

تأثیر متغیرهای فرآیند لیزر پالسی در تولید کامپوزیت سطحی H₁₃-TiC

مریم کاظمی^۱، شهرام خیراندیش^{۲*}، حسن ثقفیان^۳ و علی دادو^۴

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۰۶، ش.ص ۷۸-۶۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۰۲)

چکیده

در این پژوهش، کامپوزیت‌سازی سطحی فولاد ابزار گرمکار H₁₃ توسط فرآیند لیزر پالسی Nd:YAG و ذرات کاربید تیتانیم (TiC) با موفقیت انجام شد. به منظور بررسی تأثیر متغیرهای فرآیند لیزر، کامپوزیت‌سازی در سرعت روبش ۲، ۷ و ۱۲ mm/s و عرض پالس ۶، ۸ و ۱۰ ms و فاصله کاری پرتو لیزر ۴، ۵ و ۶ mm انجام شد. مشخصه‌یابی سطوح کامپوزیتی به کمک آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌نگاری تفکیک انرژی (EDX) صورت پذیرفت. سختی سطوح کامپوزیت شده و زیرلایه، با استفاده از یک دستگاه ریزسختی‌سنج اندازه‌گیری شد. با توجه به مزیت‌های روش طراحی آزمایش سطح پاسخ (RSM)، نتایج آزمایشگاهی داده شده به نرم‌افزار Design Expert پردازش شدند و روابط آماری بین متغیرها و پاسخ‌ها استخراج شد. تحلیل نتایج آماری به دست آمده از روش طراحی آزمایش، بررسی خواص منطقه کامپوزیت شده در محدوده وسیع‌تری از متغیرها را فراهم ساخت و همچنین امکان پیش‌بینی مقادیر بهینه برای هر یک از متغیرهای فرآیند لیزر را فراهم آورد. به منظور دستیابی به ناحیه کامپوزیت‌شده با بیش‌ترین سختی و ریزساختار بهینه، مقادیر بهینه برای سرعت روبش، فاصله کاری و عرض پالس به ترتیب ۱۲ mm/s، ۵/۹۴ mm و ۹/۹۶ ms گزارش شد که در این حالت ریزسختی منطقه کامپوزیت شده ۱۶۰۶ ویکرز گزارش شد. نتایج حاصل از مشخصه‌یابی نمونه‌های کامپوزیت شده در شرایط بهینه متغیرهای لیزر، ایجاد منطقه‌ای کامپوزیتی بدون ترک و تخلخل، با مشارکت مناسب و توزیع یکنواخت ذرات TiC را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: فولاد ابزار گرمکار H₁₃، لیزر پالسی Nd:YAG، ذرات کاربید تیتانیم (TiC)، روش سطح پاسخ (RSM).

^۱ - کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

^۲ - استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران و عضو قطب علمی تکنولوژی آلیاژهای با استحکام بالا

^۳ - دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران و عضو قطب علمی تکنولوژی آلیاژهای با استحکام بالا

^۴ - دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

* نویسنده مسئول مقاله: kheirandish@iust.ac.ir

بیشگفتار

فولادهای ابزار گرمکار به دلیل استحکام و چقرمگی در دمای بالا به عنوان قالب‌های فورج گرم، ریخته‌گری و اکستروژن مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱-۴]. این فولادها باید شرایط سرویس بسیار دشوار نظیر تنش‌های حرارتی بالا، سایش و فرسایش را بدون وقفه و بدون ایجاد مشکلاتی نظیر اعوجاج و تخریب ناشی از سایش تحمل کنند. به منظور جلوگیری و کاهش تخریب‌های احتمالی این قطعات، ذرات سخت با نقطه ذوب بالا را با این آلیاژها، به صورت کامپوزیت‌های زمینه فلزی می‌سازند. کامپوزیت‌های زمینه فلزی دسته‌ای از مواد با چگالی پایین و استحکام، سختی، مقاومت به سایش و فرسایش بالا نسبت به فاز زمینه هستند که کاربرد گسترده در صنایع مختلف دارند [۵-۷]. حضور ذرات سرامیکی در داخل شبکه می‌تواند سبب تردی و ناهمگن شدن ساختار شود [۸-۱۲]. در حالیکه در دماهای بالا، ذرات کاربیدی به علت پایدارتر بودن نسبت به سرامیک‌ها، بسیار تاثیرگذارتر عمل می‌کنند. در این میان، اضافه کردن ذرات TiC با پایداری ترمودینامیکی بالا، به ساختار فولادها، سبب افزایش سختی و بهبود مقاومت به سایش و فرسایش فولادها می‌شود [۸-۱۲]. روش‌های پوشش‌دهی رایج نظیر پاشش حرارتی، پلاسما اسپری و جوشکاری قوسی، دارای محدودیت‌های زیادی مثل انرژی مورد نیاز بالا، عملیات حرارتی بعدی مورد نیاز، منطقه متاثر از حرارت وسیع‌تر و سینتیک کندتر هستند، علاوه بر این بسیاری از روش‌های ذکر شده دارای آلودگی‌های زیست محیطی هستند [۱۳-۱۷]. یکی از این روش‌ها برای رفع محدودیت‌های بالا، استفاده از لیزر است [۱۳-۱۷]. کامپوزیت‌سازی سطحی با لیزر سبب ایجاد لایه‌های سطحی با چسبندگی، سختی، مقاومت به سایش، خوردگی، خستگی و شکست بالا بر روی محدوده وسیعی از مواد را تحت شرایط کنترل شده، فراهم می‌کند [۱۸]. این روش، منطقه‌ای با ریزساختار همگن با دندریت‌های ریز در سطح و همچنین منطقه متاثر از حرارت بسیار کوچک را فراهم می‌کند [۱۸]. فرآیند لیزر، دارای پرتویی متمرکز است که حرارت ورودی آن به قطعه کم است، لذا منطقه کامپوزیت-شده، تنش‌های پسماند و اعوجاج بسیار کمتری را متحمل شده و نیاز به عملیات حرارتی بعدی و پیش‌گرم نمودن قطعات ندارد [۱۹،۲۰]. علاوه بر این، عمق و عرض منطقه کامپوزیت‌شده به راحتی در فرآیند لیزر قابل کنترل بوده و

میزان تغییرات ریزساختاری زیرلایه کم‌ترین مقدار را دارد [۱۹،۲۰]. با توجه به اینکه مطالعات زیادی در خصوص تأثیر متغیرهای فرآیند انجام شده است [۲۱،۲۲]؛ اما گزارشی در مورد بهینه‌یابی این متغیرها توسط روش‌های طراحی آزمایش و بررسی دقیق تأثیر آن‌ها بر ریزساختار و سختی ناحیه کامپوزیتی H₁₃-TiC مشاهده نشده است. در این پژوهش هدف، بررسی دقیق تأثیر متغیرهای فرآیند لیزر بر منطقه کامپوزیت‌شده و بهینه‌یابی این متغیرها جهت دستیابی به ریزساختار بهینه با بیش‌ترین سختی است.

مواد و روش‌ها

نمونه‌های دیسکی شکل از جنس فولاد ابزار گرمکار H₁₃ با قطر ۵ cm و ضخامت ۰/۵ mm در این پژوهش به عنوان زیرلایه مورد استفاده قرار گرفتند و به منظور تعیین ترکیب شیمیایی این فولاد از آزمون اسپکتروفتومتری استفاده گردید. قبل از فرآیند کامپوزیت-سازی سطح، به منظور عملیات حرارتی، نمونه‌ها به مدت بیست دقیقه در دمای ۱۰۲۵ °C آستنیت‌ه و پس از سرد کردن در روغن، به مدت ۱/۵ ساعت در دمای ۵۶۰°C بازگشت داده شدند [۲۳]. پودر آلیاژی کاربید تیتانیم (TiC) با اندازه‌ای در محدوده ۲/۵-۰/۵ میکرومتر مورد استفاده قرار گرفت و خمیر پیش‌نشانی (مخلوط پودر TiC و خمیر سدیم سیلیکات (Na₂SiO₃) با نسبت $\frac{Wt\%TiC}{Wt\%Paste} = \frac{3}{2}$) روی سطح فولاد H₁₃ اعمال شد و فرآیند لیزر روی سطح انجام گرفت. با توجه به وسیع بودن تعداد متغیرهای فرآیند لیزر پالسی، کامپوزیت‌سازی سطح با استفاده از لیزر پالسی Nd:YAG با توان ۲۲۰ وات و پارامترهای آرایه شده در جدول ۱ انجام گرفت.

به منظور بررسی ریزساختاری نمونه‌های کامپوزیت شده، نمونه‌ها از مقاطع برش زده شدند. سپس با سنباده، به‌ترتیب با مش‌های ۱۰۰ تا ۳۰۰۰ آماده‌سازی سطحی شدند. در ادامه نمونه‌ها به وسیله آلومینای یک میکرومتر پولیش شدند. بعد از پولیش کردن، نمونه‌ها در محلول نایتال ۵٪ به مدت ۱۵ ثانیه و سپس در محلول Vilella به مدت ۴۵ ثانیه اچ شدند [۲۴].

