

Miesięcznik
Naukowo-Techniczny

Nr 2/2014

przegląd SPAWALNICTWA

Welding Technology Review

SciTeex Group

MACHINES FOR SURFACE PREPARATION AND FINISHING

POLAND
GERMANY
FRANCE
RUSSIA
UKRAINE

MASZYNY DO OBRÓBKI POWIERZCHNI



Komora do śrutowania
i metalizacji natryskowej
BLASTLUX^{RS} series



GOLD MEDAL
Poznan International Fair
2010



ISO 9001:2000
ISO 14001:2004
OHSAS 18001:2007



Gazele Biznesu
2006, 2007, 2008, 2009, 2010

Rok założenia 1928 PL ISSN 0033-2364 Index 37125 Cena w prenumeracie 17 zł (w tym 5% VAT)



INSTYTUT SPAWALNICTWA
Polskie Spawalnicze Centrum Doskonałości

Instytut Spawalnictwa zaprasza na


56. Naukowo-Techniczną Konferencję Spawalniczą

pod hasłem:

SPAWALNICTWO – ZAWSZE MOŻNA WIĘCEJ

oraz

Międzynarodowe Targi Spawalnicze ExpoWELDING



Zapraszamy wszystkich
zainteresowanych tematyką
konferencji do przesyłania referatów
pod adres:

mgr Alojzy Kajzerek,
tel.: 32 33 58 201
fax.: 32 231 46 52
Alojzy.Kajzerek@is.gliwice.pl

14 – 16 października 2014 roku
ExpoSilesia w Sosnowcu



Instytut Spawalnictwa
ul. Bł. Czesława 16-18, 44-100 Gliwice
tel.: 32 231 00 11, fax: 32 231 46 52
is@is.gliwice.pl, www.is.gliwice.pl

Wydawca/Publisher

Redakcja Przegląd Spawalnictwa Agenda Wydawnicza SIMP
ul. Świętokrzyska 14a, 00-050 Warszawa
tel.: 22 827 25 42, fax: 22 336 14 79
e-mail: pspaw@ps.pl,
www.pspaw.ps.pl

Redaktor Naczelny / Editor-in-Chief

Prof. Jerzy Nowacki – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Z-cy Redaktora Naczelnego / Deputies Editor-in-Chief

Prof. Tomasz Chmielewski – Politechnika Warszawska; ds. naukowych / Science Affairs
Prof. Andrzej Klimpel – Politechnika Śląska; ds. Naukowych / Science Affairs
Dr inż. Lechosław Tuz – ds. Wydawniczych / Publishing Affairs
Mgr Włodzimierz Jacek Walczak – Linde Gas Polska; ds. Współpracy z Przemysłem / Industry Cooperation Affairs

Sekretarze / Submission Officers

Lic. Norbert Kozłowski
Dr inż. Adam Sajek

Redaktorzy Działów / Associate Editors

Prof. Leszek A. Dobrzański – Politechnika Śląska – Nowe materiały / New Materials
Prof. Zbigniew Mirski – Politechnika Wroclawska – Lutowanie i klejenie / Brazing and Bonding
Prof. Jacek Stania – Instytut Spawalnictwa w Gliwicach – Praktyka spawalnicza / Welding Practice
Mgr inż. Bogusław Olech – Polskie Towarzystwo Badań Nieniszczących SIMP, Oddział w Szczecinie
Prof. Władysław Włosiński – Polska Akademia Nauk – Zaawansowane technologie / Advanced Technologies

Międzynarodowa Rada Programowa / International Scientific Committee

Prof. Jan Pilarczyk – Instytut Spawalnictwa w Gliwicach, Przewodniczący / President
Prof. Andrzej Ambroziak – Politechnika Wroclawska, Zastępca / Vice-President

Komitet Naukowy / Scientific Committee

Prof. Alexander I. Balitskii – National Academy of Science, Ukraina
Dipl. Ing. Paweł Baryliszyn – Volkswagen Aktiengesellschaft, Wolfsburg, Niemcy
Prof. Gilmar Ferreira Batalha – Polytechnic School of University Sao Paulo, Brazylia
Dr inż. Hubert Drzeniek – Amil Werkstofftechnologie, Berlin, Niemcy
Prof. Nikolaos Gouskos – University of Athens, Grecja
Prof. Georgij M. Grigorenko – National Academy of Science, Ukraina
Prof. Jolanta Janczak-Rusch – EMPA, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Szwajcaria
Prof. Andrzej Kolasa – Politechnika Warszawska, Polska
Prof. Valeriy D. Kuznetsov – Kyiv Polytechnical Institute, Ukraina
Prof. Jerzy Łabanowski – Politechnika Gdańska, Polska
Prof. Leonid M. Łobanow – National Academy of Science, Ukraina
Prof. George Papadopoulos – University of Athens, Grecja
Prof. Borys Je. Paton – National Academy of Science, Ukraina
Dr inż. Jan Plewniak – Politechnika Częstochowska, Polska
Dr inż. Anna Pociła – Politechnika Opolska, Polska
Prof. Jacek Senkara – Politechnika Warszawska, Polska
Prof. Andrzej Skorupa – Akademia Górniczo-Hutnicza Kraków, Polska
Prof. Božo Smoljan – University of Rijeka, Chorwacja
Prof. Mirko Sokovic – University of Ljubljana, Słowenia
Prof. Edmund Tasak – Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, Polska
Prof. Johannes Wilden – University of Applied Sciences, Krefeld, Niemcy
Prof. Hongyan Zhang – University of Toledo, USA

Komitet ds. współpracy z przemysłem / Committee of Industry Cooperation

Prezes Marek Bryś – Messer Eutectic Castolin, Polska
Dyrektor Michał Kozłowski – ESAB Polska, Polska
Prezes Mirosław Nowak – Technika Spawalnicza Poznań, Polska
Dyrektor Zbigniew Pawłowski – Lincoln Electric Bester, Polska
Prezes Andrzej Piłat – Związek Zakładów Doskonalenia Zawodowego, Polska
Prezes Jacek Rutkowski – Kemppi, Polska
Dr inż. Krzysztof Sadurski – Lincoln Electric Bester, Polska
Prezes Andrzej Siennicki – CLOOS Polska, Polska
Prezes Jacek Świtkowski – GCE Polska, Polska

Korekta, druk / Correction, printing

Korekta: mgr inż. Halina Wierzbicka,
Redaktor statystyczny: mgr Marcin R. Konopka, mgr inż. Sławomir Krajewski
Redaktor językowy: mgr Marcin G. Żytkowski
Druk: EDIT Sp. z o.o., Warszawa

FORUM SPAWALNIKÓW POLSKICH

przegląd SPAWALNICTWA

Welding Technology Review

MIESIĘCZNIK NAUKOWO-TECHNICZNY AGENDA WYDAWNICZA SIMP

rok założenia 1928
dawniej

SPAWANIE
I CIĘCIE METALI

Nr 2/2014

PL ISSN 0033-2364

LXXXVI

SPIS TREŚCI - CONTENTS

Anna Olbrycht*

Powłoki metalowe jako zabezpieczenie antykorozyjne konstrukcji stalowych

Metal coatings as corrosion protection of steel structures..... 2

Tomasz Chmielewski, Dariusz Golański, Janusz Bazela, Grzegorz Gontarz*

Badania właściwości powłok Zn i Al natrykiwanych łukowo na stal S235JR

Investigation of the properties of Zn and Al coatings deposited by arc spraying onto S235JR steel substrate 7

Jarosław Grześ*

Oporność korozyjna wybranych powłok nakładanych metodą tamponową

Corrosion resistance of selected coatings deposited by the brush planting method..... 14

Mariusz Piękniewski

Wytwarzanie stalowych i aluminiowych konstrukcji budowlanych w świetle zmian wymagań.....

..... 19

Marek R. Brzeziński*

Współczesne metody mechanicznego przygotowania powierzchni konstrukcji stalowych do zabezpieczeń antykorozyjnych.....

..... 20

Janusz Bazela - SciTeeX Group Sp. z o.o.

Zabezpieczenia antykorozyjne konstrukcji stalowych dla oznaczenia CE zgodnie z wymogami PN-EN 1090.....

..... 25

Andrzej Radziszewski - Resurs

Powłoki z metali nieżelaznych i ich stopów natrykiwane cieplnie. Aplikacje przemysłowe.....

..... 33

Bernard Wichtowski, Ryszard Pakos*

Zagadnienia materiałowo-spawalnicze modernizowanego stalowego mostu kolejowego na linii nr 408

Materials and welding aspects of bridge modernization of 408 railway..... 40

Marcin Winnicki, Aleksandra Małachowska,

Małgorzata Rutkowska-Gorczyca, Andrzej Ambroziak*

Przebieg powłok miedzi na podłożu aluminiowym naniesionych metodą LPCS

Bond strength and copper coatings deposited on aluminium alloy with LPCS method..... 47

..... 47

Jan Plewniak

Jubileusz 80-lecia Sekcji Spawalniczej Stowarzyszenia Inżynierów Mechaników i Techników Polskich.....

..... 53

Rozprawa doktorska - dr inż. Tomasz Wojdat

Lutowanie miękkie aluminium z miedzią i stalą z zastosowaniem warstw pośrednich.....

..... 54

* Artykuły recenzowane

Patronat i stała współpraca / Patronage and permanent cooperation

CLOOS
Polska



KEMPMI
The Joy of Welding

Linde



Wydanie czasopisma jest wspierane finansowo przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego / The publication of the Journal is financially supported by the Ministry of Science and Higher Education in Poland.

Powłoki metalowe jako zabezpieczenie antykorozyjne konstrukcji stalowych

Metal coatings as corrosion protection of steel structures

Streszczenie

W artykule przedstawiono cele i zasady nakładania powłok metalowych chroniących konstrukcje stalowe przed korozją. Opisano korzyści płynące ze stosowania zanurzeniowych powłok cynkowych i powłok natryskiwanych cieplnie. W oparciu o krajowe i zagraniczne przykłady dokonano analizy kosztów wytwarzania i eksploatacji powłok metalowych w porównaniu do kosztów powłok malarskich.

Słowa kluczowe: powłoki metalowe, powłoki zanurzeniowe, powłoki natryskiwane cieplnie, zabezpieczenie antykorozyjne

Abstract

In the article the purposes and principles of metal coatings, protecting the steel constructions against corrosion, were discussed. The benefits of using the hot-dip galvanized coatings and the thermal sprayed coatings were presented. On the basis of national and foreign examples the analysis of manufacturing and exploitation costs of thermal sprayed coatings in comparison to the cost of traditional painting systems were presented.

Keywords: Metal coatings, hot dip coatings, thermally sprayed coatings, corrosion protection

Wstęp

Jedną z podstawowych metod ochrony konstrukcji stalowych przed korozją jest tzw. metoda bierna, polegająca na oddzieleniu tworzywa konstrukcyjnego od środowiska korozyjnego powłoką ochronną. Najczęściej stosowane są następujące rodzaje powłok:

- malarskie,
- cynkowe, nakładane metodą zanurzeniową (ogniową) jako samodzielne lub w systemie dupleks z powłokami malarskimi,
- z cynku, aluminium lub ich stopów, nakładane metodą natryskiwania cieplnego i uszczelnione systemem powłok malarskich.

Metalem najczęściej stosowanym do ochrony konstrukcji stalowych jest cynk. Powłoka cynkowa zabezpiecza podłoże stalowe na skutek wysokiej aktywności elektrochemicznej (ochrona katodowa), ale również

przez wytwarzanie produktów korozji. Cynk ma niższy potencjał utleniania od żelaza i dlatego najpierw ulega korozji, zabezpieczając podłoże stalowe również w obszarach niewielkich nieciągłości w powłoce, które powstały w wyniku uszkodzeń mechanicznych lub w miejscach trudno dostępnych niedostatecznie pokrytych. Ochronna zdolność powłoki cynkowej zależy od ilości cynku, a więc jest proporcjonalna do grubości powłoki. Cynk, będąc metalem bardzo reaktywnym, tworzy na swojej powierzchni warstewkę produktów korozji składających się z tlenków przechodzących pod wpływem wilgoci w wodorotlenki, a następnie podczas procesu wysychania, w reakcji z dwutlenkiem węgla, w nierozpuszczalne węglany stanowiące doskonałą ochronę cynku przed penetracją środowiska korozyjnego [1].

Obecnie do nakładania powłok metalowych na konstrukcje stalowe praktycznie wykorzystuje się dwie metody: metodą zanurzeniową i metodą natryskiwania cieplnego.

Mgr inż. Anna Olbrycht – Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa.

Autor korespondencyjny/corresponding author: korozja@imp.edu.pl

Powłoki zanurzeniowe

Cynkowanie zanurzeniowe, zwane również ognio-
wym, polega na utworzeniu powłoki przez zanurze-
nie stali lub żeliwa w kąpeli ze stopionego cynku [1].
Znane są następujące rodzaje procesów: cynkowanie
zanurzeniowe wyrobów, tzw. cynkowanie jednostkowe,
cynkowanie zanurzeniowe blachy i drutu sposobem
ciągłym.

W przypadku cynkowania jednostkowego grubość
powłoki określona w PN-EN ISO 1461 [2], w zależno-
ści od grubości stali, wynosi nie mniej niż $45 \pm 85 \mu\text{m}$
($325 \pm 610 \text{ g/m}^2$). Grubość powłoki cynkowej jest podsta-
wowym, chociaż nie jedynym parametrem determinują-
cym czas ochrony antykorozyjnej. Powłoki zbyt grube
mogą wykazywać gorszą przyczepność do podłoża.

Podczas cynkowania reagują ze sobą ciekły cynk
i aktywna powierzchnia stali cynkowanego wyrobu.
Na powierzchni wyrobu w wyniku dyfuzji tworzy się
w bardzo krótkim czasie warstwa stopowa żelazo-
-cynk. Powstająca w wyniku procesu warstwa dyfuzyj-
na Zn-Fe na granicy faz podłoże–powłoka zapewnia
dobrą przyczepność do podłoża.

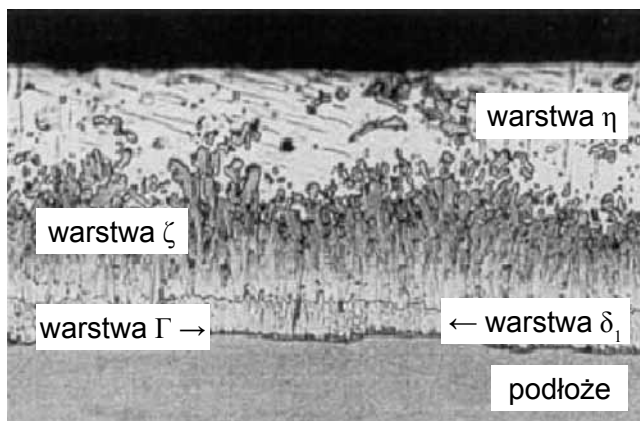
Na powierzchni stali wytwarza się jedna lub wię-
cej warstw stopowych Fe-Zn, na których dopiero przy
wynurzeniu wyrobu z wanny cynkowniczej tworzy się
powłoka prawie czystego cynku o składzie kąpeli.
Zależnie od składu chemicznego stali, jej właściwo-
ści, temperatury kąpeli cynkowej, jej składu chemicz-
nego oraz szybkości wynurzenia, może utworzyć się
powłoka cynkowa o różnej budowie metalograficznej
i grubości oraz barwie srebrzystej, metalowo-szarej lub
ciemno-matowej. Na rysunku 1 przedstawiono budowę
powłoki cynkowej. Składa się ona z następujących faz
międzymetalicznych:

- Γ – faza zawierająca $17 \pm 28\%$ Fe
- δ_1 – faza zawierająca $7 \pm 12\%$ Fe
- ζ – faza zawierająca $5 \pm 7\%$ Fe
- η – faza zawierająca do $0,08\%$ Fe

Struktura, skład chemiczny i grubość powłoki zależą
od składu chemicznego kąpeli cynkowniczej i gatunku
stali cynkowanej.

Przez lata wprowadzano do technologii cynkowania
przemysłowego kąpeli z różnymi dodatkami stopowymi.
Powodem tego było ograniczenie nadmiernego wzrostu
grubości powłoki na stalach o zawartości $0,03 \pm 0,15\%$ Si
(tzw. zakres Sandelina) i powyżej $0,28\%$, lub gdy
 $\text{Si} \geq 0,04\%$ i $\text{Si} + 2,5 \text{ P}$ wynosiło $0,09 \pm 0,2\%$. Wśród
przyczyn rozwoju technologii cynkowania pojawiają się
również uwarunkowania wynikające z wymogów este-
tycznych wyrobu oraz, jak wynika z niektórych badań, dą-
żenie do podwyższenia jego właściwości ochronnych.

W celu rozwiązania problemu otrzymywania po-
włok o optymalnej grubości konieczne jest stosowa-
nie wielu dodatków w kąpeli do cynkowania. Zgodnie
z PN-EN ISO 1461 ich suma nie powinna przekraczać
 $1,5\%$ udziału masowego. Poszukiwania uniwersalnego
rozwiązania doprowadziły do opracowania kąpeli



Rys. 1. Przekrój poprzeczny typowej powłoki cynkowej na stali
Fig. 1. Cross-section of a typical zinc coating on steel

o złożonym składzie. W ostatnich latach wprowadzone
zostały do użycia w Polsce kąpeli zawierające dodatki
stopowe Al, Sn, Ni i Mn o nazwie Wegal, jak również
kąpiel zawierająca dodatki Zn-Sn-V (Ni), czy też kąpiel
o składzie Ni, Sn, Bi. Znaczne ilości Sn (nawet powyżej
 $1,5\%$) w niektórych z proponowanych kąpeli wpływa-
ją na podniesienie kosztów wytworzenia powłoki oraz
skłonność do pęknięcia konstrukcji w kąpeli cynkowej.
Omówienie tych problemów przedstawione jest w licz-
nych publikacjach.

Interesującymi odmianami cynkowych powłok zanu-
rzeniowych są powłoki zawierające aluminium w stęże-
niach wyższych od standardowego, tj. 5% Al (Galfan)
i 55% Al (Galvalume). Charakteryzują się one znacznie
większą odpornością korozyjną od tradycyjnej powłoki
cynkowej. Wytwarzane są na blachach i drutach me-
todą ciągłą, która nie jest w niniejszym opracowaniu
omawiana. Warto nadmienić, że w połowie lat 90. ubie-
głego wieku opracowano technologię jednostkowego
pokrywania wyrobów powłoką Galfan i pracowały wów-
czas 4 instalacje, w tym 3 poza Europą. W skali la-
boratoryjnej procesy te opracowano również w Polsce.
Niezależnie od siebie w IMP i na Politechnice Śląskiej
opracowano proces tworzenia powłok Zn-5%Al oraz
proces pokrywania w kąpeli 55%Al-Zn. Opracowa-
nia te nie znalazły jednak zastosowania w przemyśle,
mimo że potwierdzono znacznie lepszą odporność ko-
rozyjną tych powłok w porównaniu z powłoką cynkową.
Podobnie jak proces aluminiowania zanurzeniowego,
który wprawdzie był stosowany w skali przemysłowej,
nie zyskały popularności.

Powłoki cynkowe pochłaniają 70% cynku zużywanego
na wszystkie powłoki ochronne i są stosowane w wielu gałę-
ziach produkcji przemysłowej. Według informacji członków
Polskiego Towarzystwa Cynkowniczego (PTC) największy-
mi odbiorcami usług cynkowania zanurzeniowego są:

- producenci konstrukcji stalowych – 42%
- infrastruktura drogowa – 31%
- budownictwo – 11%
- rolnictwo – 10%
- inne – 6% .

Dokładna liczba cynkowni zanurzeniowych (ognio-
wych) w Polsce jest trudna do określenia, ponieważ

budowane są na bieżąco nowe obiekty. Można szacować, że jest ich ok. 80. Uwzględniając również modernizację i rozbudowę dotychczas istniejących cynkowni można stwierdzić, że jest to obecnie nowoczesne zaplecze technologii cynkowania w skali europejskiej, a jakość cynkowania jest wysoka. Największa wanna cynkownicza w Polsce i jedna z największych w Europie ma wymiary 16,5 x 2 x 3,2 m.

Prawidłowo wykonana powłoka cynkowa w zależności od agresywności środowiska, w którym jest eksploatowana, wytrzymuje od 10 do 100 lat (tabl. I).

Ze względu na wieloletni okres ochrony przed korozją, jaki zapewnia zanurzeniowa powłoka cynkowa, jest ona zabezpieczeniem bardzo ekonomicznym. Koszty ponoszone w momencie wykonywania powłoki są niewielkie w stosunku do jej trwałości. Powłoka malarska stosunkowo szybko starzeje się, średnio co 6÷7 lat wymaga konserwacji, dlatego koszt takiego zabezpieczenia rośnie w czasie. Powłoka cynkowa praktycznie nie wymaga renowacji.

Tablica I. Trwałość powłok cynkowych zanurzeniowych w zależności od ich grubości i kategorii agresywności środowiska (wg PN-EN ISO 14713-1) [3]

Table I. Durability of hot-dip galvanizing coating in dependence from thickness and category of corrosivity (PN-EN ISO 14713-1) [3]

Powłoka zanurzeniowa wykonana wg normy PN-EN ISO 1461		Kategoria agresywności środowiska wg ISO 9223							
		Trwałość min/max lat Oznaczenie trwałości							
		C3		C4		C5		CX	
Grubość min, µm	85	40/>100	VH	20/40	VH	10/20	H	3/10	M
	140	67/>100	VH	33/67	VH	17/33	VH	6/17	H
	200	95/>100	VH	48/95	VH	24/48	VH	8/24	H
M – trwałość średnia 5 ÷ 10 lat H – trwałość wysoka 10 ÷ 20 lat VH – trwałość bardzo wysoka ponad 20 lat									

Powłoki natryskiwane cieplnie

Drugą metodą stosowaną do nakładania powłok metalowych na konstrukcje stalowe jest natryskiwanie cieplne. Znajduje ono zastosowanie tam, gdzie nie można wykonać cynkowania zanurzeniowego. Za pomocą natryskiwania cieplnego można uzyskać powłoki na konstrukcji o dowolnej wielkości. Ograniczenia wynikają jedynie z jej kształtu. Proces ten umożliwia dobranie rodzaju i grubości powłoki metalowej do warunków eksploatacyjnych. Wzrostowi liczby zastosowań metody natryskiwania cieplnego sprzyja również wykorzystanie do procesu nowoczesnych urządzeń łukowych umożliwiających poprawę jakości powłok i istotne obniżenie kosztów nakładania.

Natryskiwanie cieplne jest procesem, w którym materiał powłokowy w postaci drutu, proszku, pręta lub

żyłki jest nagrzewany do stanu plastycznego lub stopionego, a następnie rozpylany za pomocą strumienia gazu, najczęściej sprężonego powietrza, i наносzony na przygotowaną powierzchnię. Czynnikiem powodującym topienie materiału powłokowego jest ciepło palnika tlenowo-gazowego, łuku elektrycznego lub plazmy. Cząstki, padając na podłoże, odkształcają się i nakładają na siebie, tworząc powłokę.

W zależności od agresywności korozyjnej środowiska i jego wartości pH, do ochrony konstrukcji stalowych przed korozją stosuje się najczęściej:

- cynk i stopy cynku z aluminium – na konstrukcje eksploatowane w różnych środowiskach,
- aluminium na konstrukcje eksploatowane w środowisku o większej agresywności,
- stop AlMg5 – w środowisku wody i atmosfery morskiej.

Cynk jest metalem najczęściej stosowanym na powłoki ochronne. W środowisku o większej agresywności stosuje się powłoki aluminiowe. Na powierzchni aluminium tworzy się warstewka tlenków Al_2O_3 mająca dobrą przyczepność. Grubość tej warstewki może zwiększać się pod wpływem czynników zewnętrznych. Jony Al^{3+} przechodzą przez pory cienkiej warstewki i reagując z jonami O^{2-} pochodzącymi z roztworu, wytwarzają tlenek Al_2O_3 stanowiący warstewkę zabezpieczającą podłoże [4].

Coraz częściej do ochrony konstrukcji stalowych stosuje się stop ZnAl15, który łączy w sobie cechy obu metali. Dodatek aluminium do cynku zwiększa twardość powłok stopowych, jak również powoduje, że można je stosować w temperaturze do 315°C, a więc znacznie wyższej niż w przypadku powłok cynkowych, dla których dopuszczalna temperatura eksploatacji wynosi 200°C, co jest skutkiem niskiej temperatury topnienia cynku [5]. Powłoki stopowe 85/15 mają lepszą przyczepność do stali, niż czysty cynk i aluminium. Stwierdzono również, że mają dobre właściwości mechaniczne (np. skrawalność), porównywalne do aluminium i znacznie lepsze od cynku. Badania wykazały, że przy natryskiwaniu stopu ZnAl15 występują mniejsze straty materiału powłokowego niż przy natryskiwaniu czystego Zn. Koszt materiału powłokowego koniecznego do pokrycia 1 m² powierzchni powłoką o grubości 100 µm, przy prawidłowych parametrach natryskiwania, jest o ok. 20% mniejszy dla powłok ze stopu ZnAl15 niż powłok z Zn [6].

Powłoki stopowe Zn-Al dzięki obecności aluminium są szczególnie efektywne w środowiskach o dużej zawartości substancji agresywnych, na przykład w atmosferze przemysłowej zawierającej dwutlenek siarki, w budownictwie drogowym i mostowym, gdzie używane są środki do odlodzenia dróg, czy w atmosferze wody morskiej zawierającej duże ilości chlorku sodu [7].

Ochronne powłoki metalowe mogą pracować samodzielnie i wtedy o ich trwałości będzie decydowała agresywność środowiska i grubość nakładanej powłoki. W celu zwiększenia trwałości tych powłok, względnie nadania im odpowiedniego efektu plastycznego, pokrywa się je zwykle dodatkowo odpowiednio dobranym

zestawem powłok malarskich, który w tym przypadku pełni rolę bariery chroniącej powłokę metalową przed bezpośrednim działaniem środowiska. Powstały w ten sposób system ochronny zapewnia najbardziej trwałą ochronę przed korozją.

W Zaleceniach do wykonywania i odbioru antykorozyjnych zabezpieczeń konstrukcji stalowych drogowych obiektów mostowych będących Załącznikiem do Zarządzenia nr 15 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 8 marca 2006 r. [8] potwierdzono, że zastosowanie systemów metalizacyjno-malarskich daje najwyższą trwałość zabezpieczeń. W przypadku właściwego nakładania powłok i ich konserwacji w trakcie użytkowania, trwałość zabezpieczenia powinna wynosić co najmniej 25 lat.

Natryskiwanie cieplne, znane i stosowane od prawie 100 lat, obecnie powszechnie stosuje się do nakładania powłok metalowych na mosty, wiadukty, konstrukcje węzłów drogowych, kominy instalacji energetycznych, zbiorniki najróżniejszego rodzaju itd. (tabl. II).

Tablica II. Przykłady konstrukcji zabezpieczonych przed korozją systemem powłok metalizacyjno-malarskich [9, 10]

Table II. Selected structures protected against corrosion by using thermal spraying and paint coatings [9, 10]

Rodzaj konstrukcji	System ochronny metalizacyjno - malarski	Rok wyk.
Most przez Wisłę Wyszogród	Zn natryskiwany + system malarski epoksydowo-poliuretanowy	1999
Most Świętokrzyski Warszawa	Zn natryskiwany 150 µm + system malarski epoksydowo-poliuretanowy 300 µm	2000
Most Jana Pawła II Gdańsk	Zn natryskiwany 200 µm + system malarski epoksydowo-poliuretanowy 170 µm	2001
Most Kotlarski przez Wisłę Kraków	Zn natryskiwany 150 µm + system malarski epoksydowo-poliuretanowy 160 µm	2001
Most Siekierkowski Warszawa	Zn natryskiwany 200 µm + system malarski epoksydowo-poliuretanowy 180 µm	2002
Most przez Rogalicę Szczecin	Zn natryskiwany 150 µm + system malarski epoksydowo-poliuretanowy 290 µm	2002
Most Solidarności Płock	Zn natryskiwany 200 µm + system malarski epoksydowo-poliuretanowy 210 µm	2007
Most przez Wisłę im. Jana Pawła II Puławy	Zn natryskiwany 200 µm + system malarski epoksydowo-poliuretanowy 180 µm	2008
Most M-45 przez rzekę Banówkę. Przebudowa drogi krajowej nr S22 Elbląg – Grzechotki	ZnAl15 natryskiwany 150 µm + system malarski epoksydowo-poliuretanowy 180 µm	2008
Wiadukt nr 3. Rozbudowa ul. Janka Wiśniewskiego Gdynia. Etap II	Zn natryskiwany 200 µm + system malarski epoksydowo-poliuretanowy 210 µm	2008
Estakada Kwiatkowskiego Gdynia	ZnAl15 natryskiwany 150 µm + system malarski epoksydowo-poliuretanowy 210 µm	2008
Most przez rzekę Wisłę i wiadukt nad ul. Dęblińską Puławy	Zn natryskiwany 200 µm + system malarski epoksydowo-poliuretanowy 180 µm	2008
Przebudowa wiaduktu nad torami PKP w ciągu ul. Ku Ujściu Gdańsk	Zn natryskiwany 200 µm + system malarski epoksydowo-poliuretanowy 250 µm	2008

Przy uwzględnieniu wszystkich kosztów związanych z długoletnią eksploatacją obiektów, tzw. jednoroczny koszt życia obiektu jest znacznie niższy przy zastosowaniu do ochrony powłok metalowo-malarskich niż powłok malarskich, pomimo że koszt wytworzenia powłok metalowo-malarskich jest o ok. 50% wyższy.

W tablicy III przedstawiono szacunkowe obliczenia kosztów wytworzenia i eksploatacji dwóch systemów zastosowanych do ochrony konstrukcji o powierzchni ok. 3000 m² [9].

Koszt wytworzenia i 20 lat eksploatacji ochrony powłokami malarskimi wynosi ok. 260÷480 zł/m². Każde następne 15÷20 lat eksploatacji to koszt ok. 120÷280 zł/m². Natomiast koszt wytworzenia i 15÷20 lat eksploatacji ochrony powłokami metalowo-malarskimi to ok. 200÷280 zł/m². Każde następne 15÷20 lat eksploatacji to koszt ok. 60÷100 zł/m². Zwiększone nakłady na wytworzenie takiego systemu zwracają się już po 10÷15 latach eksploatacji [9].

Tablica III. Przykładowe koszty wytworzenia i eksploatacji dwóch systemów ochronnych w odniesieniu do 1 m² powłoki

Table III. Examples of costs of manufacture and exploitation of two protection schemes with respect to 1 m² of the coating

Rodzaj prac	Koszt dla konstrukcji chronionej systemem I powłoki EP i PUR na gruntach wysokocynkowych lub etylokrzemianowych zł/m ²	Koszt dla konstrukcji chronionej systemem II 150 µm Zn + 200 µm EP i PUR zł/m ²
Nałożenie systemu	90÷130	150÷180
Koszt przeglądu co 3 lata	3÷10	—
Koszt przeglądu i drobnych renowacji co 5÷6 lat	15÷30	3÷10
Koszt generalnego remontu co 15÷20 lat	90÷160 (usunięcie starej powłoki i nałożenie nowej)	40÷60 (renowacja powłoki malarskiej)

Podsumowanie

Przy wyborze systemu ochronnego należy w pierwszym rzędzie kierować się jego trwałością i kosztem eksploatacji podczas całego okresu użytkowania, a nie wyłącznie kosztem wytworzenia systemu. Ze względów ekonomicznych konstrukcje stalowe przewidziane do wieloletniej eksploatacji powinny być chronione przed korozją za pomocą cynkowych powłok zanurzeniowych lub powłok metalizacyjno-malarskich.

