

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

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

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

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

Otrzymano (Received) 29.01.2009

WPŁYW OBRÓBKI PLASTYCZNEJ POWŁOK KOMPOZYTOWYCH Ni-Al-Al₂O₃ ORAZ Z FAZ MIĘDZYMETALICZNYCH Ni₃Al I NiAl NA PARAMETRY KRZYWEJ UDZIAŁU MATERIAŁOWEGO

Określono wpływ obróbki plastycznej poprzez spęczanie na parametry stereometryczne powłok stopowych, kompozytowych oraz z faz międzymetalicznych. Materiał powłokowy został nałożony na podłoże stalowe (C45) za pomocą technologii poddźwiękowego płomieniowego natryskiwania cieplnego i natryskiwania plazmowego. Powłoki otrzymane za pomocą natryskiwania cieplnego uzyskują duże wartości chropowatości powierzchni. Zalecana jest zatem dalsza wykańczająca obróbka plastyczna powłok kompozytowych i z faz międzymetalicznych. Dlatego też istotne jest, żeby określić, w jakim stopniu dla różnych rodzajów materiałów powłokowych obróbka plastyczna wpłynie na zmianę parametrów udziału materiałowego. W tym celu wykonano badania eksperymentalne spęczania próbek stalowych C45 z naniesionymi powłokami: stopową o strukturze jednofazowej, o maksymalnej 10% rozpuszczalności glinu w sieci krystalograficznej niklu, kompozytową Ni-Al-Al₂O₃ oraz powłokami z faz międzymetalicznych Ni₃Al i NiAl dla gniotu względnego $\epsilon_t = 18\%$.

Słowa kluczowe: powłoki kompozytowe, obróbka plastyczna powłok, odkształcenie plastyczne

THE INFLUENCE OF PLASTIC WORKING COMPOSITE Ni-Al-Al₂O₃ COATINGS AND THE Ni₃Al AND NiAl INTERMETALLIC COATINGS ON PARAMETERS OF BEARING AREA CURVE

Processes of repairs and of productions of manufactured product with apply a coating be glad recognition among engineers. During voyage lots of repairs are carried out onboard vessels. The welding technology of applying alloy and composite and intermetallic coatings is very common. In this paper the technology of thermal spraying of composite metal-ceramic and alloy and intermetallic coatings was presented. It is a simple technology and a very useful one in ship machinery repairs during voyage (e.g. internal combustion engines, torque pumps, separators). The composite coatings were obtained by powder flame spraying. The thermal spraying coatings are characterized by great surface roughness. The thermal spraying nickel-based alloy coatings are used in a variety of applications: as bond coats for thermal barrier coatings on turbine components, as restorative layers for machine parts, as bond coats in internal combustion engine cylinders, for corrosion protection of boiler tubes and in numerous other applications requiring wear-, high temperature- and corrosion-resistant surfaces. The composite Ni-Al-Al₂O₃ coatings the development of new specific solutions for each types of engine. The NiAl and Ni₃Al intermetallic have found widespread applications as high-temperature structural material due to their high melting point, low density, good thermal conductivity and excellent oxidation resistance. The NiAl and Ni₃Al coatings were obtain by plasma spraying. Coatings with improved corrosion resistance and abrasion resistance were also developed and are available now. A brief overview on other applications of thermal spraying in the many industry will be given also. The nickel-based alloy coatings and the composite Ni-Al-Al₂O₃ coatings and the intermetallic NiAl and Ni₃Al coatings was plastic working was proposed. The coating subjected to plastic working gained a more homogeneous structure as most of the pores, which had occurred after flame spraying, were closed. The influence of strain intensity on parameters of bearing area curve at the nickel-based alloy and composite and intermetallic coatings was determined. It carry experimental research for three relative draft $\epsilon_t = 18\%$.