جدول ۱- مشخصات لیزر مورد استفاده

واحد	مشخصات	پارامترهای لیزر
μm	۱/۰۶۴	طول موج
----	پالسی	حالت موج
Hz	۱۵	فرکانس پالس
ms	۱۰، ۸، ۶	عرض پالس
mm	۶، ۵، ۴	فاصله کاری
mm/s	۱۲، ۷، ۲	سرعت روبش لیزر

$$X_i = \frac{(Z_i - Z_i^0)}{\Delta Z_i^0} \quad (1)$$

$$Z_i^0 = \frac{(Z_i^{\max} + Z_i^{\min})}{2} \quad (2)$$

$$\Delta Z_i^0 = \frac{(Z_i^{\max} - Z_i^{\min})}{2} \quad (3)$$

که در اینجا X_i بیان کننده مقدار کد شده متغیر مستقل، Z_i مقدار واقعی متغیر، Z_i^0 مقدار داده مرکزی مقادیر واقعی متغیرها و ΔZ_i^0 گام تغییرات داده‌های واقعی است [۲۸]. در این طراحی آزمایش، سرعت روبش لیزر (Z_1)، عرض پالس لیزر (Z_2)، فاصله سر لیزر تا قطعه کار (Z_3)، به عنوان متغیرهای مستقل مورد بررسی قرار گرفتند که پس از تبدیل به کد، به ترتیب به صورت X_1 ، X_2 و X_3 بیان شدند. برای این منظور از طراحی آزمایش Box-Behnken استفاده شد [۲۵ و ۲۸]. جدول ۲ نام و محدوده مقادیر هر متغیر مستقل را نشان می‌دهد. جدول ۳، ماتریس طراحی Box-Behnken و نتایج حاصل برای هرکدام از پاسخ‌ها را نشان می‌دهد. برای برازاندن نتایج هرکدام از پاسخ‌ها، از رابطه (۴)، که معادله درجه دوم می‌باشد، استفاده شده است [۲۶ و ۲۸].

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (4)$$

به منظور مطالعه دقیق ریزساختار و چگونگی توزیع ذرات تقویت‌کننده از میکروسکوپ الکترونی روبشی Roventec Vega II xmu مدل Tescan با ولتاژ ۳۰ kV مجهز به دستگاه طیف‌نگاری تفکیک انرژی (EDX) استفاده شد. در ادامه برای بررسی‌های دقیق‌تر ساختار زمینه از میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (FESEM) مدل Mira3-XMU نیز استفاده شد. ریزسختی منطقه کامپوزیت شده توسط یک فرورونده ریزسختی ویکرز (Buehler مدل MXT-al) با بار ۵۰۰ گرم و زمان ۱۵ ثانیه اندازه‌گیری شد. سختی هر منطقه، ۳ بار اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها ثبت گردید. برای آنالیز تفرق پرتوی ایکس از دستگاه پراش پرتو ایکس از نوع Philips XPert Pro با ولتاژ ۴۰ kV و جریان ۴۰ mA، گام زمانی ۰/۰۲۶ درجه و پرتو $\text{CuK}\alpha$ با طول موج $1/5406 \text{ \AA}$ انتخاب گردید.

برای دستیابی به پوشش کامپوزیتی $\text{H}\alpha\text{-TiC}$ با خواص بهینه، از نرم افزار Design Expert 8.0.7.1 و روش طراحی آزمایش سطح پاسخ (RSM) جهت بهینه‌یابی متغیرهای لیزر در کامپوزیت‌سازی سطح استفاده شد. از معادله‌های ریاضی و آماری برای پیش‌بینی و مدل‌سازی جواب متغیرهای در نظر گرفته شده در روش طراحی آزمایش سطح پاسخ استفاده شد [۲۵، ۲۶]. متغیرهای مستقل از طریق روابط زیر به صورت روابط کد شده در می‌آیند. کدهای استفاده شده در این پژوهش ۱، ۰ و -۱ است [۲۷].

جدول ۲- نام و محدوده مقادیر متغیرهای مستقل

Levels						علائم		متغیرها
واقعی			کد شده			واقعی	کد شده	
۲	۷	۱۲	-۱	۰	+۱	Z ₁	X ₁	سرعت روبش (mm/s)
۶	۸	۱۰	-۱	۰	+۱	Z ₂	X ₂	عرض پالس (ms)
۴	۵	۶	-۱	۰	+۱	Z ₃	X ₃	فاصله سرلیزر تا قطعه کار (mm)

جدول ۳- ماتریس طراحی Box-Behnken

ریزسختی ی پوشش ها (HV)	مقادیر کد شده			مقادیر واقعی			ترتیب انجام آزمایشها
	X ₃	X ₂	X ₁	Z ₃	Z ₂	Z ₁	
۱۳۱۰	۰	۰	۰	۵	۸	۷	۱
۱۲۹۷	۰	۰	۰	۵	۸	۷	۲
۱۲۶۶	۱	-۱	۰	۶	۶	۷	۳
۱۶۰۵	۰	۱	۱	۵	۱۰	۱۲	۴
۱۳۱۴	۰	۰	۰	۵	۸	۷	۵
۱۲۱۰	-۱	-۱	۰	۴	۶	۷	۶
۱۴۰۳	-۱	۱	۰	۴	۱۰	۷	۷
۸۹۶	۰	-۱	-۱	۵	۶	۲	۸
۱۵۳۰	-۱	۰	۱	۴	۸	۱۲	۹
۱۱۸۶	۰	۱	-۱	۵	۱۰	۲	۱۰
۱۴۳۹	۱	۱	۰	۶	۱۰	۷	۱۱
۱۴۸۳	۰	-۱	۱	۵	۶	۱۲	۱۲
۹۸۴	-۱	۰	-۱	۴	۸	۲	۱۳
۱۰۹۵	۱	۰	-۱	۶	۸	۲	۱۴
۱۵۵۱	۱	۰	۱	۶	۸	۱۲	۱۵

نتایج و بحث

ریزساختار

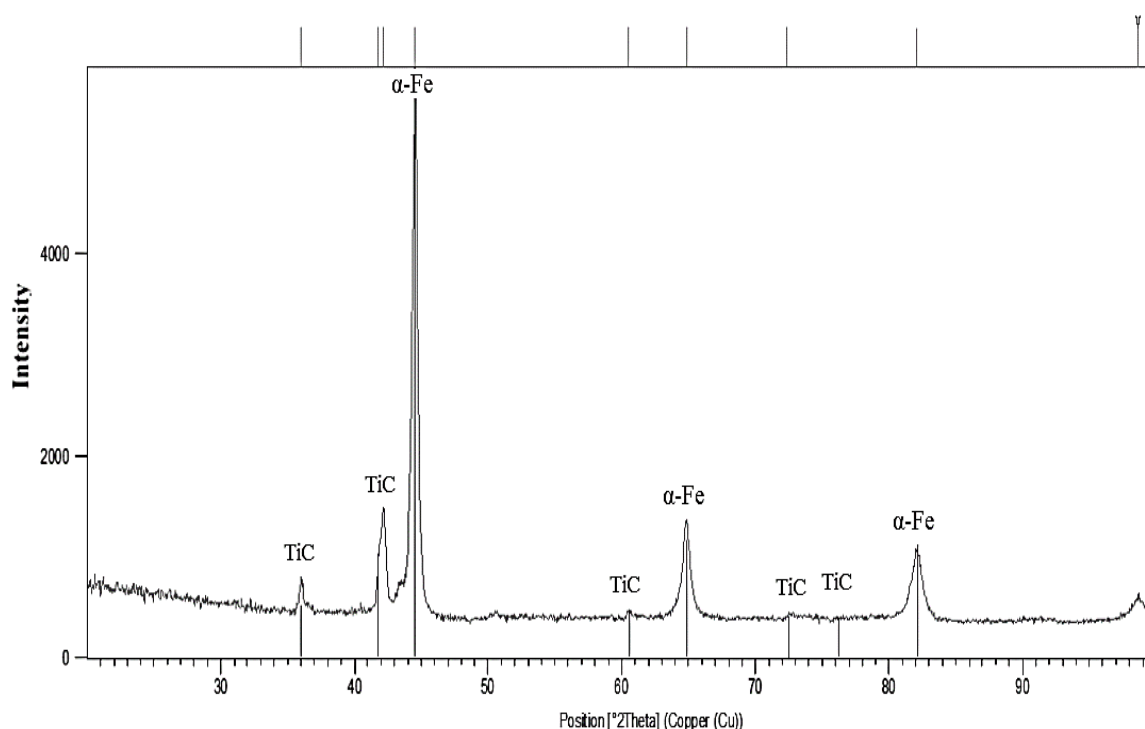
ترکیب شیمیایی به دست آمده از آزمون اسپکتروفتومتری برای فولاد H13، در جدول ۴ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱ که الگوی پراش پرتو ایکس از منطقه کامپوزیتی را نشان می‌دهد، می‌توان بیان کرد که کاربیدهای رسوب کرده در شبکه منطقه کامپوزیتی، در

یک زمینه فریتی قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه عنصر Ti در آلیاژهای آهنی، پایدار کننده فریت است. بنابراین، ذوب ذرات TiC در اثر حرارت ناشی از فرآیند لیزر، سبب افزایش غلظت عنصر Ti در حوضچه مذاب شده که این امر سبب پایداری فریت در حین انجماد شده است و از سوی دیگر، عنصر Ti با کربن زمینه مجدداً ترکیب شده و تشکیل رسوبات TiC ثانویه با مورفولوژی گلبه‌ای را داده است.

