

WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI WARSTW NATRYSKIWANYCH CIEPLNIE

CHOSEN PROPERTIES OF COATINGS OBTAINED BY THERMAL SPRAYING

W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości warstw z brązu aluminiowego, warstw ze stali X46Cr13 oraz warstw natryskanych z drutu proszkowego gat. Spray-Arc 100. Wytrzymałość na rozciąganie natryskanych warstw zmieniała się zależnie od odległości natryskiwania oraz od rodzaju natryskiwanego materiału. Wytrzymałość warstw ze stali X46Cr13 osiągnęła wartość ponad 180 MPa. W warstwach wytworzonych z drutu proszkowego twardość osnowy metalicznej wynosiła ok. 530 HV0,2, natomiast twardość wydzielen w warstwie wynosiła od 1030 – 1800 HV0,5. Badania metalograficzne wykazały, że warstwy z brązu aluminiowego charakteryzowały się wysoką jakością, zwartą, drobnoziarnistą budową i zawierały najmniejszą, spośród badanych warstw, ilość widocznych porów.

Słowa kluczowe: *Natryskiwanie cieplne, wytrzymałość na rozciąganie, rapid tooling*

This paper describes results of research tests of sprayed coatings of aluminium bronze, steel X46Cr13 and flux-cored wire Spray – Arc 100. The influence of a stand off distance or a sort of material on the tensile strength of coatings was investigated. The tensile strength of X46Cr13 was reached the maximum value circa 180 MPa. Microhardness of coatings of Spray–Arc 100 in metal matrix is 530 HV0,2, and in grain releases is 1030 – 1800 HV0,5. It was found that the quality of sprayed layers of alumina bronze is high, low porosity, fine – grained and compact structure in metallographic observations.

Keywords: *Thermal spraying, tensile strength, rapid tooling*

1. Wstęp

Rozwój metod natryskiwania cieplnego, opracowanie nowych materiałów na warstwy oraz nowoczesne konstrukcje urządzeń do natryskiwania przyczyniły się do znacznego poszerzenia zakresu ich zastosowania. Nadal konwencjonalne natryskiwanie cieplne wykorzystywane jest do regeneracji zużytych części maszyn [1,2], do celów ochrony przed korozją konstrukcji stalowych [3], do zmniejszania ilości wadliwych wyrobów powstałych podczas obróbki skrawaniem, czy usuwania niektórych wad w wyrobach odlewanych [4]. Natomiast nowoczesne zastosowania to świadome kształtowanie szczególnych właściwości powierzchni części maszyn i urządzeń ukierunkowane na określone warunki ich pracy. Mogą to być np. warstwy odporne na kawitację [5], korozję i erozję wysokotemperaturową [6], zwiększające odporność na ścieranie abrazyjne [7], lub też warstwy, które powinny w warunkach pracy ulegać łatwemu ścieraniu – tzw. abradable seals [8]. Nowe metody natryskiwania i nowe materiały znajdują

zastosowanie w medycynie – w budowie endoprotez [9]. Metoda natryskiwania cieplnego może być też alternatywną metodą dla precyzyjnego odlewania drobnych części [10].

Szczególne miejsce natryskiwanie cieplne zajmuje w technikach szybkiego wytwarzania form do wtryskiwania tworzyw sztucznych, które stanowią podstawową część składową techniki znanej jako RAPID PROTOTYPING [11]. Za pomocą techniki natryskiwania cieplnego wykonuje się gniazda form wtryskowych do tworzyw sztucznych, jak też matryce i stemple do plastycznego formowania wyrobów z blach [12]. Technologia wykonania takiego urządzenia polega na napyleniu sprężonym gazem (zwykle powietrzem) stopionych cząstek metalu na model wzorcowy. Natryskiwana warstwa metalu lub stopu tworzy formę skorupową, która odwzorowuje powierzchnię i kształt modelu wzorcowego. Po oddzieleniu modelu skorupę metalową wzmacnia się odpowiednim kompozytem oraz dołącza wypychacze

