

# Powłoki wielowarstwowe 5\*(Cu/Ni) nakładane metodą tamponową

## 5\*(Cu/Ni) Multi-layer Coatings Deposited by Brush Plating Method

### Streszczenie

W artykule omówiono rolę i znaczenie powłok niklowo-miedzianych oraz ich zastosowania. Głównym tematem artykułu są wielowarstwowe powłoki miedziano-niklowe typu 5\*(Cu/Ni) nakładane metodą tamponową, będącą odmianą nakładania galwanicznego. Celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie możliwości metody tamponowej w zakresie wytwarzania wspomnianych powłok. Przeprowadzono podstawowe badania: pomiary grubości powłok, metalograficzne oraz mikrotwardości. Otrzymane wyniki odniesiono do wyników otrzymanych dla jednowarstwowych powłok Ni i Cu.

**Słowa kluczowe:** metoda tamponowa; powłoki Cu/Ni; powłoki wielowarstwowe

### Abstract

The article discusses the role and importance of nickel-copper coatings and their applications. The main topic of the article are multi-layer copper-nickel coatings of type 5\*(Cu/Ni) applied with a brush plating method, which is a variant of galvanic application. The aim of the conducted research was to check the possibility of the brush plating method in the production of the mentioned coatings. Basic research was carried out: coating thickness measurements, metallographic and microhardness. The results obtained were referred to the results obtained for monolayer Ni and Cu coatings.

**Keywords:** brush plating; Cu/Ni coatings; multi-layer coatings

### Wstęp

Powłoki z rodziny powłok niklowych i miedzianych należą do jednych z najbardziej popularnych. Posiadają szerokie zastosowanie ze względu na właściwości miedzi (dostępność, wysoka przewodność elektryczna i cieplna, odporność korozyjna) oraz niklu i jego stopów (odporność na zużycie i korozję). Mogą pełnić nie tylko rolę dekoracyjną czy ochronną, ale są również stosowane w procesie nakładania powłok technicznych. W tym przypadku Cu jest zazwyczaj stosowana jako warstwa podkładowa, natomiast warstwa Ni pełni rolę właściwej warstwy roboczej. Przy ich zastosowaniu w regeneracji powierzchni zużytych lub uszkodzonych wskutek eksploatacji elementów maszyn warstwy Cu, nakładane z określonego elektrolitu, umożliwiają szybkie uzupełnienie ubytków powierzchni, jej wyrównanie i jednocześnie pełnią rolę warstwy podkładowej pod warstwę niklu bądź innego metalu lub stopu metali [1]. Poprzez naprzemienne nakładanie warstw Ni i Cu możliwe jest otrzymanie powłoki wielowarstwowej, która może np. być powłoką gradientową, charakteryzującą się zmianami właściwości na jej grubości lub materiałem wyjściowym do wytworzenia na powierzchni powłoki będącej stopem Cu-Ni. Stop Cu-Ni ma z kolei dobre właściwości antykorozyjne i wytrzymałościowe.

Dzięki temu można go stosować jako np. materiał na pokrycia elementów armatury wodnej.

Metoda tamponowa (ang. *brush plating, selective plating, spot plating, swab plating*) kilkakrotnie już była omawiana na łamach Przeglądu Spawalnictwa [1÷4]. Jest odmianą nakładania w wannach galwanicznych metali i ich stopów. Pierwszy patent z nią związany pojawił się we Francji w 1948 roku, jako następstwo prac zapoczątkowanych w 1938 roku przez Georges Ixii i opracowania w 1945 roku pierwszego przemysłowego, komercyjnego procesu nakładania powłok tą metodą. Dalszy rozwój metody nastąpił w latach 50. i 60. Obecnie metoda posiada świadectwa dopuszczenia wielu znaczących koncernów i instytucji, działających w różnych dziedzinach przemysłu.

Istotą metody tamponowej jest to, że elektrolit nanosi się na powierzchnię pokrywaną za pomocą tamponu, nasuniętego na elektrodę (najczęściej grafitową lub stalową), zamocowaną w uchwycie. Uchwyt elektrodowy jest podłączony do bieguna dodatniego źródła, a przedmiot pokrywany do ujemnego. Duża liczba opracowanych elektrolitów umożliwia obecnie nakładanie ponad 70 różnych metali i ich stopów.

Dr inż. Jarosław Grześ – Politechnika Warszawska, inż. Michał Jankowski – SupraElco Warszawa.