جدول ۴- ترکیب شیمیایی حاصل از آزمون اسپکتروفتومتری زیرلابه

عنصر	کربن	منگنز	سیلیسیم	کروم	وانادیوم	مولیبدن	نیکل	آهن
درصد وزنی	۰/۴	۰/۴	۱	۴/۹	۱	۱/۳	۰/۱	معادل



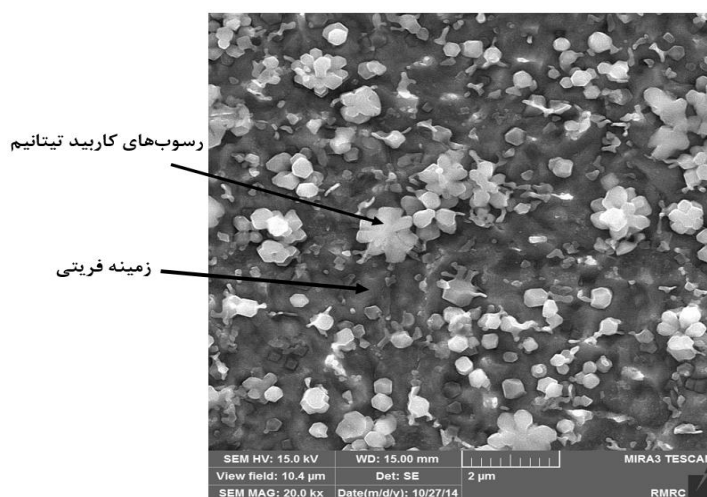
شکل ۱- الگوی پراش پرتو ایکس از سطح منطقه کامپوزیت شده در شرایط میانی برای هر سه متغیر (سرعت روبش mm/s ۷، عرض پالس ۸ ms و فاصله کاری ۵ mm)

رویش متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، افزایش سرعت رویش پرتو لیزر، سبب کاهش عمق و عرض منطقه کامپوزیت شده و HAZ شده است.

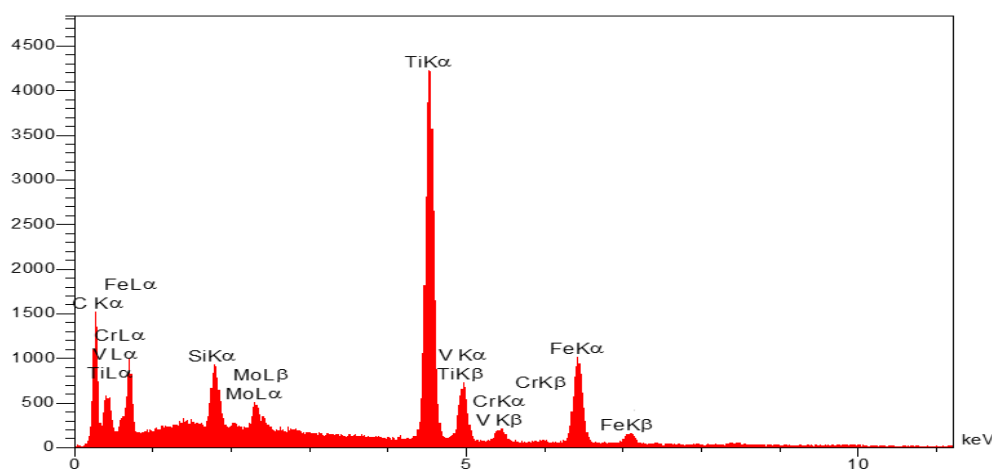
شکل ۲، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع عرضی منطقه کامپوزیتی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲، منطقه کامپوزیتی حاوی رسوبات سخت کننده TiC و فاز همگن و یکدست زمینه است که با توجه به الگوی پراش پرتو ایکس از سطح منطقه کامپوزیتی، فاز زمینه، فریتی است.

تاثیر سرعت رویش پرتو لیزر بر ریزساختار منطقه کامپوزیت شده و HAZ

سرعت رویش در سه حالت ۲، ۷ و ۱۲ mm/s مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۴، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع عرضی لایه کامپوزیت شده در سرعت‌های



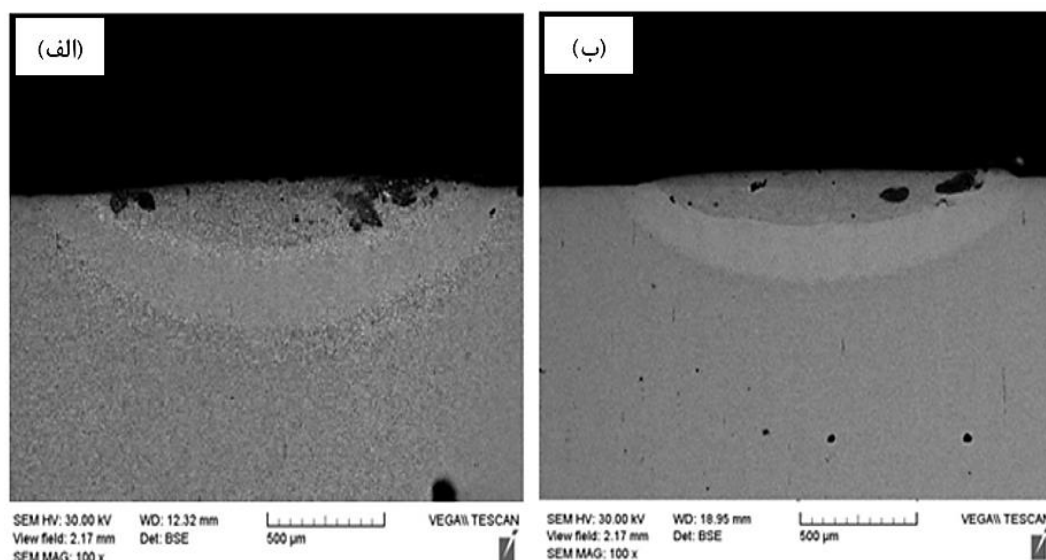
شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از مقطع عرضی منطقه کامپوزیت شده در شرایط میانی برای هر سه متغیر (سرعت رویش ۷ mm/s، عرض پالس ۸ ms و فاصله کاری ۵ mm)



شکل ۳- الگوی حاصل از آنالیز عنصری آزمون EDX کاربیدهای گلیبرگی ریزساختار

جدول ۵- نتایج حاصل از آنالیز عنصری آزمون EDX کاربیدهای گلبه‌ری ریزساختار

عنصر	درصد وزنی	درصد اتمی
C	۱۹/۷۹	۴۸/۱۳
Ti	۴۱/۹۵	۲۶/۳۶
V	۷/۰۷	۴/۳۸
Cr	۱۲/۲۲	۷/۸۹
Fe	۱۶/۹۶	۱۱/۳۸
Mo	۲/۰۱	۱/۸۶
مجموع	۱۰۰	۱۰۰



شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع عرضی منطقه کامپوزیت شده در فاصله کاری ۴ (mm) و عرض پالس ۸ (ms). الف) سرعت روبش ۲ (mm/s)، ب) سرعت روبش ۱۲ (mm/s)

برهمکنش پرتو لیزر و سطح زیرلایه را در بر دارد. بنابراین، حرارت حوضچه مذاب تشکیل شده کاهش می‌یابد. کاهش حرارت حوضچه مذاب، سبب کاهش حجم منطقه ذوب شده می‌شود؛ در نتیجه عمق و عرض منطقه کامپوزیت شده و HAZ کاهش می‌یابد [۱۸ و ۲۹ و ۳۰].

