



## تأثیر ارتعاشات فراصوت در فشردن‌سازی داغ پودرهای آلومینیوم و آلیاژ تیتانیوم

رضوان عابدینی<sup>1</sup>، امیر عبدالله<sup>2\*</sup>، یونس علیزاده<sup>2</sup>، وحید فرتاش‌وند<sup>1</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

\* تهران، صندوق پستی 15875-4413، amirah@aut.ac.ir

## کلیدواژگان

## چکیده

فشردن محوری داغ  
چگالش پودر  
ارتعاشات فراصوت  
آزمون‌های تجربی  
AA1100  
Ti-6Al-4V

فرایند فشردن داغ پودر با هدف تولید قطعات با خصوصیات مشابه مواد اولیه کار سرد شده انجام می‌گیرد. مهمترین مشکل در فرایند متالورژی پودر وجود تخلخل، عدم یکنواختی خصوصیات در نقاط مختلف قطعه، عدم پایداری هندسی و ابعادی و کاهش استحکام قطعات تولیدی می‌باشد که ناشی از اصطکاک ذرات پودر با یکدیگر و ذرات پودر با جداره قالب است. دستیابی به قطعات با چگالی بالا و ساختار همگن بزرگترین هدف در ساخت قطعات متالورژی پودر می‌باشد. از این‌رو تلاش‌ها برای دستیابی به حداکثر چگالی به همراه توزیع یکنواخت چگالی مورد توجه محققان قرار گرفته است. به منظور نیل به این هدف یکی از راه‌حل‌ها استفاده از فرایندهای کمکی نظیر اعمال ارتعاشات فراصوت می‌باشد که می‌تواند منجر به بالا رفتن نرخ چگالش فرایند و در نتیجه افزایش چگالی و استحکام قطعه گردد. در راستای ارزیابی این ایده، در این مقاله اثر اعمال ارتعاشات طولی فراصوت در فشردن‌سازی پودر فلزات آلومینیوم AA1100 و آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V در شرایط دما و تنش ثابت و همچنین برهم کنش آن با پارامترهای مستقل دیگر نظیر دما و نوع ذرات پودر توسط انجام آزمون‌های تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور چیدمان آزمون فشردن داغ پودر به کمک ارتعاشات فراصوت شامل تجهیزات اعمال نیروی استاتیک و ارتعاشی فراصوت طراحی و ساخته شده است. نتایج نشان داده‌اند که اعمال ارتعاشات فراصوت به سبب موجب دستیابی به چگالی بالاتر می‌شود. همچنین دما اثر متفاوت بر تأثیرگذاری فراصوت در دو نوع پودر داشته است.

## Effect of ultrasonic on hot compaction of AA1100 and Ti-6Al-4V powders

Rezvan Abedini, Amir Abdullah\*, Yunus Alizadeh, Vahid Fartashvand

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 15875-4413, Tehran, Iran, amirah@aut.ac.ir

## Keywords

Vertical hot pressing  
Powder densification  
Ultrasonic vibration  
Experimental tests  
AA1100  
Ti-6Al-4V

## Abstract

Hot pressing of metal powders is used in production of parts for similar properties to wrought materials. Since residual porosity, inhomogeneous properties, dimensional and geometrical instability and therefore reduction in mechanical strength are the main problems in powder metallurgy components which are due to friction between powder particle interfaces and powder compact and die walls. Because of this, access to parts with high density and homogeneous structure is the great object in powder metallurgy. One of the remedies can be employment of ultrasonic vibrations which is thought to result in increased rates of densification and therefore higher efficiency of the process in increase of part density and strength. To evaluate this solution, this paper deals with the effects of high power longitudinal ultrasonic vibrations on the densification of AA1100 aluminum and Ti-6Al-4V titanium alloy powder under constant applied stress and different temperatures. The effects of powder type and process temperature on the densification behavior and ultrasonic efficiency are discussed. For experimental tests, setup of ultrasonic assisted hot pressing of powders were designed and fabricated. The results show that applying ultrasonic vibrations leads to obtaining higher relative density. In addition, it is found that the effect of ultrasonic vibrations is greater for Ti-6Al-4V powders. However, the temperature has different effects on the ultrasonic vibrations efficiency in two types of powders.

