2) : 339–345.
2. Yunhong L., Q. Zhao, Z. Zhang, X. Li, L. Ren. 2014. „Preparation and characterization of TiC particulate locally reinforced steel matrix composites from Cu-Ti-C system with various C particles”. *Journal of Asian Ceramic Societies* 2 (3) : 281–288.
3. Cui C., Z. Guo, H. Wang, J. Hu. 2007. „In situ TiC particles reinforced grey cast iron composite fabricated by laser cladding of Ni–Ti–C system”. *Journal of Materials Processing Technology* 183 (2–3) : 380–385.
4. Olejnik E., S. Sobula, T. Tokarski, G. Sikora. 2013. „Composite zones obtained by in situ synthesis in steel castings”. *Archives of Metallurgy and Materials* 58 (3) : 769–773.
5. Opitek B. 2014. *Strefy kompozytowe otrzymywane in situ w odlewach stalowych bijaków do kruszarek*. Kraków: Akademia Górniczo-Hutnicza (praca inżynierska).
6. Galgali R.K., H.S. Ray, A.K. Chakrabarti. 1998. „Wear characteristics of TiC reinforced cast iron composites. Part 1 – Adhesive wear”. *Materials Science and Technology* 14 (8) : 810–815.
7. Srivastava A.K., K. Daas. 2009. „Microstructural and mechanical characterization of *in situ* TiC and (Ti,W)C-reinforced high manganese austenitic steel matrix composites”. *Materials Science and Engineering: A* 516 (1–2) : 1–6.
8. Feng K., Y. Yang, B. Shen, L. Guo. 2005. „*In situ* synthesis of TiC/Fe composites by reaction casting”. *Materials and Design* 26 (1) : 37–40.

9. Lee J., D. Lee, M.H. Song, W. Rhee, H.J. Ryu, S.H. Hong. 2018. „In-situ synthesis of TiC/Fe alloy composites with high strength and hardness by reactive sintering”. *Journal of Materials Science & Technology* 34 (8) : 1397–1404.
10. Li S., K. Kondoh, H. Imai, B. Chen, L. Jia, J. Umeda. 2015. „Microstructure and mechanical properties of P/M titanium matrix composites reinforced by in-situ synthesized TiC–TiB”. *Materials Science and Engineering: A* 628 (25 March 2015) : 75–83.
11. Babapoor A., M.S. Asl, Z. Ahmadi, A.S. Namini. 2018. „Effects of spark plasma sintering temperature on densification, hardness and thermal conductivity of titanium carbide”. *Ceramics International* 44 (12) : 14541–14546.
12. Hu S.W., Y.G. Zhao, Z. Wang, Y.G. Li, Q.C. Jiang. 2013. „Fabrication of in situ TiC locally reinforced manganese steel matrix composite via combustion synthesis during casting”. *Materials & Design* 44(February 2013) : 340–345.
13. Li S.T., H.Y. Wang, S.J. Lü, S.L. Sun, D. Li, Q.C. Jiang. 2008. „Fabrication of steel matrix composite locally reinforced with *in situ* TiC particulate via SHS reaction of (Ti, Fe)-C system during casting”. *ISIJ International* 48 (9) : 1293–1298.

