

Laser Cladding of Commercially Pure Titanium by Tungsten Carbide-Cobalt Composite Coating

Amin Esteghamat¹, *Farzad Khodabakhshi², SeyyedFarshid Kashani-bozorg³

1- Master Student, School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

3- Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Citation: Esteghamat A, Khodabakhshi F, Kashani-bozorg S.F. Laser Cladding of Commercially Pure Titanium by Tungsten Carbide-Cobalt Composite Coating. Metallurgical Engineering 2021; 24(1): 18-29 <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2021.526233.1310>

doi: <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2021.526233.1310>

ABSTRACT

Titanium has been a widely used alloy in industrial applications due to its excellent specific strength, high corrosion resistance, etc. Despite these superior characteristics, poor surface properties such as low hardness limit titanium applications. Many studies were conducted on surface properties improvement on titanium and its alloys. Laser alloying is one of the newest methods in order to enhance the surface properties of the parts. In this study, using a fiber laser beam as an energy source, titanium substrate was subjected to surface melting and surface alloying by introducing tungsten carbide (WC) particles. Two critical parameters, including laser power and scanning speed, were optimized, and defects were successfully eliminated. The influence of process parameters on defects, size, and shape of the melt pool and HAZ was discussed. Various microstructural characterizations were implemented to study the possible phase transformations in the examined system. Microhardness results show that on the surface of alloyed samples, the microhardness significantly increases and reaches 1900 Hv, which gradually moves towards the substrate and reaches 150 Hv in the substrate.

Keywords: Laser cladding; Commercially Pure Titanium; WC-Co; Microstructure; Mechanical properties.

Received: 4 March 2021 | Accepted: 24 August 2021

■ ■
* *Corresponding Author:*

Farzad Khodabakhshi, PhD

Address: School of Metallurgy and Materials Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Tel: +98 (21) 82084127

E-mail: fkhodabakhshi@ut.ac.ir

روکش کاری لیزری پوشش کامپوزیتی تیتانیوم خالص تجاری با کاربرد تنگستن-کبالت

امین استقامت^۱، فرزاد خدابخشی^۲، سید فرشید کاشانی بزرگ^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش جوشکاری، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳- استاد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

فلز تیتانیوم همواره به دلیل خواص منحصر به فرد از جمله نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی عالی و... مورد توجه صنعت قرار گرفته است. در کنار این خواص مطلوب، خواص سطحی تیتانیوم به دلایلی از جمله حساس نبودن به عملیات حرارتی چون فولاد و فعال بودن در محیط با افزایش دما، با محدودیت روبرو است. از این رو بهبود خواص سطحی زمینه گسترده وسیعی از پژوهش‌ها بر روی تیتانیوم بوده است. یکی از روش‌های نوین بهبود خواص سطحی استفاده از پرتو لیزر است. در پژوهش حاضر با استفاده از پرتو لیزر فیبری، پودر کامپوزیتی کاربرد تنگستن-کبالت از طریق تزریق مستقیم به داخل حوضچه مذاب سبب تشکیل لایه کامپوزیت سطحی بر روی زیرلایه تیتانیوم خالص تجاری گردید. متغیرهای اصلی فرآوری از قبیل حرارت ورودی و نرخ تغذیه پودر جهت تولید لایه‌های کامپوزیت سطحی عاری از عیب بهینه شدند. با انجام بررسی‌های ریزساختاری تحولات فازی ممکن از قبیل ماتنریتی شدن زمینه و تشکیل فاز β در زمینه α در خصوص این سیستم کامپوزیتی مورد مطالعه قرار گرفتند. همچنین واکنش‌های درجا و تجزیه فازی ترکیب کاربرد تنگستن-کبالت در حین فرآوری بررسی گردید. نتایج به دست آمده از آزمون سختی سنجی ویکرز لایه‌های کامپوزیتی، حکایت از تشکیل یک لایه روکش بسیار سخت با مقدار سختی حدود ۱۹۰۰ ویکرز دارد که با فاصله گرفتن از سطح لایه به سمت داخل و انحلال پودر مرکب تزریقی در زیرلایه از سختی آن کاسته می‌شود. این میزان افزایش سختی حکایت از یک سخت کاری سطحی بیش از ۱۰ برابری نسبت به تیتانیوم پایه را دارد.

واژه‌های کلیدی: روکش کاری لیزری، تیتانیوم خالص تجاری، کاربرد تنگستن-کبالت، ریزساختار، خواص مکانیکی.

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۴ | پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۲

۱. مقدمه

یا در دماهای بالا کاربری دارند، باعث ایجاد محدودیت‌هایی در کاربرد تیتانیوم شده است [۴]. می‌توان با بکارگیری فرآیندهای مختلف ذوب سطحی و با استفاده از مواد سرامیکی سخت یک لایه ماده مرکب سطحی و محافظ روی تیتانیوم ایجاد کرد و دمای کاری و مقاومت به سایش آن را افزایش داد [۵].

یکی از منابع ایجاد حوضچه مذاب سطحی، پرتو لیزر است [۶]. استفاده از پرتو لیزر برای ایجاد حوضچه مذاب روی سطح قطعه به دلیل تمرکز حرارتی و چگالی انرژی بالای آن، منطقه متأثر از حرارت باریک‌تر و سرعت انجماد بالاتری را نسبت به منابع سنتی معمول به همراه دارد [۷]. منطقه متأثر از حرارت باریک‌تر با کاهش تأثیرات مخرب حرارتی و سرعت انجماد بالاتر باعث دست یافتن به ساختار ریزدانه‌تر و مقاوم‌تر می‌شود [۸].

تیتانیوم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت به خوردگی عالی بسیار مورد توجه صنایع هوافضا و شیمیایی قرار گرفته است [۱]. از کاربردهای آن می‌توان به استفاده در ساخت بدنه هواپیما (نسبت استحکام به وزن بالا)، موتور جت (استحکام بالا، چگالی پایین و مقاومت خزشی خوب تا دمای 550°C)، قطعات جایگزین در بدن (مقاومت به خوردگی و استحکام بالا) و صنایع شیمیایی (مقاومت به خوردگی بالا) اشاره کرد [۲]. همچنین در ساخت پروانه کشتی‌ها، واحدهای شیرین‌سازی آب و محفظه‌های واکنش شیمیایی از این فلز و آلیاژهای آن استفاده می‌کنند [۳].

در کنار تمام خواص عالی و منحصر به فرد تیتانیوم، خواص سطحی ضعیف آن از جمله سختی محدود و مقاومت به اکسایش پائین در قطعاتی که در شرایط سایشی کار می‌کنند

* نویسنده مسئول:
دکتر فرزاد خدابخشی

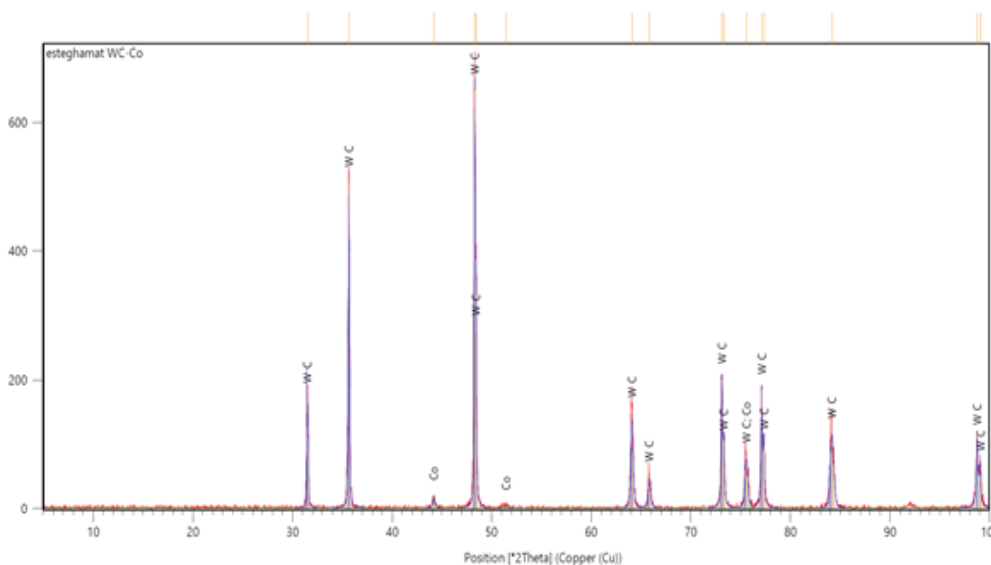
نشانی: تهران، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد.

