

NI-B BEVONATOK ELŐÁLLÍTÁSI PARAMÉTEREINEK OPTIMALIZÁLÁSA

EXPERIMENTAL OPTIMIZATION OF NI-B COATING PARAMETERS

Bányai Kristóf*, Kovács Sándor**, Vadászné Dr. Bognár Gabriella***

ABSTRACT

This study investigates the optimization of deposition and heat treatment parameters for electroless Ni-B coatings with the aim of improving their tribological performance. Using the Taguchi method combined with analysis of variance, the impact of bath temperature, deposition time, and heat treatment temperature on friction coefficient, microhardness, wear volume loss, and wear depth were analysed. Results reveal that heat treatment temperature has the most significant influence, followed by bath temperature and deposition time, with none of the factors being negligible. The developed methodological approach demonstrates the potential of structured statistical design to determine optimal process parameters for high-performance Ni-B coatings.

1. BEVEZETÉS

Az elektrolit nélküli bevonattechnológiák az elmúlt években egyre nagyobb jelentőségre tettek szert, mivel az elektrolízis alkalmazása nélkül előállított bevonatok mind szélesebb körben kerülnek alkalmazásra különböző ipari szektorokban. Ez a növekvő érdeklődés hangsúlyozza a Ni-P és Ni-B bevonatok tribológiai vizsgálatának fontosságát, amelyet korábbi kutatási projektünkben [1] végeztünk el. E munkában bemutattuk és jellemeztük a vizsgált mintákat, valamint részletesen ismertettük a mikrokeménység-vizsgálatok, a kopási tesztek és a pásztázó elektronmikroszkópos elemzések eredményeit. A vizsgálatok célja a Ni-P és Ni-B bevonatok alapvető tribológiai paramétereinek meghatározása volt, beleértve a súrlódási együtthatót, a kopási térfogatvesztést és a kopási tényezőt. Az eredmények rámutattak, hogy a Ni-P-I bevonat rendelkezett a legkedvezőbb tribológiai tulajdonságokkal, mivel a legmagasabb átlagos Vickers-mikrokeménységet kombinálta a legalacsonyabb mért kopási térfogattal és a súrlódási munkához viszonyított legkisebb kopási rátával. Egyértelműen igazolást nyert, hogy az elektrolit nélküli nikkelalapú bevonatok tribológiai viselkedését jelentős mértékben befolyásolják a kémiai fürdő paramétereit. E

megfigyelés további kutatásokat indokol az optimális fürdőösszetétel és hőkezelési feltételek meghatározása érdekében, amelyek a tribológiai teljesítmény maximalizálását szolgálják.

Li és munkatársai kutatásukban a leválasztási paraméterek optimalizálására összpontosítottak a keménység és a kopásállóság növelése céljából, igazolva a módszer hatékonyságát a felületi tulajdonságok javításában [2]. Niksefat és Mahboubi eredményei szerint a felületkezelés számottevően javította a grafén-oxiddal erősített nikkel-bór alapú kompozit bevonatok mechanikai és tribológiai jellemzőit [3]. Reddah és munkatársai a Taguchi-módszer alkalmazásával optimalizálták a nikkel-alumínium-oxid kompozit bevonatok elektrodepozíciós folyamatát [4]. Megállapításaik rávilágítottak a folyamatparaméterek szerkezetre és keménységre gyakorolt hatására, amelyek jelentős teljesítménynövekedést eredményeztek. Mei és munkatársai a GCr15 acélon alkalmazott nikkel-bór-molibdén (Ni-B-Mo) elektrolit nélküli bevonat optimalizálására fókuszáltak [5]. Vizsgálataik kimutatták, hogy a sókoncentráció és a leválasztási idő befolyásolja a leválasztási sebességet és a keménységet, melynek célja a kopásállóság fokozása volt. Chintada és munkatársai átfogó irodalmi áttekintést nyújtottak az elektrolit nélküli nikkelalapú bevonatokról, kiemelve a különböző folyamatparaméterek hatását a bevonat tulajdonságaira [6]. Tanulmányuk különös hangsúlyt helyezett a Ni-P és Ni-B kompozitokra, alátámasztva azok potenciálját a keménység, a kopásállóság és a korrózióállóság javításában. Reddy Paturi és munkatársai az ideghálózatok alkalmazási lehetőségeit vizsgálták a felületbevonati folyamatok modellezésében és optimalizálásában, beleértve a nikkelalapú rendszereket is [7]. Hangsúlyozták a gépi tanulás jelentőségét a bonyolult folyamat-tulajdonság összefüggések feltárásában, amely hozzájárul a bevonattechnológiák továbbfejlesztéséhez. Az idézett források összességében igazolják a strukturált, statisztikailag megalapozott optimalizálási módszerek tudományos relevanciáját, a Ni-B bevonatok megértésének és teljesítményének fejlesztése érdekében.

