

# Regeneracja zaworów silników okrętowych metodą napawania laserowego

## Regeneration of marine engine valves using laser hard-facing

### Streszczenie

Analizowano możliwości zastosowania napawania laserowego proszkiem na bazie kobaltu przyłgni zaworu wylotowego okrętowego silnika Diesla. Po przygotowaniu przez obróbkę skrawaniem, wyselekcjonowane zawory poddano napawaniu laserowemu z wykorzystaniem lasera wysokiej mocy ROFIN DL020. Do napawania użyto proszku EuTroLoy 16012. Jeden z zaworów został pocięty i poddany badaniom metalograficznym oraz pomiarom twardości, a pozostałe zawory zostały zainstalowane w silniku okrętowym, w którym pracowały przez ok. 3000 h. Badania przeprowadzone dla stanu wyjściowego wykazały typową strukturę dendrytyczną napoiny, charakterystyczną dla warstw napawanych, z równomiernie rozłożonymi wydzieleniami węglików w obszarach międzydendrytycznych oraz w minimalnym stopniu zmienioną strukturę w podłożu stalowym. Analogiczne badania wykonano dla zaworów po okresie eksploatacji. Przyłgni zaworów wykazywały niewielkie efekty zużycia. W mikrostrukturze napoiny stwierdzono nieznaczne zmiany spowodowane głównie efektami procesów dyfuzyjnych zachodzących w temperaturze pracy oraz spadek twardości. Technika napawania laserowego okazała się bardzo przydatna do regeneracji zaworów silników okrętowych.

### Abstract

We analyzed the applicability of cobalt-based powder laser hard-facing of exhaust valve face of marine diesel engine. After preparation by machining, using of high-power Rofin DL020 laser selected valves were hard-facing. The EuTroLoy 16012 powder were used. One of the valves were cut and subjected to metallographic examinations and hardness measurements, while the other valves were assembled in the engine, which worked for about 3000 h. The tests conducted for the baseline showed a characteristic for surfaced layers dendritic structure of the overlay with carbides uniformly deposited in interdendritic areas and minimally changed the structure of the substrate steel. A similar study conducted for the valves after the operation. Valves face showed a little effects of wear. The microstructure of the deposit was found mostly minor changes due to the effects of diffusion processes occurring in the operating temperature and a decrease of hardness. Laser hard-facing technique has proven very useful for the regeneration of marine engine valves.

### Wstęp

Zjawiska jednoczesnego obciążenia mechanicznego, cieplnego i korozyjnego wpływają na trwałość i bezpieczeństwo eksploatacji takich elementów jak

**Dr inż. Hanna Smoleńska, dr hab. inż. Jerzy Łabanowski** – Politechnika Gdańska, **mgr inż. Włodzimierz Kończewicz** – Akademia Morska w Gdyni.

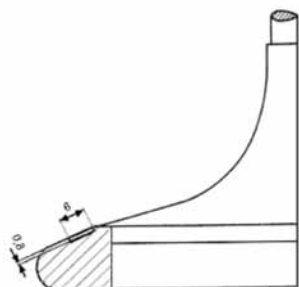
zawory wylotowe silników okrętowych, które poddawane są obciążeniom mechanicznym o charakterze statycznym i dynamicznym, zmiennej temperaturze, oraz korozyjnemu środowisku spalin o składzie uzależnionym od jakości stosowanego paliwa. Jedną z metod pozwalających na wydłużenie trwałości zaworów wylotowych silników okrętowych jest wytwarzanie na powierzchni przyłgni zaworu, a więc na stosunkowo niewielkiej, ale najsilniej obciążonej powierzchni – warstwy wykonanej z materiału o znacznie większej

odporności na zużycie niż materiał rodzimy zaworu. Z tego względu stosowane są głównie stopy na bazie kobaltu (stellity), stopy na bazie niklu lub materiały na bazie kompozytów ceramicznych [1÷5]. Technologiczne metody wytwarzania warstw wierzchnich to stopowanie lub napawanie laserowe i plazmowe [6÷10]. W artykule przedstawiono możliwość zastosowania napawania laserowo warstw z proszku na bazie kobaltu jako powłok zwiększających odporność powierzchni przylgni na procesy zużycia i korozji. Istnieje także możliwość wykorzystania tej metody do wytwarzania powłok naprawczych [10]. Dobrze dobrany materiał do napawania dzięki swojemu składowi chemicznemu zapewnia zarówno dobrą odporność na korozję wysokotemperaturową w środowisku spalin zawierających siarkę (niska zawartość niklu, wysoka zawartość chromu, średnie zawartości wolframu), jak i wysoką twardość oraz odporność na ścieranie. Zawór z tak wytworzoną warstwą utwardzającą był z powodzeniem eksploatowany w rzeczywistych warunkach – w silniku głównym statku przez 3000 h.