تلفن: ۸۲۰۸۴۱۲۷ (۲۱) ۰۹۸-

پست الکترونیکی: fkhodabakhshi@ut.ac.ir

جدول ۱. ترکیب شیمیایی زیرلایه تیتانیومی برحسب درصد وزنی.

Ti	Al	Mo	Zr	Nb	Si	Sn	V
باقیمانده	<۰/۰۰۷	<۰/۰۱۰	۰/۰۰۴	۰/۰۰۵	۰/۰۰۶	<۰/۰۳۰	<۰/۰۰۴
Ni	Mn	Fe	Cr	Cu			
<۰/۰۲۰	<۰/۰۰۵	۰/۱۷	۰/۰۱۹	<۰/۰۰۵			



شکل ۱. الگوی پراش پرتو ایکس از پودر کاربید تنگستن-کبالت.

تحت استاندارد ASTM E 3047-16:2018 استفاده شد. نتیجه حاصل از این آزمون در جدول ۱ آورده شده است. در این تحقیق برای سختی کاری سطحی تیتانیوم از پودر کاربید تنگستن-کبالت (به عنوان چسب) با توزیع اندازه‌های بین ۱۱-۴۵ μm استفاده شد. نتیجه آزمون پراش پرتو ایکس^۱ پودر در شکل ۱ آورده شده است.

در این پژوهش از یک دستگاه لیزر فیبری پیوسته Yb:Fiber مدل IPG YLR-1000-IC با توان اسمی ۱/۱ kW مجهز به دستگاه تغذیه پودر SulzerMetco TWIN 10-C و با سامانه گاز محافظ به همراه یک میز CNC^۲ پنج محور مدل Fadal VMC 3016، استفاده شد. پودر کاربید تنگستن-کبالت توسط دمش گاز محافظ آرگون به داخل حوضچه مذاب تزریق شد. همچنین یک گاز آرگون کمکی از اکسید شدن حوضچه مذاب محافظت کرد. افشانک پرتو لیزر را بر روی سطح قطعه تابانیده شده تا زمینه و پودر تزریقی ذوب شوند. در حین انجام این عمل نازل لیزر ثابت است و زمینه در صفحه XY توسط ماشین CNC حرکت می‌کند.

متغیرهای فرآیند شامل توان لیزر (P)، سرعت روبش (V)، نرخ جریان گاز محافظ و نرخ تزریق پودر (PFR) است. بر

1. X-Ray Diffraction
2. Computer Numerical Control

کاربید تنگستن با نقطه ذوب بالای در حدود ۲۸۷۰ درجه سانتی‌گراد و مقدار سختی در حدود ۲۶۰۰ ویکرز یکی از سخت‌ترین مواد شناخته شده توسط بشر است. از آنجائی که کاربید تنگستن یک سرامیک است، بطور معمول از فلز کبالت به عنوان چسب ذرات آن استفاده می‌کنند. در پژوهش‌های زیادی از این ماده سخت به عنوان تقویت کننده جهت ساخت لایه‌های کامپوزیت سطحی استفاده شده است که بهبود قابل توجه سختی فروروی و مقاومت سایشی از مهمترین نتایج بدست آمده بوده است [۹-۱۱].

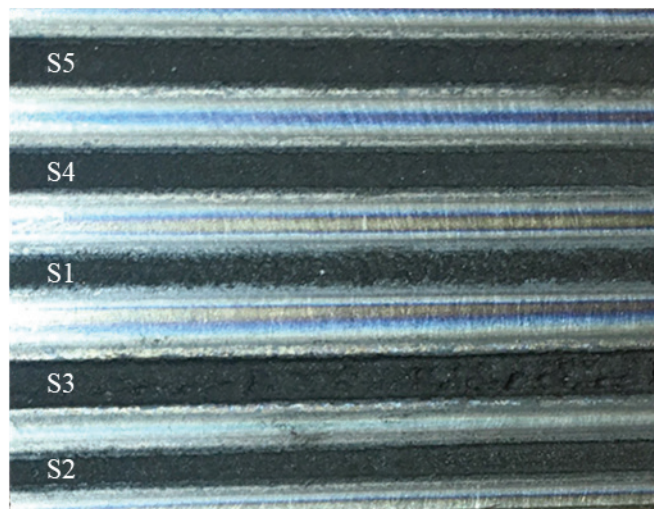
در این پژوهش با هدف بهبود خواص سطحی تیتانیوم خالص تجاری، با تزریق پودر میکرومتری کاربید تنگستن-کبالت به داخل حوضچه مذاب ایجاد شده توسط پرتو لیزر پیوسته فیبری، لایه‌های سطحی سخت بر سطح زیرلایه تیتانیومی ایجاد شده است.

۲. مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از یک ورق تیتانیومی بازپخت شده با ابعاد $6/35 \times 10 \times 10$ mm از نوع ۱ به عنوان زیرلایه استفاده شده است. برای تعیین دقیق ترکیب شیمیایی نمونه‌ها از آزمون تعیین ترکیب شیمیایی طیف نگار نشری جرقه (کوانتومتری)

جدول ۲. متغیرهای اصلی فرایند ساخت نمونه‌ها

نمونه	توان لیزر (w)	سرعت روبش (mm/min)	نرخ تزریق پودر (g/min)	نرخ جریان گاز محافظ (lit/min)
H1	۵۰۰	۲۰۰	-	۴
H2	۶۰۰	۲۰۰	-	۴
H3	۷۰۰	۲۰۰	-	۴
H4	۶۰۰	۳۰۰	-	۴
H5	۶۰۰	۴۰۰	-	۴
S1	۸۰۰	۳۰۰	۱/۵۴	۴
S2	۸۰۰	۲۰۰	۱/۵۴	۴
S3	۸۰۰	۱۰۰	۱/۵۴	۴
S4	۱۰۰۰	۲۰۰	۱/۵۴	۴
S5	۱۱۰۰	۲۰۰	۱/۵۴	۴



شکل ۲. تصویر پوشش‌های کاربرد تنگستن-کبالت ایجاد شده بر روی زیرلایه تیتانیومی.

این اساس برای بررسی تأثیر حرارت ورودی بر ریزساختار تیتانیوم، تعداد ۵ نمونه با سرعت‌های روبش و توان‌های لیزر مختلف تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. همچنین با تغییر متغیرهای سرعت روبش و توان لیزر ۵ نمونه تقویت‌شده با پودر تهیه شد که در جدول ۲ ارائه شده است. تصاویر سطح برخی از نمونه‌های فرآوری شده با روکش کاری لیزری در شکل ۲ آورده شده‌اند.