Literatura

- [1] Kwiatkowski L., Milewski W.: Powłoki metalowe w ochronie przed korozją konstrukcji stalowych. Informator Gospodarczy PIKS 2009.
- [2] PN-EN ISO 1461:2011P Powłoki cynkowe nanoszone na wyroby stalowe i żeliwne metodą zanurzeniową – Wymagania i metody badań.
- [3] PN-EN ISO 14713-1:2010E Powłoki cynkowe – Wytyczne i zalecenia dotyczące ochrony przed korozją konstrukcji ze stopów żelaza – Część 1: Zasady ogólne dotyczące projektowania i odporności korozyjnej.
- [4] Milewski W.: Powłoki metalowe natryskiwane cieplnie jako zabezpieczenie antykorozyjne obiektów mostowych. Międzynarodowa Konferencja „Nowoczesne systemy ochrony antykorozyjnej obiektów mostowych” Kielce, maj 2009.
- [5] Guide for the protection of steel with thermal spray coatings of aluminium and zinc and their alloys and composites – Sulit R.A. – American Welding Society – NTSC, Anaheim C.A 7-11.06.1993.
- [6] Sprawozdanie z pracy pt.: Techniczno – ekonomiczna analiza porównawcza powłok ochronnych natryskiwanych cieplnie z drutu Zn i Zn-Al produkowanych przez Z.M. Silesia, wykonanej pod kier. W. Milewskiego dla Z.M. Silesia w 2008.
- [7] Milewski W., Milewski P.: Korzyści wynikające z zastąpienia natryskiwania cieplnego powłok Zn powłokami Zn-Al, Inżynieria Powierzchni 4/2012.
- [8] Królikowska A.: Zalecenia do wykonywania i odbioru antykorozyjnych zabezpieczeń konstrukcji stalowych drogowych obiektów mostowych – nowelizacja z 2006 r. Załącznik do Zarządzenia Nr 15 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 8 marca 2006.
- [9] Nowicka E., Ratuszkiewicz K.: Powłoki metalowe natryskiwane cieplnie jako zabezpieczenie antykorozyjne stalowych konstrukcji mostowych, Inżynieria Powierzchni 4/2012.
- [10] Wysokowski A.: Ograniczenie wpływu korozji na zmniejszenie nośności mostów stalowych poprzez zastosowanie natryskiwania cieplnego, Inżynieria Powierzchni 1/2007

Warszawscy Laureaci Medalu im. S. Olszewskiego

W dniu 19.12.2013 r. podczas Świątecznego spotkania Warszawskiego Oddziału Sekcji Spawalniczej SIMP, wręczone zostały Medale im. Inż. Stanisława Olszewskiego, które przyznawane są przez Sekcję Spawalniczą SIMP najwybitniejszym polskim i zagranicznym spawalnikom w uznaniu ich zasług dla spawalnictwa.



Na zdjęciu od lewej: Wojciech Zakolski (odznaczony medalem), Kazimierz Ferenc (Prezes OW SS SIMP), Jan Grzebalski (Honorowy Prezes OW SS SIMP), Witold Klimczewski (odznaczony medalem).

Tomasz Chmielewski
Dariusz Golański
Janusz Bazela
Grzegorz Gontarz

Badania właściwości powłok Zn i Al natryskiwanych łukowo na stal S235JR

Investigation of the properties of Zn and Al coatings deposited by arc spraying onto S235JR steel substrate

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości powłok cynkowych i aluminiowych natryskiwanych łukowo na podłożu ze stali S235JR wg PN-EN 10025. Powłoki natryskiwano agregatem Metallisation S350. W ramach prowadzonych badań scharakteryzowano mikrostrukturę powłok, ich twardość i przyczepność do podłoża.

W sposób pośredni określono poziom naprężeń własnych w powłokach, dokonując precyzyjnego pomiaru ugięcia próbek i wyznaczenia na tej podstawie wartości naprężenia średniego.

Słowa kluczowe: natryskiwanie cieplne, powłoki anodowe

Abstract

The article presents results of research of the properties of Zn and Al coatings deposited by arc spraying method onto a substrate of S235JR steel according to PN-EN 10020. In this study the microstructure of the coatings was characterized together with their hardness and adhesion to the substrate.

In an indirect way, the level of coating residual stresses were calculated, through the precise measurement of sample deflection that was used to calculate the stress magnitude.

Keywords: thermal spraying, anodic coating

Wstęp

Powłoki cynkowe i aluminiowe na podłożu stalowym stanowią anodowy protektor podłoża przed korozją elektrochemiczną. Wytwarzanie powłok metalowych przez natryskiwanie cieplne, nazywane również metalizacją natryskową, znane jest już od ponad wieku, a prekursorem tej metody w Polsce jest Instytut Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie. Natryskiwanie termiczne od początku swego istnienia jest nieustannie rozwijane, zarówno pod względem stosowania nowych

źródeł ciepła, konstrukcji urządzeń, jak i modyfikacji materiałów powłokowych. Natryskiwanie termiczne cynku i aluminium realizuje się najczęściej metodą łukową, ewentualnie płomieniową odmianą poddźwiękową. Stosowanie wysokoenergetycznych metod natryskiwania, takich jak płomieniowe naddźwiękowe czy plazmowe, do natryskiwania cynku i aluminium nie znajduje szerokiego zastosowania. Z jednej strony wynika to z relatywnie niskich wartości temperatury topnienia cynku i aluminium, a z drugiej od powłok ochronnych anodowych nie jest oczekiwana wysoka

Dr hab. inż. Tomasz Chmielewski, prof. PW; dr hab. inż. Dariusz Golański, prof. PW; mgr inż. Grzegorz Gontarz Politechnika Warszawska; **mgr inż. Janusz Bazela** – SciTeeX Sp. z o.o.

Autor korespondencyjny/corresponding author: t.chmielewski@wip.pw.edu.pl

przyczepność czy niska porowatość, gdyż ochrona katodowa nie jest od nich zależna. Natryskiwanie powłok anodowych na stal jest alternatywą dla ogniowego i galwanicznego cynkowania stali. Ze względu na różne uwarunkowania techniczno-ekonomiczne, natryskiwanie cynku, czy aluminium w celu ochrony katodowej stosuje się najczęściej do konstrukcji o znacznych rozmiarach przekraczających gabaryty wanien cynkowniczych (np. przęsła mostów), a także w przypadku konstrukcji trwale związanych z miejscem eksploatacji lub gdy za wysokie stężenie krzemu i węgla w stali utrudnia cynkowanie ogniowe. Natryskiwanie termiczne powłok anodowych ma również tę zaletę, że może być stosowane lokalnie, np. w miejscu naprawy spoiny czy innego elementu konstrukcji stalowej.

Ochrona elektrochemiczna metali

Metody ochrony elektrochemicznej są oparte na zmianie potencjału elektrodowego metalu w celu zahamowania lub ograniczenia jego rozpuszczania w środowisku korozyjnym. W zależności od kierunku przesuwania potencjału elektrodowego chronionego metalu do wartości niższej lub wyższej (do zakresu pasywnego) rozróżniane są metody ochrony katodowej i anodowej. Cynk i aluminium jako materiały mniej szlachetne w stosunku do stali, tj. będące wobec stali anodą, tworzą ochronę katodową. Ochrona katodowa oznacza, że przedmiot poddany ochronie spełnia rolę katody w korozyjnym ogniwie galwanicznym. Potencjał elektrodowy chronionego metalu przesuwa się w kierunku dodatnim, a więc roztworzenie (utlenianie) tego metalu jest ograniczone. Metal chroniony jest katodą, na której mogą zachodzić tylko reakcje redukcji. Rozróżnia się ochronę katodową galwaniczną i elektrolityczną [1+3,10].

Galwaniczna ochrona katodowa nazywana również *protektorem* zachodzi bez użycia zewnętrznego źródła prądu. Chroniony przedmiot (stal) jest katodą ogniwa galwanicznego, którego anodę stanowi celowo tracony metal mniej szlachetny (Zn, Al lub ich stopy) zwany protektorem. Protektor, roztworząc się, zabezpiecza chroniony przedmiot. Protektorem może być powłoka na metalu chronionym (np. cynk na stali) lub odpowiednio rozmieszczone płyty anodowe. Dobór rodzaju materiału powłoki przeciwkorozyjnej jest uzależniony od środowiska, w jakim ma być eksploatowana, a grubość determinuje okres trwałości, jak przedstawiono w tabelicy I. Dla środowiska kwaśnego stosuje się powłoki aluminiowe, a dla środowiska o odczynie zasadowym powłoki cynkowe.

Elektrolityczna ochrona katodowa ma miejsce wówczas, gdy chroniony przedmiot jest katodą ogniwa zasilanego prądem stałym z zewnętrznego źródła prądu (zasilacza elektrycznego). Pomocnicza anoda jest najczęściej wykonana z materiału nieulegającego roztworzeniu (Pt, Pb, Ni).

Tablica I. Grubość powłok ochronnych z cynku, aluminium i ich stopów, natryskiwanych cieplnie na stal, zależnie od warunków eksploatacji i wymaganej twardości wg PN-H-04684 (M – powłoka uszczelniana jedną warstwą powłoki malarskiej lub pokryta wielowarstwową powłoką malarską)

Table I. The thickness of the protective coatings of Zn and Al or their alloys, deposited by thermal spraying onto the steel substrate, depending upon operating conditions and the required hardness according to PN-H-04684 (M – the sprayed coating with additional covering with one or multi-layer of paint coat)

Środowisko	Materiał powłoki	Minimalna grubość powłoki, μm			
		Trwałość powłoki, liczba lat			
		5÷10	10÷20	20÷30	>40
Atmosfera przemysłowa	Zn	150M	200M	—	—
	Al	200 150M	200 150M	300 200M	350 250M
	ZnAl15	150 120M	200 150M	300 200M	—
	AlMg5	200 150M	200 150M	300 200M	350 250M
Atmosfera morska	Zn	200 150M	250 200M	350 250M	—
	Al	250 200M	300 250M	350 250M	—
	ZnAl15	150 100M	200 150M	250 200M	350 300M
	AlMg5	250 200M	300 350M	350 250M	—
Woda słodka	Zn	200 100M	250 150M	300 200M	350 250M
	Al	200 150M	250 150M	250M	300M
	ZnAl15	150 100M	200 120M	250 150M	300 200M
	AlMg5	200 150M	250 200M	250M	300M
Woda morska	Zn	150M 250	200M 350	—	—
	Al	150M 250	200M 300	250M 350	300M
	ZnAl15	120M	150M	200M	250M
	AlMg5	200M 250	250M 300	300M 350	—
Woda gorąca do 100°C	Al	250	300	—	—
	AlMg5	250	300	—	—

Natryskiwanie powłok

Przebieg procesu natryskiwania cieplnego w zależności od zastosowanej odmiany może być stosunkowo prosty lub znacznie bardziej skomplikowany, niemniej jednak w każdym przypadku sprowadza się do stopienia i rozpylenia lub znacznego nagrzania materiału powłokowego, przyspieszenia go w strumieniu natryskowym i skierowania na powierzchnię modyfikowanego przedmiotu. W kolejnym etapie dochodzi do uderzenia

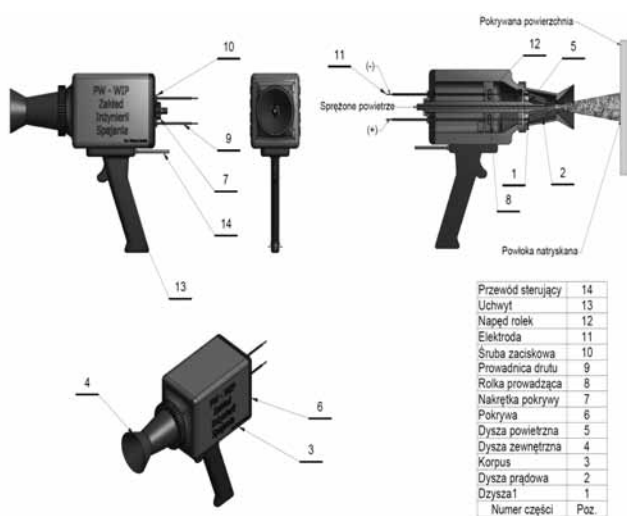
rozpędzonych cząstek materiału powłokowego w warstwę wierzchnią modyfikowanego materiału i połączenia z nim. Charakterystyczną cechą natryskiwania jest brak nadtopienia podłoża. Stosunkowo wysoka energia cieplna i kinetyczna cząstek w strumieniu natryskowym umożliwia uzyskanie przyczepności powłoki do podłoża. Połączenie powłoki z warstwą wierzchnią podłoża ma charakter złożony i częściowo polega na mechanicznym zakleszczeniu cząstek powłoki w nierównościach podłoża, w części na adhezyjnym (wiązań międzycząsteczkowe) oddziaływaniu materiału podłoża i powłoki, a niekiedy może mieć lokalnie charakter wiązań atomowych lub być efektem powstania dyfuzyjnej warstwy przejściowej. Natryskiwanie termiczne umożliwia wykonywanie powłok różnych metali i stopów, które mogą pełnić funkcję ochronną, dekoracyjną lub regeneracyjną [5, 6, 11].

Na potrzeby badań zastosowano natryskiwanie łukowe, w którym źródłem ciepła jest łuk elektryczny jarzący się swobodnie pomiędzy dwoma drutami stanowiącymi materiał powłokowy. Do prawidłowej realizacji procesu niezbędna jest precyzyjna synchronizacja prowadzenia drutów względem siebie (posuwu) oraz prędkości ich topienia (mocy łuku elektrycznego). Topiony materiał drutów jest rozpylany i przyspieszany

strumieniem powietrza, tworząc strumień natryskowy. Na rysunku 1 przedstawiono schemat pistoletu do natryskiwania łukowego, a na rysunku 2 pokazano jego szczegółową budowę w obszarze topienia drutu.

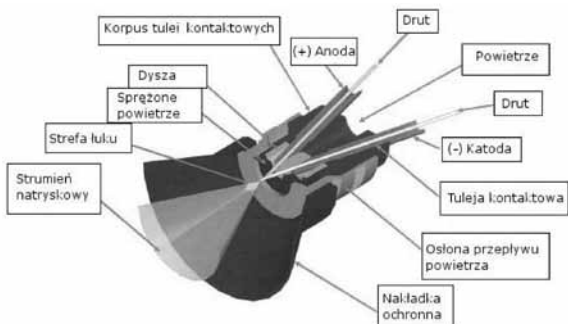
W ramach badań wykonano serię prób natryskiwania łukowego agregatem Metallisation S350 ochronnych powłok anodowych Al i Zn. Celem badań było porównanie podstawowych właściwości powłok.

Metale natryskiwano na specjalnie spreparowane próbki stalowe o grubości 3 mm w kształcie prostokąta (20x30 mm) i koła (ø25 mm). Powierzchnię do natryskiwania przygotowywano na poziomie Sa 2,5 przez śrutowanie pneumatyczne w komorze Blastlux SciTeeX śrutem stalowym kruszonym. Przebieg procesu natryskiwania opisano dalej. Do natryskiwania powłoki cynkowej zastosowano drut firmy Metallisation cynkowy o średnicy 2,3 mm, a do natryskiwania powłoki aluminiowej drut aluminiowy firmy Metallisation o średnicy 1,6 mm. W tabelicy II zestawiono parametry natryskiwania cynku i aluminium. Natryskiwanie cynku i aluminium odbywało się w porównywalnych warunkach. Parametry natryskiwania dla obu materiałów były zbliżone. Różna średnica drutu, tj. 2,3 mm dla cynku i 1,6 mm dla aluminium, determinowała różną wartość posuwu drutu – 1,3 m/min podczas natryskiwania cynku i 8,5 m/min podczas natryskiwania aluminium.



Rys. 1. Schemat pistoletu do natryskiwania łukowego [8]

Fig. 1. The scheme of arc spraying gun [8]



Rys. 2. Schemat obszaru topienia drutu w pistolecie do natryskiwania łukowego [4]

Fig. 2. The scheme of the melting area of a wire in arc spraying gun [4]

Tablica II. Parametry natryskiwania powłok Zn i Al
Table II. The parameters of arc spraying of Zn and Al coatings

Grubość powłoki	Powłoka Zn	Powłoka Al
Grubość powłoki, μm	200/900/1100	340/620/780
Napięcie łuku, V	24	24
Natężenie prądu, A	220	230
Ciśnienie powietrza, bar	4,5	4,5
Posuw drutu, m/min	1,3	8,5
Średnica drutu, mm	2,3	1,6
Temperatura podłoża, °C	45	45
Temperatura powłoki po natryskiwaniu	120	290



Rys. 3. Natryskiwanie łukowe

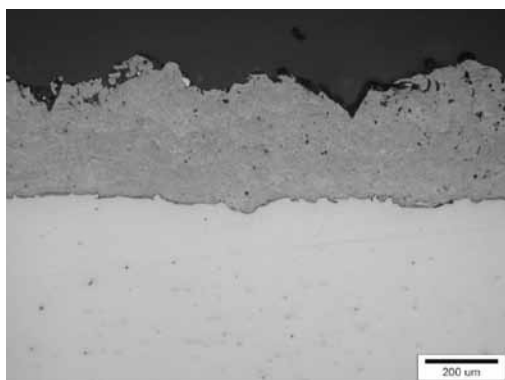
Fig. 3. Arc spraying process

Badania metalograficzne

Preparatyka zglądów metalograficznych zawierała pobranie próbek, inkludowanie w żywicy epoksydowej, szlifowanie na papierach ściernych o ziarnistości: 100, 250, 360, 500, 800, 1200 oraz polerowanie wodną zawiesiną Al_2O_3 o uziarnieniu 1 μm . Badania metalograficzne zostały wykonane na mikroskopie świetlnym Olympus ze zintegrowanym aparatem cyfrowym, wykorzystującym technikę obserwacji w polu jasnym.

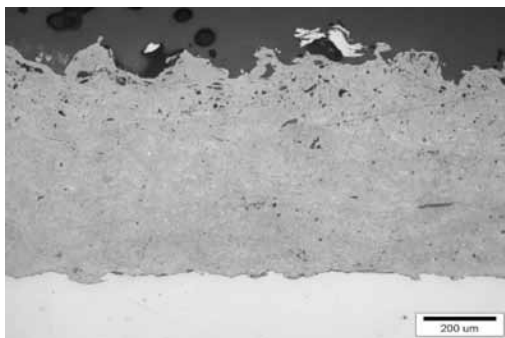
Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono mikrostruktury powłok aluminium o różnej grubości natrykiwanych łukowo na podłoże stalowe S235JR. Powłoki te charakteryzują się niską porowatością, równomierną grubością na całej obserwowanej powierzchni, dobrze przylegają do podłoża stalowego oraz są ciągłe.

Na rysunkach 6 i 7 zostały przedstawione mikrostruktury powłok cynkowych natrykiwanych łukowo na podłoże stalowe S235JR różniące się grubością. Zaprezentowane powłoki również charakteryzują się równomierną grubością na całej obserwowanej powierzchni, dobrze przylegają do podłoża stalowego oraz są ciągłe. Natomiast, w przeciwieństwie do powłok aluminiowych, w granicy międzyfazowej powłoka-podłoże występuje strefa pośrednia charakteryzująca się występowaniem nowej fazy.



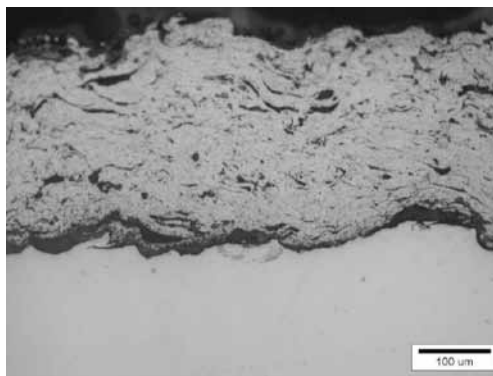
Rys. 4. Mikrostruktura powłoki Al o grubości ok. 0,34 mm natrykiwanej łukowo na podłoże stalowe S235JR, bez trawienia

Fig. 4. The microstructure of Al coating with a thickness of approximately 0.34 mm, deposited by arc spraying onto S235JR steel substrate, without etching



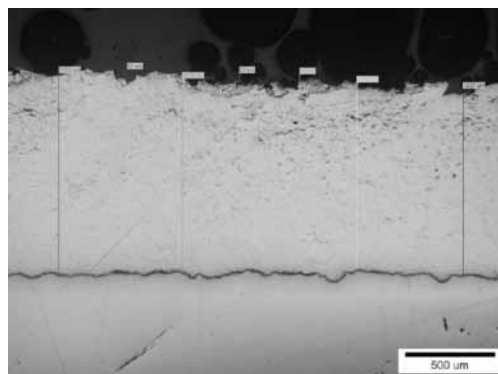
Rys. 5. Mikrostruktura powłoki Al o grubości ok. 0,78 mm natrykiwanej łukowo na podłoże stalowe S235JR, bez trawienia

Fig. 5. The microstructure of Al coating with a thickness of approximately 0.78 mm, deposited by arc spraying onto S235JR steel substrate, without etching



Rys. 6. Mikrostruktura powłoki Zn o grubości ok. 0,2 mm natrykiwanej łukowo na podłoże stalowe S235JR, bez trawienia

Fig. 6. The microstructure of Zn coating with a thickness of approximately 0.2 mm, deposited by arc spraying onto S235JR steel substrate, without etching

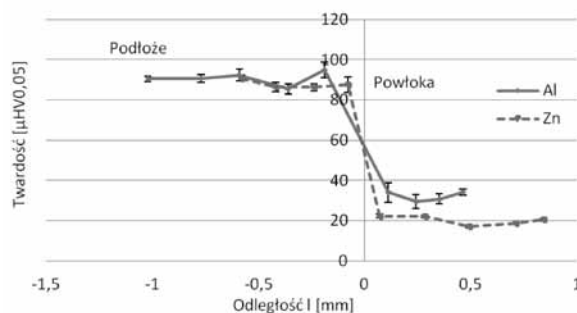


Rys. 7. Mikrostruktura powłoki Zn o grubości ok. 1,1 mm natrykiwanej łukowo na podłoże stalowe S235JR, bez trawienia

Fig. 7. The microstructure of Zn coating with a thickness of approximately 1.1 mm, deposited by arc spraying onto S235JR steel substrate, without etching

Pomiary twardości

Do pomiarów twardości zastosowano mikrotwardościomierz Leitz Wetzlar. Rozkłady twardości zostały wykonane w skali $\mu HV_{0,05}$ w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni w kierunku podłoże-powłoka. Na rysunku 8 pokazano wykres ilustrujący rozkłady twardości w porównywanych powłokach.



Rys. 8. Rozkłady twardości w podłożu i natrykiwanych powłokach Al oraz Zn

Fig. 8. The hardness distribution in the steel substrate and in the deposited Al and Zn coatings

Twardość powłoki aluminiowej wynosi ok. 30 $\mu\text{HV}0,05$ i jest o ok. 10 jednostek wyższa niż twardość powłoki cynkowej. W obu przypadkach twardość stalowego podłoża nie uległa zmianie na skutek działania cyklu cieplnego natryskiwania i wynosi ok. 90 $\mu\text{HV}0,05$. Średnia twardość powłok nie zmienia się w funkcji odległości od granicy podłoże-powłoka, a zarejestrowane odchylenie standardowe od wartości średniej zawiera się w zakresie kilku jednostek. Wynik ten świadczy o stosunkowo wysokiej jednorodności powłok w całej ich objętości.

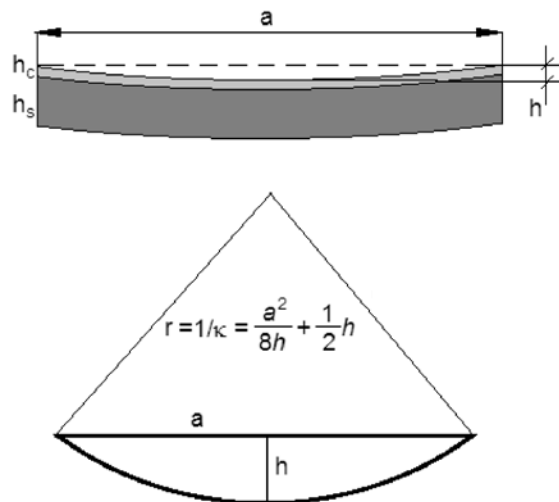
Badania naprężeń własnych

Do określenia naprężeń w nałożonych powłokach wykorzystano pomiar ugięcia próbek po procesie natryskiwania. W celu pomiaru ugięcia próbek zaprojektowano specjalny przyrząd pokazany na rysunku 9, bazujący na precyzyjnym cyfrowym czujniku zegarowym sprzęgniętym z gniazdem składającym się z sześciu elementów jednoznacznie ustalających próbkę przez odebranie wszystkich sześciu stopni swobody. Przed natryskiwaniem kalibrowano czujnik na nieodkształconej próbce, a po nałożeniu powłoki i ostygnięciu próbki mierzono jej ugięcie powstające w efekcie indukowania się w złączu sił skurczowych i momentów gnących powstających na skutek różnych właściwości fizycznych powłoki i podłoża oraz nierównomiernego rozkładu temperatury.

Na podstawie zmierzonego ugięcia h płyt próbnych i odległości między podporami $a = 27$ mm obliczono promień krzywizny r natrykiwanej próbki.



Rys. 9. Przyrząd do pomiaru ugięcia natrykiwanych próbek
Fig. 9. The digital gauge used for deflection measurement of the sprayed samples



Rys. 10. Geometria odkształconej próbki zastosowana do wyznaczenia promienia krzywizny

Fig. 10. The geometry of the deformed samples that was used to determine the radius of sample curvature

Na podstawie równań Stoneya [9] i teorii ugięcia związanej z wyznaczaniem naprężeń przez pomiar krzywizny ugięcia, średnie naprężenie własne w powłoce (σ) można obliczyć z zależności:

$$\sigma = \frac{1}{6} \frac{E_s}{(1-\nu_s)} \frac{h_s^2}{h_c} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right)$$

gdzie:

E_s – moduł Younga materiału podłoża,

ν_s – liczba Poissona,

h_c – grubość powłoki,

h_s – grubość podłoża.

W równaniu tym r_1 i r_2 są promieniami krzywizny podłoża przed nałożeniem powłoki (r_1) i po nałożeniu powłoki (r_2). Ze względu na każdorazowe zerowanie czujnika dla podłoża stalowego S235JR człon ($1/r_1$) został pominięty. W związku z tym średnie naprężenie własne w powłoce można określić wyrażeniem:

$$\sigma = \frac{1}{6} \frac{E_s}{(1-\nu_s)} \frac{h_s^2}{h_c} \frac{1}{r_2}$$

W tablicach III i IV zamieszczono wyniki pomiarów grubości i wygięcia próbek, oraz obliczone na podstawie równania Stoneya wartości naprężeń własnych w powłokach Zn i Al.

Tablica III. Wyniki pomiarów grubości, ugięcia próbki oraz obliczonych naprężeń własnych w powłokach Zn na podłożu S235JR

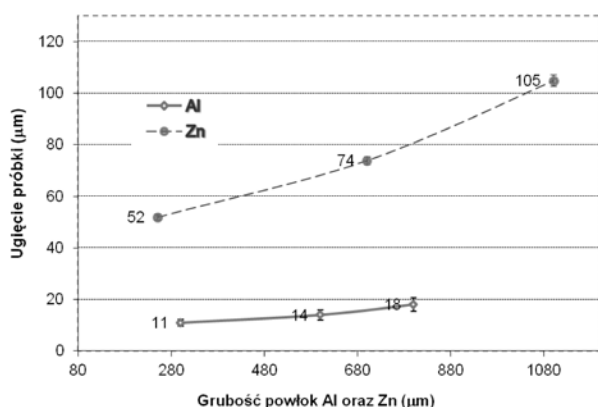
Table III. The results of the thickness measurements, the deflection of the sample and calculated residual stresses in the Zn coatings deposited on S235JR substrate

Nr próbki Zn	Grubość powłoki h_c μm	Grubość podłoża h_s μm	Ugięcie h μm	Naprężenie σ , MPa
1	226	3000	52	1065
2	885	3000	74	387
3	1100	3000	105	442

Tablica IV. Wyniki pomiarów grubości, ugięcia próbki oraz obliczonych naprężeń własnych w powłokach Al na podłożu S235JR
Table IV. The results of the thickness measurements, the deflection of the sample and calculated residual stresses in the Al coatings deposited on S235JR substrate

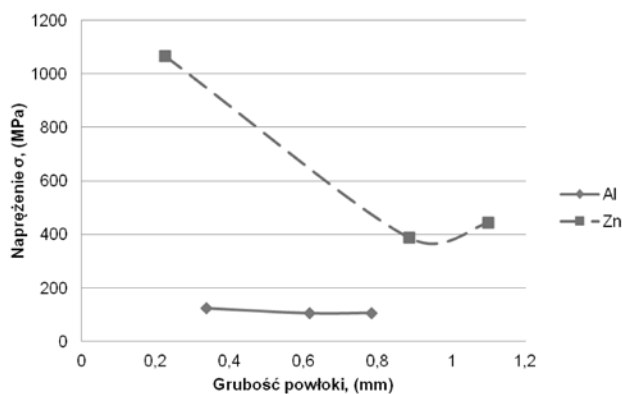
Nr próbki Al	Grubość powłoki h_c μm	Grubość podłoża h_s μm	Ugięcie h μm	Naprężenie σ , MPa
1	336	3000	11	122
2	616	3000	14	105
3	784	3000	18	106

Na rysunkach 11 i 12 zostały przedstawione wykresy zmierzonego ugięcia próbki w funkcji grubości powłoki Zn i Al oraz naprężenia własne σ w powłokach Zn i Al obliczone na podstawie krzywizny wygięcia próbek po procesie natryskiwania w funkcji grubości powłoki.



Rys. 11. Wykres ugięcia próbek natryskiwanych Al i Zn na podłożu S235JR w funkcji grubości uzyskanych powłok

Fig. 11. The deflection of the sample as a function of the thickness of Al and Zn coatings sprayed onto the substrate of S235JR steel



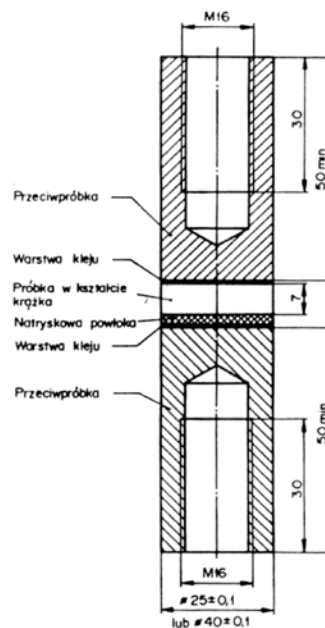
Rys. 12. Średnie naprężenie własne σ w powłokach Zn oraz Al obliczone na podstawie krzywizny wygięcia próbek po procesie natryskiwania w funkcji grubości powłoki

Fig. 12. The mean residual stress σ in Zn and Al coatings calculated based on the sample curvature measured after spraying as a function of the coating thickness

Pomiar przyczepności

Badania przyczepności wykonano na podstawie PN-EN 582 dla układu powłoka Al oraz Zn na podłożu stalowym S235JR. Przyczepność określona została

metodą odrywania R_H (wytrzymałość określona w statycznej próbie rozciągania, która wynika z ilorazu najwyższej siły F_m i przekroju próbki na powierzchni przelomu). W doświadczeniu zastosowano próbkę typu B składającą się z dwóch przeciwpróbek oraz z wklejonej pomiędzy nie próbki w kształcie dysku jednostronnie pokrytego powłoką natrykiwaną Zn oraz Al (rys. 13). Dyski zostały przyklejone do przeciwpróbek klejem termoutwardzalnym 3M-2214 Regular, zgodnie z zaleceniami producenta. Próbkę sklejało się w specjalnym przyrządzie pryzmowym, który zapewniał współosiowość przeciwpróbek.



Rys. 13. Schemat przygotowania próbek do testu przyczepności
Fig. 13. The scheme of samples preparation for the adhesion test

Przyczepność powłok natryskiwanych zależy od wielu czynników technologicznych i właściwości materiałów powłoki i podłoża [7]. Podczas badania przyczepności w obu przypadkach powłok cynkowych i aluminowych rejestrowano utratę spójności w połączeniu powłoka-podłoże. Lokalizacja przebiegu pęknięcia w połączeniu świadczy o tym, iż jest to najsłabszy element złącza. Badania przyczepności wykonywano w obu przypadkach dla trzech różnych grubości powłok, po cztery próby dla każdej wartości grubości (tabl. V).

Tablica V. Wyniki prób statycznego rozciągania podczas badania przyczepności powłok Al oraz Zn do podłoża S235JR

Table V. The results of the static tensile tests of Al and Zn coatings adhesion to the substrate

Powłoka	Grubość powłoki μm	Średnia arytmetyczna przyczepności MPa	Odchylenie standardowe
Zn	226	5,35	1,25
	885	4,98	0,63
	1100	4,65	1,03
Al	336	7,60	1,35
	616	7,30	1,34
	784	7,08	0,98

Wnioski

Metoda natryskiwania łukowego powłok anodowych na stali znajduje zastosowanie w zabezpieczeniu konstrukcji stalowych przed działaniem korozji. Wykorzystywana jest zarówno na etapie wytwarzania konstrukcji, montażu, jak i podczas napraw. Powłoki cynkowe i aluminiowe natryskiwane łukowo na podłoże stalowe S235JR charakteryzują się wystarczającą przyczepnością do podłoża w kontekście roli jaką pełnią, to jest protektora w ogniwie galwanicznym. W warunkach technologicznego wytwarzania powłok ochronnych nie zaleca się przekraczania grubości 0,35 mm.

