

Tomasz Dyl^{1*}, Robert Starosta¹, Robert Skoblik²

¹Akademia Morska, Wydział Mechaniczny, Katedra Materiałów Okrętowych i Technologii Remontów, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, Poland

²Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Technologii Materiałów Maszynowych i Spawalnictwa, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk, Poland

* Corresponding author. E-mail: dylu@am.gdynia.pl

Otrzymano (Received) 23.02.2009

WPŁYW OBRÓBKİ PLASTYCZNEJ POWŁOK MMC NA UMOCNIE NIE I ZMNIEJSZENIE CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI

Określono wpływ obróbki plastycznej na wybrane właściwości powłok kompozytowych o osnowie niklowej przy różnym udziale procentowym fazy dyspersyjnej Al_2O_3 . Powłoki Ni-Al- Al_2O_3 zostały nałożone na próbki ze stali niestopowej C45 z użyciem technologii poddźwiękowego płomieniowego natryskiwania cieplnego. Następnie poddane zostały obróbce plastycznej na zimno poprzez walcowanie i prasowanie na prasie hydraulicznej. W pracy przedstawiono analizę wyników badań nad możliwością zastosowania technologii obróbki plastycznej (walcowania i prasowania) do kształtowania wybranych właściwości natryskiwanych płomieniowo powłok stopowych Ni-Al i powłok kompozytowych Ni-Al- Al_2O_3 . Powłoki stopowe są o strukturze jednofazowej, a mianowicie granicznego roztworu stałego α , o maksymalnej 10% rozpuszczalności glinu w sieci krystalograficznej niklu, natomiast w powłokach kompozytowych udział objętościowy Al_2O_3 wyniósł 15 i 30%. Obróbka plastyczna jest metodą alternatywną dla obróbki skrawaniem jako obróbka wykańczająca powłok nanoszonych przez natryskiwanie cieplne.

Słowa kluczowe: powłoki kompozytowe MMC, obróbka plastyczna powłok, faza dyspersyjna

THE INFLUENCE OF PLASTIC WORKING MMC COATINGS ON THE SURFACE ROUGHNESS REDUCTION AND STRAIN HARDENING

The paper presents the effect of plastic working on the selected properties of composite coatings on the nickel base of different contents dispersed phase of Al_2O_3 . Coatings of Ni-Al- Al_2O_3 were deposited on the steel specimens using the subsonic process of flame spraying. The specimens were then subjected to both cold plastic working by rolling and also pressing by the hydraulic press. Plastic working is an alternative to machining, as the method of finishing of coats made by flame spraying. The paper presents the findings of the research into the possibility of using plastic working (rolling and pressing) to obtain the selected properties of the flame sprayed Ni-Al alloy coatings and Ni-Al- Al_2O_3 composite coatings. The alloy coatings had a single-phase structure, namely boundary solution α , of the maximum 10% aluminium solubility in the crystal lattice of nickel, whereas in the composite coatings the volume content of non-metallic material Al_2O_3 was 15 and 30%. Flame spraying is widely used to apply coatings in the manufacture or reconditioning of a variety of machine parts (drive shaft journals in marine shafting, crank shaft main journals, pump rotors and casings, valve inserts and internal combustion engine cylinders, ship propellers and turbine rotor journals). Ceramic-and-metallic coatings are applied mainly to increase durability of machine parts. The paper aims for the preliminary analysis of the possibility for replacement of the traditional finishing methods, through machining, of the investigated coatings by surface plastic working. Steel specimens (C45) with the applied coating were subjected to cold rolling to obtain the following values of actual draft: $\phi_r = 0.06; 0.12$ and cold pressing $\phi_p = 0.12$. Flame-sprayed coatings were characterised by a considerable value of parameter R_a . The surface roughness obtained by flame spraying is not satisfactory in respect of the service qualities as large values of the order of $R_a = 13.3 \mu m$ are obtained. Therefore the coatings should be subjected to finishing in order to achieve the required surface quality. After plastic working, neither spalling nor exfoliation was observed on the actual surface or on the cross-section of the coatings. Qualitative assessment of the coatings' adhesion using the so called 'rapid temperature changes' method did not show any adverse effect of the coating plastic strain on the tested property. Plastic working also contributed to the improvement in the stereometric structure (i.e. roughness) of the coatings. Another effect of plastic working was considerable reduction in the roughness average value. Profile measurements showed that the minimum values of R_a were obtained for rolled surfaces with the maximum values of relative strain, whereas the maximum values for pressed specimens.

