کاربرد روش سطح پاسخ در بهینه سازی ضخامت و سختی پوشش وانادیم کاربید ایجاد شده به روش پلاسمای الکترولیتی

مهران تدین سعیدی[۱*]، بابک قربانیان [۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۹، ش.ص:۱۲۰-۱۱۱، تاریخ پذیرش:۱۳۹۷/۰۹/۲۴)

چکیده

یکی از مهم‌ترین روش‌های سختکاری فولادهای ابزار استفاده از پوشش‌های کاربیدی است که در طی این فرآیند اتم وانادیم در دمای بالا به سطح نمونه نفوذ کرده و با کربن موجود در فولاد واکنش می‌دهد و کاربید وانادیم با سختی بالا را ایجاد می‌کند. یکی از روش‌های نوین ایجاد پوشش، پلاسمای الکترولیتی می‌باشد. در تحقیق حاضر تلاش می‌شود تا به کمک روش پلاسمای الکترولیتی پوششی از جنس کاربید وانادیم در سطح نمونه ایجاد و در مرحله بعدی پارامترهای موثر در ضخامت و سختی این پوشش را بهینه نماید. در همین راستا از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ (RSM) در جهت بهینه سازی پوشش استفاده شد. الکترولیت تحقیق از موادی چون اکسید وانادیم، اسید کلریدریک و NaOH تشکیل شده است که NaOH به عنوان افزایش دهنده هدایت به عنوان یک پارامتر مهم به شمار می‌رود. علاوه بر NaOH اختلاف ولتاژ و زمان پوشش‌دهی نیز از مهم‌ترین پارامترهای تاثیر گذار بر ضخامت و سختی پوشش است که در این تحقیق به عنوان متغیرهای مستقل به شمار می‌روند. از متغیرهای وابسته تحقیق نیز می‌توان به ضخامت و سختی اشاره کرد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که حالت بهینه نمونه کاربید وانادیم ایجاد شده به روش پلاسمای الکترولیتی داری اختلاف ولتاژ ۱۰۰ ولت، مقدار NaOH در حدود ۵۰ گرم بر لیتر و مدت زمان ۶/۶۵ دقیقه می‌باشد. نمونه بهینه دارای سختی در حدود ۱۲۵۰ ویکرز و ضخامتی در حدود۲۹/۵ میکرون است.

واژه‌های کلیدی: وانادیم کاربید، روش سطح پاسخ، پلاسمای الکترولیتی، سختی.

[۱]- استادیار، گروه مهندسی مواد، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران.

[۲]- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

*-نوسینده مسئول مقاله:tadayon@kiau.ac.ir

Archive of SID

www.SID.ir

پیشگفتار

روش پلاسمای الکترولیتی روشی مناسب و جدید است. این روش برای ایجاد پوشش‌هایی استفاده می‌شود که بهبود خواص مکانیکی سطح را به دنبال دارد[۱-۴]. از این روش اغلب برای پوشش‌دهی آلومینیوم، تیتانیوم و فولاد مورد استفاده قرار می‌گیرد[۵-۸]. روش پلاسمای الکترولیتی به دو شیوه عمده انجام می‌شود:

۱- روش اکسیداسیون به روش پلاسمای الکترولیتی(PEO): در این روش قطعه نقش آند را ایفا می‌کند و اغلب برای ایجاد پوشش‌های اکسیدی کاربرد دارد.
۲- روش اشباع در پلاسمای الکترولیتی(PES): در این روش قطعه به عنوان کاتد مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای پوشش‌دهی غیر اکسیدی کاربرد دارد[۹].

یکی از مهم‌ترین و موثرترین پوشش‌های موجود در فولادهای ابزار ایجاد پوشش‌های نیتریدی می‌باشد. این پوشش‌ها، باعث ایجاد سختی و مقاومت به سایش بالا در فولادهای ابزار سرد کار می‌شوند و عمر قالب را تا چندین برابر افزایش می‌دهند. امروزه تکنولوژی‌های بسیاری برای ایجاد پوشش‌های نیتریدی وجود دارد؛ اما بیش‌تر به ایجاد نیترید وانادیم بر روی فولادهای حاوی وانادیم تمرکز شده است [۱۰].