Keywords: composite coatings, plastic working of coatings, plastic strain

WPROWADZENIE

Aktualnie występuje znaczny popyt na materiały o nowych i ulepszonych właściwościach. Doprowadziło to do badań nad rozwojem technologii wytwarzania materiałów kompozytowych oraz z faz międzymetalicznych. Materiały takie mają zastosowanie w kosmonautyce,

elektronice, energetyce, w przemyśle zbrojeniowym, samochodowym, lotniczym, a także okrętowym [1]. Kompozyty i fazy międzymetaliczne znalazły też zastosowanie jako materiały powłokowe spełniające rolę ochronną lub nadającą warstwie powierzchniowej odpowiednie

właściwości tribologiczne. Stopy na osnowie uporządkowanych faz międzymetalicznych z udziałem aluminium posiadają dużą odporność na utlenianie i korozję wżerową, a także wysoką wytrzymałość zmęczeniową oraz żaroodporność. Dlatego znalazły one zastosowanie do produkcji części maszyn do pracy w trudnych warunkach eksploatacyjnych (łopatki turbin spalinowych, zawory wydechowe, wirniki turbosprężarek) [2]. Powłoki kompozytowe oraz z faz międzymetalicznych można uzyskać poprzez natryskiwanie cieplne. Technologie natryskiwania cieplnego są szeroko wykorzystywane ze względu na możliwość zwiększenia właściwości eksploatacyjnych warstwy powierzchniowej (wytrzymałościowe, tribologiczne, antykorozyjne i dekoracyjne) [3, 4]. Natryskiwanie płomieniowe ma szerokie zastosowanie do nakładania powłok przy wytwarzaniu i regeneracji elementów części maszyn (czopy wałów napędowych w linii wałów okrętowych, czopy wałów korbowych, wirniki i korpusy pomp, gniazda zaworowe i cylindry silników spalinowych, śruby napędowe okrętowe i czopy pod łożyska wirnika turbiny) oraz narzędzi do przeróbki plastycznej (matryce kuźnicze, tłoczyska, walce robocze) [3, 5]. Powłoki stopowe o strukturze jednofazowej, a mianowicie granicznego roztworu stałego α , o maksymalnej 10% rozpuszczalności glinu w sieci krystalograficznej niklu, oraz kompozytowe Ni-Al-Al₂O₃, gdzie objętościowe stężenie tworzywa niemetalowego Al₂O₃ wynosiło: 15%, 30%, a także z faz międzymetalicznych NiAl oraz Ni₃Al cechują się wysoką wytrzymałością zmęczeniową oraz znaczną odpornością na korozję. Powłoki metalowo-ceramiczne są stosowane przede wszystkim w celu podwyższenia trwałości części maszyn [5, 6].

Powłoki kompozytowe oraz z faz międzymetalicznych otrzymane za pomocą natryskiwania cieplnego uzyskują duże wartości chropowatości powierzchni. Istotne jest zatem, aby określić, w jakim stopniu dla różnych rodzajów materiałów powłokowych obróbka plastyczna wpłynie na zmianę parametrów stereometrycznych. Wykonano zatem badania spęczania próbek stalowych C45 z naniesionymi powłokami na osnowie niklu i aluminium: stopową, kompozytową i z faz międzymetalicznych dla gniotu względnego $\epsilon_h = 18\%$.

ZAKRES BADAŃ

Badania eksperymentalne przeprowadzono dla próbek ze stali C45 z naniesionymi powłokami: stopową Ni-Al (o składzie w % masy: Ni-94%, Al-5%, B-1%) [7] oraz powłoką kompozytową Ni-Al-Al₂O₃ (materiał powłokowy stanowił mieszaninę osnowy Ni-Al i fazy dyspersyjnej tlenku glinu, gdzie udział objętościowy wynosił 15% oraz 30%), a także z faz międzymetalicznych NiAl i Ni₃Al. Przed nałożeniem powłok w odpowiedni sposób przygotowano powierzchnię poprzez obróbkę strumieniowo-ścierną, następnie odfuszczone i oczyszczone z produktów utleniania. Podczas realizacji procesu technologicznego natryskiwania płomieniowego powłok kom-