Keywords: composite MMC coatings, plastic working of coatings, dispersion phase

WPROWADZENIE

Natryskiwanie płomieniowe ma szerokie zastosowanie do nakładania powłok przy wytwarzaniu i regeneracji elementów części maszyn (czopy wałów napę-

dowych w linii wałów okrętowych, czopy wałów korbowych, wirniki i korpusy pomp, gniazda zaworowe i cylindry silników spalinowych, śruby napędowe okrę-

towe i czopy pod łożyska wirnika turbiny) [1, 2]. W pracy [3] przeprowadzono wstępną analizę teoretyczną procesu walcowania płaskich wyrobów z powłoką naniesioną metodą natryskiwania płomieniowego. Dokonana została analiza wyników badań numerycznych uzyskanych w programie Forge 2D. Istotą badań było określenie zachowania się powłoki w kotlinie walcowniczej. Po przeprowadzonej analizie stanu odkształcenia i naprężenia materiału z nałożoną powłoką stopową Ni-Al określono, że istnieje możliwość zastosowania obróbki plastycznej jako obróbki wykańczającej powłok natrykiwanych cieplnie. Przeprowadzono zatem próby doświadczalne procesu walcowania i prasowania próbek stalowych z nałożoną powłoką stopową niklu z aluminium, a także powłok kompozytowych z ceramiczną fazą dyspersyjną. Próbki stalowe (C45) z nałożoną powłoką poddano procesowi walcowania na zimno, uzyskując wartości gniotów rzeczywistych ($\varphi_h = 0,06; 0,12$), oraz prasowania na zimno ($\varphi_h = 0,12$). Natrykiwane płomieniowo powłoki cechowały się znaczną wartością parametru R_a . Chropowatość powierzchni powłok otrzymanych za pomocą natryskiwania cieplnego nie jest zadowalająca pod względem eksploatacyjnym, gdyż uzyskuje duże wartości, rzędu $R_a = 13,3 \mu\text{m}$ [4]. Zatem należy powłoki poddać obróbce wykańczającej w celu uzyskania wymaganej jakości powierzchni. Po obróbce plastycznej nie zaobserwowano złuszczeń i odwarstwień materiału na powierzchni rzeczywistej i przekroju poprzecznym powłok. Jakościowa ocena przyczepności powłok metodą tzw. szybkich zmian temperatury nie wykazała negatywnego wpływu odkształcenia plastycznego powłoki na badaną właściwość. Obróbka plastyczna przyczyniła się również do poprawy struktury stereometrycznej (chropowatości) powłok. Obróbka plastyczna spowodowała znaczny spadek wartości średniego arytmetycznego profilu nierówności. Pomiar profilometryczny wykazały, że najmniejsze wartości współczynnika R_a uzyskano dla powłok walcowanych z największymi wartościami odkształcenia względnego, a najmniejsze dla próbek prasowanych.

METODYKA BADAŃ

Powłoki stopowe Ni-Al i kompozytowe Ni-Al- Al_2O_3 nałożono na podłożu stalowym C45 poprzez natryskiwanie płomieniowe poddźwiękowe „na zimno” (wstępnie podgrzewano palnikiem stalowe podłoże do temperatury ok. 100°C) w Katedrze Materiałów Okrętowych i Technologii Remontów Akademii Morskiej w Gdyni. Materiałem powłokowym był proszek ProXon 21021 (Ni - 94%, Al - 5%, B-1%) oraz jego mieszanina z proszkiem MetaCeram 28020 o wielkości cząstek $60 \mu\text{m}$ (Al_2O_3 - 97,7%, TiO_2 - 2,2%, SiO_2 - 0,1%) [4-6], proszki te zostały wyprodukowane przez firmę Castolin. Udział tlenku glinu Al_2O_3 w uzyskanych powłokach wyniósł: 15 i 30% obj.

Podczas realizacji procesu technologicznego natryskiwania płomieniowego powłok stopowych zastosowano następujące parametry [4-6]: ciśnienie gazu palnego - acetyleno: 0,07 MPa, ciśnienie tlenu: 0,4 MPa, odległość palnika od natrykiwanej powierzchni: 150 mm, liczba nakładanych warstw: 6, uzyskane grubości powłok wynosiły $h_p = 0,68 \text{ mm}$ (tab. 1).