روش سطح پاسخ (RSM[1]) مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که برای مدل کردن و تجزیه و تحلیل مسائلی که در آن متغیر پاسخ تحت تأثیر چندین متغیر مستقل می‌باشد، بسیار مفید است و هدف از آن بهینه کردن متغیرهای پاسخ می‌باشد[۱۱-۱۳]. روش سطح پاسخ، یک ابزار مفید برای توصیف شاخص‌های کیفی در طول فرآوری مواد غذایی است[۱۳-۱۵]. در این فرآیند پارامتر پاسخ در یک مقیاس ثابت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در بیش‌تر مسائل کاربردی بیش از یک عامل در کیفیت و عملکرد یک محصول دخالت دارند که این عوامل باید مورد بررسی قرار گیرند. در بهینه سازی به روش سطح پاسخ، متغیرهای ورودی به عنوان متغیرهای مستقل تعریف می‌شوند و تأثیر این متغیرها بر متغیرهای خروجی (وابسته) مورد مطالعه قرار می‌گیرد[۱۶]. مزیت اصلی RSMکاهش تعداد تکرارهای آزمایش‌ها برای ارزیابی پارامترهای چندگانه و روابط متقابل آن‌هاست[۱۷].

در پژوهش حاضر به بهینه سازی ضخامت و سختی پوشش وانادیم کاربید به کمک روش طراحی آزمایش سطح پاسخ (RSM) تمرکز شده است.

مواد و روش‌ها

نمونه مورد آزمایش در این تحقیق، فولاد ۱,۲۴۳۶ است و علت استفاده از این فولاد در صد کربن بالای آن می‌باشد. نتایج آنالیز کوانتومتری در جدول ۱ آمده است.

نمونه‌های فولادی با قطر ۲۰ و ارتفاع ۵ میلی متر به تعداد لازم با دستگاه کاتر برش زده شدند. سپس نمونه‌ها تا به دست آمدن سطح آینه‌ای پولیش شدند.

برای اتصال نمونه ها به الکترود، روی سطح جانبی استوانه سوراخی با مته ۳/۵ زده شد. الکترودی که نمونه به آن متصل می‌شود یک میله به قطر ۴ و ارتفاع ۳۰۰ میلی متر است. به منظور جلوگیری از واکنش الکترود با محلول، جنس الکترود فولاد زنگ نزن c316 انتخاب شد.

اجزای محلول الکترولیت باید بتواند یون‌های مثبت وانادیم ایجاد کند و در اثر فرایند به یون مثبت وانادیم یونیزه شود و با نفوذ آن به داخل قطعه و افزایش همزمان دما وانادیم در سطح، با کربن فولاد واکنش داده و کاربید وانادیم ایجاد شود. الکترولیت انتخاب شده شامل اکسید وانادیم، اسید کلریدریک (HCl) و محلول NaOH است. حجم محلول مورد استفاده ۲۰۰۰ میلی لیتر بود.

[1]- Response Surface Methodology

Archive of SID

www.SID.ir

جدول۱-ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در این پژوهش

عناصر	C	Si	Mn	Cr	Mo	Fe
درصد وزنی (Wt%)	۲	۰/۲	۰/۳	۱۱	۰/۷۵	مابقی

فرآیند پوشش‌دهی در محیط پلاسمای الکترولیتی شامل قرار دادن نمونه در وان الکترولیت و اعمال ولتاژ و زمان لازم بود.

به منظور اندازه‌گیری دما نمونه تا ۳۰۰ میکرو متر نزدیک سطح سوراخ شده و ترمو کوپل در داخل آن قرار می‌گیرد. شکل ۱ نمایی از نمونه آماده سازی شده می‌باشد. به منظور عدم تاثیر جریان اعمالی به نمونه‌ها حین اندازه‌گیری دما ترموکوپل توسط بوته سرامیکی از سطح فلز ایزوله شد. برای تعیین فاز ایجاد شده تست XRD، برای ضخامت سنجی از میکروسکوپ الکترونی روبشی و نرم افزار نهامین پردازان و برای اندازه‌گیری سختی از سختی‌سنج استفاده شده است.

طراحی آزمایش یک روش بسیار کارا، به منظور انجام آزمایشات می‌باشد، به‌گونه‌ای که داده‌های به دست آمده قابل تجزیه و تحلیل آماری بوده و نتایج در سطح اطمینان معنی‌دار ارائه می‌گردد. روش سطح پاسخ طرح آزمایشی است که از ترکیب تکنیک‌های ریاضی و آماری به‌دست‌آمده و بهترین مدل ریاضی را با توجه به پارامترهای آماری از قبیل P-Value و F-Test بدست می‌آورد و نحوه تغییرات متغییرهای وابسته با متغییرهای مستقل را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. روش طراحی باکس بنکن گزینه مناسبی برای طراحی آزمایش می‌باشد.