Na podstawie wykonanych badań sformułowano następujące wnioski:

- Warstwa wierzchnia powłok cynkowych natryskiwanych łukowo charakteryzuje się blisko dwukrotnie mniejszą chropowatością niż powłok aluminiowych.
- Uzyskane połączenia podłoża z powłoką zarówno cynkową, jak i aluminiową są dobrej jakości, tzn. materiał powłok dobrze wypełnia wszystkie nierówności podłoża stalowego i połączenie jest ciągłe.
- Powłoki aluminiowe mają większą przyczepność do podłoża o ok. 40% niż powłokicynkowe mają większą przyczepność do podłoża o ok. 40%.
- Dla obu powłok wraz ze wzrostem ich grubości maleje przyczepność do podłoża.
- Średnie naprężenia własne σ w powłoce aluminiowej w zakresie grubości od ok. 0,3 do 0,8 mm zmieniają się nieznacznie.
- Średnie naprężenia własne σ w powłoce cynkowej w zakresie grubości od ok. 0,25 do 1,1 mm są bardzo wysokie przy małej grubości powłoki, obniżając się szybko wraz ze wzrostem grubości do ok. 0,8 mm.
- Z wykresów na rysunkach 11 i 12 wynika, że średni poziom naprężeń własnych w powłokach w nieznanym stopniu zależy od grubości powłoki. Jedynie dla powłoki cynkowej przy bardzo małej grubości redystrybucja naprężeń własnych w wyniku odkształcenia plastycznego metalu powłoki nie jest w stanie zrekompensować dużej różnicy współczynników rozszerzalności cieplnej cynku i stalowego podłoża, która w głównej mierze ma wpływ na siły skurczowe w złączu.
- Twardość powłoki aluminiowej wynosi ok. 30 μ HV_{0,05} i jest o ok. 10 jednostek wyższa niż twardość powłoki cynkowej.

Literatura

- [1] Baszkiewicz J., Kamiński M.: Korozja materiałów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2006.
- [2] Blicharski M.: Inżynieria powierzchni, WNT, Warszawa 2009.
- [3] Burakowski T., Wierchoń T.: Inżynieria powierzchni metali, WNT, Warszawa 1995.
- [4] Borowy M.: Natryskiwanie łukowe powłok anodowych, Praca magisterska, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, 2013.
- [5] Brennek J., Milewski W.: Natryskiwanie cieplne powłok ochronnych, Instytut Wydawniczy CRZZ, Warszawa 1978.
- [6] Chmielewski T., Golański D.: Właściwości powłok tytanowych natryskiwanych termicznie na podłoża ceramiczne AlN, Przegląd Spawalnictwa 9-10/2009, s. 27÷31.
- [7] Milewski W.: Wpływ współczynnika wnikania ciepła na powierzchniach styku na przyczepność powłok natryskiwanych cieplnie, Wydawnictwo Czasopism i Książek Technicznych, Warszawa 2006.
- [8] Rosiak M.: Natryskiwanie termiczne powłok intermetalicznych (Ni-Al) na podłoża stalowe, Praca magisterska, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, 2013.
- [9] Stoney G.G.: The tension of metallic films deposited by electrolysis, Proceedings of the Royal Society (London) A82, s. 172÷175.
- [10] Tkaczyk S. (pod redakcją): Powłoki Ochronne, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1994.
- [11] Zimmerman J.: Golański D., Chmielewski T., Włosiński W., Model obliczeniowy do analizy naprężeń własnych w układzie powłoka-podłoże podczas nanoszenia powłok metodami termicznymi, Przegląd Spawalnictwa 1/2013, s. 12÷17.

Miesięczne i roczne spisy treści oraz streszczenia artykułów opublikowanych w Przeglądzie Spawalnictwa są dostępne na stronie internetowej:

www.pspaw.ps.pl

Odporność korozyjna wybranych powłok nakładanych metodą tamponową

Corrosion resistance of selected coatings deposited by the brush plating method

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań korozyjnych wybranych powłok nakładanych metodą tamponową. Przedmiotem badań były powłoki metalowe (Ni, Cu+Ni) i powłoki kompozytowe metalowo-ceramiczne (Cu+Si₃N₄, NiW+Si₃N₄). Badania odporności na korozję wykonano metodą potencjodynamiczną w 0,5M NaCl. Przedstawiono również wyniki badań metalograficznych i pomiarów mikrotwardości.

Słowa kluczowe: metoda tamponowa, powłoki, korozja

Abstract

The paper presents the results of the corrosion resistance investigation of selected coatings deposited by the brush plating method. The metal (Ni, Cu+Ni) and composite metal-ceramic composite (Cu+Si₃N₄, NiW+Si₃N₄) coatings have been produced in the frame of conducted research. The investigation of corrosion resistance has been performed using the potentiodynamic method in the 0.5M solution of NaCl. The results of microhardness measurements and microscopic investigation of the surface and cross-section of the coating have been also included.

Keywords: brush plating, coatings, corrosion

Wstęp

Zagadnienia związane z modyfikacją właściwości powierzchni elementów maszyn i urządzeń stanowią obecnie istotny kierunek prowadzonych prac badawczych. Powierzchnia elementu w czasie eksploatacji jest narażona na równoczesne oddziaływanie czynników mechanicznych i korozyjnych. Istotne jest zatem uzyskanie jednocześnie jej odpowiedniej odporności na zużycie mechaniczne i oddziaływanie czynnika korozyjnego. Jedną z metod umożliwiających realizację tego zadania jest metoda tamponowa (ang. *brush plating*, *selective plating*, *spot plating*, *swab plating*).

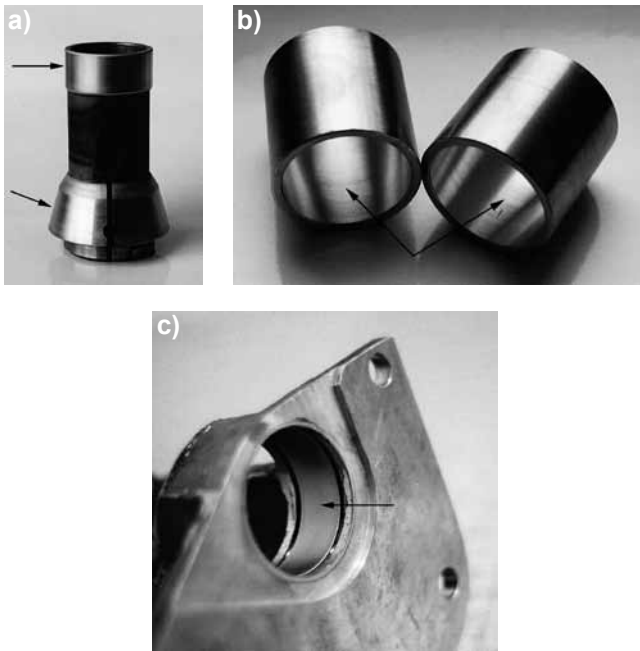
Metoda ta stanowi odmianę metody galwanicznej nakładania powłok. W porównaniu z nią ma wiele zalet, takich jak: krótszy czas nakładania powłoki, niższy koszt procesu, łatwość obsługi stosowanych urządzeń. W metodzie tamponowej elektrolit jest przenoszony na powierzchnię elementu pokrywającego za pomocą

tamponu nasuniętego na elektrodę połączoną z dodatnim biegunem źródła prądu, natomiast element pokrywany połączony jest z biegunem ujemnym. Znaczna liczba dostępnych w metodzie elektrolitów umożliwia otrzymywanie powłok jedno- i wielowarstwowych, które w zależności od ich budowy i rodzaju mogą cechować się określonymi właściwościami, takimi jak odporność na zużycie, odporność na działanie czynników korozyjnych, wysoka twardość czy odpowiednia zwilżalność powierzchni. Ze względu na dużą mobilność urządzeń stosowanych w metodzie tamponowej i charakter procesu możliwe jest nakładanie powłok na powierzchnie elementów maszyn w miejscu ich pracy, niejednokrotnie bez konieczności ich demontażu. Na rysunku 1 pokazano przykłady powłok nałożonych metodą tamponową.

W tablicy I zestawiono wybrane elektrolity produkcji chińskiej, cechujące się wg producenta m.in. odpornością na korozję i/lub na zużycie.

Dr inż. Jarosław Grześ – Politechnika Warszawska, Instytut Technik Wytwarzania.

Autor korespondencyjny/corresponding author: jgrzes@wip.pw.edu.pl



Rys. 1. Powłoki nałożone metodą tamponową: a) NiW, b) Cu, c) Ni
Fig. 1. Coatings deposited by the brush plating method a) NiW, b) Cu, c) Ni

Tablica I. Wybrane elektrolity i ich właściwości [1]
Table I. Plating solutions and their properties [1]

Nazwa elektrolitu	K_j	P	S_o	Q_E	Uwagi
Copper Alkaline - 1	60	0,079	9,8	710	Warstwy podkładowe, niskie naprężenia pozostające
Copper High Build Alkaline	80	0,079	9,8	953,6	
Nickel High Speed	50	0,104	12,7	562,9	Powłoki odporne na zużycie
Nickel Compact High Speed	50	0,113	12,7	562,9	
Indium	65	0,04	5÷12,7	952,6	
Nickel Tungsten Alloy	85	0,214	1,2	844,4	
Copper Semi-Bright	64	0,152	7,6÷12,7	710	Powłoki ochronne i dekoracyjne, odporność na korozję
Cobalt	38	0,037	3,8	514	
Cadium Acidic	152	0,121	3,5	1583	Odporność na korozję
Cadmium Low Hydrogen Non-Embritling	100	0,02	30	1212	
Zinc Alkaline	65,4	0,02	12,7	1403	Odporność na zużycie i korozję
Chromium Acidic	44	0,545	0,625	736,1	

K_j - koncentracja jonów metalu w elektrolicie, g/l
 P - współczynnik zużycia mocy, Ah/dm²·μm
 S_o - szybkość nakładania, μm/min
 Q_E - wydajność elektrolitu, dm²/l·μm

Przedstawione wyniki badań wybranych powłok metalowych i kompozytowych uzyskano w cyklu prac prowadzonych w Zakładzie Inżynierii Spajania Politechniki Warszawskiej związanych z badaniem powłok nakładanych metodą tamponową. Badane powłoki nakładano urządzeniem produkcji chińskiej DSQ-15, stosując uchwyty elektrodowe ZDB-1(II) i elektrody grafitowe SM 1. Pomiary mikrotwardości wykonano metodą Vickersa, wykorzystując twardościomierz MPT-3 oraz mikroskop świetlny Neophot 21 wyposażony w przystawkę do pomiarów mikrotwardości. Obserwacje mikroskopowe prowadzono na mikroskopie Olympus przy powiększeniach 200 i 1000 razy. W celu określenia odporności powłok na korozję wykorzystano metodę potencjodynamiczną i środowisko 0,5M NaCl.

Powłoki metalowe

Przedmiotem badań były powłoki metalowe niklowe (Ni) i miedziano-niklowe (Cu+Ni). Powłoki zastały nałożone na powierzchnię stali 45. W ramach wstępnego przygotowania powierzchnie poddano szlifowaniu w celu uzyskania odpowiedniej ich chropowatości. Proces nakładania obejmował następujące etapy:

- odtłuszczenie elektrolityczne,
- aktywację powierzchni,
- nakładanie podkładowej warstwy niklowej polepszającej przyczepność właściwej warstwy do podłoża,
- nakładanie warstw Ni i Cu.

Zastosowane elektrolity i parametry nakładania powłok Ni i Cu+Ni zestawiono w tablicy II.

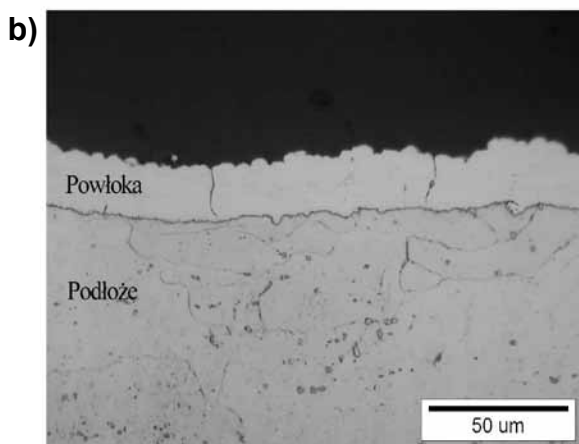
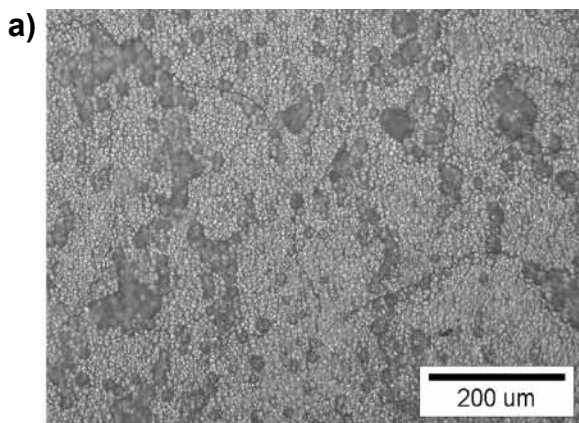
Tablica II. Parametry nakładania powłok Ni i Cu+Ni
Table II. The deposition parameters of Ni and Cu+Ni coatings

Elektrolit	Napięcie nakł. V	Czas nakł. s	Prędkość przesuwu elektrody m/min	Uwagi
Elektroclean#1	12	30	~6	Czyszczenie elektrolityczne
Activator#2	8	15	~4	Aktywacja powierzchni
Activator#3	20	30		
Nickel Special	18	3÷5	~6	Warstwa podkładowa (g ≈ 1÷3 μm)
	12	3÷5		
Copper Semi-Bright	6	240	~10	Warstwa Cu (g ≈ 20 μm)
Nickel Semi-Bright	8	100	~10	Warstwa Ni (g ≈ 5 μm)
		200		Warstwa Ni (g ≈ 10 μm)
		300		Warstwa Ni (g ≈ 15 μm)

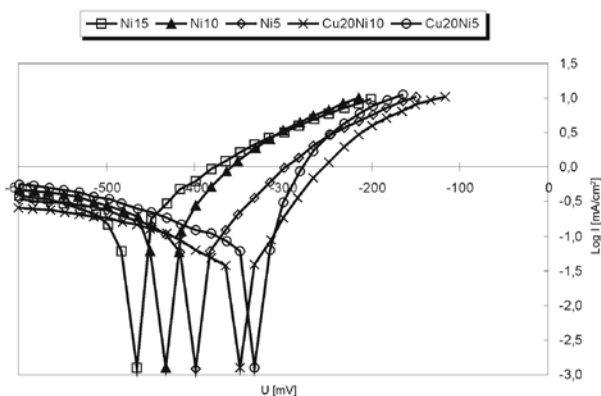
Pomiędzy poszczególnymi operacjami nakładania próbki płukano w wodzie. Po zakończeniu etapu nakładania płukano je w alkoholu etylowym i suszono w strumieniu ciepłego powietrza. Przygotowano następujące zestawy próbek:

- zestaw I: powłoka Ni o grubości 5 μm ,
- zestaw II: powłoka Ni o grubości 10 μm ,
- zestaw III: powłoka Ni o grubości 15 μm ,
- zestaw IV: powłoka Cu+Ni – o grubościach odpowiednio 20 μm i 5 μm ,
- zestaw V: powłoka Cu+Ni – o grubościach odpowiednio 20 μm i 10 μm .

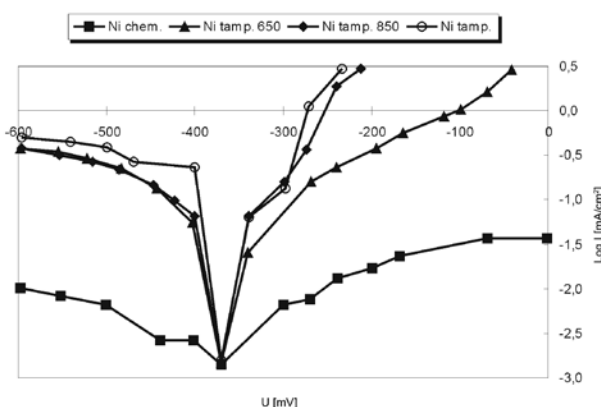
Pomiary mikrotwardości wykazały, że twardość uzyskanych powłok (mierzona na przekroju poprzecznym powłoki) wynosi średnio 430 HV_{0,04} dla warstw Ni oraz 221 HV_{0,04} dla warstw Cu. Obserwacje mikroskopowe wykazały pęknięcia na powierzchni i przekroju poprzecznym powłok niklowych, spowodowane naprężeniami wewnętrznymi w powłokach. Typowy obraz pęknięć w powłokach niklowych, nakładanych metodą tamponową, pokazano na rysunku 2. Wyniki badań odporności korozyjnej przedstawiono na rysunku 3 w postaci krzywych polaryzacji anodowej. Na rysunku 4 porównano krzywe polaryzacji anodowej otrzymane dla powłoki niklowej o grubości 5 μm i powłok niklowych poddanych procesowi borowania w temperaturze 650°C i 850°C, nakładanych metodą tamponową, oraz powłoki niklowej naniesionej chemicznie [2].



Rys. 2. Pęknięcia w powłoce Ni: a) powierzchnia powłoki, b) przekrój poprzeczny
Fig. 2. Cracks observed in Ni coating: a) the coating surface, b) the coating cross-section



Rys. 3. Krzywe polaryzacji anodowej powłok Ni i Cu+Ni nakładanych metodą tamponową, I – gęstość prądu korozji, U – potencjał
Fig. 3. The anodic polarization curves for Ni and Cu+Ni coatings deposited by the brush plating method, I – current density, U – potential



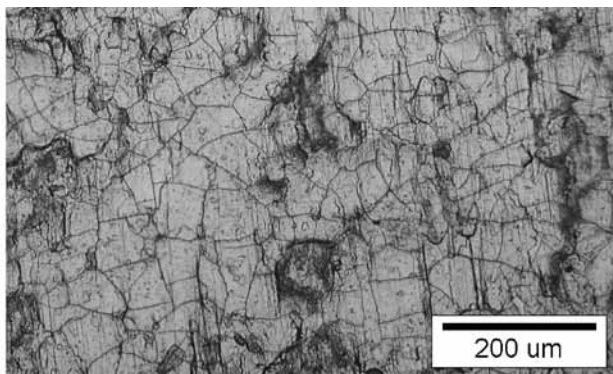
Rys. 4. Krzywe polaryzacji anodowej powłok Ni o grubości 5 μm , nakładanych metodą tamponową i chemicznie, I - gęstość prądu korozji, U - potencjał
Fig. 4. The anodic polarization curves for 5 μm Ni coatings deposited by both brush plating and chemical methods, I - current density, U - potential

Powłoki kompozytowe

Jednym z zastosowań metody tamponowej jest możliwość nakładania powłok kompozytowych metalowo-ceramicznych [3, 4], co dodatkowo podnosi jej użyteczność. Badania korozyjne przeprowadzono dla powłok kompozytowych Cu+Si₃N₄ i NiW+Si₃N₄. Powłoki nakładano na powierzchnię stali 18G2A z elektrolitów Copper Alkaline#1 i Nickel Tungsten Alloy. Jako fazę niemetaliczną zastosowano proszek Si₃N₄ o wielkości ziarna 0,5 μm . Elektrolit podczas nakładania mieszano w celu utrzymania zawiesiny proszku w elektrolicie. Proces nakładania obejmował te same etapy jak w przypadku powłok metalowych. Parametry nakładania powłok Cu+Si₃N₄ i NiW+Si₃N₄ zestawiono w tablicy III. W celach porównawczych nałożono powłoki Cu i NiW z elektrolitów niezawierających proszku Si₃N₄, przy napięciu nakładania odpowiednio 11 V i 12 V.

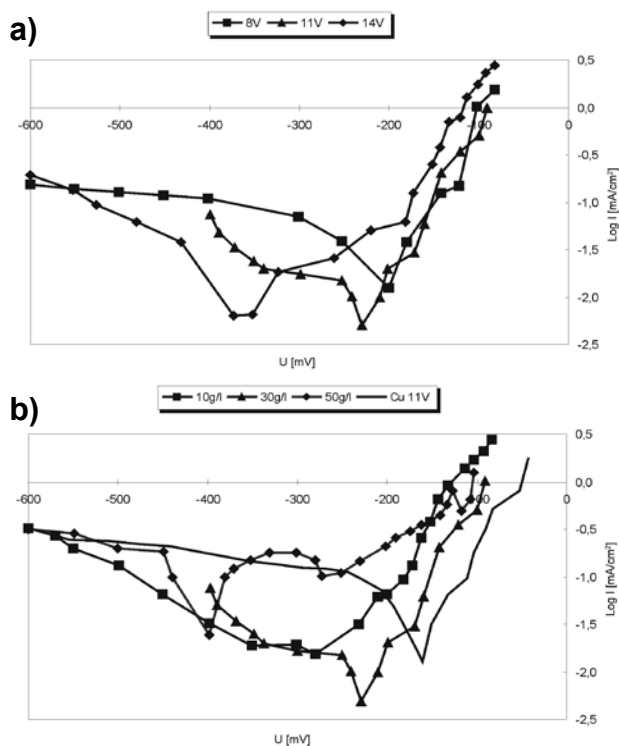
Tablica III. Parametry nakładania powłok Cu+Si₃N₄ i NiW+Si₃N₄
Table III. The deposition parameters of Cu+Si₃N₄ and NiW+Si₃N₄ coatings

Elektrolit	Napięcie nakładania, V	Czas nakładania, s	Prędkość przesuwu elektrody, m/min	Uwagi
Elektroclean#1	12	30	~6	Czyszczenie elektrolityczne
Activator#1	12	45	~4	Aktywacja powierzchni
Nickel Special	18	3÷5	~6	Warstwa podkładowa (g ≈ 1÷3 μm)
	12	3÷5		
Copper Alkaline#1	8/11/14	900	~6	Warstwa Cu+Si ₃ N ₄ , zawartość proszku w elektrolicie: 10, 30, 50 g/l
Nickel Tungsten Alloy	9/12/15	900	~6	Warstwa NiW+Si ₃ N ₄ , zawartość proszku w elektrolicie: 10, 30, 50 g/l



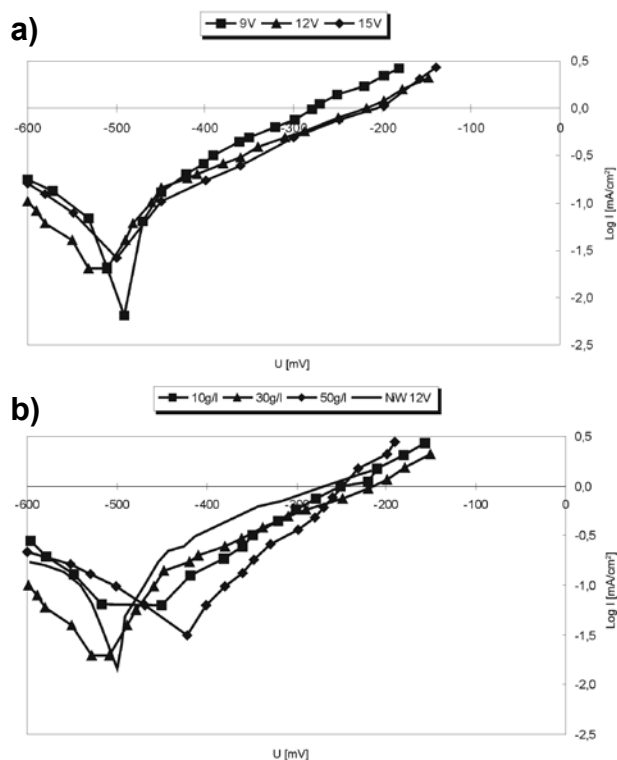
Rys. 5. Pęknięcia w powłoce NiW
Fig. 5. Cracks in NiW coating

W wyniku pomiarów mikrotwardości stwierdzono, że twardość powłok w zależności od napięcia nakładania i zawartości Si₃N₄ w elektrolicie zawierała się w granicach 120÷230 HV0,02 (powłoki Cu+Si₃N₄) i 500÷1000 HV0,02 (powłoki NiW+Si₃N₄) i była wyższa od twardości powłok Cu i Ni nakładanych bez dodatku Si₃N₄. Podobnie jak w przypadku powłok niklowych, również w powłokach NiW stwierdzono występowanie pęknięć (rys. 5). Wyniki badań odporności korozyjnej w postaci krzywych polaryzacji anodowej przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Krzywe polaryzacji anodowej powłok Cu+Si₃N₄ nakładanych metodą tamponową: a) dla zawartości proszku Si₃N₄ w elektrolicie 30 g/l i różnego napięcia nakładania, b) dla napięcia nakładania 11 V i różnej zawartości proszku Si₃N₄ w elektrolicie, I – gęstość prądu korozji, U – potencjał

Fig. 6. The anodic polarization curves for Cu+Si₃N₄ coatings: a) for 30 g/l content of Si₃N₄ powder and several deposition voltages, b) for the deposition voltage of 11 V and several contents of Si₃N₄ powder in the electrolyte, I – current density, U – potential



Rys. 7. Krzywe polaryzacji anodowej powłok NiW+Si₃N₄ nakładanych metodą tamponową: a) dla zawartości proszku Si₃N₄ w elektrolicie 30 g/l i różnego napięcia nakładania, b) dla napięcia nakładania 12 V i różnej zawartości proszku Si₃N₄ w elektrolicie, I – gęstość prądu korozji, U – potencjał

Fig. 7. The anodic polarization curves for NiW+Si₃N₄ coatings: a) for 30 g/l content of Si₃N₄ powder and several deposition voltages, b) for the deposition voltage of 12 V and several contents of Si₃N₄ powder in the electrolyte, I – current density, U – potential

Wnioski

Obserwacje mikroskopowe wykazały dobre przyleganie badanych powłok do materiału podłoża. Dla powłok Ni i NiW zaobserwowano występowanie siatki pęknięć, charakterystycznej dla tego rodzaju powłok. Wyraźnie większą skłonność do pęknięć zaobserwowano w powłoce NiW. Badane powłoki kompozytowe metalowo-ceramiczne charakteryzują się wyższą twardością w porównaniu z powłokami uzyskanymi z elektrolitów niezawierających proszku Si_3N_4 .

Analizując krzywe polaryzacji anodowej stwierdzono, że powłoki metalowe Ni cechuje mniejsza odporność na korozję w porównaniu z powłokami Cu+Ni (rys. 3). Niższa odporność korozyjna powłok metalowych Ni jest spowodowana obecnością pęknięć w powłoce, które sprzyjają zwiększeniu szybkości korozji. Zastosowanie w celu uszczelnienia powłoki warstwy Cu podniosło jej odporność korozyjną. Zaobserwowano spadek odporności korozyjnej ze wzrostem grubości powłoki Ni. W odniesieniu do powłok Ni nakładanych chemicznie powłoki Ni nakłada-

ne metodą tamponową cechują się obniżoną odpornością korozyjną. Zastosowanie procesu borowania spowodowało stosunkowo niewielki wzrost odporności korozyjnej powłok Ni nakładanych tamponowo. W przypadku powłok kompozytowych Cu+ Si_3N_4 w porównaniu z powłoką Cu zaobserwowano niższą odporność korozyjną. Powłoki NiW+ Si_3N_4 charakteryzowały się porównywalną lub lepszą odpornością korozyjną w porównaniu z powłoką NiW. Porównując oba rodzaje powłok kompozytowych, wyższą odporność na korozję stwierdzono dla powłok Cu+ Si_3N_4 , natomiast odporność korozyjna powłok NiW+ Si_3N_4 jest mniej zależna od zawartości proszku Si_3N_4 w elektrolicie i napięcia nakładania. Na podstawie wyników badań powłok metalowych Cu-Ni należy przypuszczać, iż zastosowanie warstwy podkładowej Cu podwyższyłoby odporność korozyjną powłok NiW+ Si_3N_4 .

Prezentowane wyniki badań zostały uzyskane w ramach prac badawczych [2, 5, 6] oraz prac własnych autora.

Literatura

- [1] Brush plating solutions instruction manual, China National Machinery Import & Export Corporation, Beijing Branch.
- [2] Opracowanie metod wytwarzania oraz badania struktury i właściwości nowych warstw wieloskładnikowych i kompozytowych. Grant KBN nr 3 P407 058 04.
- [3] Grześ J.: Wytwarzanie metodą tamponową metalowych i metalowo-ceramicznych powłok kompozytowych. Kompozyty nr 5/2002, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, s. 359+363.
- [4] Grześ J.: Powłoki kompozytowe Cu+ Si_3N_4 i Ni+ Si_3N_4 nakładane metodą tamponową, Kompozyty nr 6/2003 (3(2003)6), Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.
- [5] Warstwy kompozytowe otrzymywane w procesie nakładania tamponowego. Program badawczy „Nowe Materiały”, Politechnika Warszawska.
- [6] Nanokompozyty ceramiczno-metalowe z gradientem właściwości. Grant KBN nr PZB-KBN-013/T08/15.

Odczyty techniczne

Organizowane przez Sekcję Spawalniczą OW SIMP, dostępne dla członków SIMP, NOT oraz wszystkich sympatyków spawalnictwa.

Wydział Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej

Gmach Nowy Technologiczny
Warszawa, ul. Narbutta 85, sala NT 129
Dojazd tramwajami: 17 i 33

Data i godzina	Prelegent, temat odczytu
27-03-2014 godz. 17 ⁰⁰	Dr inż. Michał Łagosz , Zakład Inżynierii Spajania PW Wymiarowanie konstrukcji spawanych z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi modelowania trójwymiarowego. Prezentacja projektowania oraz przykładów zrealizowanych konstrukcji.

Wytwarzanie stalowych i aluminiowych konstrukcji budowlanych w świetle zmian wymagań

Od 2010 r. przedsiębiorstwa wytwarzające konstrukcje stalowe i aluminiowe elementy konstrukcji zobligowane są do zapewnienia, że Zakładowa Kontrola Produkcji (ang. *Factory Production Control*) została certyfikowana na zgodność z wymaganiami EN 1090-1.

Aby wytwórca konstrukcji stalowych lub aluminiowych uzyskał certyfikat dla FPC, potrzeba nie tylko poświadczenia kwalifikacji pracowników zaangażowanych w cały proces, ale także udowodnienia, że istnieje wymagane wyposażenie techniczne. W celu uzyskania certyfikacji wg EN 1090ff firma powinna zostać poddana auditowi, którego podstawą jest sprawdzenie głównych czynników mających wpływ na jakość wytwarzanych konstrukcji stalowych lub aluminiowych, takich jak:

- egzaminy spawaczy,
- badania technologii spawania,
- ISO 3834 – zapewnienie jakości prac spawalniczych,
- wdrożenie i ciągłe nadzorowanie systemu zakładowej kontroli produkcji (FPC),

oraz innych, powiązanych z nimi procesów wytwórczych.

Certyfikacja FPC umożliwia oznakowanie wyrobów budowlanych znakiem CE, będącego dowodem zgodności z Dyrektywą o wyrobach budowlanych (CPD), a od 01.07.2013 r. Rozporządzeniem (UE) nr 305/2011. W rezultacie tak podjętych działań konstrukcje stalowe i aluminiowe mogą być wprowadzane do obrotu jako wysokojakościowe wyroby budowlane na terenie całej UE.

Jaka jest sytuacja prawna, dotycząca warunków wytwarzania stalowych i aluminiowych konstrukcji budowlanych?

Otóż, ponad dwadzieścia lat temu weszła w życie w Europie dyrektywa dot. wyrobów budowlanych (CPD – *Construction Products Directive*) nr 89/106/EEC. Celem dyrektywy było ujednoczenie warunków produkcji wyrobów budowlanych, zagwarantowanie swobodnego handlu i nieograniczonego korzystania z tych produktów w UE. W ciągu ostatnich lat zostały przyjęte i zharmonizowane w całej Europie poszczególne sekcje dyrektywy CPD, takie jak np. EN 10025ff dla wyrobów walcowanych na gorąco ze stali konstrukcyjnych. Także, pod koniec 2010 r., normy serii EN 1090 zastąpiły obowiązujące w poszczególnych państwach członkowskich UE krajowe wymagania dot. wytwarzania wyrobów budowlanych, np. w Polsce obowiązującą PN-B-06200, w Niemczech DIN 18800-7.

