

THE INFLUENCE OF PLASTIC WORKING ON THE SELECTION PROPERTIES OF THE NICKEL – ALUMINIUM ALLOY COATINGS

Robert Starosta¹, Robert Skoblik², Tomasz Dyl¹

¹Gdynia Maritime University, Faculty of Marine Engineering,
Morska 83, 81-225 Gdynia

²Gdansk University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering,
Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk

Abstract

In the paper chance for practical application of plastic working to finishing coating was analyzed. Alloy coatings Ni-5%Al were obtain by flame spraying. These coatings have monophasic structures of α solid solution. Steel (C45) samples with alloy coatings were cold and hot (950 °C) rolling and pressing. During of plastic working was used effective force to obtain of relative drafts $\varepsilon = 6\%$, 9% , 12% value. After finishing the adhesion reduction, cracks on the surface and cross- sections of coatings deposited on steel base wasn't observed. The largest value of strain hardening (U_{HV}) of alloy coating Ni-5%Al was stated after pressing. The metallic coatings obtain by thermal flame spraying be characterized by big surface roughness. Studying coating was received average value of parameter of $R_a = 13 \mu\text{m}$. The plastic working caused decrease surface roughness. Minimum value of R_a parameter was observed after hot rolling. It was found that maximal roughness was presented after pressing. The corrosion tests were performed in $0.01 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ solution by potentiokinetic technique. The corrosion rate was dependent on method of plastic working. The increasing relative drafts resulted in rise corrosion current density and decrease in value of corrosion potential. Exception to the rule was found for hot rolling.

Keywords: technology, engine parts, alloy coating, plastic tooling

WPLYW OBRÓBKI PLASTYCZNEJ NA WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI POWŁOK STOPOWYCH NIKIEL – ALUMINIUM

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań nad możliwością zastosowania technologii obróbki plastycznej (walcowania na zimno i gorąco, oraz prasowania) do kształtowania wybranych właściwości natrykiwanych płomieniowo powłok stopowych Ni-5%Al o strukturze jednofazowej, a mianowicie granicznego roztworu stałego α , o maksymalnej 10% rozpuszczalności glinu w sieci krystalograficznej niklu. Celem pracy jest wstępna analiza możliwości zastąpienia tradycyjnie stosowanych metod wiórowej obróbki wykańczającej badanych powłok metodami powierzchniowej obróbki plastycznej. Próbkę stalowe (C45) z nałożoną powłoką poddano procesowi walcowania na zimno uzyskując wartości gniotów względnych ($\varepsilon = 6, 9, 12\%$), walcowaniu na gorąco w temperaturze 950 °C ($\varepsilon = 6$ i 12%) oraz prasowaniu na zimno ($\varepsilon = 12\%$). 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. Pomiar twardości wykazały, że największe umocnienie powłok nastąpiło po operacji prasowania na zimno (56%), najmniejsze po walcowaniu próbek na gorąco. Obróbka plastyczna przyczyniła się również do poprawy struktury stereometrycznej (chropowatości) powłok. Natrykiwane płomieniowo powłoki cechowały się znaczną wartością parametru R_a ($13 \mu\text{m}$). Obróbka plastyczna spowodowała znaczny spadek wartości średniego arytmetycznego profilu nierówności. Pomiar profilometryczne wykazały, że najmniejsze wartości współczynnika R_a uzyskano dla powłok walcowanych na gorąco z największymi wartościami odkształcenia względnego, a najmniejsze dla próbek prasowanych.

Polaryzacyjne badania korozyjne w środowisku $0,01 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ wykazały, że w większości wypadków operacji obróbki plastycznej nastąpił wzrost gęstości prądu korozyjnego ($\sim 25\%$) jak i spadek potencjału korozyjnego ($\sim 10\%$). Wyjątkiem jest proces walcowania na zimno ($\varepsilon \sim 12\%$), dla którego nie stwierdzono pogorszenia właściwości korozyjnych.

