

# Badania struktury kompozytowych powłok Ni-WC napawanych plazmowo

## Study of the structure of composite coatings Ni-WC deposited by plasma transferred arc

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań struktury kompozytowych powłok o osnowie niklu, umacnianych cząstkami węgliku wolframu, otrzymanych techniką napawania plazmowego. Warstwy te nanoszono na podłoża ze stali niestopowej dla różnych wartości natężenia prądu łuku głównego. Analizowano strukturę napoin, stosując zarówno mikroskopię optyczną jak i skaningową. Wykazano, iż budowa powłok Ni-WC jest złożona, a poprawne napoiny o równomiernym rozmieszczeniu WC formują się dla określonych parametrów procesu.

**Słowa kluczowe:** napoiny kompozytowe; Ni – WC; napawanie plazmowe proshkowe; mikrostruktura

### Abstract

The results of the structure investigation of nickel matrix composite overlays reinforced by tungsten carbide particles are presented in the paper. These layers were deposited by the plasma transferred arc welding method onto the low alloy steel with various values of the main arc current. The structure of coatings was analyzed using both optical and scanning microscopy. It was shown that the structure of Ni-WC layers is complex and overlays of uniform WC distribution are formed for only specific process parameters.

**Keywords:** composite overlays; Ni – WC, Plasma Powder Transferred Arc Welding; microstructure

### Wstęp

W licznych aplikacjach napawania plazmowego stosowany jest materiał dodatkowy w postaci proszku, co umożliwia otrzymanie napoin o różnorodnym składzie chemicznym i właściwościach [1÷5]. W powłokach o strukturze materiału kompozytowego, stosowanych w celu podwyższenia odporności warstwy wierzchniej części maszyn na zużycie ścierne, osnowę stanowią na ogół stopy na bazie żelaza, niklu lub kobaltu, w których rozmieszczone są cząstki wysokotopliwych faz, np. węgliki metali przejściowych IVB-VIB grupy układu okresowego pierwiastków [6÷8]. Węgliki te charakteryzują się przede wszystkim dużą twardością, wysoką temperaturą topnienia oraz stabilnością termodynamiczną [9]. Dodatek tego rodzaju twardych faz do stosunkowo plastycznej osnowy znacząco zwiększa właściwości użytkowe napoin. Wykazują one jednocześnie wysoką odporność na zużycie ścierne oraz obciążenia udarowe, czemu nie mogą sprostać typowe powłoki czysto metaliczne. W tego rodzaju warunkach eksploatacyjnych stosowane są zwłaszcza powłoki kompozytowe umacniane cząstkami węgliku wolframu [10÷12]. Napoiny o strukturze kompozytowej cechują się wysokimi i powtarzalnymi właściwościami eksploatacyjnymi szczególnie wówczas, gdy cząstki fazy umacniającej są równomiernie rozmieszczone w metalowej matrycy.

Wiele czynników ma wpływ na proces tworzenia się napoin kompozytowych i dyspersję cząstek fazy umacniającej. Najważniejszym z nich jest charakter i intensywność

oddziaływania ciekłej osnowy metalicznej z cząstkami fazy umacniającej, których przejawem jest stopień zwilżenia. Dobra zwilżalność ma miejsce wówczas, gdy zarówno ciecz jak i faza stała cechują się tym samym rodzajem wiązań atomowych, przy spełnieniu odpowiednich warunków temperaturowych oraz aktywacji powierzchni [13]. W węglkach metali przejściowych IVB-VIB grupy układu okresowego pierwiastków charakter wiązań jest skomplikowany, występują w nich wiązania mieszane, metaliczne z udziałem oddziaływania typu kowalentnego, a w niektórych przypadkach jonowego [14,15]. Jeśli cząstki fazy trudnotopliwej są dobrze zwilżane ciekłą osnową metaliczną w warunkach procesu, tworzą się poprawne napoiny, a uzysk (stopień wykorzystania proszku węgliku) jest wysoki. Gdy zwilżalność nie jest dostateczna, cząstki umocnienia są wypierane z ciekłego jeziora, powstają niezgodności spawalnicze, a stopień uzysku cząstek fazy umacniającej jest mały.