## Materiał do badań

Badane zawory silników okrętowych wykonano ze stali H10S2M (0,374% C; 9,34% Cr; 0,402% Mn; 0,344% Ni; 2,46% Si; 0,822% Mo; 0,0162% P; 0,001% S) – odpowiednik wg. norm PN-EN X40CrSiMo10-2. Zawory poddano obróbce mechanicznej przed napawaniem warstwy utwardzającej. Na powierzchniach przylgni wykonano podtoczenia o szerokości ok. 6 mm i głębokości ok. 0,8 mm (rys. 1). Na tak przygotowane powierzchnie przylgni napawano za pomocą wiązki laserowej warstwę z proszku EuTroLoy 16012 o składzie chemicznym podanym w tablicy I. Do napawania wykorzystano laser diodowy dużej mocy ROFIN DL020.

W celu określenia warunków napawania laserowego przylgni grzybków zaworów wykonano próby wstępne napawania w pozycji podolnej po torze kołowym krążków o grubości 8 mm i średnicy 75 mm ze stali zaworowej X40CrSiMo10-2. Uzyskano warstwy napawane pozbawione pęknięć oraz wad wykrywalnych



**Rys. 1.** Powierzchnia przylgni zaworu przygotowanego do napawania laserowego  
**Fig. 1.** Prepared valve face for laser hard-facing

**Tablica I.** Skład chemiczny proszku  
**Table I.** Chemical composition of the powder

Proszek	Skład chemiczny, % mas.							
	C	Si	Cr	W	Ni	Mo	Fe	Co
EuTroLoy 16012	1,55	1,21	29,7	9,0	2,0	0,01	1,7	reszta

**Tablica II.** Warunki technologiczne napawania laserowego proszkowego laserem HPDL ROFIN DL020

**Table II.** Technological conditions for powder laser hard-facing by HPDL ROFIN DL020 laser

Parametry napawania	Moc lasera kW	Prędkość napawania, m/min	Natężenie podawania proszku g/min	Grubość ściegu napoiny, mm	Szerokość ściegu mm
1 warstwa – 2 ściegi	1,0-1,2	0,2	5,0	1,0-1,2	5,5-6,0
2 i 3 warstwa – 2 ściegi	1,1-1,2	0,2	5,0	1,3-1,5	6,0-6,5

metodami badań nieniszczących, a także wykazujące gładkie i równe lico. Warunki pracy zaworów wymagały uzyskania warstwy o szerokości 8,5÷9,0 mm i grubości napoiny 4,0÷4,5 mm. Ustalono, że optymalne wyniki otrzymuje się przy zastosowaniu parametrów napawania zestawionych w tablicy II. Szczegółowe parametry procesu napawania były następujące: długość ogniskowa wiązki lasera – 82 mm, szerokość wiązki lasera na powierzchni napawanej – ok. 6,8 mm, przepływ gazu (argonu) przenoszącego proszek – 2 l/min, przepływ gazu ochronnego (argonu) – 6 l/min, średnica dyszy podajnika proszku – 1,2 mm, kąt pochylenia dyszy – ok. 40°, odległość dyszy od jeziora spawalniczego – ok. 10 mm. Zakładka ściegów wynosiła 30÷40% (ok. 3,0 mm). Stosowano wstępne podgrzewanie zaworu do temperatury 250÷300°C.

Po napawaniu zawory zostały poddane obróbce skrawaniem w celu nadania im odpowiedniej geometrii (rys. 2). Obróbkę mechaniczną napawanych przylgni grzybków zaworowych przeprowadzono na tokarce uniwersalnej TUC-40. Obróbkę wykańczającą wykonano za pomocą szlifowania szlifierką Christ-Marine AB75H. Grubość warstwy napawanej po szlifowaniu wynosiła 1,2 mm.

