

روش طراحی آزمایش به منظور بهینه‌سازی سختی پوشش‌های آندایزینگ آلومینیوم

ایمان محمدی^۱، مزدک ایزدی^۲، محمد فاروقی^۱، عبدالله افشار^{*۱}

^۱دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی و علم مواد، تهران، ایران.

^۲دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، تهران، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۴/۱۱/۱۷، تاریخ دریافت نسخه اصلاح‌شده: ۱۳۹۶/۰۱/۰۴، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۶/۱۲/۱۵

چکیده در این پژوهش هدف این است که سختی پوشش آندایزینگ آلومینیوم به کمک روش طراحی آزمایش بهینه شود. متغیرهای متفاوتی بر سختی این پوشش مؤثر می‌باشند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به زمان، دما و متغیرهای مربوط به جریان پالسی (دانسیته جریان حداکثر و حداقل، فرکانس و چرخه کاری) اشاره کرد. در این راستا متغیرهای مذکور در سطوح مختلف به‌عنوان ورودی فرآیند طراحی آزمایش در نظر گرفته شد. هم‌چنین اثر این متغیرها بر سختی پوشش آندایزینگ آلومینیوم به صورت یک مدل ریاضی به‌عنوان خروجی به دست آمد. برای رسیدن به مدل نهایی از روش آنالیز تغییرات به منظور دست‌یابی به بهترین روش برای رسیدن به حداکثر سختی پوشش استفاده شد. با استفاده از این مدل ریاضی علاوه بر این که امکان تعیین مؤثرترین متغیرها وجود دارد، می‌توان بهینه مقدار سختی را نیز به‌عنوان خروجی فرآیند به دست آورد. نتایج نشان داد که دما و مربع چرخه کاری مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار بر سختی این پوشش‌ها هستند. هم‌چنین پوششی با سختی ۴۹۱ Hv در شرایط کاری دمای ۳/۱۳ °C، زمان ۲۹/۵۰ min، چرخه کاری ۶۵/۱۶ درصد، فرکانس ۱۴۶/۹۴ Hz، جریان حداکثر ۴/۰۹ A/dm² و حداقل ۱/۲۳ A/dm² ایجاد شد.

کلمات کلیدی: آندایزینگ، جریان پالسی، سختی، طراحی آزمایش.

Design Experiment Methods for Optimization of Aluminum Anodize Coating Hardness

Iman Mohammadi¹, Mazdak Izadi², Mohammad Farooghi¹, Abdollah Afshar^{*1}

¹Sharif University of Technology, Department of Materials Science and Engineering, Tehran, Iran.

²Tariyat Modares University, Faculty of Engineering, Tehran, Iran.

Abstract The aim of this work is to optimize the hardness of anodizing aluminum coating by design of experimental method. Various parameters affect the hardness of these coatings among which time, temperature and pulse current parameters (current density limit, frequency and duty cycle) were considered. According to this, mentioned parameters in different levels were considered as input variables. Also, the effect of parameters on the hardness of anodizing aluminum coating was obtained as a mathematical model. The final model was achieved by Analysis of variance which was used for attaining the best method to predict the maximum hardness of these coatings. The most effective variables and optimized hardness of anodizing aluminum coating were obtained by using the mathematical model. Experimental results showed that temperature and quadratic behavior of duty cycle were the most important terms on the hardness of these coatings. Furthermore, the maximum hardness of this coating was 491Hv, which was attained at the maximum and minimum current densities of 4.09, 1.23 A/dm², frequency of 146.94 Hz, time of 29.50 min, duty cycle of 65.16% and the bath temperature of 3.13°C.

Keywords: anodizing, pulse current, hardness, design of experimental.

۱- مقدمه

هنگامی که آلومینیوم در معرض اتمسفر قرار می‌گیرد یک لایه اکسید چسبنده و محافظ بر روی آن ایجاد می‌شود که با وجود نازک بودن، مقاومت به خوردگی و سختی سطحی آنرا افزایش می‌دهد. این لایه را می‌توان توسط آندایزینگ ضخیم‌تر نمود. سازوکار کلی عمل بدین صورت است که جریان مستقیم برق از مایع الکترولیت مناسبی می‌گذرد که در آن آلومینیوم آند بوده و فلز مناسب دیگری کاتد می‌باشد. در این صورت بر سطح آلومینیوم لایه نازکی از اکسید ایجاد می‌شود که ضخامت آن به عوامل گوناگونی بستگی دارد [۱-۳]. البته در جریان‌های متناوب نیز لایه اکسیدی تشکیل می‌شود اما بسیار نرم و الاستیک بوده و در جریان‌های مستقیم دارای ضخامت و سختی بیشتری می‌باشد [۲].

در اصل دانسیته جریان اعمالی در آندایزینگ آلیاژهای آلومینیومی تأثیر به‌سزایی دارد و می‌تواند نرخ رشد، چگالی لایه آندی و میزان تخلخل و خواص فیلم آندی را تحت تأثیر قرار دهد [۴-۵]. در اصل در دانسیته جریان‌های پایین نرخ رشد لایه آندی پایین بوده و باعث تشکیل یک لایه نرم، متخلخل و نازک می‌شود و به لایه‌ای که ایجاد می‌شود آندایزینگ نرم گفته می‌شود. البته در دانسیته جریان خیلی زیاد نیز پدیده‌ی سوختن لایه‌ی آندی اتفاق افتاده و سختی پوشش آندایزینگ کاهش می‌یابد. از طرفی ضخامت لایه‌ی آندی هر چند در جریان‌های مستقیم ضخامت بالاتری نسبت به جریان پالسی دارد اما سختی آن در زمان‌های بالاتر به دلیل گرمای ایجاد شده در سطح آند کاهش محسوس می‌یابد [۶-۷]. تحقیقات انجام شده بر روی آندایزینگ پالسی نمونه‌ها نشان می‌دهد که لایه ایجاد شده به روش آندایزینگ پالسی می‌تواند ترکیبی از آندایزینگ سخت و آندایزینگ نرم باشد بنابراین می‌توان گفت که استفاده از جریان‌های پالسی تنها راهی است که می‌تواند ترکیبی از آندایزینگ سخت و نرم را ایجاد کند که این اتفاق می‌تواند باعث بهبود خواص مکانیکی لایه ایجاد شده به این روش باشد [۸-۱۰].

