

## پژوهش‌نامه ریخته‌گری

### مقاله پژوهشی:

# تأثیر تغییر شکل پلاستیک شدید سطحی بر ریزساختار و خواص مکانیکی تیتانیوم خالص تولیدشده به روش ذوب لیزر انتخابی

ایمان انصاریان<sup>۱</sup>، رضا تقی‌آبادی<sup>۲\*</sup>، سعید امینی<sup>۳</sup>، عبدالله صبوری<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۲- دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۳- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

۴- استادیار، دانشکده مدیریت و مهندسی تولید، دانشگاه پلی تکنیک تورین، ایتالیا

\* نویسنده مکاتبه کننده: تلفن: ۰۲۸-۳۳۹۰۱۱۴۳، قزوین، کد پستی: ۹۶۸۱۸-۳۴۱۴۸، Email: taghiabadi@ikiu.ac.ir

### چکیده:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۹

در تحقیق حاضر تأثیر فرایند کوبش فراصوتی (UP) در سرعت‌های پیشروی مختلف بر ریزساختار و خواص مکانیکی تیتانیوم خالص تجاری ذوب لیزر انتخابی شده (SLMed) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بررسی‌های ساختاری نشان داد که اعمال فرایند UP موجب کاهش چشمگیر نسبت طول به عرض تیغه‌های مارتنزیت سوزنی ( $\alpha'$ ) و کاهش ناهمسانگردی ساختاری تیتانیوم SLM شده می‌شود. بهترین عملکرد فرایند در سرعت پیشروی ابزار معادل ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور مشاهده شد که در آن نسبت طول به عرض تیغه‌های مارتنزیت در نواحی سطحی از ۱۶ به ۴/۵ کاهش و سختی سطح نمونه حدود ۷۰ درصد افزایش یافت. همچنین بررسی استحکام برشی نمونه‌ها در آزمون پانچ برشی نشان داد که استحکام تسلیم برشی و استحکام برشی نهایی تیتانیوم خالص SLM شده پس از اعمال فرایند UP به ترتیب حدود ۲۷ و ۱۴ درصد بهبود یافت. بر اساس نتایج حاصله، میزان رشد استحکام تسلیم بیشتر است که این امر حاکی از کاهش ظرفیت کارسختی برشی نمونه‌ها پس از فرایند UP است. بررسی نانو سختی نمونه‌ها نیز بیانگر افزایش قابل ملاحظه سختی نمونه‌ها است. حداکثر عمق فرورفتگی در نمونه‌های تیتانیوم خالص SLM شده پس از UP از حدود ۲۱۵ به ۱۶۴ نانومتر کاهش یافت.

### واژه‌های کلیدی:

تیتانیوم خالص تجاری، تغییر شکل شدید سطحی، ساخت افزودنی، خواص مکانیکی، ریزساختار.

### ارجاع به این مقاله:

ایمان انصاریان، رضا تقی‌آبادی، سعید امینی، عبدالله صبوری، تأثیر تغییر شکل پلاستیک شدید سطحی بر ریزساختار و خواص مکانیکی تیتانیوم خالص تولیدشده به روش ذوب لیزر انتخابی، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، بهار و تابستان ۱۴۰۲، جلد ۷، شماره ۱، صفحات ۱۵-۲۴.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/FRJ.2023.410269.1181

### ۱- مقدمه

نمونه‌سازی سریع<sup>۳</sup> شامل ساخت لایه‌لایه قطعات سه‌بعدی با کمک طراحی کامپیوتری، صنعت را وارد عرصه جدیدی نمود که از آن به‌عنوان انقلاب صنعتی نوین یاد می‌شود [۱]. فرآیندهای AM برای فلزات طی دو دهه ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ توسعه یافتند. در این فرآیندها، مواد خام اولیه مانند پودر، سیم و ورق طی فرآیند ذوب و انجماد لایه به لایه به کمک یک منبع انرژی متمرکز مانند پرتو لیزر یا پرتو الکترون به‌صورت انتخابی ذوب‌شده و به یک توده فلزی متراکم و منسجم تبدیل می‌شود. از کاربردهای

ایده تولید اشیاء سه‌بعدی به‌صورت لایه به لایه، مدت‌ها قبل از توسعه ایده ساخت افزودنی (AM)<sup>۱</sup> مواد شکل گرفت. نخستین بار در سال ۱۹۵۲، کوچیما<sup>۲</sup> مزایای فرآیندهای تولید لایه را نشان نشان داد. در ادامه ثبت اختراعات در بازه ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ انجام شد که ایده تولید یک شی ۳ بعدی با استفاده از رویکرد گسترده لایه بیشتر تقویت شد و در این بین زمینه برای معرفی و توسعه فرآیندهای مبتنی بر آن فراهم گشت. در سال ۱۹۸۰ روش

<sup>3</sup> Rapid prototyping

<sup>1</sup> Additive manufacturing (AM)

<sup>2</sup> Kojima

فراصوتی (USRP)<sup>۹</sup>، عملیات اصطکاکی مکانیکی سطحی فراصوتی (SMAT)<sup>۱۰</sup> و کوبش فراصوتی (UP)<sup>۱۱</sup> هستند [۱۴، ۱۳، ۱۶]. در این بین، UP از جمله روش‌های جدید S<sup>2</sup>PD است که در آن با بهره‌گیری از یک مبدل، انرژی الکتریکی به صورت ارتعاشات مکانیکی فرکانس بالا به لایه‌های سطحی ماده منتقل شده و با القای کرنش‌های شدید پلاستیک به نواحی سطحی موجب بهبود خواص مکانیکی این نواحی می‌شود. این روش بر دامنه وسیعی از اشکال قابل اعمال بوده و موجب تغییر شکل هندسی قطعات نمی‌شود.

نظر به قابلیت بالای فرایندهای S<sup>2</sup>PD در اصلاح بافت و خواص سطحی فلزات و آلیاژهای مهندسی، تاکنون تحقیقات قابل توجهی در زمینه اصلاح سطحی قطعات تولیدشده از طریق ساخت افزودنی (ذوب لیزر انتخابی) انجام شده است. یان<sup>۱۲</sup> و همکاران [۱۳] گزارش نمودند که اعمال فرایند SMAT بر آلیاژ Ti-6Al-4V ذوب لیزر انتخابی شده، منجر به ایجاد لایه نانوساختار، آزاد شدن تمرکز تنش و ایجاد تنش پسماند فشاری در لایه سطحی شده و استحکام مکانیکی سطح را بهبود می‌بخشد. ژانگ<sup>۱۳</sup> و همکاران [۱۵] پس از اعمال شات پینینگ فراصوتی (USP) بر آلیاژ Ti-6Al-4V تولیدشده با SLM، مشاهده کردند که سختی و تنش‌های فشاری القاشده با افزایش زمان USP افزایش یافتند به طوری که عمق سختی حدود ۰/۳ میلی‌متر به دست آمد. ایشان همچنین نشان دادند که فرایند USP موجب افزایش میکرو کرنش شبکه و کاهش اندازه بلورک‌ها می‌شود. خردمندفر و همکاران [۱۶] با اعمال فرایند UP تحت عنوان بهسازی سطح نانو کریستال فراصوتی (UNSM)<sup>۱۴</sup> بر آلیاژ تیتانیوم فورج نوع بتا Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr به سطح نانوساختار دست یافتند. همچنین گزارش شد که اعمال فرایند UNSM موجب بهبود قابل توجه مقاومت به سایش آلیاژ می‌شود. لسیک<sup>۱۵</sup> و همکاران [۱۶] در تحقیقات خود روی اینکونل ۷۱۸ تولیدشده توسط SLM، نشان دادند که در مقایسه با سایر روش‌های S<sup>2</sup>PD، فرایند UP موجب بیشترین میزان بهبود در سختی نمونه‌ها (حدود ۵۰٪) می‌شود و عمق لایه سخت شده توسط این روش حدود ۱۸۰ میکرومتر است. زینگ<sup>۱۶</sup> و همکاران [۱۷] در تحقیق خود روی آلیاژ آلومینیم تولیدشده توسط SLM، مشاهده کردند که اعمال فرایند UP موجب ایجاد تنش‌های پسماند فشاری در