سطح مقطع نمونه‌ها توسط دستگاه برش با سیم^۳ بریده شد. مقاطع برش خورده با استفاده از کاغذهای سنباده حاوی ذره‌های SiC از P60 تا P3000 سنباده‌زنی شدند و سپس مقطع عرضی نمونه‌ها با محلول آلومینای 0/05 μm پولیش شدند. از محلول حکاکی kroll جهت نمایان شدن ریزساختار نمونه‌ها استفاده شد. برای تصویربرداری از میکروسکوپ نوری

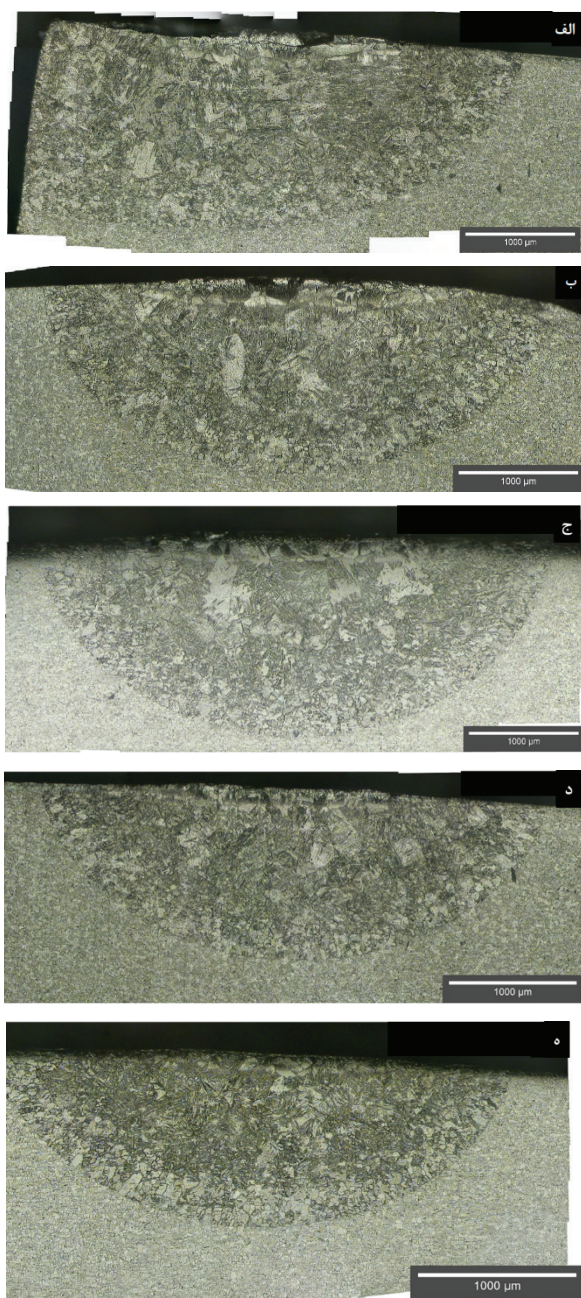
مقاطع مسطح و براق‌شده نمونه‌ها، تحت آزمون ریز سختی سنجی ویکرز توسط دستگاه (TUKON 1202, Buehler, UK)

4. Optical microscope

و با استفاده از پایگاه داده‌های ICSD صورت پذیرفت.

۳. Wire Cut

3. Wire Cut



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی نوری از سطح مقطع حوضچه مذاب نمونه الف (H1 (200-500)، ب) (H2 (200-600)، ج) (H3 (200-700)، د) (H4 (300-600) و ه) (H5 (400-600).

نمونه S5 آخرین نمونه است که نسبت به نمونه S4 بازمی‌توان لیزر افزایش یافته است. این افزایش حرارت سبب ایجاد پوشش یکنواخت‌تر و با عیوب کمتر شده که از لحاظ ظاهری نمونه بهینه این پژوهش است (شکل ۸). در این خصوص قابل ذکر است که رقیق شدن لایه با افزایش حرارت ورودی تأثیرگذار بوده و مشارکت بیشتر فلز پایه در شکل‌گیری حوضچه جوش را به همراه داشته است.

شکل ۴ تصویر مقطع عرضی حوضچه جوش نمونه S1 که

تحت بار ۲۰۰ g و زمان بارگذاری ۱۵ s و بافاصله ۲۰۰ μm از هم قرار گرفتند.

۳. نتایج و بحث

بهسازی سطح تیتانیوم خالص تجاری با لیزر بدون ذرات تقویت کننده

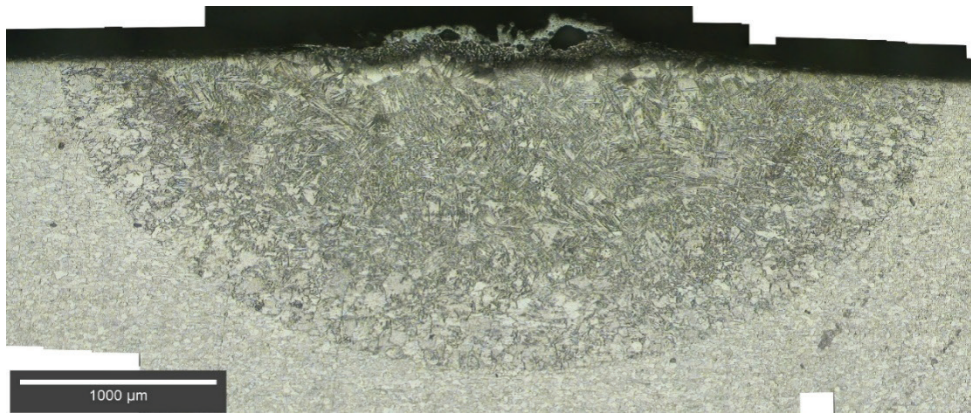
تصاویر میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی ۵۰ برابر گرفته شده است و بعد از قرار گرفتن نزدیک به ۲۰۰ عکس در کنار یکدیگر با استفاده از نرم‌افزار فتوشاپ تصویر نهایی و کامل از حوضچه مذاب شکل گرفته است. حوضچه مذاب برای تمامی نمونه‌ها به صورت کامل مشخص است به غیر از نمونه H1 که متأسفانه به دلیل نزدیکی به لبه زیرلایه بخشی از آن از دست‌رفته است (شکل ۳).

با مقایسه تصاویر گرفته شده از نمونه‌ها همانطور که انتظار می‌رود با افزایش توان لیزر و به دنبال آن افزایش حرارتی ورودی از نمونه H1 تا نمونه H3 حوضچه مذاب بزرگ‌تر شد (شکل ۳ الف-ج). از طرف دیگر در نمونه‌های H4 و H5 با ثابت بودن توان لیزر و افزایش سرعت روبش لیزر کاهش حرارت ورودی و کوچک‌تر شدن حوضچه مذاب مطابق شکل ۳ (د و ه) روی می‌دهد.