Słowa kluczowe: technologia, elementy silnikowe, powłoki stopowe, obróbka plastyczna

1. Wprowadzenie

W pracy określono wpływ wielkości odkształcenia na umocnienie charakteryzujące się współczynnikiem umocnienia U_{HV} i właściwości stereometryczne określone na podstawie parametru chropowatości R_a powłok niklowo-aluminiowych, przeprowadzono badania doświadczalne walcowania płaskich wyrobów i prasowania z naniesioną powłoką stopową Ni-5%Al metodą natryskiwania płomieniowego. Natryskiwanie płomieniowe ma szerokie zastosowanie do nakładania powłok przy wytwarzaniu i regeneracji narzędzi do przeróbki plastycznej i elementów części maszyn (walce hutnicze, matryce kuźnicze, tłoczyska, czopy wałów napędowych i korbowych, powierzchnie ślizgowe łoża tokarki, gniazda zaworowe i cylindry silników spalinowych, śruby napędowe okrętowe i krawędzie robocze podajnika ślimakowego) [1, 2]. Powłoki otrzymane za pomocą natryskiwania ciepłego cechuje duża wartość chropowatości powierzchni [3]. Dlatego powłoki muszą być poddane obróbce wykańczającej. Najczęściej stosuje się obróbkę skrawaniem (np. toczenie, szlifowanie). W pracy zaproponowano obróbkę plastyczną na zimno poprzez walcowanie i prasowanie, a na gorąco poprzez walcowanie, jako obróbkę wykańczającą powłok stopowych niklowo-aluminiowych natryskiwanych cieplnie, jako technologie pozwalające na kształtowanie ich właściwości.

Przygotowanie próbek

Powłoki stopowe Ni-5%Al nałożono na podłoże stalowe (C45) metodą natryskiwania płomieniowego. Podczas realizacji procesu technologicznego natryskiwania płomieniowego powłok stopowych zastosowano następujące parametry [3, 4]: ciśnienie gazu palnego - acetylenu: 0,07 MPa, ciśnienie tlenu: 0,4 MPa, odległość palnika od natryskiwanej powierzchni: 150 mm. Jako materiał powłokowy użyto proszku ProXon 21021 (Tabela 1).

Tab. 1. Skład chemiczny proszku ProXon 21021 [3, 4]
Tab. 1. The chemical composite of ProXon 21021 powder [3, 4]

Pierwiastek	Udział masowy, %
Ni	93,45
Al	5
B	0,8
Fe	0,34
Cr	0,18
Si	0,15
C	0,08

Po przeprowadzonych rozważaniach teoretycznych określono, że najkorzystniejszy rozkład odkształceń uzyskano dla pasma o grubości powłoki $h_p=0,6$ mm [5]. Dlatego też w Katedrze Materiałów Okrętowych i Technologii Remontów Akademii Morskiej w Gdyni, do przeprowadzenia badań doświadczalnych przygotowano próbki płaskie stalowe z naniesioną powłoką o średniej grubości $h_p=0,68$ mm (Tabela 2).

Tab. 2. Wyniki analizy statystycznej pomiaru grubości powłoki (wartości w)
Tab. 2. The results of statistic analysis of coating thickness μm

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

Proces walcowania prowadzono w walcierce duo Ø150 mm znajdującej się w Instytucie Modelowania i Automatyzacji Procesów Przeróbki Plastycznej Politechniki Częstochowskiej, dla dwóch gniotów względnych $\varepsilon = 6\%$ i $\varepsilon = 12\%$ (proces trójzabiegowy- $3 \times \varepsilon = 2\%$) przy stałej prędkości walcowania 0,2 m/s. Walcowanie prowadzono na zimno w temperaturze otoczenia i na gorąco w temperaturze 950°C. Dokonano również prób obróbki wykańczającej bezwiórowej w Laboratorium Przeróbki Plastycznej Katedry Technologii Materiałów Maszynowych i Spawalnictwa Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej. Walcowanie prowadzono na zimno w temperaturze otoczenia w walcierce laboratoryjnej duo o średnicy walców Ø200 mm i długości beczki 250 mm, dla dwóch gniotów względnych $\varepsilon = 6\%$ i $\varepsilon = 9\%$. Prasowanie próbek z naniesioną powłoką Ni-5%Al wykonano na zimno na prasie hydraulicznej typu ZD20 (max. 20 ton), dla gniotu względnego $\varepsilon = 12\%$, nacisk jednostkowy określono rzędu 900 MPa.