طرح آماری باکس بنکن[1] با استفاده از نرم افزار Design Expert با سه متغیر مستقل میزان تغییرات ولتاژ (اختلاف ولتاژ بین ولتاژ جرقه زنی و ولتاژ نگه داشته شده) در محدوده ۵۰-۱۰۰ ولت، میزان NaOH در محدوده ۱۵-۵۰ گرم بر لیتر و زمان در محدوده ۵-۱۵ دقیقه به‌کار برده شد. متغیرهای وابسته نیز شامل ضخامت و سختی است. با توجه به طرح باکس بنکن با ۳ فاکتور، ۱۷ آزمایش مورد نیاز بود تا تأثیرات ۳ فاکتور مستقل برروی یک پاسخ مورد بررسی قرار گیرد. جدول ۲ نشان دهنده این است که برای استفاده از روش بهینه سازی با سطح پاسخ باید ۱۷ تست صورت گیرد که این ۱۷ تست بر اساس ۳ متغیر مستقل زمان، مقدارNaOH و ولتاژ و ۲ تغیر وابسته سختی و ضخامت می باشد.

اثرات اصلی و متقابل فاکتورهای آزمایشی بر مقدار ولتاژ، زمان و NaOH با استفاده از طرح آماری RSM مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در روش RSM برای هر متغیر وابسته، مدلی تعریف شده که اثرات اصلی و متقابل فاکتورها را بر روی هر متغیر جداگانه بیان می‌کند. مدل کلی سطح پاسخ چند متغیره به صورت معادله ۱ می‌باشد. در مدل مذکور، Y پاسخ پیش بینی شده، b_0 ضریب ثابت، b_i اثر خطی، b_{ii} اثرات مربعات و b_{ij} اثرات متقابل است.

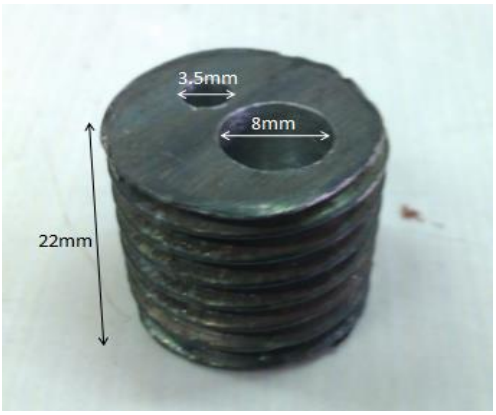
$$Y_n = b_0 + \sum_{i=1}^{k} b_i X_i + \sum_{i=1}^{k} b_{ii} X_{ij} + \sum_{i \neq j=1}^{k} b_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

د ر روش RSM از طرح باکس بنکن (BBD) برای تعیین کد استفاده شد.

[1]- Box-Behnken

Archive of SID

www.SID.ir



شکل۱- نمایی از نمونه آزمایش

جدول۲- نتایج بدست آمده از تستها

Run	Block	Factor 1 A:Voltage	Factor 2 B:NaOH	Factor 3 C:t	Response 1 Hardness	Response 2 Tickness
1	Block 1	50.00	15.00	10.00	700	11.36
2	Block 1	50.00	50.00	10.00	702	12.6
3	Block 1	75.00	32.50	10.00	727	14.33
4	Block 1	75.00	15.00	5.00	756	15.5
5	Block 1	50.00	32.50	15.00	711	12.12
6	Block 1	100.00	32.50	5.00	901	20.31
7	Block 1	50.00	32.50	5.00	761	12.18
8	Block 1	100.00	50.00	10.00	1221	29.66
9	Block 1	75.00	32.50	10.00	841	16.2
10	Block 1	75.00	32.50	10.00	851	17.3
11	Block 1	75.00	50.00	5.00	811	15.2
12	Block 1	75.00	32.50	10.00	765	14.66
13	Block 1	100.00	32.50	15.00	1111	25.44
14	Block 1	100.00	15.00	10.00	1002	23.19
15	Block 1	75.00	15.00	15.00	821	15.92
16	Block 1	75.00	32.50	10.00	752	14.72
17	Block 1	75.00	50.00	15.00	811	13.96

نتایج و بحث

نتایج طراحی آزمایش

بر اساس داده‌های جدول ۳ مقدار F محاسبه شده برای ضخامت ۹/۸۷ با درجه آزادی ۹ بزرگ‌تر از مقدار بحرانی F می‌باشد و از طرفی مقدار سطح معناداری کوچک‌تر از ۰/۰۵ است در نتیجه با اطمینان ۹۵ درصد می‌توان گفت مدل به دست آمده برای ضخامت قابل اعتماد است.