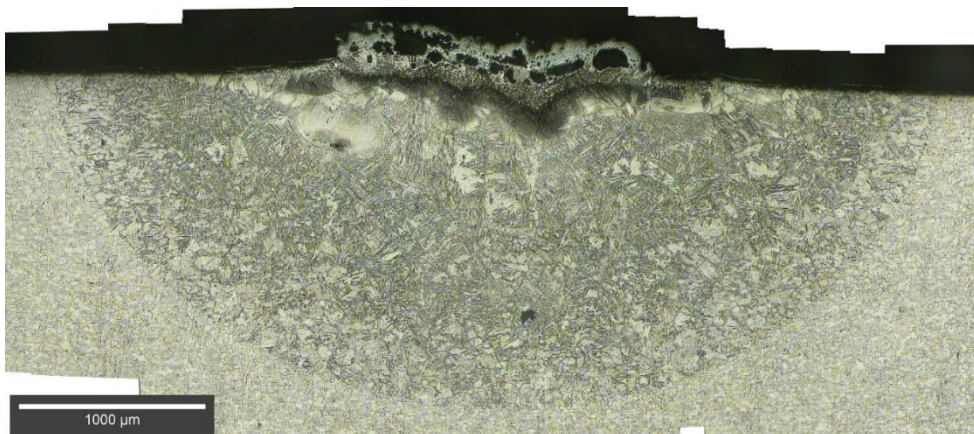
آلیاژسازی و کامپوزیت‌سازی با لیزر و ورود ذرات تقویت کننده بر روی سطح

چهار ناحیه در مقاطع عرضی نمونه‌های پوشش‌دهی شده مشاهده می‌شود که به ترتیب از بالا به پایین شامل یک‌لایه روکشی روی سطح نمونه، ناحیه آلیاژی حوضچه مذاب که پودر کاربرد تنگستن-کبالت وارد و با زمینه تیتانیومی واکنش داده است، منطقه متأثر از حرارت که تنها تحت تأثیر حرارت ورودی ساختار آن دگرگون شده و تیغه‌های مارتنزیتی تشکیل شده و در نهایت هم ساختار دست‌نخورده زیرلایه تیتانیومی است. در این نمونه‌ها نیز همانند نمونه‌های عملیات حرارتی شده با افزایش توان و یا کاهش سرعت روبش لیزر حوضچه و ناحیه متأثر از حرارت بزرگ‌تر شده است.

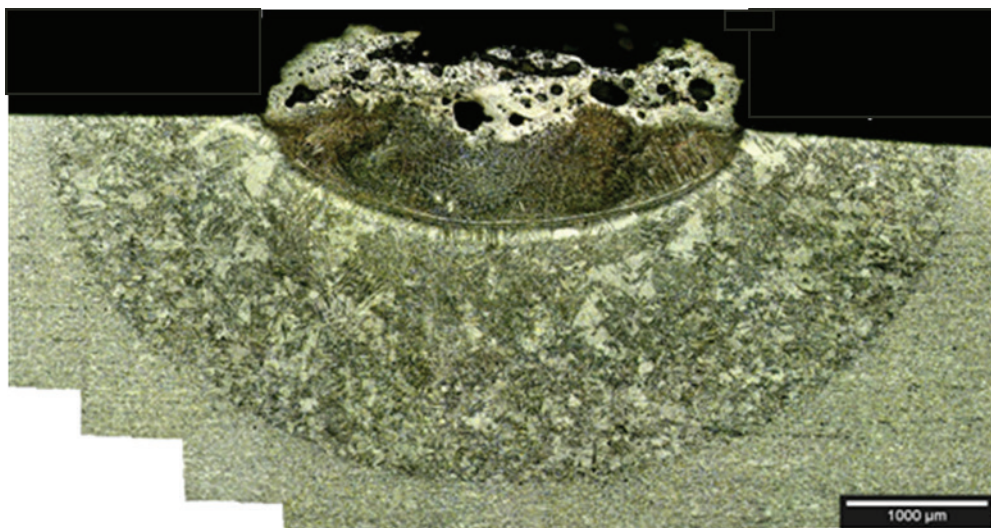
در نمونه‌های S1 تا S3 با ثابت بودن توان لیزر سرعت روبش کاهش و در نتیجه حرارت ورودی افزایش یافته است. با افزایش حرارت ورودی حوضچه مذاب و منطقه متأثر از حرارت بزرگ‌تر، پوشش روی سطح نمونه ضخیم‌تر و حفرات آن بیشتر شده است. به صورت کلی در نمونه‌های S1، S2 و S3 پوشش‌ها معیوب، پرحفره و غیریکنواخت هستند (شکل‌های ۴ تا ۶). با افزایش توان و به دنبال آن حرارت ورودی در نمونه S4 نسبت به نمونه‌های S1، S2 و S3، حوضچه مذاب و منطقه متأثر از حرارت بزرگ‌تری مشاهده می‌شود. همچنین این افزایش حرارت باعث یکنواخت‌تر شدن پوشش نمونه نسبت به نمونه‌های قبلی و کاهش اندازه حفرات پوشش شده است (شکل ۷).



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی نوری از مقطع عرضی حوضچه مذاب نمونه S1 (300-800)



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی نوری از سطح مقطع عرضی حوضچه مذاب نمونه S2 (200-800)



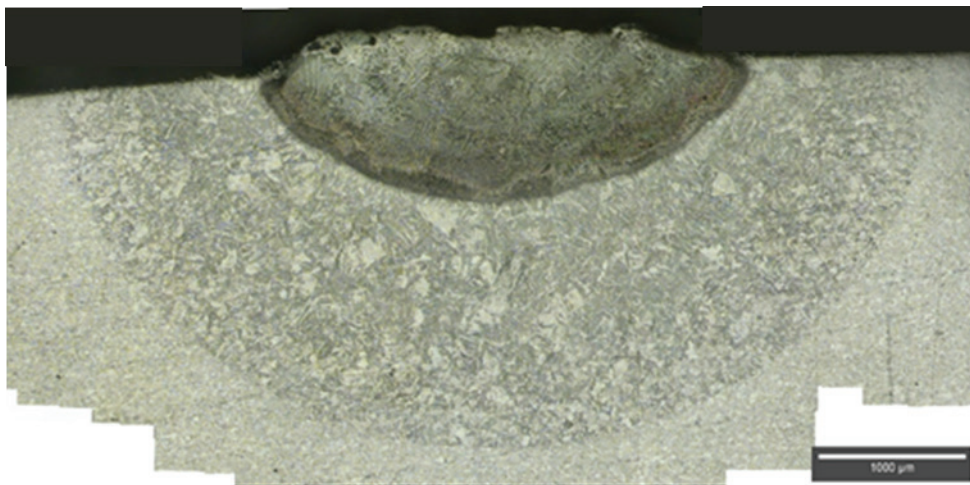
شکل ۶. تصاویر میکروسکوپی نوری از مقطع عرضی حوضچه مذاب نمونه S3 (100-800)

طریق یک فصل مشترک نازک آلیاژی که در آن پودر کاربید تنگستن-کبالت با زیرلایه تیتانیومی واکنش داده به زیر لایه تیتانیومی متصل شده است.

در بین نمونه‌های تقویت‌شده با پودر کمترین حرارت ورودی را دارد، نشان می‌دهد. روی سطح نمونه یک لایه نازک کاربید تنگستن-کبالت با حفرات بزرگ شکل گرفته است که از



شکل ۷. تصاویر میکروسکوپی نوری از مقطع عرضی حوضچه مذاب نمونه (200-1000) S4.



شکل ۸. تصاویر میکروسکوپی نوری از مقطع عرضی حوضچه مذاب نمونه (200-1100) S5.

حجم ناحیه آلیاژی افزایش یافته است که تا عمق بیشتری از نمونه را فراگرفته است. ضخامت پوشش تقریباً ثابت بوده با این تفاوت که حفرات آن هم از لحاظ اندازه و هم تعداد کاهش یافته‌اند و پوشش مناسب‌تری به دست آمده است (شکل ۷). در آخرین نمونه (S5)، که نمونه بهینه نیز هست باز هم توان لیزر و حرارت ورودی افزایش یافته تا یک ساختار یکنواخت و تقریباً بدون عیب حاصل شود. در این نمونه شکل ناحیه آلیاژی متقارن و مناسب است و حجم آن افزایش یافته است و ساختار دندریتی آن بوضوح دیده می‌شود. از طرف دیگر پوشش سطحی در این نمونه بسیار نازک شده است (شکل ۸).