2. Metodyka badań

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 stereoskopowy MBC-9 przy pięciokrotnym powiększeniu. Przyczepność powłoki uznawano za dobrą, jeżeli nie zaobserwowano złuszczeń, pęcherzy lub odwarstwień.

Pomiar chropowatości powierzchni powłok natryskiwanych płomieniowo, przed obróbką plastyczną, wykonano w Zakładzie Metrologii i Jakości Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. Użyto profilometr stykowy Hommel Tester T8000 niemieckiej firmy Hommelwerke.

Ocenę struktury stereometrycznej powierzchni powłok, po obróbce plastycznej, wykonano na podstawie pomiaru średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości (parametr R_a). Chropowatość powłok mierzono profilometrem HOMMEL TESTER T1000. Długość odcinka pomiarowego wynosiła 4,8 mm, a odcinka elementarnego 0,8 mm.

Pomiaru twardości dokonano za pomocą twardościomierza typu Vickersa. Zastosowano siłę 50 N. Po przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych walcowania i prasowania próbek płaskich z naniesioną powłoką stopową określono, że gniot względny wpływa w znacznym stopniu na poprawę jakości powierzchni i umocnienie powłoki stopowej Ni-5%Al. Określono współczynnik umocnienia, który przedstawiono wzorem:

$$U_{HV} = \frac{HV_1}{HV_0}, \quad (1)$$

gdzie:

HV_0 – twardość powłoki nieobrabianej – 160 HV50;

HV_1 – twardość powłoki po obróbce plastycznej.

Pomiar odporności na korozję powłok wykonano metodą potencjodynamiczną w układzie trójelektrodowym. Odtłuszczoną acetonem próbkę o powierzchni 0,75 cm², elektrodę pomocniczą (polaryzującą) z platynowanego tytanu oraz elektrodę odniesienia (nasycona elektroda kolomelowa) umieszczono w naczyniu, w którym znajdowało się 500 ml 0,01 M roztworu H₂SO₄ o temperaturze otoczenia. Przed dokonaniem pomiarów próbki zostały poddane jednogodzinnej

ekspozycji w elektrolicie w celu ustabilizowania się potencjału korozyjnego. Podczas pomiaru elektrolit był cały czas mieszany.

Badania wykonano rejestrując krzywe polaryzacji $i=f(E)$ w zakresie ± 150 mV od potencjału korozyjnego. Jako pierwszą rejestrowano krzywą katodową, a następnie anodową. Szybkość zmian potencjału, we wszystkich przypadkach, wynosiła 10 mV/min. W celu określenia wartości gęstości prądu korozyjnego posłużono się programem komputerowym "Elfit - corrosion polarization data fitting program". Program wyznaczał parametry korozyjne używając zależności (2) [6]:

$$J = \frac{J_{da}}{\left(\frac{J_{da}}{J_c} - 1\right) \times \exp\left(\frac{-2,303 \times (E - E_c)}{b_a}\right) + 1} - \frac{|J_{dc}|}{\left(\frac{|J_{dc}|}{J_c} - 1\right) \times \exp\left(\frac{2,303 \times (E - E_c)}{b_c}\right) + 1}, \quad (2)$$