Dla poprawnego formowania się napoin kompozytowych, oprócz zapewnienia dobrej zwilżalności składników kompozytu, nie bez znaczenia jest różnica gęstości. Gdy materiały osnowy i fazy umacniającej znacząco różnią się masą właściwą dochodzi do nierównomiernego rozmieszczenia cząstek umocnienia w objętości powłoki: cząstki o wysokiej gęstości właściwej mają tendencję do opadania na dno, natomiast lekkie cząstki węglików gromadzą się w strefie górnej napoin.

**Dr inż. Mariusz Bober; prof. dr hab. inż. Jacek Ślania** – Zakład Inżynierii Spajania, Politechnika Warszawaska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: mbober@wip.pw.edu.pl

W niniejszej pracy, stanowiącej kontynuację wcześniejszego cyklu [16,17], przedstawiono wyniki badań struktury kompozytowych napoin Ni-WC otrzymanych metodą plazmową dla różnych parametrów procesowych.

## Przygotowanie próbek, materiały i urządzenia

Napoiny наносzono na podłoża ze stali niestopowej S355J0 w postaci płaskowników o wymiarach 10x50x150 mm. Powierzchnie podłoży zostały oczyszczone przed procesem napawania.

W charakterze materiału dodatkowego stosowano mieszaninę proszków, której osnowę stanowił komercyjny proszek niklu, zawierający dodatkowo 0,03% C, 2,4% Si, 1,4% B oraz 0,4% Fe o ziarnistości 50-150  $\mu\text{m}$ . Proszek osnowy mieszano z proszkiem węgla wolframu o tej samej ziarnistości w stosunku objętościowym 3:2.

Powłoki kompozytowe napawano dla zmiennych wartości natężenia prądu łuku głównego w zakresie 60 – 120A. Pozostałe parametry utrzymywano na stałym poziomie, ważniejsze z nich przedstawiono poniżej:

- natężenie prądu łuku wewnętrznego – 40A,
- napięcie łuku plazmowego – 25V,
- wydatek proszku – 6 g/min,
- prędkość napawania – 50 mm/min,
- wydatek gazu (argon):
- plazmotwórczego – 1,5 l/min,
- osłonowego – 8 l/min,
- transportującego – 5 l/min,
- amplituda oscylacji – 8 mm,
- prędkość ruchu oscylacyjnego – 450 mm/min,
- odległość plazmotronu od przedmiotu napawanego – 15 mm,
- średnica dyszy zwężającej – 4 mm.