pozytowych i stopowych zastosowano następujące parametry [7]: ciśnienie gazu palnego - acetylenu: 0,07 MPa, ciśnienie tlenu: 0,4 MPa, odległość palnika od natryskiwanej powierzchni: 150 mm. Powłoki z faz międzymetalicznych uzyskano poprzez natryskiwanie plazmowe. Proces technologiczny nakładania powłok z faz międzymetalicznych prowadzono dla podanych parametrów: natężenie prądu - 450 A, napięcie łuku wewnętrznego - 47 V, przepływ argonu - 2000 dm³/h, przepływ wodoru - 100 dm³/h, odległość dyszy od próbki 70 mm. Prasowanie przeprowadzono na prasie hydraulicznej ZD20 w Laboratorium Obróbki Plastycznej Katedry Technologii Materiałów Maszynowych i Spawalnictwa Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej, dla gniotu względnego $\epsilon_h = 18\%$, nacisk jednostkowy wynosił 900 MPa.

Strukturę stereometryczną powierzchni po obróbce plastycznej mierzono w Katedrze Materiałów Okrętowych i Technologii Remontów Wydziału Mechanicznego Akademii Morskiej w Gdyni profilometrem HOMMEL TESTER T1000. Długość odcinka pomiarowego wynosiła 4,8 mm, a odcinka elementarnego 0,8 mm. Dokonano pomiaru średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości (parametr R_a), a następnie określono wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni:

$$K_{Ra} = \frac{R'_a}{R_a} \quad (1)$$

gdzie: K_{Ra} - wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni, R'_a - średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości powierzchni powłoki przed obróbką plastyczną, R_a - średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości powierzchni powłoki po obróbce plastycznej.

WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

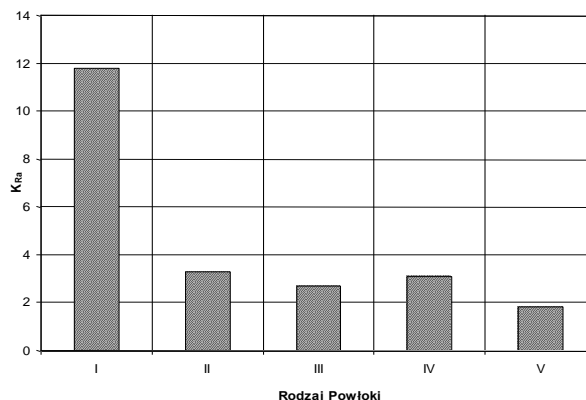
W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych określono, że obróbka plastyczna poprzez spęczanie dla stałego gniotu względnego ma wpływ na zmianę parametrów udziału materiałowego różnych rodzajów materiałów powłokowych. Natryskiwane płomieniowo powłoki kompozytowe i stopowe na osnowie niklu charakteryzowały się silnie rozwiniętą powierzchnią rzeczywistą. Wartość średniego arytmetycznego odchylenia profilu nierówności wynosiła $R'_a = 13,3 \mu\text{m}$ [8]. Po natryskiwaniu plazmowym średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości powierzchni powłok z faz międzymetalicznych wynosiło $R'_a = 12,99 \mu\text{m}$ dla powłok Ni₃Al i $R'_a = 5,25 \mu\text{m}$ dla powłok NiAl. Po obróbce plastycznej uzyskano znaczne zmniejszenie wartości rozpatrywanego parametru chropowatości. Powłoki natryskiwane plazmowo z materiału proszkowego na bazie faz międzymetalicznych NiAl i Ni₃Al charakteryzowały się strukturą warstwową i porowatością [9, 10]. Powłoki po natryskiwaniu płomieniowym muszą być poddawane obróbce

wykańczającej, a w szczególności obróbce bezwiórowej w celu zmniejszenia ich porowatości i chropowatości [11].