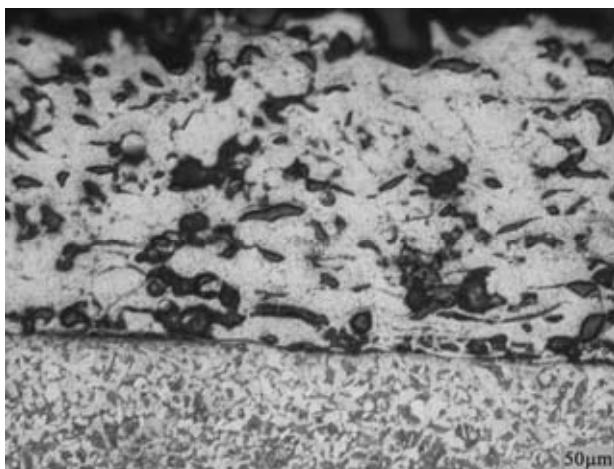
gdzie:

- J – gęstość prądu [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$],
- J_c – gęstość prądu korozyjnego [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$],
- J_{da} – gęstość anodowego prądu granicznego [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$],
- J_{dc} – gęstość katodowego prądu granicznego [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$],
- E – potencjał [mV],
- E_c – potencjał korozyjny [mV],
- b_a – anodowy współczynnik Tafela [mV],
- b_c – katodowy współczynnik Tafela [mV].

3. Wyniki badań doświadczalnych

Obciążenia użyte podczas obróbki plastycznej próbek stalowych z nałożoną powłoką stopową Ni-5%Al spowodowały jedynie trwałe odkształcenia materiału powłoki. W materiale podłoża nie zaobserwowano zmian struktury świadczących o jego plastycznym odkształceniu (rys. 1). Badania metalograficzne wykazały również zmniejszenie porowatości odkształconych plastycznie powłok. Zastosowane jakościowe metody badań przyczepności powłok nie wykazały negatywnego wpływu wykańczającej obróbki plastycznej na ich adhezję do stalowego podłoża.

a)

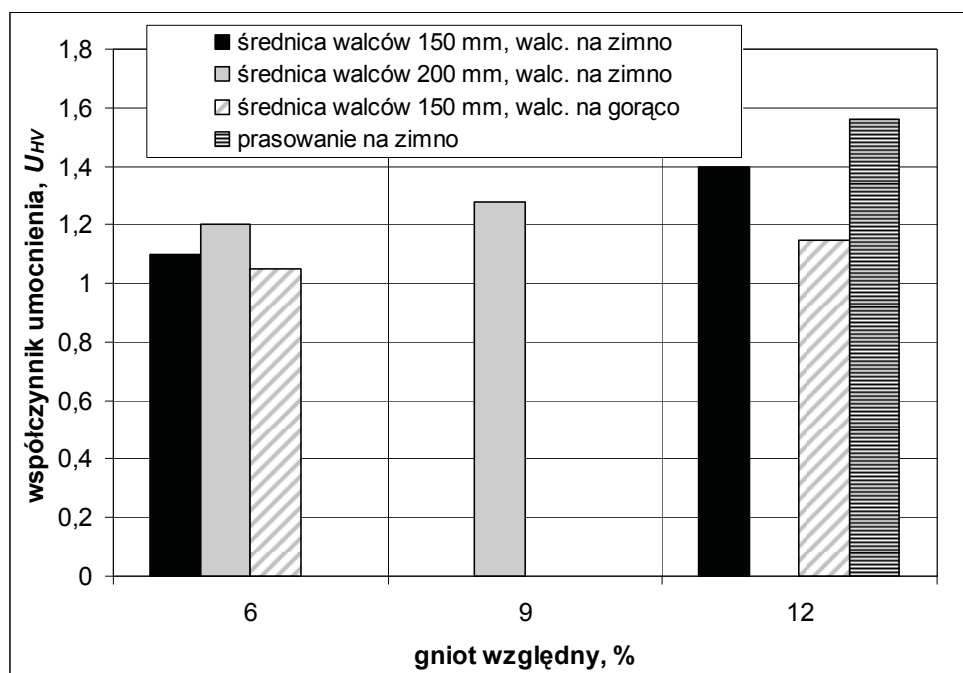


b)



Rys. 1. Mikrostruktura powłoki Ni-5%Al: a) po natryskiwaniu cieplnym, b) po obróbce plastycznej na zimno poprzez prasowanie

