ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

10.22034/ijme.2025.478764.2008

# بررسی تاثیر سدیم دودسیل سولفات بر تغییرات ریزسختی پوشش‌های کامپوزیتی نیکل آلومینا و پوشش‌های نیکلی خالص

**صادق میرزامحمدی*، سید محمد جسمانی، عباس عباسیان**

گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: S-Mirzamohammadi@nus.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

**مقاله پژوهشی**

دریافت: ۲۵ شهریور ۱۴۰۳

پذیرش: ۲۱ دی ۱۴۰۳

**کلیدواژگان:**

نیکل

پوشش کامپوزیتی

آبکاری الکتریکی

سدیم دو دسیل سولفات

ریزسختی

**چکیده**

ساخت پوشش‌های کامپوزیتی کاربردی به وسیله روش آبکاری الکتریکی نیازمند دستیابی به روش‌های مناسب جهت افزایش ریزسختی آن‌ها می‌باشد. بر این اساس، هدف این تحقیق بررسی و مقایسه تاثیر سدیم دودسیل سولفات (SDS) بر آبکاری کامپوزیتی و خواص ریزسختی پوشش‌های کامپوزیتی نیکل آلومینا و پوشش‌های نیکلی خالص قرار داده شد. جهت آبکاری پوشش‌ها از نمونه‌های فولادی استفاده شد. حمام وات به عنوان الکترولیت وان آبکاری تعیین گردید. از ترکیب سدیم دو دسیل سولفات با غلظت‌های مختلف 50mg/l تا 300mg/l به عنوان افزودنی حمام وات استفاده شد. افزایش غلظت SDS در حمام تا 200mg/l سبب افزایش محتوای ذرات از ۱/۸ تا ۵ درصد وزنی شد. ریزسختی پوشش‌های کامپوزیتی زمینه نیکلی و نیکلی خالص به وسیله یک دستگاه ریزسختی سنج ویکرز ارزیابی شد. تغییر غلظت SDS از 50mg/l تا 150mg/l به دلیل افزایش محتوای ذرات تقویت کننده در پوشش، سبب افزایش ریزسختی از 260Hv تا 510Hv شد. افزایش مقدار غلظت SDS از 150mg/l تا 200mg/l علی رغم افزایش محتوای ذرات تقویت کننده در پوشش، سبب کاهش ریزسختی از 510Hv تا 460Hv شد. بدین ترتیب که افزایش SDS از 150mg/l به 200mg/l باعث کاهش ۱۱ درصدی در ریزسختی پوشش نیکلی خالص شد. زیرا، افزایش بیش از حد این افزودنی سبب ایجاد مواد کربن دار و تردی زمینه نیکلی می شود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت، مقدار بهینه غلظت SDS در حمام وات جهت بهبود ریزسختی پوشش‌های کامپوزیتی نیکل آلومینا بین 100mg/l تا 150mg/l می‌باشد.

# Investigating the effect of sodium dodecyl sulfate on microhardness changes of nickel-alumina composite coatings and pure nickel coatings

**Sadegh Mirzamohammadi*, Seyed Mohammad Jesmani, Abbas Abbasian**

Department of Materials and Metallurgical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: S-Mirzamohammadi@nus.ac.ir

**Article Information**

**Original Research Paper**

Received: 15 September 2024

Accepted: 10 January 2025

**Keywords:**

Nickel

Composite Coating

Electroplating

Sodium Dodecyl Sulfate

Microhardness

**Abstract**

Fabrication of practical composite coatings by electroplating method requires obtaining suitable methods to increase their micro hardness. Based on this, the aim of this research was to investigate and compare the effect of sodium dodecyl sulfate (SDS) on composite plating and micro hardness properties of nickel-alumina composite coatings and pure nickel coatings. The Watt bath was determined as the electrolyte of the electroplating bath. The combination of Sodium dodecyl sulfate with different concentrations of 50 mg/l to 300 mg/l was used as an additive for the Watt's bath. Increasing the concentration of SDS in the bath up to 200mg/l caused an increase in the content of particles from 1.8 to 5% by weight. The micro hardness of nickel and pure nickel composite coatings was evaluated by a Vickers micro hardness tester. Changing the concentration of SDS from 50mg/l to 150mg/l due to the increase in the content of reinforcement particles in the coating caused an increase in micro hardness from 260Hv to 510Hv. Increasing the concentration of SDS from 150mg/l to 200mg/l caused a decrease in micro hardness from 510Hv to 460Hv despite the increase in the content of reinforcement particles in the coating. Increasing SDS from 150mg/l to 200mg/l caused an 11% decrease in the micro hardness of the pure nickel coating. Because, excessive increase of this additive causes the formation of carbonaceous materials and embrittlement of the nickel substrate. Based on the obtained results, it can be concluded that the optimal value of SDS concentration in the water bath to improve the micro hardness of nickel-alumina composite coatings is between 100mg/l and 150mg/l.

**برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:**

**Please cite this article using:**

Mirzamohammadi S, Jesmani SM, Abbasian A. Investigating the effect of sodium dodecyl sulfate on microhardness changes of nickel-alumina composite coatings and pure nickel coatings. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Feb 19;11(12):16-24. doi: 10.22034/ijme.2025.478764.2008 [In Persian]

## ۱- مقدمه

از سالیان گذشته، رسوب دهی الکتروشیمیایی فلزات، به دلیل کنترل‌پذیری مناسب، هزینه اندک و دمای کاری پایین فرآیند، به عنوان یکی از روش‌های پرکاربرد و اقتصادی برای مصارف گوناگون مورد توجه بوده است. علاوه بر این تنوع خواص حاصله این روش بر جذابیت‌های آن می‌افزاید [۱]. لایه های کامپوزیتی با فناوری های نوین [۲] و پوشش های کامپوزیتی از جمله مواد کاربردی مورد نیاز صنعت می باشند. در راستای گسترش دستگاه هایی که قطعات آنها نیاز به سختی سطحی بالا دارند [۳]، توسعه و بهبود پوشش های کامپوزیتی یک راهکار مناسب می باشد. یکی از نوآوری‌هایی که منجر به تولید پوشش‌هایی با خواص و کارآیی بسیار مناسب‌تری شده است، پوشش دادن کامپوزیتی و به خصوص پوشش دادن از طریق رسوب الکترولیتی هم زمان زمینه و فاز تقویت کننده است [۴]. در ابتدای استفاده از پوشش‌های ایجاد شده به روش آبکاری الکتریکی، همه پوشش‌ها به صورت یک لایه خالص از یک فلز مثل نیکل، کروم و یا کبالت بودند. اما به گذشت زمان، ترکیب‌ها و حمام‌های آبکاری پیچیده‌تر شدند. به طوری که افزودنی‌های شیمیایی مختلف مثل سرفکتانت‌ها و مواد دیگر کارهای صنعتی را متمایزتر و پیچیده تر کردند [۵]. بعد از گذشت زمانی بیشتر، پوشش‌های کامپوزیتی نیز پا به منصه ظهور گذاشتند و افزوده شدن ذرات تقویت کننده سبب ایجاد پوشش‌های کامپوزیتی شد [۶]. ترکیب خواص فلزی زمینه همچون استحکام، چسبندگی مناسب، انعطاف‌پذیری و چکش‌خواری و غیره با خواص سرامیکی ذرات تقویت‌کننده می‌تواند یک ماده کامپوزیتی بسیار مناسب را تولید کند. هدف از تولید پوشش‌های کامپوزیتی را می‌توان افزایش سختی و مقاومت سایشی، افزایش مقاومت به خوردگی و مقاومت به اکسیداسیون دمای بالا و خود روانکاری دانست [۷].

آبکاری الکترولیتی نیکل خالص عموما از حمام وات، حمام سولفامات، حمام سولفاتی، حمام کلریدی و حمام فلوئوبرات استفاده می‌شود. از بین حمام‌های فوق الذکر حمام وات پرکاربردترین نوع حمام در صنعت است [۸]. در این نوع حمام از سولفات نیکل جهت تامین یون نیکل حمام به صورت غیر مختلط استفاده می‌شود سایر اجزاء حمام عبارتند از کلرید نیکل و اسید بوریک [۹]. کلرید نیکل جهت استفاده از قابلیت یون کلر در شکستن لایه محافظ روی آند نیکلی و بهبود حلالیت آند و افزایش چگالی جریان‌های حدی با شکستن لایه نفوذی در حمام وجود دارد [۱۰]. اسید بوریک برای ثابت نگه داشتن pH حمام در حدود ۴ و در نتیجه کم کردن تمایل به هیدرولیز و کاهش ایجاد نمک‌های بازی به کار می‌رود [۱۱]. به عنوان فاز دوم و تقویت کننده کامپوزیت، ذرات اکسیدی متنوعی همچون $TiO_2$، $ZrO_2$، $ZnO$، $SiO_2$ و $Al_2O_3$ مورد استفاده قرار گرفته اند [۱۲، ۱۳]. هدف از کاربرد همه ذرات مذکور بهبود خواص سطحی پوشش بوده است [۱۴]. از این بین ذرات مذکور، توجه بیشتری به ذرات $Al_2O_3$ بوده است. افزودن $Al_2O_3$ به زمینه نیکلی موجب افزایش سختی، مقاومت سایشی و ضریب اصطکاک پوشش می شود. مطالعات متعددی بر روی رسوب دهی دو مرحله ای ذرات $Al_2O_3$ در زمینه آلیاژی فسفر نیکل انجام گرفته است. مراحل تشکیل کامپوزیت شامل دو مرحله می‌باشد. مرحله اول، رسوب الکتروفورتیک ذرات $Al_2O_3$ و مرحله دوم رسوب الکترولیتی یون‌های نیکل بر روی ذرات. مدفون شدن ذرات در زمینه سبب تشکیل کامپوزیت خواهد شد. این فرآیند به دلیل برقراری پیوندهای تر بین ذرات $Al_2O_3$ و زمینه فلزی خواص مکانیکی و ریزسختی بهتری ایجاد کرده است [۱۵].

جهت بهبود و افزایش میزان رسوب آلومینا درون پوشش‌های زمینه نیکلی از مواد شیمیایی مختلفی استفاده شده است. این مواد شیمیایی به الکترولیت افزوده می شوند و به عنوان افزودنی در حمام آبکاری شناخته می‌شوند [۱۶]. تابحال، از افزودنی‌های مختلفی همچون هگزادسیل پیریدینیوم برماید[1]، ستیل تریمتل آمونیم برمید[2] و سدیم دودسیل سولفات[3] استفاده شده است. این افزودنی‌ها در غلظت بسیار اندک به الکترولیت افزوده می شوند [۱۷، ۱۸]. تحقیقات مختلفی با افزودن SDS به حمام وات انجام شده و نتایج مختلفی به دست آمده است. مقدار ذرات آلومینا که در پوشش وارد شده اند و جزئی از پوشش شده اند بسیار مهم است. در حقیقت مقدار این ذرات که به عنوان ذرات تقویت کننده کامپوزیت می‌باشند بر روی ریزسختی پوشش‌های حاصل بسیار موثر است. برخی از تحقیقات به این نتیجه رسیده اند که با افزودن SDS در حمام وات، مقدار مشارکت نانوذرات آلومینا در زمینه پوشش افزایش و ریزسختی نیز افزایش می‌یابد [۱۷-۱۹]. برخی دیگر نیز به این نتیجه رسیده اند که در برخی از مقادیر غلظتی از SDS که به حمام اضافه شده است،