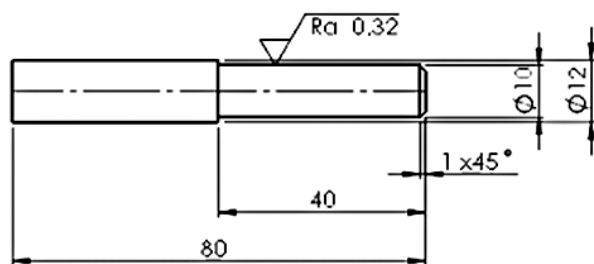
Autor korespondencyjny/Corresponding author: jgrzes@wip.pw.edu.pl

## Przedmiot i metodyka badań

Przedmiotem badań były powłoki wielowarstwowe typu 5\*(Cu/Ni), otrzymane w procesie nakładania tamponowego w ramach [5] i prac związanych z modyfikacją powierzchni prowadzonych w Zakładzie Inżynierii Spajania PW. Podstawowym celem badań było określenie możliwości stosowania metody tamponowej do otrzymywania powłok wielowarstwowych przekładanych, czyli takich, które zbudowane są z szeregu naprzemiennie ułożonych warstw dwóch metali lub ich stopów. Dla celów porównawczych wykonano nakładanie powłok Cu i Ni jednowarstwowych oraz powłok dwuwarstwowych Cu/Ni. W ramach badań określono zmiany grubości powłoki w funkcji czasu nakładania przy danych parametrach procesu (napięcia i prędkości przesuwu tamponu względem powierzchni pokrywanej), przeprowadzono pomiary twardości powłok oraz obserwacje mikroskopowe.

Powłoki nakładano z następujących elektrolitów: Copper Alkaline #1 (powłoki Cu) i Nickel Extreme High Speed (powłoki Ni). O wyborze tych elektrolitów zadecydowały w głównej mierze: szybkości osadzania z nich powłok, zbliżone zakresy napięć nakładania oraz zalecanych prędkości przesuwu tamponu. Ponadto występuje znacząca różnica w twardości uzyskanych z nich powłok.

Powłoki nakładano na próbkach walcowych, o wymiarach powierzchni pokrywanej  $\varnothing 10 \times 40$  mm (rys. 1), wykonanych ze stali St3. W połowie próbek powierzchnia przeznaczona do pokrywania była szlifowana do uzyskania  $Ra = 0,32 \mu\text{m}$ , w pozostałych zachowano ją w takim stanie, w jakim była po toczeniu wykańczającym.



Rys. 1. Próbką do nakładania powłok  
Fig. 1. Sample for applying coatings

Pomiary mikrotwardości wykonano metodą Vickersa, wykorzystując mikroskop optyczny Leitz. Liczba punktów pomiarowych zawierała się między 7 a 15, zależnie od grubości powłoki. Obciążenie węgelnika wynosiło 25 g. Obserwacje mikroskopowe przeprowadzono na mikroskopie metalograficznym Olympus BX51M, stosując powiększenia 10 i 20 razy (obserwacje powierzchni powłok) oraz 100, 200 i 500 razy (obserwacje przekrojów poprzecznych powłok). Zgłady metalograficzne przekrojów poprzecznych wykonano pod kątem i trawiono 5% roztworem Nitalu. Grubość powłok w czasie nakładania kontrolowano za pomocą mikromierza, mierząc średnicę próbki.

Wpływ napięcia i czasu nakładania na grubość, twardość oraz budowę powłoki określono na powłokach jednowarstwowych, które nakładano przy napięciach odpowiednio 10 i 14 V (powłoki Ni) oraz 11 i 14 V (powłoki Cu) oraz różnych czasach. Niższe wartości są średnimi, a wyższe maksymalnymi napięciami z zakresu napięć zalecanych przez producenta elektrolitów [6]. Badania te stanowiły pierwszy etap. W drugim etapie badań, dla wybranego na podstawie pierwszego etapu napięcia (14 V), nakładano i badano pozostałe powłoki. Wszystkie nałożone powłoki wymieniono w tabelicy I.

## Technologia nakładania powłok

Przed nakładaniem powłok powierzchnia próbek została przygotowana wg standardowej procedury. W pierwszej kolejności zastosowano czyszczenie elektrolityczne i aktywowanie. Następnie nakładano specjalną niklową warstwę podkładową z elektrolitu Nickel Special, której celem było zapewnienie lepszej przyczepności badanych powłok do powierzchni próbek. Charakterystykę elektrolitów zastosowanych w procedurze przygotowania powierzchni i nakładania powłok Cu i Ni przedstawiono w tabelicy II [6].

Parametry poszczególnych operacji przygotowania powierzchni i nakładania powłok przedstawiono w tabelicy III. W celu zapewnienia tej samej prędkości  $v$  przesuwu tamponu względem powierzchni pokrywanej i aby niezależnie jej wartość od wpływu ręcznego nakładania, próbki mocowano w uchwycie trójściskowym tokarki TSB 16 (rys. 2). Prędkość obrotową wrzeciona tokarki dobrano tak, aby  $v = 10$  m/min.