فرایندهای AM در فلزات می‌توان به صنایع هوافضا، انرژی، نفت و گاز و پزشکی اشاره کرد [۳، ۲]. تولید مستقیم هندسه‌های بسیار پیچیده با صرف کمترین زمان و کمترین میزان اتلاف فلز، برتری مهم روش ذوب لیزر انتخابی (SLM)<sup>۱</sup> نسبت به سایر روش‌های مرسوم تولید از جمله ریخته‌گری، ماشین‌کاری و آهن‌گری است [۴].

علی‌رغم مزایای متعدد فرایند SLM نظیر دقت مناسب، ساخت سازه‌های پیچیده، زمان سریع تولید نمونه اولیه [۲]، محدودیت‌هایی به خصوص برای تولید نمونه‌های با ابعاد بزرگ توسط این فرایند گزارش شده است. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به شکل‌گیری نقایص ساختاری، ایجاد دانه‌های ستونی با خواص ناهمسانگرد [۵] و شکل‌گیری تنش‌های پسماند کششی در نواحی سطحی اشاره نمود [۶]. علاوه بر این، سطح قطعات SLM شده غالباً زبر و مواج است. بنابراین، پیش از استفاده از این قطعات ضروری است با بهره‌گیری از روش‌های مناسب نسبت به اصلاح ساختار و رفع عیوب سطحی آن‌ها اقدام نمود.

فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید (SPD)<sup>۲</sup> قابلیت خود را به عنوان روش‌های مؤثر در اصلاح و پالایش ساختار در فلزات و آلیاژها اثبات کرده‌اند [۸، ۷]. در این روش‌ها کرنش پلاستیک قابل توجهی به فلزات و آلیاژها اعمال شده و از طریق کارسختی، همگن کردن ساختار، توزیع و خرد شدن رسوبات و افزایش چگالی نابجایی‌ها خواص مکانیکی بهبود می‌یابد [۹]. از مهم‌ترین روش‌های SPD می‌توان به فرایند تغییر شکل در کانال‌های همسان زاویه‌دار (ECAP)<sup>۳</sup> [۱۰]، فرایند تغییر شکل پیچشی تحت فشار زیاد (HPT)<sup>۴</sup>، فرایند نورد تجمعی (ARB)<sup>۵</sup> و فرایند فورج چندگانه (MDF)<sup>۶</sup> اشاره نمود [۹-۱۱]. علی‌رغم اثربخشی قابل توجه و پتانسیل بسیار بالای این روش‌ها در بهبود خواص توده فلزات و آلیاژها، متأسفانه اعمال آن‌ها بر قطعات دارای اشکال پیچیده بسیار سخت و بعضاً ناممکن است. بر این اساس دسته جدیدی از فرایندهای SPD موسوم به فرایندهای تغییر شکل پلاستیک شدید سطحی (S<sup>2</sup>PD)<sup>۷</sup> توسعه یافته‌اند.

در فرایندهای S<sup>2</sup>PD بافت و خواص مکانیکی سطحی فلزات و آلیاژها از طریق کارسختی و ایجاد تنش‌های پسماند فشاری، بدون براده برداری بهبود می‌یابد [۱۲]. از جمله مهم‌ترین رایج‌ترین روش‌های S<sup>2</sup>PD، روش‌های مبتنی بر استفاده از امواج فراصوت مانند شات پینینگ فراصوتی (USP)<sup>۸</sup>، نورد سطحی

<sup>9</sup> Ultrasonic surface rolling process

<sup>10</sup> Ultrasonic surface mechanical attrition treatment

<sup>11</sup> Ultrasonic peening

<sup>12</sup> Yan

<sup>13</sup> Zhang

<sup>14</sup> Ultrasonic nanocrystal surface modification

<sup>15</sup> Lesyk

<sup>16</sup> Xing

<sup>1</sup> Selective laser melting

<sup>2</sup> Severe plastic deformation

<sup>3</sup> Equal channel angular pressing

<sup>4</sup> High pressure torsion

<sup>5</sup> Accumulated roll bonding

<sup>6</sup> Multi directional forging

<sup>7</sup> Surface severe plastic deformation

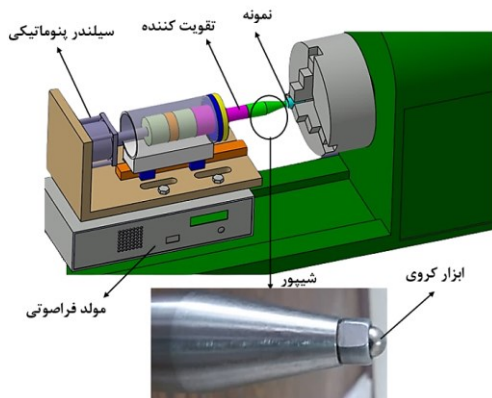
<sup>8</sup> Ultrasonic shot peening

کننده) و هورن (شیپور) تقویت شده و با استفاده از یک ابزار کروی به صورت متوالی به سطح قطعه کار وارد می‌شوند. تصویر نمادین فرایند و شکل ابزار (شیپور) در شکل ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که شیپور دامنه ارتعاشی حاصل از مبدل را افزایش داده و به ابزار کوبش کروی از جنس تنگستن کار باید با سختی ۸۰ راکول سی و قطر ۶ میلی‌متر منتقل می‌کند. همچنین از یک سیلندر پنوماتیکی برای تأمین نیروی استاتیکی وارده به پشت ابزار استفاده شد.

برای بررسی ریزساختار، پس از آماده‌سازی سطحی نمونه‌ها توسط روش‌های استاندارد متالوگرافی، سطح آن‌ها توسط محلول اچ شامل ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر، ۵ میلی‌لیتر آب اکسیژنه ( $H_2O_2$ ) ۳۰٪ و ۲ میلی‌لیتر HF به مدت ۲۰ ثانیه حکاکی شد. در ادامه ساختار سطح و زیر سطح نمونه‌ها توسط میکروسکپ نوری Zeiss مدل Axiotech بررسی شد. همچنین برای آنالیز تصویری ساختار (بررسی اندازه تیغه‌ها و تخلخل‌های ساختار) از نرم‌افزارهای ImageJ و MIP استفاده شد.