افزایش سرعت روبش پرتو لیزر، سبب کاهش حرارت حوضچه مذاب می‌شود، بنابراین مقدار TiC انحلال یافته در داخل حوضچه مذاب کاهش می‌یابد، لذا مورفولوژی

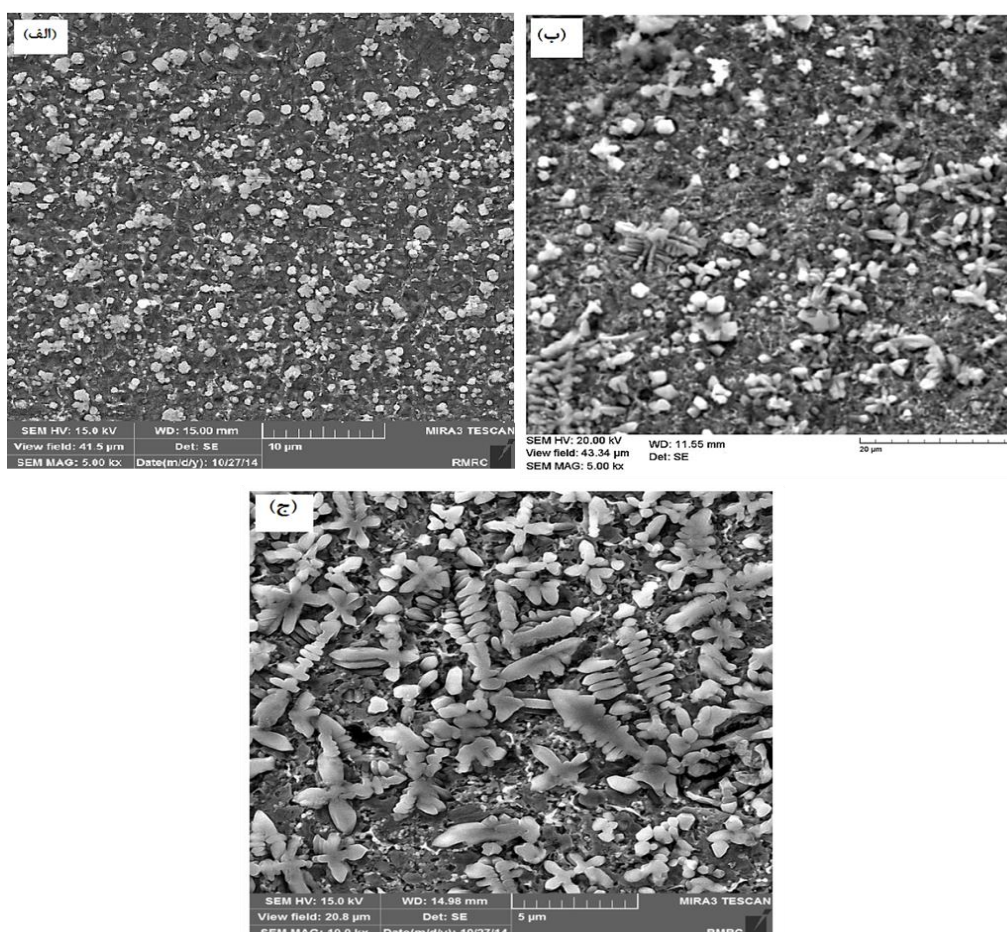
سرعت روبش لیزر تاثیر فراوانی در فیزیک فرآیند دارد و تغییرات سرعت روبش فرآیند، میزان همپوشانی پالس‌ها، انرژی ورودی به قطعه و زمان برهمکنش پرتو لیزر و سطح را نیز تغییر خواهد داد. با افزایش سرعت روبش، از یک سو، میزان همپوشانی پالس‌ها کاهش یافته و در نتیجه انرژی وارده به قطعه یا به عبارت دیگر، میزان حرارت تولید شده کاهش خواهد یافت و همچنین باعث کاهش مقدار انرژی در واحد طول می‌شود و از سوی دیگر، کاهش زمان

ذرات TiC، با افزایش سرعت روبش، با کم‌ترین تغییر

نسبت به مورفولوژی اولیه خود باقی می‌مانند.

کاهش سرعت روبش، انحلال ذرات TiC را افزایش داده و در نتیجه پس از انجماد، در داخل ریز ساختار، کاربیدهایی که مجدداً منجمد شده‌اند، ترکیبی از کاربید تیتانیوم و عناصر آلیاژی فاز زمینه هستند که با مورفولوژی‌های دندریتی، کروی و میله‌ای مشاهده می‌شوند. با بیش‌تر شدن مقدار انحلال ذرات TiC در حوضچه مذاب، کروی بودن سبب افزایش انرژی آزاد سطحی می‌شود، لذا این ذرات به منظور کاهش انرژی آزاد، به صورت مکعبی، چند ضلعی، لایه‌ای، دندریتی و گلبستگی در ریزساختار ظاهر

می‌شوند [۳۱].
شکل ۵، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از قسمت میانی مقطع عرضی لایه کامپوزیت شده در سرعت‌های روبش متفاوت را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵ (الف)، مشاهده می‌شود که به‌علت بالا بودن سرعت روبش پرتو لیزر و در نتیجه، کم‌تر بودن زمان برهمکنش پرتو لیزر و سطح زیرلایه، حرارت کمتری به قطعه وارد می‌شود و انحلال ذرات TiC بسیار ناچیز است؛ به همین دلیل ذرات TiC تقریباً با مورفولوژی اولیه خود، به طور یکنواخت در منطقه کامپوزیت شده توزیع شده‌اند.



شکل ۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از مقطع عرضی منطقه کامپوزیت شده در فاصله کاری ۴ (mm) و عرض پالس ۸ (ms). (الف) سرعت روبش ۱۲ (mm/s)، (ب) سرعت روبش ۷ (mm/s)، (ج) سرعت روبش ۲ (mm/s)

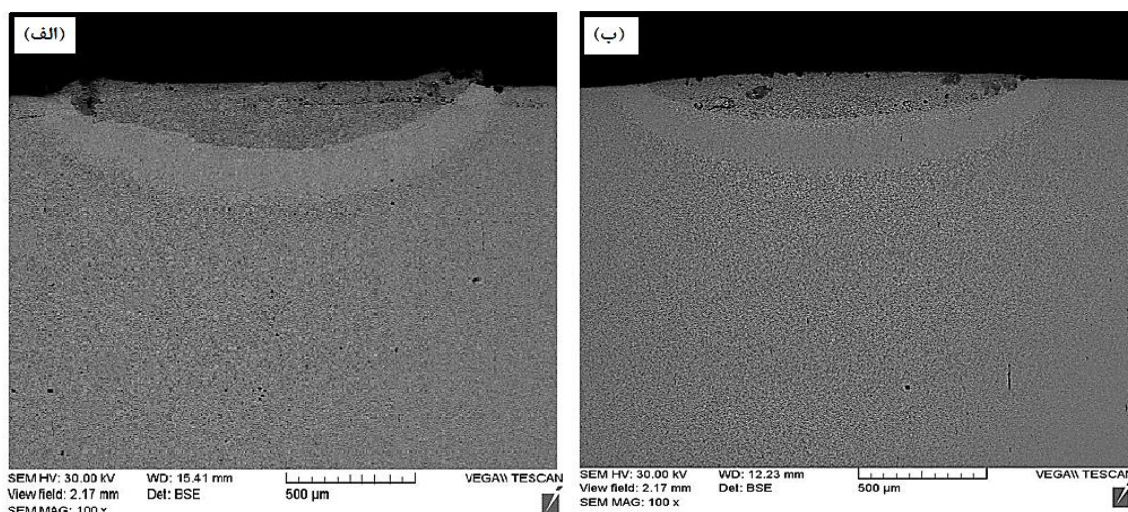
تأثیر عرض پالس لیزر بر ریزساختار منطقه کامپوزیت- شده و HAZ

شکل ۶، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع عرضی لایه کامپوزیت شده در عرض پالس‌های ۶، ۸ و ۱۰ ms را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، افزایش عرض پالس لیزر، سبب کاهش عمق و عرض منطقه کامپوزیت شده و HAZ شده است. عرض پالس نیز همانند سرعت روبش پرتو لیزر، تأثیر فراوانی در فیزیک فرآیند دارد و تغییرات عرض پالس لیزر، میزان توان بیشینه ورودی به قطعه، شدت لیزر، زمان تابش پرتو لیزر و در نتیجه، حرارت ورودی به قطعه را تغییر خواهد داد.

با توجه به شکل ۶، با افزایش عرض پالس، توان بیشینه و شدت پرتو لیزر اعمال شده روی سطح کاهش یافته است که این امر، حرارت و حجم حوضچه مذاب تشکیل شده روی سطح قطعه را کاهش داده است. بنابراین، عمق و عرض منطقه کامپوزیت شده و HAZ کاهش یافته است [۳۲].