* gépészmérnöki alapszakos hallgató, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet

** kutatómérnök, Bay Zoltán Alkalmazotti Kutatási Nonprofit Kft.

*** egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet

A munka tudományos újdonsága a Ni–B bevonatokhoz alkalmazott fürdő- és hőkezelési paraméterek optimalizálására kidolgozott módszertani megközelítésben rejlik. Míg a korábbi kutatások az elektrolit nélküli bevonatok kísérleti jellemzésére összpontosítottak, jelen tanulmány Taguchi-módszert és varianciaanalízist (ANOVA) alkalmaz a folyamatparaméterek tribológiai tulajdonságokra gyakorolt főhatásainak és kölcsönhatásainak értékelésére.

A kutatási célkitűzés megvalósítását támogatandó, a 2. fejezet áttekinti a Ni–P és Ni–B bevonatok jellemzőit befolyásoló fő fürdőparamétereket, továbbá bemutatjuk a hőkezelés várható hatásait a vonatkozó szakirodalom alapján. A 3. fejezet a Taguchi-módszert alkalmazza a kísérletterv összeállítására. A 4. fejezetben az ANOVA-eredmények azt mutatják, hogy a vizsgált tényezők egyike sem hanyagolható el, ami lehetővé teszi a három tényező optimális kísérleti beállításainak meghatározását.

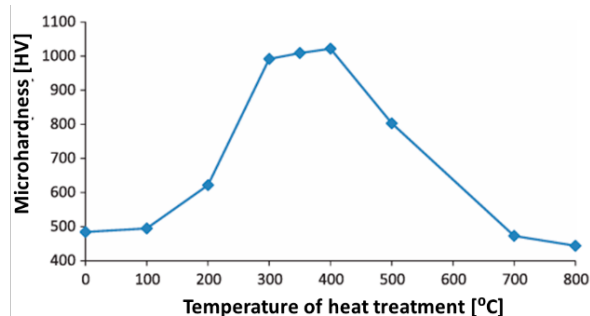
2. A NI–P ÉS NI–B BEVONATOK TULAJDONSÁGAIK BEFOLYÁSOLÓ FÜRDŐPARAMÉTEREK

A szakirodalomban számos tanulmány számol be a bört és foszfort tartalmazó elektrolit nélküli bevonatok tulajdonságairól. A Ni–P és Ni–B bevonatok leválasztását számos tényező befolyásolhatja, ideértve a fürdő összetételét, a pH-értéket és a hőmérsékletet, amelyek mind jelentős hatást gyakorolnak a bevonatok fizikai és mechanikai tulajdonságaira [8]. A stabilizátorok (például a tiokarbamid [9], az ólom-acetát [10] vagy a maleinsav [11]) alkalmazása meghosszabbíthatja a fürdő élettartamát, továbbá befolyásolhatja a leválasztási sebességet és a felületi morfológiát is [12]. A felületaktív anyagok szintén javíthatják a leválasztási feltételeket, növelhetik a leválasztási sebességet, csökkenthetik a bevonat porozitását és fokozhatják a korrózióállóságot [13].

E paraméterek közül a fürdő pH-ja kiemelten fontos, mivel nemcsak a kialakuló mikroszerkezetre van hatással (savas közegben amorf, lúgos közegben kristályos bevonatok képződnek), hanem a bevonat keménységét is befolyásolja [14].