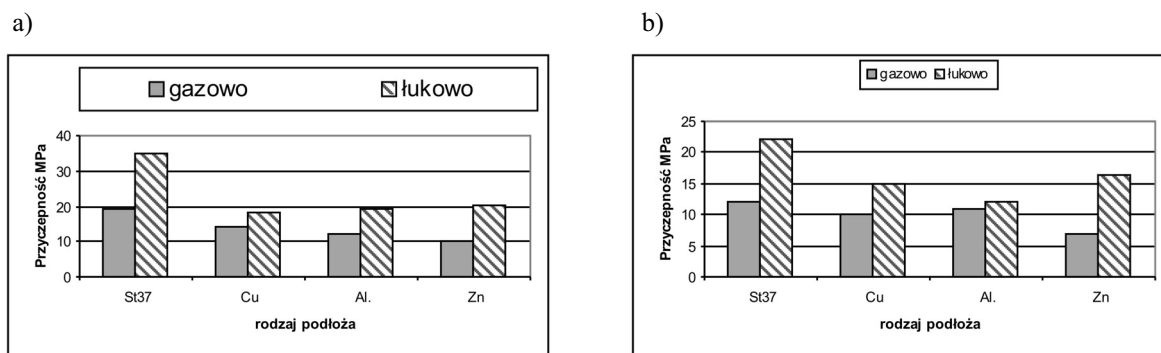
i kanały chłodzące. Następnie gniazdo umieszcza się w płycie formy do wtryskiwania tworzyw sztucznych. Wykonane w ten sposób formy używane są zarówno w konwencjonalnych jak i numerycznych maszynach technologicznych tj. wtryskarkach i i prasach [13].

2. Właściwości natryskanych warstw

Metody badań właściwości warstw zależą przede wszystkim od warunków pracy oraz od rodzaju obciążeń działających na warstwy podczas eksploatacji. Poddaje się je badaniom twardości, wytrzymałości na ścinanie, wytrzymałości zmęczeniowej, odporności na zużycie ściernie, itp. [4, 14]. Najczęściej badaną właściwością warstw natryskiwanych ciepłnie jest przyczepność warstw do powierzchni podłoża. Badaniom przyczepności poddaje się również warstwy nakładane np. metodą galwaniczną [16]. Próba przyczepności polega na odrywaniu warstwy od podłoża przy sile działającej prostopadle do warstwy. Chociaż w praktyce taki rodzaj obciążeń występuje bardzo rzadko podczas eksploatacji warstw, to wyniki tej próby wykorzystywane są głównie do oceny jakości powiązania warstwy z powierzchnią natryskiwanego przedmiotu. Próbę przyczepności wykorzystuje się również przy optymalizacji warunków natryskiwania,

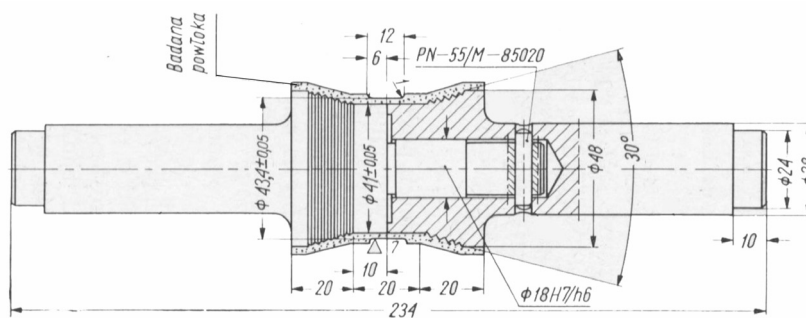
a także do oceny prawidłowości jej przeprowadzenia i wielu innych. Użyteczność warstwy pracującej razem z natryskanym przedmiotem jest tym większa im mocniej przylegają one do siebie. Przyczepność zależy od wielu czynników; między innymi wpływ na nią mają rodzaj materiału warstwy oraz rodzaj materiału podłoża czy metoda i parametry natryskiwania (rys. 1).

Nieco innych właściwości oczekuje się od warstw, które pracują jako materiał samoistny, bez podłoża, jako część w kształcie tzw. skorupy. Warstwa taka powinna charakteryzować się dużą spójnością wewnętrzną i mieć dobrą wytrzymałość na rozciąganie. Kierunek działania sił rozciągających może być prostopadły do powierzchni warstwy – wówczas określana jest spójność wewnętrzna warstwy lub też prostopadły do przekroju poprzecznego warstwy – wówczas wynik próby stanowi klasyczną własność wytrzymałości na rozciąganie. Badania warstw z metalizacji natryskowej gazowej i łukowej dla różnych materiałów wskazują, że wyniki z takich badań różnią się znacznie [4, 14, 16]. Kształt próbki stosowanej do badań wytrzymałości warstw na rozciąganie w kierunku prostopadłym do jej przekroju poprzecznego pokazano na rys. 2, a wyniki badań warstw z metalizacji natryskowej łukowej przedstawiono na rys. 3.