Z danych zawartych w tabeli 1 można stwierdzić, że przy większych zawartościach fazy dyspersyjnej w powłokach kompozytowych uzyskuje się większą chropowatość. Można zauważyć również (rys. 1), że wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni uzyskuje największe wartości dla powłok stopowych Ni-Al. Wskaźnik zmniejszenia chropowatości najmniejsze wartości przyjmuje dla powłok z faz międzymetalicznych NiAl oraz kompozytowych o zawartości 30% Al_2O_3 . Oznacza to, że stosując stałą wartość odkształcenia względnego, uzyskane zostanie nieznaczne zmniejszenie chropowatości dla powłok kompozytowych o dużej zawartości tlenku glinu i dla powłok z faz międzymetalicznych NiAl. Natomiast istotny wpływ gniotu względnego na zmniejszenie chropowatości występuje dla powłok stopowych i kompozytowych o niewielkiej zawartości fazy ceramicznej. Oznacza to, że najbardziej podatnymi powłokami na osnowie niklu do obróbki plastycznej są powłoki stopowe Ni-Al i kompozytowe Ni-Al- Al_2O_3 przy 15% udziale fazy dyspersyjnej tlenku glinu.

TABELA 1. Wyniki pomiarów parametrów profilu nierówności dla różnych rodzajów materiałów powłokowych
TABLE 1. Result measurement of parameters of profile roughness at the different coating materials

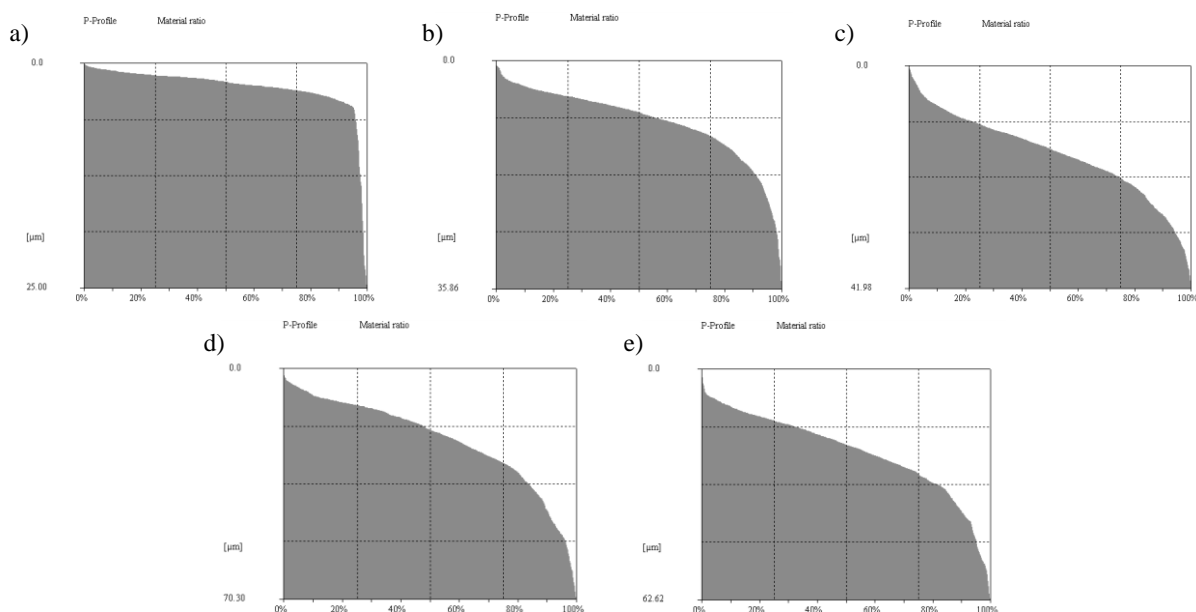
Rodzaj powłoki	K_{Ra}	R_a μm	R_k μm	R_{pk} μm	R_{vk} μm
stopowa Ni-Al	11,8	1,1	1,01	1,43	6,13
kompozytowa Ni-Al-15% Al_2O_3	3,3	3,9	7,38	1,64	10,55
kompozytowa Ni-Al-30% Al_2O_3	2,7	4,9	12,39	2,33	8,63
faza międzymetaliczna Ni_3Al	3,1	4,2	15,44	4,20	12,48
faza międzymetaliczna NiAl	1,8	2,9	17,02	4,86	6,21



Rys. 1. Wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni (K_{Ra}) dla powłok: I - stopowych Ni-Al, II - kompozytowych z 15% udziałem fazy dyspersyjnej Al_2O_3 , III - kompozytowych z 30% udziałem fazy dyspersyjnej Al_2O_3 , oraz IV - z faz międzymetalicznych Ni_3Al i V - z faz międzymetalicznych NiAl