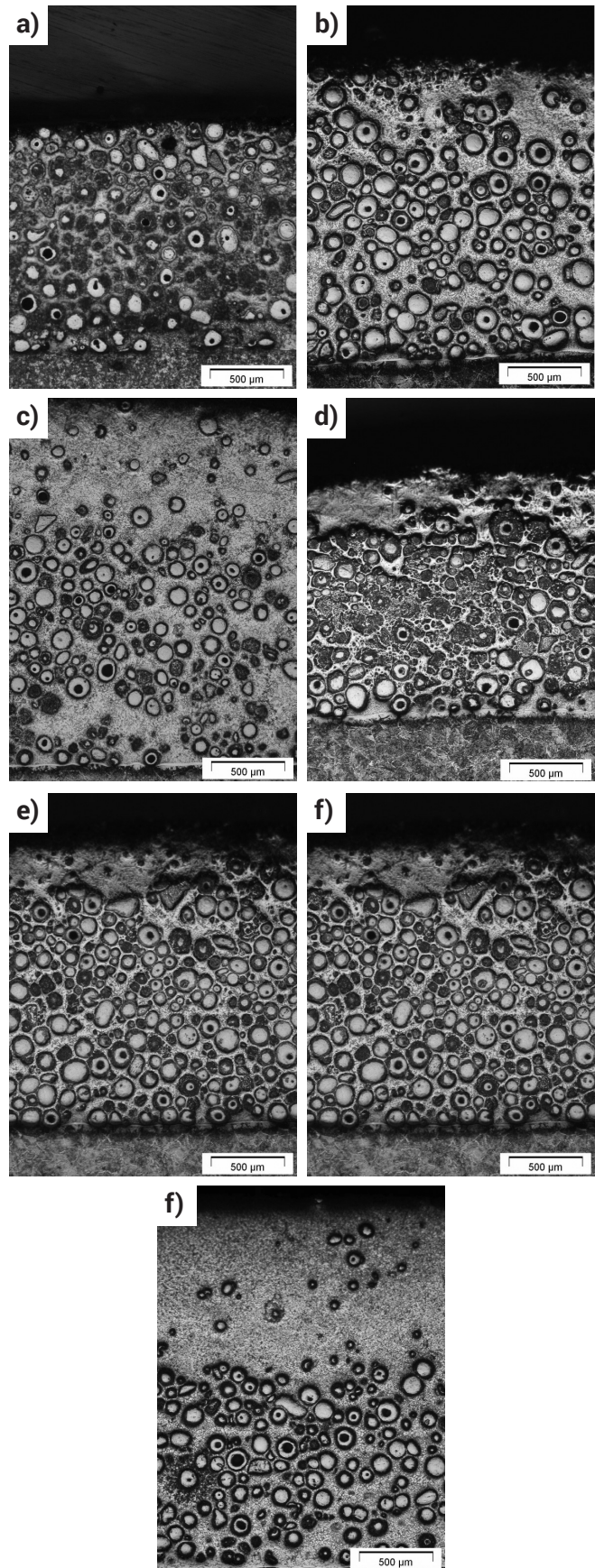
Próbki do badań mikroskopowych struktury w przekroju poprzecznym zostały przygotowane według standardowej procedury, przy czym wszystkie napoiny przecinano w tej samej odległości od początku ściegu dla zapewnienia poprawności wnioskowania. Z uwagi na dużą twardość materiału cięcie prowadzono na wycinarce elektroerozyjnej. Do obserwacji wykorzystywano optyczny mikroskop metalograficzny z cyfrowym zapisem obrazu oraz skaningowy mikroskop elektronowy.

## Wyniki badań

Inspekcja wizualna okiem nieuzbrojonym potwierdziła poprawny wygląd wszystkich napoin i brak niezgodności spawalniczych, natomiast badania instrumentalne ujawniły znaczne zróżnicowanie struktury w zależności od parametrów procesu.

Na rysunku 1 przedstawiono struktury napoin kompozytowych otrzymanych dla różnych wartości natężenia prądu łuku głównego. Rozmieszczenie cząstek węgla wolframu w osnowie jest zbliżone do równomiernego w napoinach wykonanych przy natężeniu prądu w zakresie 60-90A (rys. 1a-d), przy czym dla próbek wykonanych przy małym natężeniu prądu (60 i 70A) widoczna jest znaczna destrukcja cząstek węgla. Ze wzrostem prądu grubość napoin rośnie w skutek nadtopiania materiału podłoża. W powłokach napawanych prądem o natężeniu powyżej 90A nadtopienie to jest bardzo intensywne. W konsekwencji zwiększa się objętość ciekłego jeziora, a cząstki węgla mają tendencję do sedymentacji.

Na rysunku 2 przedstawiono morfologię cząstek węgla wolframu w osnowie kompozytu. Widoczne są duże i mniejsze cząstki węgla, na ogół o regularnym, sferycznym kształcie. We wnętrzu niektórych z nich widoczne są czarne okrągłe obszary - pęcherze gazowe.