Czagány és munkatársai [15] az egyik legátfogóbb elemzést nyújtják, amely a foszfortartalmú bevonatok tulajdonságait vizsgálja a széles körben alkalmazott W302 melegalakító szerszámacélon. Vizsgálatuk során 6,73–22,2 tömeg% foszfortartalmú bevonatokat választottak le. Az eredmények egyértelműen kimutatták, hogy a bevonatok tulajdonságai jelentős mértékben függenek a foszfortartalomtól. A Ni–B bevonatok esetében a mérési paramétereket hasonló módon tárgyalja Henry [16].

A szakirodalmi adatok szerint a bevonatok tulajdonságait az utólagos hőkezelés is befolyásolhatja. A 300–400 °C hőmérséklet-tartományban végzett hőkezelés növelheti a keménységet az amorf Ni–P ötvözet kristályos nikkellé és kemény nikkell-foszfid fázissá történő átalakulása révén. Amint az 1. ábra mutatja, ez a szerkezeti átalakulás a bevonat keménységét fokozza, ugyanakkor a korrózióállóság csökkenéséhez vezet [17].



1. ábra A hőkezelési hőmérséklet hatása a nikkell–foszfor bevonatok keménységére [18].

A fentiek alapján megállapítható, hogy a fürdőkhöz, a leválasztási folyamathoz és az azt követő hőkezeléshez kapcsolódó számos tulajdonság és paraméter befolyásolhatja a kialakuló Ni–B bevonatok tribológiai viselkedését. Ezek közül célszerű azokra a paraméterekre összpontosítani, amelyek a szakirodalom szerint jelentős hatással vannak a bevonatok tulajdonságaira, és amelyek költséghatékony módon szabályozhatók a különböző típusú bevonatok előállítására érdekében.

Ennek megfelelően az 1. táblázat a bevonatleválasztáshoz alkalmazott rögzített fürdőparamétereket mutatja be, míg a 2. táblázat azokat a paramétereket foglalja össze, amelyek költséghatékonyan változtathatók annak érdekében, hogy lúgos fürdő alkalmazásával eltérő tulajdonságú Ni–B bevonatok legyenek előállíthatók.

1. táblázat Rögzített fürdőparaméterek Ni–B bevonat leválasztásához lúgos fürdőben.

Fürdőparaméterek	Ni–B
NiCl ₂ [g/l]	20
C ₂ H ₈ N ₂ [g/l]	90
NaOH [g/l]	90
NaBH ₄ [g/l]	1.2
Tiokarbamid [g/l]	0,001
pH	>12

2. táblázat Változtatható fürdő- és hőkezelési paraméterek Ni-B bevonat előállításához.

Paraméter	Érték		
Fürdő hőmérséklete [°C]	60	72.5	85
Leválasztási idő [min]	60	80	100
Hőkezelési hőmérséklet [°C]	-	250	350

3. A TAGUCHI-MÓDSZER ALKALMAZÁSA A KÍSÉRLETEK SZÁMÁNAK CSÖKKENTÉSÉRE

A Taguchi-módszert a hagyományos faktoriális kísérletterv fejlesztésére dolgozták ki, amely jelentősen csökkenti a szükséges kísérletek számát. Ortogonális mátrixai lehetővé teszik összetett problémák egyszerűsített vizsgálatát. Ezek a mátrixok előre

definiált kísérletterveket tartalmaznak, amelyek időt és költséget takarítanak meg. A Taguchi-módszer tárgyalásakor fontos tisztázni két alapvető fogalmat: a tényezőt és a szintet. A tényező olyan változó vagy elem, amelyet a kísérlet során vizsgálunk, és amely befolyásolhatja a kimenetet, míg a szint az adott tényező felvehető értékeit jelenti. Például a vízsugaras felületmegmunkálás során a víznyomás tényezőnek tekinthető, a szintek pedig a vizsgált konkrét nyomásértékek [22].

Három tényező és három szint esetén az $L9(3^3)$ ortogonális mátrix alkalmazása indokolt. A bevonatkészítési folyamatparaméterek elemzésére szolgáló $L9(3^3)$ ortogonális mátrix [25] szerkezetét a 3. táblázat mutatja be.