در شکل ۵ (ب)، کم‌تر شدن سرعت روبش، سبب بیش‌تر شدن زمان برهمکنش پرتو لیزر و سطح زیرلایه و در نتیجه بیش‌تر شدن حرارت ورودی به قطعه می‌شود که این امر، افزایش انحلال ذرات TiC در حوضچه مذاب را به دنبال دارد. همان‌گونه که در شکل ۵ (ب) مشخص است، به علت انحلال موضعی کاربیدهای اولیه، اندازه آن‌ها کوچک‌تر شده و از نظر مورفولوژی، کروی‌تر شده‌اند؛ در حالی که کاربیدهایی که حل شده و مجدداً منجمد شده‌اند، با مورفولوژی مکعبی، گلبگی و دندریتی ظاهر شده‌اند.

در شکل ۵ (ج)، سرعت روبش پرتو لیزر کم‌ترین مقدار خود را دارد که در این حالت تقریباً تمام کاربیدهای اولیه حل شده‌اند، بنابراین در این حالت، کاربیدها بیش‌ترین چگالی خود را در حوضچه مذاب داشته‌اند و پس از انجماد، برای کاهش انرژی آزاد سطحی با مورفولوژی دندریتی رسوب کرده‌اند. با دقت بیش‌تر در شکل ۵ (ج)، مشاهده می‌شود که کاربیدهایی که با مورفولوژی دندریتی رشد کرده‌اند، توسط کاربیدهای بسیار ریز ثانویه که میله‌ای و کروی شکل هستند، احاطه شده‌اند. به طور کلی می‌توان بیان کرد که با افزایش انحلال ذرات TiC و در نتیجه افزایش چگالی آن‌ها در حوضچه مذاب، کاربیدهایی که مجدداً رسوب می‌کنند، برای به حداقل رساندن انرژی آزاد سطحی، مورفولوژی آن‌ها از کروی به مکعبی، گلبگی، میله‌ای (شبه دندریتی) و دندریتی تغییر می‌کند.



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع عرضی منطقه کامپوزیت شده در فاصله کاری ۵ (mm) و سرعت

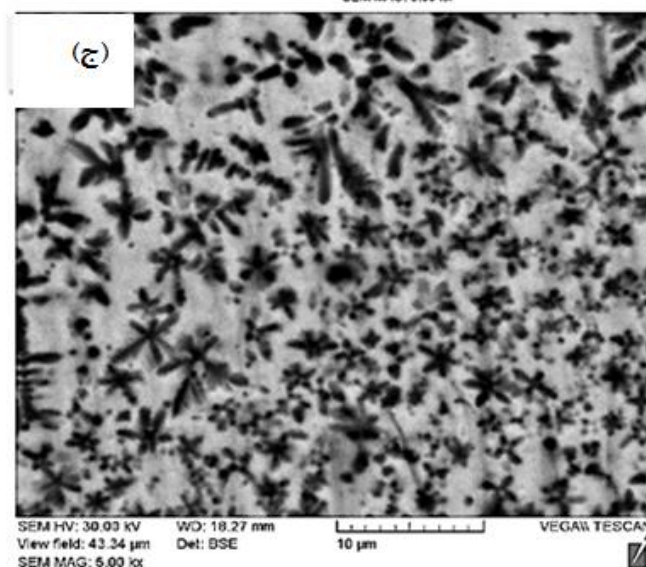
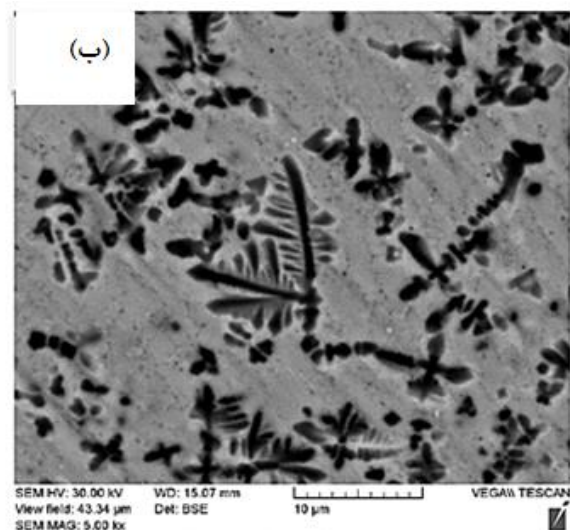
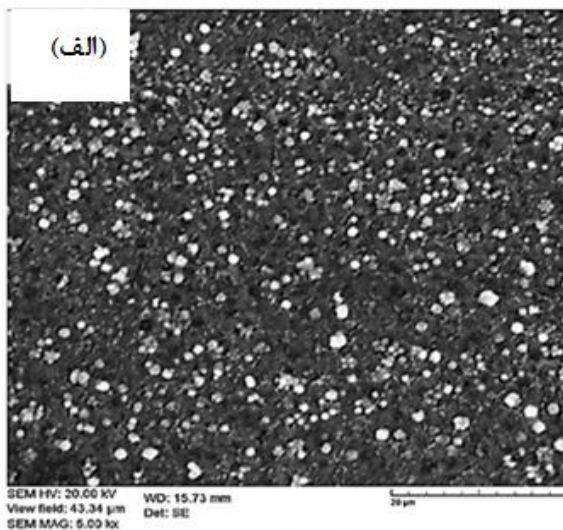
روبش ۲ (mm/s). الف) عرض پالس ۶ (ms)، ب) عرض پالس ۱۰ (ms)

شده، در نتیجه انحلال ذرات TiC کاهش می‌یابد که این روند با مقایسه شکل ۷ (الف، ب، ج)، به وضوح قابل استنتاج است.

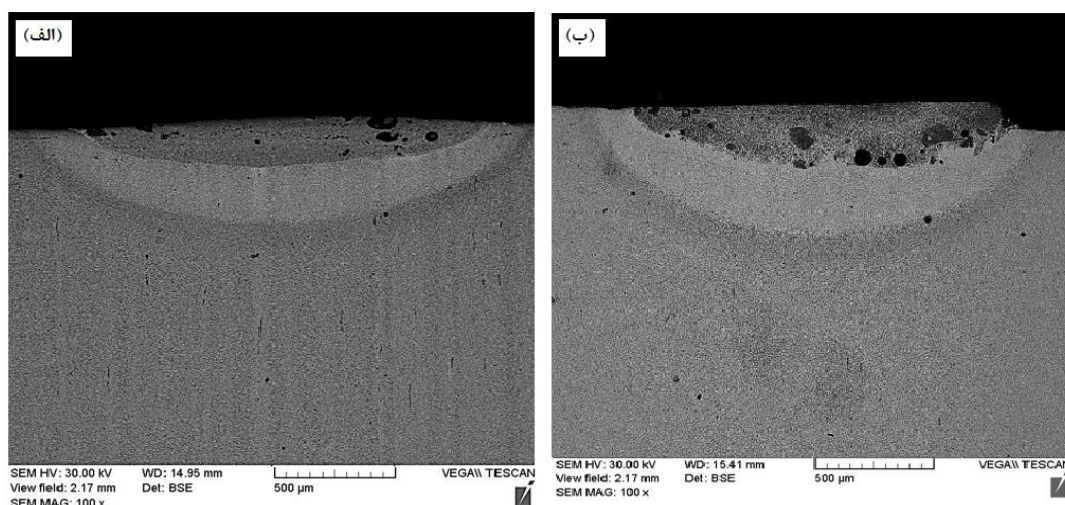
با توجه به شکل ۶، کاهش عرض پالس، زمان تابش پرتو لیزر را کاهش داده است که این امر، سبب افزایش گرادیان دمایی $\left(\frac{\partial T}{\partial X}\right)$ در منطقه کامپوزیت شده و همچنین افزایش نرخ سرد شدن $\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)$ شده است؛ بنابراین کاربیده‌های انحلال یافته با هر مورفولوژی که منجمد شوند، اندازه آن‌ها ریزتر می‌شود [۳۲].

شکل ۷، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از قسمت میانی مقاطع عرضی لایه کامپوزیت شده در عرض پالس‌های متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مشخص است، کاهش عرض پالس از یک سو، سبب افزایش انحلال ذرات TiC و از سوی دیگر، باعث کاهش اندازه ذرات کاربیدهایی که حل شده و مجدداً منجمد شده‌اند، شده است. با مقایسه شکل ۷ (ب) و (ج)، کاهش اندازه کاربیده‌های دندریتی و میله‌ای شکل را در اثر کاهش عرض پالس، شاهد هستیم.

افزایش عرض پالس، سبب کاهش دمای حوضچه مذاب



شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع عرضی منطقه کامپوزیت شده در فاصله کاری ۵ (mm)، سرعت روبش ۲ (mm/s). (الف) عرض پالس ۱۰ (ms)، (ب) عرض پالس ۸ (ms)، (ج) عرض پالس ۶ (ms)



شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع عرضی منطقه کامپوزیتی در عرض پالس ۸ (ms) و سرعت روبش ۱۲ (mm/s). الف) فاصله کاری ۶ (mm)، ب) فاصله کاری ۴ (mm)

منطقه کامپوزیت شده کاهش یافته؛ اما به علت نفوذ حرارت به قسمت‌های درونی‌تر قطعه، لذا عمق منطقه کامپوزیتی و HAZ افزایش یافته است.