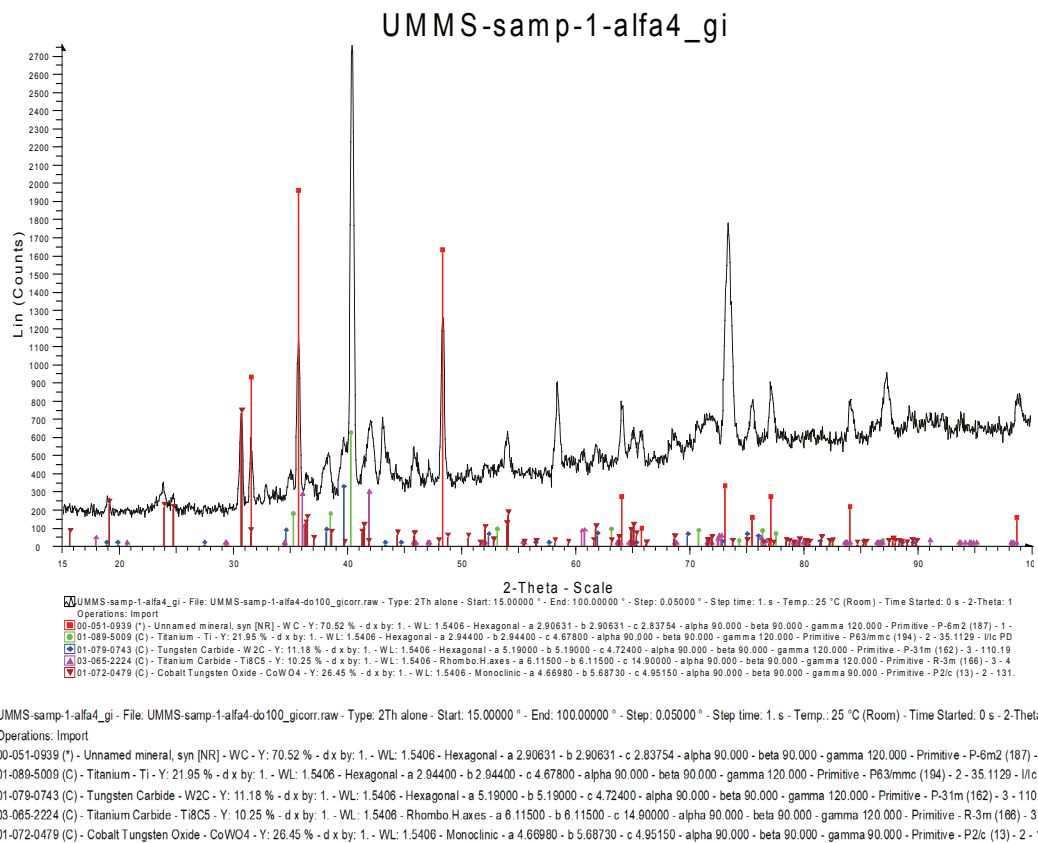
بررسی تحولات فاز در سیستم مورد بررسی به کمک آنالیز اشعه ایکس

نتیجه آزمون XRD نمونه بهینه فرآوری شده با پودر تقویت‌کننده، در شکل ۹ آورده شده است. طبق بررسی

نمونه S2 با کاهش سرعت روبش لیزر افزایش حرارت ورودی را تجربه می‌کند. در این نمونه با توجه به کاهش سرعت روبش لیزر و افزایش حرارت ورودی، پوشش سطحی ایجاد شده و فصل مشترک آلیاژی ایجاد شده نسبت به نمونه S1 ضخیم‌تر شده که البته تعداد حفرات پوشش نیز افزایش یافته است (شکل ۵).

به همین ترتیب در نمونه S3 هم با کاهش سرعت روبش لیزر پوشش سطحی ایجاد شده و فصل مشترک آلیاژی ایجاد شده نسبت به دو نمونه قبلی افزایش ضخامت زیادی داشته است. پوشش به دست آمده شامل حفرات بزرگ‌تر و بیشتری نسبت به دو نمونه قبلی است و بخش آلیاژی زیر آن رشد قابل توجهی داشته و ساختار دندریتی آن مشخص شده است (شکل ۶).

در نمونه S4 با انتخاب سرعت روبش لیزر متوسط ۲۰۰ mm/min و افزایش توان لیزر تا ۱۰۰۰ W حرارت ورودی به صورت قابل توجهی افزایش یافته است. در نتیجه این تغییر،



شکل ۹. الگوی پراش پرتو ایکس XRD از حوضچه مذاب نمونه S5.

شکسته شده و در قسمت پایینی حوضچه دندریتهای کامل را مشاهده کرد.