Od połowy 2012 r. – gdy upłynął okres przejściowy – wszystkie wytwórnie produkcji metalowej i firmy przetwórcze pracujące pod nadzorem budowlanym powinny być certyfikowane zgodnie z EN 1090-1 i posiadać certyfikat dla Zakładowej Kontroli Produkcji (FPC).

W dniu 1 lipca 2013 r. nastąpiła zmiana wymagań dot. wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych. Tego dnia obowiązywać zaczął nowy europejski akt prawny – Europejskie rozporządzenie o wyrobach budowlanych (CPR) – Rozporządzenie (UE) nr 305/2011 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 9 marca 2011 r. ustanawiające zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych, jednocześnie uchylające dyrektywę Rady 89/106/EWG – Dyrektywę Rady z dnia 21 grudnia 1988 r. w sprawie zbliżenia przepisów ustawowych, wykonawczych i administracyjnych państw członkowskich odnoszących się do wyrobów budowlanych (89/106/EWG), zmienioną dyrektywą Rady 93/68/EWG z dnia 22 lipca 1993 r.

UE-CPR jest automatycznie obowiązujące we wszystkich państwach członkowskich UE bez konieczności dodatkowego wdrożenia do prawa krajowego w danym kraju. Istnieją jednak pewne zmiany i nowe warunki wpływające na producentów i sprzedawców, jak również autoryzowanych importerów i dystrybutorów wyrobów budowlanych.

Z dniem 1 lipca 2013 r. wyroby budowlane powinny spełniać wymagania nowego rozporządzenia (CPR). Producenci, jednostki notyfikowane i użytkownicy wyrobów budowlanych muszą dostosować się do nowych warunków. Szczególny nacisk jest położony na pisemnej deklaracji właściwości użytkowych, zastępującej deklarację zgodności, i zmodyfikowanym oznakowaniu CE. Stosując to oznakowanie jako obowiązkowe, należy mieć na uwadze zależność, w której wyroby budowlane wytwarzane bez zastosowania zharmonizowanej specyfikacji technicznej (wymagań prawa europejskiego, a nie tylko niedostosowanych do CPR wymagań prawa krajowego) nie mogą być oznakowane CE.

Według zapisów art. 66 CPR obowiązują następujące warunki:

1. wyroby budowlane wprowadzone na rynek przed 01.07.2013 r. zgodnie z CPD są uważane za zgodne z rozporządzeniem wyrobów budowlanych (CPR);
2. producenci mogą wystawić deklarację właściwości użytkowych na podstawie certyfikatu zgodności lub deklaracji zgodności wydanych przed dniem 1 lipca 2013 r. zgodnie z dyrektywą 89/106/EWG;
3. wytyczne do europejskich aprobat technicznych, opublikowane przed dniem 1 lipca 2013 r. zgodnie z art. 11 dyrektywy 89/106/EWG, mogą być stosowane jako europejskie dokumenty oceny;
4. producenci i importerzy mogą wykorzystywać europejskie aprobaty techniczne wydane zgodnie z art. 9 dyrektywy 89/106/EWG przed dniem 1 lipca 2013 r. jako europejskie oceny techniczne do końca okresu ważności tych aprobat.

Europejskie rozporządzenie o wyrobach budowlanych (CPR) obowiązujące od dnia 1 lipca 2013 r. zostało wprowadzone na terenie UE z okresem przejściowym (do 01.07.2014 r.). Po tym terminie nie będzie już innego wymagania, jak tylko stosowanie zapisów Rozporządzenia UE Nr 305/2011. Do tego dnia wraz z CPR obowiązujące są wymagania prawa krajowego poszczególnych państw członkowskich UE. Wytwórcy posiadający aktualne dopuszczenia do wytwarzania wyrobów budowlanych wg wymagań prawa krajowego mogą nadal wytwarzać te wyroby i wprowadzać do obrotu, jednakże bez deklaracji zgodności lub deklaracji właściwości użytkowych oraz bez oznakowania CE.

Zatem, w zakresie wytwarzania budowlanych konstrukcji stalowych i aluminiowych do dnia 1 lipca 2014 r. obowiązujące pozostają zarówno wymagania europejskie ujęte w EN 1090-1, jak i wymagania krajowe (np. w Polsce PN-B-03200, PN-B-06200). Po tym terminie obowiązujące będą wyłącznie wymagania europejskie.

Rozporządzenie UE nr 305/2011 dot. wyrobów budowlanych reguluje wprowadzanie ich na rynek i swobodny przepływ w Unii Europejskiej lub Europejskim Obszarze Gospodarczym (EOG) dopóki dopóki nie zostaną zharmonizowane specyfikacje techniczne dla tych wyrobów. Państwa członkowskie zasady dot. wytwarzania wyrobów budowlanych, a tym samym korzystania z nich na własnym terytorium, regulują samodzielnie.

Współczesne metody mechanicznego przygotowania powierzchni konstrukcji stalowych do zabezpieczeń antykorozyjnych

Streszczenie

W artykule przedstawiono różne aspekty mechanicznego przygotowania powierzchni konstrukcji stalowych, a w szczególności konstrukcji spawanych. Podano wytyczne obróbki strumieniowo-ściernej, która obecnie jest podstawową metodą przygotowania podłoża dla powłok lakierniczych i metalizacyjnych. Zwrócono również uwagę na aspekty ochrony środowiska naturalnego, niezbędne podczas prowadzenia tego typu prac.

Wstęp

Problem przygotowania powierzchni pod powłoki antykorozyjne wydaje się znany i stosunkowo prosty, a mianowicie: należy przygotować powierzchnię konstrukcji stalowej (w domyśle – spawanej) zgodnie z wymaganiami stawianymi przy dalszych operacjach. Pojawiają się jednak wówczas następujące kwestie:

- Jakież są warunki zabezpieczenia antykorozyjnego (rodzaj powłoki)?
 - Jakież warunki czasowe i organizacyjne są pomiędzy przygotowaniem powierzchni a nałożeniem zabezpieczenia?
 - Jaki jest kształt elementów konstrukcji?
 - W którym miejscu procesu wytwarzania prowadzone jest czyszczenie (przed czy po spawaniu)?
 - W którym miejscu należy przeprowadzić czyszczenie i nałożyć powłokę?
 - Jak przeprowadzić utylizację odpadów po przygotowaniu powierzchni (jakie aspekty ochrony środowiska należy uwzględnić)?
- Konkretne, adekwatne do rzeczywistych warunków

Mgr inż. Marek R. Brzeziński – Instytut Mechaniki Precyzyjnej, Warszawa.

odpowiedzi na te pytania powinny determinować wybór większości parametrów procesu przygotowania powierzchni, który może okazać się niezbyt prosty.

Tymczasem pomijane są tu sytuacje: częściowego czyszczenia, tylko wybranych miejsc lub tylko miejsca spoin – czyli nie rozważamy całości konstrukcji, a tylko wybrane miejsca (po spawaniu), a z resztą „jakoś będzie”.

Rodzaj przewidywanej powłoki ochronnej (lakiernicza, metalizacyjna lub obie) oraz ich grubość określa wstępny zakres oczekiwanych wielkości chropowatości determinowanych takimi parametrami jak Ry_5 i Ra. Zazwyczaj chropowatość powinna mieścić się w zakresie 30÷50% grubości przewidywanej powłoki, określana wielkością parametru Ry_5 , lecz mogą być również inne wymagania. W związku z tym nie można dokładnie określić, jaka powinna być chropowatość powierzchni, a jedynie z dużym przybliżeniem przyjąć, że dla różnych powłok lakierowych będzie wynosić 20÷40 μm , zaś dla powłok metalizacyjnych 40÷60 μm .

Istotny jest również kształt profilu chropowatości, pożądanym jest tzw. „zębaty” – związane jest to z rodzajem stosowanego ścierniwa/ziarna: lepsze jest ostrokatne niż zbliżone do kulistego.

Dodatkowym warunkiem początkowym jest rzeczywisty stopień wstępnego skorodowania podłoża i oczekiwany (osiągnięty) stopień oczyszczenia po obróbce, np.: Sa (1 do 2 ½), a bardzo rzadko Sa 3.

Metody przygotowania powierzchni

Śrutowanie

Podstawową metodą zapewniającą odpowiednią wielkość i typ profilu chropowatości dla wszelkich powłok natryskiwanych (malarskich, metalizacyjnych) jest obróbka strumieniowo-ścierna (tzw. *śrutowanie*) – nieprawidłowo nazywana „piaskowaniem”.

W jakości obróbki strumieniowo-ścierniej, rozumianej jako stopień oczyszczenia, uzyskanie wymaganej chropowatości, powtarzalności procesu i kosztów wykonania, kluczowe znaczenie mają zastosowane urządzenia technologiczne i związane z tym ścierniwa oraz kolejność procesów technologicznych.

Inne metody

Operacje takie jak: szlifowanie tarczowe, szczotkowanie lub młotkowanie mechaniczne/ręczne powinny być traktowane jako operacje dodatkowe, uzupełniające – niezapewniające jakości przygotowania podłoża porównywalnej ze śrutowaniem, jednak niekiedy niezbędne.

Specyfika konstrukcji spawanych

Specyfika konstrukcji spawanych z punktu widzenia pełnego oczyszczenia podłoża, a w szczególności metody strumieniowo-ścierniej powoduje wiele trudności i niejako wymusza dużo wcześniejsze zabiegi technologiczne, niżby się to wydawało. Dotyczy to w szczególności przestrzeni konstrukcyjnych z ograniczonym dostępem: typu U, V, długich częściowo zamkniętych lub otwartych otworów.

Inną cechą konstrukcji spawanych jest powstawanie po spawaniu bardzo twardej, odpornej na ścieranie powłoki z żużli spawalniczych. Wymagają one szczególnie podejścia technologicznego, przedstawionego dalej.

Wstępne oczyszczanie półfabrykatów

Rozważając wspomniane oraz jeszcze inne czynniki, optymalne jest (o ile to możliwe):

- stosowanie półfabrykatów (kształtowników, blach) wstępnie oczyszczonych strumieniowo-ściernie przed dostawą (u producenta),
- stosowanie półfabrykatów (kształtowników, blach) wstępnie oczyszczonych strumieniowo-ściernie i ze wstępną powłoką lakierniczą (*primere*) przed dostawą [1] – u producenta, z wyjątkiem konstrukcji metalizowanych,
- wstępne oczyszczanie elementów po cięciu i/lub ukosowaniu: mycie z pozostałości chłodziw, tłuszczów i innych zanieczyszczeń (przed spawaniem),
- usunięcie (przedmuchiwanie) z resztek ścierniwa i pyłu od producenta/dostawcy.

Prawie zawsze te półfabrykaty przed ciągłym czyszczeniem są wstępnie opalane i odmuchiwane z zanieczyszczeń organicznych i wilgoci, a po procesie śrutowania prowadzone jest automatyczne zamiatanie wirującymi szczotkami i odmuchiwanie powietrzem.

Wymienione, nieco dziwne propozycje, wydają się później oczywiste, gdy analizuje się koszty wykonania konstrukcji. Bardzo istotne jest takie wstępne przygotowanie również z punktu widzenia przyszłych możliwości technicznych wykonawcy spawania.

Alternatywne wstępne oczyszczanie

Jeżeli nawet półfabrykaty (blachy, kształtowniki) nie są przygotowane wstępnie tak jak to przedstawiono wcześniej, to nadal najkorzystniejsze jest stosowanie oczyszczania przed operacjami montażowymi (spawaniem) i również wtedy powinno następować wstępne oczyszczanie elementów po cięciu, po ukosowaniu: mycie z pozostałości chłodziw, tłuszczów i innych zanieczyszczeń, ostatecznie chociażby „odmuchi” sprężonym powietrzem [2].

Tak jak przy oczyszczaniu wstępnym najlepiej jest stosować ściernia metalowe, takie jak: śruty stalowe ostrokątne, śruty żeliwne, śruty kuliste w zakresach średnic ziarna 0,4÷1,2 mm. Konieczne jest stosowanie urządzeń z automatycznym obiegiem ścierniwa. Stosowane są urządzenia wirnikowe (najlepiej przelotowe) lub duże komory z oczyszczarkami pneumatycznymi ciśnieniowymi, które zawsze wyposażone są w układy automatycznego obiegu i uzupełniania ścierniwa.

Otrzymywana po obróbce chropowatość zazwyczaj jest regulowana prędkością obrotową wirników (kół rzutowych) przy jednej wielkości ścierniwa.

Śruty są ścierniwami wielokrotnego użytku: zarówno pod względem technicznym, jak i ekonomicznym. Oddzielanie tzw. *podziarna* następuje w związanych z maszynami systemach filtracji i odsiewania (odwiania) zarówno drobnych cząstek rozbitego ścierniwa, jak i zanieczyszczeń z obrabianej powierzchni [3].

Problemem jest czystość ścierniwa w obiegu, szczególnie poziomu jego zaolejenia, stąd pożądane jest wstępne mycie lub opalenie elementów. Czystość zależy głównie od stanu czystości chemicznej materiałów wyjściowych i stanu technicznego urządzeń obróbkowych – znów wynika z tego konieczność czyszczenia wstępnego.

Późniejsze ewentualne doczyszczanie ręczne można prowadzić pneumatycznymi urządzeniami strumieniowo-ściernymi ciśnieniowymi, stosując ścierniwa mineralne: elektrokorund, żużel pomiedziowy, żużel ponikłowy, garnet.

Niedopuszczalne jest stosowanie do oczyszczania „na sucho” piasku kwarcowego z powodu zakazu obwiązującego w tej dziedzinie od wielu lat.

Oczyszczanie po spawaniu

W przypadku stosowania półfabrykatów przygotowanych/opisanych powyżej, po spawaniu podstawową operacją powinno być tzw. *młotkowanie*, tzn. odbijanie żużla ze spoin (o ile występuje) ręczne lub pneumomechaniczne. To ułatwia późniejszą miejscową obróbkę strumieniowo-ścierną miejsc spoin, ale raczej już bez obiegu ścierniwa, więc ścierniwami typu garnet lub żużle.

Szczególną cechą obróbki spoin jest kąt ustawienia strumienia ściernego/dyszy w stosunku do powierzchni. Zazwyczaj przy oczyszczaniu zalecane jest w celu uzyskania optymalnych efektów obróbki ustawianie dyszy do powierzchni pod kątem ok. 30÷60°. W celu maksymalizacji efektu rozbijania tzw. „szlaki” na spoinie optymalne jest ustawienie dyszy pod kątem ok. 90°, wówczas dominuje efekt zbliżony do kulowania – pękanie „szlaki”.

Ostatecznym zabiegiem jest omiecenie lub odmuśnianie powierzchni z resztek zanieczyszczeń.

Te operacje powinny być wykonywane u producenta konstrukcji spawanej, w zadaszanej hali, a więc z niewielkim wpływem warunków atmosferycznych.

Alternatywne oczyszczanie całej konstrukcji po spawaniu, bez wstępnych operacji, zawsze okazuje się bardzo niedokładne, wątpliwe technicznie i bardzo kosztowne.

Ocena metod oczyszczania

Z przedstawionych powyżej sposobów organizacji oczyszczania niewątpliwie najgorszym rozwiązaniem jest oczyszczanie całości konstrukcji po spawaniu, przed nałożeniem powłok ochronnych na placu budowy/montażu całej konstrukcji.

Oczywistymi przeciwnościami w tym przypadku są warunki atmosferyczne, pora roku, pośpiech (a więc niedokładność), niedoczyszczenia w miejscach trudno dostępnych, konieczność stosowania urządzeń pneumatycznych – więc o bardzo małej wydajności, a jednocześnie bardzo energochłonnych. Ponadto wprowadzony jest tu wpływ tzw. elementu ludzkiego („jakoś się to zrobi”).

Jakość przygotowania powierzchni jest niska, koszty wysokie, utylizacja odpadów jest kosztowna (aczkolwiek niekiedy w ogóle jej nie ma).

Ocena jakości przygotowania podłoża

Podstawą przyjęcia ramowego procesu wyboru technologii wykonania przygotowania podłoża jest ocena stanu wyjściowego, stanu dostawy surowca.

Norma PN-EN ISO 8501 [4] porządkuje opis stanu podłoża przed oczyszczaniem, opisując go od A do D, głównie w zależności od stopnia skorodowania. Taki opis wymaganego wyjściowego, rzeczywistego stanu stanowi uzasadnienie do przyjętych później wariantów technologicznych, a co jest chyba najważniejsze, oceny pracochłonności oczyszczania, a więc kosztów pracy.

Norma ta przewiduje również oznaczenie wyglądu stanu powierzchni po oczyszczaniu, zgodnego z zamieszczonymi w niej fotograficznymi wzorcami, w celu możliwości łatwego zapisu efektów pracy ustawiono:

- dla oczyszczania strumieniowo-ściernego są cztery stopnie: Sa 1, Sa 2, Sa 2 ½, Sa 3,
- dla oczyszczania ręcznego i zmechanizowanego są dwa stopnie: St 2 i 3,
- dla oczyszczania płomieniowego jest jeden stopień: F1.

Podobną procedurą jest ocena wielkości uzyskanej chropowatości po oczyszczaniu bez konieczności pomiaru, tylko na podstawie porównania z wzorcami. Zawierają one dwie płytki wzorcowe, jedną dla ścierniw ostrokątnych, drugą dla kulistych; z czterema polami o różnej chropowatości każda, od 25 do 150 µm. Porządkuje to norma PN-EN ISO 8503 [5].

Opisane metody [6] mają charakter porównawczy i są w pewien sposób subiektywne, ale zazwyczaj wystarczające do zapisu wymagań technicznych oraz udokumentowania przebiegu prac technologicznych.

Oczywiście najdoskonalszą metodą oceny chropowatości jest jej pomiar przenośnymi przyrządami, gdyż wówczas istnieje możliwość zapisu wyników pomiaru, a więc również ich udokumentowanie.

Rodzaje ścierniw

W zależności od: miejsca prowadzenia obróbki, miejsca oczyszczania w procesie technologicznym wykonania konstrukcji, dostępnych urządzeń do oczyszczania, zalecane są różne rodzaje ścierniw.

Uwzględnić należy: możliwość wielokrotnego użycia ścierniwa, jego odpylania, zbierania zużytego ścierniwa, uciążliwości dla otoczenia powstałych pyłów.

Bardzo istotne jest również przewidywanie sposobu utylizacji odpadów powstałych w czasie oczyszczania.

Podstawowe ścierniwa to:

- śruty stalowe ostrokątne w zakresach wielkości ziarna 0,4÷1,2 mm,
- śruty stalowe kuliste w zakresach wielkości ziarna 0,4÷1,2 mm,
- elektrokorundy zwykłe lub szlachetne w zakresach wielkości ziarna 0,4÷1,4 mm,
- garnet w zakresach wielkości ziarna 0,6÷1,4 mm,
- żuźle (pomiedziowy, ponikłowy) w zakresach wielkości ziarna 0,6÷1,4 mm.

Śruty [7] stalowe ostrokątne i kuliste są ścierniwami wielokrotnego użycia.

Celem stosowania śrutu ostrokątnego łamanego lub ciętego z drutu jest oczyszczenie podłoża i uzyskanie właściwej dla powłoki wielkości i kształtu chropowatości.

Zależnie od jakości śrutu, składu chemicznego, kształtu oraz właściwości oczyszczanego podłoża, można spodziewać się trwałości od 500 do 5000 przejść śrutu.

Pylenie śrutów w wyniku zużycia jest bardzo małe.

Największą trwałość mają śrutu kuliste stalowe, ok. 6000 przejść, jednak ich zdolność do skrawania jest nieco mniejsza niż śrutów ostrokątnych. Główny cel ich stosowania to skruszenie powierzchniowej zgorzeliny, a także skruszenie pozostałości żużli na spoinach po spawaniu.

Ceny śrutów stalowych i stalowych zwykle są najwyższe; w zależności od typu i granulacji (czyli wielkości ziarna) sięgają 4÷7 PLN/kg.

Elektrokorundy [8] – zwykły lub szlachetny – mają ziarna ostrokątne, zaś ich trwałość to 10÷30 przejść, z możliwością stosowania tylko w oczyszczarkach pneumatycznych. Ich ceny są nieco niższe (2÷4 PLN/kg) od śrutów stalowych, ale pylenie zdecydowanie większe.

Garnet i żuźle [8] również mają ziarna ostrokątne, jednak ich trwałość to co najwyżej dwa przejścia przez powierzchnię obrabianą, a pylenie jest bardzo duże. Praktycznie są przeznaczone do stosowania w obiegu otwartym lub w komorach o bardzo dobrej wentylacji. Mają najniższe ceny (1÷3 PLN/kg).

Zróznicowanie cen u poszczególnych dostawców zależy od: typu i wielkości ziarna, jakości pod względem trwałości, jak również ilości podziarna oraz wielu innych istotnych cech, więc ogólnie mówiąc, od jakości ścierniwa.

Odpady po oczyszczaniu

Oczywistymi odpadami po obróbce stalowej powierzchni są: drobiny stali w postaci pyłu, zawiesiny, pyły i odpady materiałów ściernych (zużyte ścierniwa), tłuszcze i smary z poprzednich procesów. Z uwagi na konieczność utylizacji tych materiałów wydaje się oczywiste wykonywanie tych operacji na ściśle określonych stanowiskach (śrutownice, szlifiernie, myjnie), gdzie nie będą one rozprzestrzeniały się do otoczenia, można je łatwo zbierać i utylizować. Korzystne jest stosowanie kurtyn wodnych w celu koncentracji pyłów w postaci szlamu.

Utylizacja może polegać na składowaniu na odpowiednich wysypiskach albo, co wydaje się dużo bardziej celowe, stosowaniu ich jako domieszek do podsyppek drogowych itp.

Wielu dostawców ścierniwa zajmuje się również utylizacją odpadów po oczyszczaniu.

Ostatecznością jest wykonywanie operacji oczyszczania, mycia, malowania pospawanej konstrukcji już na placu budowy czy montażu. Niekiedy ta „ostateczność” może być bardzo kosztowna dla wykonawcy z uwagi na łączne stężenie zanieczyszczeń – również z uwzględnieniem ewentualnych kar za zanieczyszczenie środowiska oraz konieczności utylizacji nie tylko materiałów technologicznych, ale także zanieczyszczonych fragmentów otoczenia (np. ziemi).

Wnioski

- Najlepsze efekty techniczne i ekonomiczne są uzyskiwane przy stosowaniu blach, kształtowników wstępnie obrabianych strumieniowo-ściernie u producenta/dostawcy.

- Najwyższa jakość i wydajność oraz najniższe koszty oczyszczania uzyskiwane są przy stosowaniu oczyszczarek wirnikowych.
- Nieco niższe wydajności i znacznie wyższe koszty oczyszczania obserwuje się przy stosowaniu pneumatycznych urządzeń ciśnieniowych.
- W omówionych przypadkach najkorzystniejsze jest stosowanie ścierniwa metalowych (śrutów).
- Szczególną uwagę należy poświęcić obróbce samych spoin.
- Najkosztowniejsze, najmniej wydajne, najniższe jakościowo i nieekologiczne jest wykonywanie całego procesu oczyszczania urządzeniami pneumatycznymi i ścierniwami jednorazowego użytku w „terenie”, czyli w miejscu montażu konstrukcji spawanej.

Literatura

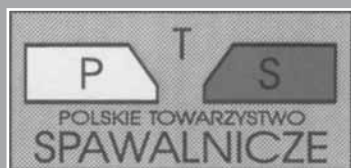
- [1] Bus J.: Zabezpieczenia antykorozyjne dla morskich statków; *Lakiernictwo Przemysłowe*, 3/2011.
- [2] Andziak J.: Strumieniowo-ściernie przygotowanie podłoża stalowych przed nanoszeniem powłok ochronnych; *Symposium „Metody i środki do strumieniowo-ściernego przygotowania podłoża metali pod powłoki ochronne”*, IMP - Hajnówka 2001.
- [3] Piosik T.: Wirnikowe oczyszczarki strumieniowo-ściernie; *Symposium „Metody i środki do strumieniowo-ściernego przygotowania podłoża metali pod powłoki ochronne”*, IMP Hajnówka 2001.
- [4] PN-ISO 8501 – Przygotowanie podłoża stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów. Wzrokowa ocena czystości powierzchni. Stopnie skorodowania i stopnie niezabezpieczonych podłoża stalowych po usunięciu wcześniej nałożonych powłok; PKN 1998.
- [5] PN-ISO 8503 – Przygotowanie podłoża stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów. Charakterystyka chropowatości powierzchni podłoża stalowych po obróbce strumieniowo-ścierniej; PKN 1999.
- [6] Jaczewski M.: Przygotowanie powierzchni do malowania; *Lakiernictwo Przemysłowe*, 3/2012.
- [7] PN-ISO 11124 – Przygotowanie podłoża stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów. Wymagania techniczne dotyczące metalowych ścierniwa stosowanych w obróbce strumieniowo-ścierniej; PKN 2000.
- [8] PN-ISO 11126 – Przygotowanie podłoża stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów. Wymagania techniczne dotyczące niemetalowych ścierniwa stosowanych w obróbce strumieniowo-ścierniej; PKN 2001.

Abstract

The paper presents different aspects of mechanical treatment of steel constructions especially welded constructions. We present fundamental guidelines during works of surface preparing treatment before painting or metal spraying which is shot blasting. We point on an aspect of environmental protection during works like blasting.

POLSKIE TOWARZYSTWO SPAWALNICZE

Oddział w Opolu



POLITECHNIKA OPOLSKA w Opolu

informuje o organizacji

XIX KONFERENCJI SPAWALNICZEJ „SPAWANIE W ENERGETYCE” w dniach od 8 do 10 kwietnia 2014 r. w Ośrodku Ziemowit w Jarnołtówku

- Referaty o maksymalnej objętości 8 stron zostaną opublikowane w Przeglądzie Spawalnictwa
- Opłata konferencyjna wynosi 1350 zł w pokoju jednoosobowym oraz 1100 zł w pokoju dwuosobowym i obejmuje noclegi, pełne wyżywienie, materiały konferencyjne, oraz udział w imprezach towarzyszących. Opłatę należy wpłacić do 15.03.2014 r. Po tym terminie opłata wzrasta o 15%.
- Autor referatu wnosi opłatę w wysokości 1100 zł za pokój jednoosobowy i 950 zł za pokój dwuosobowy. W przypadku referatów współautorskich zniżka dotyczy tylko jednego autora.
- Zgłoszenia uczestnictwa w konferencji należy przesać do 15 marca 2014 r, a referaty do 1 lutego 2014 r. pod adres:

POLSKIE TOWARZYSTWO SPAWALNICZE – ODDZIAŁ W OPOLU
ul. A. Struga 10, 45-073 Opole (faks: 48 77 401 92 01)

Wszystkich zainteresowanych udziałem w konferencji prosimy o kontakt z Polskim Towarzystwem Spawalniczym – Oddział w Opolu.

Dodatkowe informacje: Anna Pocica, tel. 48 77 4498539, 501598761, e-mail: a.pocica@po.opole.pl
Tomasz Derwich, tel. 48 77 4019258, e-mail: tomasz.derwich@esab.pl

PLANY SPAWANIA - TEORIA I PRAKTYKA - JACEK SŁANIA

Cena

Cena 1 egzemplarza książki Jacka Słania:
Plany spawania – teoria i praktyka wynosi:
80 zł (w tym 5% VAT)

**W celu zamówienia książki
w Redakcji należy wypełnić formularz
zamieszczony obok i przesać go
w formie faksu, skanu lub listu na adres:**

REDAKCJA – Przegląd Spawalnictwa AW SIMP

ul. Świętokrzyska 14a, 00-050 Warszawa
tel.: 22 827 25 42, faks: 22 336 14 79
e-mail: pspaw@ps.pl

Wpłaty należy dokonać na rachunek bankowy:

Bank BPH S.A. Oddział w Warszawie
45 1060 0076 0000 3200 0043 1836

**Zamawiam książkę *Plany spawania – teoria i praktyka*
w Redakcji Przegląd Spawalnictwa w liczbie egz.**

Imię i nazwisko

Firma

Adres

NIP

Kontakt do osoby zamawiającej:

Oświadczam, że jestem podatnikiem VAT i upoważniam firmę do wystawienia faktury bez podpisu

Podpis

Zabezpieczenia antykorozyjne konstrukcji stalowych dla oznaczenia CE wg PN-EN 1090

Streszczenie

W artykule przedstawiono m.in. wymagania PN-EN 1090 wobec przygotowywania powierzchni elementów konstrukcji stalowych przed spawaniem i przed wykonywaniem powłok ochronnych. Opisano również problem badania właściwości powłok ochronnych podczas ich wykonywania i na etapie kontroli powykonawczej. Przedstawiono przykładowe urządzenia służące do realizacji operacji technologicznych przygotowania powierzchni i wykonywania powłok oraz ich kontroli.

Wstęp

Od 1 lipca 2014 r. w celu oznakowania konstrukcji stalowych i aluminiowych przeznaczonych do wprowadzenia na rynek Unii Europejskiej producenci będą musieli spełniać wymagania EN 1090. Wśród wielu wymagań, PN-EN 1090 określa również te, które dotyczą przygotowania i obróbki powierzchni konstrukcji.

Norma ISO 3834 *Wymagania jakości dotyczące spawania materiałów metalowych* określa wymagania jakościowe oraz stanowi podstawę oceny zdolności spawalniczych wytwórcy konstrukcji stalowych.

Norma PN-EN 1090 *Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych* określa wymagania jakościowe całego procesu wytwarzania konstrukcji dla wykonawców planujących oznakowanie swoich wyrobów znakiem CE. Norma ta składa się z trzech części:

Część 1: Zasady oceny zgodności elementów konstrukcyjnych;

Część 2: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych;

Część 3: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji aluminiowych.

Wykonawca powinien posiadać wdrożony i certyfikowany system Zakładowej Kontroli Produkcji oraz przeprowadzić ocenę zgodności produkowanego wyrobu z wymaganiami EN 1090. Ocena obejmuje wytwarzanie, a tam gdzie jest to wskazane, również projektowanie konstrukcji. Normę stosuje się do seryjnego i jednostkowego wytwarzania elementów konstrukcyjnych oraz ich zestawów.

Wybór ochrony antykorozyjnej

Obróbka powierzchni dotyczy wielu etapów wytwarzania konstrukcji, m.in. oczyszczenia brzegów przed spawaniem, oczyszczenia złączy spawanych, przygotowania powierzchni przed wykonaniem powłoki ochronnej oraz kontroli procesu i oceny zabezpieczenia antykorozyjnego. W tym przypadku w PN-EN 1090 zapisane są odwołania do norm powiązanych, określających szczegółowo te zagadnienia, np. sposób badania stopnia czystości powierzchni określa PN-ISO 8501. Podstawą zabezpieczenia konstrukcji stalowych przed korozją jest nałożenie odpowiedniego powłokowego systemu ochronnego na prawidłowo przygotowane podłoże [1, 2, 4].

System ochronny powłokowy może składać się z jednej powłoki nakładanej w kilku warstwach, może to być także kilka różnych powłok o uzupełniających się właściwościach.

Dobór właściwego systemu ochronnego zależy przede wszystkim od stopnia agresywności środowiska, w jakim konstrukcja ma być użytkowana, oraz od planowanego czasu eksploatacji. Wraz ze wzrostem poziomu agresywności środowiska wzrastają również wymagania co do systemu ochronnego i – co często idzie za tym – wymagania co do przygotowania powierzchni pod planowaną powłokę ochronną. Zależności te zawarto w PN-71/H-04651 oraz ISO 12944. Planowany czas eksploatacji jest zależny od rodzaju

wybranej powłoki. Przykładowo dla powłok natryskiwanych cieplnie PN-EN 22063 i PN-H-04684 określają zależności pomiędzy okresem oczekiwanej trwałości a grubością powłoki, środowiskiem i rodzajem natryskiwanego materiału [5]. Trwałość powłoki malarskiej (wg ISO 12944-1) jest to oczekiwany czas do pierwszej renowacji, która powinna nastąpić w przypadku wystąpienia określonego stopnia zniszczeń korozyjnych opisanych w ISO4628-1-5.

Procesem wchodzącym w skład systemu i decydującym o jakości i trwałości nakładanej powłoki ochronnej jest właściwe przygotowanie powierzchni. Proces polega na usunięciu z niej zanieczyszczeń i nadaniu odpowiedniej klasy chropowatości. Rodzaje zanieczyszczeń, jakie mogą występować na powierzchni materiału lub konstrukcji, to m.in. zendra walcownicza, zgorzelina, rdza, zużyta powłoka ochronna, zatłuszczenia, pyły, skondensowana wilgoć, zanieczyszczenia jonowe. Staranne oczyszczenie powierzchni zwiększa poziom energii swobodnej powierzchni, umożliwiając uzyskanie odpowiednio wysokiej przyczepności powłoki do podłoża [3, 6]. Nadanie odpowiedniej chropowatości zwiększa natomiast powierzchnię kontaktu powłoki z podłożem.