## 1- مقدمه

بالا، مهمترین هدف در فرایند متالورژی پودر می‌باشد. عدم دستیابی به چگالی بالا و وجود تخلخل در قطعه به شدت استحکام آن را کاهش می‌دهد. در فرایند فشردن داغ، فشار و دمای بالا به طور همزمان به پودر درون قالب اعمال می‌گردد. در نتیجه به دلیل اعمال همزمان دما و فشار، مکانیزم‌های چگالش

در فرایند متالورژی پودر، ماده اولیه به شکل پودر فلزات و آلیاژها تولید می‌شود و با روش‌های مختلف از قبیل اکستروژن، فشردن و سپس زینتر کردن و نیز فشردن داغ به شکل قطعه نهایی در می‌آید. ساخت قطعات با حداقل تخلخل و استحکام

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

R. Abedini, A. Abdullah, Y. Alizadeh, V. Fartashvand, Effect of ultrasonic on hot compaction of AA1100 and Ti-6Al-4V powders, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 1-12, 2016 (in Persian)

می‌توان بدون نیاز به زمان بالای عملیات و فشار خیلی زیاد به چگالی‌های بالاتر و در نتیجه استحکام بالاتر قطعات دست یافت. اولین بار تأثیر اعمال ارتعاشات فراصوت بر خصوصیات استحکام مواد توسط نتایج آزمون‌های تجربی بلاها و لانگنکر منتشر گردید. آن‌ها نشان دادند با اعمال ارتعاشات فراصوت در آزمون کشش مواد مختلف نظیر آلومینیوم و تیتانیوم استحکام مواد متناسب با شدت ارتعاشات اعمالی کاهش می‌یابد [12-14]. امروزه از اعمال ارتعاشات فراصوت در بهبود و تسریع بسیاری از فرایندهای فیزیکی و شیمیایی در مقیاس صنعتی و تحقیقاتی استفاده می‌گردد. فراصوت به صورت مستقیم در بسیاری از فرایندها نظیر جوشکاری پلاستیک‌ها و ماشین‌کاری مواد سخت و ترد کاربرد صنعتی یافته است [15] و در بسیاری از فناوری‌های شکل‌دهی و ماشین‌کاری قطعات به عنوان کمک فرایند در حال تحقیق و توسعه می‌باشد [16-18]. برآیند نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که اعمال ارتعاشات فراصوت در شکل‌دهی فلزات موجب کاهش تنش سیلان ماده و کاهش نیروهای اصطکاک در سطوح درگیر می‌گردد [19]. اعمال ارتعاشات فراصوت در فرایندهای مختلف شکل‌دهی وابسته به پارامترهای مستقل نظیر نوع فلز یا آلیاژ، ساختار ماده، نیروهای شکل‌دهی، شرایط دمایی و پیشینه عملیات دارای اثرهای مختلفی می‌باشد.

تحقیقات در برخی زمینه‌های اعمال ارتعاشات فراصوت در فشرده‌سازی سرد پودر مواد مانند صنایع داروسازی به کاربرد صنعتی انجامیده است [20] اما در عملیات فشرده‌سازی داغ پودر، به دلیل مشکلات متعدد در فرایند فشرده‌سازی و به طور همزمان اعمال ارتعاشات فراصوت تحقیقات محدودی بر روی پودرهای نیکل، مس و آهن انجام گرفته است [10, 11, 21]. پوکریشو و همکارانش [10, 11] اثر ارتعاشات فراصوت بر چگالش داغ پودر نیکل و مس را تحت خلاء مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان‌دهنده آن بود که اعمال ارتعاشات فراصوت موجب افزایش نرخ چگالش در مراحل ابتدایی عملیات، شتاب بخشیدن به تبدیل حالت گذرا<sup>4</sup> به حالت پایدار چگالش<sup>5</sup> و افزایش نرخ کرنش کرنش خزش در مرحله پایدار چگالش گردیده است. لهفلدت [21] بیان کرد با اعمال ارتعاشات فراصوت بر فرایند فشرده‌سازی داغ پودر آهن می‌توان به اندازه 50°C دمای عملیات را کاهش داد. کرامپ و همکارانش [8] آزمون فشرده‌سازی داغ را بر روی پودر کرومی با اعمال ارتعاشات در فرکانس‌های 150Hz (ارتعاشی)

