



باسمه تعالی  
دانشگاه صنعتی اصفهان  
دانشکده مهندسی مواد

## سمینار دفاع از رساله دکتری مهندسی مواد

با عنوان

# بررسی مکانیزم‌های انجمادی موثر در تولید درجای آلیاژهای پایه تیتانیوم به روش ساخت افزایشی بر پایه بستر پودر

ارائه کننده: محمد حسین مصلی نژاد

زمان: یکشنبه ۲۲ خرداد ۱۴۰۱ - ساعت ۱۱ مکان: سالن سمینار دانشکده مهندسی مواد

### اعضای کمیته داوری:

استاد راهنما: دکتر بهزاد نیرومند

اساتید مشاور: دکتر مهدی جوانبخت - دکتر عبدالله صبوری

اساتید داور: دکتر محمود مرآتیان - دکتر احمد رضائیان - دکتر محسن حداد سبزواری

### چکیده:

روش‌های ساخت افزایشی، از جمله فناوری‌های نوظهوری هستند که در آنها تولید قطعات به صورت لایه لایه از روی مدل‌های سه بعدی رایانه‌ای انجام می‌شود. روش ذوب انتخابی بستر پودر با لیزر (LPBF)، که در آن پرتوی لیزر قسمت‌های مشخصی از یک بستر پودر از پیش آماده شده را ذوب می‌کند، یکی از روش‌های اصلی ساخت افزایشی قطعات فلزی است. با توجه به در دسترس نبودن و هزینه بالای پودرهای آلیاژی با ترکیب دلخواه، مطالعه تولید درجای آلیاژها به روش ساخت افزایشی با استفاده از پودر عناصر تشکیل دهنده آنها، امری مهم و ضروری است. متفاوت بودن خواص نوری، حرارتی و ترموفیزیکی اجزای تشکیل دهنده آلیاژ، چالش‌هایی را در مسیر آلیاژسازی درجای موفق ایجاد می‌کند. از این رو برای دستیابی به آلیاژی همگن با خواص مطلوب، شناخت و بررسی این پدیده‌ها و عوامل موثر بر آنها، نظیر توان لیزر و سرعت روبش لیزر، بسیار با اهمیت است. هم‌چنین، رخداد انجماد به صورت سریع، وجود شیب دمایی بسیار زیاد، تشکیل دانه‌های ستونی و بافت قوی، از مشکلاتی است که در قطعات ساخت افزایشی به چشم می‌خورد. در این راستا، افزودن عناصر آلیاژی با هدف ایجاد تحت تبرید ترکیبی و بهبود شرایط برای تشکیل دانه‌های هم‌محور انجام می‌گیرد. از طرفی، ساخت درجای آلیاژهای تیتانیوم، به دلیل داشتن خواص مکانیکی، خوردگی و زیستی مناسب، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است. افزودن عنصر مس به تیتانیوم نه تنها منجر به بهبود خواص خوردگی و زیستی تیتانیوم می‌شود، ریز ساختار ستونی تیتانیوم را به هم‌محور تبدیل کرده و منجر به بهبود خواص مکانیکی این آلیاژ می‌شود. با این حال، پژوهش‌های بسیار اندکی به بررسی آلیاژسازی درجای ترکیب  $Ti-Cu$  پرداخته‌اند. از این رو در پژوهش حاضر آلیاژهای  $Ti-5wt.\%Cu$  به صورت درجا به روش LPBF ایجاد شده و علاوه بر بررسی ریز ساختار، تاثیر پارامترهای فرایند ساخت بر ریز ساختار و میزان موفقیت آلیاژسازی مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی تاثیر عنصر  $B$  در کنار عنصر  $Cu$ ، آلیاژ  $Ti-1wt.\%Cu-0.1wt.\%B$  نیز به همین روش تولید و بررسی شد. ریزساختار نمونه‌های تولید شده به وسیله میکروسکوپ نوری و الکترونی مطالعه شد و تغییرات ریزساختاری و فازهای موجود در آلیاژها با استفاده از روش پراش پرتوی ایکس مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به در نظر گرفته نشدن خواص ذاتی ماده در رابطه چگالی انرژی حجمی (VED)، رابطه‌ی جدیدی تحت عنوان انرژی موثر ( $E_{eff}$ ) مبتنی بر ضریب نفوذ حرارتی و دمای ذوب، ارایه شد. معادله تحلیلی روزنتال نیز برای بررسی ابعاد حوضچه مذاب و نحوه ذوب شدن اجزای آلیاژ در نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که ساخت درجای آلیاژهای  $Ti-5wt.\%Cu$  و  $Ti-1wt.\%Cu-0.1wt.\%B$  به روش LPBF امکان پذیر است. علیرغم اختلاف نظرهای موجود در بین پژوهشگران، نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش چگالی انرژی ورودی منجر به بزرگتر شدن حوضچه مذاب و کاهش سرعت سرد شدن آن می‌شود. این امر در نمونه‌های  $Ti-5wt.\%Cu$  موجب کامل تر شدن فرایند آلیاژسازی و افزایش میکرو کرنش شبکه بلور آلیاژ در مقادیر چگالی انرژی بالاتر شد. نتایج نشان داد که انتخاب اندازه پودر عناصر می‌بایست بر اساس ویژگی‌های حرارتی و نوری عناصر، خصوصاً ضریب جذب و ضریب هدایت حرارتی صورت پذیرد. براساس مشاهدات ریزساختاری و شبیه‌سازی، سازوکاری برای ذوب مخلوط  $Ti$  و  $Cu$  در اثر پرتوی لیزر در شرایط پژوهش حاضر پیشنهاد شد که براساس آن ابتدا ذرات تیتانیوم ذوب شده و سپس ذرات مس در مذاب ایجاد شده ذوب و حل می‌شود. افزودن عنصر  $Cu$  و  $B$ ، هر دو منجر به هم‌محور شدن برخی از دانه‌های بتای اولیه شد. اندازه میانگین این دانه‌ها در نمونه  $Ti-1wt.\%Cu-0.1wt.\%B$ ،  $7\ \mu m$  اندازه گیری شد. براساس محاسبات مبتنی بر نمودار سرد شدن آلیاژها، مقدار فاکتور محدود کننده رشد ( $Q$ ) برای آلیاژها محاسبه شد. این عدد برای آلیاژهای  $Ti-5wt.\%Cu$  و  $Ti-1wt.\%Cu-0.1wt.\%B$  به ترتیب  $K$  ۳۵/۵۳ و  $K$  ۱۵ بدست آمد. براساس محاسبات، بیش از ۵۰٪ این اثر در آلیاژ دوم ناشی از افزودن عنصر  $B$  بود. براساس مشاهدات ریز ساختاری، الگوی روبش تاثیر بسزایی بر میزان موفقیت آلیاژسازی داشت. به ویژه، انجام فرایند ذوب مجدد نواحی غنی از تیتانیوم را تا حدود ۹۸٪ درصد کاهش داد. همچنین برای اولین بار فاز تیتانیوم آلفا با شکل دوگانه کرووی و کشیده در کنار فاز یوتکتوئید غیر لایه‌ای مشاهده شد.

**کلمات کلیدی:** ساخت افزایشی، ذوب انتخابی بستر پودر با لیزر، آلیاژسازی درجا، انجماد سریع، تیتانیوم، روزنتال.