Przygotowanie powierzchni metodą strumieniowo-ścierną

Powszechnie stosowaną metodą, umożliwiającą najlepsze na poziomie przemysłowym przygotowanie powierzchni pod powłoki ochronne, jest obróbka strumieniowo-ścierna [7, 9]. Metoda ta polega na oddziaływaniu na obrabianą powierzchnię ścierniwa o dużej energii kinetycznej, powodującego erozję zdefektowanej warstwy wierzchniej aż do uzyskania czystej metalicznej powierzchni. Wybór odmiany oczyszczania strumieniowo-ściernego zależy od wielu czynników, w największym stopniu od: wielkości oczyszczanej powierzchni, wolumenu produkcji, gabarytów i geometrii wytwarzanych czy obrabianych przedmiotów [7].

Rodzaj czyszczonego metalu i jego wymagana docelowo chropowatość determinuje zastosowanie odpowiedniej technologii narzucania pneumatycznego (mieszanka sprężonego powietrza i ścierniwa przez dyszę) lub wirnikowego (siła odśrodkowa koła rzutowego) odpowiedniego rodzaju i kształtu ścierniwa, które będzie inne dla konstrukcji stalowych, inne dla aluminium i inne dla stali nierdzewnych. Zależności te opisano w PN-EN ISO 11124-1. Dobór właściwego ścierniwa ma więc znaczenie zarówno w kwestii uzyskiwanego stopnia oczyszczenia, jak i żądanej klasy chropowatości podłoża przygotowywanego pod powłokę ochronną. Powszechnie stosowane ścierniwa to śrut żelazny, śrut stalowy, śrut stalowy nierdzewny, odmiany elek-

trokorundu. Wybór technologii do obróbki strumieniowo-ściernej wirnikowej lub pneumatycznej zależy od różnych czynników.

W omawianych oczyszczarkach stosowane są ścierniwa wielokrotnego użytku, przy czym ścierniwa o kształcie kulistym stosowane są przede wszystkim w maszynach wirnikowych, natomiast ścierniwa ostrokrawędziowe są powszechnie wykorzystywane w śrutowniach pneumatycznych. Oczywiście nie jest to zasada stosowana w każdym przypadku [11]. Oczyszczarki wirnikowe firmy SciTeeX umożliwiają stosowanie mieszanek śrutów lub śrutu ostrokrawędziowego.

Do obróbki pneumatycznej nadają się zwłaszcza elementy o zróżnicowanych wymiarach [10], złożonej geometrii, wielkogabarytowe, np. gotowe konstrukcje, ale również takie, kiedy wymogiem technologicznym jest uzyskanie profilu o wysokich chropowatości.

Najprostsze oczyszczarki pneumatyczne (rys. 1) w zależności od potrzeb mogą mieć różnej pojemności zbiorniki na śrut, różną długości lancy roboczej, średnice i rodzaj dyszy. Zastosowanie tego typu urządzeń ma miejsce głównie w warunkach poligonowych.



Rys. 1. Oczyszczarka standardowa i bezpyłowa

Oczyszczarki tzw. bezpyłowe umożliwiają odzysk ścierniwa użytego do czyszczenia przez lancę w kontakcie z powierzchnią oczyszczaną. Niska wydajność tego typu urządzeń ogranicza ich zastosowanie w praktyce do obróbki miejscowej. Komory śrutownicze pneumatyczne stanowią w przemyśle standard wielokrotnie sprawdzony, ekonomiczny w eksploatacji i prosty w obsłudze. Wyjątkowo przyjazne warunki pracy zapewnione są m.in. przez skuteczność odpylania oraz wydajne oświetlenie, co skutkuje wysoką jakością i wydajnością produkcyjną przy najniższych kosztach. W tej dziedzinie liderem europejskim jest firma SciTeeX. Opatentowany system transportu ścierniw FlexMatic, po doświadczeniach wynikających z kilkunastu lat intensywnej eksploatacji, w wyniku opinii użytkowników, udzielonych licencji oraz setek egzemplarzy pracujących maszyn, uzyskał pozycję standardu przemysłowego.

Typowe elementy do obróbki wirnikowej w maszynach automatycznych to elementy produkcji seryjnej, elementy o powtarzalnej i „otwartej” geometrii, takie jak kształtowniki i pręty stalowe, a także blachy.

Oczyszczarki wirnikowe (rys. 3) są urządzeniami, w których obróbka następuje automatycznie. Są to maszyny łatwe w obsłudze, bezpieczne, ekonomiczne w eksploatacji oraz spełniają wymagania ochrony środowiska. Przykładem maszyny do obróbki blach i profili jest tzw. oczyszczarka wirnikowa rolkowa, gdzie przenośnik rolkowy ma bezstopniową regulację prędkości. Wsady są równomiernie i dokładnie czyszczone ze wszystkich stron bez konieczności ich odwracania. Ścierniwo pracuje w obiegu zamkniętym. Urządzenia wyposażone są w filtr odpylający, który zapewnia bezpyłową pracę. Maszyna może być wyposażona w układy wspomagające załadunek i rozładunek. W niektórych rozwiązaniach na wyjściu ze strefy obróbki wirnikowej elementy są poddawane obróbce szczotkowania i odmuchiwania obrobionej powierzchni. Dzięki temu przedmioty po obróbce pozabawione są pozostałości ścierniwa i pyłów i mogą

być przeznaczone przykładowo do automatycznego zabezpieczania lakierem podkładowym. Specjalne oczyszczarki rolkowe mogą być również stosowane do czyszczenia przestrzennych konstrukcji spawanych – w tym przypadku bezużyteczne są układy szczotkowania, natomiast turbin jest więcej i są ustawione pod różnymi kątami względem kierunku transportu.

Elementy o złożonej geometrii, ale wytwarzane seryjnie, mogą być obrabiane w technologii mieszanej – wirnikowej i pneumatycznej.

Powłoki metalowe natryskiwane cieplnie

Do realizacji natryskiwania cieplnego metalowych powłok antykorozyjnych stosowane są powszechnie dwie technologie:

- system płomieniowy (rys. 4),
- system łukowy (rys. 5).



Rys. 2. Komora do śrutowania pneumatycznego CABILUX PC-CL 633 – SciTeeX



Rys. 3. Maszyna do śrutowania wirnikowego RATIOJET RS-P 840/4T – SciTeeX



System płomieniowy wyposażony jest w układ regulacji ciśnienia gazów roboczych oraz w palnik gazowo-tlenowy, w którym generowany jest strumień natryskowy. Materiał powłokowy może mieć formę drutu lub proszku. Wydajność natryskiwania może wynosić do 50 kg Zn/h.

Na rysunku 5 pokazano system Metallisation do natryskiwania łukowego. Źródłem ciepła służącym do topienia materiału powłokowego jest łuk elektryczny, materiał powłokowy rozpylany jest sprężonym powietrzem.



Rys. 4. System natryskiwania płomieniowego Metallisation



Rys. 5. System natryskiwania łukowego 350 Metallisation

Natryskiwanie cieplne wymaga specjalnych warunków w celu zapewnienia zarówno bezpieczeństwa operatora, jak i poprawności warunków natryskiwania powłoki.

Ten specyficzny proces termiczny wymaga specjalnych warunków pracy. Ze względu na zagrożenie wybuchowe wynikające z powstających wysokich stężeń pyłów, urządzenia muszą być wyposażone w zabezpieczenia p.poż. Toteż kabiny do metalizacji powinny być wyposażone w odpowiedni system wentylacji, oświetlenie, system tłumienia hałasu oraz system filtracji pyłów wykonany wg wytycznych ATEX.

Kabiny produkcji SciTeeX zintegrowane z urządzeniami do metalizacji łukowej angielskiej firmy Metallisation zapewniają ponadstandardowe wymagania oraz zaawansowane funkcje bezpieczeństwa pracy operatora.



Rys. 6. Komora do śrutowania i natryskiwania cieplnego w firmie Beckmann Volmer Niemcy

Powłoki organiczne (malarskie)

Technologia wykonywania systemu ochronnego określa technologię wykonywania powłoki, pod względem warunków klimatycznych oraz technologii transferu materiału malarskiego na powierzchnię. Materiał ochronny może być w postaci proszkowej lub ciekłej. Materiał proszkowy jest napylany elektrostatycznie, a następnie polimeryzowany (topiony) w temperaturze zwykle 200°C. Materiał ciekły może być nanoszony bezpośrednio (pędzlem, zanurzeniowo) lub natryskiwany przez pistolety pneumatyczne, pompy airless lub sterowane elektronicznie zestawy natryskowe umożliwiające nakładanie materiałów wieloskładnikowych o krótkich czasach żelowania (rys. 7÷9).

Przy nakładaniu systemu ochronnego istotne znaczenie ma miejsce wykonywania takich prac ze względu na wymagane warunki klimatyczne i czasy międzyoperacyjne. Natryskiwanie powłok ciekłych realizuje się optymalnie w kabinach-suszarkach lakierniczych zapewniających stabilne warunki technologiczne (temperatura, bezpyłowość, kontrolowana wilgotność), spełniających warunki BHP (wentylacja, oświetlenie) i środowiskowych. Kabiny takie dzięki



Rys. 7. Pompa WIWA Airless do natryskiwania farb i lakierów



Rys. 8. Pompa WIWA do natryskiwania materiałów o dużej gęstości



Rys. 9. Pompa WIWA do natryskiwania materiałów dwukomponentowych

zapewnianiu kontrolowanego środowiska pozwalają na znaczne wydłużenie bezpiecznego czasu pomiędzy przygotowaniem podłoża a nałożeniem powłoki (wg PN-H-04684).

Kabino-suszarki serii VENUS produkowane przez SciTeeX (rys. 10) stosowane są do natryskiwania powłok organicznych w zakresie temperatury 20÷30°C i suszenia w temperaturze 60°C, ustalonej według wymagań technologicznych dla wysokiej jakości powłok



Rys. 10. Kabino-suszarka lakiernicza Venus – SciTeeX

malarskich. Odpowiedni przepływ powietrza w fazie natryskiwania oraz laminarność przepływu zapewniają skuteczny odciąg „odkurzu” lakierniczego, wpływają na warunki technologiczne natrysku, higienę pracy, oświetlenie (białe ściany) i ochronę środowiska. Kabino-suszarka zapewnia także dużą wydajność produkcyjną; elementy schną kilka razy szybciej niż w temperaturze otoczenia.

Kontrola procesu przygotowania powierzchni

Zapewnienie właściwych warunków i przepisanych normami parametrów wykonywania powłok wymaga spełnienia określonych uwarunkowań. Wspólnym i ważnym dla całego procesu problemem jest kontrolowanie warunków klimatycznych od rozpoczęcia procesu czyszczenia powierzchni do nałożenia powłoki. Istotnym elementem kontroli jest określenie warunków kondensacji atmosferycznej pary wodnej na obrabianej powierzchni metalowej, tzw. temperatura punktu

rosy. Jeżeli temperatura podłoża jest wyższa o więcej niż 3°C od temperatury punktu rosy, wtedy nie zachodzi kondensacja pary wodnej na podłożu i może być ono poddane malowaniu. Przyrządem umożliwiającym szybkie pomiary warunków klimatycznych i obliczenie aktualnej różnicy pomiędzy temperaturą podłoża i punktu rosy jest miernik Elcometer 319 przedstawiony na rysunku 11.

Stopień czystości powierzchni – kolejny ważny czynnik technologiczny – określa się wzrokowo. Oczyszczoną powierzchnię należy ocenić w rozproszonym świetle dziennym lub przy odpowiednim sztucznym oświetleniu przez porównanie z fotografiami wzorcowymi zawartymi w PN-ISO 8501.

Ocena profilu chropowatości jest kolejnym istotnym czynnikiem technologicznym bezpośrednio związanym z jakością wykonywanych powłok. Zgodnie z zaleceniami normy ISO 8503-1 ocenie podlega parametr R_{y5} . Oceny można dokonać przy użyciu ręcznego przyrządu stykowego do pomiaru chropowatości (Elcometer 7061, rys. 12) lub przez porównanie badanej powierzchni ze wzorcami zawartymi w normie ISO 8503-2 (Elcometer 125, rys. 13).



Rys. 11. Elcometer 319



Rys. 12. Przyrząd do pomiaru chropowatości Elcometer 7061



Rys. 13. Przyrząd do oceny chropowatości Elcometer 125

W przypadku przygotowania powierzchni do malowania zalecana jest obróbka strumieniowo-ścierana śrutem ostrokątnym. Uzyskany w ten sposób profil powierzchni ma ostre i liczne podcięcia, które umożliwiają „zakotwiczenie się” powłoki w nierównościach metalu. Dla większości farb i lakierów zaleca się wartość Rz 40÷70 μm . W przypadku farb z małą ilością rozpuszczalników wartość Rz może wynosić 150÷250 μm [7].

Wpływ na jakość powłok ochronnych ma też stopień zanieczyszczeń tłuszczowych. Obecność tłuszczu na badanej powierzchni można stwierdzić np. wg PN-70/H-97052 metodą z bibułą filtracyjną i benzyną ekstrakcyjną.

Ocena zapylenia powierzchni jako kolejny czynnik technologiczny polega na określeniu stopnia zapylenia. Należy sprawdzić przez porównanie zebrane na taśmie samoprzylepnej pyły z rysunkiem wzorcowym zawartym w ISO 8502-3; służy do tego przyrząd oferowany przez SciTeeX -Elcometer 142 przedstawiony na rysunku 14.

Sprawdzanie obecności zanieczyszczeń jonowych jest to zabieg kontrolny, dla którego jeszcze brak jest kryteriów oceny. Niemniej jednak w przypadku hipotetycznej obecności zanieczyszczeń jonowych należy przeprowadzić testy sprawdzające, np. metodą Bresla (Elcometer 138) lub bibuły filtracyjnej, do której przeznaczony jest przyrząd Elcometer 130, pokazany na rysunku 15. Obecność jonów żelaza w stężeniu do 15 mg/m^2 nie wywiera negatywnego wpływu na większość powłok malarskich [7].



Rys. 14. Zestaw do sprawdzania obecności zanieczyszczeń pyłowych na powierzchni Elcometer 142



Rys. 15. Przyrząd do określania stanu zanieczyszczeń jonowych na powierzchni Elcometer 130

Kontrola powłoki metalizacyjnej

Ocena poprawności powłoki natryskiwanej polega na określeniu kilku charakterystycznych właściwości. Podstawowym badaniem jest określenie grubości powłoki. Wartość minimalnej grubości powłoki ochronnej natryskiwanej cieplnie w zależności od warunków pracy i gatunku materiału podano w PN-EN 22063. W zależności od potrzeb wykonywania samych pomiarów lub archiwizacji i obróbki wyników dostępne są różne modele mierników Elcometer 456C. Zaprezentowany na rysunku 16 przyrząd umożliwia wykonywanie pomiarów o charakterze nieniszczącym, międzyoperacyjnych (tj. pomiędzy poszczególnymi warstwami powłoki), kiedy powłoka jest gorąca, jak również pomiarów kontrolnych odbiorowych.

Kolejną krytyczną właściwością powłok metalizacyjnych jest przyczepność powłoki do podłoża. Właściwość tę można określić, jednak z natury jest to próba niszcząca, którą zależnie od wymagań zamawiającego i okoliczności technologicznych wykonuje się na próbkach referencyjnych lub na obrabianym przedmiocie. Do wykonywania pomiarów przyczepności firma SciTeeX oferuje specjalistyczny przyrząd hydrauliczny Elcometer 506 (rys. 17), który umożliwia wykonanie precyzyjnych pomiarów zgodnie z PN-ISO 16276-1 i PN-EN ISO 4623.



Rys. 16. Mierniki grubości powłok Elcometer 456C



Rys. 17. Przyrząd do badania przyczepności powłok Elcometer 506

Kontrola procesu i ocena powłoki malarskiej

Proces malowania, jak i właściwości samej powłoki malarskiej podlegają szczegółowej ocenie, zawierającej: sprawdzenie materiału malarskiego, ocenę przygotowania powierzchni do malowania, sprawdzenie warunków pracy (punkt rosy), sprawdzenie stopnia wyschnięcia poszczególnych warstw podczas wykonywania powłoki, sprawdzenie grubości powłoki mokrej przyrządem grzebieniowym (Elcometer 112), ocenę wyglądu powłoki w trakcie malowania. Ocena gotowej powłoki malarskiej powinna obejmować jej wygląd zewnętrzny, grubość, przyczepność i szczelność.

Wygląd zewnętrzny należy sprawdzić pod względem wad malarskich oraz porównać zgodność ze wzorcem koloru i ewentualnie sprawdzić stopień połysku. Do oceny grubości powłoki możliwe jest oparcie się na kilku normach (np. PN-ISO 2808; ISO 19840); nie ma jednej normy określającej wytyczne dla tego badania. Najczęściej metodyka pomiarów ustalana jest pomiędzy stronami kontraktu. Najważniejsze jest, aby do pomiarów były użyte przyrządy pomiarowe z możliwością kalibracji zgodnie z wybraną metodą. Podobnie jak w przypadku powłoki metalizacyjnej można stosować wybrany model Elcometer 456C (rys. 16).

Przyczepność powłok malarskich może być kontrolowana kilkoma metodami, np. metodą siatki nacięć (wg PN-EN-ISO 2409), która polega na wykonaniu krzyżowego nacięcia powłoki do podłoża i porównaniu wyniku z wzorcem z normy, do czego służy przyrząd Elcometer 107 (rys. 18). Przyczepność powłoki malarskiej można kontrolować również metodą odrywową (wg PN-ISO 16276-1, PN-EN ISO 4624) polegającą na odrywaniu przyklejonego do powłoki stempla z rejestracją siły zrywania. Wśród różnych modeli są dostępne zrywarki mechaniczne Elcometer 106 (rys. 19) i precyzyjne zrywarki hydrauliczne Elcometer 506.



Rys. 18. Nóż do siatki nacięć Elcometer 107



Rys. 19. Przyrząd odrywowy do badania przyczepności powłoki Elcometer 106

Badanie szczelności powłok można przeprowadzać za pomocą wysokonapięciowego urządzenia sygnalizującego wady ciągłości powłoki. Wartość napięcia dobierana jest w zależności od grubości powłoki. Sposób wykonywania testu określa norma ASTM D5162-00. Przyrząd Elcometer 266 (rys. 20) dzięki swemu wyposażeniu umożliwia badanie szczelności bardzo szerokiego zakresu grubości i kształtu powłok.

Istotną zaletą przyrządów firmy Elcometer jest w wielu przypadkach możliwość rejestracji wykonywanych pomiarów i ich archiwizacji w celu udokumentowania prawidłowości prowadzenia całego procesu.



Rys. 20. Przyrząd wysokonapięciowy do badania szczelności powłok Elcometer 266

Podsumowanie

System zapewnienia jakości w spawaniu, jak i związane z nim normy, regulują bardzo szczegółowo wymagania dotyczące przygotowania powierzchni przed spawaniem, jak i przed wykonaniem powłok ochronnych. Problem przygotowania i zabezpieczenia powierzchni jest traktowany jako

integralna część procesu technologicznego wytwarzania konstrukcji stalowych spawanych. Ze względu na dość wysoki stopień skomplikowania operacji zarówno technologicznych, jak i kontrolnych związanych z obróbką powierzchni problem ten jest obecnie w centrum uwagi firm wytwarzających konstrukcje budowlane. Do niedawna stalowe konstrukcje budowlane wykonywano z zachowaniem standardów technicznych podanych w PN-B-06200:2002. Normę tę zastąpiła PN-EN 1090-2:2009. Nowa norma wprowadziła zmiany w klasach wykonywania konstrukcji i w zagadnieniach technologicznych.

Literatura

- [1] Chmielewski T.: Projektowanie procesów technologicznych – Spawalnictwo. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013.
- [2] Chmielewski T.: Struktura i właściwości kompozytowych powłok ochronnych wykonywanych metodą natryskiwania gazoproszkowego. Kompozyty (Composites), 2003, vol. 3, 6, s. 92-95.
- [3] Chmielewski T.: Natryskiwanie detonacyjne metali na podłoża ceramiczne. Przegląd Spawalnictwa, 9-10/2006, s. 80-83.
- [4] Chmielewski T., Jakubowski J.: Żaroodporne powłoki INCONEL 625 natryskiwane termicznie na podłoża stali stopowych. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej – Mechanika, 2009, vol. 229, s. 143-153.
- [5] Chmielewski T., Golański D., Gontarz G.: Pomiar naprężeń własnych powłok metalicznych natryskiwanych termicznie. Przegląd Spawalnictwa, nr 12/2011, s. 59-64.
- [6] Harris A.F., Beevers A.: The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion. International Journal of Adhesion and Adhesives. 1999, vol.19, 6, s. 445-452.
- [7] Piosik T., Zyzak P.: Wybrane zagadnienia obróbki strumieniowo-ściernej. VII Konferencja odlewnicza TECHNICAL Nowa Sól, 2004, s. 23-43.
- [8] Piosik T.: Wirnikowe oczyszczarki strumieniowo-ścierne. Biuletyn Konferencji TECHNICAL '02. Nowa Sól, 2002, s. 62.
- [9] Piosik T., Zyzak P.: Właściwości ścierniwa używanego w oczyszczarkach wirnikowych. Biuletyn Konferencji TECHNICAL '06. Nowa Sól, 2006, s. 53-62.
- [10] Wensink H., Jansen H. V., Berenschot J.W. and Elwenspoek M.C.: Mask materials for powder blasting. Journal of Micromechanics and Microengineering. 2000, vol. 10, 175.
- [11] Zyzak P.: Cechy użytkowe śrutu stosowanego w oczyszczarkach wirnikowych. Archiwum Odlewnictwa, 2006, vol. 6, No 18 (2/2) s. 343-348.

Powłoki z metali nieżelaznych i ich stopów natryskiwane ciepłnie

Aplikacje przemysłowe

Streszczenie

W artykule przedstawiono zarys procesu natryskiwania ciepłego (NC) w oparciu o trzy techniki. Wskazano na przestrzeganie reżimu technologicznego w procesie natryskiwania ciepłego oraz szczegółowy zakres czynności, które należy poddać szczególnej ocenie, aby uzyskać prawidłowo wykonaną powłokę o oczekiwanych właściwościach.

Pokazano przykłady powłok z metali nieżelaznych i ich stopów (cynk, aluminium, mosiądz, brąz) natryskiwanych ciepłnie na powierzchnie elementów w celu:

– zapewnienia ich odporności na korozję,

- otrzymania powłok eksploatacyjnych nowych,
- regeneracji zniszczonej powierzchni roboczej urządzenia,
- otrzymania odpowiedniego efektu wizualnego.

Materiały zdjęciowe zamieszczone w artykule pochodzą wyłącznie z prac wykonanych przez firmę autora artykułu. Autor ma na celu pokazanie, na wybranych kilku przykładach, jak wiele możliwości zastosowań ma natryskiwanie ciepłnie, w tym przypadku powłok z metali nieżelaznych.

Wstęp

Natryskiwanie ciepłnie (NC), inaczej nazywane metalizacją natryskową, jest procesem mniej skomplikowanym i łatwiejszym do opanowania przez człowieka niż proces spawania, czy też jego odmiana, jaką jest napawanie.

Natryskiwanie ciepłnie jest metodą wytwarzania powłok np. z metali żelaznych, nieżelaznych (oraz z ich stopów i mieszanin) na powierzchniach elementów w celu:

- ochrony przed korozją,
- uzyskania powłok eksploatacyjnych ochronnych przed zużyciem ściernym i erozyjnym oraz kawitacją na nowo wytworzonych elementach,
- uzyskania powłok eksploatacyjnych odpornych na działanie wysokiej temperatury,
- regeneracji zużytych powierzchni urządzeń w okresie eksploatacji,
- renowacji zabytków,
- uzyskania powłok ozdobnych na pracach wykonanych przez artystów.

Natryskiwanie ciepłnie (NC) zaczęto stosować na świecie pod koniec XIX w., a gwałtowny rozwój tej metody nastąpił na początku XX w.

Natryskiwanie ciepłnie (NC) jest procesem, w którym metal podany do palnika w postaci m.in. drutu lub proszku jest stopiony ciepłem płomienia wytworzonego przez mieszaninę gazów lub łuk elektryczny, a następnie zostaje rozpylony strumieniem gazów lub sprężonego powietrza.

Na początku XXI w. zaliczono do metod natryskiwania ciepłego również proces, w którym stopienie materiału nie następuje pod wpływem płomienia, a jedynie przez nadanie cząstkom materiału odpowiednio dobranej prędkości w zakresie od 500 m/s do 1000 m/s celem ich uplastycznienia, a następnie narzucenia na element w celu utworzenia powłoki. Natryskiwanie zimnym gazem (*Cold Spray*) jest procesem nowym i nowatorskim do specjalnych zastosowań. Dotychczas proces *Cold Spray* jest mało rozpowszechniony w przemyśle.

W powszechnie stosowanych metodach natryskiwania ciepłego, cząstki metalu padają na natryskiwaną powierzchnię w stanie półplastycznym (w uplastycznionej formie), ulegają spłaszczeniu i przylegając do siebie w postaci kolejnych warstw, tworzą ciągłą powłokę.

Mgr inż. Andrzej Radziszewski – Resurs.

Na rysunkach 1+3 przedstawiono najprostsze i najbardziej ekonomiczne trzy techniki stosowane powszechnie z ośmiu ogólnie znanych procesów natryskiwania ciepłego.

Natryskiwanie ciepłe (NC) stosowane jest prawie we wszystkich gałęziach przemysłu, m.in.: maszynowym, okrętowym, elektrotechnicznym, chemicznym, spożywczym, energetyce, wydobywczym, przetwórczym, budownictwie oraz w zdobnictwie.

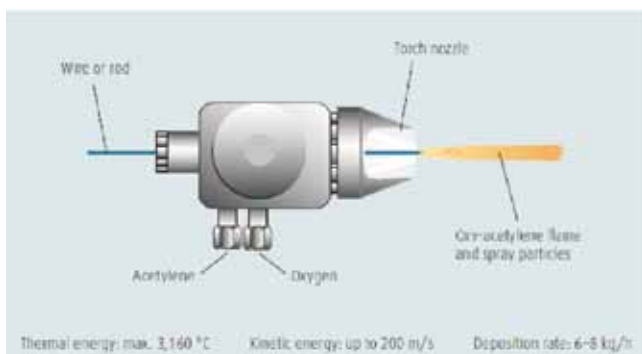
Do najważniejszych zalet metody natryskiwania ciepłego należą:

– łatwość prowadzenia procesu, dodatkowym atrybutem jest mobilność urządzeń (NC),

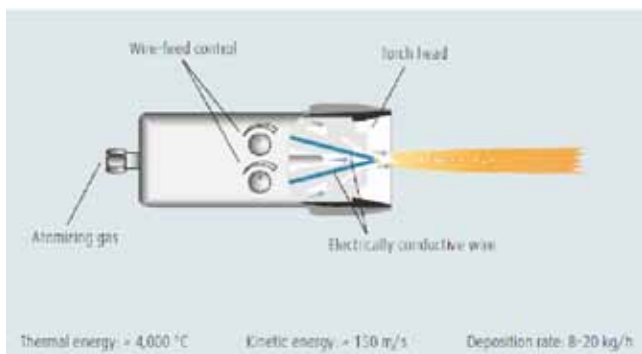
- łatwość obsługi stosunkowo prostych (obecnie skomputeryzowanych) urządzeń, możliwość szerokiej aplikacji w każdej skali produkcyjnej i usługach,
- wykonywanie powłok na przedmiotach o dowolnych kształtach, wielkości i wykonanych z różnorodnych materiałów,
- proces wytworzenia powłok nie powodujący zmian strukturalnych w elemencie (NC),
- zastosowanie szerokiej gamy różnych materiałów, w tym mieszanin o składzie chemicznym i proporcjach dostosowanych do warunków eksploatacyjnych.



Rys. 1. Natryskiwanie płomieniowe z wykorzystaniem proszku (Źródło: Linde i Resurs)



Rys. 2. Natryskiwanie płomieniowe z wykorzystaniem drutu (Źródło: Linde i Resurs)



Rys. 3. Natryskiwanie łukowe z wykorzystaniem drutu (Źródło: Linde i Resurs)

Proces natryskiwania ciepłego

Powłoka utworzona w procesie natryskiwania ciepłego (NC) powinna być mocno związana z natryskiwaną powierzchnią oraz mieć możliwie jednorodną i zwartą strukturę z jak najmniejszą ilością tlenków i mikroporów. Uzyskanie tych właściwości powłoki, składającej się z od kilkunastu do kilkudziesięciu warstw nakładanych kolejno, zależy od prawidłowego i starannego wykonania wszystkich etapów związanych z całym procesem natryskiwania ciepłego (niezależnie od zastosowanej techniki NC), do których należy zaliczyć:

1. Przygotowanie powierzchni w celu uzyskania jak najlepszego połączenia powłoki z podłożem, co uwarunkowane jest zapewnieniem:
 - obróbki wstępnej powierzchni (ślusarskiej, mechanicznej),
 - dużej czystości powierzchni (mycie, odłuszczenie),
 - odpowiedniej jej chropowatości (obróbka strumieniowo-ścierna, iskro- lub elektrodrażenie).
2. Natryskiwanie ciepłe, w którym zawartych jest szereg czynności związanych z podłączeniem, nastawieniem i regulacją parametrów NC, ochrona z zakresu BHP pracownika wykonującego proces NC, kontrolowanie jakości i grubości podczas procesu NC, samoocena powłoki przez wykonującego proces, kontrola wizualna i kontrola ostateczna (przez osoby trzecie).
3. Obróbkę powłoki w celu uzyskania parametrów zawartych w dokumentacji (umowie, zleceniu, wskazówek zamawiającego). W zależności od rodzaju i przeznaczenia powłoki, stosowanego materiału do NC, techniki natryskiwania oraz wytycznych w dokumentacji obróbka może zawierać czynności związane z: obróbką mechaniczną, doszczelnianiem chemicznym powłoki, wyżarzaniem dyfuzyjnym, innymi zabiegami nadającymi jej właściwości zdobnicze.

Gwarancją wykonania powłoki NC o dobrej jakości jest:

- utrzymanie należytych parametrów technicznych procesu NC zgodnie z wymaganiami norm oraz danymi zawartymi w instrukcjach obsługi urządzeń do NC,
- należyta obsługa urządzeń przez operatora w oparciu o przebyte szkolenie wstępne i stanowiskowe przeprowadzone przez nadzór,
- wykonywanie prac z należytą starannością.

W tablicy I przedstawiono porównanie parametrów technicznych związanych z wybranymi technikami natryskiwania ciepłego.

Zasady kontroli procesu NC i właściwości powłok

Wiadomo, że powłoka natryskiwana cieplnie jest anizotropowa i ma specyficzną budowę (w zależności od zastosowanego materiału i techniki prowadzenia procesu) wynikającą z wpływu szeregu czynników związanych z całym procesem natryskiwania ciepłego. Jednakże po jej wykonaniu powłoka powinna mieć właściwości założone w dokumentacji technicznej lub w zleceniu. Rygorystyczne przestrzeganie parametrów ustawień zawartych w instrukcji urządzenia przez obsługę w zupełności powinno zapewnić odpowiednią jakość powłoki NC. Z tego powodu kwalifikacje operatora i jego należyte oraz sumienne wykonanie pracy oraz stan techniczny urządzeń do NC (zapewniający uzyskanie zgodnych z instrukcją parametrów NC) stają się czynnikami decydującymi o jakości wykonanej powłoki.

Do najważniejszych właściwości powłoki NC należy zaliczyć: przyczepność, stopień utlenienia, porowatość. Zbadanie tych właściwości jest możliwe jedynie za pomocą metod niszczących na tzw. *próbkach świadkach* wykonywanych jednocześnie podczas procesu NC głównego (podstawowego) elementu. Bada się:

- przyczepność za pomocą próby ścinania lub odrywania,
- stopień utlenienia za pomocą analizy chemicznej lub metalograficznej,
- porowatość za pomocą analizy metalograficznej na zglądach lub replikach metalograficznych (również na obiekcie z powłoką) oraz za pomocą oznaczania ciężaru właściwego próby nasiąkliwej, a także za pomocą badań penetracyjnych.