تسریع می‌گردند و می‌توان به چگالی‌های بالاتر و نزدیک به چگالی تئوری ماده پودر دست یافت. اعمال فشار زیاد در دمای بالا روشی سنتی برای دستیابی به چگالی‌های بالاتر می‌باشد. در صورتی که فشرده‌سازی به صورت سرد باشد نیاز به استفاده از دستگاه‌هایی با تناژ بالاتر و مصرف انرژی بالاتر و در نتیجه صرف هزینه بیشتر در ساخت قطعات است. در صورت فشرده‌سازی داغ نیاز به پرس‌های تناژ بالا با هزینه سرمایه‌گذاری بیشتر کاهش می‌یابد. برای کاهش بیشتر نیروهای پرس و رسیدن به چگالی کامل‌تر و استحکام بیشتر، تحقیقات در زمینه استفاده از روش‌ها و عوامل مکمل در این فرایند ادامه دارد [1]. فشرده‌سازی داغ در متالورژی پودر به دو صورت فشرده‌سازی محوری داغ<sup>1</sup> (VHP) و فشرده‌سازی همه‌جانبه داغ<sup>2</sup> (HIP) انجام می‌پذیرد. در فرایند فشرده‌سازی محوری داغ، پودر درون قالب ریخته شده و دما و فشار براساس یک نمودار مشخص با گذشت زمان افزایش می‌یابد. این عملیات توسط یک دستگاه پرس محوری با قابلیت اعمال نیروی (تنش) ثابت و در شرایط هم‌دما انجام می‌پذیرد. در فرایند فشرده‌سازی همه‌جانبه داغ، پودر درون یک قالب انعطاف‌پذیر از جنس الاستومر و یا فولاد ضد زنگ و نزدیک به شکل نهایی ریخته شده و درون کوره با اتمسفر خنثی و فشار و دمای بسیار بالا در مدت چند ساعت قرار می‌گیرد. هزینه ساخت قطعات در فرایند HIP به دلیل تجهیزات گران‌قیمت و مصرف انرژی زیاد، بسیار بالاست و اغلب در موارد مورد نیاز برای دستیابی به چگالی کامل و قطعه بدون تخلخل و ترک در قطعات دارای کاربرد بحرانی مورد استفاده قرار می‌گیرد [2].

عیب اصلی روش VHP نسبت به روش HIP، ضعف این روش در دستیابی به چگالی‌های بالا و قطعه همگن از نظر توزیع چگالی و خصوصیات میکروساختاری می‌باشد. دلیل این امر وجود اصطکاک بین ذرات پودر و نیز اصطکاک بین ذرات پودر با جداره قالب در حرکت خطی ذرات پودر در راستای فشرده‌سازی VHP می‌باشد. در حالی که در فرایند HIP به دلیل اعمال نیروی شعاعی همه‌جانبه نیروی اصطکاک نزدیک به صفر است. چگالش پودر در دمای بالا را می‌توان به کمک روش‌هایی مانند اعمال تنش خارجی [3, 4]، استفاده از مواد روان‌کار [5]، تبدیل فازها حین عملیات فشرده‌سازی [6, 7]، اعمال ارتعاشات با فرکانس پایین (ارتعاشی) [8, 9] یا ارتعاشات با فرکانس بالا (فراصوت)<sup>3</sup> [10, 11] تسهیل نمود. به کمک روش‌های یاد شده

<sup>1</sup> Vertical Hot Pressing (VHP)

<sup>2</sup> Hydrostatic Hot Pressing (HIP)

<sup>3</sup> Ultrasonic

<sup>4</sup> Transition state

<sup>5</sup> Steady state creep

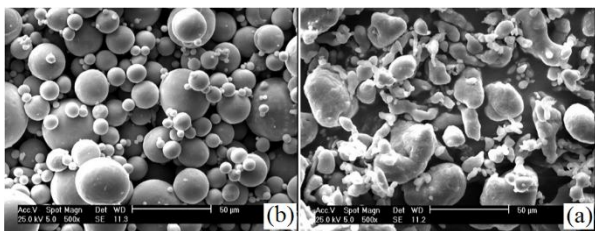


Fig. 1 SEM images of (a) <40  $\mu\text{m}$  irregular AA1100 and (b) <45  $\mu\text{m}$  spherical Ti-6Al-4V powder particles

شکل 1 تصویر SEM (a) پودر نامنظم AA1100 با اندازه ذرات <40 میکرومتر و (b) پودر کرووی Ti-6Al-4V با اندازه ذرات <45 میکرومتر