Część tak przygotowanych zaworów poddano badaniom niszczącym w celu określenia ich struktury, składu chemicznego oraz twardości (rys. 3). Wykonano:  
– badania metalograficzne warstw napawanych w stanie wyjściowym na przekrojach prostopadłych do powierzchni oraz na powierzchni przylgni z wykorzystaniem mikroskopu optycznego i SEM;



**Rys. 2.** Zawory po napawaniu laserowym  
**Fig. 2.** Valves after laser hard-facing



**Rys. 3.** Zawór po obróbce mechanicznej  
**Fig. 3.** Valve after machining

- analizę składu chemicznego w poszczególnych charakterystycznych obszarach metodą EDAX;
  - pomiary mikrotwardości na przekroju napoin.
- Pozostałe zawory zostały zainstalowane w silniku głównym statku i pracowały w rzeczywistych warunkach przez 3000 h. Po tym czasie zawory zostały zdemontowane i poddane szczegółowym oględzinom oraz cyklowi badań takiemu samemu jak dla zaworów bezpośrednio po napawaniu.

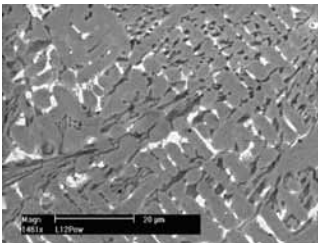
## Wyniki badań

Mikrostrukturę przekroju przy powierzchni warstwy napawanej laserowo przedstawiono na rysunku 4. Obserwowano typową, kierunkową strukturę dendrytyczną. W obszarach dendrytycznych występuje austenit kobaltowy umocniony roztworowo przez takie pierwiastki jak chrom i wolfram. Eutektyki międzydendrytyczne i węgliki są bogate w chrom, wolfram i krzem. Analiza fazowa wykazała obecność węglików typu  $M_{12}C$  ( $Co_6W_6C$ ) i  $M_{23}C_6$  ( $Cr_{23}C_6$ ).

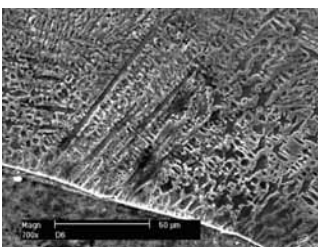
Na granicy napoina-stal nie zaobserwowano żadnych wad, a w przeważającej części występowała wyraźnie oddzielona warstwa napoiny o kierunkowej strukturze dendrytycznej (rys. 5).

Wykorzystując przystawkę EDS, wykonano analizę składu chemicznego na przekroju napoiny przy powierzchni oraz w pobliżu granicy napoina-stal. Dla porównania na wykresie podano także nominalny skład proszku do napawania (rys. 6).

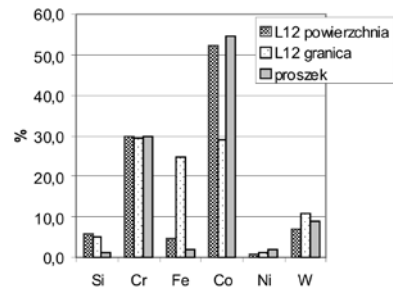
Z rysunku 6 wynika, że w warstwie przygranicznej napoiny nastąpił znaczny wzrost zawartości żelaza na skutek wymieszania z materiałem podłoża podczas napawania.



**Rys. 4.** SEM – typowa mikrostruktura wierzchniej warstwy napoiny – stan wyjściowy  
**Fig. 4.** SEM – typical microstructure of the surface layer of the padding weld – baseline



**Rys. 5.** SEM – mikrostruktura granicy napoina-stal  
**Fig. 5.** SEM – microstructure of deposit-steel boundary

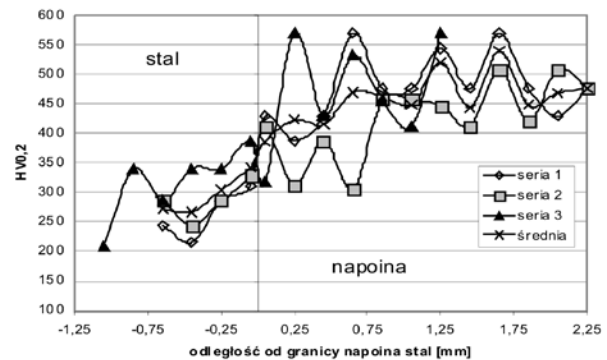


**Rys. 6.** Skład chemiczny napoiny przy powierzchni i w pobliżu granicy napoina-stal oraz nominalny skład chemiczny proszku EuTroLoy 16012

**Fig. 6.** Chemical composition of the padding weld close to surface and deposit-steel boundary and EuTroLoy 16012 powder chemical composition.