W celu zapewnienia prawidłowego przebiegu procesu i dobrej jakości powłoki operatorzy podczas wykonywania procesu NC powinni wykonać podstawowe czynności związane z kontrolą międzyoperacyjną, takie jak:

- sprawdzenie powierzchni przygotowanej za pomocą obróbki skrawaniem – kontrola wymiarów, błędów

Tablica I. Porównanie parametrów technicznych niektórych technik natryskiwania ciepłego (Źródło: opracowanie własne)

Technika NC	Szybkość cząstek m·s ⁻¹	Adhezja MPa	Zawartość tlenków %	Porowatość %	Prędkość nanoszenia kg·hr ⁻¹	Typowa grubość powłoki, mm
Płomieniowe	40	<8	10÷15	10÷25	1÷10	0,2÷10
Łukowe	100	10÷30	10÷20	5÷10	6÷60	0,2÷10
Plazmowe	200÷300	20÷70	1÷3 (5)	2÷5	1÷5	0,2÷2
HVOF	600÷1000	>70	1-2	<1	1÷5	0,2÷2

odchyłek kształtów, błędów odchyłek położenia, badania wizualne okiem uzbrojonym powierzchni, kontrola podcięć, faz, otworów ślepych i przelotowych, rowków wpustowych, kanałków itp.

- kontrola odłuszczenia za pomocą badań wizualnych powierzchni,
- kontrola obróbki strumieniowo-ścierniej powierzchni,
- wizualne sprawdzenie chropowatości w odniesieniu do wzornika chropowatości, np. Grit LD2040 (zgodnie z dokumentacją), uzupełniające badanie wizualne powierzchni metodą „pod światło” w celu lokalizacji miejsc o nieodpowiedniej chropowatości (świecących),
- kontrola prawidłowego maskowania zabezpieczającego powierzchni za pomocą taśmy, blachy, opaski, farby specjalnej,
- kontrola ustawień parametrów palnika w czasie prób (natryskiwania próbnego) przed podstawowymi czynnościami natryskiwania cieplnego właściwej powłoki na element, kontrola okiem uzbrojonym długości „żądła” płomienia za kołpakiem palnika mającego wpływ na ziarnistość powłoki i jej stopień utlenienia, regulacja ilością (prędkością) podawanego materiału i ilością gazów na przepływomierzach,
- kontrola temperatury powłoki podczas natryskiwania przy zastosowaniu pirometru,
- kontrola wizualna ziarnistości powłoki na powierzchni elementu, międzyoperacyjne odmuchiwanie powierzchni powłoki, kontrola okiem uzbrojonym pęknięć,
- międzyoperacyjne pomiary grubości powłoki przy zastosowaniu przyrządu np. „eXacto” f. ElektroPhysik, typ 180-0902, kontrola grubości elementu z powłoką za pomocą mikromierza lub suwmiarki elektronicznej, kontrola ostateczna wymiarów,
- demontaż zabezpieczeń maskujących, czyszczenie, mycie elementu z powłoką,
- przekazanie elementu do dalszych czynności związanych z obróbką wchodzącą w skład procesu NC.

Firmy wykonujące powłoki NC muszą gwarantować dobrą jakość powłoki oraz jej dobre połączenie z materiałem rodzimym podłoża. Wielokrotnie zlecający prosi o udzielenie okresu gwarancji na powłoki NC. Dlatego też firma Resurs wykonuje okresowo badania niszczące metodą odrywania, aby przekazać zlecającemu, z jaką siłą związana jest powłoka z podłożem. W związku z tym w 2010 r. w Instytucie Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie w Laboratorium Badań i Oceny Własności Mechanicznych Materiałów, Części Maszyn i Konstrukcji przeprowadzono badania przyczepności powłok z cynku (ZN) natrykiwanych cieplnie. Badaniom poddano powłoki Zn nałożone metodą AWS palnikiem produkcji Thermach (USA) na próbki ze stali St3S. Badania przyczepności wykonano 2 metodami, których wyniki przedstawiono w tablicach II i III.

Tablica II. Wyniki badania przyczepności metodą odrywania zgodnie z PN-EN ISO 2063:2006

Przyczepność powłoki, MPa	Średnia grubość powłoki, μm	Uwagi
11	124	Powłoka odcięta do podłoża przed pomiarem przyczepności
11	124	
11,5	124	
12	124	

Tablica III. Wyniki badania przyczepności metodą odrywania w próbie statycznego rozciągania zgodnie z normą PN-EN 582:1996

Przyczepność powłoki, MPa	Średnia grubość powłoki, μm	Siła zrywająca kN
6,98	350	3,39
7,52	360	3,65
8,16	340	3,96
5,41	500	2,62

Przykłady zastosowania powłok z metali nieżelaznych natrykiwanych cieplnie

Powłoki eksploatacyjne na nowe elementy

1. Powłoka eksploatacyjna wykonana z cynku Zn (NC). Powłoki cynkowe wykonuje się zwyczajowo techniką natryskiwania łukowego (AWS) ze względu na najmniejsze koszty związane z wykonaniem powłoki oraz dużą wydajnością urządzenia. W poniższym przykładzie pokazano powłoki cynkowe na elementach (Doppeling Rotorlager – rys. 4) używanych w elektrowniach wiatrowych stacjonujących na morzu.

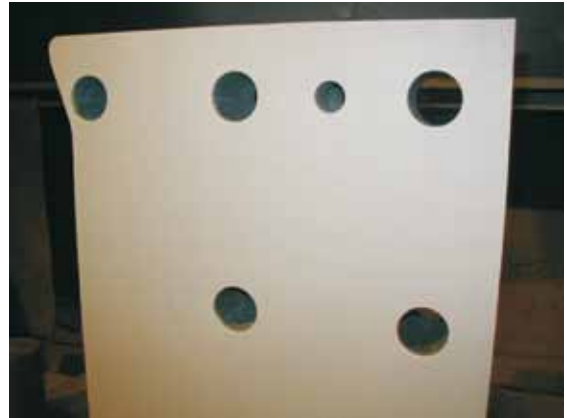
Grubość powłoki Zn zmierzona na kostkach wynosiła $80 \pm 160 \mu\text{m}$, nie mogła być mniejsza niż $70 \mu\text{m}$ (minimalna dopuszczalna grubość powłoki). Na życzenie klienta do każdej partii 20 szt. elementów wykonywano płytę próbną z powłoką cynku Zn $100 \pm 30 \mu\text{m}$ o wymiarach $200 \times 200 \times 10 \text{ mm}$ w celu przeprowadzenia badań kalorymetrycznych na zasolenie.

2. Powłoka eksploatacyjna ze srebra Ag/C natrykiwana cieplnie na powierzchnię wału kontaktowego (Contact Shaft) wykonanego z materiału Elmedur (rys. 5). Zadaniem powłoki było zapewnienie bardzo dobrego połączenia w celu umożliwienia przepływu prądu o dużym natężeniu i napięciu.

3. Powłoka trójwarstwowa z aluminium (Al) i tlenku aluminium (Al_2O_3) eksploatacyjna na powierzchni

zewnątrznej dysz do pieców szklanych do topienia bazaltu (rys. 6). Celem wykonania powłoki $Al+Al_2O_3$ było przedłużenie żywotności dysz oraz zwiększenia żaroodporności i żarowytrzymałości ich powierzchni. Założono dyfuzję aluminium w głąb stali podczas procesu topienia bazaltu przy jednoczesnej ochronie

wysokotemperaturowej przez powłokę z tlenku aluminium. Obie powłoki po wykonaniu zostały doszczelnione preparatem odpornym na wysokie temperatury (do $1600^{\circ}C$), w skład którego wchodziły m.in.: krzemian sodu, glinaka ogniotrwała, tlenek cyrkonu, tlenek aluminium.



Rys. 4. Elementy (Doppeling Rotorlager) z powłoką cynkową używane w elektrowniach wiatrowych stacjonujących na morzu



Rys. 5. Wałki kontaktowe podczas wykonywania powłoki i z nałożoną powłoką ze srebra po obróbce



Rys. 6. Dysze do pieców szklanych do topienia bazaltu w trakcie wykonywania powłoki i z nałożoną powłoką $Al+Al_2O_3$ oraz po doszczelnieniu preparatem odpornym na wysokie temperatury na bazie krzemianu sodu, tlenku cyrkonu, tlenku aluminium

Powłoki regeneracyjne na powierzchni zużyte

Kolejnym przykładem wykorzystania powłok z metali nieżelaznych są powłoki regeneracyjne, które mają na celu przywrócenia właściwości użytkowej zużytej powierzchni urządzenia lub też nadanie jej lepszych właściwości zwiększających żywotność eksploatacyjną.

1. Przykład powłoki regeneracyjnej ze stopu łożyskowego o składzie chemicznym Sn 89%, Cu 3%, Sb 7%, Pb 0,3%, która miała zastąpić zużyte uszczelnienie wykonane z polimeru. Powłoka ze stopu łożyskowego była natryskiwana cieplnie na powierzchni uszczelnień labi-

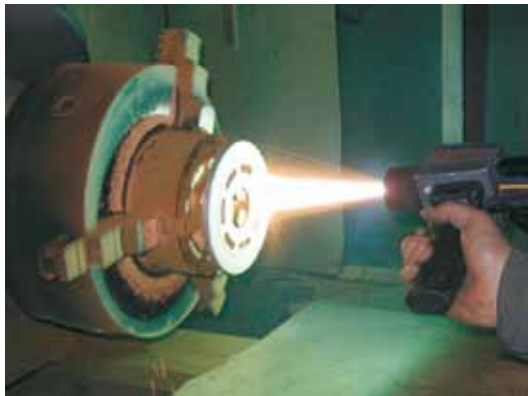
ryntowych kierownic kompresorów w celu odtworzenia i utworzenia miękkiej warstwy uszczelniającej (rys. 7).

2. Regeneracja płytki rozdzielacza hydrauliki siłowej przy zastosowaniu powłoki z brązu cynowego CuSn8 nałożonej techniką AWS. Powłoki natryskiwane cieplnie z brązu aluminiowego np. CuAl8 i brązu cynowego np. CuSn8 są szeroko wykorzystywane w regeneracji części maszyn i urządzeń (rys. 8, 9).

3. Powłoka z mosiądzu M63 natryskiwanego cieplnie na powierzchni dna sitowego wymiennika ciepła (rys. 10).



Rys. 7. Fragmenty kierownic kompresora z wykonywaną i nałożoną powłoką Sn 89%, Cu 3%, Sb 7%, Pb 0,3% o grubości ok. 7÷8 mm po NC



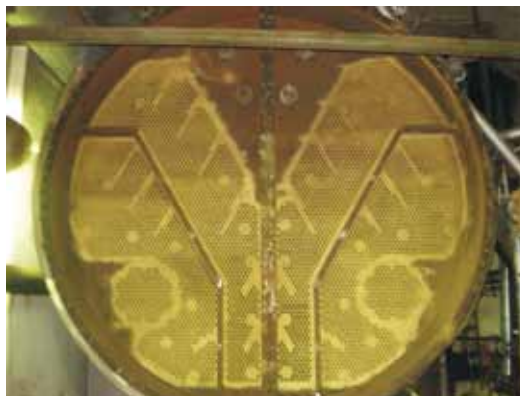
Rys. 8. Płytki rozdzielacza podczas obróbki



Rys. 9. Płytki po obróbce wstępnej tokarskiej z powłoką CuSn8 o grubości ok. 3÷4 mm po natryskiwaniu cieplnym



Rys. 10. Dno sitowe podczas obróbki i po natryskiwaniu cieplnym powłoki z mosiądzu M63. Praca wykonywana na urządzeniu w elektrowni



Renowacja zabytków i powłoki ozdobne na nowych pracach artystów

1. Renowacja Syrenki Warszawskiej (rys. 11).

Renowację przeprowadzono w 4 fazach: naprawa głębokich uszkodzeń powierzchni, natryskiwanie ciepłe brązem, patynowanie powłoki z brązu, doszczelnianie warstwy wierzchniej.



Rys. 11. Fazy renowacji zabytkowej Syrenki Warszawskiej

2. Renowacja rzeźby Chrystusa z krzyżem (rys. 12).



Rys. 12. Rzeźba Chrystusa z krzyżem po naprawie uszkodzonej głowy i po renowacji całej figury powłoką z cynku natryskiwanej cieplnie

3. Powłoki ozdobne na pracach artystów (rys. 13, 14).



Rys. 13. Rzeźby artystów wykonane z gipsu, betonu, które pokryte zostały powłoką z brązu i poddane obróbce końcowej przez patynowanie



Rys. 14. Zawór gazowy w trakcie natryskiwania ciepłego i fragment pomnika z wkomponowanym zaworem z widoczną czarną malarską warstwą doszczelniającą powłokę NC

Literatura

- [1] Klimpel A.: Natryskiwanie i napawanie ciepłe, Wydawnictwa Śląskie 1999.
- [2] Praca zbiorowa pod kier. K. Brenka: Poradnik metalizacji natryskowej, PWT 1959.
- [3] Ogólnodostępne materiały Linde – Niemcy
- [4] Materiały własne firmy Resurs – Polska.

„RESURS”
A. Radziszewski
 ul. Czarodzieja 12
 03-116 Warszawa
 Tel.: +48 22 614-05-70
 Faks + 48 22 614-05-72
www.resurs.pl

Zagadnienia materiałowo-spawalnictwa modernizowanego stalowego mostu kolejowego na linii nr 408

Materials and welding aspects of bridge modernization of 408 railway

Streszczenie

Po pewnym okresie użytkowania obiektu budowlanego ulega zmianie jego zdolność do spełniania w pełnym zakresie funkcji projektowanych, a przede wszystkim jego trwałość technologiczna i użytkowa. Wyraźnie problem ten dotyczy kolejowych obiektów mostowych. Ponad 75% tych konstrukcji liczy ponad 50 lat, z czego prawie 45% jest eksploatowanych ponad 100 lat, czyli już przekroczyło zakładaną trwałość normatywną. Sukcesywnie obiekty te są wzmocniane i modernizowane. Wymaga to wcześniejszego poznania aktualnych cech materiałowo-wytrzymałościowych konstrukcji oraz spawalności stali.

W artykule zagadnienie to przedstawiono w związku z modernizacją mostu stalowego na linii kolejowej nr 408, Szczecin-Berlin.

Słowa kluczowe: mosty stalowe, stal zlewna, spawalność stali

Abstract

After a period of use of a building changes the ability to meet the full range of designed functions, above all, its durability and usable technology. This problem applies to railway bridges. Over 75% of these structures has more than 50 years, of which nearly 45% are operated for over 100 years, so already exceeded the assumed working life. These objects are strengthened and modernized. This fact requires prior knowledge of the current characteristics of material-strength steel construction and weldability.

In the paper this is shown selected aspects of the modernization of the railway steel bridge No. 408, the line Szczecin-Berlin.

Keywords: steel bridges, confluent steel, weldability

Wstęp

W ramach Regionalnego Programu Operacyjnego województwa zachodniopomorskiego na lata 2002-2013 przeprowadzono modernizację dwóch regionalnych linii kolejowych i kilku mostów [1, 2]. Jednym z tych mostów jest konstrukcja usytuowana na linii nr 408 Szczecin-Stobno-Granica RP-Berlin, której remont wykonano na przełomie 2012/2013 roku. Według

danych z karty ewidencyjnej obiekt został odbudowany w 1948 r. z konstrukcji poniemieckiego pochodzenia i nieznanego miejsca wcześniejszej eksploatacji. Pierwotnie była to kolejowa linia dwutorowa i mosty usytuowane w omawianym kilometrze zostały zniszczone w wyniku działań wojennych w końcu II wojny światowej.

Obecnie do Berlina, oddalonego od Szczecina w linii kolejowej 110 km, podróż pociągiem trwa 2 godziny. Ponieważ do Berlina nie mogą wjeżdżać

Dr hab. inż. Bernard Wichtowski, em. prof. ZUT, dr inż. Ryszard Pakos – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

Autor korespondencyjny/corresponding author: marek.wichtowski@zut.edu.pl

lokomotywy spalinowe, w Angermünde następuje zmiana lokomotywy lub pasażerowie przesiadają się do elektrycznego składu. Na linii tej brakuje zaledwie 33 km elektryfikacji, w tym 10 km torów po stronie polskiej i 23 km po stronie niemieckiej. Według informacji w „Głosie Szczecińskim”, z 19.11.2012 r., Komisja Rejonu Gartz nad Odrą już w czerwcu 2009 r. podjęła uchwałę o pilnej konieczności rozbudowy dwutorowej trasy, jej zelektryfikowania i przystosowania do prędkości 160 km/h. Porozumienie pomiędzy Polską i Niemcami w zakresie modernizacji linii zostało zawarte dopiero w ostatnich dniach grudnia 2012 r. Według doniesień prasowych szczególne zainteresowanie budową tej linii wykazuje Berlin Brandenburg Airport. Samoloty berlińskich lotnisk rocznie przewożą ok. 1 mln pasażerów z Pomorza Zachodniego, którzy docierają tam głównie samochodami.

Uznano, że kolej jest dobrym uzupełnieniem komunikacyjnym dla tego rejonu.

Konstrukcja mostu

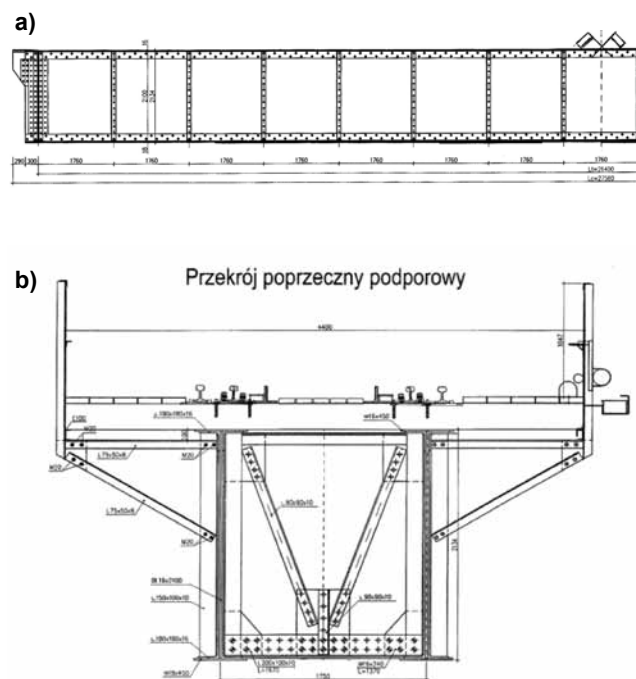
Widok mostu przedstawiono na rysunku 1, a jego dane ewidencyjno-konstrukcyjne obrazują rysunki 2 i 5. Most wykonano jako typową, jednoprzęsłową, nitowaną, stalową konstrukcję blachownicową z jazdą górą. Prawdopodobnie wybudowana została na początku XX w. [3÷5].

Rozpiętość podporowa przęsła wynosi 26,40 m. Długość dźwigarów nośnych jest równa 27,00 m, przy czym ich osiowy rozstaw poprzeczny wynosi 1,75 m, a szerokość poprzeczna łącznie z dwustronnymi chodnikami 4,40 m. Dźwigary blachownicowe wykonano ze środnika o przekroju poprzecznym 18x2100 mm oraz z pasów o różnej grubości i jednakowej szerokości 450 mm na całej ich długości. Pas górny w strefie podporowej ma grubość 16 mm, a pas dolny 18 mm i są one na swej rozpiętości, w części środkowej, wzmocnione dwoma nakładkami. Poszczególne pasy ze środnikiem są połączone przez nitowanie dwoma kątownikami równoramiennymi 180x180x16 mm (rys. 2).

Sztywność przestrzenną mostu zapewniają stężenia pionowe poprzeczne oraz poziome w płaszczyźnie pasa górnego i dolnego (rys. 6a). Stężenie wiatrowe w poziomie pasów górnych wykonano jest ze słupków z kątownika 110x110x10 mm w odstępach co 1,76 m oraz krzyżulców z kątowników 90x90x10 mm. Stężenie pionowe w odstępach co 3,52 m wykonane jest w przęśle jako krzyżowe, a na podporze jako V z pojedynczych kątowników 90x90x10 mm (rys. 2b i 6a). W osi stężeń pionowych założone są także kątownikowe rozpórki w poziomie pasa dolnego.



Rys. 1. Widok ogólny mostu i jego nawierzchnia po remoncie
Fig. 1. View of bridge and the railway after modernization



Rys. 2. Konstrukcja mostu: a) widok boczny dźwigara głównego, b) przekrój poprzeczny

Fig. 2. Bridge structure: a) side view of the main beam, b) cross-section

Skład chemiczny i właściwości mechaniczne stali

Ze strefy podporowej jednego z dźwigarów blachownicowych wycięto odcinek stali środnika, z której wykonano próbki do badań materiałowych. Charakterystykę składu chemicznego wypolerowanej powierzchni próbki wykonano spektrometrem emisyjnym jarzeniowym GDS 500A firmy LECO. Analizę przeprowadzono dla trzech wypaleń na próbce, a jej wyniki zawarto w tablicy I. Zamieszczono w niej średnie arytmetyczne procentowe zawartości podstawowych 9 pierwiastków, z 21 pierwiastków zbadanych. Jednocześnie w tablicy tej, w celach porównawczych, podano skład chemiczny węglowej stali zlewnej (*Flußstahl*) oraz jej odmiany o podwyższonej wytrzymałości oznaczonej symbolem St52 (*Hochwertige Baustähle*). Stale te stosowali Niemcy w konstrukcjach budowlanych do lat czterdziestych XX w.

Dane stali zlewnej określono wg [2, 6], natomiast stal St52 była produkowana w różnych odmianach, przy dość zróżnicowanym składzie dodatków stopowych [7, 8]. Państwowe Koleje w Niemczech dopiero w 1937 r. wydały wytyczne dla tej stali, określające jej skład chemiczny i cechy wytrzymałościowe [9]. W tablicy I podano dane aktualnego zamiennika stali St52, jakim jest wg DIN 17102-83 stal niskostopowa o podwyższonej wytrzymałości StE355, oraz do niedawna stosowanej w polskim mostownictwie stali St3M wg PN-89/H-84023/04 i stali 18G2 wg PN-86/H-84018. Zgodnie z zaleceniami normy mostowej PN-82/S-10052, stal 18G2 stosujemy na elementy w konstrukcjach nitowanych z jednoczesnym przyjęciem jej wytrzymałości obciążeniowej o 10 MPa niższej od wykazanej.

Z porównania składu chemicznego poszczególnych gatunków stali wynika, że konstrukcja mostu została wykonana ze stali St52 o właściwościach obecnej stali niemieckiej StE355. Na uwagę w jej składzie zasługuje znaczna zawartość: manganu, krzemu i chromu, a ich odchyłka standardowa w badaniach wyniosła odpowiednio 1,10%; 2,22% i 6,49%. Jednocześnie zawartości siarki (0,0158%) i fosforu (0,0221%) nie przekraczają ilości, które aktualnie uznaje się za dopuszczalne, tj. 0,040%.

Właściwości mechaniczne i plastyczne stali z konstrukcji mostu określono na podstawie badań statycznego rozciągania próbek okrągłych, pięciokrotnych o średnicy bazowej 10 mm. Z uwagi na małą szerokość wyciętego odcinka stali ze środnika dźwigara mostu, próbki wykonano z blachy o kierunku prostopadłym do kierunku jej walcowania; są to tzw. *próbki poprzeczne*. Z literatury wynika, że próbki poprzeczne przy badaniach udarnościoowych mają mniejszą wartość pracy łamania. Analogiczne właściwości stwierdził autor (BW) przy badaniach stali z blachownicowych dźwigarów pod suwnice półbramownicowe w [10]. Cechy tej nie stwierdzono jednak w przypadku próbek o zróżnicowanych kierunkach ich pobrania, przy badaniach statycznego rozciągania. Przy określonej wartości R_e różnica wyniosła 1,4%, a przy wyznaczaniu R_m jedynie 0,7%. Przyjęto, że różnice te stanowią błąd pomiaru.

Zbadano trzy próbki o parametrach podanych na rysunku 3, który przedstawia wykres ich rozciągania. Badania prowadzono zgodnie z PN-EN ISO 6892:2010 na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z600, a ich wyniki podano w tablicy II. Wartości charakterystyczne właściwości mechanicznych stali wynoszą:

- minimalna wartość górnej granicy plastyczności:
 $R_{eH} = 370$ MPa,
- granica wytrzymałości na rozciąganie:
 $R_m = 590$ MPa,
- procentowe wydłużenie stali:
 $A_5 = 23\%$.

Przyjmując wartość $R_e = \min R_{eH} = 371$ MPa oraz „mostowy” współczynnik materiałowy $\gamma_s = 1,20 + 0,05 = 1,25$, otrzymuje się przy grubości elementów $t \leq 16$ mm:

- wytrzymałość charakterystyczną:
 $f_{yk} = 370 > 355$ MPa,
- wytrzymałość obliczeniową
 $f_d = 370/1,25 = 295 - 10 = 285$ MPa.

Wykorzystując próbkę do badań składu chemicznego, określono twardość stali, którą mierzono w tzw. warunkach standardowych, używając kulki stalowej o średnicy $D = 10$ mm przy obciążeniu $P = 29\,430$ N utrzymywanym przez czas $t = 15$ s. Badania przeprowadzono twardościomierzem B3 CS, a ich wyniki zamieszczono w tablicy II.

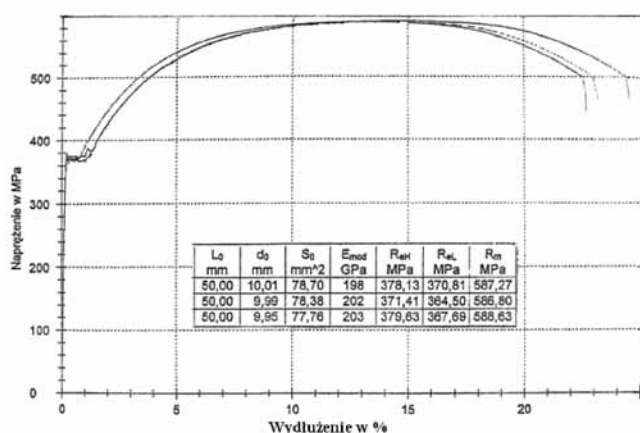
Tablica I. Skład chemiczny stali, z której wykonano most, oraz stali starych i współczesnych

Table I. Chemical composition of bridge steel and the old and current used steels

Rodzaj stali	Skład chemiczny stali, % wag.								
	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Al
Stal badana	0,196	1,250	0,378	0,0221	0,0158	0,0634	0,223	0,0008	0,0016
Stal zlewna	0,030 ÷0,350	0,040 ÷0,750	ślady ÷0,180	0,004 ÷0,160	0,004 ÷0,115	0,110 ÷0,140	0,007 ÷0,014	0,030 ÷0,040	0,010 ÷0,020
StE355 (St52)	max 0,200	0,900 ÷1,650	0,100 ÷0,500	max 0,035	max 0,030	max 0,200	max 0,300	max 0,300	min 0,020
St3M	max 0,200	min 0,040	0,120 ÷0,300	max 0,050	max 0,050	–	max 0,300	max 0,300	max 0,300
18G2	max 0,200	1,000 ÷1,5000	0,200 ÷0,350	max 0,040	max 0,040	max 0,300	max 0,300	max 0,300	min 0,020

Ocenę zachowania się stali z konstrukcji mostu w wypadku wystąpienia warunków sprzyjających kruchym pękaniom przeprowadzono na podstawie próby udarności. Badania wykonano na próbkach Charpy'ego (KCV) w czterech zakresach temperatury, od -40 do +20°C, przy ich zróżnicowaniu co 20°C. Uzyskane wyniki przedstawiono w tablicy III i na rysunku 4.

Na rysunku 4, oprócz przedstawienia wartości średniej udarności na danym poziomie temperaturowym, zaznaczono poziomą linię, określającą udarność na poziomie 34 J/cm². Jest to minimalna wartość krytyczna udarności KCV stawiana przez Eurokod 3 stalom nowych konstrukcji w przypadku badania próbek o A = 80 mm². W PN-EN 1993-1-10:2007 podano, że „praca łamania A_v(T) w dżulach [J], potrzebna do złamania próbki udarnościowej z korbem ostrym Charpy V w określonej temperaturze badania T była nie niższa niż 27 J.” Oznacza to dla badanych próbek wartość



Rys. 3. Wykres rozciągania próbek ze stali średnika dźwigara głównego
Fig. 3. The scheme of tensile strength of the web of main beam

Tablica II. Właściwości mechaniczne stali badanej i stali porównawczych
Table II. Mechanical properties of tested and compared steels

Rodzaj stali	Średnica próbki, t blachy, mm	R _{eH} MPa	R _m MPa	A ₅ %	α R _e /R _m	Twardość Brinella		
						HB	R _{mB} , MPa ¹⁾	R _{eB} , MPa ²⁾
Stal mostu	ø10	371	587	23	0,620	170	572	360
		378	587	25	0,625	179	604	380
		380	589	23	0,632	187	638	402
Wartość średnia		379	588	24	0,626	179	604	380
StE355 (St52)	t ≤ 70	>345	490÷630	>22	0,625	–	–	–
18G2	t = 16÷33	>345	480÷620	>22	0,627	–	–	–

¹⁾ R_{mB} wg PN-EN ISO 6506-4:2002

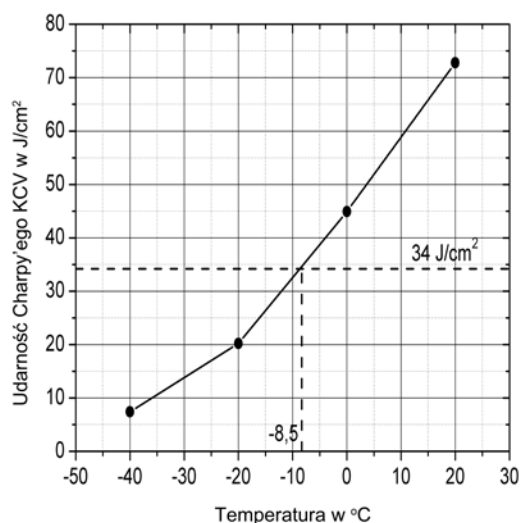
²⁾ R_{eB} = αR_{mB}, gdzie: α = 0,63 wg [2]

Tablica III. Udarność próbek Charpy'ego
Table III. Impact strength in Charpy's test

Element	Wymiary próbki			Numer próbki	Udarność KCV w J/cm ²			
	przekrój, mm	karb, mm	pole, mm ²		-40°C	-20°C	0°C	20°C
Stal średnika dźwigara	10x10	2	80	1	7,4	16,1	40,7	72,4
				2	7,4	20,0	45,0	72,5
				3	7,4	24,6	49,1	73,6
Wartość średnia					7,4	20,2	44,9	72,8

udarności KCV = 34 J/cm². Analogiczną wartość K_v dla próbek wzdłużnych ze stali S355 w stanie JR, JO i J2, w temperaturze 20°C i -20°C podano w normie hutniczej PN-EN 10025-2, natomiast dla stali mostowej S355 w stanie N, NL, M i ML wartość K_v jest większa (27÷63 J) i przyjmowana wg PN-EN 10025-3 oraz PN-EN 10025-4.

Określone wyżej wymagania udarnościowe dotyczą nowych konstrukcji stalowych. Wskazane w tablicy III wartości udarności pozwalają na oszacowanie plastyczność stali mostu oraz określenie stopnia jej zesterzenia. Badana stal wykazała stosunkowo małą udarność w temperaturze ujemnej. Uzyskana udarność KCV = 20,2 J/cm² w temperaturze -20°C stanowi 59,4% wymaganej udarności normatywnej (34 J/cm²). Temperatura przejścia badanej stali w stan kruchy wynosi -8,5°C (rys. 4), a tzw. wskaźnik starzenia wg [10] ma wartość W_s = 20,2/34 = 0,59.