Fig. 1. Cross-section of Ni-5%Al coating: a) after thermal spraying, b) after pressing

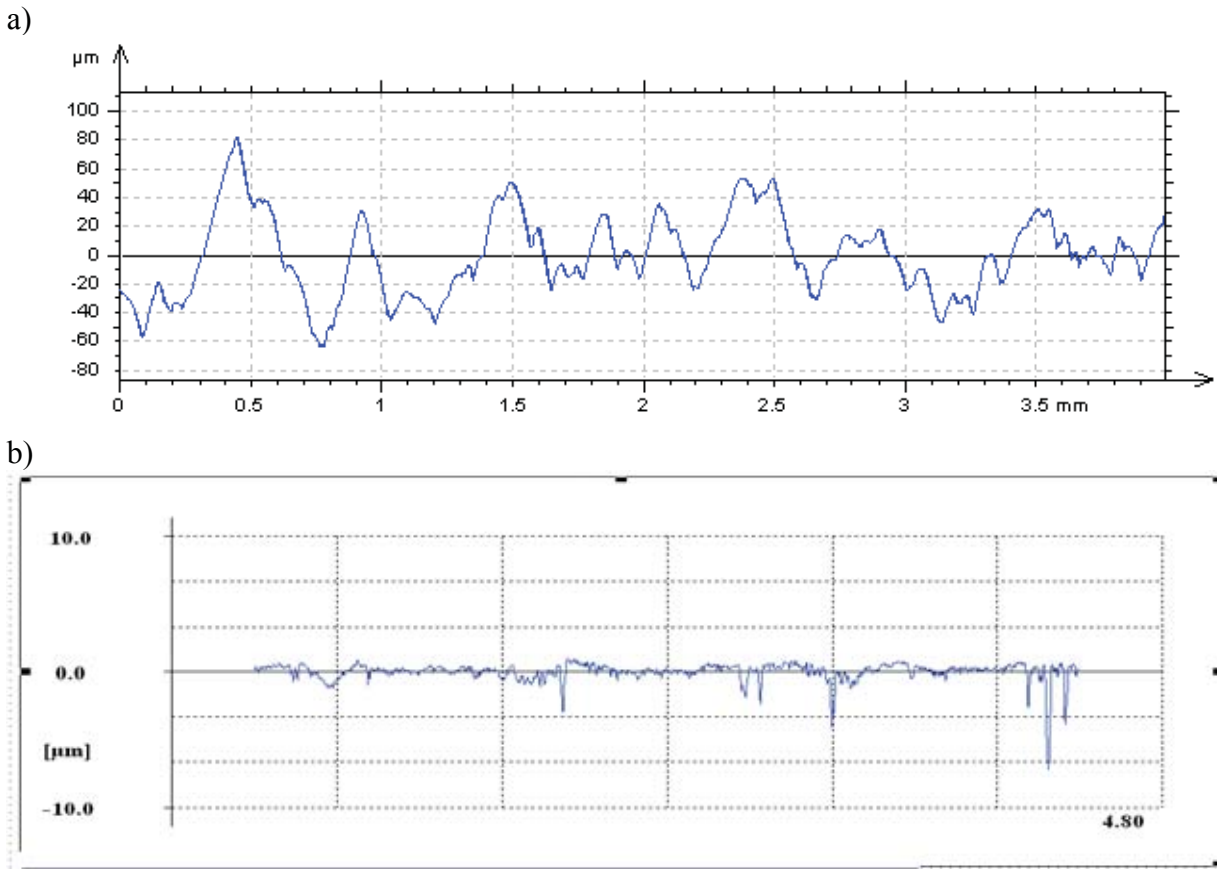


Rys. 2. Wpływ gniotu względnego na umocnienie powłoki stopowej, określone poprzez współczynnik umocnienia U_{HV}
 Fig. 2. The influence of relative drafts on strain hardening (U_{HV}) of alloy coating Ni-5%Al