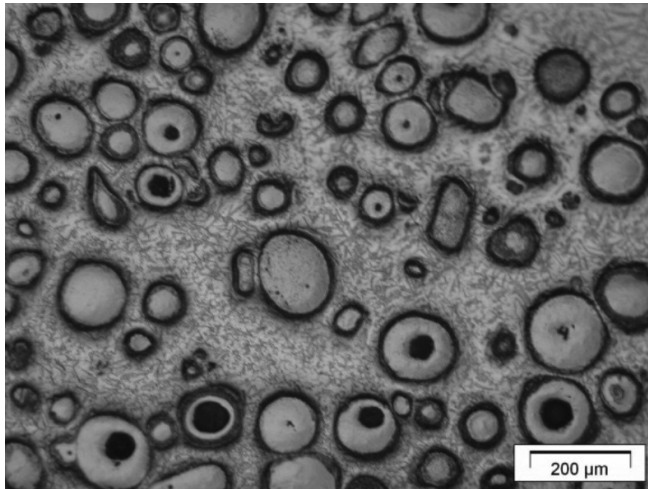


**Rys. 1.** Struktura napoin kompozytowych otrzymanych dla natężenia prądu łuku głównego: a) 60A, b) 70A, c) 80A, d) 90A, e) 100A, f) 110A, g) 120A

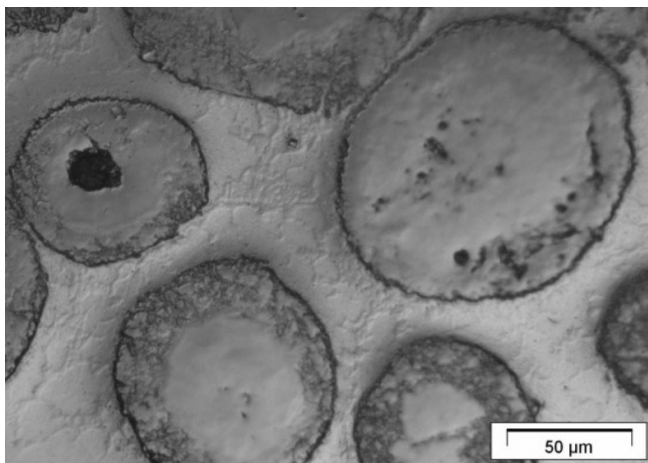
**Fig. 1.** Structures of composite overlays obtained for the main arc current of: a) 60A, b) 70A c) 80A d) 90A e) 100A, f) 110A, g) 120A

Obserwacja granicy międzyfazowej węgiel – osnowa niklowa wykazała jej ciągłość (rys. 3 i 4) i obecność dość szerokiej strefy przejściowej po stronie fazy trudnotopliwej. Odnosi się to do wszystkich próbek w badanym zakresie

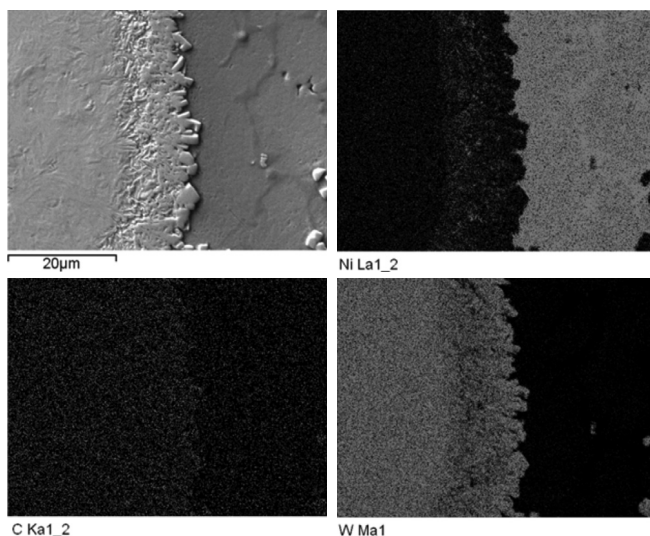
parametrów. Ujawniono też obecność nowych, drobnych cząstek rozmieszczonych w osnowie. Wyniki badań rozkładu powierzchniowego pierwiastków w strefie przejściowej dokumentują obecność zarówno wolframu jak i niklu – rysunek 4. Potwierdzają to badania rozkładu liniowego pierwiastków wzdłuż linii prostopadłej do granicy międzyfazowej (rys. 5).