TABELA 1. Wyniki analizy statystycznej pomiaru grubości powłoki h_p (wartości w μm)

TABLE 1. Results of statistical analysis of coating thickness measurement h_p (values in μm)

Liczba pomiarów	Średnia	Mediana	Min.	Maks.	Odch. std.	Błąd std.
25	680	680	620	735	26,93	5,39

Walcowanie i prasowanie powłok stopowych i kompozytowych wykonano w Laboratorium Obróbki Plastycznej Katedry Technologii Materiałów Maszynowych i Spawalnictwa Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej. Spęczanie próbek z naniesioną powłoką wykonano na zimno na prasie hydraulicznej typu ZD20 (max 20 ton) dla gniotu rzeczywistego $\varphi_h = 0,12$. Walcowanie prowadzono na zimno w temperaturze otoczenia w walcu laboratoryjnym duo o średnicy walców $\phi 200 \text{ mm}$ i długości beczki 250 mm, dla gniotu rzeczywistego $\varphi_h = 0,06; 0,12$.

Pomiaru mikrotwardości dokonano za pomocą twardościomierza typu Vickersa z pomocą przyrządu typu H montowanego w uchwycie mikroskopu metalograficznego Vertival. Zastosowano obciążenie 0,4 N działające w czasie 10 sekund, w temperaturze otoczenia. Przekątne odcisków mierzono z dokładnością $0,2 \mu\text{m}$. Po przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych walcowania i prasowania próbek płaskich z naniesioną powłoką określono, że objętościowe stężenie tworzywa niemetalowego Al_2O_3 wpływa w znacznym stopniu na zmianę wartości parametru R_a , który charakteryzuje chropowatość powierzchni, a także na zmianę twardości powłoki kompozytowej.

W celu oceny wpływu parametrów procesu technologicznego na twardość obrabianej stali wyznaczono stopień względnego umocnienia warstwy powierzchniowej (S_{II}) [6].

Oceny wpływu odkształcenia na strukturę powłok dokonano za pomocą mikroskopu optycznego Axiovert 25 przy powiększeniu 200 razy.

Ocenę przyczepności powłok stopowych i kompozytowych do podłoża przeprowadzono zgodnie z normą PN-79/H-04607 dwiema metodami jakościowymi:

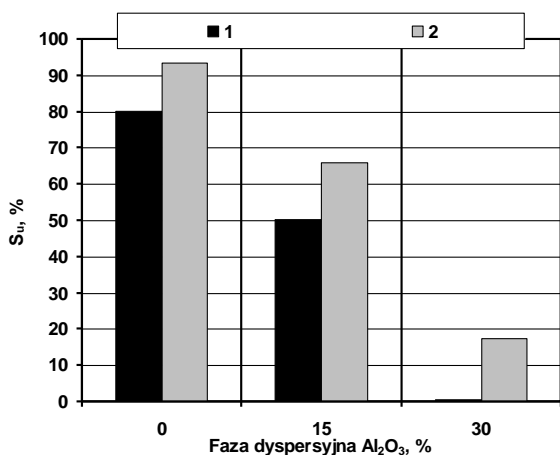
- metodą rys - wykonano trzy równoległe rysy rysikiem traserskim w odległości 2 mm od siebie, w poprzek próbki,
- metodą zmian temperatur - próbki nagrzano w piecu do temperatury 573 K i wygrzewano je przez 15 minut, a następnie chłodzono w wodzie o temperaturze otoczenia.

Oceny dokonano, oglądając powłokę pod mikroskopem stereoskopowym MBC-9 przy pięciokrotnym powiększeniu. Przyczepność powłoki uznawano za dobrą, jeżeli nie zaobserwowano złuszczeń, pęcherzy lub odwarstwień.

Strukturę stereometrycznej powierzchni po obróbce plastycznej mierzono w KMOiTR AM w Gdyni profilometrem HOMMEL TESTER T1000. Długość odcinka pomiarowego wynosiła 4,8 mm, a odcinka elementarnego 0,8 mm. Na podstawie pomiaru średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości (parametr R_a) wyznaczono wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni K_{Ra} , jest to iloraz chropowatości powierzchni materiału przed obróbką plastyczną przez chropowatość powierzchni materiału po obróbce plastycznej [6].

WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych określono, na podstawie pomiarów mikrotwardości i profilu chropowatości po natrykiwaniu cieplnym i po obróbce plastycznej, że zawartość fazy dyspersyjnej w powłoce kompozytowej ma istotny wpływ na umocnienie i strukturę stereometryczną powierzchni powłoki.