Dokonano także pomiaru twardości na przekroju warstwy napawanej. Ponieważ warstwa jest niejednorodna (twarde obszary eutektyk międzydendrytycznych, wydzielenia węglików oraz obszary dendrytyczne o niższej twardości), wyniki pomiarów wykazują znaczny rozrzut. Wykonano 3 serie pomiarów, na przekroju prostopadłym do powierzchni, przy obciążeniu 200 g oraz obliczono średnią wartość mikrotwardości (rys. 7).

Przez cały czas eksploatacji, 3000 h, zawory funkcjonowały bardzo dobrze. Wymontowano je i poddano oględzinom. Stwierdzono, że powierzchnia przylgni zaworu wylotowego uległa nieznacznej degradacji. Na rysunku 8 przedstawiono zmiany na powierzchni przylgni – wystąpienie warstwy zgorzeliny, a także śladów



**Rys. 7.** Twardość mierzona na przekroju prostopadłym do powierzchni napoiny – stan wyjściowy – 3 serie pomiarowe i wartość średnia  
**Fig. 7.** Hardness profiles in the perpendicular to deposit surface cross-section – initial state – 3 series of measurements and average value



**Rys. 8.** Powierzchnia przylgni zaworu po 3000 h pracy  
**Fig. 8.** The surface of valve face after 3000 h operation

odkształceń plastycznych. Na rysunku 9 widoczna jest wielowarstwowa zgorzelina na powierzchni napoiny ze skłonnością do pęknięcia i odwarstwiania się.

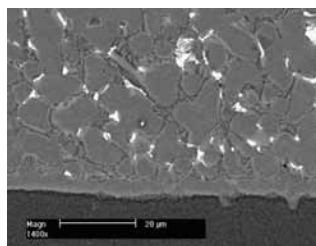
Badania metalograficzne napoin po eksploatacji nie wykazały znaczących zmian w mikrostrukturze w stosunku do stanu po napawaniu (rys. 10, 11).

Istotne zmiany stwierdzono w rozkładzie pierwiastków stopowych na przekroju napoiny. Na rysunku 12 przedstawiono skład chemiczny napoiny w obszarach przy powierzchni oraz na granicy napoina-stal. Porównując informacje z rysunków 6 i 12 można zaobserwować, że podczas eksploatacji nastąpiła dyfuzja żelaza z podłoża stalowego do napoiny, a koncentracja żelaza wzrosła do ponad 30% w całej objętości napoiny. Temperatura pracy – ok. 750°C i długi czas ekspozycji stanowią wystarczające warunki dla przebiegu procesów dyfuzyjnych w napoinie. Zjawisko wzbogacania napoiny w żelazo w wyniku dyfuzji z podłoża było widoczne we wcześniejszych badaniach, szczególnie wyraźnie zjawisko to było obserwowane po dłuższych czasach ekspozycji, np. 200 h [12,13].

Na rysunku 13 przedstawiono rozkład twardości (HV0,2) na przekroju napoiny w stanie wyjściowym i po eksploatacji przez 3000 h. Widać istotne obniżenie twardości napoiny oraz SWC stali podłoża.

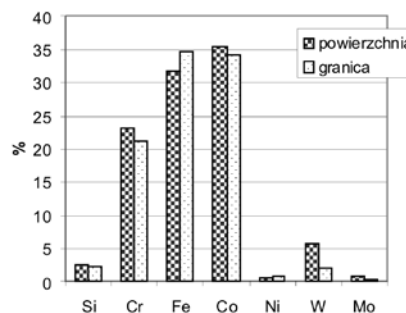
Zjawiska dyfuzyjne w napoinie zachodzące podczas pracy w podwyższonej temperaturze oraz zmiana morfologii węglików powodują zmniejszenie twardości napoiny, chociaż jej twardość nadal pozostaje na

znacznie wyższym poziomie niż twardość podłoża wykonanego ze stali zaworowej. Stan przyłgni i właściwości warstwy są na tyle dobre, że zawór mógłby być nadal eksploatowany.