Tablica I. Zestawienie nałożonych powłok  
Table I. List of applied coatings

Powłoka	Elektrolit 1	Elektrolit 2	Napięcie [V]	Czas [s]
Powłoka Ni (jednowarstwowa)	Nickel Extreme High Speed	–	10	1800
Powłoka Ni (jednowarstwowa)	Nickel Extreme High Speed	–	14	1800
Powłoka Cu (jednowarstwowa)	Copper Alkaline #1	–	11	1800
Powłoka Cu (jednowarstwowa)	Copper Alkaline #1	–	14	1800
Powłoka Cu/Ni (dwuwarstwowa)	Copper Alkaline #1	Nickel Extreme High Speed	14	240+120=360
Powłoka 5*(Cu/Ni) (wielowarstwowa)	Copper Alkaline #1	Nickel Extreme High Speed	14	10x10=100
Powłoka 5*(Cu/Ni) (wielowarstwowa)	Copper Alkaline #1	Nickel Extreme High Speed	14	10x30=300
Powłoka 5*(Cu/Ni) (wielowarstwowa)	Copper Alkaline #1	Nickel Extreme High Speed	14	10x60=600
Powłoka 5*(Cu/Ni) (wielowarstwowa)	Copper Alkaline #1	Nickel Extreme High Speed	14	10x90=900
Powłoka 5*(Cu/Ni) (wielowarstwowa)	Copper Alkaline #1	Nickel Extreme High Speed	14	10x120=1200

**Tablica II.** Charakterystyka elektrolitów [6]  
**Table II.** Plating solutions and properties [6]

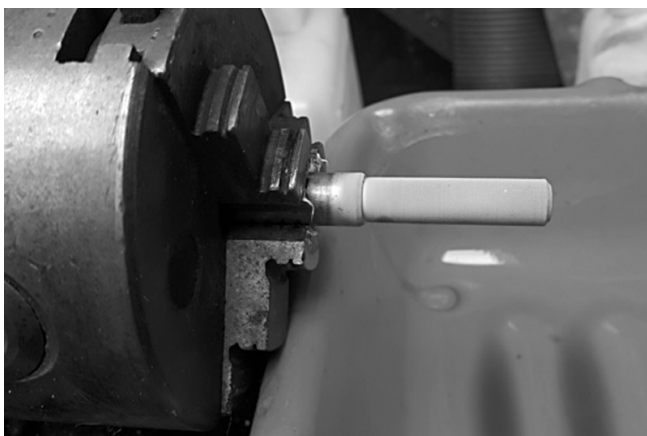
Nazwa elektrolitu	pH	K <sub>j</sub>	P	S <sub>o</sub>	Q <sub>E</sub>	Uwagi
Electroclean #1	~11	–	–	–	–	czyszczenie elektrolityczne powierzchni
Activator #4	~2	–	–	–	–	aktywacja powierzchni
Nickel Special	<2	85	–	–	–	warstwa podkładowa, twardość ok. 480 HV
Copper Alkaline #1	9,2÷9,8	60	0,079	9,8	710	niskie naprężenia wewnętrzne, dobra przyczepność, twardość ok. 230 HV
Nickel Extreme High Speed	7,5÷7,8	56	0,046	8,0	113,2	twardość ok. 525 HV

pH – odczyn elektrolitu  
K<sub>j</sub> – koncentracja jonów metalu w elektrolicie, g/l  
P – współczynnik zużycia mocy, Ah/dm<sup>2</sup>·μm  
S<sub>o</sub> – szybkość nakładania, μm/min  
Q<sub>E</sub> – wydajność elektrolitu, dm<sup>2</sup>/l·μm

**Tablica III.** Parametry przygotowania powierzchni i nakładania powłok  
**Table III.** Parameters of surface preparation and plating

Nazwa elektrolitu	Biegunowość	Napięcie [V]	Czas [s]	Uwagi
Electroclean #1	(+)	12	30	czyszczenie elektrolityczne
Activator #4	(-)	12	30	aktywacja powierzchni
Nickel Special	–	–	3÷5	warstwa podkładowa
	(+)	18	3÷5	
	(+)	12	3÷5	
Copper Alkaline #1	(+)	11, 14	1800	powłoki Cu
		14	240	powłoki Cu/Ni
			10, 30, 60, 90, 120 <sup>*)</sup>	powłoki wielowarstwowe
Nickel Extreme High Speed	(+)	10, 14	1800	powłoki Ni
		14	120	powłoki Cu/Ni
			10, 30, 60, 90, 120 <sup>*)</sup>	powłoki wielowarstwowe

Po każdej operacji próbki były płukane w bieżącej wodzie.  
<sup>\*)</sup> czasy nakładania pojedynczej warstwy w powłoce



**Rys. 2.** Mocowanie próbek  
**Fig. 2.** Mounting of samples

Powłoki nakładano wykorzystując jako źródło prądu prostownik DSD-15-Q, stosując uchwyty elektrodowe ZDB-1(II) i prostopadłościowe elektrody grafitowe o wymiarach 40 x 40 x 10 mm (l x s x h), dobrane do wielkości powierzchni pokrywanej tak, aby wyeliminować konieczność przesuwu poprzecznego tamponu.