از طرفی جریان‌های مستقیم به دلیل این‌که در طی فرآیند آندایزینگ، دانسیته بالایی از حباب‌های گاز روی کاتد و قطعه تحت عملیات آندایزینگ می‌شود که با افزایش حجم

گازها به علت انتقال حرارت ضعیفی که این گازها دارند سطح قطعه بیش از حد گرم شده و باعث ایجاد حفره، ترک، عیوب سطحی و زیرسطحی و تغییر شکل ماکروسکوپی فیلم آندی می‌شود. همچنین وجود این گازها از رسیدن الکترولیت به فصل مشترک پوشش/ زیرلایه جلوگیری کرده و در ادامه سرعت آندایزینگ کاهش و ولتاژ لازم افزایش می‌یابد بنابراین در این پژوهش از جریان‌های پالسی استفاده شد [۱۰-۱۲].

برای بهینه‌سازی متغیرهای مؤثر بر سختی پوشش‌های آندایزینگ آلومینیوم روش‌های مرسوم و سنتی تغییر یک متغیر در زمان می‌باشد. اگرچه این روش‌ها محدودیت‌هایی دارند که کاربرد آن‌ها را با ملاحظات مواجه کرده است. در این روش‌ها با تغییر یک متغیر و ثابت قرار دادن سایر متغیرها نمی‌توان تأثیر متقابل هر کدام از متغیرها بر یکدیگر را در نظر گرفت، از طرف دیگر تعداد آزمایش‌هایی که در این روش‌ها زیاد است. لذا در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های گوناگونی به منظور بهینه‌سازی متغیرها مورد استفاده قرار گرفته است که از این جمله می‌توان به طرح‌های عاملی، طرح ترکیب مرکزی و روش تاکوچی اشاره کرد [۱۳-۱۴]. طراحی آزمایش (DOE) یکی از معروف‌ترین روش‌ها به منظور بهینه‌سازی متغیرها بوده و در پژوهش‌های زیادی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۵-۱۶]. در حقیقت طراحی آزمایش‌ها DOE یکی از قوی‌ترین روش‌های بهبود کیفیت و افزایش بهره‌وری است. در این شیوه از طریق انجام برخی آزمایش‌ها، آگاهانه تغییراتی در فرآیند یا سیستم اعمال می‌شود تا تأثیر آن‌ها در ویژگی‌های عملکردی یا پاسخ فرآیند یا سیستم به آن‌ها، مورد بررسی قرار گیرد. تاکنون پژوهش قابل‌توجهی در زمینه‌ی استفاده از روش طراحی آزمایش جهت بهینه‌سازی سختی پوشش آندایزینگ آلومینیوم انجام و گزارش نشده است. لازم به ذکر است که مطالعه‌ی فرآیندهای پالسی به‌عنوان روشی نوین در ایجاد پوشش‌های آندایزینگ آلومینیوم با استفاده از مدل‌سازی ریاضی اهمیت به‌سزایی دارد. بر این اساس با توجه به لزوم بهینه‌سازی پوشش مذکور در روش پالسی و اهمیت آن، در این پژوهش از روش سطح پاسخ براساس طرح ترکیب مرکزی به منظور بهینه‌سازی سختی پوشش‌های آندایزینگ آلومینیوم در الکترولیت اسید سولفوریک/ اگزالیک مورد استفاده قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

جدول ۱. ترکیب الکترولیت جهت آندایزینگ نمونه‌ها [۱۷].

مقدار	ترکیب
۲۰۰ g/L	H ₂ SO ₄
۲۰ g/L	H ₂ C ₂ O ₄
۱۰ g/L	C ₇ H ₆ O ₆ S.2H ₂ O
۱۰ ml/L	C ₃ H ₈ O
۳ g/L	Al ₂ (SO ₄) ₃

در این پژوهش برای مطالعه پوشش آندایزینگ از ورق آلومینیوم آلیاژی گروه ۱۰۵۰ استفاده شد. به منظور آماده‌سازی زیرلایه آلومینیومی جهت فرآیند آندایزینگ نمونه‌ها در ابعاد $20 \times 30 \times 1 \text{ mm}^3$ بریده و در ادامه به دلیل حساسیت سطح به زیرلایه توسط کاغذ سمباده ۸۰۰ و ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ پولیش شد و پس از عملیات الکتروپولیش در محلول (۴:۱) اسید پرکلریدریک و اتانول در دمای اتاق و ولتاژ ۲۰ V و زمان‌های ۳۰ ثانیه تحت عملیات الکتروپولیش قرار گرفتند.

ترکیب شیمیایی حمام مورد استفاده برای آندایزینگ مطابق جدول ۱ می‌باشد لازم به ذکر است که این ترکیب طی مطالعات انجام شده و بهینه‌سازی متغیرهای آن در منابع مطالعه شده در حمام اسید سولفوریک - اسید اگزالیک بهترین حمام جهت آندایزینگ آلومینیوم معرفی شد [۱۷]. لذا متغیرهای حمام در تحقیق انجام شده ثابت در نظر گرفته شد.