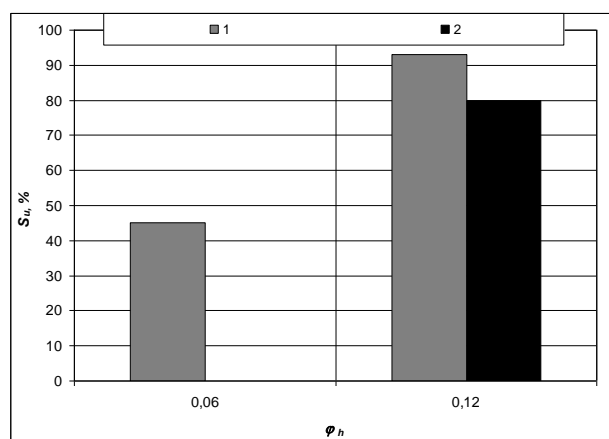
Rys. 1. Wpływ zawartości fazy dyspersyjnej Al₂O₃ w uzyskanych powłokach kompozytowych na stopień względnego umocnienia po obróbce plastycznej na zimno: 1 - po prasowaniu, 2 - po walcowaniu

Fig. 1. Effect of Al₂O₃ dispersion phase content in obtained composite coatings on relative strengthening ratio after cold plastic working: 1 - after pressing, 2 - after rolling

Na rysunku 1 przedstawiono zależność stopnia względnego umocnienia powłoki kompozytowej na osnowie niklu od objętościowego stężenia tworzywa niemetalowego Al₂O₃. Można zauważyć, że wraz ze wzrostem zawartości procentowej tlenku glinu zmniejsza się wartość współczynnika umocnienia powłoki po obróbce plastycznej. Istotne jest również, że po walcowaniu, a także po prasowaniu próbki z powłoką stopową Ni-Al uzyskują znacznie większe mikrotwardości

w porównaniu do próbek z powłokami kompozytowymi. Zatem przy zastosowaniu mniejszego stężenia fazy dyspersyjnej uzyska się większe umocnienie osnowy powłoki. Wprowadzenie fazy dyspersyjnej Al₂O₃ już wpływa na zwiększenie twardości osnowy powłok. Dlatego celowe jest stosowanie obróbki plastycznej jako obróbki wykańczającej umacniającej przede wszystkim dla powłok stopowych Ni-Al. Po prasowaniu występuje wzrost twardości dla powłok Ni-Al nawet do 80%, a dla powłok kompozytowych o zawartości 15% Al₂O₃ twardość osnowy powłoki wzrasta o 50%. Przy zastosowaniu procesu walcowania można uzyskać jeszcze większe wartości stopnia względnego umocnienia osnowy powłok stopowych i kompozytowych ($S_u = 93\%$ dla powłok Ni-Al i $S_u = 66\%$ dla powłok Ni-Al-15% Al₂O₃).

Z otrzymanych wyników pomiaru twardości zaobserwowano, że wszystkie zaproponowane metody plastycznej obróbki wykańczającej spowodowały umocnienie badanych powłok (rys. 2). Największy stopień względnego umocnienia powłoki był dla próbek poddanych walcowaniu.



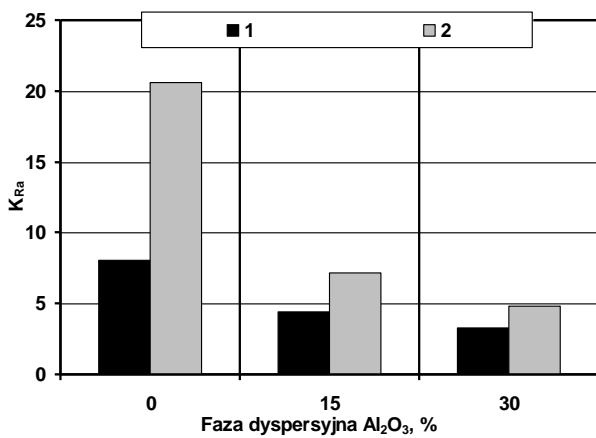
Rys. 2. Wpływ gniotu rzeczywistego (ϕ_h) na stopień względnego umocnienia (S_u) powłoki stopowej Ni-Al: 1 - po walcowaniu, 2 - po prasowaniu

Fig. 2. Effect of actual draft (ϕ_h) on strengthening ratio (S_u) of Ni-Al alloy coating: 1 - after rolling, 2 - after pressing

Stosując obróbkę plastyczną powłok natrykiwanych płomieniowo, uzyskuje się znaczną poprawę jakości powierzchni. Średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości powłoki po obróbce plastycznej jest od 3,3 do 20,6 razy mniejsze w porównaniu do średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości powłoki nieobrabianej plastycznie. Po walcowaniu parametr R_a uzyskuje dużo mniejsze wartości w porównaniu do odchylenia profilu chropowatości po prasowaniu.