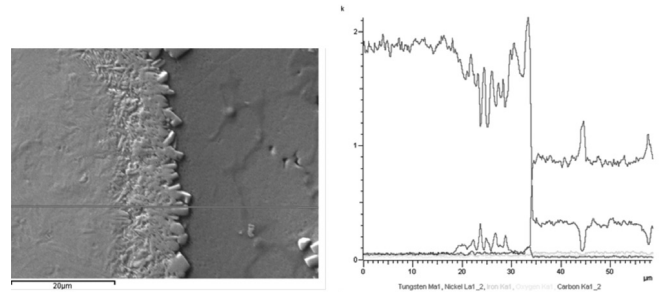
Rys. 2. Morfologia cząstek WC w napoinie kompozytowej  
Fig. 2. Morphology of WC particles in the composite coatings



Rys. 3. Struktura kompozytu przy większym powiększeniu  
Fig. 3. Composite structure by higher magnification

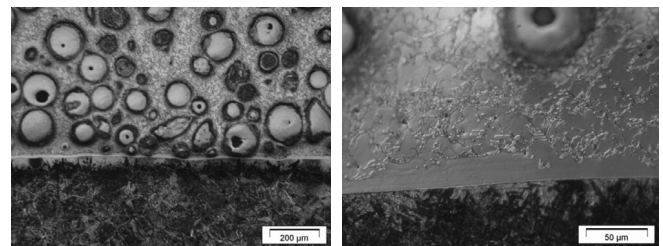


Rys. 4. Granica międzyfazowa Ni-WC i rozkłady powierzchniowe pierwiastków  
Fig. 4. Ni-WC interface and surface distribution of main elements



Rys. 5. Stężenie pierwiastków wzdłuż linii prostopadłej do granicy międzyfazowej osnowa – faza umacniająca  
Fig. 5. Concentration of elements along a line perpendicular to the matrix – reinforcing phase interface

Granica pomiędzy napoiną kompozytową Ni-WC podłożem (stal niestopowa) jest ciągła i wolna od niezgodności spawalniczych. Widoczna jest na niej strefa przejściowa o jasnym kolorze – rysunek 6. Obserwacje tego obszaru przy dużym powiększeniu wykazują odmienną strukturę tej strefy w stosunku do wnętrza osnowy niklowej.



Rys. 6. Granica międzyfazowa podłoże - napoina kompozytowa: a) w świetle białym, b) przy zastosowaniu kontrastu Nomarskiego  
Fig. 6. The composite coatings – substrate material interface: a) in the white light, b) using Nomarski contrast

## Dyskusja wyników badań

Otrzymane wyniki badania struktury wykazują, iż w powłokach kompozytowych napawanych metodą PPTAW z dużym udziałem węgla w proszku wyjściowym, w dolnym zakresie natężenia prądu napawania (60-70A) dochodzi do znacznego, większego niż dla wyższych prądów, nadtopienia cząstek fazy umacniającej (rys. 1). Ten na pozór zaskakujący rezultat można wyjaśnić efektem braku osłony cząstek węgla przed bezpośrednim oddziaływaniem strumienia plazmy o wysokiej energii cieplnej przez stosunkowo niewielką ilość fazy ciekłej w jeziorce. Potwierdza to także usytuowanie zdegradowanych cząstek WC raczej w górnym rejonie napoin (rys. 1a, b). Pomimo równomiernego rozmieszczenia fazy umacniającej w osnowie taka struktura nie jest korzystna z punktu widzenia pracy zarówno w warunkach obciążenia ściernego jak i uderowego [10].