## Wyniki badań

Aby określić zmiany grubości w zależności od czasu nakładania, w przypadku powłok jednowarstwowych Ni i Cu podczas ich nakładania co 300 s mierzono średnicę próbki w trzech miejscach – na początku, w środku i na końcu powierzchni pokrywanej. Na ich podstawie wyliczono wartości średnie grubości powłok oraz średni czas przyrostu grubości powłoki o 1 μm. Wyniki pomiarów i obliczeń zestawiono w tablicy IV.

**Tablica IV.** Zmiany grubości powłok w czasie nakładania  
**Table IV.** Changes in coating thickness during application

Elektrolit	Napięcie [V]	Czas [s]	Średnica [mm]			Średnia grubość powłoki [mm]	Średni czas nakładania 1 μm [s]
			pomiar 1	pomiar 2	pomiar 3		
Nickel Extreme High Speed	10	0	9,940	9,930	9,930	–	13,1
		300	9,980	9,985	9,950	0,019	
		600	10,040	10,045	9,990	0,046	
		900	10,095	10,100	10,020	0,069	
		1200	10,140	10,150	10,045	0,089	
		1500	10,195	10,215	10,080	0,115	
		1800	10,260	10,265	10,100	0,138	
Nickel Extreme High Speed	14	0	9,945	9,940	9,920	–	11,2
		300	9,995	10,010	9,9650	0,027	
		600	10,050	10,070	10,020	0,056	
		900	10,100	10,150	10,050	0,082	
		1200	10,150	10,210	10,080	0,0106	
		1500	10,200	10,270	10,120	0,131	
		1800	10,260	10,350	10,160	0,161	
Copper #1 Alkaline	11	0	9,950	9,940	9,935	–	11,0
		300	10,000	9,990	9,980	0,024	
		600	10,060	10,050	10,020	0,051	
		900	10,120	10,105	10,060	0,077	
		1200	10,170	10,165	10,120	0,105	
		1500	10,240	10,235	10,170	0,137	
		1800	10,300	10,290	10,220	0,164	
Copper #1 Alkaline	14	0	9,945	9,925	9,925	–	10,2
		300	10,015	9,990	9,970	0,030	
		600	10,090	10,060	10,030	0,064	
		900	10,160	10,120	10,080	0,094	
		1200	10,230	10,180	10,130	0,124	
		1500	10,280	10,240	10,190	0,153	
		1800	10,370	10,270	10,210	0,176	

Pomiary mikrotwardości wykazały, że zawierała się ona w granicach:

- dla powłoki Cu i napięcia nakładania 11 V, 179÷195 HV (wartość średnia 186 HV);
- dla powłoki Cu i napięcia nakładania 14 V, 153÷206 HV (wartość średnia 176 HV);
- dla powłoki Ni i napięcia nakładania 10 V, 429÷599 HV (wartość średnia 522 HV);
- dla powłoki Ni i napięcia nakładania 14 V, 420÷599 HV (wartość średnia 501 HV).