Z otrzymanych wyników pomiaru twardości zaobserwowano, że wszystkie zaproponowane metody obróbki wykańczającej spowodowały umocnienie badanych powłok (rys 2). Największą wartość umocnienia ($U_{HV} = 1,56$) stwierdzono dla próbek poddanych prasowaniu na zimno, nacisk jednostkowy wynosił 900 MPa. Z kolei minimalna wartość współczynnika $U_{HV} = 1,05$ wystąpiła w przypadku przeprowadzenia procesu technologicznego na gorąco przy gniocie względnym $\varepsilon = 6\%$. Ze względu na różnicę potencjałów elektrochemicznych materiału powłoki i podłoża (stal w ogniwie galwanicznym z ze stopem Ni-5%Al jest anodą) po procesie przygotowania zglądów metalograficznych nie udało się wytrawić granic krystalitów powłoki. W związku z tym nie można stwierdzić jednoznacznie, czy zaproponowana temperatura obróbki 950 °C, przy zadanych stopniach odkształcenia jest najodpowiedniejsza dla zajścia procesu rekrytalizacji pierwotnej stopu Ni-5%Al. Na stopień umocnienia próbek walcowanych na zimno wpłynęła również średnica użytych beczek. Tworzywo poddane obróbce plastycznej, w której wykorzystano walce o średnicy 200 mm, cechowało się o 10% większą twardością w porównaniu do materiału odkształconego za pomocą walców o średnicy 150 mm.

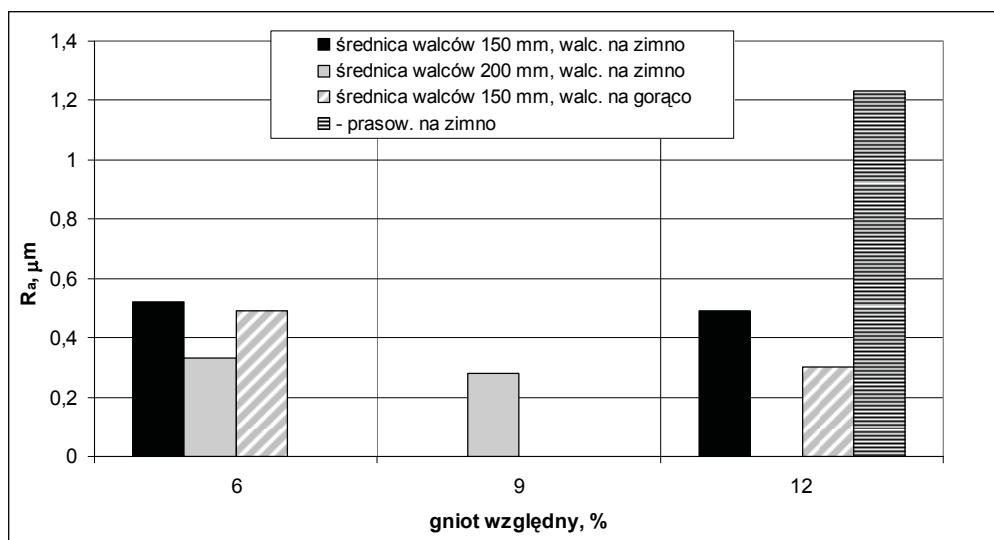
Natryskiwane płomieniowo powłoki stopowe charakteryzowały się silnie rozwiniętą powierzchnią rzeczywistą. Wartość średniego arytmetycznego odchylenia profilu nierówności (parametr R_a wynosił około 13 μm – rys. 3). Zastosowane metody obróbki wykańczającej powłok pozwoliły na znaczne zmniejszenie wartości rozpatrywanego parametru chropowatości (rys. 4). Najmniejszą wartość $R_a = 0,28 \mu\text{m}$ uzyskano w przypadku powłok walcowanych na gorąco przy gniocie względnym 9%. Natomiast proces prasowania pozwolił na uzyskanie chropowatości powierzchni rzędu $R_a = 1,2 \mu\text{m}$. Stwierdzono, że stopień odkształcenia, średnica walców jak i temperatura walcowania, wpływa na wartość chropowatości powierzchni. Wzrost wartości gniotu względnego z $\varepsilon = 6\%$ do 12% w przypadku walcowania na zimno spowodował spadek wartości współczynnika R_a jedynie o 6%. Jednak w przypadku przeprowadzenia procesu walcowania w temperaturze 950 °C powyższy wzrost wartości odkształcenia przyczynił się do spadku chropowatości powierzchni o 60%. Również średnica zastosowanych walców za pomocą, których wykonano obróbkę wpływało odwrotnie proporcjonalnie na wartość parametru R_a obrabianej powierzchni. Powierzchnie powłok obrabiane beczkami o średnicy 150 mm cechowały się