Wzrost natężenia prądu napawania powyżej wartości 70A prowadzi do zwiększenia nadtopienia materiału podłoża, a zatem utworzenia większej ilości fazy ciekłej, która zwilża i pokrywa grubszą warstwą ziarna węglików, co skutkuje wyraźnie mniejszą ich degradacją (nadtopieniem). W zakresie 80-90A są one przy tym równomiernie rozmieszczone na całym przekroju poprzecznym napoiny. Powstają wówczas napoiny kompozytowe Ni-WC o najkorzystniejszej strukturze, o równomiernym rozmieszczeniu fazy węglikowej i nieznacznym jej nadtopieniu. Wydaje się, iż będą one dysponować najlepszymi cechami użytkowymi spośród badanych, gdyż dalszy wzrost natężenia prądu napawania (powyżej 90A) prowadzi do nadmiernego rozcieńczenia napoiny materiałem podłoża. W efekcie stosunek objętości fazy ciekłej do ilości cząstek fazy umacniającej

staje się zbyt duży, co obok obniżenia właściwości samej osnowy kompozytu skutkuje sedymentacją węglików. Jednocześnie jeziorko o większej objętości dłużej krystalizuje i wydłuża się czas niekorzystnego procesu rozpuszczania się węglików w cieczy.

Badania mikroskopowe wykazały, iż mikrostruktura napoin Ni-WC jest złożona. Osnowa kompozytu po krystalizacji nie jest jednofazowa, widoczne są w niej obszary istnienia nowej fazy. Wyniki badania rozkładu powierzchniowego pierwiastków (rys. 4) wskazują, iż w obszarach tych występuje wolfram. Jest to efektem procesu intensywnego rozpuszczania się węgla w ciekłej osnowie z następującą krystalizacją fazy bogatej w wolfram z przesyconego roztworu. Z kolei cząstki węgla wolframu, mimo wspomnianego wyżej nadtapiania strumieniem plazmy i rozpuszczania się w ciekłej osnowie zachowują swój sferyczny, regularny kształt. We wnętrzu niektórych z nich widoczne są pęcherze gazowe (ciemny obszar na rys. 2), obecne już w proszku wyjściowym, powstałe na etapie jego produkcji i sferoidyzacji.

Granica międzyfazowa węglík-osnowa jest ciągła, z wyraźną strefą przejściową o znaczącej grubości (rys. 3). Świadczy to zarazem o dobrej zwilżalności WC ciekłym stopem Ni jak i o dużej intensywności oddziaływania międzyfazowego. Analiza rozkładu powierzchniowego i liniowego pierwiastków (rys. 4 i 5) dokumentuje, iż strefa ta jest bogata w wolfram oraz nikiel, przy czym zasięg penetracji Ni jest znaczny.

Podobnie jak granice pomiędzy cząstkami węgla i osnową kompozytu, również makroskopowa granica międzyfazowa pomiędzy osnową napoiny i podłożem stalowym jest ciągła. Na granicy tej jest usytuowana wąska strefa o jasnej barwie rozciągnięta na całej długości linii wtopienia (rys. 6). Charakteryzuje się ona odmienną morfologią niż osnowa napoiny, można zatem wnioskować, iż jest to obszar o innych właściwościach. Analiza tego obszaru i jego wpływ na właściwości eksploatacyjne napoin będą przedmiotem dodatkowych badań.

## Wnioski

Napoiny kompozytowe Ni-WC o równomiernym rozmieszczeniu i małym nadtopieniu cząstek fazy umacniającej, oferujące przypuszczalnie najlepsze właściwości użytkowe, tworzą się przy ściśle określonych parametrach procesu.

Kluczowe znaczenie ma wielkość prądu napawania, zapewniająca podczas procesu odpowiedni stosunek ilości fazy stałej do ciekłej oraz intensywność oddziaływania międzyfazowego. Przy zbyt niskim prądzie ma miejsce nadtapianie i degradacja cząstek węgla nieosłoniętych fazą ciekłą, natomiast przy zbyt wysokim dochodzi do nadmiernego rozcieńczenia napoiny materiałem podłoża oraz do sedymentacji cząstek fazy umacniającej.

Granice międzyfazowe w kompozycie są ciągłe, co jest dowodem dobrej zwilżalności WC stopem Ni i zapewnia duży uzysk cząstek fazy umacniającej. Szeroka strefa przejściowa na granicy pomiędzy węglikiem wolframu i stopem niklu oraz obecność nowej fazy krystalizującej w osnowie świadczą o rozpuszczalności węgla wolframu w cieczy w trakcie formowania się napoin.