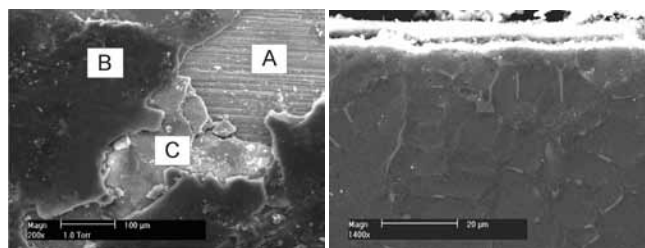
Rys. 11. SEM – mikrostruktura na granicy napoina-stal po pracy w silniku przez 3000 h

Fig. 11. SEM – microstructure in the deposit-steel boundary after 3000 h operation in engine



Rys. 12. Skład chemiczny napoiny przy powierzchni i w pobliżu granicy napoina-stal po 3000 h pracy w silniku

Fig. 12. Chemical composition of padding weld close to surface and in the deposit-steel boundary after 3000 h operation

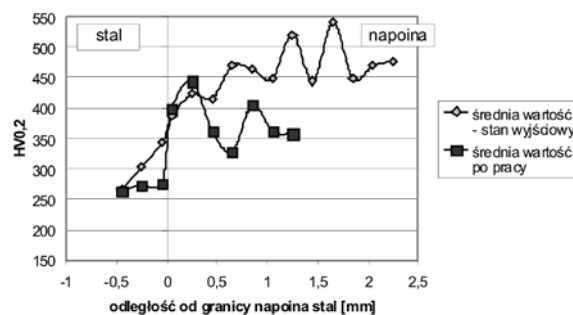


Rys. 9. SEM – powierzchnia przyłgni po 3000 h pracy: A – odsłonięta powierzchnia metaliczna, B, C – kruszące się kolejne warstwy zgorzeliny

Fig. 9. SEM – valve face surface after 3000 h work; A – uncovered metallic surface, B, C – crumble following layers of scale

Rys. 10. SEM – mikrostruktura na przekroju prostopadłym do powierzchni napoiny po 3000 h pracy

Fig. 10. SEM – microstructure of perpendicular to deposit surface cross-section, after 3000 h operation



Rys. 13. Twardość mierzona na przekroju prostopadłym do powierzchni napoiny – stan po 3000 h pracy oraz porównanie z wartością średnią dla stanu wyjściowego

Fig. 13. Hardness profiles in the perpendicular to deposit surface cross-section – after 3000 h operations and comparison with average value for initial state

## Wnioski

Napawanie laserowe przyłgni zaworu stopem na bazie kobaltu zapewniło dobre właściwości użytkowe, co zostało potwierdzone wynikami badań przeprowadzonych w rzeczywistych warunkach eksploatacji zaworu przez 3000 h.

Zastosowanie technologii napawania laserowego umożliwiło uzyskanie warstwy o dobrych właściwościach przy minimalizacji zużycia kosztownego proszku na bazie kobaltu.

Napawanie laserowe dało możliwość precyzyjnego kształtowania warstwy o założonych wymiarach.

Zastosowane rozwiązanie technologiczne może być praktycznie stosowane zarówno w celu wydłużenia czasu eksploatacji nowych zaworów, jak i dla potrzeb regeneracji.