علاوه بر این بر اساس داده‌های جدول ۳ مقدار F محاسبه شده برای سختی ۱۰/۸۴ با درجه آزادی ۹ بزرگتر از مقدار بحرانی F می‌باشد و از طرفی مقدار سطح معناداری کوچک‌تر از ۰/۰۵ است، در نتیجه با اطمینان ۹۵ درصد می‌توان گفت: مدل به دست آمده برای سختی قابل اعتماد است.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول۳- نتایج تست ANOVA

مدل	مجموع مربعات	df	میانگین مربعات	F	p-value
ضخامت	۳۸۲/۲۴	۹	۴۲/۴۷	۹/۸۸	۰/۰۰۳۲
سختی	۲۴۶۷۰۰	۹	۸۲۲۳۷/۱۰	۱۰/۸۴	۰/۰۰۰۸

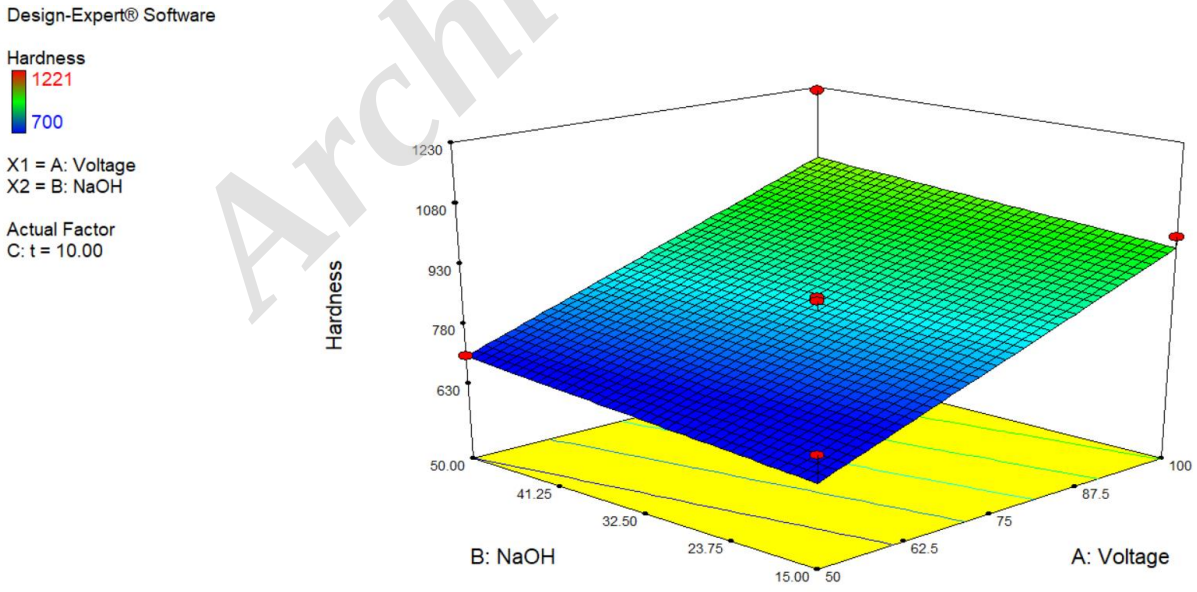
نمودار سه بعدی سختی بر حسب مقدار NaOH و اختلاف ولتاژ در زمان ثابت در شکل ۲ نشان داده شده است. محدوده سختی ۱۲۲۱ تا ۷۰۰ ویکرز مشاهده شده و میزان سختی با افزایش ولتاژ و NaOH در حداکثر سطح خود قرار داشته و با کاهش آن نزول یافته است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان این‌گونه بیان نمود که افزایش ولتاژ، باعث افزایش توان ورودی براساس فرمول $\frac{v^2}{R}$ شده که این افزایش توان، باعث افزایش دمای سطح قطعه می‌شود و همچنین این امر، منجر به افزایش میزان نفوذ وانادیم و افزایش سختی می‌شود. از سوی دیگر، افزایش NaOH افزایش هدایت را در پی دارد که این موضوع نیز می‌تواند باعث رسانایی بیش‌تر محلول و انتقال بهتر وانادیم به سطح شود. بنابراین، نتایج بیان شده هر دو عامل ولتاژ و NaOH می‌تواند سختی را افزایش دهد.

بر اساس معادله کلی سطح پاسخ برای سختی نمونه‌ها ضرایب متغیرهای مهم، در معادله ۲ آورده شده است.

$$Hardness=+209.50735+6.80500 *Voltage +1.90000 * NaOH +5.62500 * t \quad (2)$$

بر اساس نتایج بدست آمده بیش‌ترین تاثیر را ولتاژ بر سختی می گذارد.