سختی نمونه‌ها توسط آزمون سختی ویکرز با استفاده از دستگاه میکروسختی Leitz Wetlar Etzlar 115842 در نیروی ۱۰۰ گرم و زمان ساکن شدن<sup>۳</sup> ۱۵ ثانیه مطابق با استاندارد ASTM E-384 اندازه‌گیری شد. دستگاه مذکور قبل از اندازه‌گیری سختی نمونه‌ها کالیبره شد. برای تهیه نمونه‌های سختی، مقاطع عرضی از نمونه‌های کوبش فراصوتی شده توسط برش با سیم تهیه شد. سپس پس از مانع و پرداخت کاری، نمودار سختی از نزدیک سطح تا عمق حدود ۶۰۰ میکرومتر تهیه شد.

به منظور بررسی استحکام برشی نمونه‌ها قبل و بعد از اعمال UP، قالب پانچ برشی از فولاد ابزار سردکار SPK با قطر پانچ ۶/۲ میلی‌متر و قطر سوراخ ۶/۲۵ میلی‌متر به کار گرفته شد. ضخامت ایده‌آل برای آزمایش پانچ برشی با قالب مذکور، نمونه‌های ورقی



شکل ۱- (الف) تصویر نمادین اجزای سیستم مورد استفاده برای کوبش فراصوتی و (ب) تصویر شیپور و ابزار کروی.

نواحی نزدیک به سطح می‌شود. همچنین با اعمال فرایند UP، خواص سطحی بهبود یافته و تخلخل‌های ساختار کاهش می‌یابد. علاوه بر موارد فوق، تاکنون تحقیقات مشابه دیگری نیز در زمینه تأثیر فرایندهای S<sup>2</sup>PD بر آلیاژ Ti-6Al-4V انجام شده است. با این حال، بررسی‌های انجام شده حاکی از آن است که علی‌رغم مقاومت به خوردگی عالی و زیست‌سازگاری بسیار بالای تیتانیوم خالص تجاری (CP-Ti)<sup>۱</sup> در مقایسه با آلیاژ Ti-6Al-4V و پتانسیل بالای فرایند UP در اصلاح ساختار و خواص مکانیکی قطعات SLM شده، تاکنون هیچ تحقیقی در این زمینه انجام نشده است. انتظار می‌رود که با بهبود خواص مکانیکی قطعات تیتانیوم خالص تهیه شده به روش ساخت افزودنی، استفاده از این فلز در ساخت قطعات پیچیده مورد استفاده در کاربردهای زیست پزشکی توسعه یابد. در این تحقیق سعی شده است که تأثیر فرایند UP در اصلاح ساختار و بهبود خواص مکانیکی تیتانیوم خالص تجاری تولیدشده به روش SLM مورد بررسی قرار گیرد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

نمونه‌های CP-Ti به صورت قطعات استوانه‌ای با ارتفاع و قطر به ترتیب ۱۵ و ۲۵ میلی‌متر به روش SLM با استفاده از دستگاه Concept Laser Mlab Cusing-R مجهز به لیزر فیبر ۱۰۰ وات ساخته شدند. به این منظور از پودر اولیه تیتانیوم خالص تجاری GR1 (≤ 50 μm, LPW, UK) با مورفولوژی کروی استفاده شد. پارامترهای فرایند شامل توان لیزر، سرعت اسکن، ضخامت لایه و فضای دریچه<sup>۲</sup> به ترتیب ۹۵ وات، ۹۰۰ میلی‌متر بر ثانیه، ۲۵ میکرومتر و ۹۸ میکرومتر بودند.

ترکیب شیمیایی تیتانیوم CP مورد تحقیق تعیین شده با استفاده از روش اسپکترومتری نشری (کوانتومتری) بر اساس استاندارد ASTM E415 و توسط دستگاه Foundry-Master Pro در جدول ۱ ارائه شده است.

فرایند کوبش فراصوتی توسط یک دستگاه تراش مدل TN50 با سرعت دوران ۴۵ دور بر دقیقه تحت چند سرعت پیشروی مختلف (۰/۰۸، ۰/۱۲ و ۰/۱۶ میلی‌متر بر دور) انجام شد. در این فرایند جهت تولید انرژی الکتریکی از ژنراتور فراصوتی مدل MPI با توان ۳ کیلووات و فرکانس در محدوده ۱۸ تا ۳۰ کیلوهرتز و همچنین کنترل دامنه ارتعاشی استفاده شد. سپس توسط یک مبدل (ترانسدیوسر) ابزار ارتعاشی فراصوتی که مجهز به چهار عدد سلول پیزوالکتریک است، فرکانس در حدود ۲۰ kHz را از ژنراتور فراصوتی دریافت و به صورت ویبره مکانیکی تبدیل می‌کند. در ادامه ارتعاشات مکانیکی تولیدشده توسط بوستر (تقویت

<sup>3</sup> Dwell time

<sup>1</sup> Commercially pure titanium

<sup>2</sup> Hatch space

### ۳- نتایج و بحث

تصویر میکروسکپ نوری نشان‌دهنده ریزساختار تیتانیوم خالص تجاری در حالت آنیل و SLM شده به ترتیب در شکل‌های ۲-الف و ۲-ب نشان داده شده است. حضور دانه‌های تقریباً هم‌محور با اندازه دانه میانگین حدود ۸۵ میکرومتر در تیتانیوم آنیل شده (شکل ۲-الف) و مارتنزیت‌های سوزنی  $\alpha'$  در نمونه SLM شده کاملاً مشهود است. شکل‌گیری مارتنزیت آلفا پریم را می‌توان ناشی از نرخ سرمایش زیاد فرایند ذوب سطحی ( $10^5$  تا  $10^7$  کلوین بر ثانیه) و وقوع دگرگونی فازی بدون نفوذ در نمونه SLM شده دانست. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در این نمونه مرزهای دانه اولیه واضح نیستند و مطابق با مشاهدات گزارش شده در برخی منابع [۱۸، ۱۹] به نظر می‌رسد که توسط دسته‌های مارتنزیت سوزنی پوشانده شده‌اند. همچنین کسر حجمی قابل توجهی از تخلخل‌ها در نمونه SLM شده قابل مشاهده است (شکل ۲-ب). شکل‌گیری این تخلخل‌ها به پارامترهای فرایند ذوب لیزر انتخابی بستگی دارد. بر اساس نتایج حاصل از تحقیقات پیشین، سرعت اسکن و توان لیزر بیشترین تأثیر را بر شکل‌گیری تخلخل در نمونه‌های SLM شده دارند اما نقش فضای درجه در این مورد خیلی محسوس نیست. افزایش یا کاهش انرژی ورودی (نسبت به مقدار بهینه) باعث افزایش میزان تخلخل‌ها خواهد شد. همچنین نشان داده شده است که در خصوص سایر پارامترها نظیر سرعت اسکن و توان لیزر مقدار بهینه‌ای برای به حداقل رساندن درصد تخلخل در ساختار وجود دارد. با این حال به نظر می‌رسد که تشکیل تخلخل در نمونه‌های SLM شده اجتناب‌ناپذیر است [۲۰، ۲۱]. درصد تخلخل و نسبت طول به عرض تیغه‌های مارتنزیت سوزنی  $\alpha'$  محاسبه شده توسط آنالیز تصویری در جدول ۲ ارائه شده است.