برای بررسی سختی پوشش‌ها از روش میکروسختی سنجی ویکرز طبق استاندارد ASTM B578 استفاده شد. به دلیل نازک بودن پوشش‌ها نیروی اعمالی ۲۵ گرم انتخاب شد. از هر نمونه پنج سختی از نقاط مختلف گرفته شد و بعد از خواندن عدد سختی از جدول مربوط، میانگین پنج سختی به دست آمده برای هر نمونه به عنوان عدد سختی گزارش شد.

جدول ۲. متغیرهای تاثیرگذار بر سختی پوشش آندایزینگ آلومینیوم و تغییرات آن‌ها.

متغیر	دانشیته جریان حداکثر (A/dm ²)	دانشیته جریان حدادقل (A/dm ²)	زمان (min)	دما (°C)	فرکانس (Hz)	چرخه کاری (%)
تغییرات	۳-۷	۰-۳	۱۰-۶۰	۳۰-(-۱۰)	۲/۵-۴۰۰	۳۰-۹۵

مدل‌های متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر F برای سه مدل 2FI, linear و quadratic برابر می‌باشد اما مدل quadratic به دلیل مقدار کمتر P برای پیش‌بینی سختی پوشش آندایزینگ آلومینیوم انتخاب شد. برای بررسی اثر متغیرها روی سختی پوشش آندایزینگ آلومینیومی آنالیز داده‌های حاصل از نرم‌افزار طراحی آزمایش به وسیله معادلات رگرسیون حاصل از واریانس (ANOVA) انجام گرفت. نتایج حاصل از این معادلات دقت ۸۲,۶۳ درصدی نتایج حاصل از نرم‌افزار را نشان داد و معادله‌ی ۱ را برای سختی پوشش‌های

جدول ۳، ۳۳ آزمایش طراحی شده به منظور یافتن بهینه متغیرهای مؤثر بر روی سختی پوشش‌های آندایزینگ آلومینیوم را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پنج آزمایش تکراری به منظور حذف خطا سیستم در داده‌های مرکزی مشاهده می‌شود. به منظور پیش‌بینی بهترین مدل برای پیش‌بینی سختی پوشش‌های آندایزینگ آزمون فیشر (F - value) و درصد مشارکت داده‌ها (P-value) مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین مدلی انتخاب شد که دارای کمترین مقدار P و مقدار بهینه F بود. جدول ۴ نتایج حاصل از آنالیز ANOVA را برای

$$\text{Hardness (HV)} = 524.74 - 13.18A - 14.02B + 67.09C - 57.50D - 69.18E - 18.78F - 42.5A \times B - 2.38A \times E - 29.63A \times F - 7.8B \times E - 13C \times E - 7.75E \times F - 17.75A^2 - 80.61C^2 - 46.73E^2 \quad (1) \text{ معادله}$$

آندایزینگ آلومینیوم پیش‌بینی کرد که در این رابطه A دانسیته جریان حداکثر، B دانسیته جریان حداقل، C چرخه کاری، D فرکانس، E دما و F زمان آندایزینگ نمونه‌ها می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

جدول ۳. طراحی آزمایش متغیرها برای بهینه‌سازی سختی پوشش‌های آندایزینگ آلومینیوم.