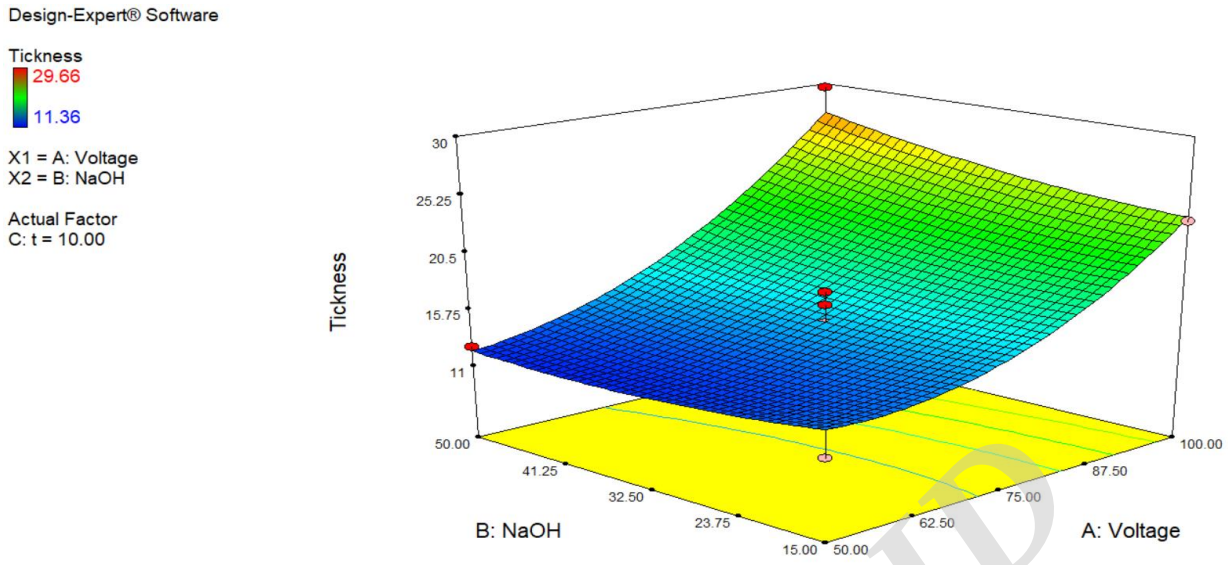
نمودار سه بعدی سختی بر حسب مقدار NaOH و اختلاف ولتاژ در زمان ثابت در شکل ۳ نشان داده شده است. محدوده ضخامت ۲۹/۶۶ تا ۱۱/۶۶ میکرون مشاهده شده است. در این بخش همانند سختی میزان ضخامت با افزایش ولتاژ و NaOH در حداکثر سطح خود قرار داشته و با کاهش آن نزول یافته است.



شکل۲-نمودار سه بعدی تغییرات NaOH و ولتاژ بر حسب سختی در زمان ثابت

Archive of SID

www.SID.ir



شکل۳-نمودار سه بعدی تغییرات NaOH و ولتاژ بر حسب سختی در زمان ثابت

بر اساس معادله کلی سطح پاسخ برای ضخامت نمونه‌ها ضرایب متغیرهای مهم، در معادله ۳ آورده شده است.

$$\text{Tickness} = +33.76925 + 0.68459 * \text{Voltage} + 0.98561 * \text{NaOH} + 0.27669 * t + 2.98857E\text{-}003 * \text{Voltage} * \text{NaOH} + 0.010380 * \text{Voltage} * t - 4.74286E\text{-}003 * \text{NaOH} * t + 4.90240E\text{-}003 * \text{Voltage}^2 + 2.27429E\text{-}003 * \text{NaOH}^2 - 0.039740 * t^2 \quad (3)$$

بر اساس نتایج بدست آمده بیش‌ترین تاثیر را مقدار NaOH بر ضخامت می‌گذارد. تفاوت ضخامت و سختی این می باشد که در زمینه ضخامت بیش‌ترین تاثیر را مقدار NaOH دارد.

شکل ۴ نمودار سه بعدی تغییرات مقدار NaOH و ولتاژ بر حسب درصد دست یابی به نمونه بهینه می‌باشد. بر اساس این نمودار بیش‌ترین احتمال حالت بهینه در اختلاف ولتاژ ۱۰۰ ولت و مقدار NaOH ۵۰ گرم بر لیتر حاصل می‌شود. از آنجایی که زمان، کم‌ترین تاثیر را بر سختی و ضخامت داشته است؛ بنابراین کم‌ترین زمان در نرم افزار لحاظ شد. بر این اساس نتایج بهینه حالت زمان ۶/۶۵ دقیقه تخمین زده شد. در این حالت بهینه نتایج خروجی نشان می‌دهد که سختی در حدود ۱۲۸۲ ویکرز و ضخامت ۲۹/۹۳ میکرون خواهد بود که درصد دستیابی به این نتایج در حدود ۷۵٪ است. در همین راستا برای راستی آزمایی نتایج خروجی تستی مشابه نتایج بهینه طراحی و انجام شد.