3. táblázat Az $L9(3^3)$ ortogonális mátrix a bevonatkészítési folyamatparaméterek vizsgálatához.

Kísérleti beállítás	Faktor			Súrlódási tényező [-]
	Fürdő hőmérséklete [°C]	Leválasztási idő [min]	Hőkezelési hőmérséklet [°C]	
1	60	60	-	0,53
2	60	80	250	0,53
3	60	100	350	0,57
4	72,5	60	250	0,52
5	72,5	80	350	0,57
6	72,5	100	-	0,51
7	85	60	350	0,56
8	85	80	-	0,51
9	85	100	250	0,48

4. VARIANCIAANALÍZIS ALKALMAZÁSA A FÜRDŐ- ÉS HŐKEZELÉSI PARAMÉTEREK OPTIMALIZÁLÁSÁRA

A módszer a teljes variáciát komponensekre bontja, és azt vizsgálja, hogy a csoportok közötti variancia szignifikánsan nagyobb-e, mint a csoportokon belüli variancia. A varianciaanalízis különösen hasznos olyan kutatásokban, ahol több független változó hatásait kell egyidejűleg elemezni [24].

Az ANOVA-módszer első lépéseként minden tényező alsó, alap- és felső szintjére vonatkozóan kiszámítjuk a kísérleti eredmények összegét az alábbi egyenletek felhasználásával:

$$F_{i,1} = \sum_{k=1}^{k_{max,i,1}} y_{i,1,k}, F_{i,2} = \sum_{k=1}^{k_{max,i,2}} y_{i,2,k}, \quad (1)$$

$$F_{i,3} = \sum_{k=1}^{k_{max,i,3}} y_{i,3,k}, \quad (2)$$

ahol $F_{i,1}$ az i . faktor alsó szintje, $F_{i,2}$ az i . faktor alapszintje, $F_{i,3}$ az i . faktor felső szintje, $y_{i,1,k}$ az i . faktor alsó szintjén végzett kísérlet k . eredménye, $k_{max,i,1}$ az i . tényező alsó szintjén elvégzett különböző kísérletek száma, $y_{i,2,k}$ az i . faktor alapszintjén végzett kísérlet k . eredménye, $k_{max,i,2}$ az i . tényező alapszintjén

elvégzett különböző kísérletek száma, $y_{i,3,k}$ az i . faktor felső szintjén végzett kísérlet k . eredménye, and $k_{max,i,3}$ az i . tényező felső szintjén elvégzett különböző kísérletek száma.

Ezt követően az egyes tényezők átlagos eredményei az adott szinteken a következőképpen határozhatók meg:

$$\bar{F}_{i,1} = \frac{F_{i,1}}{k_{max,i,1}}, \bar{F}_{i,2} = \frac{F_{i,2}}{k_{max,i,2}}, \quad (3)$$

$$\bar{F}_{i,3} = \frac{F_{i,3}}{k_{max,i,3}}, \quad (4)$$

ahol $\bar{F}_{i,1}$ az alsó szinten mért értékek átlaga, $\bar{F}_{i,2}$ az alapszinten mért értékek átlaga, and $\bar{F}_{i,3}$ a felső szinten mért értékek átlaga. Ezt követően az egyes tényezők kísérleti eredményekre gyakorolt hatását az abszolút különbség alapján értékeljük: $|\bar{F}_{i,1} - \bar{F}_{i,3}|$. Amint a 4. táblázat mutatja, a hőkezelési hőmérséklet gyakorolja a legnagyobb hatást a mért súrlódási együtthatóra, mivel $|\bar{F}_{3,1} - \bar{F}_{3,3}| > |\bar{F}_{2,1} - \bar{F}_{2,3}| > |\bar{F}_{1,1} - \bar{F}_{1,3}|$.