با ضخامت  $0/8-0/6$  میلی‌متر است. پیش از انجام آزمایش برای افزایش سطح تماس بین نمونه‌ها و قالب و دقت آزمایش سطح نمونه‌ها تا سنباده ۲۰۰۰ پرداخت شدند. آزمایش پانچ برشی با استفاده از دستگاه آزمایش کشش Zwick/Roell Z100 انجام شد. میزان نیروی اعمالی برحسب جابجایی پانچ اندازه‌گیری شد و تنش برشی برحسب مگاپاسکال با استفاده از رابطه (۱) اندازه‌گیری شد:

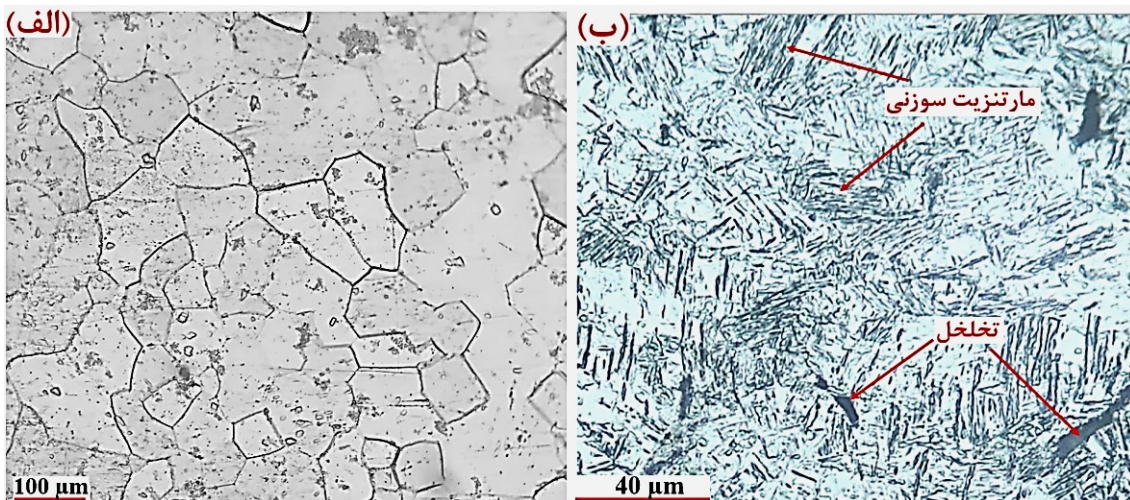
$$\tau = \frac{P}{\pi dt} \quad (1)$$

در این رابطه P نیروی پانچ برحسب نیوتن، t ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر و d میانگین قطر پانچ و قالب برحسب میلی‌متر است. منحنی‌های آزمایش پانچ برشی با رسم تنش برشی برحسب جابجایی نرمال به دست می‌آیند. جابجایی نرمال نیز از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$d = \frac{h}{t} \quad (2)$$

در این رابطه d جابجایی نرمال و h جابجایی پانچ برحسب میلی‌متر است. همچنین آزمایش برای تمامی نمونه‌ها با سرعت  $0/001$  میلی‌متر بر ثانیه انجام شد.

برای بررسی دقیق‌تر سختی نمونه‌ها، آزمایش نانو فروروندگی با استفاده از دستگاه نانو فروروندگی TriboScope Nanomechanical انجام شد. همچنین از فرو رونده الماسی برکوچ (هرم سه‌بعدی) استفاده شد. این آزمایش در حداکثر بار ۶ میلی‌نیوتن و زمان نگهداری ۱۰ ثانیه انجام شد. همچنین زمان کل آزمون نیز حدود ۸۰ ثانیه بود.



شکل ۱- تصاویر میکروسکپ نوری نشان‌دهنده ریزساختار تیتانیوم خالص تجاری (الف) آنیل شده و (ب) SLM شده.

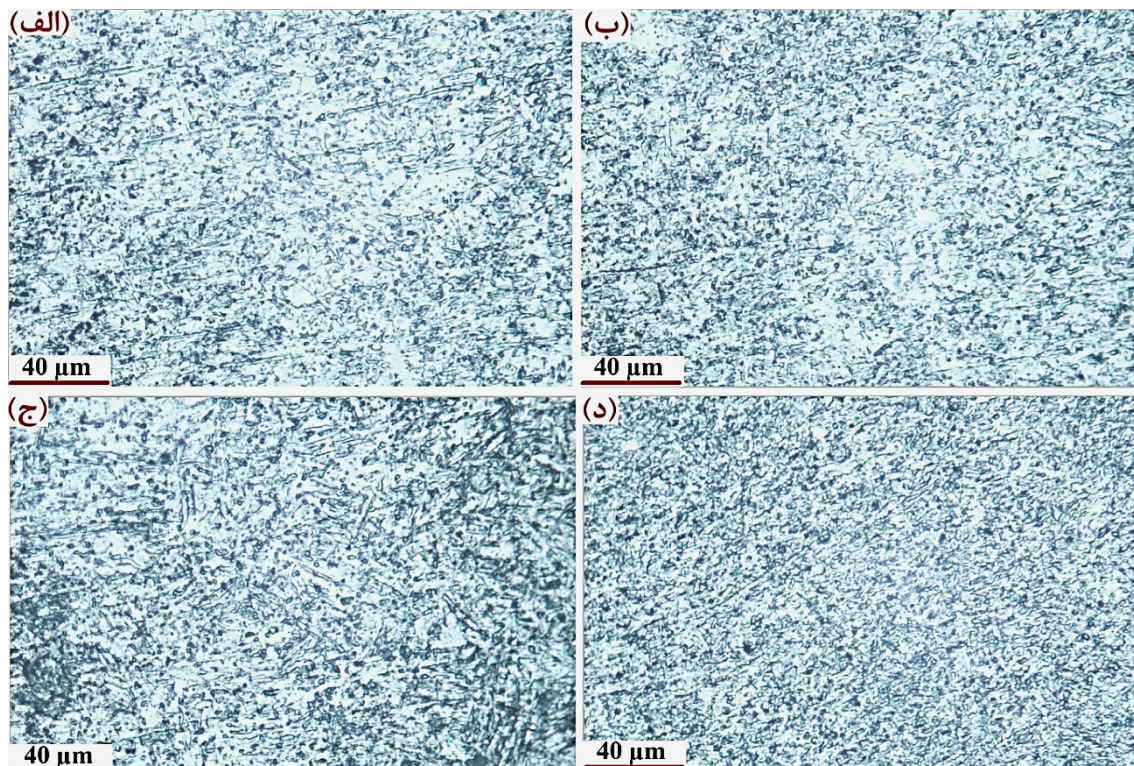
است. همان‌طور که مشاهده می‌شود عمق مؤثر UP حداکثر  $\mu\text{m}$  ۳۰۰ است. نتایج تحقیقات پیشین روی آلیاژ Ti-6Al-4V نیز نشان می‌دهد که با اعمال UP دانه‌های ستونی اصلاح شده و ناهمسانگردی ساختار کاهش یافته است. علت این امر احتمالاً تنش‌های نوسانی ناشی از فرایند UP است که منجر به آسیب دیدن مرزهای دانه و در نتیجه بخش‌بندی دانه‌ها شده است [۲۲]. علاوه بر بهبود ناهمسانگردی خواص در مقایسه با شکل ۲ (مربوط به نمونه SLM شده اولیه)، پس از اعمال فرایند UP تخلخل‌های موجود در نمونه کاهش یافته و ابعادشان ریزتر شده است. نتایج تحقیقات پیشین روی آلیاژ SLM شده نیز حاکی از تأثیر مثبت این فرایند در کاهش تخلخل‌ها ناشی از تغییر شکل پلاستیک و سیلان فلز و بسته شدن منافذ است [۱۷].