چرخه‌ی کاری (%)	فرکانس (Hz)	دما (°C)	زمان (min)	دانسیته جریان حداقل (A/dm ²)	دانسیته جریان حداکثر (A/dm ²)	Run	std
۸۱/۴۶	۳۲۸/۲۴	-۲/۷۸	۱۹/۰۳	۲/۴۶	۶/۲۸	۲۰	۱
۸۱/۴۶	۷۴/۲۶	۲۲/۷۸	۱۹/۰۳	۲/۴۶	۶/۲۸	۲۸	۲
۳۳/۵۴	۳۲۸/۲۴	-۲/۷۸	۵۰/۹۷	۲/۴۶	۶/۲۸	۸	۳
۸۱/۴۶	۷۴/۲۶	۲۲/۷۸	۵۰/۹۷	۰/۵۴	۶/۲۸	۲۵	۴
۳۳/۵۴	۳۲۸/۲۴	۲۲/۷۸	۵۰/۹۷	۲/۴۶	۳/۷۲	۲۳	۵
۸۱/۴۶	۳۲۸/۲۴	-۲/۷۸	۵۰/۹۷	۰/۵۴	۶/۲۸	۲	۶
۸۱/۴۶	۷۴/۲۶	-۲/۷۸	۱۹/۰۳	۲/۴۶	۳/۷۲	۲۹	۷
۳۳/۵۴	۷۴/۲۶	۲۲/۷۸	۵۰/۹۷	۲/۴۶	۶/۲۸	۲۴	۸
۳۳/۵۴	۳۲۸/۲۴	-۲/۷۸	۱۹/۰۳	۰/۵۴	۶/۲۸	۲۶	۹
۸۱/۴۶	۷۴/۲۶	-۲/۷۸	۵۰/۹۷	۰/۵۴	۳/۷۲	۱۱	۱۰
۳۳/۵۴	۷۴/۲۶	-۲/۷۸	۵۰/۹۷	۲/۴۶	۳/۷۲	۱۶	۱۱
۳۳/۵۴	۷۴/۲۶	۲۲/۷۸	۱۹/۰۳	۰/۵۴	۶/۲۸	۱۴	۱۲
۳۳/۵۴	۳۲۸/۲۴	۲۲/۷۸	۱۹/۰۳	۰/۵۴	۳/۷۲	۹	۱۳
۸۱/۴۶	۳۲۸/۲۴	۲۲/۷۸	۵۰/۹۷	۰/۵۴	۳/۷۲	۱	۱۴
۸۱/۴۶	۳۲۸/۲۴	۲۲/۷۸	۱۹/۰۳	۲/۴۶	۳/۷۲	۷	۱۵
۳۳/۵۴	۷۴/۲۶	-۲/۷۸	۱۹/۰۳	۰/۵۴	۳/۷۲	۱۰	۱۶
۵۷/۵۰	۲۰۱/۲۵	۱۰/۰۰	۳۵/۰۰	۱/۵۰	۳/۰۰	۱۸	۱۷
۵۷/۵۰	۲۰۱/۲۵	۱۰/۰۰	۳۵/۰۰	۱/۵۰	۷/۰۰	۴	۱۸
۵۷/۵۰	۲۰۱/۲۵	۱۰/۰۰	۳۵/۰۰	۰/۰۰	۵/۰۰	۳۰	۱۹
۵۷/۵۰	۲۰۱/۲۵	۱۰/۰۰	۳۵/۰۰	۳/۰۰	۵/۰۰	۲۲	۲۰
۲۰/۰۰	۲۰۱/۲۵	۱۰/۰۰	۳۵/۰۰	۱/۵۰	۵/۰۰	۲۷	۲۱
۹۵/۰۰	۲۰۱/۲۵	۱۰/۰۰	۳۵/۰۰	۱/۵۰	۵/۰۰	۳۲	۲۲
۵۷/۵۰	۲/۵۰	۱۰/۰۰	۳۵/۰۰	۱/۵۰	۵/۰۰	۱۲	۲۳
۵۷/۵۰	۴۰۰/۰۰	۱۰/۰۰	۳۵/۰۰	۱/۵۰	۵/۰۰	۵	۲۴
۵۷/۵۰	۲۰۱/۲۵	-۱۰/۰۰	۳۵/۰۰	۱/۵۰	۵/۰۰	۱۳	۲۵
۵۷/۵۰	۲۰۱/۲۵	۳۰/۰۰	۳۵/۰۰	۱/۵۰	۵/۰۰	۳	۲۶
۵۷/۵۰	۲۰۱/۲۵	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	۱/۵۰	۵/۰۰	۳۳	۲۷
۵۷/۵۰	۲۰۱/۲۵	۱۰/۰۰	۶۰/۰۰	۱/۵۰	۵/۰۰	۶	۲۸
۵۷/۵۰	۲۰۱/۲۵	۱۰/۰۰	۳۵/۰۰	۱/۵۰	۵/۰۰	۳۱	۲۹
۵۷/۵۰	۲۰۱/۲۵	۱۰/۰۰	۳۵/۰۰	۱/۵۰	۵/۰۰	۱۷	۳۰
۵۷/۵۰	۲۰۱/۲۵	۱۰/۰۰	۳۵/۰۰	۱/۵۰	۵/۰۰	۱۵	۳۱
۵۷/۵۰	۲۰۱/۲۵	۱۰/۰۰	۳۵/۰۰	۱/۵۰	۵/۰۰	۱۹	۳۲
۵۷/۵۰	۲۰۱/۲۵	۱۰/۰۰	۳۵/۰۰	۱/۵۰	۵/۰۰	۲۱	۳۳

جدول ۴. نتایج آنالیز ANOVA مدل‌های متفاوت برای بهینه‌سازی متغیرهای موثر بر سختی پوشش آندایزینگ آلومینیوم.

P Value	F Value	Mean square	DF	Sum of squares	Source
۰,۰۰۰۱<	۳۶,۱۸	۱۵۹۳۷,۳۲	۷۰	+۶E۱,۱۱۶	Linear
۰,۰۰۰۱<	۳۷,۰۹	۱۶۳۳۷,۲۴	۵۵	+۵E۸,۹۸۵	2FI
۰,۰۰۰۱<	۱۹,۳۹	۸۵۲۸,۹۶	۴۹	+۵E۴,۱۷۹	Quadratic
۰,۰۰۱	۹,۴۷	۴۱۷۲,۱۹	۱۳	۵۴۲۳۸,۴۹	Cubic
		۴۴۰,۴۴	۹	۳۹۶۴,۰۰	Pure error

آندایز می‌شود کاهش می‌یابد و از آنجا که متغیر جریان در سختی چنین پوشش‌هایی مهم می‌باشد بنابراین با کاهش جریان مطابق آنچه که در مقدمه ذکر شد پوشش ایجاد شده نرم بوده و سختی لازم را ندارد و هنگامی که چرخه کاری خیلی افزایش یابد بنابراین زمان بازیابی آندایزینگ کم شده و به جریان‌های مستقیم نزدیک می‌شود بنابراین سختی پوشش کاهش می‌یابد.

این معادله می‌تواند سختی پوشش‌های آندایزینگ آلومینیوم تحت شرایط آندایزینگ پالسی را پیش‌بینی نماید. با توجه به ضرایب حاصل از معادله نشان می‌دهد که دما و مربع چرخه کاری مهم‌ترین متغیرها در سختی پوشش‌های آندایزینگ آلومینیوم می‌باشد (شکل ۱) که می‌توان گفت که با کاهش چرخه کاری مدت زمانی که نمونه تحت جریان حداکثر