Ezt követően meghatározható az egyes tényezők négyzetösszege, majd kiszámítható a hibakomponens négyzetösszege is. Meghatározhatók az egyes tényezők szabadságfokai, valamint kiszámíthatók a hiba

szabadságfokai. Ezek birtokában meghatározhatók a tényezők varianciaértékei, továbbá a hiba varianciája is kiszámítható (lásd 5. táblázat). Ezt követően a tényezők varianciarányadosai meghatározhatók az egyes tényezők és a hiba varianciaértékei alapján.

Kiszámítható a tényezők tiszta négyzetösszege, valamint meghatározhatók a tényezők százalékos hozzájárulásai. A számítások eredményeit a 6. táblázat foglalja össze.

4. táblázat Az egyes tényezők kísérleti eredményekre gyakorolt hatásának elemzése.

Statisztikai tulajdonság		Faktor		
Megnevezés	Jelölés	t_f [°C]	T_l [min]	t_h [°C]
A kísérleti eredmények összege (a tényezők alsó szintjein)	$F_{i,1}$	1,630	1,610	1,550
A kísérleti eredmények összege (a tényezők alapszintjein)	$F_{i,2}$	1,600	1,610	1,530
A kísérleti eredmények összege (a tényezők felső szintjein)	$F_{i,3}$	1,550	1,560	1,700
A kísérleti eredmények átlaga (a tényezők alsó szintjein)	$\bar{F}_{i,1}$	0,543	0,537	0,517
A kísérleti eredmények átlaga (a tényezők alapszintjein)	$\bar{F}_{i,2}$	0,533	0,537	0,510
A kísérleti eredmények átlaga (a tényezők felső szintjein)	$\bar{F}_{i,3}$	0,517	0,520	0,567
Az alsó és felső szinten végzett kísérletek átlaga közötti különbség	$ \bar{F}_{i,1} - \bar{F}_{i,3} $	0,027	0,017	0,050

5. táblázat A tényezők és a hiba négyzetösszegei, szabadságfokai és varianciaértékei.

Statisztikai tulajdonság		Faktor			Hiba
Megnevezés	Jelölés	t_f [°C]	T_l [min]	t_h [°C]	
Az egyes tényezők és a hiba négyzetösszege	S_i, S_e	0,001	0,001	0,006	0,000
Az egyes tényezők és a hiba szabadságfokai	f_i, f_e	2,000	2,000	2,000	2,000
Az egyes tényezők és a hiba varianciaértékei	V_i, V_e	0,001	0,000	0,003	0,000

6. táblázat A varianciarányadosok számított értékei, a tényezők tiszta négyzetösszegei és százalékos hozzájárulásai.

Statisztikai tulajdonság		Faktor		
Megnevezés	Jelölés	t_f [°C]	T_l [min]	t_h [°C]
Az egyes tényezők varianciarányadosa	VA_i	12,25	6,25	64,75
Az egyes tényezők tiszta négyzetösszege	S'_i	0,001	0,000	0,006
Az egyes tényezők százalékos hozzájárulása	P_i	13,35%	6,23%	75,67%

A 6. táblázatból látható, hogy a súrlódási tényező szempontjából a hőkezelési hőmérséklet 75,67%-ban, a fürdő hőmérséklete 13,35%-ban, míg a leválasztási idő 6,23%-ban befolyásolta a súrlódási együttható értékét. Mivel egyik tényező hatása sem hanyagolható el, és figyelembe véve, hogy a súrlódási együtthatóra a „minél kisebb, annál jobb” elv érvényes, az optimális kísérleti beállítások a következők: fürdőhőmérséklet $t_f = 85$ °C, leválasztási idő $T_l = 100$ min, valamint hőkezelési hőmérséklet $t_h = 350$ °C. Az optimálisan kiválasztott kísérleti beállításokhoz tartozó kísérleti eredmény várható értéke meghatározásra került: $y_{opt} = 0,541$, továbbá kiszámításra került a várható érték konfidencia-intervalluma is: $KI = \pm 0,026$. A becült optimális érték konfidencia-intervalluma [0,515; 0,567].

Az eddigi gondolatmenethez hasonlóan elvégezhető más tribológiai jellemzők esetében is az optimális bevonatelőállítási paraméterek optimalizálása.