[1] Hexadecylpyridinium Bromide (HPB)
[2] Cetrimonium Bromide (CTAB)
[3] Sodium Dodecyl Sulfate (SDS)

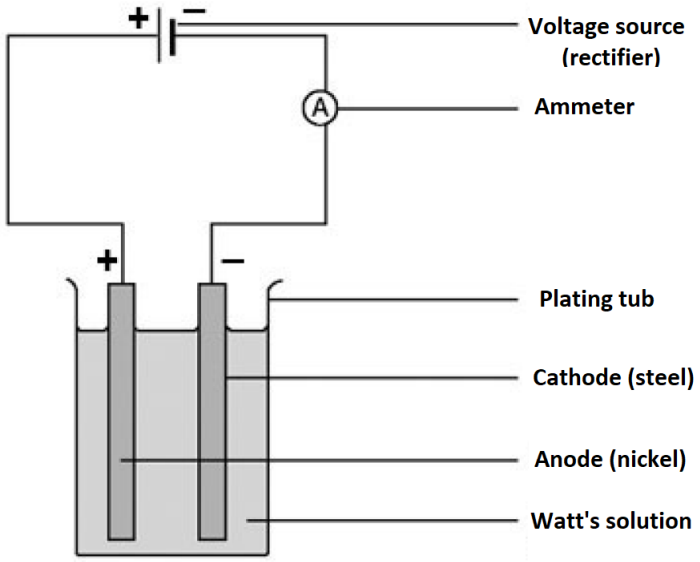
نتیجه عکس حاصل شده است. به عبارت بهتر مقدار نسبتا زیادی از SDS به حمام وات اضافه شده است. اما بعد از فرایند آبکاری الکتریکی مشخص شده است که مقدار ریزسختی کمتری با توجه به مشارکت ذرات آلومینا در پوشش به دست آمده است [۲۰، ۲۱].

با توجه به تحقیقات فوق الذکر، مقدار SDS به واسطه تغییر مقدار ذرات تقویت کننده بر روی ریزسختی پوشش های کامپوزیتی تاثیر می گذارد. علاوه بر این، مقدار SDS بر روی ریزسختی زمینه نیکلی پوشش ها نیز تاثیر گذار است. بنابراین ضروری است که تاثیر مقادیر متفاوت SDS بر روی ریزسختی پوشش های خالص نیکلی نیز بررسی گردد. تابحال، هیچگونه تحقیق جامعی در مورد بررسی توامان تاثیر مقدار SDS بر روی تغییرات ریزسختی حاصل از افزوده شدن آلومینا و تغییرات ریزسختی زمینه خالص نیکلی انجام نشده است. بنابراین هدف این تحقیق، بررسی تاثیر سدیم دودسیل سولفات بر آبکاری کامپوزیتی و خواص ریزسختی پوشش‌های کامپوزیتی نیکل آلومینا و پوشش‌های نیکلی خالص قرار داده شده است.

## ۲– مواد و روش تحقیق

### ۲–۱– آماده سازی پایه فرایند آبکاری

از پایه ای فولادی به عنوان پایه فرایند آبکاری الکتریکی استفاده شد. آلیاژ فولاد مورد نظر از آلیاژ CK45 انتخاب گردید. ترکیب شیمیایی آلیاژ مذکور مطابق با استاندارد بود. شکل اولیه فولاد انتخابی به صورت ورق بود. ورق‌ها به صورت نمونه‌هایی در ابعاد 0.3×4×10 سانتی‌متر بریده شدند. آندهای نیکلی نیز در همین ابعاد تهیه شدند. شماتیک پیل آبکاری در شکل ۱ نشان داده شده است. عملیات ساییدن و پرداخت کاری ابتدایی انجام گرفت. عملیات چربی گیری در ترکیبی برگرفته از استاندارد ASTM B254-92 [۲۲] انجام گرفت. بر طبق استاندارد مذکور اسیدشویی نیز بسیار ضروری بود. در بین هر کدام از مراحل چربی گیری و اسیدشویی عملیات میانی آبکشی با آب مقطر نیز انجام گرفت. نمونه‌ها قبل از ورود به مرحله بعد خشک می‌شدند.




**شکل ۱** شماتیک پیل آبکاری برای آبکاری الکتریکی پوشش‌ها

## ۲–۲– مواد و شرایط آبکاری الکتریکی

محلول پایه آبکاری الکتریکی ورقه‌های فولادی محلول با ترکیب وات بود. پوشش‌های نیکلی خالص با محلول وات خالص ایجاد شدند. اما برای ایجاد پوشش‌های نانوکامپوزیتی به مقدار 5 g/l به آن‌ها نانوذرات آلومینا اضافه شد. همه ترکیبات محلول الکترولیت ثابت هستند و جهت بررسی تاثیر SDS مقدارهای متفاوت از این افزودنی از 50 mg/l تا 300 mg/l به محلول وات افزوده شد. ترکیب حمام وات استفاده شده در آزمایش‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. هر کدام از نمونه های آبکاری با سه بار تکرار تهیه شده اند.