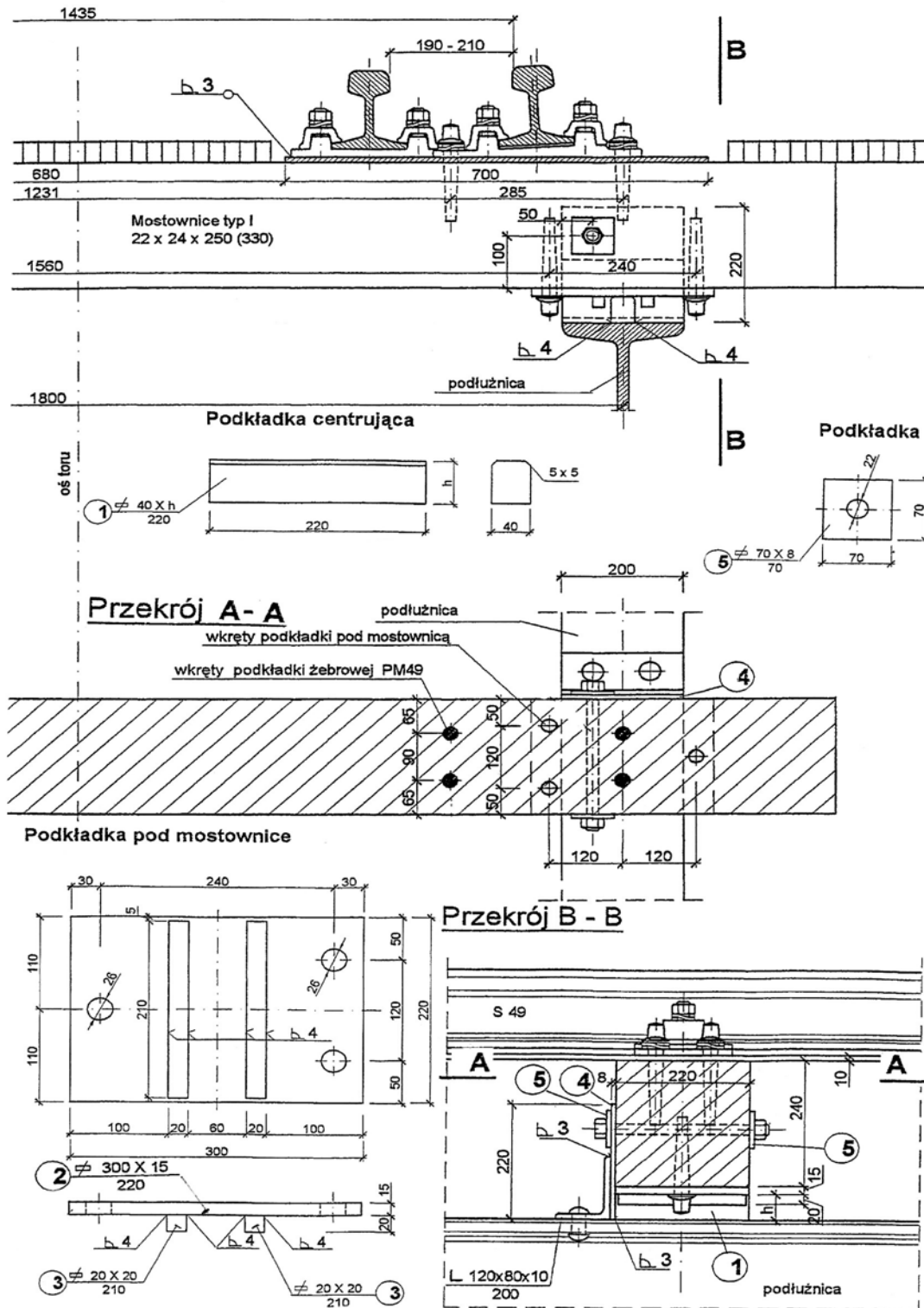


Rys. 4. Średnia udarność próbek ze stali średnika dźwigara mostu
Fig. 4. The average impact strength of the web of main beam

Ocena spawalności stali

Podczas remontu mostu przewidziano oparcie mostownic na pasach górnych dźwigarów blachownicowych w sposób pokazany na rysunku 5. Bezpośrednie przekazywanie obciążenia z mostownic na most jest dokonywane przez podkładki centrujące oznaczone 1. Zamontowane 94 podkładki o zmiennej wysokości

wzdłuż obiektu (h od 50 do ~90 mm) są bezpośrednio spawane do pasów górnych w osi środkowej. Takie rozwiązanie konstrukcyjne likwiduje poprzeczne zginanie blachy pasa dźwigara pod mostownicą [3] (rys. 6b). Podkładki te o długości 210 mm i szerokości 40 mm zespawane są spoinami pachwinowymi grubości a = 4 mm, co warunkuje konieczność wykonania oceny spawalności stali mostu.



Rys. 5. Projektowane oparcie mostownicy na pasie górnym dźwigara
 Fig. 5. Designed support of bridge sleeper of the main beam



Rys. 6. Oparcie mostownic: a) bezpośrednio na pasach górnych dźwigarów (przed remontem), b) na płytach centrujących (po remoncie)

Fig. 6. Support of bridge sleeper: a) direct on the main beam (before modernization), b) on the centre plates (after modernization)

W odniesieniu do modernizowanego mostu autorzy określili spawalność metalurgiczną, oszacowaną na podstawie składu chemicznego według obliczonych poniższych wskaźników (1÷7) przyjętych z [11÷13]:

– równoważnik węgla

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} = 0,454\% > 0,43\% \quad (1)$$

– wskaźnik odporności na pękanie

$$HCS = 1000 \left(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right) \frac{C}{3Mn + Cr + Mo + V} = 2,61\% < 4\% \quad (2)$$

$$C_{ekw} = C + 2S + \frac{P}{3} + \frac{S - 0,4}{10} + \frac{Mn - 0,8}{12} + \frac{Ni}{12} + \frac{Cu}{15} + \frac{Cr - 0,8}{15} = 0,236\% > 0,15\% \quad (3)$$

– wskaźnik oceny skłonności do pękania zimnego, gdzie: $t = 16 \text{ mm}$

$$C'_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{P}{2} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{13} + \frac{Cr + V}{5} + 0,0024t = 0,504\% > 0,4\% \quad (4)$$

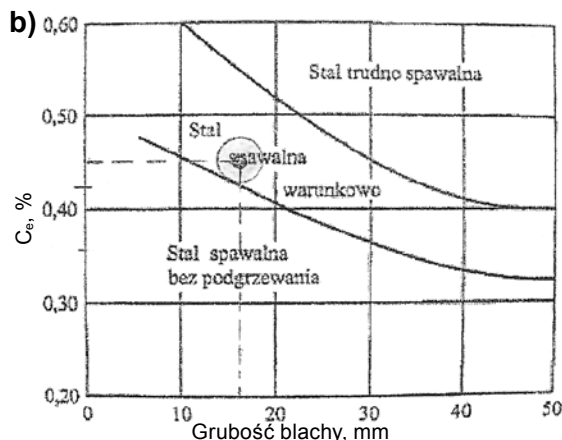
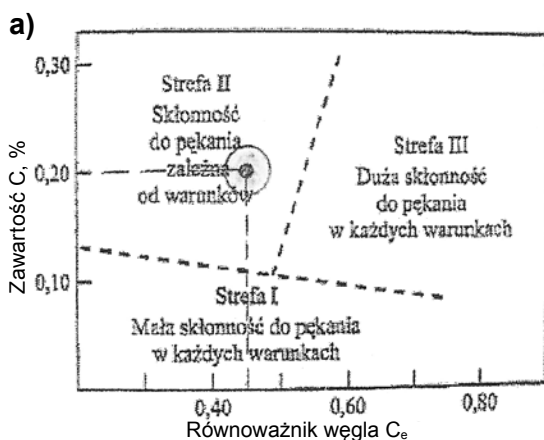
– twardość strefy wpływu ciepła

$$HV_{max} = 90 + 1050C + 47Si + 75Mn + 30Ni + 31Cr = 414HV > 350HV \quad (5)$$

$$HV_{max} = 1200C'_e - 200 = 405HV > 350HV \quad (6)$$

$$HV_{min} = 1200C'_e - 260 = 345HV < 350HV \quad (7)$$

Z wyjątkiem wskaźników (2) i (7) obliczone wartości pozostałych wskaźników są większe od wartości skrajnych, granicznych. Stal, z której wykonano most, jest skłonna do powstawania pęknięć i jest spawalna warunkowo (rys. 7). Dla aktualnie zalecanej stali mostowej S355N i S355NL, o właściwościach stali St52 w omawianym moście, wg PN -EN 10025-3 (dla elementów o grubości $\leq 63 \text{ mm}$) wartość C_e nie powinna przekraczać 0,43%.



Rys. 7. Parametry stali: a) wpływ zawartości C i C_e na podatność pęknięć w SWC, b) zależność spawalności od C_e i grubości blachy pasa górnego [7, 13]

Fig. 7. Steel properties: a) influence of the C and C_e content on cracks susceptibility in HAZ, b) function of weldability and the upper beam plate thickness

Wnioski

Z uzyskanych wyników badań i wyliczonych wskaźników spawalności wynika, że:

- most został wykonany z niskostopowej stali zlewnej St52 o właściwościach do niedawna stosowanej stali niemieckiej StE355 wg DIN 17102-83,
 - stal jest stalą uspokojoną, gdyż $Si = 0,378\% > 0,12\%$, o strukturze drobnoziarnistej i $P = 0,022\% < 0,05\%$
 - wytrzymałość charakterystyczna stali $f_{yk} = R_{emin} = 370 \text{ MPa}$,
 - wytrzymałość obliczeniowa stali $f_d = 285 \text{ MPa}$ dla $t \leq 16 \text{ mm}$,
 - stal jest spawalna warunkowo, ma tendencje do powstawania pęknięć na zimno z powodu hartowania się SWC,
 - uzyskano dużą zgodność wartości R_m i R_e otrzymanych ze statycznego rozciągania stali i badań twardości HB; różnice wynoszą jedynie $+2,7\%$ i $+3,3\%$.
- Spawanie płytek centrujących pod mostownice (rys. 5 i 6) należy prowadzić z zachowaniem poniższych zaleceń:
- podkładki centrujące spawać spoinami pachwinowymi o grubości $a = 4 \text{ mm}$,
 - przed spawaniem w miejscu podkładki odcinek pasa górnego dźwigara blachowniczego długości 400 mm podgrzać do temperatury 200°C ,
 - podgrzewać palnikiem z użyciem propanu-butanu w celu wyeliminowania ewentualnego nawęglenia stali pasów przy podgrzewaniu z użyciem acetyleny,
 - do spawania używać elektrod zasadowych niskowodorowych, np. OK.55.00, wg EN499 oznaczonych jako E46 5B 32 oraz wg ISO 2560 jako E515 B 120 26 H.

Literatura

- [1] Wichtowski B., Hołowaty J.: Ocena właściwości stali mostów na modernizowanych regionalnych liniach kolejowych woj. zachodniopomorskiego. Mosty, nr 2/2012.
- [2] Wichtowski B., Hołowaty J.: Analiza właściwości materiałowych i spawalniczych stali zlewnej mostów kolejowych. Inżynieria i Budownictwo, nr 5/2013.
- [3] Madaj A., Wołowicki W.: Budowa i utrzymanie mostów. WKŁ, Warszawa 1995.
- [4] Bień J.: Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych. WKŁ, Warszawa 2010.
- [5] Wiśniewski D., Majka M., Bień J.: Ocena nośności mostów w okresie ich eksploatacji. Doświadczenia krajowe i zagraniczne. Inżynieria i Budownictwo, nr 7-8/2013.
- [6] Madaj A., Skarżewski J.: Ocena właściwości stali zgrzewanych i wczesnych stali zlewnych w konstrukcjach mostowych. Inżynieria i Budownictwo, nr 2/1986.
- [7] Czaplński K.: Dawne wyroby ze stopów żelaza. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2009.
- [8] Hołowaty J.M., Wichtowski B.: Properties of Structural Steel used in Earlier Railway Bridges. Structural Engineering International, 4/2013.
- [9] Stahlbau-Kalender. Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin 1940.
- [10] Wichtowski B., Hołowaty J.: Badania udarnościowe stali zlewnej mostów kolejowych. Inżynieria i Budownictwo, nr 1/2014.
- [11] Tasak E.: Spawalność stali. Fotobit, Kraków 2002.
- [12] Rykaluk K., Wichtowski B.: Wytrzymałość konstrukcji mostowej z pęknięciami w spawanych złączach czołowych. Materiały XLIII Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB, tom V, Poznań-Krynica 1997.
- [13] Blicharski M.: Inżynieria materiałowa. Stal. WNT, Warszawa 2004.

Przegląd Spawalnictwa Welding Technology Review Open Access Library

Przegląd Spawalnictwa uruchomił możliwość wolnego dostępu do pełnych treści artykułów w ramach Open Access Library. Artykuły w języku angielskim w formacie PDF zamieszczane są na stronie internetowej redakcji: www.pspaw.ps.pl.

Autorów zainteresowanych publikacją w Open Access Library prosimy o przesyłanie artykułów w języku polskim i angielskim. W miesięczniku nastąpi publikacja w języku polskim, a tekst w języku angielskim zostanie zamieszczony na stronie internetowej.

Marcin Winnicki
Aleksandra Małachowska
Małgorzata Rutkowska-Gorczyca
Andrzej Ambroziak

Przyczepność powłok miedzi na podłożu aluminiowym naniesionych metodą LPCS

Bond strength of copper coatings deposited on aluminum alloy with LPCS method

Streszczenie

Metoda niskociśnieniowego natryskiwania na zimno (ang. *Low Pressure Cold Spraying* – LPCS) umożliwia nanoszenie powłok z miękkich metali, takich jak Sn, Zn, Al, Cu, ewentualnie Ni i Fe, oraz ich stopów. W procesie zaleca się stosowanie domieszki ceramiki do proszku metalu, w celu polepszenia właściwości mechanicznych uzyskanych warstw oraz zwiększenia wydajności procesu. Budowanie warstw z samego proszku metalu jest również możliwe. W pracy badano wpływ zastosowanego proszku na właściwości mechaniczne oraz mikrostrukturę uzyskanych powłok, naniesionych przy stałych parametrach procesu. Skupiono się na wykonaniu powłok miedzianych, które są powszechnie stosowane w elektrotechnice. Wykorzystano komercyjne proszki dendrytyczne; proszek Cu z domieszką Al_2O_3 (w proporcji obj. 50% Cu/50% Al_2O_3) o granulacji -45+15 μm oraz proszek Cu o granulacji -50+15 μm , którymi pokryto stop aluminium AA1350. Przeprowadzone analizy miały na celu określenie przyczepności warstw oraz ich mikrotwardości. Powłoki były odrywane zgodnie z normą PN-EN 582, bez obróbki powierzchni. Warstwy natryskiwano przy wykorzystaniu manipulatora, co umożliwiło uzyskanie równomiernie nałożonej powłoki.

Słowa kluczowe: metoda niskociśnieniowego natryskiwania na zimno, przyczepność powłok, mikrotwardość, mikrostruktura

Abstract

Low Pressure Cold Spraying method (LPCS) allows build coatings with soft metals such as Sn, Zn, Al, Cu, even Ni and Fe and their alloys. In the process admixture of ceramics to the metal powder is recommended to improve mechanical properties of deposited coatings and increase deposition efficiency. Building coatings with pure powder without ceramic is also possible. In the manuscript the influence of used powder on mechanical properties and microstructure of obtained coatings, deposited with constant process parameters is presented. Copper coatings were deposited, which are commonly used in the electrical engineering. Two kinds of commercial available dendritic powders, Cu powder with Al_2O_3 admixture (50% Cu/50% vol. Al_2O_3) with a particle size of -45+15 μm and pure Cu powder with a particle size of -50+15 μm were used in the tests. Aluminum alloy AA 1350 was used as a substrate. The aim of the research was to identify coatings bond strength and microhardness. The bond strength tests consisted in pulling off the coatings in accordance with standard PN-EN 582 without coating surface machining preparation. In the spraying process manipulator was used, what gives uniformly deposited coatings.

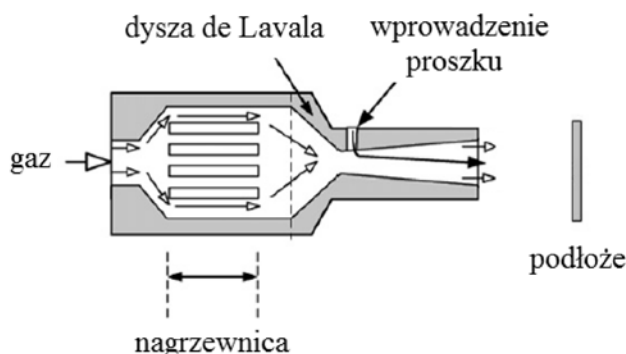
Keywords: Low Pressure Cold Spraying method, coating bond strength, microhardness, microstructure

Mgr inż. Marcin Winnicki; mgr inż. Aleksandra Małachowska; dr inż. Małgorzata Rutkowska-Gorczyca; prof. dr hab. inż. Andrzej Ambroziak – Politechnika Wrocławska.

Autor korespondencyjny/corresponding author: marcin.winnicki@pwr.wroc.pl

Wstęp

W metodzie niskociśnieniowego natryskiwania na zimno (ang. *Low Pressure Cold Spraying*) cząstki proszku pozyskują prędkość ze strumienia sprężonego gazu (powietrza lub azotu) o zadanej temperaturze, a następnie uderzają w podłoże. W procesie nie ma udziału wysokich temperatur, dzięki czemu cząstki osadzone są na podłożu w stanie stałym. Proszek jest jedynie podgrzany przez przepływający gaz. Energia w procesie pozyskiwana jest z wysokiej prędkości przepływającego przez dyszę gazu. Budowanie warstwy jest możliwe po przekroczeniu przez cząstki prędkości dźwięku, co umożliwia dysza de Laval'a o specjalnym kształcie zbieżno-rozbieżnym (rys. 1). Istotne jest, aby proszek został wprowadzony do dyszy w pobliżu przewężenia, co gwarantuje pozyskanie przez jego cząstki wysokiej prędkości. W metodzie LPCS stosuje się ciśnienie do 0,9 MPa. Temperatura podgrzania gazu mieści się w przedziale od temperatury otoczenia do 650°C [1÷3]. Zaleca się stosowanie mieszaniny proszku metalu z ceramiką, co pozwala uzyskać korzystniejsze właściwości naniesionej warstwy [3].



Rys. 1. Metoda niskociśnieniowego natryskiwania na zimno LPCS [2]
Fig. 1. Low Pressure Cold Spraying method (LPCS) [2]

Mechanizm łączenia następuje wskutek intensywnej, lokalnej deformacji materiału na granicy cząstki i podłoża, zachodzącej podczas uderzenia ziarna w podłoże. Dochodzi wtedy do powstania pasm adiabatycznego ścinania. Umożliwia to usunięcie tlenków przez tworzącą się wypływkę i tym samym zetknięcie czystych metalicznie powierzchni [4, 5]. Poza połączeniem mechanicznym dodatkowo mogą wystąpić inne mechanizmy wiązania, np. lokalne wiązanie metalurgiczne, o którym pisze Husain [6]. Na wartość adhezji ma wpływ wiele parametrów, do których można zaliczyć m.in.: materiał podłoża i jego przygotowanie, materiał natrykiwanego proszku, parametry procesu, podgrzanie podłoża przed natrykiwaniem czy też obróbkę cieplną naniesionych warstw.

Innym czynnikiem mającym wpływ na przyczepność powłok w przypadku metody niskociśnieniowej jest ilość dodatku ceramiki do proszku metalicznego. Spełnia ona trzy funkcje: aktywuje powierzchnie usuwając tlenki, ubija cząstki metalu, jak również zapobiega zapychaniu dyszy. Dlatego wraz ze wzrostem zawartości ceramiki w proszku dochodzi do znacznej poprawy właściwości adhezyjnych powłoki [3, 7÷15]. Najkorzystniejsze właściwości zaobser-

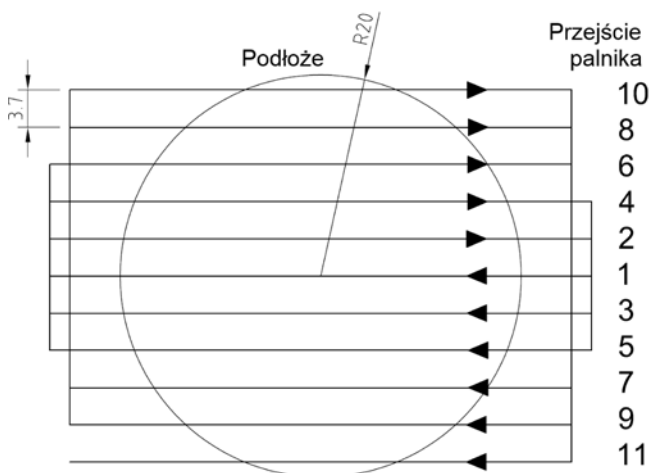
wowano w przypadku dodatku 50% obj. ceramiki Al_2O_3 [9]. Dodatkowo wraz ze wzrostem fazy ceramicznej obserwowano zmianę typu pęknięcia w próbach odrywania powłok z adhezyjnego na kohezyjny w warstwie aluminiowej [10].

Podawane aktualnie w literaturze wartości adhezji dla procesu niskociśnieniowego natryskiwania na zimno sięgają nawet powyżej 60 MPa dla warstw cynku i aluminium [2, 7÷13], co wynika z zastosowania domieszki ceramiki. Przyczepność warstw miedzi jest znacznie niższa i zależy od postaci zastosowanego proszku. W przypadku proszku o składzie $Cu + 50\% Al_2O_3$ naniesionego na piaskowane podłoże stalowe przyczepność wynosi odpowiednio 32 MPa dla proszku sferycznego Cu o granulacji $-25+5 \mu m$ oraz 18 MPa dla proszku dendrytycznego Cu o granulacji $-63 \mu m$ [9].

Wciąż jednak w literaturze jest niewiele informacji na temat przyczepności powłok, jej związku z parametrami procesu, jak również materiałem podłoża i natrykiwanego proszku. Szczególnie niewiele informacji na ten temat dotyczy warstw naniesionych metodą niskociśnieniowego natryskiwania na zimno. Stąd też w niniejszym artykule skupiono się na badaniu przyczepności warstw naniesionych z dendrytycznego proszku miedzi w dwóch postaciach, czystego Cu oraz mieszanki $Cu + Al_2O_3$.

Metodyka badań

Warstwy natrykiwano za pomocą urządzenia do niskociśnieniowego natryskiwania na zimno Dymet 413. Urządzenie to wyposażone jest w palnik z wewnętrznie osadzoną nagrzewnicą oraz dyszą de Laval'a o średnicy wylotowej $\varnothing 5 \text{ mm}$. Palnik podłączony był do manipulatora pracującego w 3 osiach (x, y, z). Jako gaz roboczy wykorzystano powietrze. Parametry natryskiwania zestawiono w tabelicy I. Schemat ułożenia poszczególnych przejść palnika względem podłoża przedstawiono na rysunku 2. Odległość między ściegami wynosiła 3,7 mm, dzięki czemu poszczególne ściegi nachodziły na siebie.



Rys. 2. Schemat ułożenia poszczególnych przejść palnika
Fig. 2. Arrangement of individual burner passes

Tablica I. Parametry procesu LPCS
Table I. LPCS process parameters

Proszek	Liczba warstw w powłoce	Podgrzanie podłoża	Parametr procesu				
			Temperatura gazu T , °C	Ciśnienie gazu p , MPa	Odległość palnika od podłoża l , mm	Masowe natężenie podawania proszku m , g/min	Prędkość liniowa palnika V , mm/min
Cu+Al ₂ O ₃	1	–	600	0,9	10	40	10
Cu	3	100°C					

W badaniach zastosowano komercyjnie dostępne proszki następujących metali: 50% Cu + 50% obj. Al₂O₃ o granulacji -45+15 µm (wartość średnia 27 µm) oraz Cu o granulacji -50+15 µm (wartość średnia 31 µm, rys. 3). Oba proszki zostały wytworzone w sposób redukcji elektrochemicznej, z tym że proszek Cu (rys. 3b) z dodatkowym rozdrabnianiem. Proszek Al₂O₃ był przygotowany w procesie kruszenia i pozyskał kształt nieregularny. Materiał podłoża stanowił krążek ze stopu aluminium AA1350 (tabl. II) o średnicy \varnothing 40 mm i grubości 7 mm. Powierzchnia podłoża przed natryskiwaniem została odpowiednio przygotowana przez obróbkę strumieniowo-ścierną, dzięki czemu uzyskała chropowatość $R_a = 6,45 \mu\text{m}$.

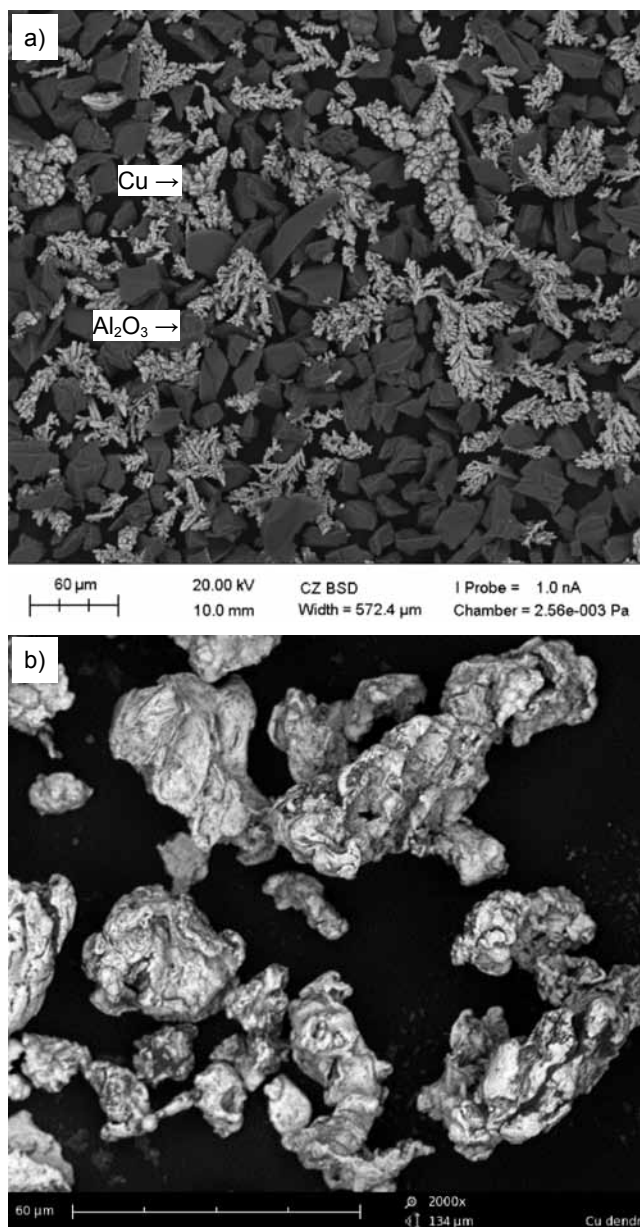
Badanie właściwości adhezyjnych wykonano dla powłok falistych, ponieważ powłoki łuszczyły się podczas procesu obróbki toczeniem. Jako grubość wyjściową przyjęto 500 µm. Dla każdej próbki wykonano taką liczbę warstw, aby ostateczna powłoka miała minimalną grubość ok. 500 µm. Badania zostały wykonane przez próbę zrywania powłok, zgodnie z PN-EN 582 *Natryskiwanie cieplne. Określanie przyczepności metodą odrywania*. Wartość adhezji wyznacza się jako stosunek maksymalnego obciążenia do powierzchni przekroju próbki. Próba zrywania służy do oceny wpływu materiału warstwy oraz podłoża, jak również warunków procesu natryskiwania [16]. Do przygotowania próbek wykorzystano klej utwardzalny na zimno Distal o średniej wytrzymałości 50 MPa.

Mikrostrukturę oraz mikrotwardość badano w powłokach wykonanych z jednej warstwy. Badania metalograficzne przeprowadzono na skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) Phenom G2 pro. Pomiar mikrotwardości wykonano na Digital Micro Hardness Tester MMT-X7 firmy Matsuzawa Co., Ltd. Przekroje metalograficzne przed analizą były trawione zgodnie z PN-75/H-04512, natomiast mikrotwardość mierzono wg PN-EN ISO 6507-3:2007P.

Tablica II. Skład chemiczny stopu aluminium AA1350 (wt. %, wg PN-EN 573-3:2010P)

Table II. Chemical composition of aluminium alloy AA 1350 (wt. %, acc. to PN-EN 573-3:2010P)

Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Al
0,12	0,24	0,02	0,01	0,01	0,07	0,02	reszta



Rys. 3. Morfologia proszków zastosowanych w procesie natryskiwania LPCS: a) Cu + Al₂O₃, b) Cu

Fig. 3. Powders morphology used in LPCS process: a) Cu + Al₂O₃, b) Cu

Analiza wyników badań

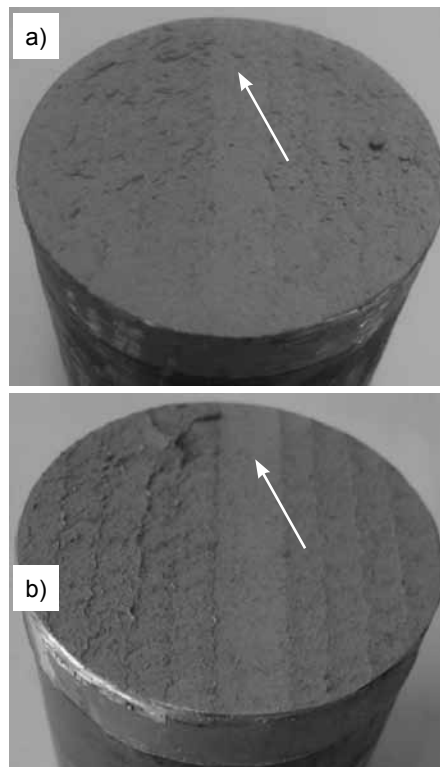
Wyniki badań przyczepności warstw do podłoża przedstawiono w tabelicy III. Na podstawie uzyskanych wyników można zauważyć, że dodatek korundu do proszku ponad dwukrotnie zwiększył przyczepność uzyskanych powłok. Należy podkreślić, że w przypadku budowania powłok z proszku Cu, uprzednio należało podgrzać podłoże do temperatury 100°C przed natryskiwaniem. W przeciwnym przypadku energia procesu była zbyt niska i ziarna odbijały się od podłoża. Obecność ceramiki w powłoce Cu + Al₂O₃ przyczyniła się znacznie do wzrostu przyczepności, dla której uzyskano średnią wartość 24,81 MPa. Natomiast w przypadku powłok natryskiwanych samym proszkiem Cu średnia przyczepność osiągnęła zaledwie 10,87 MPa.

Powłoki natryskiwano, wykonując pierwszy ścieg w osi próbki, co miało umożliwić równomierny rozkład ciepła w materiale podłoża. Większa ilość ciepła podwyższa energię procesu, dzięki czemu uzyskuje się wyższą wydajność natryskiwania oraz przyczepność do podłoża. Na rysunku 4 przedstawiono przekłomy warstw. Powłoka wykonana z czystej miedzi ma typowo adhezyjny przełom, natomiast powłoka Cu + Al₂O₃ adhezyjno-kohezyjny. Jak można zauważyć, w obu powłokach zerwanie zapoczątkowane jest w miejscach rozpoczęcia nakładania pierwszego ściegu, który oznaczono strzałkami. W przypadku powłoki Cu + Al₂O₃ przełom adhezyjno-kohezyjny postępuje od podłoża do wewnętrznej części powłoki. W obszarach, gdzie podłoże było bardziej nagrzane, doszło do zerwania kohezyjnego. Prawdopodobnie zwiększenie energii procesu przez podgrzanie podłoża w obu przypadkach do temperatury powyżej 100°C powinno zwiększyć przyczepność warstwy.

Uzyskane mikrotwardości obu warstw odbiegały znacznie od mikrotwardości zastosowanego proszku, która wynosiła odpowiednio dla Cu z mieszanki 72,2 HV0,01 (odch. stand. 9,94) oraz Cu czystego 78,1 HV0,01 (odch. stand. 8,6). Dla warstw Cu + Al₂O₃ wartość mikrotwardości mieści się w przedziale 119,4 HV0,2÷129,0 HV0,2, natomiast w przypadku zastosowania proszku Cu w przedziale 120,3 HV0,2÷121,8 HV0,2. Wyższa mikrotwardość materiału w warstwie

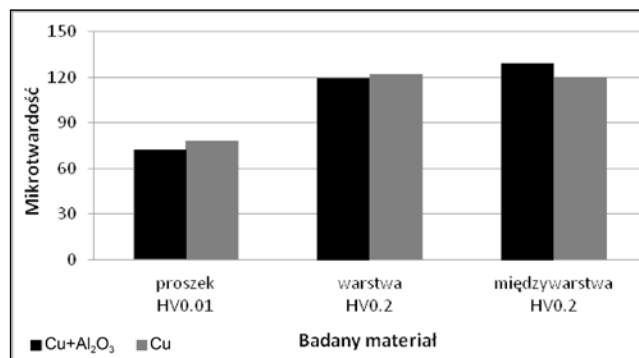
Tablica III. Wyniki próby zrywania warstw
Table III. Results of coating pull-off tests

Proszek	Próba	Grubość powłoki, μm		Siła zrywająca N	Przyczepność powłoki, MPa	Wartość średnia MPa	Odchylenie standardowe
		min	max				
Cu	1	510	960	13 340	10,62	10,87	0,57
	2	480	880	13 160	10,47		
	3	470	760	14 470	11,51		
Cu + Al ₂ O ₃	1	470	860	28 820	22,93	24,81	1,69
	2	490	1120	31 760	25,27		
	3	470	980	32 950	26,22		



Rys. 4. Wyniki próby zrywania warstw LPCS: a) Cu + Al₂O₃, b) Cu
Fig. 4. Results of LPCS coatings pull-off tests: a) Cu + Al₂O₃, b) Cu

spowodowana jest zgniotem podczas natryskiwania, co wywołuje utwardzenie. W przypadku warstw zawierających korund odnotowano wyższą mikrotwardość w strefie przejściowej między podłożem a warstwą, czyli w obszarze tzw. międzywarstwy, co wynika z obecności ceramiki w natrykiwanym proszku (rys. 5). Korund lokalnie wbijał się w podłoże, powodując intensywniejszy zgniot cząstek Cu.