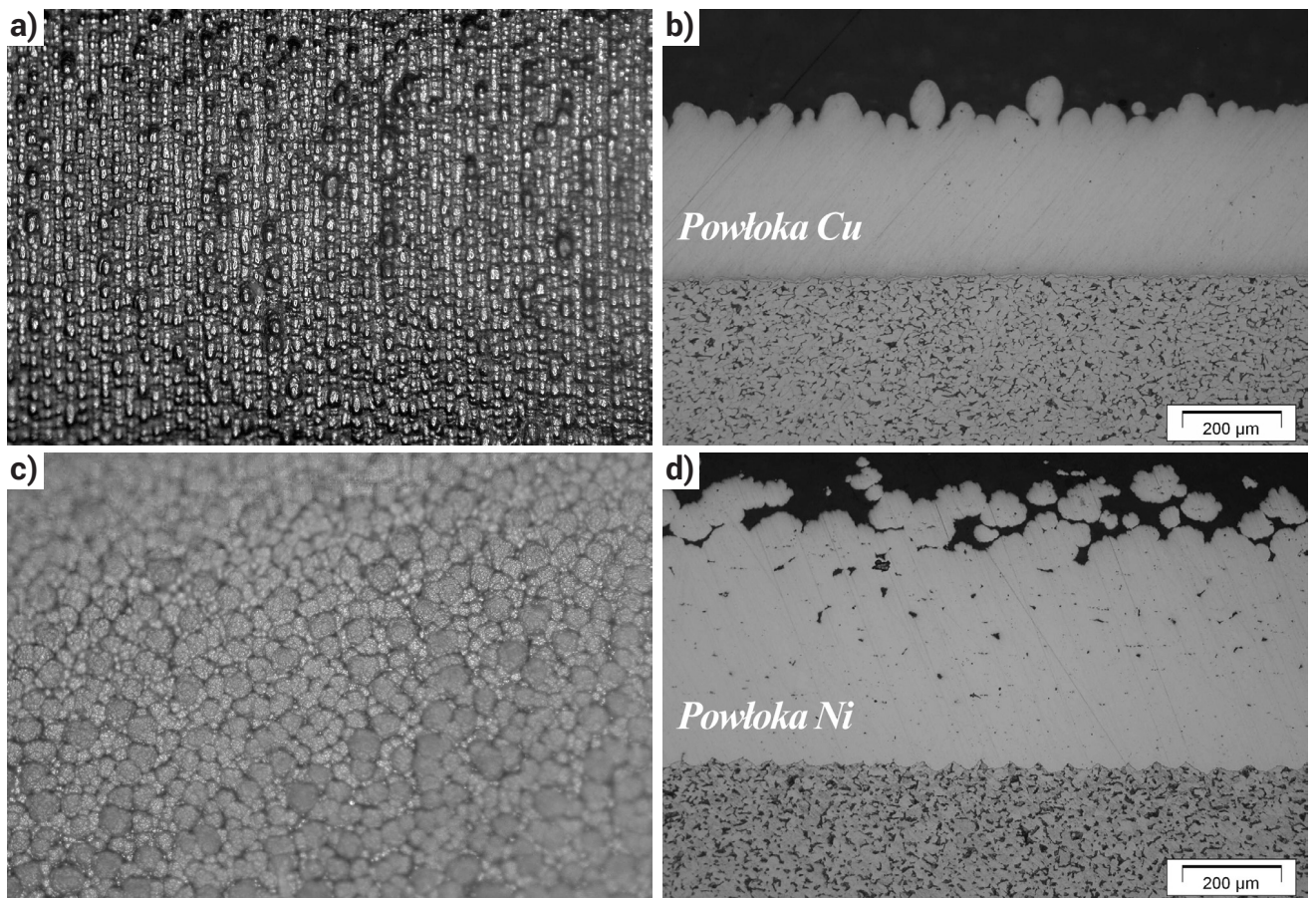
Na rysunku 3 przedstawiono obrazy mikroskopowe powierzchni i przekrojów poprzecznych powłok Cu i Ni.

W drugim etapie przeprowadzono badania dla powłok wielowarstwowych. Wyniki pomiarów grubości (wartości średnie) oraz mikrotwardości powłok na przekroju poprzecznym zamieszczono w tablicy V. Rysunek 4 przedstawia wybrane obrazy mikroskopowe przekrojów poprzecznych powłok wielowarstwowych.