## Literatura

- [1] Kolaska H., Dreyer K.: Metall 45 (1991) 224.
- [2] Schlager D., Theiler C., Kohn H.: Protection against high temperature corrosion with laser welded claddings, applied and tested on exhaust valve discs of large diesel engines burning heavy fuel oil; Materials and Corrosion 53, 103+110 (2002).
- [3] Kawana, H. Ichimura, Y. Iwata, S. Ono; Development of PVD ceramic coatings for valve seats; Surface and Coatings Technology 86-87 (1996) 212-217.
- [4] Elliott P.; Choose materials for high-temperature environments; Chemical Engineering Progress; New York; Feb 2001, Vol. 97 (2).
- [5] Ming-xi Li, Yi-zhu He, Guo-xiong: Laser cladding Co-based alloy/SiCp composite coatings on IF steel; Sun Materials and Design, 25 (2004) 355-358.
- [6] Peidao D., Jianglong L., Gongqi S., Shouze Z., Pengjun C.; Laser surface alloying of a low alloy steel with cobalt; Journal of Materials Processing Technology, 58 (1996) 131-135.
- [7] Gemelli E., Gallerie A., Caillet M.: Improvement of Resistance to Oxidation by Laser Alloying on a Tool Steel; Scripta Materialia, Vol. 39, No. 10, (1998) 1345-1352.
- [8] Kvernes: In: Coatings for high temperature applications (Eds. E. Lang), Elsevier Applied Science Publishers, London and New York 1983, 361-394.
- [9] Hidouci, Pelletier J.M., Ducoin F., Dezert D., Guerjouna R. E: Microstructural and mechanical characteristics of laser coatings; Surface and Coatings Technology, 123 (2000).
- [10] Jendrzewski R., Conde A., De Damborenea J., Sliwinski G.: Characterisation of the laser-clad stellite layers for protective coatings; Materials and Design, 23 (2002).
- [11] Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej pt.: Opracowanie warunków technologicznych napawania laserowego i plazmowego proszkami na osnowie kobaltu, przyłgni grzybków zaworów ze stali X40CrSiMo10-2 oraz wykonanie partii próbnej zaworów GRANT KBN – 015721 4TO8C 06224.
- [12] Smolenska H.: The elevated temperatures influence on the cobalt base cladding layer; Inżynieria Materiałowa. – 2010, nr 3(175), s. 366-368.
- [13] Kończewicz W., Smoleńska H.: The resistance investigation of the marine engine exhaust valve using the modelling chamber; Journal of Kones Powertrain and Transport. – Vol. 15, nr 4 (2008), s. 255-262.

## I Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna NAPAWANIE – POSTĘP I ZASTOSOWANIA Wrocław, 19-21 wrzesień 2011

### Sesja II Technologie plazmowe w napawaniu

Wtorek, 20.09.2011			
Przewodniczący: prof. dr hab. inż. Jerzy Nowacki, prof. dr hab. inż. Johannes Wilden			
Godzina	Część	Autorzy	Tytuł
9 <sup>00</sup>	A	Prof. dr hab. inż. Jacek Senkara Poli technika Warszawska	Oddziaływania międzyfazowe w procesie napawania plazmowego proszkowego
9 <sup>20</sup>	A	Mgr inż. Mariusz Bober, prof. dr hab. inż. Jacek Senkara Poli technika Warszawska	Badania porównawcze napawanych plazmowo warstw niklowych z węglkami Ti i Cr
9 <sup>40</sup>	A	Dr inż. Jerzy Jakubowski, mgr inż. Piotr Wysocki, prof. dr hab. inż. Jacek Senkara Poli technika Warszawska	Selektywne napawanie regeneracyjne warstw Ni-WC na tytanowe łopatkę sprężarki silnika lotniczego
10 <sup>00</sup>	A	Prof. dr hab. inż. Andrzej Klimpel, dr inż. Agnieszka Rzeźnikiewicz Poli technika Śląska, Gliwice	Technologia naprawy uchwytów kłapy dużej birnej
PRZERWA NA KAWĘ			
Przewodniczący: prof. dr hab. inż. Andrzej Kolasa, dr hab. inż. Igor Riabcev			
10 <sup>40</sup>	B	Prof. Dr.-Ing. habil. Johannes Wilden, Hochschule Niederrhein, Niemcy Jean Pierre Bergman, TU Ilmenau Niemcy	Automatisiertes Regenerieren von großen Tiefziehwerkzeugen
11 <sup>00</sup>	B	Dr inż. Hanna Smoleńska, Poli technika Gdańska Mgr inż. Włodzimierz Kończewicz, Akademia Morska Prof. dr hab. inż. Jerzy Łabanowski, Poli technika Gdańska	Wykorzystanie napawania plazmowego do regeneracji zaworów silników okrętowych
11 <sup>20</sup>	B	Dr inż. Tomasz Kik, Dr inż. Jacek Górka, Dr inż. Artur Czupryński, Mgr inż. A. Martyniszyn Poli technika Śląska	Napawanie krawędzi przedmiotów metodą TIG i PTA
11 <sup>40</sup>	B	Dr inż. Jacek Górka, Dr inż. Artur Czupryński, Dr inż. Tomasz Kik, Mgr inż. Marcin Melcer Poli technika Śląska	Przemysłowe aplikacje napawania plazmowego proszkowego
WSPÓLNA FOTOGRAFIA			

Program sesji posterowej na stronie 42