شکل ۹، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از قسمت میانی مقطع عرضی منطقه کامپوزیت شده در فاصله‌های کاری متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل ۹ مشخص است، کاهش فاصله کاری پرتو لیزر، از یک سو، سبب افزایش انحلال ذرات TiC و تغییر مورفولوژی اولیه این ذرات شده است و از سوی دیگر، نیز باعث کوچک‌تر شدن اندازه کاربیدهایی شده است که مجدداً با مورفولوژی‌های متفاوت رسوب کرده‌اند.

با توجه به شکل ۹، کاهش فاصله کاری، سبب کاهش هم‌پوشانی پالس‌ها و سطح هم‌پوشانی شده می‌شود؛ در نتیجه اثر پیش‌گرم و پس‌گرم منطقه تحت فرآوری، کاهش می‌یابد و از طرفی، زمان برهم‌کنش پرتو لیزر و سطح قطعه نیز کاهش می‌یابد، لذا نرخ سرد شدن افزایش یافته و کاربیدهایی که در اثر نزدیک شدن پرتو لیزر به سطح و تمرکز موضعی بیش‌تر حرارت حوضچه مذاب، ذوب شده

تأثیر فاصله کاری پرتو لیزر بر ریزساختار منطقه کامپوزیت شده و HAZ

منظور از فاصله کاری، فاصله نازل پرتو لیزر تا سطح قطعه است. شکل ۸، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع عرضی لایه کامپوزیتی در فاصله‌های کاری ۴، ۵ و ۶ mm را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است، کاهش فاصله کاری پرتو لیزر، از یک سو، سبب افزایش عمق منطقه کامپوزیتی و HAZ و از سوی دیگر، باعث کاهش عرض منطقه کامپوزیتی شده است.

تغییرات فاصله کاری، باعث تغییر میزان هم‌پوشانی پالس‌ها، مساحت مناطق هم‌پوشانی کرده و زمان برهم‌کنش پرتو لیزر و سطح قطعه می‌شود.

با توجه به شکل ۸، با افزایش فاصله کاری، هم‌پوشانی پالس‌ها و مساحت منطقه هم‌پوشانی شده، افزایش یافته، در نتیجه عرض منطقه کامپوزیت شده، بیش‌تر شده است [۳۲، ۲۹]. با کاهش فاصله کاری، به علت تمرکز پرتو لیزر روی مساحت کمتری از سطح و همچنین تمرکز حرارت پرتو لیزر به منطقه کوچکتری از قطعه، بنابراین عرض

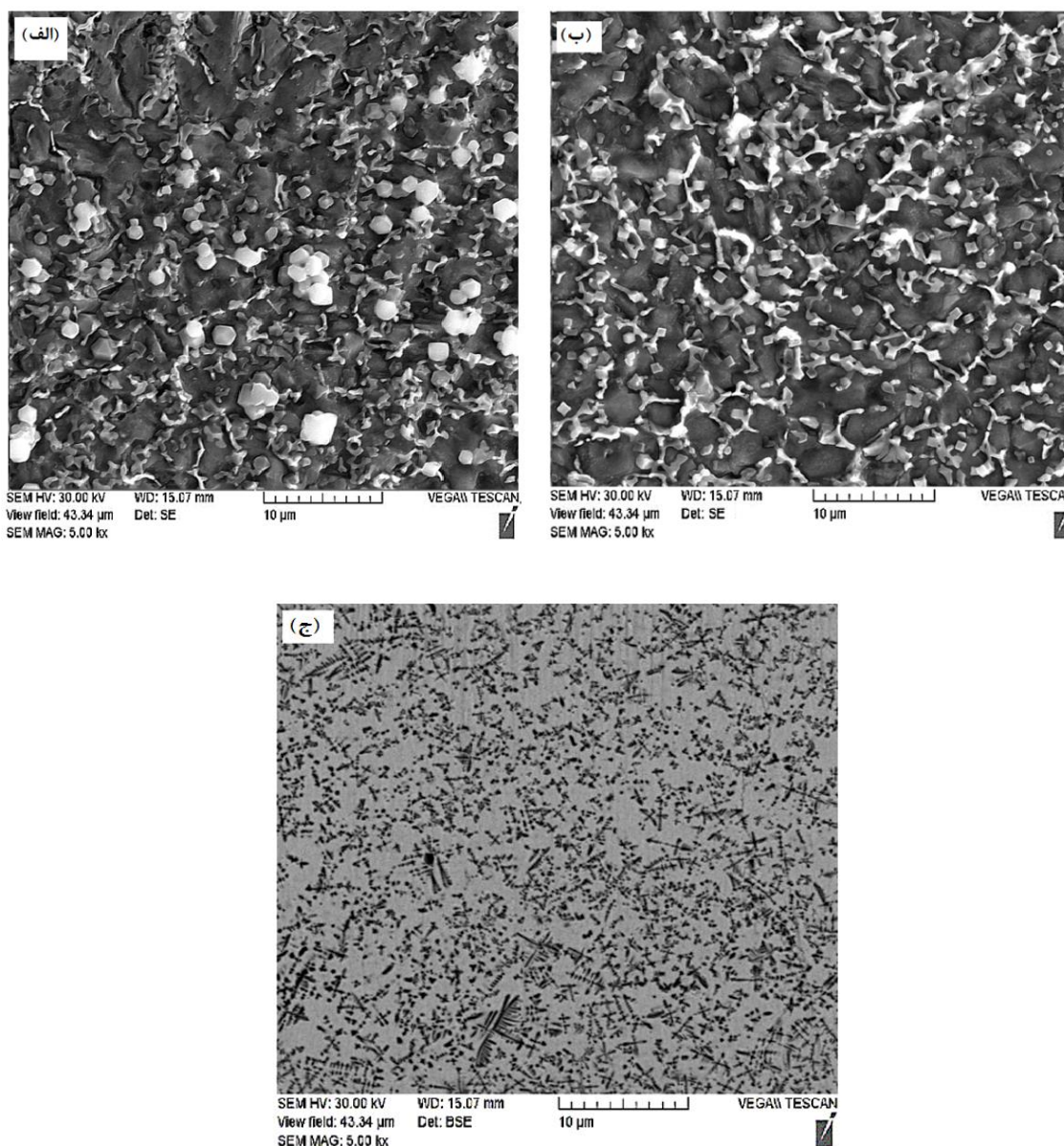
آزمون ریزسختی منطقه کامپوزیتی، به صورت رابطه (۵) ارائه شده است. دقت رابطه ارائه شده نیز توسط نتایج ارائه شده در جدول ۶ مورد ارزیابی قرار گرفت.

بودند، با اندازه‌های کوچک‌تر نسبت به فواصل کاری بیشتر، رسوب کرده‌اند [۲۹ و ۳۲ و ۳۲].

بهینه‌سازی ریزسختی ناحیه کامپوزیت‌شده

معادله ریاضی حاصل از برازش نتایج به‌دست آمده از

$$Y \text{ (microhardness)} = 1307 + 251 X_1 + 97.25 X_2 + 28 X_3 - 42 X_1 X_2 - 22.5 X_1 X_3 - 5 X_2 X_3 - 27 X_1^2 + 12.5 X_2^2 + 10 X_3^2 \quad (5)$$



شکل ۹- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مقطع عرضی منطقه کامپوزیتی در عرض پالس ۸ (ms) و سرعت روبش ۱۲ (mm/s). الف) فاصله کاری ۶ (mm)، ب) فاصله کاری ۵ (mm)، ج) فاصله کاری ۴ (mm)

جدول ۶- نتایج حاصل از برازش داده‌های به دست آمده از آزمون ریزسختی منطقه کامپوزیت شده

R2	مقدار P	مقدار F	Mean square	Degrees of freedom	نوع داده‌های آماری
۰/۹۸۷	۰/۰۰۰۱	۵۳۲/۹۲	۶۶۵۶۱/۹	۹	مقدار داده‌ها بر اساس مدل ارائه شده

افزایش فاصله کاری، باعث اعمال انرژی حرارتی پرتو

لیزر به سطح بیشتری از قطعه می‌شود که این امر، کاهش حرارت حوضچه مذاب تشکیل شده را در پی داشته است؛ لذا افزایش فاصله کاری پرتو لیزر، باعث افزایش مقدار ذرات TiC ذوب نشده و در نتیجه افزایش ریزسختی ناحیه کامپوزیتی، شده است.

نتیجه‌گیری

۱- با افزایش سرعت روبش پرتو لیزر، هم‌پوشانی پالس‌ها کم‌تر شده و مقدار انرژی حرارتی کمتری به قطعه وارد می‌شود، بنابراین حرارت حوضچه مذاب نیز کاهش یافته، در نتیجه از یک سو، عمق و عرض منطقه کامپوزیتی و عمق منطقه HAZ کاهش یافته و از سوی دیگر، مقدار TiC انحلال یافته کم‌تر شده است، لذا سختی منطقه کامپوزیت شده افزایش یافته است.