شکل ۳ ریزساختار نمونه‌های UP شده را به ترتیب در دو سرعت پیشروی ۰/۱۶ و ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور در نواحی نزدیک به سطح نمونه (شکل‌های ۳-الف و ۳-ج) و در سطح نمونه (شکل‌های ۳-ب و ۳-د) نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود در اثر کرنش پلاستیک اعمال‌شده در فرایند UP، نسبت طول به عرض مارتنزیت‌های سوزنی به‌خصوص در سطح نمونه‌ها کاهش قابل توجهی یافته است اما با افزایش فاصله از سطح نمونه، به دلیل کاهش اثر فرایند UP در عمق ماده، بهسازی تیغه‌های مارتنزیت کاهش یافته است. همچنین با کاهش سرعت پیشروی ابزار به دلیل افزایش زمان و در نتیجه افزایش تعداد کوبش، ساختار بیشتر پالایش شده و تیغه‌ها در تصویر مربوط به سطح نمونه به شدت ریز شده‌اند (شکل ۳-د).

کسر تخلخل‌ها و نسبت طول به عرض تیغه‌های مارتنزیت سوزنی پس از UP در عمق‌های مختلف محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده

جدول ۲- کسر حجمی تخلخل‌ها و نسبت طول به عرض مارتنزیت‌های سوزنی قبل و پس از فرایند UP

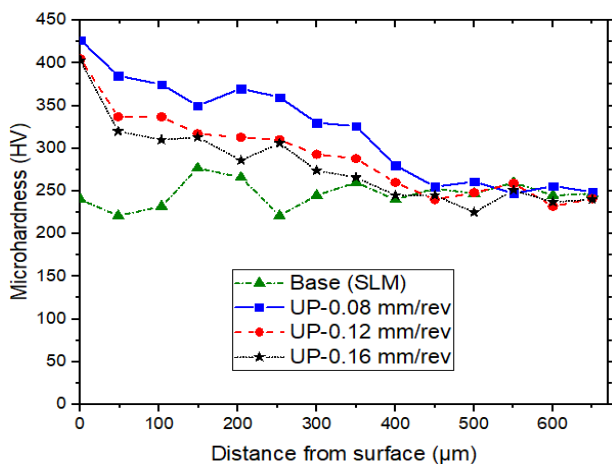
نسبت طول به عرض تیغه های مارتنزیت	کسر تخلخل‌ها (%)	عمق اندازه‌گیری شده (فاصله از سطح)	نمونه
18±3.5	1.2±0.08	-	SLM
4.5±2.8	0.48±0.13	< 100 $\mu\text{m}$	UP-0.08 mm/rev
10.2±4	0.61±0.12	> 100 $\mu\text{m}$	
16.1±4.2	0.94±0.21	> 200 $\mu\text{m}$	



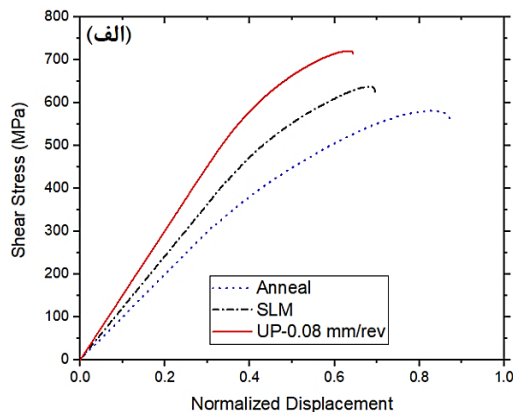
شکل ۳- ریزساختار میکروسکپ نوری نمونه‌های UP شده در سرعت پیشروی ۰/۱۶ میلی‌متر بر دور در نزدیک سطح نمونه (الف)، سطح نمونه (ب) و سرعت پیشروی ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور در نزدیک سطح نمونه (ج) و سطح نمونه (د).

میلی متر بر دور، استحکام تسلیم برشی و استحکام برشی نهایی به ترتیب حدود ۲۷ و ۱۳ درصد نسبت به حالت اولیه SLM شده بهبود یافته است.

در تحقیقات پیشین، در بررسی اثر تغییر شکل پلاستیک شدید به وسیله فرایند فورج چندگانه (MDF) بر ریزساختار و خواص مکانیکی تیتانیوم خالص تجاری نیز بهبود قابل توجه در استحکام برشی گزارش شده است. بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق، علت افزایش استحکام برشی کارسختی، ایجاد مرزهای کوچک زاویه، ریزدانه سازی ناشی از تبدیل مرزهای کوچک زاویه به بزرگ زاویه و بخش بندی دانه ها توسط دوقلوبی ها نسبت داده شده است [۲۳]. در این تحقیق بهبود استحکام برشی در مقایسه با تحقیق پیشین ذکر شده، کمتر است که احتمالاً یکی از علت های آن سطحی بودن فرایند است. در واقع عمق مؤثر سخت کاری مؤثر در تحقیق حاضر حدود ۳۰۰ میکرومتر است، در حالی که نمونه های پانچ برشی دارای ضخامت حدود ۸۰۰ میکرومتر هستند. دلیل دیگر می تواند آزاد شدن تنش های پسماند فشاری



شکل ۴- نمودار تغییرات سختی نمونه اولیه SLM شده و نمونه های UP شده در سرعت های پیشروی مختلف.