wartością $R_a = 0,52 \mu\text{m}$, z kolei powierzchnie odkształcone walcami o średnicy 200 mm charakteryzowały się wartością R_a równą $0,33 \mu\text{m}$.



Rys. 3. Przykładowe profilogramy powierzchni powłoki natrykiwanej płomieniowo powłoki stopowej Ni-5%Al: a) przed obróbką plastyczną ($R_a = 13,3 \mu\text{m}$) [7], b) po walcowaniu na gorąco, odkształcenie względne $\varepsilon = 12\%$ ($R_a = 0,38 \mu\text{m}$)

Fig. 3. The samples of alloy coating Ni-5%Al obtain by flame spraying surface analyses: a) before of plastic working ($R_a = 13,3 \mu\text{m}$) [7], b) after hot rolling, relative drafts $\varepsilon = 12\%$ ($R_a = 0,38 \mu\text{m}$)



Rys. 4. Wpływ gniotu względnego procentowego na chropowatość powierzchni powłoki stopowej Ni-5%Al
Fig. 4. The influence of relative drafts on alloy coating Ni-5%Al roughness

Tab. 3. Wyniki badań korozyjnych
 Tab. 3. The results of corrosion measurements

Obróbka wykańczająca	Odształcenie względne ε	Gęstość prądu korozyjnego i_c	Potencjał korozyjny E_c
	[%]	[$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	[mV]
przed	-	257	-173
prasowanie	12	319	-199
Walcowanie na zimno		249	-205
Walcowanie na gorąco		318	-192

Elektrochemiczne badania korozyjne wykazały, że proponowane metody obróbki wykańczającej, mającej na celu zmniejszenie chropowatości natryskiwanych cieplnie powłok spowodowały przesunięcie wartości potencjału korozyjnego w kierunku anodowym (tabela 3). Zastosowanie prasowania i walcowania na gorąco zwiększyło szybkość korozji (większe wartości i_c) powłok w porównaniu do powłoki przed obróbką plastyczną. Przeprowadzenie procesu walcowania na zimno w trzech etapach przyczyniło się do obniżenia wartości gęstości prądu korozyjnego o około 4%.

Wzrost wartości gęstości prądu korozyjnego oraz zmniejszenie wartości potencjału korozyjnego prawdopodobnie związany jest ze zmianą naprężeń wewnętrznych w badanych powłokach. W przypadku powłok obrabianych na gorąco oprócz wzrostu wartości naprężeń własnych wynikających z odkształcenia plastycznego doszły naprężenia związane z różnicą w rozszerzalności cieplnej materiału powłoki i podłoża oraz z przemianami fazowymi zachodzącymi w obydwóch tworzywach.

Wielozabiegowy proces walcowania spowodował prawdopodobnie najmniejszy przyrost naprężeń własnych, w interakcji ze znacznym, bo 25 krotnym spadkiem chropowatości, a tym samym zmniejszenie rzeczywistej powierzchni próbek, spowodował niewielki spadek wartości gęstości prądu korozyjnego.