۲- افزایش عرض پالس، سبب کاهش توان بیشینه، شدت پرتو لیزر اعمال شده روی سطح و حرارت حوضچه مذاب شده و در نتیجه انحلال ذرات TiC در حوضچه مذاب کاهش یافته که این امر افزایش سختی در ناحیه کامپوزیت شده را در بر دارد.

۳- افزایش فاصله کاری، باعث اعمال انرژی حرارتی پرتو لیزر به سطح بیشتری از قطعه می‌شود که این امر، کاهش حرارت حوضچه مذاب تشکیل شده را در پی داشته است؛ لذا افزایش فاصله کاری پرتو لیزر، باعث افزایش مقدار ذرات TiC

جدول ۶، اطلاعات آماری که توسط نرم‌افزار Design Expert 8.0.7.1 محاسبه و ارائه شده است را نشان می‌دهد که هر یک از این متغیرها قابل بازیابی بوده و میزان موثر بودن رابطه استخراج شده را نشان می‌دهند.

مقدار R^2 برابر است با ۰/۹۸۷ که این مقدار بیانگر این است که ۹۸/۷ درصد داده‌ها توسط معادله، برازش داده شده‌اند و مقدار p -value برای موثر بودن این رابطه را نشان می‌دهد.

شکل ۱۰، نمودارهای بررسی تاثیر تغییرات سرعت روبش، عرض پالس و فاصله کاری پرتو لیزر بر ریزسختی منطقه کامپوزیت شده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰ و نتایج و تحلیل‌های ارائه شده در قسمت‌های مربوط به بررسی تاثیر متغیرهای فرآیند لیزر بر ریزسختی منطقه کامپوزیت شده، می‌توان بیان کرد که با کاهش سرعت روبش پرتو لیزر، مقدار انرژی حرارتی بیشتری به قطعه وارد می‌شود. بنابراین، حرارت حوضچه مذاب نیز افزایش یافته و در نتیجه مقدار TiC انحلال یافته بیش‌تر شده است. با توجه به اینکه کاربردهای جدیدی که مجدداً در منطقه کامپوزیتی رسوب کرده‌اند، ترکیبی از کاربرد تیتانیوم و عناصر آلیاژی فاز زمینه هستند، لذا این کاربردها نسبت به کاربردهای تیتانیوم اولیه سختی کمتری دارند، لذا با کاهش سرعت روبش پرتو لیزر، سختی ناحیه کامپوزیتی کاهش یافته است.

با افزایش عرض پالس، توان بیشینه و شدت پرتو لیزر اعمال شده روی سطح کاهش یافته است که این امر، سبب کاهش انحلال ذرات TiC در حوضچه مذاب و در نتیجه افزایش سختی در این ناحیه شده است.

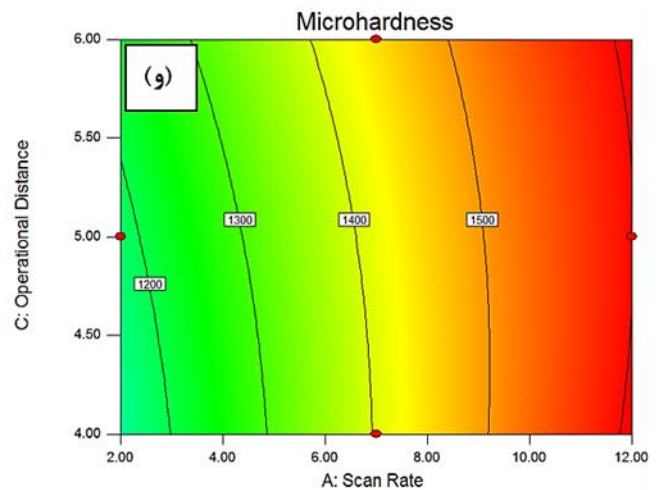
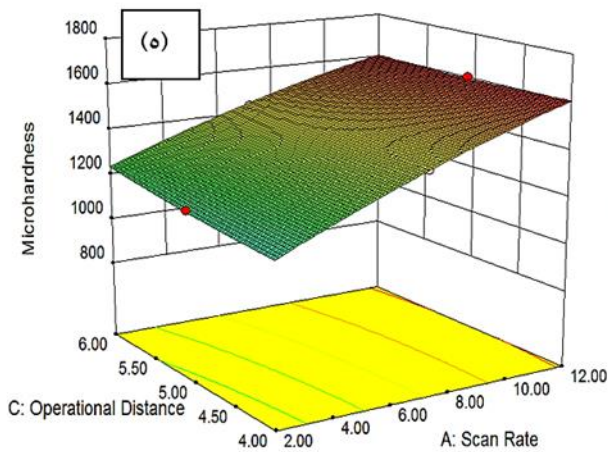
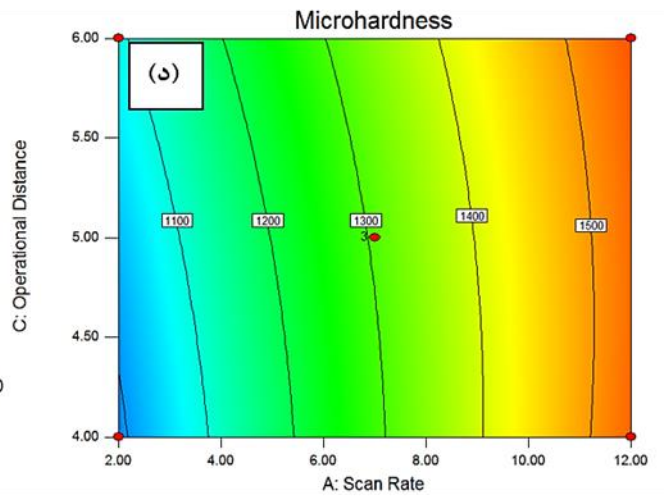
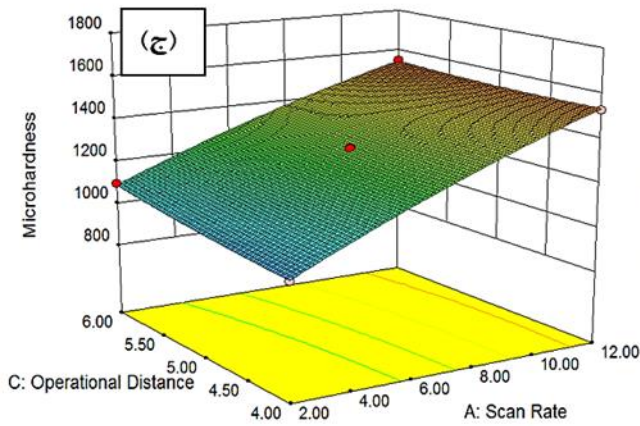
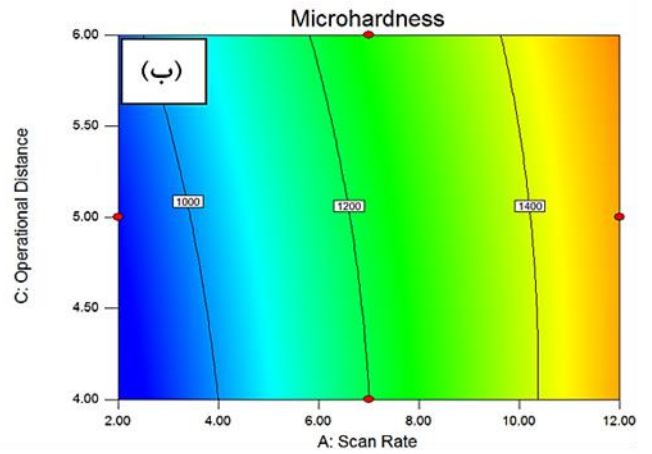
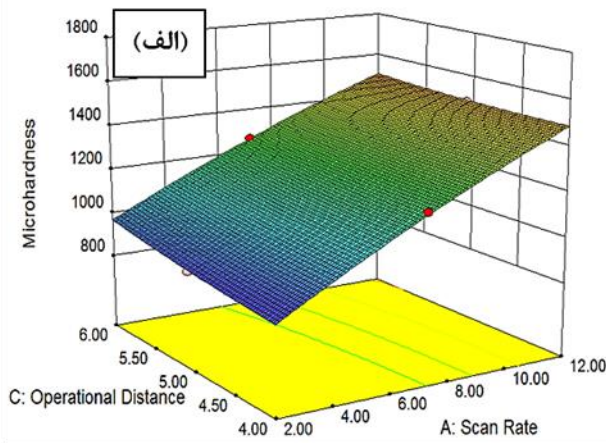
ذوب نشده و در نتیجه موجب افزایش ریزسختی ناحیه کامپوزیت شده است

۹/۹۶ ms و فاصله کاری ۵/۹۴ mm باشد که در این حالت مقدار ریزسختی سطح کامپوزیت شده ۱۶۰۶ ویکرز است.