**جدول ۱** ترکیب الکترولیتی حمام وات و غلظت افزودنی شیمیایی و نانوذرات تقویت کننده

| ماده | غلظت (g/l) |
|---|---|
| سولفات نیکل NiSO4.6H2O | 300 |
| کلرید نیکل NiCl2. 6H2O | 50 |
| اسید بوریک H3BO4 | 40 |
| سدیم دودسیل سولفات SDS | 0.05-0.3 |
| نانو ذرات آلومینا $Al_2O_3$ | 5 |

جهت توزیع یکنواخت نانوذرات آلومینا در محلول وات از همزن مگنتیک و اولتراسونیک استفاده شد. در حین فرایند آبکاری نیز جهت ادامه برقراری همگن بودن نانوذرات، فرایند همزدن ادامه یافت. شرایط فیزیکی آبکاری الکتریکی در جدول ۲ ارائه شده است.

**جدول ۲** شرایط فیزیکی آبکاری الکتریکی [۲۳، ۲۴]

| مولفه | دما (C) | اسیدیته (pH) | دانسیته جریان (A/dm2) | سرعت همزدن (rpm) |
|---|---|---|---|---|
| مقدار | 55 | 3.9 | 5 | 100 |

### ۲-۳- بررسی مورفولوژی و آنالیز کمی و ریزسختی پوشش‌ها

ابتدا سطح مقطع نمونه‌ها جهت آنالیز میکروسکوپی نمونه مورد آماده سازی قرار گرفتند. بعد از آماده‌سازی و پوشش دهی طلا روی سطح پوشش‌ها، جهت مشاهده ریزساختار از یک میکروسکوپ الکترونی MIRA 3 مجهز به EDX استفاده شده است. سختی پوشش‌ها با استفاده یک دستگاه ریزسختی سنج ویکرز NOVOTEST TB-MCV-1 با بار ۵۰ گرم به مدت ۱۵ ثانیه اندازه گیری شد.

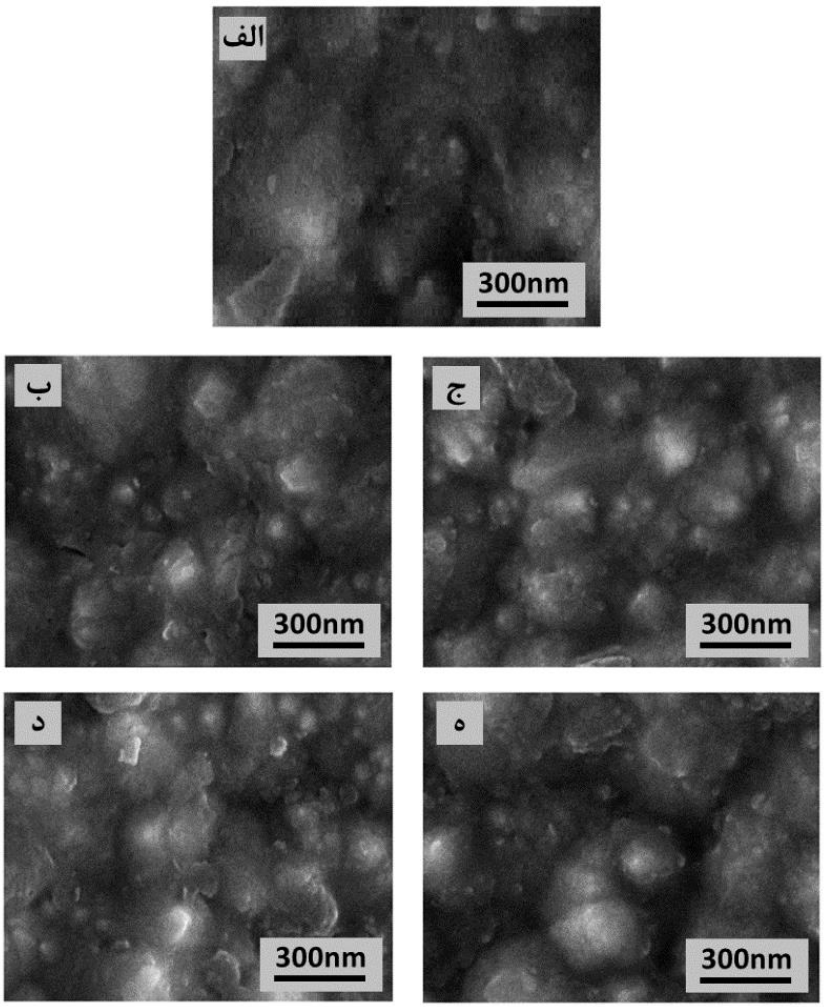
## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- بررسی تاثیر سدیم دودسیل سولفات SDS بر مشارکت ذرات در پوشش‌های کامپوزیتی و مورفولوژی پوشش‌ها