**Tablica V.** Grubość i mikrotwardość powłok Cu/Ni, 5\*(Cu/Ni)

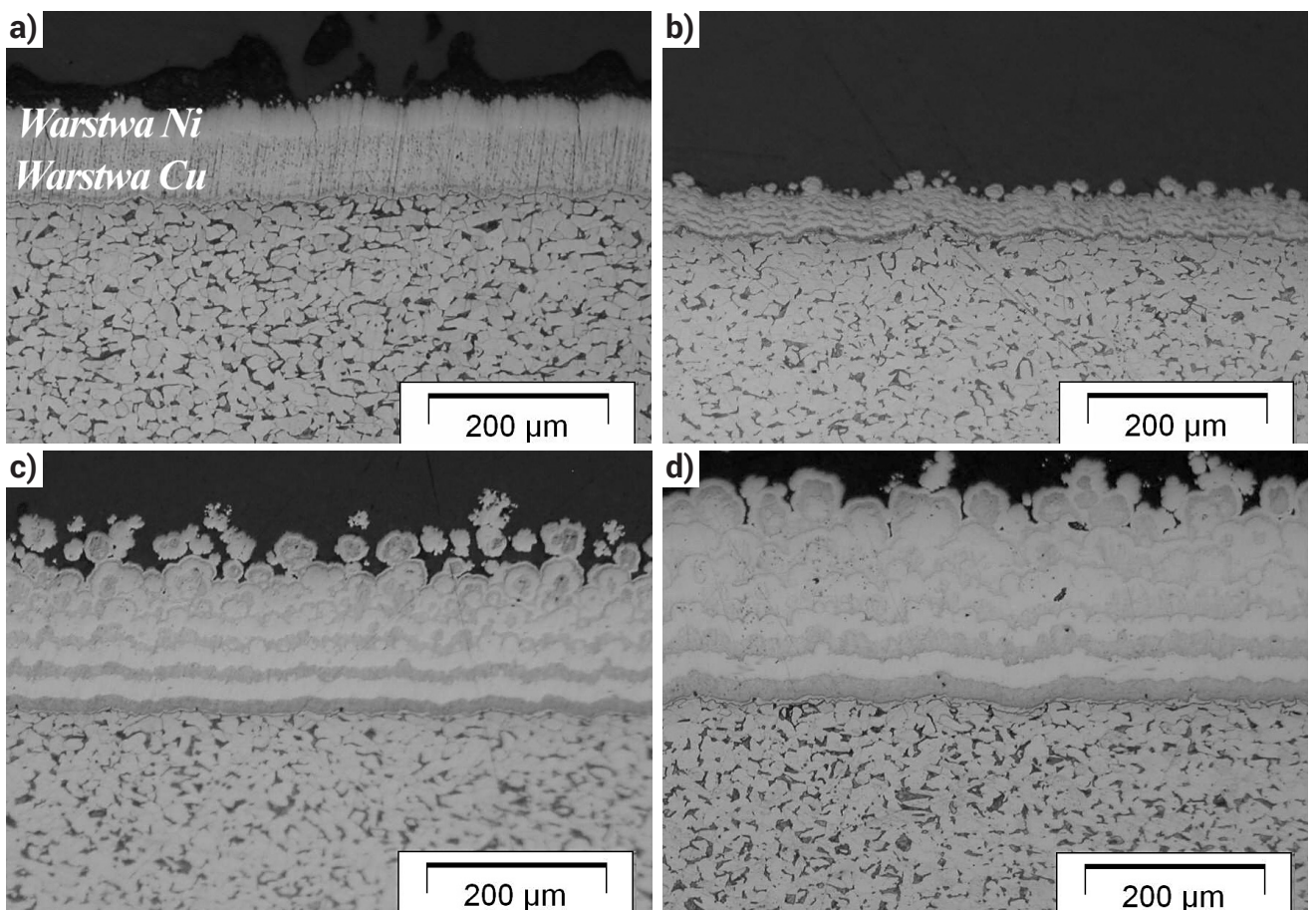
**Table V.** Thickness and microhardness of Cu/Ni, 5\*(Cu/Ni) coatings

Powłoka / całkowity czas nakładania powłoki [s]	Średnia grubość powłoki [mm]	HV 0,025 HV <sub>śred</sub> / HV <sub>max</sub> ÷HV <sub>min</sub>
Cu/Ni / t=240+120	0,040	301 / 560÷190
5*(Cu/Ni) / t=100	0,023	361 / 420÷311
5*(Cu/Ni) / t=300	0,048	310 / 413÷224
5*(Cu/Ni) / t=600	0,090	278 / 383÷122
5*(Cu/Ni) / t=900	0,110	202 / 473÷78
5*(Cu/Ni) / t=1200	0,108	188 / 454÷74
Materiał podłoża	–	128 / 206÷53



**Rys. 3.** Obrazy mikroskopowe: a) powierzchni (pow. 20x) i b) przekroju poprzecznego powłoki Cu ( $U = 14\text{ V}$ ,  $t = 1800\text{ s}$ ) oraz c) powierzchni (pow. 20x) i d) przekroju poprzecznego powłoki Ni ( $U = 14\text{ V}$ ,  $t = 1800\text{ s}$ )

**Fig. 3.** Microscopic images of: a) surface (magn. 20x) and b) cross-section of the Cu coating ( $U = 14\text{ V}$ ,  $t = 1800\text{ s}$ ) as well as c) surface (magn. 20x) and d) cross-section of the Ni coating ( $U = 14\text{ V}$ ,  $t = 1800\text{ s}$ )



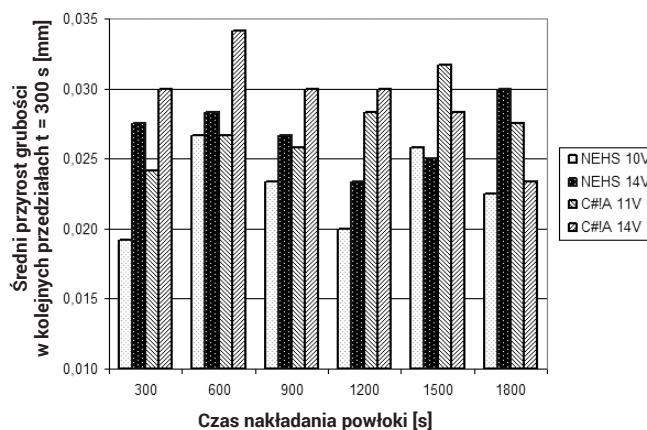
**Rys. 4.** Obrazy mikroskopowe przekroju poprzecznego powłok wielowarstwowych: a) Cu/Ni, b)  $5^*(\text{Cu/Ni})$   $t = 100\text{ s}$ , c)  $5^*(\text{Cu/Ni})$   $t = 600\text{ s}$ , d)  $5^*(\text{Cu/Ni})$   $t = 1200\text{ s}$