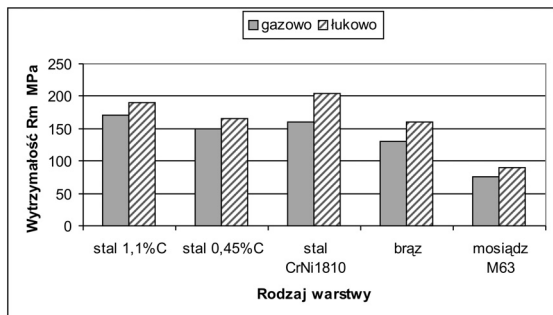
Rys. 1. Porównanie przyczepności warstw natryskanych gazowo i łukowo z różnych materiałów i na różne podłoża. a) warstwa ze stali 0,1%C, b) warstwa Al [14]

Fig. 1. Comparison of coating adhesion obtained by arc – and flame – spraying techniques and using different materials and substrates a) 0,1%C steel coating, b) aluminium coating



Rys. 2. Próbkę do badań wytrzymałości warstwy na rozciąganie [14]

Fig. 2. The tensile test piece for sprayed coatings [14]



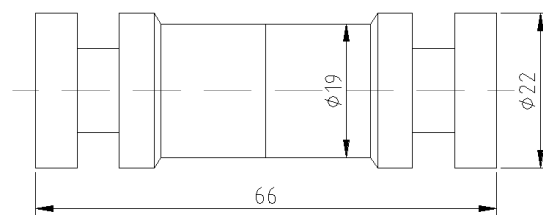
Rys. 3. Wytrzymałość na rozciąganie warstw z metalizacji natryskowej [4]

Fig. 3. The tensile strength of arc spraying coatings [4]

Z porównania wyników badań przyczepności (rys. 1) oraz wytrzymałości na rozciąganie (rys. 3) wynika, że właściwości te różnią się w sposób istotny i że na podstawie jednej właściwości nie można wnioskować o drugiej z uwagi na brak widocznej korelacji. Jedyne, co można zauważyć to w obu przypadkach lepszymi właściwościami cechują się warstwy natryskiwane łukowo w porównaniu do warstw natryskiwanych gazowo.

3. Część badawcza

W pracy badano wytrzymałość warstw metalizacyjnych na rozciąganie przy działaniu siły prostopadłej do przekroju poprzecznego warstwy. Warstwy natryskiwano na próbki wykonane ze stali gat. S235 o kształcie pokazanym na rys. 4. W porównaniu do próbki pokazanej na rys. 2 wprowadzono szereg zmian w jej konstrukcji, zachowując jednak zasadę jej działania. Zmieniono część chwytową, dopasowując ją do oprzyrządowania maszyny wytrzymałościowej oraz wykonano część walcową w miejsce stożkowej pod natryskiwaną warstwę. W miejsce montażu części próbek za pomocą kołka zastosowano odpowiednio dopasowaną śrubę przechodzącą przez współosiowe otwory w obu częściach próbki. Również zrezygnowano z nacinania gwintu na powierzchni walcowej pod warstwę ograniczając się tylko do obróbki strumieniowo ścierniej elektrokorundem o wielkości ziaren ok. 2.5 mm.



Rys. 4. Składana stalowa próbka cylindryczna do natryskiwania

Fig. 4. The sprayed piece

Proces metalizacji gazowej wykonano przy pomocy pistoletu Spray Jet 88, natomiast metalizację łukową urządzeniem f-my Mogul typu Arc Spray Unit (rys. 5).



Rys. 5. Proces metalizacji łukowej prowadzony urządzeniem Mogul Arc Spray Unit podczas natryskiwania warstw do badań wytrzymałości na rozciąganie

Fig. 5. Arc spraying process led by the Mogul Arc Spray Unit

Na warstwy zastosowano druty f-my AMIL [15], wykonane z brązu aluminiowego CuAl8, stali chromowej martenzytycznej X46Cr13 oraz drutu proszkowego Spray-Arc 100 zawierającej 19%Cr i 1.6% C. Zastosowane materiały i oznaczenia próbek przedstawiono w tab. 1.