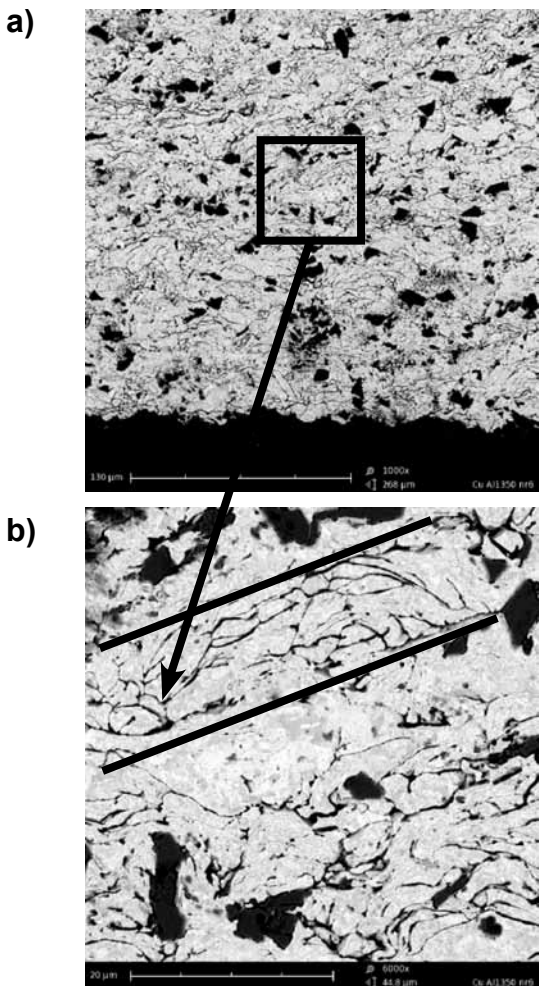


Rys. 5. Wyniki pomiarów mikrotwardości
Fig. 5. Results of microhardness measurements

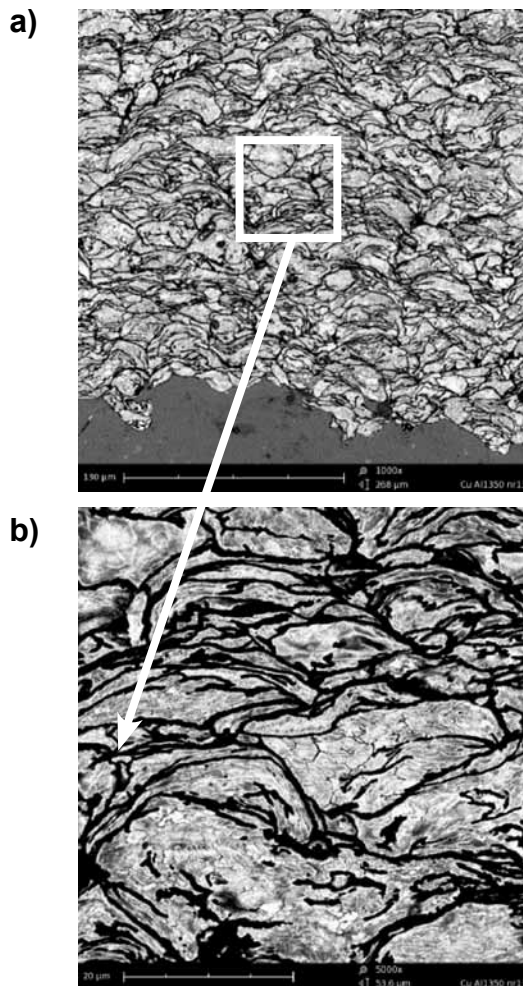
Grubość warstw wykonanych z proszku Cu + Al₂O₃ mieściła się w przedziale 470÷1120 μm. Badania metalograficzne wykazały, że mimo postaci dendrytycznej proszku warstwa zawiera zadowalającą strukturę wolną od porów (rys. 6). Czarne nieregularne punkty w mikrostrukturze to faza Al₂O₃. Można zaobserwować, że drobne ziarna korundu osadzają się w dużej ilości między poszczególnymi ziarnami miedzi, tworząc lokalne zbrojenia. Lokalne aglomeracje ceramiki mogą doprowadzić do powstania kruchego obszaru w strukturze warstwy. Na rysunku 6b zaznaczono obszar miedzi bez korundu, która niemal całkowicie wypełnia przestrzeń w warstwie. Spowodowane jest to dodatkowym zgniotem, który powoduje obecność ceramiki w proszku. Przeprowadzono również analizę zawartości korundu przy powiększeniu warstwy 550x. Okazuje się, że w naniesionej warstwie występuje jedynie ok. 10% Al₂O₃. Porównując z mieszanką proszku, gdzie występowało 50% Al₂O₃ (obj.), jest to znaczny

spadek. Większa część korundu z proszku odbija się od warstwy, stanowiąc ubytek materiału przy natryskiwaniu.

Warstwy Cu miały grubość 149÷385 μm. Cząstki proszku tworzą zadowalającą strukturę, jednak widać większą ilość porów niż w warstwach z domieszką ceramiki (rys. 7). Potwierdziła to analiza porowatości w obu warstwach. W przypadku powłok budowanych z samego proszku Cu porowatość wyniosła aż 20% (rys. 7b), natomiast dla powłok zawierających korund porowatość osiągnęła 6%. Twardość obu zastosowanych proszków była na zbliżonym poziomie, stąd decydujący wpływ na równomierne wypełnienie warstwy musiała mieć domieszka ceramiki w proszku. Ponadto ceramika zwiększyła trzykrotnie wydajność procesu. W celu wykonania powłoki o grubości 500 μm z proszku Al₂O₃ wystarczyło nanieść jedną warstwę. W przypadku zastosowania proszku bez korundu konieczne było osadzenie trzech warstw.



Rys. 6. SEM warstwy Cu + Al₂O₃, powiększenie: a) 1000x, b) 6000x
Fig. 6. SEM images of Cu + Al₂O₃ coating magnified: a) 1000x, b) 6000x



Rys. 7. SEM warstwy Cu, powiększenie: a) 1000x b) 5000x
Fig. 7. SEM images of Cu coating magnified: a) 1000x, b) 5000x

Wnioski

Badania wykazały, że proszek Cu + Al₂O₃ pozwala uzyskać powłoki o ponad dwukrotnie wyższej przyczepności do podłoża, dochodzącej do 25 MPa, od powłok wykonanych z samej miedzi. Zastosowana domieszka ceramiki ma korzystny wpływ nie tylko na wzrost przyczepności powłoki. Powoduje również zmniejszenie zawartości porów w uzyskanej powłoce, a także znaczne zwiększenie wydajności procesu, co widać po liczbie naniesionych warstw w celu uzyskania powłoki o grubości 500 µm.

Warstwy LPCS cechują się wysoką twardością, która przekracza niemal dwukrotnie twardość

materiału rodzimego proszku. Wynika to z intensywnego zgniotu i odkształcenia ziaren podczas natryskiwania. Należy podkreślić, że obecność fazy korundu w proszku metalu nie spowodowała znacznego wzrostu twardości metalu w powłoce.

Analiza mikrostrukturalna pokazała, że naniesione powłoki z proszku Cu + Al₂O₃ cechują się dużą gęstością i małą porowatością. Powłoki wykonane z miedzi bez dodatku korundu nie wypełniają równomiernie przestrzeni w warstwie, czego skutkiem jest większa porowatość.

Literatura

- [1] T. Schmidt, F. Gärtner, H. Assadi, H. Kreye, Development of a Generalized Parameter Window for Cold Spray Deposition, *Acta Mater.* 54, 2006, s. 729÷742.
- [2] Xian-Jin Ning, Jae-Hoon Jang, Hyung-Jun Kim, The effects of powder properties on in-flight particle velocity and deposition process during low pressure cold spray process, *Applied Surface Science*, 2007, vol. 253, s. 7449÷7455.
- [3] H. Koivuluoto, J. Lagerbom, M. Kylmalahti, P. Vuoristo, Microstructure and Mechanical Properties of Low-Pressure Cold-Sprayed (LPCS) Coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 17 (5÷6), 2008, s. 721÷727.
- [4] H. Assadi, F. Gärtner, T. Stoltenhoff, H. Kreye, Bonding mechanism in cold gas spraying, *Acta Materialia* 51 (2003), s. 4379÷4394.
- [5] M. Grujicic, C.L. Zhao, W.S. DeRosset, D. Helfritsch, Adiabatic shear instability based mechanism for particles/substrate bonding in the cold-gas dynamic-spray process, *Materials and Design* 25 (2004), s. 681÷688.
- [6] T. Hussain, D. McCartney, P. Shipway, D. Zhang, Bonding Mechanisms in Cold Spraying: The Contributions of Metallurgical and Mechanical Components, *J. Therm. Spray Technol.*, 18(3), 2009, s. 364÷379.
- [7] H. Mäkinen, J. Lagerbom, P. Vuoristo, Adhesion of Cold Sprayed Coatings: Effect of Powder, Substrate, and Heat Treatment, *Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions: Proceedings of the 2007 International Thermal Spray Technology*, 2007, Beijing, China.
- [8] X.-J. Ning, J.-H. Kim, H.-J. Kim, C. Lee, Characteristics and heat treatment of cold-sprayed Al-Sn binary alloy coatings, *Applied Surface Science* 255 (2009), s. 3933÷3939.
- [9] H. Koivuluoto, P. Vuoristo, Effect of Powder Type and Composition on Structure and Mechanical Properties of Cu+Al₂O₃ Coatings Prepared by using Low-Pressure Cold Spray Process, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 19 (5), 2010, s. 1081÷1092.
- [10] Q. Wang, K. Spencer, N. Birbilis, M.-X. Zhang, The influence of ceramic particles on bond strength of cold spray composite coatings on AZ91 alloy substrate, *Surface & Coatings Technology* 205 (2010), s. 50÷56.
- [11] K. Spencer, D.M. Fabijanic, M.-X. Zhang, The use of Al-Al₂O₃ cold spray coatings to improve the surface properties of magnesium alloys, *Surface & Coatings Technology*, vol. 204, 2009, s. 336–344.
- [12] E. Irissou, J.-G. Legoux, B. Arsenaault, Ch. Moreau, Investigation of Al-Al₂O₃ Cold Spray Coating Formation and Properties, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 16 (5-6), 2007, s. 661÷668.
- [13] H. Koivuluoto and P. Vuoristo, Effect of Ceramic Particles on Properties of Cold-Sprayed Ni-20Cr+Al₂O₃ Coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 18 (4), 2009, s. 555÷562.
- [14] L. Pawłowski, *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2007.
- [15] R.G. Maev, V. Leshchynsky, *Introduction to Low Pressure Gas Dynamic Spray*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008.
- [16] Norma PN-EN 582: Natryskiwanie cieplne. Określanie przyczepności metodą odrywania, Polski Komitet Normalizacyjny.

Miesięczne i roczne spisy treści oraz streszczenia artykułów opublikowanych w Przeglądzie Spawalnictwa są dostępne na stronie internetowej:

www.pspaw.ps.pl



Jubileusz 80-lecia Sekcji Spawalniczej Stowarzyszenia Inżynierów Mechaników i Techników Polskich

Sekcja Spawalnicza SIMP powstała w 1934 r. W 2014 r. przypada więc jubileusz 80-lecia jej istnienia. W początkowych latach Sekcja działała pod nazwą „Sekcja Inżynierów Spawaczy” Stowarzyszenia Inżynierów Mechaników Polskich. Pierwsze prace Sekcji kierowane były przez Zarząd w składzie: Zygmunt Rytel – prezes, Zygmunt Dobrowolski, Stanisław Jabłoński, Michał Skarbiński i Tadeusz Maliszewski.

Protoplastą Sekcji był powstały w 1927 r. Związek Przemysłu Acetylenowego i Tlenowego z siedzibą w Katowicach i oddziałem w Warszawie, powołany przez 12 instytucji powiązanych z techniką. Dwa lata później decyzją Walnego Zgromadzenia Związek ten przyjął nazwę Stowarzyszenie dla Rozwoju Spawania i Cięcia Metali w Polsce. Powstałe Stowarzyszenia wykazywało się znaczącą aktywnością, wydając m.in. od 1928 r. miesięcznik Spawanie i Cięcie Metali, którego kontynuatorem jest Przegląd Spawalnictwa.

Pracami Zarządu Głównego Sekcji Spawalniczej SIMP od początku jej istnienia kierowali:

inż. Zygmunt Rytel	1934÷1935
prof. Zygmunt Dobrowolski	1936÷1939, po wojnie do 1962
inż. Stanisław Rudowski	1963÷1970
dr Zdzisław Leśniak	1970÷1977
prof. Stanisław Piwowar	1977÷1981
prof. Mieczysław Myśliwiec	1982÷1987
prof. Roman Kensik	1987÷1990
doc. Henryk Zatyka	1990÷1994
inż. Michał Wińcza	1994÷1998
prof. Andrzej Kolasa	1998÷2000
inż. Michał Wińcza p.o.	2000÷2002
dr Jan Plewniak	2002 do dziś.

Obecnie Sekcja Spawalnicza zrzesza ok. 560 inżynierów spawalników, posiada 14 oddziałów wymienionych poniżej wraz nazwiskami prezesów:

Bełchatów	mgr inż. Maria Cecotka
Bydgoszcz	mgr inż. Zenon Nieśmiałek
Częstochowa	dr inż. Kwiryn Wojsyk
Gdańsk	mgr inż. Michał Wińcza
Gliwice	mgr inż. Stanisław Dziuba
Gorzów	mgr inż. Tomasz Mitz

Kielce	mgr inż. Mariusz Janusz-Bielecki
Kraków	mgr inż. Włodzimierz Kowalczyk
Poznań	inż. Mirosław Nowak
Szczecin	mgr inż. Marek Saperski
Świdnica	mgr inż. Andrzej Siennicki
Warszawa	dr inż. Kazimierz Ferenc
Wieluń	mgr inż. Rafał Lis
Wrocław	prof. dr hab. inż. Zbigniew Mirski.

Obecny Zarząd kończącej się kadencji tworzą: dr Jan Plewniak (PCz) – prezes; prof. Andrzej Ambroziak (PWr) wiceprezes; prof. Tomasz Chmielewski (PW); prof. Andrzej Kolasa (PW); mgr inż. Adam Ogrodnik (UDT); mgr inż. Włodzimierz J. Walczak (Linde Gaz Polska); mgr inż. Ryszard Ziomek.

Znaczącą datą w działalności Sekcji był 1985 r., w którym obchodzono stulecie wynalezienia spawania łukowego przez inż. Stanisława Olszewskiego (wspólnie z Mikołajem Benardosem). Dla uczczenia tego doniosłego wydarzenia Zarząd Główny Sekcji Spawalniczej doprowadził do wybicia w Mennicy Państwowej medalu noszącego imię polskiego wynalazcy. Medal ten jest przyznawany od 1987 r. osobom i firmom, które mają niezaprzeczalne zasługi dla rozwoju spawalnictwa. Każdego roku przyznawanych jest około 6 medali, które są bardzo cenione w środowisku spawalników.

Sekcja Spawalnicza SIMP od początku istnienia współpracuje z miesięcznikiem naukowo-technicznym Przegląd Spawalnictwa, który istnieje 86 lat. Aktywność Sekcji skupia się m.in. na organizowaniu corocznie konferencji krajowych i międzynarodowej, w tym corocznej „numerowanej” Krajowej Konferencji Spawalniczej, w której bierze udział kilkuset uczestników, w tym roku 56. KKS w Sosnowcu. Co roku w imprezach organizowanych lub współorganizowanych przez Sekcję Spawalniczą, tj. oprócz konferencji, w seminariach, wystawach, kursach, odczytach, wyjazdach i wycieczkach technicznych, uczestniczy powyżej 2500 osób.

Kilka lat temu komisja Sekcji pod kierunkiem prof. Jacka Senkary (PW) opracowała raport o stanie spawalnictwa w Polsce, który spowodował szeroką dyskusję problemu. Wspólnie

z Polską Izbą Spawalniczą, kierowaną przez prof. Andrzeja Kolasę (PW), Sekcja prowadzi Rejestr Inżynierów Spawalników Polskich, wydając stosowny certyfikat. Od wielu lat Sekcja współpracuje z Instytutem Spawalnictwa w Gliwicach kierowanym przez prof. Jana Pilarczyka. Sekcja podejmuje starania zmierzające do upamiętnienia przez NBP dwóch zasłużonych dla spawalnictwa postaci, tj. prof. Stefana Bryły i inż. Stanisława Olszewskiego, przez wybite 2-złotowych monet okolicznościowych.

Sekcja w 2007 r. została wyróżniona Dyplomem Najwyższego Uznania za najaktywniejszą działalność merytoryczno-organizacyjną spośród jednostek specjalistycznych SIMP. W roku 2011

podczas XXXII Walnego Zjazdu SIMP Sekcja Spawalnicza otrzymała dyplom uznania za zajęcie I miejsca w rankingu na najefektywniej działającą jednostkę specjalistyczną Stowarzyszenia w kadencji 2006-2010.

Biorąc pod uwagę dotychczasowe osiągnięcia Sekcji Spawalniczej, nie można zaprzepaścić jej dorobku. Przy obecnym wysokim stopniu rozwoju spawalnictwa jest ona miejscem rozwiązywania wielu problemów w ramach działającej organizacji, jednoczącej spawalników polskich i dającej dużo satysfakcji zawodowej.

Dr inż. Jan Plewniak
Prezes Sekcji Spawalniczej SIMP

Lutowanie miękkie aluminium z miedzią i stalą z zastosowaniem warstw pośrednich

20 września 2013 r. w Instytucie Technologii Maszyn i Automatykacji na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej odbyła się publiczna dyskusja nad rozprawą doktorską mgr inż. Tomasza Wojdat p.t. „Lutowanie miękkie aluminium z miedzią i stalą z zastosowaniem warstw pośrednich”. Promotorem pracy był prof. dr hab. inż. Zbigniew Mirski z Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej, a recenzentami: prof. dr hab. inż. Jerzy Nowacki, z Instytutu Inżynierii Materiałowej Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie oraz prof. dr hab. inż. Andrzej Ambroziak, kierownik Zakładu Spawalnictwa w Instytucie Technologii Maszyn Automatykacji Politechniki Wrocławskiej.

Tematyka pracy dotyczyła problematyki lutowania metali różniących się składem chemicznym, mikrostrukturą, właściwościami fizycznymi i mechanicznymi oraz fizykochemicznymi parametrami warstwy wierzchniej. Wytwarzanie trwałych połączeń lutowanych pomiędzy metalami i ich stopami o różnym składzie chemicznym i właściwościach, w tym stopów metali nieżelaznych lub materiałów kompozytowych stanowi ważne i do końca nierozwiązane zagadnienie współczesnej inżynierii spawalnictwa. Możliwość optymalnego wykorzystania właściwości wymienionych metali i stopów w wielu konstrukcjach oraz w licznych elementach układów chłodniczych, pneumatycznych, cieplnych i elektrycznych uwarunkowana jest właściwościami i jakością zastosowanych w nich połączeń.

W badaniach wstępnych mgr inż. Tomasz Wojdat wykazał niezadowalającą zwilżalność miedzi gat. M1E spoiwami cynkowymi (kąąt zwilżania θ powyżej 50°) oraz utworzenie niekorzystnych stref reakcyjnych o dużej twardości, powyżej 500 HV 0,025, w złączach luto-



dr inż. Tomasz Wojdat

wanych aluminium (EN AW – 1050A) – miedź (M1E) i aluminium (EN AW – 1050A) – stal niestopowa (DC01) powstających w lutowinie od strony miedzi i stali. Wykazał również, że strefy reakcyjne nie tworzą się na granicy połączenia lutowiny ze stalą kwasoodporną Cr-Ni, a jej zwilżalność spoiwami cynkowymi jest zadowalająca (kąąt zwilżania θ poniżej 10°).

Efektom przeprowadzonych badań wstępnych był dobór odpowiednich materiałów dodatkowych do lutowania miękkiego oraz określenie struktury i właściwości połączeń aluminium z miedzią i stalą niestopową wytworzonych metodą lutowania płomieniowego przy użyciu płomienia propanowo-powietrznego. Materiałami dodatkowymi wybranymi i stosowanymi w badaniach były spoiwa cynkowe z dodatkiem 2, 4 i 15 % wag. Al oraz niekorozyjny topnik zawierający związki cezu.

Na podstawie analizy literaturowej oraz badań wstępnych dokonał również doboru szerokiej grupy warstw pośrednich, które następnie naniósł na podłoża metali przeznaczonych do lutowania z aluminium metodami galwanicznymi i metodami natrysku cieplnego.

Celem rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Wojdata było określenie wpływu naniesionych warstw pośrednich na lutowność miedzi gat. M1E i stali niestopowej gat. DC01 z aluminium gat. EN AW - 1050A, stwierdzenie możliwości braku tworzenia twardych stref reakcyjnych na granicy połączenia tych metali z lutownią oraz wytworzenie złączy lutowanych o zadowalających właściwościach mechanicznych. Podczas realizacji rozprawy doktorant wykazał brak przydatności warstw pośrednich nanoszonych metodami natrysku płomieniowego do procesów lutowania z uwagi na niezadowalającą zwilżalność tych warstw spoiwami Zn wynikającą z ich dużego utlenienia. Dokonał również oceny efektów procesów dyfuzyjnych przebiegających w czasie lutowania, które prowadziły do wymiany składników materiału rodzimego i spoiwa oraz do tworzenia się twardych faz międzymetalicznych. Mgr inż. Tomasz Wojdat wykazał, że procesom tym przeciwdziała galwaniczne naniesienie na powierzchnię miedzi i stali niestopowej warstwy Zn-Ni o zawartości niklu w zakresie 12÷15 % wag. i grubości 16 μm .

Udowodnił, że naniesienie na powierzchniach przeznaczonych do lutowania warstw galwanicznych Zn-Ni zapobiega tworzeniu się wymienionych stref reakcyjnych i istotnie poprawia zwilżalność i rozpląwność spoiw Zn-Al na tych powierzchniach, a zwłaszcza podłoża miedzianego o czym świadczą wielokrotnie mniejsze wartości kąta zwilżania ($\theta = 47\div 59^\circ$ – podłoże miedziane bez warstwy i $\theta = 4\div 7^\circ$ – podłoże miedziane z naniesioną warstwą Zn-Ni). Dodatkowo potwierdził przydatność lutów Zn-Al o zawartości 2÷15 % Al do lutowania płomieniem propanowo-powietrzny aluminium z miedzią i stalą niestopową pod warunkiem wytworzenia na miedzi i stali niestopowej warstwy pośredniej Zn-Ni, która skutecznie hamuje procesy dyfuzyjne umożliwiając uzyskanie szczelnych i wytrzymałych połączeń.



Dr inż. Tomasz Wojdat ze swoim promotorem prof. dr. hab. inż. Zbigniewem Mirskim

Podczas realizacji rozprawy mgr inż. Tomasz Wojdat zastosował liczne metody badawcze z obszaru inżynierii materiałowej, takie jak mikroskopia świetlna i elektronowa, analiza EDS, pomiary mikrotwardości, próby wytrzymałości na ścinanie, oraz z obszaru technologii spajania: badania zwilżalności i próby rozpląwności spoiw. Dążąc do realizacji celu pracy wykazał się znajomością technik wytwarzania powłok poprzez nanoszenie galwaniczne i natryskiwanie płomieniowe oraz technologii lutowania miękkiego.

Praca wnosi istotny wkład do inżynierii procesów spajania materiałów o zróżnicowanych właściwościach fizycznych i mechanicznych, szczególnie przeznaczonych do lutowania miękkiego miedzi i stali niestopowej z aluminium a wyniki pracy są przydatne dla specjalistów zajmujących się teorią i praktyką procesów spajania aluminium z innymi metalami.

Redakcja



Uroczysta fotografia wypromowanych doktorów nauk technicznych Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej w dniu 16.01.2014 r. z udziałem Rektora PWr prof. dr. hab. inż. Tadeusza Więckowskiego i Prorektora PWr prof. dr. hab. inż. Eugeniusza Rusińskiego

Informacje wydawcy

Profil czasopisma

Wydanie czasopisma jest wspierane finansowo przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Odbiorcami Przeglądu Spawalnictwa, czasopisma o ponad osiemdziesięcioletniej tradycji, są wszystkie ośrodki naukowe, dydaktyczne i organizacje przemysłowe w Polsce zainteresowane problematyką spajania. Czasopismo jest wysyłane do ważnych ośrodków zagranicznych zainteresowanych tą tematyką. W czasopiśmie Przegląd Spawalnictwa są publikowane recenzowane, oryginalne artykuły dotyczące: techniki spajania, cięcia, powłok spawalniczych; metalurgii, metaloznawstwa i modelowania procesów spawalniczych; metod badań struktury i właściwości złączy; charakterystyki urządzeń, sprzętu i materiałów; automatyzacji i robotyzacji; technik klejenia tworzyw konstrukcyjnych i spawania tworzyw polimerowych; szkolenia, przepisów i normalizacji; praktyki spawalniczej i poradnictwa technologicznego; wydarzeń, prezentacji karier spawalników i ich doświadczeń zawodowych. Wybrane artykuły opublikowane w Przeglądzie Spawalnictwa są tłumaczone na język angielski i zamieszczone w czasopiśmie Welding International wydawanym przez Woodhead Publishing Ltd. w Wielkiej Brytanii na mocy porozumienia o współpracy. W czasopiśmie mogą być publikowane artykuły w języku angielskim lub niemieckim.

Redakcja nie odpowiada za treść ogłoszeń, nie zwraca materiałów nie zamówionych, zastrzega sobie prawo do skracania i adiestacji tekstów oraz zmiany ich tytułów. Czasopismo wydawane w wersji drukowanej.

Wskazówki dla autorów

Objętość artykułu maks. 10÷15 stron (ewentualnie 20 po uzgodnieniu z redakcją), a komunikatu 1÷4 stron maszynopisu na arkuszu formatu A4 bez tabulatorów i wcięć, czcionka Times New Roman 12, marginesy: górny, dolny, lewy i prawy – 2,5 cm. Rysunki i tablice z ich tytułami należy umieścić w tekście. Rysunki, wykresy i fotografie należy nazywać rysunkami (np. rys. 1) i numerować cyframi arabskimi, a tablice – cyframi rzymskimi (np. tabl. IV). Należy przewidzieć możliwość zmniejszenia rysunku do 30%. Rysunki dostarczyć w oddzielnych plikach graficznych: rastrowa w formacie *.TIFF, *.JPEG 300 DPI; wektorowa w plikach *.CDR, *.AI (czcionka zamieniona na krzywe). Jednostki – układ SI. Artykuł powinien zawierać: informacje o autorach – stopnie naukowe lub zawodowe, imię i nazwisko; tytuł artykułu, streszczenie (do 1/3 strony), tekst główny, podzielony na odpowiednio zatytułowane rozdziały, wnioski końcowe, literaturę; pozycje literatury numerowane cyframi arabskimi w kwadratowych nawiasach i w kolejności cytowania w tekście. Tytuł, streszczenie oraz podpisy pod rysunkami i tabelami, 3 słowa kluczowe przetłumaczone na język angielski. Artykuły prosimy nadsyłać na CD lub e-mailem z pismem przewodnim zawierającym: zgodę na publikację artykułu w czasopiśmie; dane teleadresowe i miejsce pracy autorów do wiadomości redakcji. Zespół Autorów otrzymuje jeden egzemplarz miesięcznika z Ich artykułem wysyłany na adres Autora kontaktowego (nie dotyczy publikacji zamieszczanych w numerach z materiałami z konferencji).

Ogłoszenia i artykuły promocyjne

Ogłoszenia i artykuły promocyjne w Przeglądzie Spawalnictwa – czasopiśmie ogólnopolskim o szerokim zasięgu – są skuteczną i taną formą reklamy docierającej do wszystkich zainteresowanych problematyką spajania. Czasopismo zamieszcza kolorowe i czarno-białe: ogłoszenia reklamowe na okładkach lub wewnątrz numeru oraz wrzutki (inserts) dostarczane przez zleceniodawcę; artykuły techniczno-informacyjne; informacje o branżowych imprezach naukowo-technicznych. Redakcja przyjmuje zamówienia na publikację ogłoszeń reklamowych i artykułów techniczno-informacyjnych. Cennik ogłoszeń i artykułów promocyjnych znajduje się na stronie www.pspaw.ps.pl

PRENUMERATA

Cena

Cena 1 egzemplarza Przeglądu Spawalnictwa:
17 zł (w tym 5% VAT)

Cena 1 archiwalnego egzemplarza Przeglądu
Spawalnictwa: 25 zł (w tym 5% VAT)

**W celu zamówienia prenumeraty
w Redakcji należy wypełnić formularz
zamieszczony obok i przesać go
w formie skanu lub listu na adres:**

REDAKCJA – Przegląd Spawalnictwa AW SIMP

ul. Świętokrzyska 14a, 00-050 Warszawa
tel.: 22 827 25 42, faks: 22 336 14 79
e-mail: pspaw@ps.pl

Wpłaty należy dokonać na rachunek bankowy:

Bank BPH S.A. Oddział w Warszawie
45 1060 0076 0000 3200 0043 1836

Zamawiam czasopismo w Redakcji Przegląd Spawalnictwa

półroczna _____ 102 zł
roczna _____ 204 zł
od numeru do numeru
liczba zamawianych kompletów _____

Imię i nazwisko

Firma

Adres

NIP

Kontakt do osoby zamawiającej:

Oświadczam, że jestem podatnikiem VAT i upoważniam firmę do wystawienia faktury bez podpisu

Podpis

**Rapid Weld – wysokowydajny proces
spawania materiałów o dużych grubościach.
Tylko w urządzeniach serii Qineo**





Polska



Większe bezpieczeństwo
Większa wartość.

www.tuv-sud.pl

TÜV SÜD POLSKA

USŁUGI DLA PRZEMYSŁU:

Certyfikacja zakładów (np. ISO 3834, EN 1090-1, AD-2000 Merkblatt HPO, EN 15085), ocena zgodności urządzeń i konstrukcji, odbiory cystern wg RID i ADR, zatwierdzanie dokumentacji technicznej, nadzory inwestorskie, szkolenia i certyfikacja spawaczy oraz personelu NDT, wykonywanie badań nieniszczących, certyfikacja procesów i zakładów wg dyrektyw UE (np. PED, CPR), odbiory i dopuszczenia materiałów hutniczych, dopuszczenia technologii spawania, ocena zgodności maszyn w zakresie bezpieczeństwa technicznego, wykonywanie niezależnych ekspertyz technicznych, dopuszczenia materiałów dodatkowych do spawania wg VdTÜV 1153 i DB.

CERTYFIKACJA:

ISO 9001, ISO 14001, OHSAS 18001, ISO/TS 16949, IRIS, ISO 50001, ISO 27001, ISO 29990, systemy zintegrowane.

USŁUGI DLA ENERGETYKI:

Kogeneracja, odnawialne źródła energii, biogazownie, gospodarka paliwami, analizy niepewności pomiarów, analizy energetyczne, benchmarking, przemysłowe audyty energetyczne, komputerowe algorytmy obliczeniowe, weryfikacja sprawozdań z kogeneracji (CHP) oraz raportów na temat emisji gazów cieplarnianych (GHG).

TECHNIKA BUDOWLANA:

Kontrola projektów i jakości robót, ekspertyzy, nadzory budowlane, certyfikacja BQS/BC-7, LEED & BREEAM, audyty finansowe, ocena zgodności wind oraz schodów ruchomych, kontrole okresowe instalacji i urządzeń.

SZKOLENIA:

Szkolenia techniczne, z zakresu systemów zarządzania, studia podyplomowe.

TÜV®