Z danych zawartych na rysunku 3 można stwierdzić, że przy większych zawartościach fazy dyspersyjnej w powłokach kompozytowych uzyskuje się większą chropowatość. Można zauważyć również, że wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni uzyskuje największe wartości dla powłok stopowych Ni-Al.

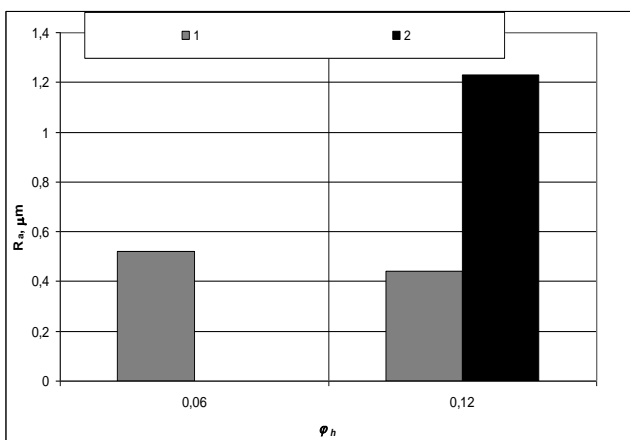
Wskaźnik zmniejszenia chropowatości najmniejsze wartości przyjmuje dla powłok kompozytowych o zawartości 30% Al_2O_3 (rys. 3).



Rys. 3. Wpływ zawartości fazy dyspersyjnej Al_2O_3 w uzyskanych powłokach kompozytowych na wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni po obróbce plastycznej na zimno: 1 - po prasowaniu, 2 - po walcowaniu

Fig. 3. Effect of Al_2O_3 dispersion phase content in obtained composite coatings on surface roughness reduction ratio after cold plastic working: 1 - after pressing, 2 - after rolling

Natryskiwane płomieniowo powłoki stopowe charakteryzowały się silnie rozwiniętą powierzchnią rzeczywistą. Wartość średniego arytmetycznego odchylenia profilu nierówności była równa 13,3 μm . Zastosowane metody obróbki plastycznej powłok pozwoliły na znaczne zmniejszenie wartości rozpatrywanego parametru chropowatości (rys. 4). Najmniejszą wartość chropowatości uzyskano w przypadku powłok walcowanych przy gnioście rzeczywistym $\varphi_n = 0,12$ ($R_a = 0,44 \mu\text{m}$). Natomiast proces prasowania pozwolił na uzyskanie chropowatości powierzchni rzędu $R_a = 1,23 \mu\text{m}$.



Rys. 4. Wpływ gniości rzeczywistego (φ_n) na chropowatość powierzchni (R_a) powłoki stopowej Ni-5%Al: 1 - po walcowaniu, 2 - po prasowaniu

Fig. 4. Effect of actual draft (φ_n) on surface roughness (R_a) and Ni-5%Al alloy coating: 1 - after rolling, 2 - after pressing

Obciążenia użyte podczas obróbki plastycznej próbek stalowych z nałożoną powłoką stopową i kompozytową spowodowały jedynie trwałe odkształcenia materiału powłoki. Zastosowane jakościowe metody badań przyczepności powłok nie wykazały negatywnego wpływu wykańczającej obróbki plastycznej na ich adhezję do stalowego podłoża.

Po walcowaniu, a także po prasowaniu nastąpiła poprawa jakości powierzchni powłok. Dlatego można stosować obróbkę plastyczną jako obróbkę wykańczającą gładkościową powłok stopowych i kompozytowych.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Powłoki stopowe i kompozytowe otrzymane poprzez natryskiwanie płomieniowe poddźwiękowe poddawane są obróbce wykańczającej w celu uzyskania wymaganych właściwości eksploatacyjnych wytwarzanych czy regenerowanych części maszyn. Powszechnie stosowaną metodą kształtowania powierzchni powłok jest obróbka skrawaniem, która powoduje straty materiałowe. Dlatego ze względów ekonomicznych, a także technologicznych zaproponowano wykorzystanie obróbki plastycznej jako obróbki wykańczającej powłok na osnowie niklu. Określono, że istnieje możliwość zastosowania walcowania, a nawet prasowania jako technologii wpływających na poprawę parametrów stereometrycznych powierzchni powłok stopowych i kompozytowych.