Tab. 1. Materiały na warstwy i oznaczenie próbek do badań wytrzymałości na rozciąganie.

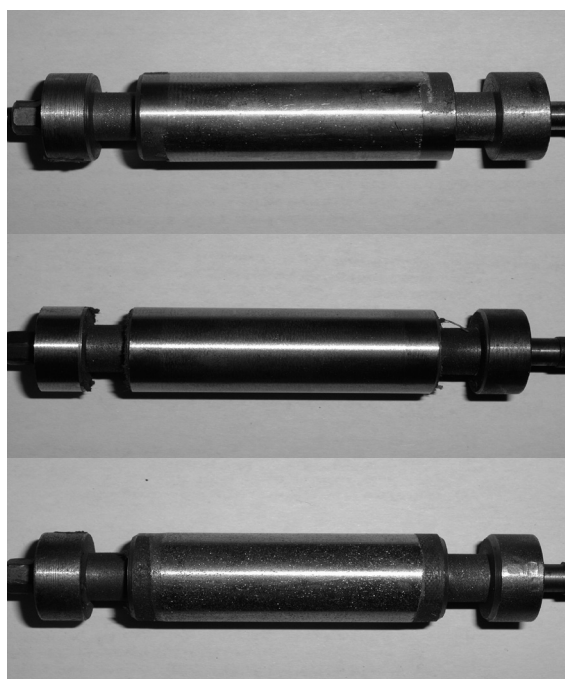
Tab. 1. Sprayed materials and spraying methods and designation of tensile test pieces.

l.p.	Materiał	Oznaczenie drutu (wg AMIL)	Nr materiału wg DIN EN 1274	Oznaczenie próbek	Odległość pistoletu natryskowego od próbki mm	Metoda natryskiwania
1.	Brąz aluminiowy	CuAl8	4.6	A1	100	gazowo
				A3	200	
2.	Stal nierdzewna	X46Cr13	5.6	A5	200	łukowo
				A6	250	
				A7	100	
3.	Drut proszkowy	Spray-Arc 100	-	A8	150	
				A9	200	

Tablica 2. Zastosowane parametry do procesu natryskiwania.
Table 2. Spraying parameters used in the experiment.

L.p.	Oznaczenie próbek	Materiał natryskiwany	Napięcie łuku U (V)	Nateżenie prądu I (A)	Ciśnienie powietrza MPa	Średnica drutu mm
1.	A1	Brąz aluminiowy	-	-	-	3,17
2.	A3					
3.	A5					
4.	A6	Stal nierdzewna	34	-	0,7	1,6
5.	A7	Drut proszkowy	20	200	0,6	1,6
6.	A8					
7.	A9					

Parametry natryskiwania warstw przedstawiono w tab. 2, a wygląd natryskanych warstw pokazano na rys. 6.

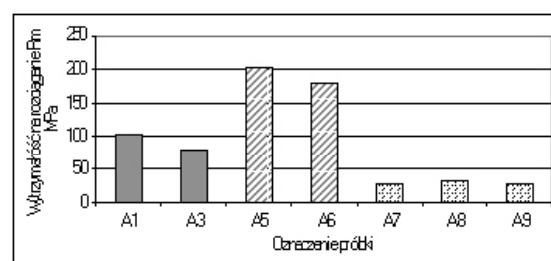


Rys. 6. Wygląd natryskanych warstw na próbce stalowej od góry A3, A6, A9
Fig. 6. Sprayed coatings: test pieces A3, A6, A9

4. Wyniki badań

Próbki do badania wytrzymałości materiału warstw natryskanych przygotowano przez szlifowanie. Zmierzono również średnicę próbek przed i po natryskiwaniu, co pozwoliło na obliczenie grubości i pola przekroju poprzecznego powłoki. Głowica umieszczona na belce maszyny wytrzymałościowej Instron przesuwała się z prędkością 5mm/min. Siła oraz wydłużenie rejestrowane były przez komputer sprzężony z maszyną wytrzymałościową z częstością próbkowania 10 punktów na sekundę. Wyniki z próby wytrzymałości na rozciąganie warstw przedstawiono

na rys. 7. Dla warstwy z drutu proszkowego wykonano pomiary twardości, a wyniki przedstawiono w tablicy 3. Struktury warstw natryskanych z poszczególnych materiałów przedstawiono na rys. 8.