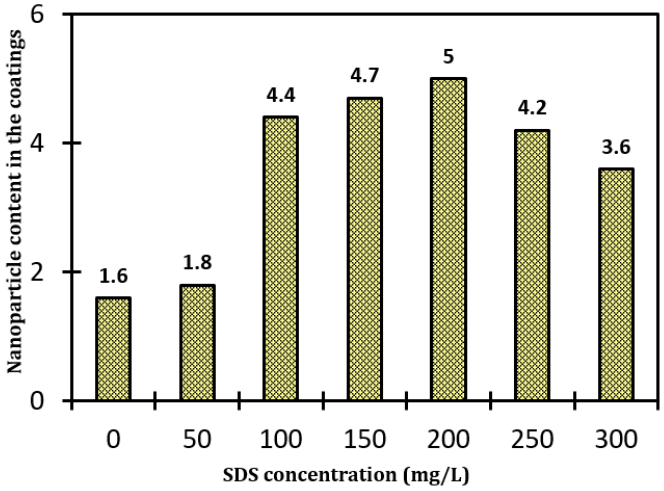
پوشش‌های کامپوزیتی تولید شده در این تحقیق با غلظت‌های مختلف از SDS در حمام آبکاری وات ایجاد شدند. غلظت SDS در ترکیب پایه حمام تغییر کرده است. موفولوژی سطحی پوشش‌های ایجاد شده به وسیله غلظت‌های مختلف از ترکیب SDS در حمام آبکاری در شکل ۲ نشان داده شده است. پوشش نیکل آلومینا تشکیل شده با سرفکتانت مذکور یک ساختار کروی منظم را از خود نشان می‌دهد. این نتیجه نشان می‌دهد که سرفکتانت SDS بر روی منظم شدن دانه بندی سطحی پوشش‌ها تاثیر مثبت گذاشته است. با مشاهده سطحی نمونه پوشش مربوط به غلظت صفر و 50mg/l از SDS این نتیجه حاصل می‌شود که ساختار دانه نسبتا درشت و ناهمگن و خشن است. اما با افزوده شدن SDS و رسیدن غلظت به 100mg/l و 150mg/l ساختار نسبتا و ظاهرا ریزتر و منظم‌تر می‌شود.

شکل ۳ رابطه بین غلظت SDS و مقدار ذرات آلومینا مشارکت کرده در پوشش کامپوزیتی را نشان می‌دهد. توجه به شکل مشخص می‌کند که این رابطه خطی نیست. شکل ۳ نشان می‌دهد که محتوای آلومینا ابتدا افزایش یافته است و سپس کاهش یافته است. بیشترین نتیجه به دست آمده مربوط به پوششی است که با 200mg/l از SDS ایجاد شده است. در این پوشش کامپوزیتی محتوای آلومینای موجود در پوشش به ۵ درصد وزنی رسیده است. در حالیکه پوشش‌های کامپوزیتی ایجاد شده با 50mg/l از SDS منجر به مشارکت ۱،۸ درصد وزنی از ذرات آلومینا شده اند. به عبارت بهتر با افزایش مقدار SDS در حمام آبکاری از 50mg/l تا 200mg/l، مقدار ذرات در پوشش به میزان ۱۷۰ درصد افزایش داشته است. البته بیان این نتیجه دارای اهمیت است که مقدار ذرات در غلظت‌های 100mg/l، 150mg/l و 200mg/l به ترتیب مقدارهای ۴،۴، ۴،۷ و ۵ درصد وزنی آلومینا به دست آمده است و این مقادیر بسیار قابل ملاحظه و نزدیک به هم هستند. با افزایش مقدار SDS به مقادیری بیشتر از 200mg/l مقدار مشارکت ذرات آلومینا کاهش

می‌یابد. این کاهش قابل ملاحظه است. به طوری که با افزایش غلظت SDS از 200mg/l تا 300mg/l، مقدار محتوای ذرات در پوشش از ۵ درصدوزنی به ۳,۶ درصد وزنی کاهش می‌یابد.



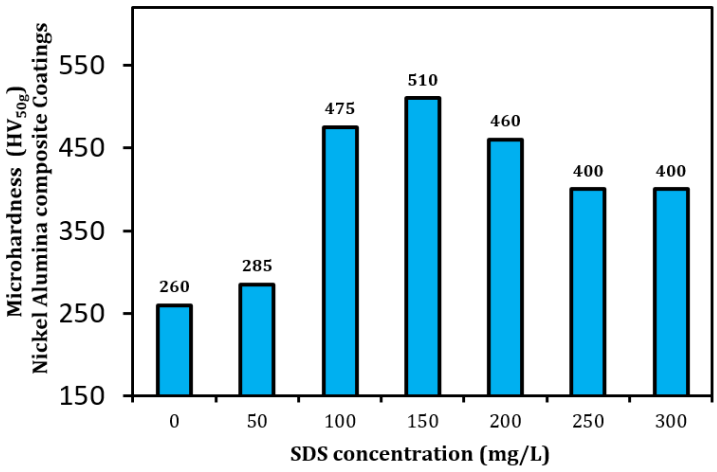

**شکل ۲** مورفولوژی سطحی پوشش‌های کامپوزیتی نیکل آلومینا ایجاد شده در حمام های آبکاری حاوی مقادیر مختلف از SDS شامل الف) صفر، ب) 100mg/1، ج) 150mg/1، د) 200mg/1 و ه) 300mg/1