راستی آزمایی نتایج طراحی

در ابتدا از نمونه بهینه تست پرتو ایکس تهیه شد. نتایج بدست آمده از آزمون پراش پرتو ایکس در نمونه بهینه (شکل۵) مشاهده می‌شود که علاوه بر پوشش کاربید وانادیم، اکسید آهن روی پوشش نیز بوجود آمده است. با توجه به تحقیق انجام شده توسط قربانیان در سال ۲۰۱۶ بیان شده که در پاکت گازی ایجاد شده اطراف نمونه گاز اکسیژن وجو دارد که این گاز بر اساس واکنش زیر ایجاد می‌شود[۱]:

$$H_2O = H^o + OH^o$$

$$H^o + H^o = H_2$$

$$OH^o + OH^o = H_2O + 1/2O_2 \quad (3)$$

بر اساس این فرآیند در اثر ایجاد لایه گازی علاوه بر وانادیم اتم اکسیژن هم یونیزه شده و در اثر میدان مغناطیسی بالا به سطح قطعه نفوذ می‌کند و به دلیل دمای بالاتر از ۴۰۰درجه سطح با آهن واکنش داده و اکسید

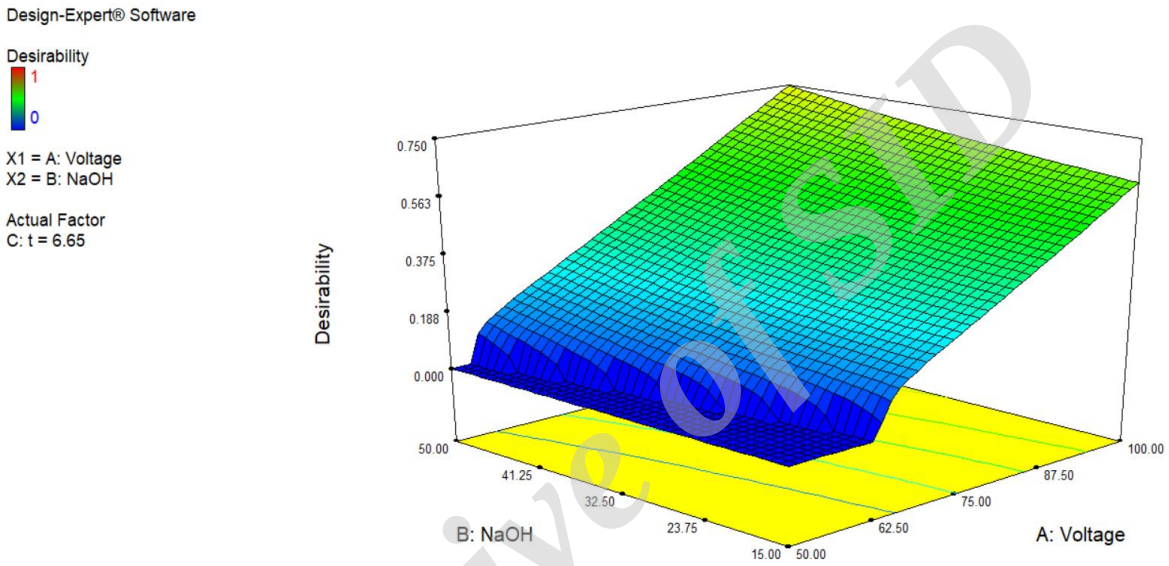
Archive of SID

www.SID.ir

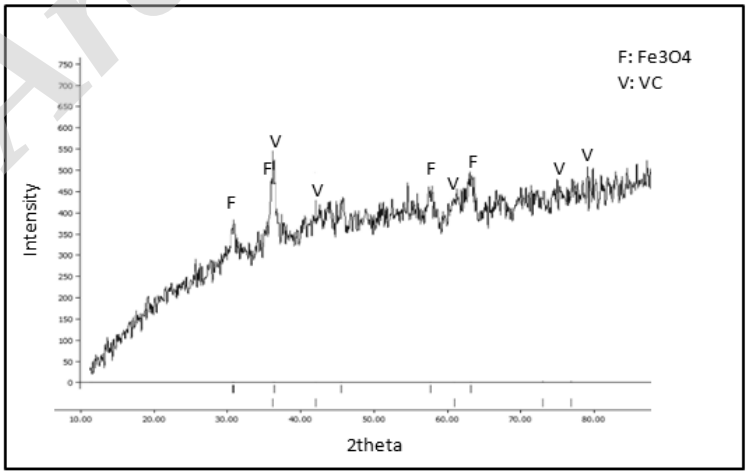
آهن را بوجود می‌آورد. در حالت کلی می‌توان این‌گونه بیان کرد که علت اصلی سخت شدن نمونه وجود کاربید وانادیم می‌باشد.

نتایج ضخامت سنجی نمونه بهینه در شکل ۶ آورده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده ضخامت پوشش ایجاد شده در حدود ۲۹/۷۶ میکرون است، این مقدار با مقدار بدست آمده از طراحی آزمایش حدود۰/۱۷ میکرون اختلاف دارد که این مقدار اختلاف کم‌تر از ۵درصد می‌باشد. بنابراین، می‌توان این‌گونه بیان کرد که نتایج طراحی آزمایش با نتایج راستی آزمایی همخوانی دارد.