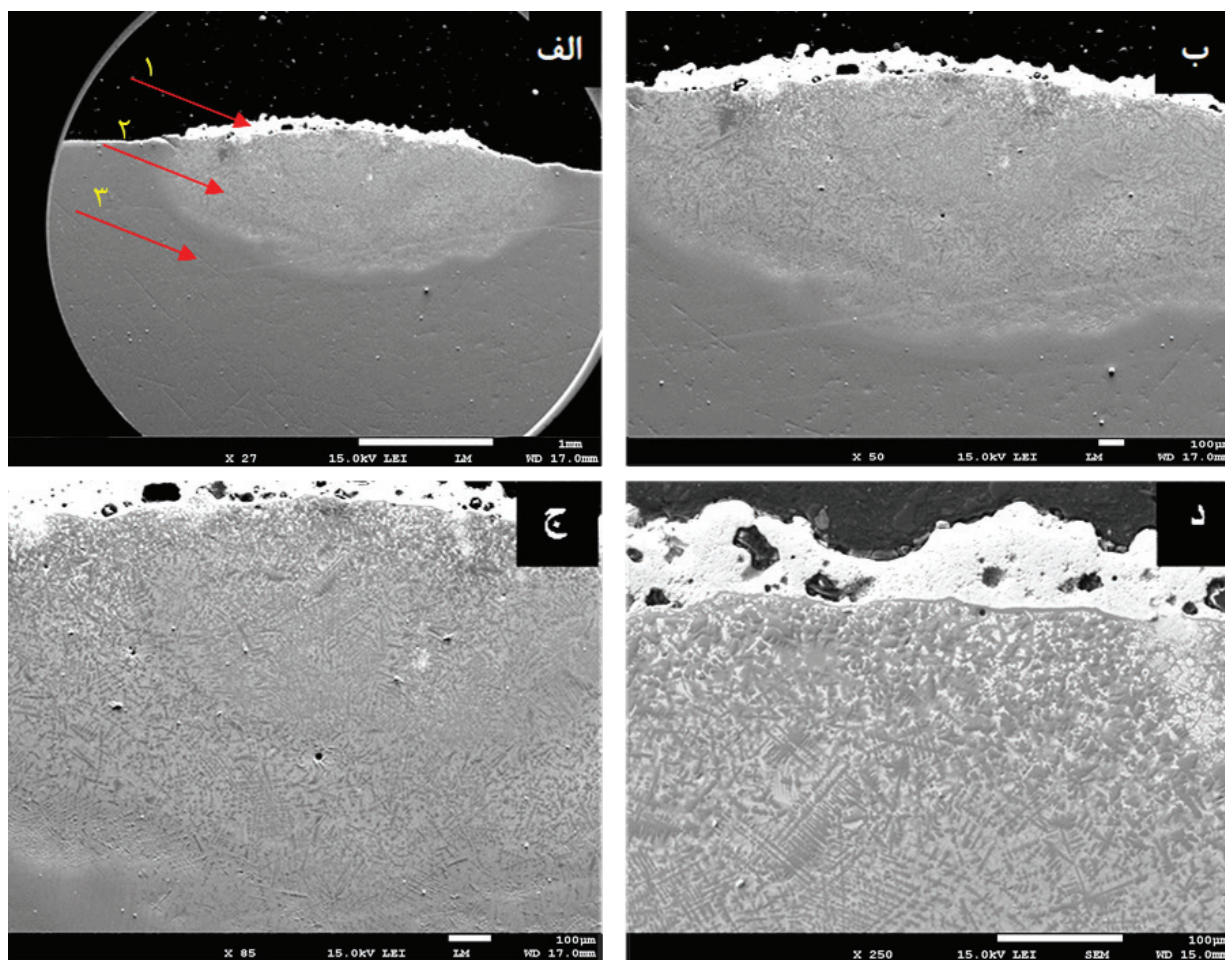
خواص مکانیکی

نیمرخ میکروسختی دو نمونه فرآوری شده بدون پودر تقویت کننده با بیشترین و کمترین حرارت ورودی، از سطح نمونه بطرف عمق در شکل ۱۱ آورده شده است. هر دو نمونه افزایش سختی قابل توجهی داشته‌اند، اما نمونه H3 با بیشترین حرارت ورودی افزایش سختی بسیار بالاتری نسبت به نمونه H5 نشان داد و سختی سطح آن به ۶۵۹ ویکرز رسید. چراکه نمونه H3 به دلیل حرارت ورودی بالاتر و حوضچه بزرگتر و سرعت سرد شدن کمتر، مدت زمان بیشتری بصورت مذاب باقیمانده و علیرغم انجام عملیات تحت محافظت گاز آرگون، ولیکن به دلیل واکنش پذیری بسیار بالای تیتانیوم، فرصت بیشتری برای جذب اکسیژن و نیتروژن داشته که به صورت محلول جامد تیتانیوم را سخت نموده‌اند. همین امر نیز سبب شده سطح بالایی نمونه‌ها که زمان بیشتری در تماس با هوا قرار گرفته‌اند، سختی بسیار بالایی داشته باشد که البته به تدریج به سمت عمق حوضچه از مقدار سختی کاسته شده است.

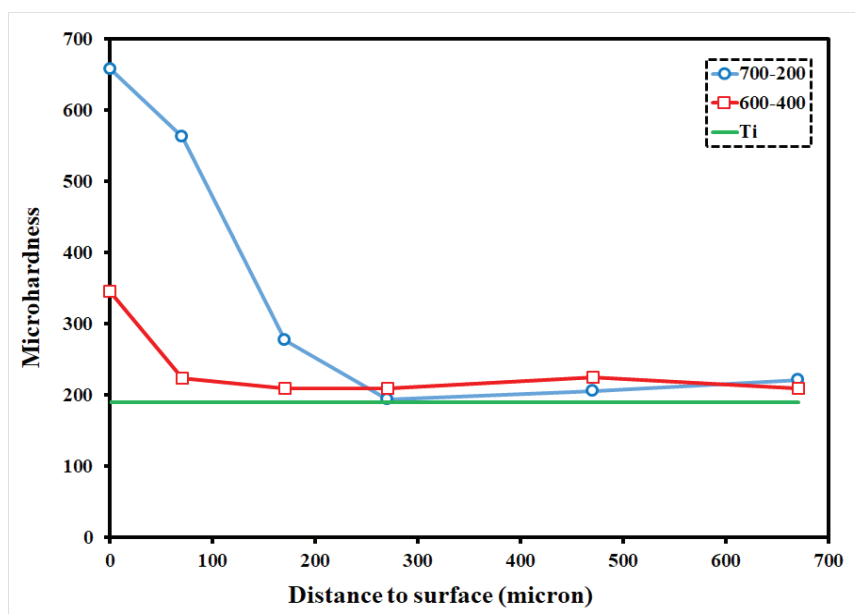
انجام شده منطقه حوضچه مذاب شامل فازهای کاربید تنگستن تجزیه نشده، تیتانیوم زیرلایه، W_2C ، Ti_8C_5 و $CoWO_4$ است. با توجه به ماهیت فرآیند ذوب لیزر و سرعت بسیار بالای انجماد در آن فازهای غیر تعادلی W_2C و Ti_8C_5 در ساختار باقیمانده‌اند و فرصت تبدیل شدن به TiC و WC را نداشته‌اند. در ادامه برای مشاهده و بررسی بیشتر ریزساختار با بزرگنمایی بالا، چگونگی توزیع فازها و... تصاویر SEM مورد مطالعه قرار داده می‌شود.

بررسی تحولات ریزساختاری به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی

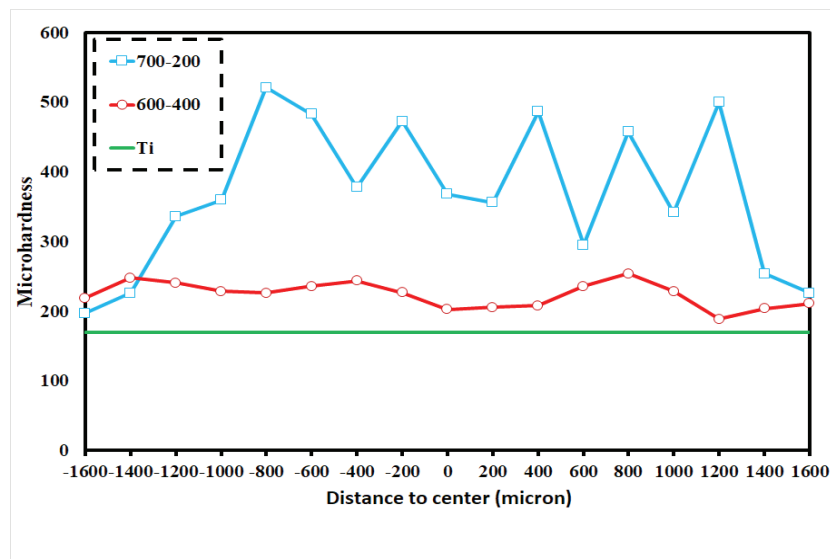
در شکل ۱۰ تصاویر SEM از نمونه S5 از بزرگنمایی ۲۷ تا ۲۵۰ برابر آورده شده است. با مشاهده تصویر ۱۰ الف، ۳ ناحیه برای این نمونه قابل تشخیص است که با نشانگر مشخص شده‌اند. یک پوشش نازک دارای حفره بارنگ روشن در قسمت بالایی، ناحیه خاکستری روشن که نشانگر حوضچه جوش و قسمت خاکستری تیره که زیرلایه تیتانیومی را نشان می‌دهد. با دقت در شکل ۱۰ د، که تصویر پوشش و حوضچه مذاب را در بزرگنمایی ۲۵۰ برابر نشان می‌دهد، می‌توان پوشش روی سطح و در زیر آن قسمت بالایی حوضچه دندریتهای