Na linii wtopienia napoiny w podłożu ze stali niestopowej powstaje strefa przejściowa o odmiennym strukturze niż osnowa kompozytu.

*Badania były finansowane z grantu NCBiR/KGHM nr CuBR/1/3NCBR/2014.*

## Literatura

- [1] Jitai N., Wei G., Mianhuan G., Shixiong L.: „Plasma application in thermal processing of materials”, *Vacuum* 65, 2002, 263 – 266.
- [2] Weroński A., Gardyński J.: „Nakładanie powłok metodą plazmową na części samochodowe”, *Przegląd Spawalnictwa* nr 1 – 2, 1996, 14 – 16.
- [3] Weroński A., Pałka K.: „Zwiększenie trwałości nurników homogenizatorów przez napawanie plazmowe”, *Przegląd Spawalnictwa* nr 1 – 2, 1996, 20 – 22.
- [4] Klimpel A., Górka J., Czupryński A.: „Napawanie proszkowe PTA warstw wierzchnich suwaka zasuw urządzeń naftowych”, *Przegląd Spawalnictwa* nr 5 – 6, 2006, 15 – 19.
- [5] Górak J., Czupryński A., Kik T., Melcer M.: „Przemysłowe aplikacje napawania plazmowego proszkowego”, *Przegląd Spawalnictwa* nr 9, 2011, 87-94.
- [6] Deuis R.L., Yellup J.M., Subramanian C.: „Metal-matrix composite coatings by PTA surfacing”. *Composite Science & Technology*, 58, 1998, 299-309.
- [7] Liu Y. F., Xia Z. Y., Han J. M., Zhang G. L., Yang S. Z.: „Microstructure and wear behavior of (Cr,Fe)7C3 reinforced composite coating produced by plasma transferred arc weld-surfacing process”, *Surface & Coatings Technology*, 2006, No 201, 863 – 867.
- [8] Liyanage T., Fisher G., Gerlich A.P.: „Microstructures and abrasive wear performance of PTAW deposited Ni-WC overlays using different Ni-alloy chemistries”, *Wear*, 2012, No 274-245, 345-354.
- [9] Toth L. E.: „Transition Metal Carbides and Nitrides”, Academic Press, New York and London, 1971.
- [10] Katsich C., Badisch E.: „Effect of carbide degradation in a Ni-based hardfacing under abrasive and combined impact/abrasive conditions”, *Surface & Coatings Technology* 206 (2011) 1062–1068.
- [11] Kulu P., Surzhenkov A., Tarbe R., Saarna M., Tarraste M., Viljus M.: „Hardfacings for Extreme Wear Applications”, *Surface Modification Technologies XXVIII*, Edited by T. S. Sudarshan, Petri Vuoristo and Heli Koivuluoto.
- [12] Liyanage T., Fisher G., Gerlich A. P.: „Microstructures and abrasive wear performance of PTAW deposited Ni-WC overlays using different Ni-alloy chemistries”, *Wear* 274– 275 (2012) 345– 354.
- [13] Senkara J., Windyga A.: *Podstawy teorii procesów spajania*. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1990.
- [14] Wendler B.G.: „Wykorzystanie reakcyjnej odrzenujowej dyfuzji węgla w procesach uszlachetniania powierzchni”. *Zesz. Nauk. PŁ* Nr 873, Łódź, 2001.
- [15] Oyama S. T.: „The chemistry of transition metal carbides and nitrides”, Balckie Academic & Professional, Chapman & Hall, London, 1996.
- [16] Bober M., Senkara J.: „Mikrostruktura kompozytowych powłok Ni-ZrC napawanych plazmowo”, *Przegląd Spawalnictwa*, vol. 87, nr 10, 2015, 60-63.
- [17] Bober M., Senkara J.: „Badania porównawcze napawanych plazmowo warstw niklowych z węglnikami Ti i Cr”, *Przegląd Spawalnictwa*, nr 9, 2011, 32 – 37.