نتایج بدست آمده از سختی سنجی پوشش نشان می‌دهد که این پوشش دارای سختی در حدود ۱۲۶۹ ویکرز است، این مقدار با مقدار محاسبه شده در نرم افزار ۱۳ ویکرز اختلاف دارد که این میزان کم‌تر از ۵ درصد است بنابراین می‌توان این‌گونه بیان کرد که نتایج طراحی با نتایج راستی آزمایی همخوانی دارد.



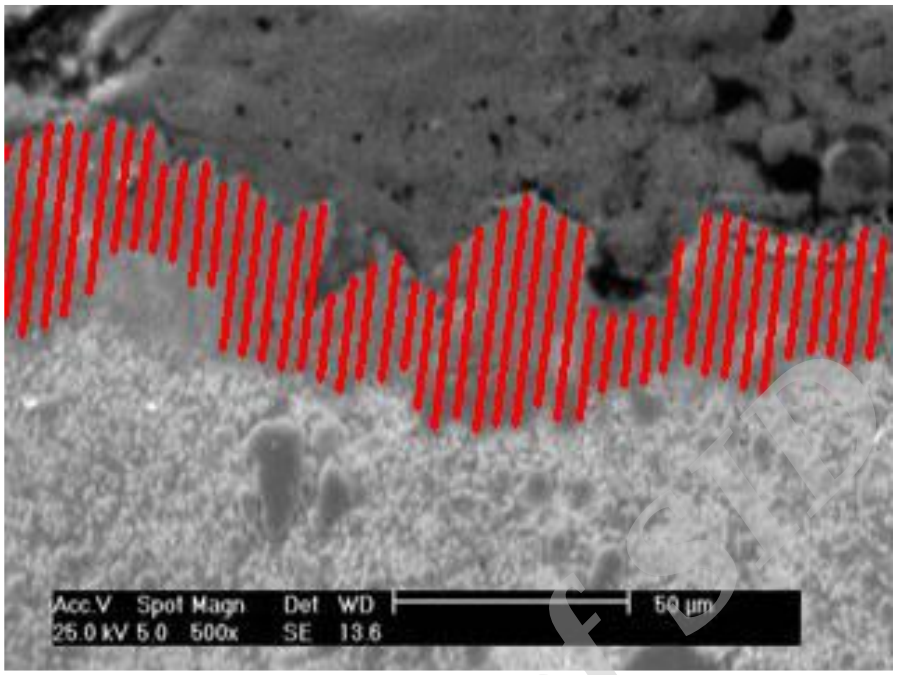
شکل۴- نمودار سه بعدی حالت بهینه

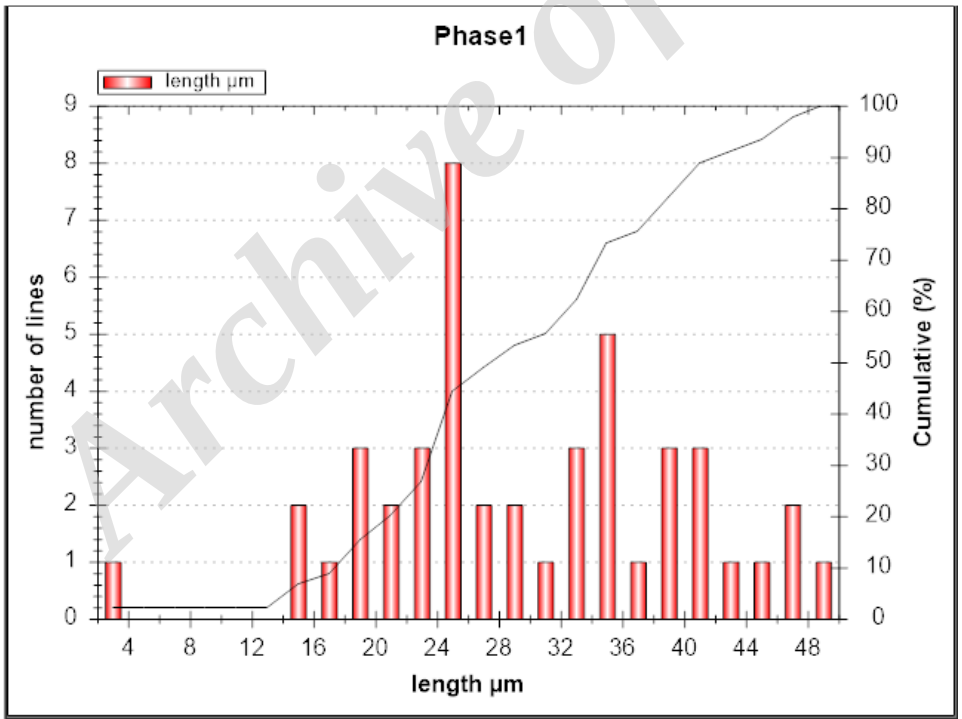


شکل۵-نتایج پراش پرتو ایکس نمونه بهینه

Archive of SID

www.SID.ir





Count	Min	Max	Average	Std
45	2.94	48.82	29.76	9.84

شکل۶- ضخامت سنجی پوشش ایجاد شده با کمک نرم افزار نهامین پردازان

Archive of SID

www.SID.ir

نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از این مقاله می‌توان این-گونه نتیجه گرفت:

۱- حالت بهینه نمونه کاربید وانادیم ایجاد شده به روش پلاسمای الکترولیتی داری اختلاف ولتاژ ۱۰۰ ولت، مقدار NaOH در حدود ۵۰ گرم بر لیتر و مدت زمان ۶/۶۵ دقیقه می‌باشد.

۲- نمونه بهینه دارای سختی در حدود ۱۲۵۰ ویکرز و ضخامتی در حدود۲۹/۵ میکرون است.

۳-بر روی پوشش کاربیدی ایجاد شده اکسید آهن وجود دارد که علت وجود آن یونیزه شدن اکسیژن در حباب گازی می‌باشد.

۴- سختی پوشش ایجاد شده از کاربید وانادیم خالص کم‌تر است که علت این امر بر اساس تحقیقات انجام شده توسط قربانیان در سال ۲۰۱۶ وجود ناخالصی‌های آهن و کرم می‌باشد.

References:

1-B.Ghorbanian, & S. M. M.Khoie, (2016). Formation of vanadium carbide with the plasma electrolytic saturation method (PES) and comparison with Thermo Reactive diffusion method (TRD). Acta Metallurgica Slovaca, 22(2), 111-119.

2-B.Ghorbanian, S. M. M., Khoie & M. Rasouli, (2016). INVESTIGATION OF THE ELECTROLYTE EFFECT ON VN CREATED VIA PES. Acta Metallurgica Slovaca, 22(4), 238-248.

3-Ghorbanian, Babak, et al. "Investigation Of The Electrolyte Effects On Formation Of Vanadium Carbide Via Plasma Electrolytic Saturation Method (Pes)." Surface Review and Letters 23.04 (2016): 1650021.

4-D.J. Blackwood, K.H.W. Seah, Electrochemical cathodic deposition of hydroxy-apatite: Improvements in adhesion and crystallinity, Materials Science and Engineering C 29 (2009) 1233.

5-W. Simka, M. Kaczmarek, A. Baron-Wieche´c, G. Nawrat, J. Marciniak, J. Zak, Electropolishing and passivation of NiTi shape memory alloy, Electrochimica Acta 55 (2010) 2437.

6-C.S. Lin, M.T. Chen, J.H. Liu, Structural evolution and adhesion of titanium oxide film containing phosphorus and calcium on titanium by anodic oxidation, Journal of Biomedical Materials Research Part A 85A (2008) 378.

7-H.J. Song, S.H. Park, S.H. Jeong, Y.J. Park, Surface characteristics and bioactivity of oxide films formed by anodic spark oxidation on titanium in different electrolytes, Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) 864.

8-M. Long, H.J. Rack, Titanium alloys in total joint replacement—a materials science perspective, Biomaterials 19 (1998) 1621.

9-Momeni, Fariba, et al. "Study of Current and Voltage Diagram In The Formed Vanadium Carbide Coatings Via Plasma Electrolytic Saturation Method." JOURNAL OF MATERIALS 7.11 (2016): 4073-4078.

10-M. Geetha, A.K. Singh, R. Asokamani, A.K. Gogia, Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopedic implants—a review, Progress in Materials Science54 (2009) 397.

11-Khuri, André I., and Siuli Mukhopadhyay. "Response surface

Archive of SID

www.SID.ir

methodology." Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics 2.2 (2010): 128-149.

12-Carley, Kathleen M., Natalia Y. Kamneva, and Jeff Reminga. Response surface methodology. No. CMU-ISRI-04-136. CARNEGIE-MELLON UNIV PITTSBURGH PA SCHOOL OF COMPUTER SCIENCE, 2004.

13-Dean, Angela, Daniel Voss, and Danel Draguljić. "Response surface methodology." Design and analysis of experiments. Springer, Cham, 2017. 565-614.

14-Gunst, Richard F. "Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments." (1996): 284-286.

15-Bezerra, Marcos Almeida, et al. "Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry." Talanta 76.5 (2008): 965-977.

16-Kleijnen, Jack PC. "Response surface methodology." Handbook of simulation optimization. Springer, New York, NY, 2015. 81-104.

17-Barton, Russell R. "Response surface methodology." Encyclopedia of Operations Research and Management Science. Springer, Boston, MA, 2013. 1307-1313.

Archive of SID

www.SID.ir