A mikrokeményiség szempontjából a hőkezelési hőmérséklet 61,5%-ban, a fürdő hőmérséklete 11,57%-ban, míg a leválasztási idő 19,91%-ban befolyásolta a mikrokeményiség értékét. Mivel egyik tényező hatása

sem hanyagolható el, és figyelembe véve, hogy a súrlódási együtthatóra a „minél nagyobb, annál jobb” elv érvényes, az optimális kísérleti beállítások a következők: fürdőhőmérséklet $t_f = 60$ °C, leválasztási idő $T_l = 60$ min, valamint hőkezelési hőmérséklet $t_h = 350$ °C. Az optimálisan kiválasztott kísérleti beállításokhoz tartozó kísérleti eredmény várható értéke meghatározásra került: $y_{opt} = 704,82$, továbbá kiszámításra került a várható érték konfidencia-intervalluma is: $KI = \pm 147,83$. A becült optimális érték konfidencia-intervalluma [556,98; 852,65].

A kopási térfogatveszteség szempontjából a hőkezelési hőmérséklet 49,5%-ban, a fürdő hőmérséklete 18,66%-ban, míg a leválasztási idő 22,09%-ban befolyásolta a mikrokeményiség értékét. Mivel egyik tényező hatása sem hanyagolható el, és figyelembe véve, hogy a kopási térfogatveszteségre a „minél kisebb, annál jobb” elv érvényes, az optimális kísérleti beállítások a következők: fürdőhőmérséklet $t_f = 60$ °C, leválasztási idő $T_l = 80$ min, valamint hőkezelési hőmérséklet $t_h = 250$ °C. Az optimálisan kiválasztott kísérleti beállításokhoz tartozó kísérleti

eredmény várható értéke meghatározásra került: $y_{opt} = 4,56 \cdot 10^7 \mu\text{m}^3$, továbbá kiszámításra került a várható érték konfidencia-intervalluma is: $KI = \pm 1,26 \cdot 10^7 \mu\text{m}^3$. A becült optimális érték konfidencia-intervalluma $[3,29 \cdot 10^7; 5,83 \cdot 10^7]$.

A súrlódási tényező, a mikrokeménység és a kopási térfogatvesztesség szempontjából végzett optimalizálás során a legjobb mért érték kívül esett a konfidenciaintervallumon, aminek több magyarázata is lehet:

- Az ANOVA nem egy-egy konkrét mért értéket „jósol”, hanem a faktorok hatását becsüli meg a teljes adatstruktúrára támaszkodva.
- Az optimális érték, amit az ANOVA-ból kaptunk, modell-alapú átlagolt becslés, tehát az összes kísérleti adat trendjét tükrözi.
- A konfidencia intervallum azt mutatja meg, hogy a valódi átlag milyen tartományban lehet (adott valószínűséggel, pl. 95%). Ez nem jelenti azt, hogy egyedi mérések ne eshetnek ezen kívülre. Egy-egy mérés kisebb (vagy nagyobb) lehet, mint a becült optimum, hiszen minden mérés tartalmaz szórást/zajt.
- Az ANOVA-optimumban szereplő feltételek átlagosan biztosítanak jó (kisebb) súrlódást, de egy mérés soha nem az „átlagot” adja vissza.

A kopásmélység szempontjából a hőkezelési hőmérséklet 59,4%-ban, a fürdő hőmérséklete 7,83%-ban, míg a leválasztási idő 21,96%-ban befolyásolta a kopásmélység értékét. Mivel egyik tényező hatása sem hanyagolható el, és figyelembe véve, hogy a kopásmélységre a „minél kisebb, annál jobb” elv érvényes, az optimális kísérleti beállítások a következők: fürdőhőmérséklet $t_f = 72,5^\circ\text{C}$, leválasztási idő $T_l = 80 \text{ min}$, valamint hőkezelési hőmérséklet $t_h = 250^\circ\text{C}$. Az optimálisan kiválasztott kísérleti beállításokhoz tartozó kísérleti eredmény várható értéke meghatározásra került: $y_{opt} = 12,841 \mu\text{m}$, továbbá kiszámításra került a várható érték konfidencia-intervalluma is: $KI = \pm 4,387 \mu\text{m}$. A becült optimális érték konfidencia-intervalluma $[8,453; 17,228]$, amely tartalmazza a legjobb mért értéket, ami $y_{min} = 9,548 \mu\text{m}$.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás célja az volt, hogy meghatározza azokat a fürdő- és hőkezelési paramétereket, amelyekkel a Ni-B bevonatok kopásállósága és keménysége javítható. A vizsgálatokhoz a szerzők a Taguchi-módszert és varianciaanalízist alkalmazták. Elemezték a fürdő hőmérsékletének, a leválasztási időnek és a hőkezelésnek a hatását. Az eredmények rámutattak, hogy különösen a hőkezelési hőmérséklet döntő szerepet játszik, de a többi tényező sem hagyható figyelmen kívül. A módszer gyakorlati útmutatót ad a