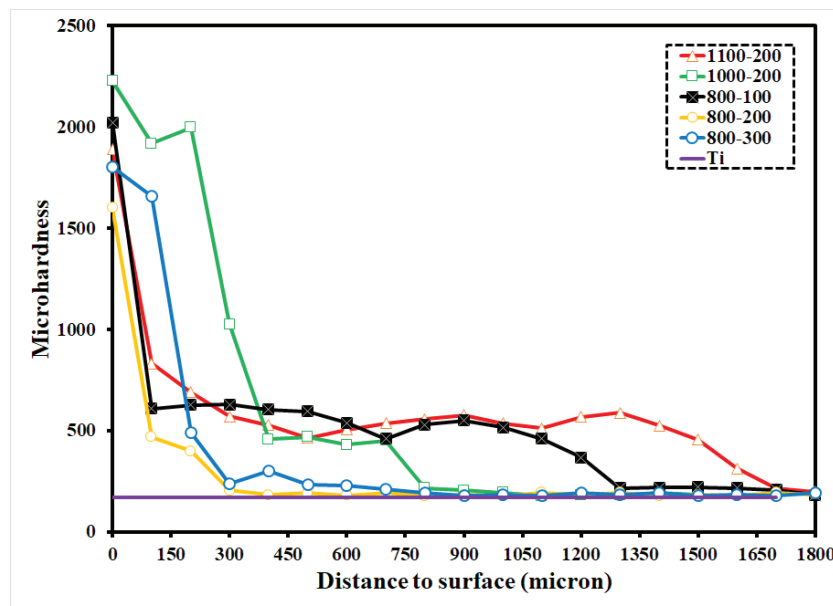
شکل ۱۰. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از مقاطع عرضی حوضچه مذاب نمونه S5.



شکل ۱۱. نمودار نیمرخ میکروسختی نمونه‌های فرآوری شده بدون پودر تقویت‌کننده از سطح نمونه به سمت عمق.



شکل ۱۲. نمودار نیمرخ میکروسختی نمونه‌های فرآوری شده بدون پودر تقویت‌کننده برحسب فاصله از مرکز نمونه.

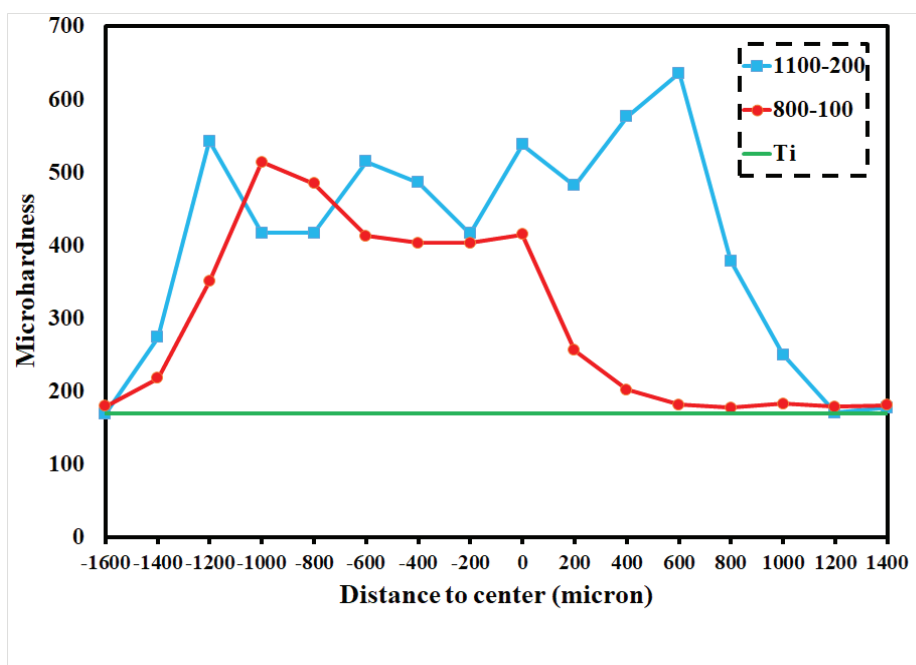


شکل ۱۳. نمودار نیمرخ میکروسختی نمونه‌های فرآوری شده با پودر تقویت‌کننده از سطح نمونه به سمت عمق.

فرصت جوانه‌زنی در مرکز حوضچه مذاب وجود داشته و رشد دانه‌های ستونی برگرفته از ناحیه متأثر از حرارت توسط دانه‌های مرکز حوضچه محدود می‌گردد و در کل دانه‌های β بیشتری از مذاب فرصت جوانه‌زنی و رشد پیدا کرده و تعداد دانه‌های β درون حوضچه افزایش می‌یابد. با ادامه فرآیند انجماد دانه‌های β تبدیل به تیغه‌های α' مارتنزیتی می‌شود. این درحالی است که مرزدانه‌های β درون ساختار باقیمانده بیشتر شده و سهم بالاتری در افزایش سختی خواهند داشت [۱۲، ۱۳].

شکل ۱۲ نیمرخ میکروسختی دو نمونه H5 و H3 را برحسب فاصله از مرکز حوضچه جوش را نشان داده است.

از طرف دیگر مطابق نمودار تعادلی تیتانیوم، مذاب ابتدا به‌صورت فاز β به‌صورت رونشانی بر دانه‌های ناحیه متأثر از حرارت که قدری رشد کرده‌اند جوانه‌زنی کرده و با توجه به تبرید سریع با دانه‌های درشت ستونی به سمت سطح لایه منجمد می‌شود و با کاهش دما در حالت جامد، فاز α' درون دانه‌های فاز β تشکیل می‌شود. در حالتی که سرعت سرمایش بسیار بالا باشد، دیواره حوضچه به‌عنوان مراکز جوانه‌زنی عمل کرده و دانه‌های β تشکیل شده و به‌سرعت تا سطح لایه رشد می‌کنند و بنابراین حوضچه نسبتاً کوچک و دانه‌های درشت β ایجاد می‌شوند. لیکن در نمونه با سرعت سرمایش پایین‌تر،



شکل ۱۴. نمودار نیمرخ میکروسختی نمونه‌های فرآوری شده با پودر تقویت‌کننده برحسب فاصله از مرکز نمونه.

همچنین مشخص است به دلیل حرارت ورودی بالاتر نمونه بهینه و حوضچه بزرگ‌تر آن، پهنای منطقه سخت شده نیز بیشتر است (شکل ۱۴).

اکنون به بررسی دلایل سخت شدن نواحی مختلف حوضچه مذاب در نمونه‌های تقویت‌شده با پودر پرداخته می‌شود. در قسمت بالایی نمونه‌ها مطابق تصاویر میکروسکوپی، یک لایه کاربرد تنگستن-کبالت خالص تشکیل شده است که باعث افزایش چشمگیر سختی سطح نمونه‌ها شده است. در زیر این پوشش سطحی و در بالای حوضچه به دلیل نزدیکی به سطح ناحیه غنی از تنگستن، خود این تنگستن و تیتانیوم موجود با تشکیل کاربرد باعث افزایش سختی در این ناحیه شده‌اند. رفته‌رفته با دور شدن از سطح نمونه و کاهش مقدار تنگستن و کربن از سختی نمونه‌ها کاسته شده است.

در نهایت انتظار می‌رود با توجه به آلیاژی شدن حوضچه و پیوندهای متالورژیکی بین فازهای تشکیل‌شده بصورت درجا و افزایش تدریجی مقادیر فاز سخت سرامیکی، و افزایش تدریجی سختی صورت گرفته و پوشش ایجادشده و نواحی سخت زیر آن از استحکام و چسبندگی مناسبی با زیرلایه برخوردار باشند [۱۴].