**Fig. 4.** Cross-section of multi-layer coatings: a) Cu/Ni, b)  $5^*(\text{Cu/Ni})$   $t = 100\text{ s}$ , c)  $5^*(\text{Cu/Ni})$   $t = 600\text{ s}$ , d)  $5^*(\text{Cu/Ni})$   $t = 1200\text{ s}$

## Analiza wyników

Etap I pozwolił na określenie dynamiki przyrostu grubości powłok Cu i Ni nakładanych z wybranych elektrolitów. Analizując otrzymane wyniki dla powłok jednowarstwowych można stwierdzić liniowy charakter przyrostu grubości powłok w funkcji czasu jej nakładania (rys. 5). Zwiększenie napięcia nakładania do wartości maksymalnej ( $U = 14\text{ V}$ ) zalecanej przez producenta elektrolitu spowodowało stosunkowo niewielki przyrost końcowej grubości powłoki. Wyniósł on dla powłoki Cu  $0,012\text{ mm}$ , a dla Ni  $0,023\text{ mm}$ . Analizując z kolei przyrost grubości powłoki w kolejnych odcinkach czasowych wynoszących  $300\text{ s}$  obserwujemy różne jego wartości (rys. 6). Przedział zmienności przyrostu w kolejnych odcinkach czasowych wynosi dla powłok Cu  $0,024 \div 0,032\text{ mm}$  ( $U = 11\text{ V}$ ) i  $0,023 \div 0,034\text{ mm}$  ( $U = 14\text{ V}$ ), a dla powłok Ni  $0,019 \div 0,027\text{ mm}$  ( $U = 10\text{ V}$ ) i  $0,023 \div 0,030\text{ mm}$  ( $U = 14\text{ V}$ ). Grubość nałożonych powłok Cu jest przy tych samych napięciach i czasach nakładania większa niż dla powłok Ni. Zwiększenie napięcia nakładania spowodowało zarówno w przypadku powłok Cu, jak i Ni zwiększenie rozrzutu wyników pomiarów mikrotwardości i przyczyniło się do niewielkiego obniżenia wartości średniej mikrotwardości.

W przypadku powłok wielowarstwowych  $5^*(\text{Cu}/\text{Ni})$  przyrost grubości ma zmieniony charakter w porównaniu z obserwowanym dla powłok Cu i Ni. Przebieg krzywej przedstawiono na rysunku 7. Widoczne jest maksimum dla  $t = 900\text{ s}$ . Dla czasu  $t = 1200\text{ s}$  zanotowano nieznaczny spadek grubości powłoki. Przyczyną może być zmiana prędkości przesuwu tamponu względem powierzchni pokrywanej spowodowana zwiększaniem się średnicy próbki w czasie nakładania lub zużycie się tamponu i jego lokalne uszkodzenia, pojawiające się w miarę upływu czasu. Jeżeli chodzi o twardość

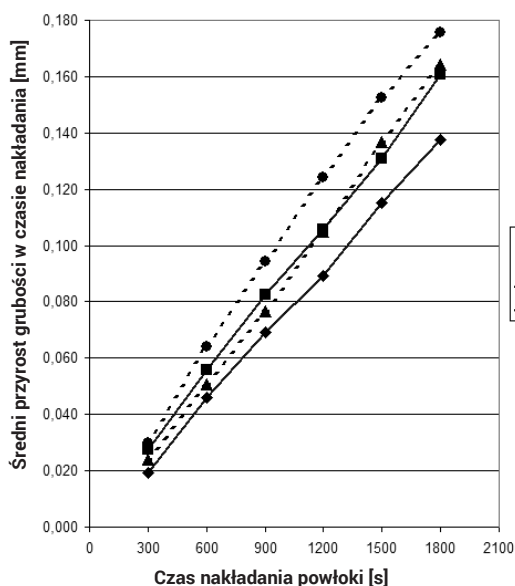


Rys. 6. Przyrost grubości powłok w kolejnych okresach nakładania ( $6 \cdot t = 300\text{ s}$ )