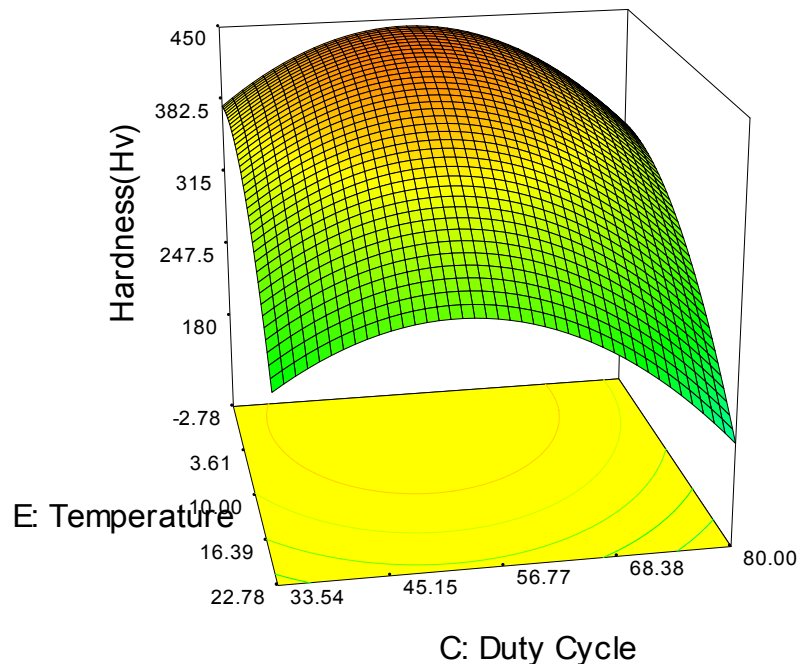
Design-Expert® Software

Hardness(Hv)



X1 = E: Temperature
X2 = C: Duty Cycle

Actual Factors
A: I (max) = 4.90
B: I (min) = 0.54
D: Frequency = 204.68
F: Time = 19.03



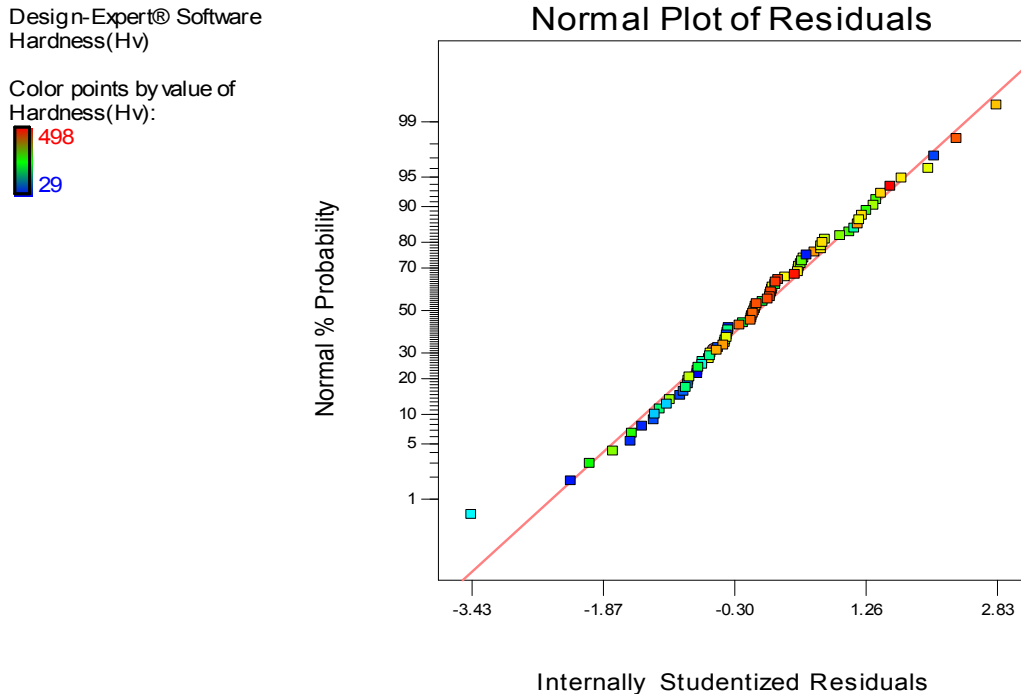
شکل ۱. منحنی اثر هم‌زمان دما و چرخه کاری بر سختی پوشش‌های آندایزینگ آلومینیوم.

برای بررسی درصد صحت اطلاعات حاصل از نرم‌افزار از منحنی احتمال نرمال باقی‌مانده (NPP) استفاده شد. NPP یک تحلیل مفید برای ارزیابی نرمال بودن داده‌ها است. در این مورد، باقی‌مانده به معنی اختلاف مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده می‌باشد.

هنگامی که دما در سطح آند افزایش می‌یابد باعث می‌شود اندازه حفره‌ها در سطح آند افزایش یابد و از آنجایی که سختی سطح به اندازه این حفره‌ها وابسته می‌باشد بنابراین باعث کاهش سختی می‌شود که این معادله با توجه به ضرایب، چنین پیش‌بینی را برای هر کدام از این متغیرها می‌نماید.

خط راست را نشان می‌دهد که نزدیک به خط راست بوده و نشان‌دهنده توزیع نرمال داده‌ها است [۱۳-۱۴].

نتایج نشان می‌دهد که مقدار باقی‌مانده به‌طور تقریبی بر روی خط راست افتاده است که می‌توان گفت اختلاف‌ها به صورت نرمال توزیع شده است. در شکل ۲ انحراف داده‌ها از



شکل ۲. منحنی احتمال نرمال باقی‌مانده برای بهینه‌سازی سختی پوشش آندایزینگ آلومینیوم.