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش عملیات روکش کاری لیزری بر روی تیتانیوم خالص تجاری با تغذیه پودر کاربرد تنگستن-کبالت به عنوان تقویت‌کننده انجام و دستاوردهای زیر حاصل شد:

سختی‌سنجی در فاصله ۶۰ میکرومتری زیر سطح نمونه انجام شده است. همین امر سبب شده حداکثر سختی روی سطح نمونه‌ها در این نمایه به دست نیاید. در این نمودار هم سختی نمونه H3 تقریباً در تمام قسمت حوضچه از نمونه H5 بالاتر بوده است.

در ادامه نمایه میکروسختی برای نمونه‌های آلیاژی نیز گرفته شد که در شکل ۱۳ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روی سطح تمامی نمونه‌ها یک لایه بسیار سخت از جنس کاربرد تنگستن-کبالت تشکیل شده که برای دو نمونه S1 و S4 این لایه ضخامت بیشتری داشته است که با تصاویر میکروسکوپ نوری نیز همخوانی دارد. نمونه S4 بالاترین سختی را از خود نشان داده که تا ضخامت حدودی $250 \mu\text{m}$ ادامه داشته است و بعد از آن نمونه S3 که یک پوشش ضخیم اما پر حفره روی آن ایجاد شده است. تمامی نمونه‌ها پس از لایه بسیار سخت سطحی با افت شدید سختی مواجه شده‌اند. نمونه بهینه روی سطح یک لایه بسیار سخت با سختی حدود 1900 HV داشته، بعد از آن نسبت به بقیه نمونه‌ها افت سختی کمتری داشته و همچنین سختی آن تا عمق بسیار بیشتری نسبت به بقیه نمونه‌ها (تا عمق $1700 \mu\text{m}$) ادامه یافته است. نمونه S2 نیز کمترین مقدار سختی را از خود نشان داده است.

همانند نمونه‌های عملیات حرارتی شده برای دو نمونه S3 و S5 نیز نمایه سختی برحسب فاصله از مرکز حوضچه مذاب با فاصله $60 \mu\text{m}$ از سطح نمونه‌ها به دست آمد. در اکثر نقاط نمونه بهینه سختی بالاتری نسبت به نمونه S3 داشته است.

References

- [1] G. Lütjering and J.C. Williams, Titanium. 2007: Springer Science & Business Media.
 - [2] M. Peters, et al., "Titanium alloys for aerospace applications". *Advanced engineering materials*, 2003. 5(6): p. 419-427.
 - [3] I. Gurrappa, "Characterization of titanium alloy Ti-6Al-4V for chemical, marine and industrial applications". *Materials Characterization*, 2003. 51(2-3): p. 131-139.
 - [4] I. Weiss and S.L. Semiatin, "Thermomechanical processing of beta titanium alloys – an overview". *Materials Science and Engineering: A*, 1998. 243(1-2): p. 46-65.
 - [5] F.S. Froes, M.N. Gungor, and M.A. Imam, "Cost-affordable titanium: the component fabrication perspective". *JOM*, 2007. 59(6): p. 28-31.
 - [6] W.M. Steen and J. Mazumder, Laser material processing. 2010: springer science & business media.
 - [7] C.W. Billings, Lasers: New Technology Of Light, The. 1992: Universities Press.
 - [8] N.B. Dahotre and S. Harimkar, Laser fabrication and machining of materials. 2008: Springer Science & Business Media.
 - [9] W. Li, P. Xu, Y. Wang, Y. Zou, H. Gong, F. Lu, "Laser synthesis and microstructure of micro- and nano-structured WC reinforced Co-based cladding layers on titanium alloy", *Journal of Alloys and Compounds* 749 (2018) 10-22.
 - [10] C. Qi, X. Zhan, Q. Gao, L. Liu, Y. Song, Y. Li, "The influence of the pre-placed powder layers on the morphology, microscopic characteristics and microhardness of Ti-6Al-4V/WC MMC coatings during laser cladding", *Optics and Laser Technology* 119 (2019).
 - [11] L. Li, D. Wang, W. Song, J. Gong, Q. Hu, X. Zeng, "Micro-structures and mechanical properties of WCP/Ti-6Al-4V composite coatings by laser melt injection and laser-induction hybrid melt injection", *Surface and Coatings Technology* 385 (2020).
 - [12] W. Li, et al., "Laser synthesis and microstructure of micro-and nano-structured WC reinforced Co-based cladding layers on titanium alloy". *Journal of Alloys and Compounds*, 2018. 749: p. 10-22.
 - [13] D. Jiang, et al., "Fabrication of nano-TiCp reinforced Inconel 625 composite coatings by partial dissolution of micro-TiCp through laser cladding energy input control". *Surface and Coatings Technology*, 2014. 249: p. 125-131.
 - [14] G.J. Li, J. Li, X. Luo, "Effects of high temperature treatment on microstructure and mechanical properties of laser-clad NiCrBSi/WC coatings on titanium alloy substrate", *Materials Characterization* 98 (2014) 83-92.
- ۱- با استفاده از لیزر فیبری تحت توان ۱۱۰۰ W و سرعت روبش ۲۰۰ mm/min بر سطح زیر لایه تیتانیوم خالص تجاری و تزریق پودر میکرومتری کاربید تنگستن-کبالت، روکش کامپوزیتی کاربید تنگستن-کبالت بر روی زیرلایه با پهنای ۳ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر ایجاد شد. افزایش حرارت ورودی موجب انحلال کاربید تنگستن در مذاب تیتانیوم و تشکیل لایه‌هایی مرکب با محصولات انحلال در فصل مشترک روکش با زیرلایه شد. با افزایش سرعت روبش لیزر و یا کاهش توان لیزر استفاده شده بر میزان عیوب (تخلخل، حباب گازی، ترک) افزوده شد.
 - ۲- انجام فرآیند فرآوری سطح با پرتو لیزر بدون تزریق پودر، منجر به تشکیل لایه سطحی با ساختار متشکل از تیغه‌های مارتنزیتی αTi - گردید.
 - ۳- در مقطع عرضی لایه‌های ایجادشده با تزریق پودر کاربید تنگستن-کبالت از بالای سطح لایه به پایین آن، چهار ناحیه دیده می‌شود که به ترتیب شامل یک‌لایه روکش کاربید تنگستن-کبالت، ناحیه آلیاژ شده که در آن پودر کاربید تنگستن-کبالت با زمینه تیتانیومی واکنش داده و ساختار شامل محصولات آن می‌شود، ناحیه متأثر از حرارت که تنها تحت تأثیر حرارت ورودی ساختار آن دگرگون شده و تیغه‌های مارتنزیتی دردانه‌های رشد یافته تیتانیوم β تشکیل شده و در نهایت هم ساختار دست‌نخورده زیرلایه تیتانیومی است.
 - ۴- نتایج به‌دست‌آمده از آزمون XRD نشان داد که WC در حوضچه مذاب حل شده و فازهای Ti_8C_5 ، W_2C و CoWO_4 به‌صورت درجا تشکیل شده‌اند.
 - ۵- بررسی‌های ساختاری حل شدن WC در حوضچه مذاب زیرلایه تیتانیومی حل شده را تأیید کردند و نشان دادند که محصولات فازهای شامل دندریت Ti_8C_5 و ساختمان‌های بلوری W_2C و CoWO_4 در زمینه تیتانیومی به‌صورت درجا تشکیل شده‌اند.
 - ۶- بررسی نتایج سختی‌سنجی نشان داد که روی سطح تمامی نمونه‌ها یک لایه بسیار سخت (روکش کاربید تنگستن-کبالت) با مقدار سختی حدود ۱۹۰۰ HV تشکیل شده و به تدریج با حرکت به سمت عمق و آلیاژی شدن ناحیه زیر روکش (حل شدن کاربید تنگستن) از میزان سختی کاسته می‌شود.