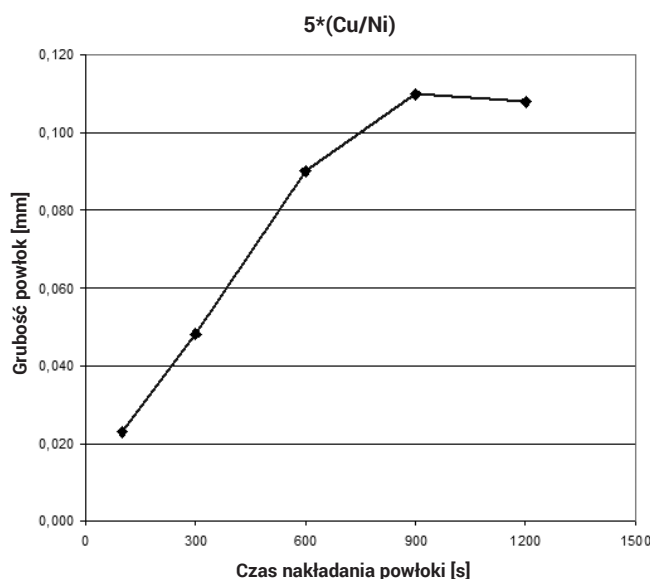
Fig. 6. Increase in coating thickness during subsequent application periods ( $6 \cdot t = 300\text{ s}$ )

powłok, to widoczny jest spadek średniej mikrotwardości oraz znaczące zwiększenie rozrzutu wyników pomiarów wraz z wydłużaniem czasu nakładania. Spowodowane jest to coraz większym udziałem miedzi w powłoce.

Obserwacje mikroskopowe powierzchni i przekrojów poprzecznych pozwoliły na stwierdzenie występowania pęknięć w warstwach niklowych, których rozprzestrzenianie ulega zablokowaniu przez znajdujące się niżej warstwy miedzi. Pęknięcia występujące w warstwach niklowych są obserwowane bardzo często, co jest związane ze stanem naprężeń występującym w warstwie. W badanych próbkach zaobserwowano również porowatość oraz nierównomierność granicy między poszczególnymi warstwami.



Rys. 5. Przyrost grubości powłok Cu i Ni w funkcji czasu nakładania  
Fig. 5. Increase in Cu and Ni coating thickness vs. application time



Rys. 7. Przyrost grubości powłok  $5^*(\text{Cu}/\text{Ni})$  w funkcji czasu nakładania  
Fig. 7. Increase in  $5^*(\text{Cu}/\text{Ni})$  coating thickness vs. application time

## Podsumowanie

Proces otrzymywania powłok wielowarstwowych metodą tamponową jest trudniejszy niż w przypadku powłok pojedynczych czy podwójnych. Wykazały to wyraźnie przeprowadzone badania. Aby jednak uniknąć większości problemów występujących przy zastosowaniu metody tamponowej do nakładania powłok wielowarstwowych, należy:

- starannie dobrać elektrolity do nakładania warstw składających się na powłokę, powinny one umożliwiać otrzymywanie gładkiej powierzchni poszczególnych warstw w szerokim zakresie napięć nakładania;

- tak dobrać elektrolity, aby szybkości osadzania z nich warstw były do siebie zbliżone;
- stosować wartości średnie napięcia lub niższe z zakresu zalecanego przez producenta, spowoduje to wydłużenie czasu nakładania powłoki, ale przyczyni się prawdopodobnie do otrzymania lepszych jakościowo warstw oraz zmniejszy ryzyko wystąpienia przypaleń;
- zapewnić właściwą kontrolę parametrów nakładania i przestrzegać ogólnych zasad nakładania powłok metodą tamponową;
- kontrolować na bieżąco w czasie nakładania stan tamponu, jakiegokolwiek ślady świadczące o jego zużyciu bądź uszkodzeniu kwalifikują tampon do wymiany;
- unikać zbyt dużych grubości poszczególnych warstw.

Podsumowując, zastosowanie metody tamponowej do otrzymywania powłok wielowarstwowych w każdym przypadku wymaga indywidualnego podejścia i rozpatrzenia szeregu czynników.

## Literatura

- [1] Grześ J., Rychlewski M.: Metoda tamponowa w regeneracji części maszyn, Przegląd Spawalnictwa nr 3, s. 30-35, 2015.
- [2] Grześ J.: Badania powłok metalowych nakładanych metodą tamponową, Przegląd Spawalnictwa nr 7-9, s. 27-29, 1991.
- [3] Grześ J.: Warstwy pośrednie nakładane metodą tamponową, Przegląd Spawalnictwa nr 6, s. 48-52, 2011.
- [4] Grześ J.: Odporność korozyjna wybranych powłok nakładanych metodą tamponową, Przegląd Spawalnictwa nr 2, s. 14-18, 2014.
- [5] Jankowski M.: Wpływ parametrów nakładania tamponowego na strukturę metalowych powłok kompozytowych Ni-Cu, Praca dyplomowa inżynierska, Politechnika Warszawska, 2017.
- [6] Brush plating solutions instruction manual, China National Machinery Import & Export Corporation, Beijing Branch.