۴- متغیرهای فرآیند لیزر جهت دستیابی به سطح کامپوزیتی با خواص تریبولوژیکی بهینه، با استفاده از فاز بهینه‌یابی روش طراحی آزمایش RSM بهینه‌یابی شد و روابط ریاضی برای تمام پاسخ‌های تعریف شده در این طراحی، ارائه شد. شرایط بهینه متغیرهای فرآیند لیزر، زمانی است که سرعت روبش ۱۲ mm/s، عرض پالس

تشکر و قدردانی

با تشکر و سپاس فراوان از مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران که همکاری لازم را در جهت انجام این پژوهش به-عمل آوردند.



شکل ۱۰- نمودارهای بررسی تاثیر تغییرات سرعت روبش، عرض پالس و فاصله کاری پرتو لیزر بر ریزسختی منطقه کامپوزیتی. الف، ب) عرض پالس ۶ (ms)، ج، د) عرض پالس ۸ (ms)، ه، و) عرض پالس ۱۰ (ms)

References:

- 1-S. Jhavar, C.P. Paul, N.K. Jain, "Causes of failure and repairing options for dies and molds: A review", *Engineering Failure Analysis*, 34 (2013) 519-535.
- 2-B. AlMangour, D. Grzesiak, J.M. Yang, "Nanocrystalline TiC-reinforced H13 steel matrix nanocomposites fabricated by selective laser melting", *Material and Design*, 96 (2016) 150-161.
- 3-B.S. Yilbas, F. Patel, C. Karatas, "Laser controlled melting of H12 hot-work tool steel with B4C particles at the surface", *Optic and Laser Technology*, 74 (2015) 36-42.
- ۴-ش. خیراندیش، م. عادل، م. اسدی اسدآبادی و ی. رضالو، "فولادهای ابزار"، مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت، (۱۳۸۸).
- 5-H. Jespersen, C. Nilsson, "The Influence of the cooling rate during quenching and preheating temperature on the toughness of a hot-work tool steel", *BHM Bergrund Hüttenmännische Monatshefte*, 157 (2012) 401-405.
- 6-X. Zhang, X. J. Liuyan, Z. S. Luo, Q. Zheng, "Improving the High-Temperature Oxidation Resistance of H13 Steel by Laser Cladding with a WC/Co-Cr Alloy Coating", *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 11 (2015).
- 7-J.H. LEE, J.H. Jang, B.D. Joo, Y.M. Son, .H. Moon, "Laser surface hardening of AISI H13 tool steel", *Trans. Nonferrous. Met. Soc. China*, 19 (2009) 917-920.
- 8-J. Davis, "Surface Hardening of Steels", ASM International, Materials Park, OH, (2002) 227.
- 9-H. J. Shin, Y. T. Yoo, "Microstructural and hardness investigation of hot-work tool steels by laser surface treatment", *Journal of Materials Processing Technology*, 201 (2008) 342-347.
- 10-E. Pagounis, V. Lindroos, M. Talvitie, "Influence of reinforcement volume fraction and size on the microstructure and abrasion wear resistance of hot isostatic pressed white iron matrix composites", *Metall. Mater. Trans. A* 27 (1996) 4171-4181.
- 11-F. Akhtar, "Microstructure evolution and wear properties of in situ synthesized TiB2 and TiC reinforced steel matrix composites", *J. Alloys Compd.* 459 (2008) 491-497.
- 12-W. Jiang, P. Molian, "Nanocrystalline TiC powder alloying and glazing of H13 steel using a CO2 laser for improved life of die-casting dies", *Surf. Coat. Technol.* 135 (2001) 139-149.
- 13-Womersley D. "Thermal spraying and powder spray welding processes for the hardfacing of grey cast iron", *Mater Des*, 11 (1990) 153-1555.
- 14-Liu YF, Mu JS, Xu XY, Yang SZ, "Microstructure and dry-sliding wear properties of TiC-reinforced composite coating prepared by plasma-transferred arc weldsurfacing process", *Mater Sci Eng*, 458 (2007) 366-370.
- 15-Lin Yu-Chi, Chen Han-Ming, Chen Yong-Chwang, "Analysis of microstructure and wear performance of SiC clad layer on SKD61 die steel after gas tungsten arc welding", *Mater Des*, 47 (2013) 828-835.
- 16-Yasavol N, Abdollah-zadeh A, Ganjali M, Alidokht SA. "Microstructure and mechanical behavior of pulsed laser surface melted AISI D2 cold work tool steel". *Appl Surf Sci*, 265 (2013) 653-662.
- 17-Yilbas BS, Patel F, Karatas C. "Laser controlled melting of HSLA steel surface with presence of B4C particles", *Appl Surf Sci*, 282 (2013) 601-606.

18-A. Chehrghani, M. J. Torkamany, M. J. Hamedi, J. Sabbaghzadeh, "Numerical modeling and experimental investigation of TiC formation on titanium surface pre-coated by graphite under pulsed laser irradiation", *Applied Surface Science*, 258 (2012) 2068-2076.

19-Dalong Cong, Zhou Hong, Ren Zhenan, Zhang Haifeng, Ren Luquan, Meng Chao, "Thermal fatigue resistance of hot work die steel repaired by partial laser surface remelting and alloying process", *Opt Lasers Eng*, 54 (2014) 55-61.

20-Xing Youqiang, Jianxin Deng, Xiuting Feng, Sheng Yu. "Effect of laser surface texturing on Si₃N₄/TiC ceramic sliding against steel under dry friction. Effect of laser surface texturing on Si₃N₄/TiC ceramic sliding against steel under dry friction", *Mater Des*, 52 (2013) 234-245.

21-G. Telasang, J. Dutta Majumdar, G. Padmanabham, M. Tak, I. Manna, "Effect of laser parameters on microstructure and hardness of laser clad and tempered AISI H13 tool steel", *Surface & Coatings Technology*, 258 (2014) 1108-1118.

22-D. Verdi, C.J. Múnez, F. Sevillano, P. Poza, "Laser surface alloying of Gr22 ferritic steel with Ni(Al): Effect of processing parameters on the microstructure and high temperature performance", *Journal of Materials Processing Technology*, 213 (2013) 1825-1834.

23-G. A. Roberts, R. Kenney, "Tool Steel", *ASM International*, (1998) 221.

24-V. Fallah, S.F. Corbin, A. Khajepour, "Solidification behaviour and phase formation during pre-placed laser cladding of Ti45Nb on mild steel", *Surface and Coatings Technology*, 204 (2010) 2400-2409.

25-K. Cruz-González, O. Torres-López, A.

García-León, J.L. Guzmán-Mar, L.H. Reyes, A. Hernández-Ramírez, J.M. Peralta-Hernández, "Determination of optimum operating parameters for Acid Yellow 36 decolorization by electro-Fenton process using BDD cathode", *Chemical Engineering Journal*, No.160 (2010) 199-206.

26-J.P. Wang, Y.Z. Chen, X.W. Ge, H.Q. Yu, "Optimization of coagulation-flocculation process for a paper-recycling wastewater treatment using response surface methodology", *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, No.302 (2007) 204-210.

27-B. Oraon, G. Majumdar, B. Ghosh, "Application of response surface method for predicting electroless nickel plating", *Materials and Design*, No.27 (2006) 1035-1045.

28-R. Soleimani, F. Mahboubi, S.Y. Arman, M. Kazemi, A. Maniee, "Development of mathematical model to evaluate microstructure and corrosion behavior of electroless Ni-P/nano-SiC coating deposited on 6061 aluminum alloy", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 23 (2015) 328-337.

29-M. Torkamany, M. J. Hamedi, F. Malek J. Sabbaghzadeh, "The effect of process parameters on keyhole welding with a 400 W Nd:YAG pulsed laser", *Journal of Physics*, 39(2006) 45663.

30-B. Du, A.N. Samant, S.R. Paital, N.B. Dahotre, "Pulsed laser synthesis of ceramic-metal composite coating on steel", *Applied Surface Science*, 255 (2008) 3188-3194.

31-J. D. Majumdar, I. Manna, "Laser processing of materials", *Sadhana*, 28 (2003) 495-562.

32-B. Courant, J. J. Hantzperigue, L. AVRIL, S. Benayoun, "Structure and hardness of titanium surfaces carburized by pulsed laser melting with graphit addition", *Journal of Material Processing Technology*, 160 (2005) 374-381.

۳۳- غ. رضوی، م. سبکتکین ریزی، م. طاهری، " بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی جوشکاری لیزر و قوس الکتریکی تیتانیوم خالص تجاری"، *مجله مواد نوین*، (۱۳۹۳).