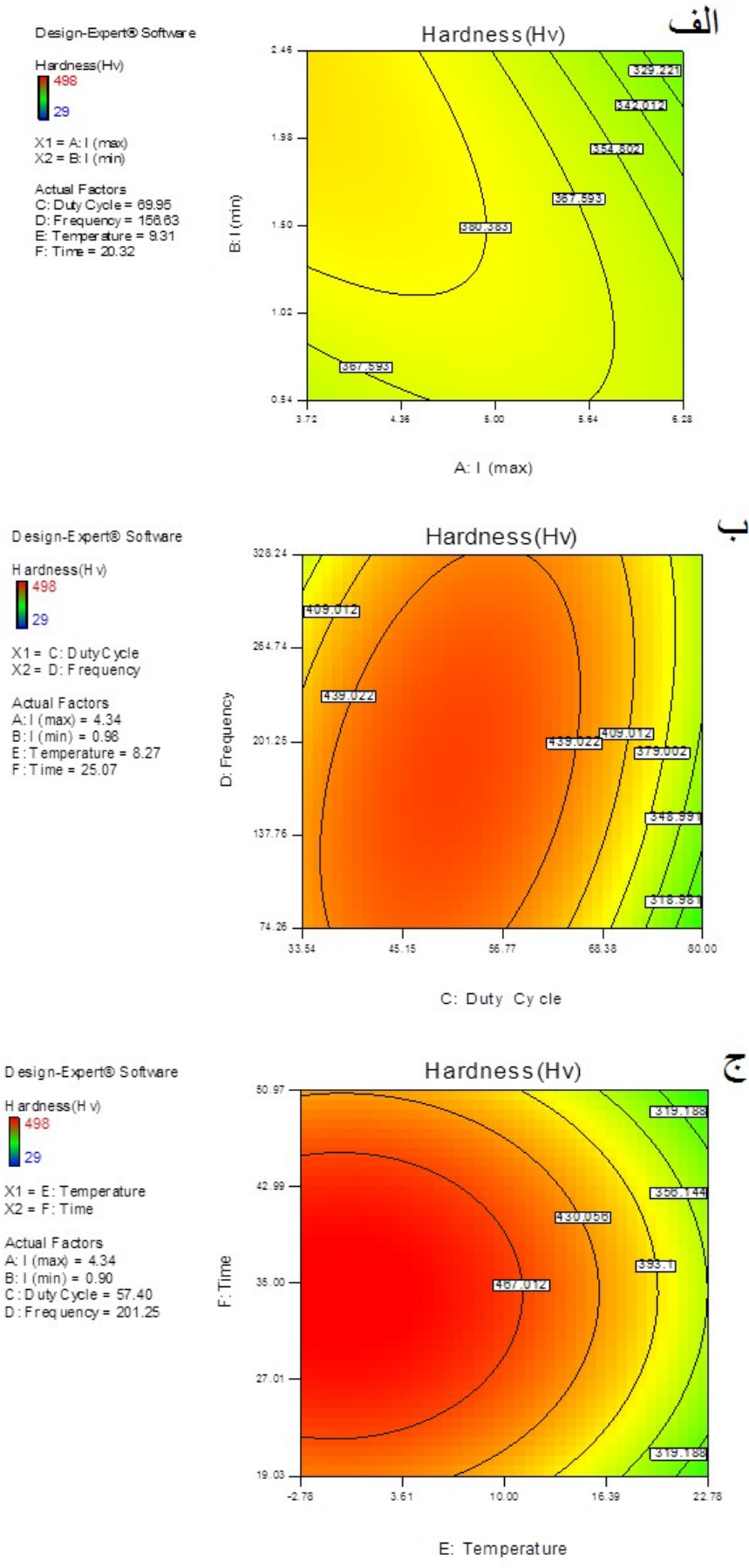
پایین به دلیل اینکه پوشش ایجاد می‌دارد چگالی بالایی نیست بنابراین سختی بالایی ندارد. از طرفی هنگامی که دانسیته جریان خیلی بالا باشد باعث می‌شود که پدیده سوخته شدن و پودری شدن پوشش دوباره اتفاق افتاده و دوباره سختی پوشش کاهش یابد. از طرفی جریان حداقل نیز می‌تواند روی سختی پوشش تأثیرگذار باشد. در اصل در دانسیته جریان‌های بالا و نزدیک به جریان حداکثر نرخ بازیابی کمتر بوده و باعث نزدیک شدن شرایط به شرایط جریان مستقیم می‌شود که قرار گرفتن نمونه تحت چنین جریان‌هایی می‌تواند باعث افزایش دما در سطح نمونه شود. همان‌طور که قبل‌تر گفته شد این افزایش دما می‌تواند منجر به کاهش سختی سطح نمونه شود [۹].

شکل ۳- ب اثر چرخه کاری و فرکانس را نشان می‌دهد. در اصل تا یک چرخه کاری مشخص سختی پوشش بهبود می‌یابد. اگرچه بعد از آن به دلیل کوتاه شدن زمان خاموشی و در نتیجه کاهش زمان بازیابی پوشش باعث می‌شود خواص پوشش افت کند که می‌توان این اتفاق را به دلیل نزدیک شدن جریان پالسی به شرایط جریان مستقیم و در نتیجه افزایش دما