bevonatok előállítási körülményeinek optimalizálásához.

6. SUMMARY

The research focused on identifying the deposition and heat treatment parameters that enhance the hardness and wear resistance of electroless Ni-B coatings. The Taguchi method and analysis of variance (ANOVA) were applied to study the influence of bath temperature, deposition time, and heat treatment conditions. The findings show that heat treatment temperature plays a decisive role, while the other factors also contribute significantly to coating performance. This approach provides practical guidance for optimizing process parameters in the production of durable Ni-B coatings.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS MINISZTERIUM EGYETEMI KUTATÓI ÖSZTÖNDÍJ PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT.



8. IRODALOM

- [1] BÁNYAI K., CZAGÁNY M., KOVÁCS S., BOGNÁR G.: *Characterisation of tribological properties and morphologies of Ni-P and Ni-B coatings*, Lubricants, Vol. 13, 2025, p.168. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040168>
- [2] LI Y., LIU Z., LI Y., LIN J.: *Optimization of Deposition Parameters for Ni-P-WC-BN(H) Composite Coatings via Orthogonal Experimentation and Wear Behavior of the Optimized Coating*, Metals, Vol. 15, 2025, p. 714. <https://doi.org/10.3390/met15070714>
- [3] NIKSEFAT V., MAHBOUBI F.: The Effect of Plasma Nitriding Time on the Tribological and Mechanical Properties of Electroless Nickel-Boron-Reduced Graphene Oxide (Ni-B-rGO) Nano-Composite Coatings. Trans. Indian Inst. Met., Vol. 77, 2024, pp. 2845–2855. <https://doi.org/10.1007/s12666-024-03262-7>
- [4] REDDAH I., GHELANI L., TOUATI S., LEKMINE F., HVIZDOŠ P., DEVESA, S., BOUMEDIRI H.: *Experimental Investigation and Optimization of the Electrodeposition Parameters of Ni-Al₂O₃ Composite Coating Using the Taguchi Method*, Coatings, Vol. 15, 2025, p. 482. <https://doi.org/10.3390/coatings15040482>