Rys. 7. Wytrzymałość warstw na rozciąganie
Fig. 7. Tensile strength of sprayed coatings

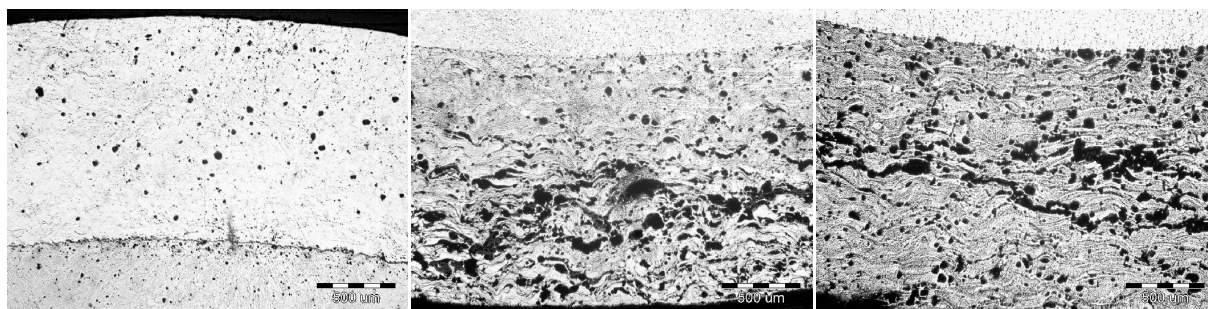
Tab. 3. Twardość warstw natryskanych drutem proszkowym.

Tab. 3. Microhardness of coatings Spray-Arc 100.

l.p.	Miejsce pomiaru	Twardość
1.	Osnowa powłoki	550HV0,2
		490HV0,2
		560HV0,2
2.	Wydzielenia w strukturze	1030HV0,5
		1060HV0,5
		1300HV0,5
		1500HV0,5
		1800HV0,5
		1500HV0,5
		1800HV0,5

5. Omówienie wyników badań

Na podstawie wyników z przeprowadzonych badań można zauważyć znaczne różnice w wytrzymałości warstw natryskanych cieplnie zależnie od rodzaju materiału oraz metody natryskiwania. Najwyższą wytrzymałość na rozciąganie, wynoszącą ok. 190 MPa, zanotowano dla warstw natryskanych łukowo drutem ze stali chromowej X46Cr13 (odpowiednik 4H13). To potwierdza ogólną opinię o dobrych właściwościach warstw z tej stali i o dużej przydatności do celów



Rys. 8. Struktury warstw natryskiwanych z brązu aluminiowego, stali nierdzewnej, Spray-Arc 100 (w kolejności od góry do dołu), powiększenie 50x

Fig. 8. Cross – section of sprayed layers of aluminium bronze, stainless steel and Spray-Arc 100, magnification 50x

metalizacji natryskowej zwłaszcza w regeneracji części maszyn.

Dobrymi właściwościami podczas natryskiwania cechuje się też brąz aluminiowy BA8. Otrzymana warstwa wykazuje dużą gęstość z małą zawartością tlenków i porów gazowych. Jej wytrzymałość na rozciąganie jest mniejsza od warstwy stalowej i wynosi ok. 90 MPa. Należy zaznaczyć, że warstwa z brązu była natryskiwana tylko gazowo z uwagi na brak odpowiedniego drutu do metalizacji łukowej. Jednak, jak wcześniej przedstawiono w przeglądzie literatury, warstwy z metalizacji łukowej wykazują wyższe właściwości mechaniczne od tych natryskiwanych gazowo, można zatem spodziewać się, że również w tym przypadku osiągnięto by większą wytrzymałość.