**شکل ۳** نمودار تاثیر غلظت SDS در حمام الکترولیتی وات بر درصد وزنی مشارکت نانو ذرات آلومینا پوشش‌های کامپوزیتی

### ۳-۲- بررسی تاثیر سدیم دودسیل سولفات SDS بر ریزسختی پوشش‌های کامپوزیتی

ریزسختی پوشش‌های کامپوزیتی ایجاد شده با غلظت‌های مختلف از SDS مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۴ مربوط به نتایج آزمایش‌های ریزسختی می‌باشد. ریزسختی پوشش کامپوزیتی که بدون SDS آبکاری شده است برابر با 260HV به دست آمد. در حالیکه با افزوده شدن 200mg/l از SDS مقدار ریزسختی تا 285HV افزایش می‌یابد. این مقدار افزایش بسیار اندک است. این افزایش کم ریزسختی پوشش به افزایش مشارکت ذرات آلومینا بر می‌گردد. همانطور که در نتایج شکل ۳ نشان داده شده است، مقدار افزایش ذرات مربوط به تغییر غلظت مذکور حدودا از ۱,۶ تا ۱,۸ درصد وزنی است. بنابراین، افزایش بسیار اندک ریزسختی بسیار قابل توجیه است و دلیل آن همان افزایش اندک مقدار نانوذرات است. اما، تغییرات مقدار ریزسختی اندازه گیری شده با افزایش غلظت SDS تا 150mg/l بسیار قابل ملاحظه شد. در این حالت، با افزوده شدن مقدارهای 100mg/l و 150mg/l از SDS ریزسختی پوشش‌ها به‌ترتیب 475HV و 510HV به دست آمد. در حقیقت، افزوده شدن مقدارهای 100mg/l و 150mg/l از SDS سبب افزایش قابل توجه مقدار ذرات آلومینا در پوشش و به دنبال آن افزایش قابل توجه ریزسختی در پوشش می‌شود. در این حالت بیشینه ریزسختی در پوشش‌ها با مقدار 510HV به دست آمد. اما نتیجه بسیار مهمی‌که با توجه به شکل ۴ قابل برداشت است، این است که در غلظت 200mg/l از SDS ریزسختی پوشش کامپوزیتی کاهش می‌یابد. مقدار 460HV برای ریزسختی این پوشش به دست آمد. به عبارت بهتر، علی رغم اینکه با افزوده شدن غلظت SDS از 150mg/l تا 200mg/l، مقدار ذرات پوشش از ۴,۷ تا ۵ درصد وزنی افزایش می‌یابد (شکل ۳)، مقدار ریزسختی پوشش‌ها از 510HV به 460HV کاهش می‌یابد. بنابراین، بررسی دلیل این موضوع که چرا با وجود افزایش ذرات تقویت کننده در پوشش کامپوزیتی، مقدار سختی کاهش یافته است بسیار حائز اهمیت است و در تعیین مقدار بهینه سرفکتانت SDS بسیار حیاتی است. باید به این مسئله توجه نمود که سختی زمینه نیکلی هم می‌تواند بر روی سختی کلی پوشش کامپوزیتی تاثیرگذار باشد و مقدار SDS می‌تواند بر روی سختی پوشش خالص نیکلی تاثیر گذاشته باشد. به همین دلیل بررسی تاثیر غلظت‌های مختلف SDS بر روی ریزسختی پوشش نیکلی خالص بسیار ضروری تشخیص داده شد.

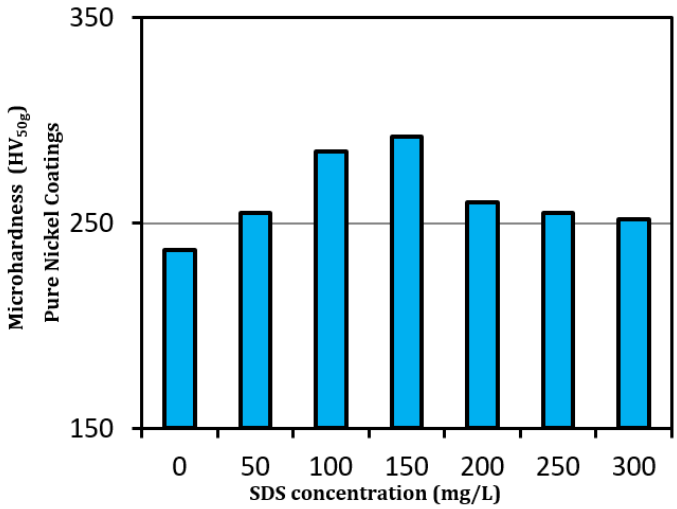



**شکل ۴** نمودار تاثیر غلظت SDS در حمام الکترولیتی وات بر ریزسختی پوشش‌های کامپوزیتی

### ۳-۳- بررسی تاثیر سدیم دودسیل سولفات SDS بر ریزسختی پوشش‌های نیکلی خالص

نمونه‌های پوشش‌های نیکلی خالص با غلظت‌های 50mg/l، 100mg/l و 150mg/l از SDS سختی افزاینده 255HV، 285HV و 292HV را از خود نشان دادند. اما با افزایش غلظت تا 200mg/l و بیشتر، ریزسختی پوشش‌های نیکلی خالص کاهش می‌یابد. با توجه به تحقیقات قبلی [۱۷]، وجود سرفکتانت‌ها در محلول‌های آبکاری سبب می‌شود که حرکت یون‌ها در مجاورت کاتد کند شود و این امر سبب کاهش اندازه دانه‌های کریستالی می‌شود. به نظر می‌رسد که افزوده شدن SDS به حمام وات در این تحقیق نیز سبب شده است که با کاهش حرکت یون‌ها، اندازه دانه‌های کریستالی ریز تر شوند و با همین مکانیزم، سختی پوشش‌ها افزایش یابد. علاوه براین، ریز شدن زمینه منجر به کاهش تغییر شکل پلاستیک و در نتیجه سختی پوشش‌ها می‌گردد. اما، توجه به نتایج گرفته شده در این تحقیق در شکل ۵ نشان می‌دهد که این افزایش یافتن سختی تا یک حد مشخص از غلظت SDS ادامه داشت و بعد از افزوده شدن غلظت SDS

بیشتر از 150mg/l سختی پوشش نیکلی خالص کاهش یافت. این امر به این دلیل است که این افزایش سختی تا یک حد مشخص برای هر یک از سرفکتانت‌ها از جمله SDS ادامه خواهد داشت. بر طبق تحقیق [۲۵] اثبات شده است که این افزودنی‌ها منجر به تولید مواد کربن دار و همچنین گوگرد در داخل زمینه فلزی می‌شوند و علاوه بر ایجاد استحکام دهی محلول جامد، سبب ایجاد تردی بین دانه ای می‌شوند. به نظر می‌رسد که پدیده تردی بین دانه ای سبب کاهش قابل توجه ریزسختی پوشش‌ها با افزودن SDS بیش از 150mg/l شده است. بنابراین با توجه به نتایج گرفته شده در این تحقیق در شکل‌های ۴ و ۵ می‌توان نتیجه گرفت که غلظت بهینه SDS برای پوشش‌های کامپوزیتی نیکل آلومینا از 100mg/l تا 150mg/l می‌باشد.