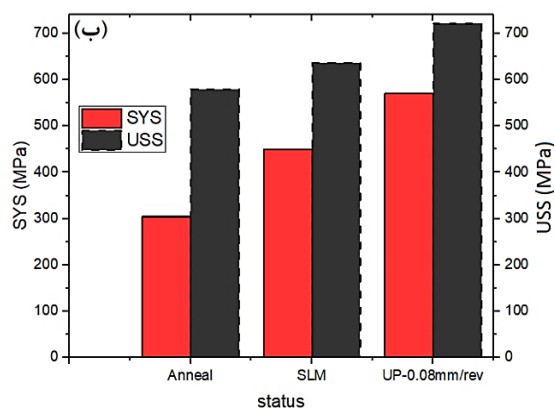


شکل ۵- (الف) نمودار استحکام برشی برحسب جابجایی نرمال برای نمونه اولیه SLM، نمونه آئیل شده و نمونه UP شده و (ب) استحکام تسلیم برشی و استحکام برشی نهایی نمونه های مذکور.

شکل ۴ نمودار تغییرات سختی نمونه های UP شده را برحسب فاصله از سطح در سرعت های پیشروی متفاوت نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود صرف نظر از تعداد پاس UP اعمال شده، سختی سطح نمونه ها به طور قابل توجهی افزایش یافته است. در سرعت پیشروی ۰/۰۸ میلی متر بر دور بیشترین افزایش سختی (حدود ۴۲۵ ویکرز) مشاهده می شود که حدود ۷۰ درصد رشد در سختی را نشان می دهد. همچنین عمق مؤثر بهبود سختی این نمونه نیز مناسب تر از نمونه های فرآوری شده در سرعت های پیشروی ۰/۱۲ و ۰/۱۶ میلی متر بر دور می باشد که این متناظر با تصویر ریزساختار آن در شکل ۳-د است. میزان افزایش سختی سطحی در کلیه سرعت های پیشروی نیز قابل توجه است به گونه ای که در سرعت های پیشروی ۰/۱۲ و ۰/۱۶ میلی متر بر دور افزایش ۶۵ درصدی نیز مشاهده می شود. در افزایش سختی مشاهده شده در تحقیق حاضر، مقداری بیشتر از مقادیر گزارش شده در تحقیقات پیشین در خصوص تأثیر فرایند UP بر سختی آلیاژهای Ti-6-4 و اینکونل ۷۱۸ است [۱۵، ۱۶].

افزایش مشاهده شده در سختی نواحی سطحی نمونه های UP شده را می توان به کارسختی ناشی از تغییر شکل شدید زیر لایه و متعاقباً افزایش چگالی نابجایی ها، انرژی ضربه انباشته شده در لایه های سطحی و پالایش ساختار (خردایش تیغه های مارتزیت سوزنی آلفا پریم) نسبت داد [۱۶].

شکل ۵ نمودار تغییرات استحکام برشی برحسب جابجایی نرمال و مقادیر استحکام تسلیم برشی (SYS) و استحکام برشی نهایی (USS) را برای نمونه های منتخب نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، متناظر با افزایش سختی، استحکام برشی نمونه ها با اعمال فرایند UP بهبود قابل توجهی یافته است. به عبارت دیگر مطابق شکل ۵-ب و در سرعت پیشروی ۰/۰۸

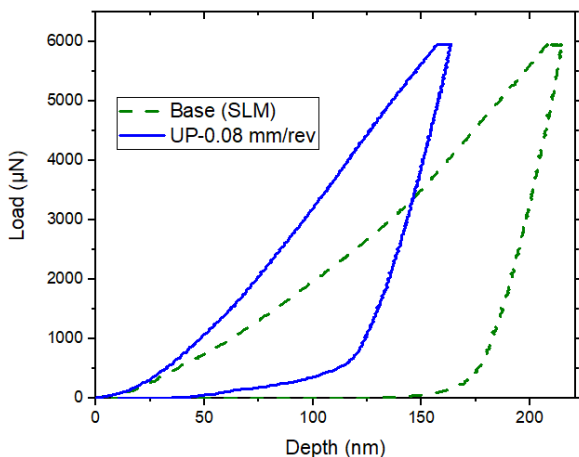


‡ Ultimate shear strength

‡ Shear yield strength

$$Er = S \times \frac{\sqrt{\pi/A}}{2} \quad (۴)$$

در این رابطه S نشان‌دهنده سفتی نمونه (قابل محاسبه از شیب منحنی برگشت) و A مساحت تورفتگی در بار حداکثر نمودار است (با Ac نیز نشان داده می‌شود). مقادیر کلیه موارد مذکور محاسبه شده و در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تأیید نتایج میکروسختی، با اعمال فرایند ثانویه UP بر تیتانیم خالص SLM شده، نانوسختی تیتانیم افزایش یافته است که این مطابق با روند داده‌های میکروسختی ویکرز و پانچ برشی است. در واقع، سختی نانو فرورفتگی تقریباً می‌تواند نشان‌دهنده توانایی ماده در برابر تغییر شکل باشد. همچنین تورفتگی ماکزیمم نیز پس از فرایند UP مطابق انتظار کاهش یافته و مدول الاستیک کاهش یافته نیز مقداری افزایش یافته است.



شکل ۶- نمودار نیرو-عمق تورفتگی حاصل از آزمون نانوایندنتیشن برای (الف) نمونه اولیه SLM شده و (ب) نمونه UP شده در سرعت پیشروی ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور.

جدول ۳- داده‌های حاصل از آزمون نانوایندنتیشن نمونه اولیه SLM شده و نمونه UP شده در سرعت پیشروی ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور

نمونه	H (GPa)	Er (GPa)	h <sub>max</sub> (nm)
SLM	3.69	136.2	214.9
UP-0.08 mm/rev	6.7	155.2	163.8

علی‌رغم روند مشابه میکروسختی ویکرز و سختی به روش نانوایندنتیشن، میزان سختی به‌دست‌آمده در روش نانوایندنتیشن بیشتر از روش میکروسختی ویکرز است. با توجه به نتایج حاصل از مطالعات پیشین، علت این مسئله احتمالاً استفاده از مساحت

ناشی از فرایند UP در اثر برش با سیم باشد. علاوه بر این، تحقیق پیشین بر حالت اولیه آنیل که استحکام برشی پایینی نسبت به حالت SLM دارند (برای مقایسه در این تحقیق استحکام برشی نمونه آنیل مطابق با تصویر ریزساختاری آن در شکل ۱-الف ارائه شده است) فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید اعمال شده و بهبود قابل توجه‌تری حاصل شده است.