Wyraźnie małą wytrzymałość, wynoszącą ok. 30 MPa, odnotowano dla warstw natryskanych z drutu proszkowego gat. Spray-Arc 100. Materiał ten prze-

znaczony jest głównie do regeneracji części maszyn. W jego strukturze występuje mocna osnowa stalowa o twardości ok. 500 HV_{0,2} oraz wydzielenia o twardości od 1030 – 1800 HV_{0,5} co czyni je szczególnie przydatnymi do natryskiwania części maszyn, których powierzchnie podlegają intensywnemu zużyciu ściernemu. Wymagane jednak jest przy tym zastosowanie warstwy podkładowej z materiału, który wykazuje dużą przyczepność, np. warstwę z drutu kompozytowego typu NiAl5. Warstwy natryskane z drutu gat. Spray-Arc 100 mają natomiast mniejszą przydatność do wytwarzania form samoistnych skorupowych, chociaż istnieje możliwość ich wykorzystania w połączeniu tzw. przekładkowym z innym materiałem jako kompozycja dwuwarstwowa. Materiał jest najbardziej porowaty spośród innych natryskanych materiałów i jest kruchy.

6. Literatura

- [1] Dziubiński J., Mazur W.: *Zastosowanie natryskiwania łukowego do regeneracji elementów hydrauliki siłowej*. Eksploatacja Maszyn nr 2-3, 1987r, s. 26-28.
- [2] Białucki P., Kaczmarek R., Kozerski S.: *Analiza wytrzymałości zmęczeniowej elementów natryskiwanych cieplnie*. Eksploatacja Maszyn nr 2-3, 1987r, s. 19-20.
- [3] Seils A.: *Korrosionsschutz von Stahlbauwerken durch Metallspritzen*. Thermische Spritzverfahren, DVS-Sondertagung, Saarbrücken 1963r, s. 78-88.
- [4] Kretzschmar E.: *Metall-, Keramik- und Plastspritzen*. VEB Verlag Technik Berlin, 1969r.
- [5] Drygas A.: *Flammgespritzte Verschleisschutzbeschichtung in Kaplan turbinen*. Mat. Konf. ITSC'90, Essen 1990r. DVS Berichte, s. 78-81.
- [6] Heath G.R., Kammer P.A.: *The high temperature erosion behavior of arc-sprayed coatings*. Mat. Konf. ITSC'96, Essen 1996r. DVS Berichte, s. 76-79.
- [7] Sikorski A., Białucki P., Kozerski S.: *Properties of ferrochromium thermal sprayed layers with different carbon contents*. Mat. Konf. ITSC'96, Essen 1996r. DVS Berichte, s. 65-67.
- [8] Rhys-Jones T.N.: *Application of thermally sprayed coatings systems in aero engines*. Mat. Konf. ITSC'89, Londyn 1989r. Abington Publishing, Vol. 1 s. 87-100.
- [9] Yankee S.J., Pletka B.J., Luckey H.A., Johnson W.A.: *Process for fabricating hydroxylapatite coatings for biomedical applications*. Thermal Spray and Application. Mat. Konf. NTSC'3, Long Beach, CA, USA 1990, s. 433-438.
- [10] Wilden J., Schick T., Wank A.: *Thermal spray moulding – production of microcomponents*. Mat. Konf. ITSC'02, Essen 2002r, s. 144-148.

- [11] Chlebus E.: *Innowacyjne technologie Rapid Prototyping w rozwoju produktu*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2003.
- [12] Aumueler B., Schneider D.W., Eisnegg K., Krauss H., Kroemmer W.: *Herstellung von Kleinserienwerkzeugen fuer die Blechumformung durch gespritzte Schichten in Schalen-Bauweise*. Mat. Konf. ITSC'02, Essen 2002r, s. 149-152.
- [13] Chlebus E.: *Techniki komputerowe CAX w inżynierii produkcji*. WNT Warszawa 2000.
- [14] Milewski W.: *Elektrometalizacja*. WNT Warszawa 1968.
- [15] Prospekt reklamowy firmy AMIL, 2004r.
- [16] Kostrzewa S., Nowak B.: *Podstawy regeneracji części pojazdów samochodowych*. WKŁ Warszawa 1979.

Dr hab. inż. Andrzej AMBROZIAK, prof. ndzw. PWr

Dr inż. Piotr BIAŁUCKI

Mgr inż. Artur POROCHOŃSKI

Politechnika Wrocławska

Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji

Zakład Spawalnictwa,

50-371 Wrocław, ul. Łukasiewicza 3/5

Tel./fax (071) 320-42-55

e-mailartur.porochonski@pwr.wroc.pl