**شکل ۵** نمودار تاثیر غلظت SDS در حمام الکترولیتی وات بر ریزسختی پوشش‌های نیکلی خالص

## ۴- نتیجه گیری

در این مقاله، رفتار و تغییرات ریزسختی پوشش‌های کامپوزیتی نیکل آلومینا و پوشش‌های نیکلی خالص در اثر اضافه شدن غلظت‌های مختلف از SDS مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس پوشش‌های کامپوزیتی مختلفی با روش آبکاری الکتریکی ایجاد شدند. علاوه بر پوشش‌های کامپوزیتی زمینه نیکلی، پوشش‌های نیکلی خالص نیز ایجاد شدند. غلظت SDS در یک محدوده مشخص در هردو دسته پوشش‌های بالا تغییر داده شد. آزمون‌های ریزسختی متعدد بر روی پوشش‌های ساخته شده مختلف انجام گرفت. بر پایه بررسی‌های تجربی آن‌ها، نتایج زیر به دست آمد.

- محتوای ذرات آلومینا در پوشش‌های کامپوزیتی زمینه نیکلی با افزودن SDS به حمام وات، ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. به نحوی که با افزایش مقدار SDS در حمام آبکاری از 50mg/l تا 200mg/l، مقدار ذرات در پوشش به میزان ۱۷۰ درصد افزایش یافت و از ۱،۸ درصد وزنی به ۵ درصد وزنی رسید.
- ریزسختی پوشش‌های کامپوزیتی با افزودن SDS به طور قابل ملاحظه افزایش یافت. به طوریکه ریزسختی پوشش‌هایی که با 150mg/l از SDS ایجاد شدند حدود 510Hv بود. این مقدار برای پوشش‌هایی که بدون SDS ایجاد شدند، حدود 260Hv بود. این نتیجه نشان داد که اضافه شدن 150mg/l از SDS ریزسختی را نزدیک به ۹۶ درصد افزایش می‌دهد. تحلیل نتایج نشان داد که این افزایش ریزسختی به دلیل افزایش محتوای ذرات در پوشش‌های کامپوزیتی است.
- افزایش مقدار غلظت SDS از 150mg/l تا 200mg/l علی رغم افزایش محتوای ذرات تقویت کننده در پوشش، سبب کاهش ریزسختی از ۵۱۰ تا ۴۶۰ شد.
- بررسی تاثیر غلظت SDS روی ریزسختی پوشش‌های نیکلی خالص نشان داد که افزایش بیش از حد غلظت SDS سبب کاهش ریزسختی می‌شود. به طوری که افزایش SDS از 150mg/l به 200mg/l باعث کاهش ۱۱ درصدی در ریزسختی زمینه نیکلی می‌شود. بنابراین مقدار بهینه غلظت SDS در حمام وات جهت بهبود ریزسختی پوشش‌های کامپوزیتی نیکل آلومینا بین 100mg/l تا 150mg/l تعیین گردید.

## References


[1] Narayanan TS. Nanocoatings to improve the tribocorrosion performance of materials. Corros. Prot. Control Using Nanomater., Elsevier. 2012 Feb 21:167-212. doi: 10.1533/9780857095800.2.167

[2] Zal V, Talebi-Ghadikolaee H, Mirzamohammadi S. Investigating the effect of polyurethane foam filling on the energy absorption of hybrid tubes with different thickness of composite layer. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Apr 20;11(2):58-68. doi: 10.22034/ijme.2024.433178.1893 [In Persian]

[3] Mirzamohammadi S, Shirazi R, Bazhian M. Designing and manufacturing of a heavy equipment rotary table equipped with PLC control. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 May 22;10(3):43-53. doi: 10.22034/ijme.2023.419585.1851 [In Persian]

[4] Benelmekki M, Erbe A. Nanostructured thin films–background, preparation and relation to the technological revolution of the 21st century. InFrontiers of Nanoscience 2019 Jan 1 (Vol. 14, pp. 1-34). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-08-102572-7.00001-5

[5] Mirzamohammadi S, Khorsand H, Aliofkhazraei M. Effect of different organic solvents on electrodeposition and wear behavior of Ni-alumina nanocomposite coatings. Surface and Coatings Technology. 2017 Mar 15;313:202-13. doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.01.025

[6] Liu H, Wang H, Guo X. Effect of Electrodeposition Method on the Abrasion Resistance of Ni-SiC Composite Nanocoatings. Journal of Materials Engineering and Performance. 2024 Mar;33(6):2853-9. doi: 10.1007/s11665-023-08204-w

[7] Mirzamohammadi S, Khorsand H, Aliofkhazraei M, Shtansky DV. Effect of carbamide concentration on electrodeposition and tribological properties of $Al_2O_3$ nanoparticle reinforced nickel nanocomposite coatings. Tribology International. 2018 Jan 1;117:68-77. doi: 10.1016/j.triboint.2017.08.003