همچنین نتایج نمودارهای پانچ برشی نشان می‌دهد که SYS نسبت به USS، افزایش بیشتری نشان می‌دهد. این مسئله نشان‌دهنده این است که با اعمال فرایند UP بر تیتانیم خالص SLM شده، تسلیم شدن در اثر تنش برشی نسبت به ناپایداری در برش، بیشتر به تعویق افتاده و احتمالاً طبق رابطه ۳ موجب کاهش ظرفیت کارسختی برشی<sup>۱</sup> (H<sub>C</sub><sup>SPT</sup>) می‌شود [۲۳]:

$$H_C^{SPT} = \frac{USS - SYS}{SYS} = \frac{USS}{SYS} - 1 \quad (۳)$$

نسبت USS/SYS برای نمونه‌های آنیل، SLM و UP مطابق شکل ۵ به ترتیب حدود ۱/۹، ۱/۴۲ و ۱/۲۶ به‌دست‌آمده است. این نتایج مطابق رابطه ۳ نشان می‌دهد که قابلیت کارسختی در اثر فرایند SLM و همچنین در اثر فرایند UP کاهش یافته یا به عبارتی استحکام تسلیم برشی به استحکام برشی نهایی نزدیک شده است. علت کاهش ظرفیت کارسختی برشی، احتمالاً ریزدانه سازی لایه‌های سطحی هنگام فرایند UP است زیرا در دانه‌های با اندازه درشت‌تر، فضای بیشتری برای قرار گرفتن نابجایی‌ها فراهم است. این می‌تواند منجر به افزایش گنجایش نابجایی‌ها شده و ظرفیت کارسختی برشی را افزایش دهد. در واقع با ریز شدن ساختار طی فرایند UP استحکام برشی افزایش می‌یابد و از آنجا که ظرفیت کارسختی نمونه‌ها کاهش یافته است، استحکام تسلیم برشی نسبت به استحکام برشی نهایی افزایش بیشتری نشان داده است [۲۴].

به‌منظور بررسی دقیق‌تر سختی نمونه‌ها، آزمایش نانوایندنتیشن در حداکثر بار حدود ۶ میلی‌نیوتن و زمان نگهداری ۱۰ ثانیه برای مطالعه سختی لایه‌های سطحی نمونه‌ها انجام شد. نمودار نیرو-جابجایی به‌دست‌آمده از این آزمایش در شکل ۶ ارائه شده است. در این آزمایش، نانوسختی نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۴ و از طریق از تقسیم حداکثر بار بر مساحت ناحیه تماس در بار حداکثر (contact area)، مدول الاستیسیته کاهش یافته (E<sub>r</sub>) که از ناحیه برگشت منحنی نیرو-تورفتگی در شکل ۶ به دست می‌آید قابل محاسبه است [۲۵]:

<sup>۱</sup> Shear work hardening capacity

به طوری که نسبت USS/SYS برای نمونه‌های SLM و UP به ترتیب حدود ۱/۴۲ و ۱/۲۶ به دست آمد.

#### مراجع

- [1] Yang L., Hsu K., Baughman B., Godfrey D., Medina F., Menon M., Wiener S., Additive manufacturing of metals: the technology, materials, design and production, 2017, 24-171.
- [2] Milewski J.O., Additive Manufacturing of Metals: From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants and Custom Jewelry. Springer, 2017, 258 1-339.
- [3] Gebhardt A., Understanding additive manufacturing, Hanser Publishers, Munich, 2011, 1-161.
- [4] دستباز ا.، توکلی ر.، شبیه‌سازی عددی ریزساختار انجماد در فرایند ذوب انتخابی بوسیله لیزر و بررسی اثر پارامترهای فرآیند بر مورفولوژی دانه‌ها، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، ۱۳۹۸، ۳ (۴) ۲۳۶-۲۲۹.
- [5] Zhang M., Liu C., Shi X., Chen X., Chen C., Zuo J., Lu J., Ma S., Residual stress, defects and grain morphology of Ti-6Al-4V alloy produced by ultrasonic impact treatment assisted selective laser melting, Applied sciences, 2016, 6(11) 304-311.
- [6] Lesyk D.A., Martinez S., Mordiyuk B.N., Dzhemelinskyi V.V., Lamikiz A. Prokopenko G.I., Post-processing of the Inconel 718 alloy parts fabricated by selective laser melting: Effects of mechanical surface treatments on surface topography, porosity, hardness and residual stress, Surface and Coatings Technology, 2020, 381, 125-136.
- [7] Ansarian I., Shaeri M.H., Ebrahimi M., Minárik P., Tribological characterization of commercial pure titanium processed by multi-directional forging, Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2019, 32, 857-868.
- [8] Yousefi D., Taghiabadi R., Shaeri M.H., Ansarian I., Microstructural evolution and mechanical properties of multi-directionally forged Si P/ZA22 composite, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2020, 20, 1-13.
- [9] شاعری م.ح.، رزاقیان آرانی ا.، بررسی تأثیر تغییر شکل پلاستیک شدید بر خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژ آلومینیوم A520 تولید شده به روش ریخته‌گری معمولی و نیمه‌جامد، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، ۱۳۹۶، ۲ (۱) ۹-۲۱.
- [10] Ansarian I., Shaeri M.H., Diffusional bonds in laminated composites produced by ECAP, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(9) 1928-1938.
- [11] انصاریان ا.، شاعری م.ح.، بکارگیری فرآیند فورج چند جهت برای تولید تیتانیوم خالص با ساختار فوق ریزدانه، مهندسی مکانیک مدرس، ۱۳۹۷، ۳۷۱-۳۸۲ (۲) ۱۸.
- [12] Abbasi A., Amini S., Sheikhzadeh, G.A., Effect of ultrasonic peening technology on the thermal fatigue of rolling mill rolls, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94, 2499-2513.
- [13] Yan X., Yin S., Chen C., Jenkins R., Lupoi R., Bolot R., Ma W., Kuang M., Liao H., Lu J., Liu M., Fatigue strength improvement of selective laser melted Ti6Al4V using ultrasonic surface mechanical attrition, Materials Research Letters, 2019, 7(8) 327-333.
- [14] Wang Z., Liu Z., Gao C., Wong K., Ye S. Xiao Z., Modified wear behavior of selective laser melted Ti6Al4V alloy by direct current assisted ultrasonic surface rolling process, Surface and Coatings Technology, 2020, 381 125122.

ناحیه تماس در بار حداکثر ( $A_c$ ) به جای مساحت باقی مانده ناحیه تماس ( $A_f$ ) در نرم‌افزار TriboScope است ( $A_c$  همیشه کوچک‌تر از  $A_f$  است و هر چه تورفتگی شدیدتر باشد تفاوت بین نانو سختی و میکروسختی افزایش می‌یابد). علاوه بر این، ناحیه تماس برای توصیف فرآیند تورفتگی الاستیک/پلاستیک، کاملاً الاستیک فرض می‌شود. همچنین تنش تسلیم مؤثر مواد و چگالی نابجایی با کاهش عمق فرورفتگی افزایش می‌یابد لذا اثر اندازه فرورفتگی (ISE)<sup>۱</sup> ایجاد می‌شود [۲۶].