W artykule określono, na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych, że obróbka plastyczna dla różnej zawartości fazy dyspersyjnej w powłoce kompozytywnej ma istotny wpływ na umocnienie i strukturę stereometryczną powierzchni powłoki poddanych obróbce plastycznej. Nasunęły się również następujące wnioski:

- po walcowaniu próbki z powłokami stopowymi Ni-Al uzyskują znacznie większe mikrotwardości w porównaniu do próbek z powłokami kompozytowymi;
- po prasowaniu dla próbek z powłokami Ni-Al występują większe wartości mikrotwardości w porównaniu do próbek z powłokami Ni-Al- Al_2O_3 ;
- wraz ze wzrostem zawartości procentowej fazy dyspersyjnej Al_2O_3 zmniejsza się wartość współczynnika umocnienia powłoki po obróbce plastycznej;
- stosowanie obróbki plastycznej jako obróbki wykańczającej umacniającej jest celowe przede wszystkim dla powłok stopowych Ni-Al, gdzie następuje znaczne umocnienie, a stopień względnego umocnienia powłoki po prasowaniu wynosi $S_u = 80\%$ i po walcowaniu $S_u = 93\%$;
- stosowanie obróbki plastycznej jako obróbki wykańczającej umacniającej jest celowe również dla powłok kompozytowych o zawartości 15% Al_2O_3 , gdzie twardość osnowy powłoki po prasowaniu wzrasta o 50% i po walcowaniu 66%;

- średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości powłoki po obróbce plastycznej jest od około 3 do około 20 razy mniejsze w porównaniu do średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości powłoki bezpośrednio po natryskiwaniu płomieniowym poddźwiękowym;
- przy większych zawartościach fazy dyspersyjnej w powłokach kompozytowych uzyskuje się większą chropowatość;
- wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni uzyskuje największe wartości dla powłok stopowych, natomiast najmniejsze wartości przyjmuje dla powłok kompozytowych o zawartości 30% Al_2O_3 ;
- średnie arytmetyczne odchylenia profilu nierówności dla powłok natrykiwanych cieplnie po walcowaniu uzyskały dużo mniejszą chropowatość ($R_a = 0,44 \mu\text{m}$ dla $\varphi_h = 0,12$, $R_a = 0,52 \mu\text{m}$ dla $\varphi_h = 0,06$) w porównaniu do profilu chropowatości powierzchni sprzed przeróbki plastycznej,
- po walcowaniu parametr R_a uzyskuje dużo mniejsze wartości w porównaniu do odchylenia profilu chropowatości po prasowaniu, ale uzyskana chropowatość po prasowaniu ($R_a = 1,23 \mu\text{m}$) jest dużo mniejsza niż chropowatość powłok po natryskiwaniu cieplnym,
- po walcowaniu, a także po prasowaniu nastąpiła poprawa jakości powierzchni powłok,
- istnieje możliwość zastosowania obróbki plastycznej jako obróbki wykańczającej gładkościowej powłok stopowych i kompozytowych na osnowie niklu.

LITERATURA

- [1] Adamiec P., Dziubiński J., Regeneracja i wytwarzanie warstw wierzchnich elementów maszyn transportowych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
- [2] Klimpel A., Technologie napawania i natryskiwania cieplnego, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
- [3] Dyl T., Starosta R., The influence of rolling on the distribution of stress and strain in nickel - aluminum alloy coatings, Inżynieria Materiałowa 2007, 3-4, 524-526.
- [4] Starosta R., Badania potencjodynamiczne natrykiwanych płomieniowo kompozytowych powłok dyspersyjnych z osnową niklową, Kompozyty (Composites) 2008, 2, 195-200.
- [5] Specyfikacja technologiczna nakładania i obróbki powłok z proszku ProXon, 21021 Materiały firmy „Castolin+Eutectic” 2003.
- [6] Dyl T., Starosta R., Skoblik R., Obróbka wykańczająca powłok MMC w aspekcie umocnienia i zmniejszenia chropowatości powierzchni, Kompozyty (Composites) 2008, 2, 147-151.