[8] Moats MS, Davenport WG. Nickel and Cobalt. InTreatise on Process Metallurgy 2024 Jan 1 (pp. 575-604). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-323-85373-6.00030-2

[9] Mirzamohammadi S, Kh. Aliov M, Aghdam AS, Velashjerdi M, Reza Naimi-Jamal M. Tribological properties of tertiary $Al_2O_3$/CNT/nanodiamond pulsed electrodeposited Ni–W nanocomposite. Materials Science and Technology. 2011 Feb;27(2):546-50. doi: 10.1179/026708309X12526555493314

[10] Haghighi NE, Hadianfard MJ. Exploring the potential of nickel-chloride bath for electroforming of pure nickel and nickel composites. Materials Chemistry and Physics. 2024 Feb 1;313:128734. doi: 10.1016/j.matchemphys.2023.128734

[11] Fukunaga A, Ueda S. Pulse electrodeposition of Ni–P alloy coatings from Watts baths: P content, current efficiency, and internal stress. Electrochimica Acta. 2024 Oct 20;502:144839. doi: 10.1016/j.electacta.2024.144839

[12] Mirzamohammadi S, Aliov MK, Sabur AR, Hassanzadeh-Tabrizi A. Study of wear resistance and nanostructure of tertiary $Al_2O_3/Y_2O_3$/CNT pulsed electrodeposited ni-based nanocomposite. Materials Science. 2010 Sep;46:76-86. doi: 10.1007/s11003-010-9266-4

[13] Zhao G, Zhao M, Zhang W. Preparation of Ni-$TiO_2$ Composite Coatings on Q390E Steel by Pulse Electrodeposition and their Photocatalytic and Corrosion Resistance Properties. International Journal of Electrochemical Science. 2022 Aug 1;17(8):220819. doi: 10.20964/2022.08.18

[14] Ren A, Kang M, Fu X. Tribological behaviour of Ni/WC–$MoS_2$ composite coatings prepared by jet electrodeposition with different nano-MoS2 doping concentrations. Engineering Failure Analysis. 2023 Jan 1;143:106934. doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106934

[15] Karthik R, Mani R, Manikandan P. Tribological studies of Ni-SiC and Ni-$Al_2O_3$ composite coatings by pulsed electrodeposition. Materials Today: Proceedings. 2021 Jan 1;37:701-6. doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.717

[16] Mirzamohammadi S, Kiarasi R, Aliov MK, Sabur AR, Shahrabi T. Relation study of different properties for tertiary pulsed electrodeposited Ni-based nanocomposite with $Al_2O_3/Y_2O_3$/CNT nanopowders. Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2011 Jul;50:173-81. doi: 10.1007/s11106-011-9315-z

[17] Jiang SW, Yang L, Pang JN, Lin H, Wang ZQ. Electrodeposition of Ni-$Al_2O_3$ composite coatings with combined addition of SDS and HPB surfactants. Surface and Coatings Technology. 2016 Jan 25;286:197-205. doi: 10.1016/j.surfcoat.2015.12.028

[18] Wang Z, Wang H, Pei D, Wan S, Fan Z, Yu M, Lu H. Refinement of structural characteristics and supercapacitor performance of MnO2 nanosheets via CTAB-assisted electrodeposition. Progress in Natural Science: Materials International. 2023 Dec 1;33(6):881-90. doi: 10.1016/j.pnsc.2023.12.013

[19] Chen Y, Hao Y, Huang W, Ji Y, Yang W, Yin X, Liu Y, Ling X. Corrosion behavior of Ni-P-nano-Al2O3 composite coating in the presence of anionic and cationic surfactants. Surface and Coatings Technology. 2017 Jan 25;310:122-8. doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.12.089

[20] Kumar N, Kishore K, Yadav S, Sharma P. Characterisation of Ni-$Al_2O_3$ composite coatings at different $Al_2O_3$ concentrations. Materials Today: Proceedings. 2024 Jun 10. doi: 10.1016/j.matpr.2024.06.001

[21] Mirzamohammadi S, Kiarasi R, Aliov MK, Sabur AR, Hassanzadeh-Tabrizi A. Study of corrosion resistance and nanostructure for tertiary $Al_2O_3/Y_2O_3$/CNT pulsed electrodeposited Ni based nanocomposite. Transactions of the IMF. 2010 Mar 1;88(2):93-9. doi: 10.1179/174591910X12646052777817
[22] Standard Practice for Preparation of and Electroplating on Stainless Steel. ASTM B254-92(2020)e1. Book of Standards Volume: 02.05. 2020:1-6. doi: 10.1520/B0254-92R20E01
[23] Mirzamohammadi S, Velashjerdi M, Anbarzadeh A. Effect of Formaldehyde on Pulsed Electro-Plated Nickel-Alumina Nanocomposite Coatings. Journal of Environmental Friendly Materials. 2021 Dec 1;5(2):11-5. doi: 20.1001.1.25383620.2021.5.2.2.8
[24] Mirzamohammadi S, Hashemi J, Zal V. Modification of nanoparticle absorption using Sodium dodecyl sulfate addition in composite plating bath. Journal of Engineering and Applied Research. 2024 Oct 1;1(2):91-100. doi: 10.48301/jear.2024.459185.1028
[25] Bund A, Thiemig D. Influence of bath composition and pH on the electrocodeposition of alumina nanoparticles and nickel. Surface and Coatings Technology. 2007 May 21;201(16-17):7092-9. doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.01.010