- [5] MEI S., ZOU X., HU Z., YANG J., ZHENG Q., HUANG W., GURYEV A., LYGDENOV B.: *Optimization of Ni-B-Mo Electroless Coating on GCr15 Steel: Effects of Main Salt Concentration and Deposition Time* Materials, Vol. 18, 2025, p. 1981. <https://doi.org/10.3390/ma18091981>
- [6] CHINTADA V.B., KOONA R., BAHUBALENDRUNI M.V.A.R.: *State of Art Review on Nickel-Based Electroless Coatings and Materials* J. Bio Tribo-Corros., Vol. 7, 2021, p. 134. <https://doi.org/10.1007/s40735-021-00568-7>
- [7] REDDY PATURI U.M., CHERUKU S., GEEREDDY S.R.: *Process Modeling and Parameter Optimization of Surface Coatings Using Artificial Neural Networks (ANNs): State-of-the-Art Review* Mater. Today Proc., Vol. 38, 2021, pp. 2764–2774. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.695>
- [8] SUDAGAR J., LIAN J., SHA W.: *Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings – A critical review*, J. Alloys Compd., Vol. 571, 2013, pp. 183–204. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.03.107>
- [9] HE Y.D., FU H.F., LI X.G., GAO W.: *Microstructure and properties of mechanical attrition enhanced electroless Ni–P plating on magnesium alloy*, Scr. Mater., Vol. 58, No. 6, 2008, pp. 504–507. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.10.051>
- [10] BALARAJU J.N., SELVI V.E., RAJAM K.S.: *Electrochemical behavior of low phosphorus electroless Ni–P–Si₃N₄ composite coatings*. Mater. Chem. Phys., Vol. 120, No. 2-3, 2010, pp. 546–551. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2009.11.047>
- [11] CHEONG W.J., LUAN B.L., SHOESMITH D.W.: *The effects of stabilizers on the bath stability of electroless Ni deposition and the deposit*, Appl. Surf. Sci., Vol. 229, No. 1-2, 2004, pp. 282–300. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.02.003>
- [12] ELANSEZHIAN R., RAMAMOORTHY B., NAIR P.K.: *Effect of surfactants on the mechanical properties of electroless (Ni–P) coating*, Surf. Coat. Technol., Vol. 203, No. 5-7, 2008, pp. 709–712. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.08.021>
- [13] CHEN B.-H., HONG L., MA Y., KO T.-M.: *Effects of surfactants in an electroless nickel-plating bath on the properties of Ni–P alloy deposits*, Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 41, No. 11, 2002, pp. 2668–2678. <https://doi.org/10.1021/ie0105831>
- [14] CHANG S.-H., CHANG C.-C., LIANG C.: *Electroless Ni–P plating and heat treatments on S45C carbon steel*, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., Vol. 46, 2013, p. 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/46/1/012003>
- [15] CZAGÁNY M., BAUMLI P., KAPTAY GY.: *The influence of the phosphorous content and heat treatment on the nano-micro-structure, thickness and micro-hardness of electroless Ni–P coatings on steel*, Appl. Surf. Sci., Vol. 423 2017, pp. 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.168>
- [16] HENRY J.R.: *Electroless (autocatalytic) plating*, Met. Finish., Vol. 105, No. 10, 2007, pp. 350–360. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(07\)80353-9](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(07)80353-9)
- [17] GUO Z., KEONG K.G., SHA W.: *Crystallisation and phase transformation behaviour of electroless nickel phosphorus platings during continuous heating*, J. Alloys Compd., vol. 358c, No.1-2, 2003, pp. 112–119. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(03\)00069-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(03)00069-0)
- [18] HIGGS C.E.: *The effect of heat treatment on the structure and hardness of an electrolessly deposited nickel-phosphorus alloy*, Electrodeposition Surf. Treat., Vol. 2, No.4, 1974, pp. 315–326. [https://doi.org/10.1016/0300-9416\(74\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0300-9416(74)90007-8)
- [19] MONTGOMERY D.C.: *Design and Analysis of Experiments*, Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2019.
- [20] ANTONY, J. *Design of Experiments for Engineers and Scientists*, Elsevier, 2023.
- [21] HERZOG M.H., FRANCIS G., CLARKE A.: *Understanding Statistics and Experimental Design: How to not lie with Statistics*, Springer Nature, 2019.
- [22] JING X., YANG Q., ZU'AN W., YUANSHEEN Q., QINGFENG X.: *Application of the Taguchi method to areal roughness-based surface topography control by waterjet treatments*, Appl. Surf. Sci. Adv., Vol. 19, 2024, pp. 100548. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100548>
- [23] SOBIH M., ELSEDDIG Z., ALMAZY K., YOUSSEF A., SALLAM M.: *Optimization of EBW Parameters for 2219 AL-alloy Using Grey Relation Method*, Adv. Mater. Res., Vol. 591-593, 2012, pp. 507–514. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.591-593.507>
- [24] MUKERJEE R., JEFF WU, C.F.: *A Modern Theory of Factorial Design*, Springer Series in Statistics. 2006.
- [25] Orthogonal Arrays (Taguchi Designs). Available online: <https://www.york.ac.uk/depts/maths/tables/orthogonal.htm> (accessed on 2 January 2025).