4. Wnioski

Wielkość gniotów względnych istotnie wpływa na umocnienie i właściwości stereometryczne powłok stopowych Ni-5%Al. Po przeprowadzonych badaniach doświadczalnych walcowania na zimno można stwierdzić, że:

- dla większych wartości gniotu ($\varepsilon = 12\%$) następuje większe umocnienie powłoki ok. 40 % ($U_{HV} = 1,4$) po walcowaniu na zimno, a po prasowaniu powłoka umacnia się nawet do 56 % ($U_{HV} = 1,56$) niż dla gniotów względnych $\varepsilon = 9\%$ ($U_{HV} = 1,28$) i $\varepsilon = 6\%$ ($U_{HV} = 1,1$),
- po walcowaniu na gorąco umocnienie powłoki jest mniejsze w porównaniu do obróbki plastycznej na zimno: dla $\varepsilon = 12\%$ współczynnik umocnienia wynosi $U_{HV} = 1,15$ i dla $\varepsilon = 6\%$, $U_{HV} = 1,05$,
- średnie arytmetyczne odchylenia profilu nierówności, dla powłok natryskiwanych cieplnie, po walcowaniu na zimno w walcierce o średnicy walców 150 mm, uzyskały dużo mniejszą chropowatość ($R_a = 0,49 \mu\text{m}$ dla $\varepsilon = 12\%$, $R_a = 0,52 \mu\text{m}$ dla $\varepsilon = 6\%$), natomiast dla próbek walcowanych na zimno walcami o średnicy 200 mm, uzyskały jeszcze mniejszą chropowatość ($R_a = 0,28 \mu\text{m}$ dla $\varepsilon = 9\%$, $R_a = 0,33 \mu\text{m}$ dla $\varepsilon = 6\%$), w porównaniu do profilu chropowatości powierzchni sprzed przeróbki plastycznej $R_a = 13 \mu\text{m}$,
- dla próbek po prasowaniu chropowatość powierzchni powłoki jest większa ($R_a = 1,23 \mu\text{m}$) niż dla próbek poddanych walcowaniu, ale dużo mniejsza niż chropowatość powłok po natryskiwaniu cieplnym ($R_a = 13 \mu\text{m}$),

- powłoka poddana obróbce plastycznej na zimno uzyskała bardziej jednorodną strukturę, wyraźnie zostały zamknięte w większości pory powstałe po natryskiwaniu cieplnym.

Uzasadnione jest zatem zastosowanie obróbki plastycznej, jako technologii do uzyskania odpowiedniej struktury geometrycznej powłok stopowych niklowo–aluminiowych natrykiwanych cieplnie.

Literatura

1. Adamiec, P., Dziubiński, J., *Regeneracja i wytwarzanie warstw wierzchnich elementów maszyn transportowych*, Wyd. Politechniki Śląskiej. Gliwice, 1999.
2. Klimpel, A., *Technologie napawania i natryskiwania cieplnego*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1999.
3. Starosta, R., Klatt, K., *Ocena podatności technologii natryskiwania płomieniowego ROTO-TECK do nakładania powłok kompozytowych Ni-Al₂O₃*, *Materiały i Technologie, Roczniki Naukowe Pomorskiego Oddziału Polskiego Towarzystwa Materiałoznawczego*, 2 (2), s.191-194, 2004.
4. *Specyfikacja technologiczna nakładania i obróbki powłok z proszku ProXon 21021*, Materiały firmy "Castolin+Eutectic", 2003.
5. Rydz, D., Koczurkiewicz, B., Starosta, R., Dyl, T., *Numeryczna analiza wpływu procesu walcowania na wartość odkształceń powłoki Ni-5%Al*, *Inżynieria Materiałowa Czasopismo Naukowo – Techniczne*, Nr 3 (151), s. 769 – 771, 2006.
6. Jankowski, J., *Wpływ ogniwa trójelektrodowego Sn-FeSn₂-stal na korozję blachy białej*, Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Wydział Chemiczny, 1995.
7. Zakład Metrologii i Jakości. Katedra Inżynierii Produkcji. *Wyniki pomiarów struktury geometrycznej powierzchni*, Sprawozdanie z wykonanych badań, praca nie publikowana, Koszalin, 2006.