Fig. 1. Surface roughness reduction ratio (K_{Ra}) for: I - Ni-Al alloy coatings, II - 15% Al_2O_3 composite coatings, III - 30% Al_2O_3 composite coatings and IV - Ni_3Al intermetallic coatings and V - NiAl intermetallic coatings

W tabeli 1 przedstawiono wartości parametrów profilu nierówności dla różnych materiałów powłokowych. Średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości (R_a) uzyskuje najmniejsze wartości dla powłok stopowych Ni-Al, a także dla powłok z faz międzymetalicznych NiAl. Wyznaczono również (tab. 1) parametry związane z krzywą udziału materiałowego różnych rodzajów materiałów powłokowych. Zredukowana wysokość wzniesień - parametr R_{pk} (powinien przyjmować jak najmniejszą wartość) charakteryzuje górną część powierzchni, która szybko ulegnie wytarciui po rozpoczęciu np. pracy silnika. Zredukowaną głębokość wgłębienia profilu nierówności opisuje parametr R_{vk} (powinien przyjmować jak największą wartość). Jest on miarą zdolności pracujących powierzch-



Rys. 2. Krzywe udziału materiałowego dla powłok: a) stopowych Ni-Al, b) kompozytowych z 15% udziałem fazy dyspersyjnej Al_2O_3 , c) kompozytowych z 30% udziałem fazy dyspersyjnej Al_2O_3 oraz d) z faz międzymetalicznych Ni_3Al i e) z faz międzymetalicznych NiAl

Fig. 2. Bearing area curves for: a) Ni-Al alloy coatings, b) 15% Al_2O_3 composite coatings, c) 30% Al_2O_3 composite coatings, d) Ni_3Al intermetallic coatings and e) NiAl intermetallic coatings

ni do utrzymywania smaru w powstających mechanicznie wgłębieniach. Parametr R_k opisuje głębokość rdzenia profilu chropowatości (powinien przyjmować jak najmniejszą wartość). Najmniejsze wartości głębokości rdzenia chropowatości R_k , a także zredukowanych wysokości wzniesień R_{pk} uzyskiwane są dla powłok stopowych Ni-Al i kompozytowych o zawartości 15% tlenu glinu. Natomiast największe wartości zredukowanych głębokości wgłębień R_{vk} występują dla powłok kompozytowych o zawartości 15% Al₂O₃ i z faz międzymetalicznych Ni₃Al. Na podstawie danych zawartych w tabeli 1 i na rysunku 2 można wnioskować, że najlepszym stopniem przylegania badanej powierzchni do przeciwpowierzchni cechować się będą powłoki kompozytowe dla 15% udziału objętościowego tlenu glinu.

Porównując dane zawarte na rysunku 2, można zauważyć, że najkorzystniejszy rozkład parametrów krzywej udziału materiałowego występuje dla powłok kompozytowych Ni-Al-Al₂O₃, gdzie materiał powłokowy stanowił mieszaninę osnowy Ni-Al i fazy dyspersyjnej tlenu glinu przy udziale objętościowym równym 15%. Można zatem stwierdzić, że najbardziej podatnymi powłokami do odkształcenia plastycznego (poza powłokami stopowymi Ni-Al) są powłoki kompozytowe o zawartości 15% Al₂O₃.

WNIOSKI

Po przeprowadzonej analizie wyników uzyskanych z badań eksperymentalnych można wysnuć następujące stwierdzenia i wnioski:

- wskaźnik zmniejszenia chropowatości powierzchni uzyskuje największe wartości dla powłok stopowych Ni-Al,
- dla powłok kompozytowych wskaźnik zmniejszenia chropowatości przyjmuje mniejsze wartości dla 30% wypełnienia cząstkami Al₂O₃ niż dla wypełnienia 15%,
- wskaźnik zmniejszenia chropowatości najmniejsze wartości przyjmuje dla powłok z faz międzymetalicznych NiAl,
- dla powłok kompozytowych o dużej zawartości Al₂O₃ i dla powłok z faz międzymetalicznych NiAl można uzyskać nieznaczne zmniejszenie chropowatości dla ustalonej wartości gniotu względnego,
- dla powłok stopowych i kompozytowych o małej zawartości Al₂O₃ można uzyskać znaczne zmniejszenie chropowatości przy stałej wartości gniotu względnego,
- najkorzystniejszy rozkład parametrów krzywej udziału materiałowego występuje dla powłok kompozytowych Ni-Al-Al₂O₃, gdzie materiał powłokowy stanowił mieszaninę osnowy Ni-Al i fazy dyspersyjnej tlenu glinu przy udziale objętościowym równym 15%.

Po przeprowadzonej analizie wyników badań można stwierdzić, że istnieje możliwość zastosowania natryski-

wanych cieplnie powłok kompozytowych Ni-Al-Al₂O₃ (o 15% zawartości Al₂O₃) do wytwarzania lub regenerowania elementów części maszyn. Powłoki kompozytowe po natryskiwaniu, a następnie po obróbce plastycznej powinny zapewnić osiągnięcie odpowiednich parametrów eksploatacyjnych części maszyn, ponieważ dla powłok Ni-Al-15%Al₂O₃ zredukowane wysokości wzniesień przyjmują najmniejsze wartości (charakteryzują górną część powierzchni, która szybko ulegnie wytarciu po rozpoczęciu pracy), natomiast zredukowane głębokości wgłębień profilu nierówności przyjmują największe wartości (jest to miara zdolności pracujących powierzchni do utrzymywania smaru w powstających mechanicznie wgłębieniach). W dalszej pracy badawczej zostanie opracowany proces technologiczny bezwiórowej obróbki wykańczającej powłok kompozytowych metalowo-ceramicznych na bazie niklu i aluminium z zawartością 15% Al₂O₃.

LITERATURA

- [1] Dobrzański L.A., Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, Materiały inżynierskie z podstawami projektowania materiałowego, Wyd. Naukowo-Techniczne, Gliwice-Warszawa 2002.
- [2] Varin R.A., Structural and functional intermetallics - on overview, Inżynieria Materiałowa 2001, 1, 11-18.
- [3] Klimpel A., Technologie napawania i natryskiwania ciepłego, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
- [4] Barbezat G., Application of thermal spraying in the automobile industry, Surface & Coatings Technology 2006, 201, 2028-2031.
- [5] Adamiec P., Dziubiński J., Regeneracja i wytwarzanie warstw wierzchnich elementów maszyn transportowych, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
- [6] Starosta R., Zieliński A., Zużycie cierne galwanicznych powłok kompozytowych Ni-Al₂O₃ oraz Ni-Fe-Al₂O₃, (Materiały 12th International Summer School Kołobrzeg 2000, Modern Plasma Surface Technology, Koszalin 2000, 379-392.
- [7] Starosta R., Badania potencjodynamiczne natryskiwanych płomieniowo kompozytowych powłok dyspersyjnych z osnową niklową, Kompozyty (Composites) 2008, 8, 2, 195-200.
- [8] Skoblik R., Starosta R., Dyl T., The influence of dispersion phase on composite coating properties after cold working, Monograph: Developments in mechanical engineering, Editor of Scientific Publications Janusz T. Cieśliński, Gdańsk University of Technology Publisher, Part III, Chapter 13, Vol. 2, Gdańsk 2008, 119-125.
- [9] Starosta R., Szczepaniak P., Ocena odporności korozyjnej powłok z faz NiAl oraz Ni₃Al natryskiwanych plazmowo, Inżynieria Materiałowa 2006, 3, 540-543.
- [10] Dyl T., Starosta R., Skoblik R., Wpływ odkształcenia na parametry stereometryczne powłok z faz międzymetalicznych NiAl i Ni₃Al, [w:] Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej, pod red. Lecha Szecówki, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2008, 81-84.
- [11] Dyl T., Starosta R., Skoblik R., Obróbka wykańczająca powłok MMC w aspekcie umocnienia i zmniejszenia chropowatości powierzchni, Kompozyty (Composites) 2008, 8, 2, 147-151.