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر تغییر شکل پلاستیک شدید سطحی به روش کوبش فراصوتی (UP) بر بهسازی و بهبود ناهمسانگردی ساختار و خواص مکانیکی تیتانیوم خالص تجاری تولید شده توسط ذوب لیزر انتخابی بررسی شد. مهم‌ترین نتایج تحقیق به شرح زیر هستند:

- ۱- اعمال فرایند UP منجر به بهبود ناهمسانگردی ساختار تیتانیوم خالص تجاری SLM شده می‌شود به گونه‌ای که نسبت طول به عرض تیغه‌های مارتنزیت آلفا پریم به طور چشم‌گیری کاهش یافتند. همچنین با کاهش سرعت پیشروی فرایند UP، بهبود بیشتری در ساختار مشاهده شد. بر اساس نتایج آنالیز تصویری، در سرعت پیشروی ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور، نسبت طول به عرض تیغه‌های مارتنزیت آلفا پریم از ۱۶ به ۴/۵ و درصد تخلخل‌های موجود در ساختار از ۰/۹۴ به ۰/۴۸ کاهش یافت.
- ۲- نتایج بررسی میکروسختی ویکرز نشان داد که کاهش سرعت پیشروی در فرایند UP منجر به بهبود قابل توجه میکروسختی تیتانیوم خالص SLM می‌شود به طوری که در سرعت پیشروی ۰/۰۸ میلی‌متر بر دور سختی سطح نمونه‌ها حدود ۷۰ درصد بهبود یافت. همچنین عمق مؤثر بهبود قابل قبول سختی حدود ۳۰۰ میکرومتر در تیتانیوم خالص SLM شده به دست آمد. نانو سختی نیز روند مشابهی با میکروسختی نشان داد و میزان بالاتر سختی نمونه‌ها در آزمایش نانوآیندنتیشن در مقایسه با میکروسختی ویکرز می‌تواند به اثر اندازه تورفتگی (ISE)، فرض کاملاً الاستیک ناحیه تماس و استفاده از  $A_c$  جایگزین  $A_f$  مربوط شود.
- ۳- نتایج آزمایش پانچ برشی نشان داد که فرایند UP منجر به افزایش ۲۷ و ۱۴ درصدی استحکام تسلیم و استحکام نهایی برشی می‌شود. همچنین ظرفیت کارپذیری برشی با اعمال فرایند UP بر تیتانیوم خالص SLM شده کاهش یافت

<sup>1</sup> Indentation size effect

- [15] Zhang Q., Duan B., Zhang Z., Wang J. and Si C., Effect of ultrasonic shot peening on microstructure evolution and corrosion resistance of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy, *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 11, 1090-1099.
- [16] Kheradmandfard M., Kashani-Bozorg S.F., Kim C.L., Hanzaki A.Z., Pyoun Y.S., Kim J.H., Amanov A., Kim D.E., Nanostructured  $\beta$ -type titanium alloy fabricated by ultrasonic nanocrystal surface modification, *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 39, 698-706.
- [17] Xing X., Duan X., Jiang T., Wang J., Jiang F., Ultrasonic peening treatment used to improve stress corrosion resistance of AlSi10Mg components fabricated using selective laser melting. *Metals*, 2019, 9(1) 103.
- [18] Attar H., Prashanth K.G., Chaubey A.K., Calin M., Zhang L.C., Scudino S. Eckert J., Comparison of wear properties of commercially pure titanium prepared by selective laser melting and casting processes, *Materials Letters*, 2015, 142 38-41.
- [19] Sun X., Lin H., Chen X., Zhang P., Comparative study on electrocrystallization of calcium phosphate ceramics on commercially pure titanium and selective laser melting titanium, *Materials Letters*, 2017, 192 92-95.
- [20] Kasperovich G., Haubrich J., Gussone J., Requena G., Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting, *Materials & Design*, 2016, 105, 160-170.
- [21] Voisin T., Calta N.P., Khairallah S.A., Forien J.B., Balogh L., Cunningham R.W., Rollett A.D., Wang Y.M., Defect-dictated tensile properties of selective laser melted Ti-6Al-4V, *Materials & Design*, 2018, 158, 113-126.
- [22] Gou J., Wang Z., Hu S., Shen J., Tian Y., Zhao G., Chen Y., Effects of ultrasonic peening treatment in three directions on grain refinement and anisotropy of cold metal transfer additive manufactured Ti-6Al-4V thin wall structure, *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 54, 148-157.
- [23] Ansarian I., Shaeri M.H., Ebrahimi M., Minárik P., Bartha K., Microstructure evolution and mechanical behaviour of severely deformed pure titanium through multi directional forging, *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 776 83-95.
- [24] Karami M., Mahmudi R., Work hardening behavior of the extruded and equal-channel angularly pressed Mg-Li-Zn alloys under tensile and shear deformation modes, *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 607 512-520.
- [25] Bao Y.W., Wang W., Zhou Y.C., Investigation of the relationship between elastic modulus and hardness based on depth-sensing indentation measurements, *Acta Materialia*, 2004, 52(18) 5397-5404.
- [26] Qian L., Li M., Zhou Z., Yang H., Shi X., Comparison of nano-indentation hardness to microhardness, *Surface and Coatings Technology*, 2005, 195(2-3) 264-271.

IRANIAN FOUNDRYMEN'S  
SOCIETY

# Founding Research Journal

## Research Paper:

### The Effect of Surface Severe Plastic Deformation on Microstructure and Mechanical Properties of Pure Titanium Produced by Selective Laser Melting

Iman Ansarian<sup>1</sup>, Reza Taghiabadi<sup>2\*</sup>, Saeid Amini<sup>3</sup>, Abdollah Saboori<sup>4</sup>

1. PhD Student, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran.
2. Associate Professor, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran.
3. Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.
4. Assistant Professor, Advanced Materials Processing, Integrated Additive Manufacturing (IAM) Center.

\*Corresponding, author: taghiabadi@edu.ikiu.ac.ir

#### Paper history:

Received: 06 August 2023  
Accepted: 11 October 2023

#### Keywords:

Commercial pure titanium,  
Surface severe plastic  
deformation,  
Selective laser melting,  
Mechanical properties,  
Microstructure.

#### Abstract:

The effect of the ultrasonic peening (UP) process at various feed rates was studied on the microstructure and mechanical characteristics of a selective laser melted (SLMed) commercially pure titanium (CP-Ti). According to the results of the microstructural investigation, applying UP reduced the microstructural anisotropy so that the acicular martensite aspect ratio of the SLMed CP-Ti decreased by about 72% (from 16 to 4.5). Also, the surface hardness of the SLMed sample increased by about 70% after applying the UP process at a feed rate of 0.08 mm/rev. Applying UP also improved the shear yield strength and the ultimate shear strength of SLMed CP-Ti sample increased by 27 and 14%, respectively. The growth rate of the yield strength was higher than that of the ultimate strength, indicating a decrease in the UPed samples' shear hardening capacity. The nano-hardness investigations also showed a significant increase in the hardness of samples where the maximum indentation depth of SLMed CP-Ti samples decreased from about 215 to 164 nm after applying the UP process.

#### Please cite this article using:

Iman Ansarian, Reza Taghiabadi, Saeid Amini, Abdollah Saboori, The Effect of Surface Severe Plastic Deformation on Microstructure and Mechanical Properties of Pure Titanium Produced by Selective Laser Melting, in Persian, Founding Research Journal, 2023, 7(1) 15-24.

DOI: 10.22034/FRJ.2023.410269.1181

Journal homepage: [www.foundingjournal.ir](http://www.foundingjournal.ir)