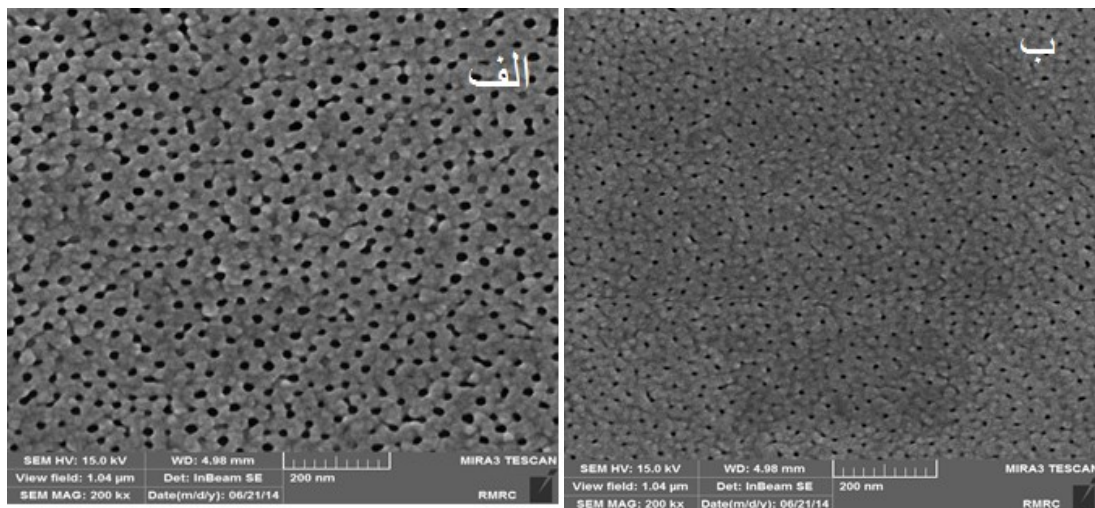
هدف بعدی در این پژوهش بهینه کردن متغیرهای ذکر شده به منظور رسیدن به حداکثر سختی در این نوع پوشش است. روش‌های متداول و مرسوم برای بهینه کردن متغیرها با تغییر یک متغیر و ثابت نگه داشتن سایر متغیرها انجام می‌شود. این‌گونه فرآیندها به دلیل عدم پیش‌بینی تأثیر متقابل هر کدام از متغیرها بر یکدیگر با مشکل مواجه هستند. اما در روش طراحی آزمایش این تأثیر متقابل در نظر گرفته می‌شود. شکل ۳ تأثیر متقابل هر کدام از متغیرها را بر روی سختی پوشش نشان می‌دهد که خطوط منحنی‌ها و عدد نشان داده شده بر هر کدام عدد سختی را نشان می‌دهد. این‌گونه منحنی‌ها با تغییر دو متغیر و ثابت نگه داشتن بقیه متغیرها رسم شده‌اند. در این نمودارها می‌توان تأثیر هر کدام از متغیرها روی یکدیگر را مشاهده نمود.

شکل ۳- الف اثر دانسیته جریان حداقل و حداکثر را بر سختی پوشش‌های آندایزینگ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در یک دانسیته جریان مشخص می‌توان سختی پوشش آندایزینگ را بهبود داد. در اصل در دانسیته جریان‌های

در سطح آند شده که باعث افزایش قطر حفره‌ها و افت خواص شود که این اثر در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳. الف) اثر دانسیته جریان حداکثر و حداقل، ب) اثر چرخه کاری و فرکانس و ج) اثر دما و زمان بر سختی پوشش‌های آندایزینگ آلومینیوم.



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی از سطح لایه آندی الف- نمونه آندایز شده تحت جریان مستقیم با دانسیته جریان 4 A/dm^2 ، دمای 10°C و زمان 30 min . ب- نمونه آندایز شده تحت شرایط جریان مستقیم پالس با جریان حداکثر 4 A/dm^2 و حداقل 3 A/dm^2 ، دمای 10°C و زمان 30 min .

[۷]. بنابراین با توجه به این متغیرها نقطه‌ی پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار در جدول ۵ مشاهده می‌شود که با توجه به این مقادیر می‌توان پوششی با سختی ۴۹۱ ویکرز ایجاد کرد.

جدول ۵. متغیرهای بهینه به منظور افزایش سختی پوشش‌های آندایزینگ آلومینیوم.

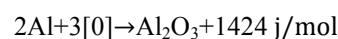
مقدار	نام	فاکتور
۴,۰۹	$I_{max} (\text{A/dm}^2)$	A
۱,۲۳	$I_{min} (\text{A/dm}^2)$	B
۶۵,۱۶	Duty Cycle (%)	C
۱۴۶,۹۴	Frequency (Hz)	D
۳,۱۳	Temperature ($^\circ\text{C}$)	E
۲۹,۵۰	Time (min)	F

۳ - نتیجه گیری

- در شرایط دمای $3,13^\circ\text{C}$ ، زمان $29,50 \text{ min}$ ، چرخه کاری ۱۶ / ۶۵ درصد، فرکانس $146,94$ ، جریان حداکثر $4,09 \text{ A/dm}^2$ و حداقل $1,23 \text{ A/dm}^2$ می‌توان پوششی با سختی ۴۹۱ ویکرز ایجاد کرد.
- پیش‌بینی سختی پوشش آندایزینگ آلومینیوم طبق معادله زیر است.

$$\text{Hardness (HV)} = 524.74 - 13.18A - 14.02B + 67.09C - 57.50D - 69.18E - 18.78F - 42.5A \times B - 2.38A \times E - 29.63A \times F - 7.8B \times E - 13C \times E - 7.75E \times F - 17.75A^2 - 80.61C^2 - 46.73E^2$$

از طرفی در چرخه کاری پایین مقدار جریان حداقل به مدت زمان بیشتری به نمونه اعمال می‌شود. تحت این شرایط به این دلیل که در دانسیته جریان‌های کم، لایه‌ی ایجاد شده چگالی بالایی ندارد، سختی پوشش کاهش می‌یابد. شکل ۳-ج اثر دما و زمان را بر روی سختی پوشش‌ها نشان می‌دهد. در اصل فرآیند آندایزینگ سخت در دماهای پایین ($10 + 10$) صورت می‌گیرد. افزایش دمای الکترولیت می‌تواند منجر به کاهش میزان سختی فیلم آندی شود که به دلیل افزایش قطر حفره‌ها به علت حل شدن در نتیجه افزایش دمای الکترولیت می‌باشد [۶-۷]. افزایش دمای سطح آند می‌تواند به دلیل اثر ژول در سطح آند (به دلیل مقاومت اسید در سطح لایه آندی) و یا انجام واکنش اکسیداسیون طی واکنش زیر باشد [۷]:



از طرفی با افزایش زمان آندایزینگ ضخامت لایه‌ی آندایزینگ افزایش می‌یابد تا جایی که فیلم به ضخامت حدی خود برسد که منجر به افزایش سختی لایه آندی می‌شود. ضخامت حدی ضخامتی است که در آن سرعت رشد فیلم با سرعت حل شدن آن در محلول با هم برابر می‌شود و از آن به بعد دیگر ضخامت افزایش نمی‌یابد [۶-۷]. این حالت برای شرایط ولتاژ ثابت صادق می‌باشد و در جریان‌های ثابت می‌تواند منجر به پدیده سوختگی و جلوگیری از رشد فیلم شود که منجر به کاهش سختی پوشش آندایزینگ آلومینیوم می‌گردد

13. Mohammadi, I., Afshar, A., Ahmadi, S., Nanoporous anodized aluminum thickness optimization through pulse current mode, *Journal of Advanced Materials and Processing*, 3(4) (2015) 11-24.
14. Mohammadi, I., Ahmadi, S., Afshar, A., Effect of pulse current parameters on the mechanical and corrosion properties of anodized nanoporous aluminum coatings, *Materials Chemistry and Physics*, 183 (2016) 490-498.
15. Cheng, H.C., Hsieh, K.Y., Chen, K.M., Thermal-mechanical optimization of a novel nanocomposite-film typed flip chip technology, *Microelectronics Reliability*, 51 (2011) 826-836.
16. Man, H.L., Behera, S.K., Park, H.S., Optimization of operational parameters for ethanol production from korean food waste leachate, *International Journal of Environmental Science & Technology*, 7 (2010) 157-164.
17. Bensalah, W., Elleuch, K., Feki, M., Wery, M., Ayedi, H.F., Optimization of anodic layer properties on aluminium in mixed oxalic/sulphuric acid bath using statistical experimental methods, *Surface & Coatings Technology*, 201 (2007) 7855-7864.

- دما و مربع چرخه کاری مهم‌ترین متغیرها در سختی پوشش‌های آندایزینگ آلومینیوم می‌باشد که با افزایش هر کدام از این متغیرها سختی پوشش آندایزینگ کاهش می‌یابد.

مراجع

1. Mohammadi, I., Afshar, A., Modification of nanostructured anodized aluminum coatings by pulse current mode, *Surface and Coatings Technology*, 278 (2015) 48-55.
2. Jani, A.M.A., Losic, D., Voelcker, N.H., Nanoporous anodic aluminium oxide: Advances in surface engineering and emerging applications, *Progress in Materials Science*, 58 (2013) 636-704.
3. Mohammadi, I., Afshar, A., Ahmadi, S., Al₂O₃/Si₃N₄ nanocomposite coating on aluminum alloy by the anodizing route: Fabrication, characterization, mechanical properties and electrochemical behavior, *Ceramics International*, 42(10) (2016) 12105-12114.
4. Bensalah, W., Feki, M., Wery, M., Ayedi, H.F., Thick and Dense Anodic Oxide Layers Formed on Aluminum in Sulphuric Acid Bath, *Journal of Materials Science & Technology*, 26 (2) (2010) 113-118.
5. Kuang, Y.F., Xu, Y., Li, G.X., Research advances on the surface treatment of aluminum and its alloy, *Plating and Surface Finishing*, 22 (2000) 16-21.
6. Aerts, T., Dimogerontakis, T., De Graeve, I., Fransaer, J., Terryn, H., Influence of the anodizing temperature on the porosity and the mechanical properties of the porous anodic oxide film, *Surface and Coatings Technology*, 201 (2007) 7310-7317.
7. Aerts, T., Jorcin, J.B., De Graeve, I., Terryn, H., Comparison between the influence of applied electrode and electrolyte temperatures on porous anodizing of aluminium, *Electrochimica Acta*, 55 (2010) 3957-3965.
8. Lee, W., The Anodization of Aluminum for Nanotechnology Applications, *The Member Journal of TMS*, 62 (6) (2010) 57-63.
9. Lee, W., Scholz, R., Gosele, U., A Continuous Process for Structurally Well-Defined Al₂O₃ Nanotubes Based on Pulse Anodization of Aluminum, *Nano Letter*, 8 (8) (2008) 2155-2160.
10. Lee, W., Schwirn, K., Steinhat, M., Pippel, E., Scholz, R., Gosele, U., Structural Engineering of Nanoporous Anodic Aluminium Oxide by Pulse Anodization of Aluminium, *Nature Nanotechnology*, 3 (2008) 234-239.

۱۱. عبدالهی، ی.، صبور روح اقدم، ع.، کریم‌زاده ع. و یزدی زاد، آ.، مدل‌سازی تأثیر زمان و دانسیته جریان بر روی ضخامت و سختی لایه اکسیدی در آندایزینگ آلومینیوم با استفاده از روش‌های آماری تجربی، ششمین همایش مشترک مهندسين متالورژی و انجمن علمی ریخته‌گری ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان، (آبان ۱۳۹۰).

۱۲. عادل خانی، ه. و فراتی راد، ح.، مطالعه مقاومت خوردگی آلومینیوم آندایز شده با جریان مستقیم و پالسی، سیزدهمین سمینار مهندسی سطح، دانشگاه تبریز، (اردیبهشت ۱۳۹۱).