جدول 1 ترکیب شیمیایی دو نوع پودر آلومینیوم AA1100 و تیتانیوم Ti-6Al-4V

ترکیب شیمیایی					استاندارد	نوع پودر
Cu	Zn	Fe+Si	Al	آلیاژ	ISO	AA1100
0.2	0.2	0.95	99	درصد	6361	
Fe	O	V	Al	Ti	آلیاژ	Ti-6Al-4V
0.19	0.12	3.9	5.9	90	ASTM B384	

سنبه‌های بالا و پایین از فولاد گرم کار H13 (1.2344) با سختی 45HRC ساخته شده‌اند. هر نمونه آلومینیوم و آلیاژ تیتانیوم به ترتیب از 2 و 3 گرم پودر تشکیل شده است که پس از عملیات فشردن به شکل استوانه‌ای در ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  میلی‌متر تبدیل می‌شود. عملیات فشردن داغ در فشار ثابت 20 مگاپاسکال و دماهای نهایی 400، 500 و 600 درجه سانتی‌گراد برای پودر آلومینیوم و 750، 850 و 950 درجه سانتی‌گراد برای پودر آلیاژ تیتانیوم انجام گرفته است.

شکل 2 نمای اجزای چیدمان آزمون فشردن داغ پودر به کمک ارتعاشات فراصوت و تجهیزات داده‌برداری را نمایش می‌دهد. طراحی چیدمان می‌بایست به گونه‌ای باشد که نیروی استاتیک شکل‌دهی و نیروی دینامیک ارتعاشات فراصوت به طور همزمان به پودر اعمال گردند. بدین منظور ترانسدیوسر درون یک محفظه استوانه‌ای قرار گرفته و نیروی استاتیک شکل‌دهی از طریق محفظه استوانه‌ای به بوستر از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V اعمال می‌گردد. بوستر در نقطه گره به محفظه استوانه‌ای وصل است و در این ناحیه محفظه استوانه‌ای دارای راهگاه آب برای خنک‌کاری قطعات می‌باشد.

در بخش پایین مجموعه، سنبه پایین بر روی قطعه‌ای با امکان تنظیم موقعیت سنبه قرار گرفته است. این قطعه به منظور خنک‌کاری دارای راهگاه آب و به منظور تامین فشار گاز خنثی یا خلاء دارای راهگاه مجزا می‌باشد. این مجموعه به واسطه یک لودسل بر روی میز اصلی قرار گرفته است.

و 20kHz (فراصوت) مورد بررسی قرار دادند. آنها بیان داشتند چگالی حاصل از عملیات فشردن داغ با اعمال ارتعاشات فراصوت به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از آزمون فشردن داغ با اعمال ارتعاشات فرکانس پایین ارتعاشی می‌باشد. در تحقیقات اخیر عابدینی و همکاران به بررسی اثر پارامترهای فرایند مانند دما و فشار و ارتعاشات فراصوت، به طور مجزا، بر فشردن داغ پودرهای آلومینیوم [22] و آلیاژ تیتانیوم [23] پرداختند. آنها دریافتند با اعمال ارتعاشات فراصوت می‌توان به چگالی نهایی بالاتر و ساختار همگن‌تری از نظر توزیع چگالی دست یافت. در تحقیقات بیان شده مقایسه‌ای بین اثر فراصوت در مواد با خصوصیات مختلف و با شکل ذرات متفاوت انجام نگرفته است. در نتیجه در تحقیق انجام شده تأثیر ارتعاشات فراصوت بر فشردن داغ انواع پودر با شکل ذرات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

هدف این مقاله بررسی تأثیر اعمال ارتعاشات طولی فراصوت در امتداد سنبه در چگالش داغ پودرهای فلزی، به عنوان پیش زمینه‌ای برای کاربرد صنعتی این فناوری می‌باشد. بدین منظور آزمون‌های فشردن داغ بر روی انواع پودرهای فلزی شامل آلومینیوم AA1100 و آلیاژ Ti-6Al-4V با و بدون اعمال ارتعاشات فراصوت در شرایط مختلف دما و نوع ذرات پودر انجام شده و تأثیر هر کدام از این پارامترها بر منحنی چگالش، چگالی اولیه و نهایی مورد بحث قرار گرفته است. مقایسه اثر اعمال ارتعاشات فراصوت در فشردن داغ پودر دو ماده مختلف و با شکل ذرات متفاوت مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله موضوع یکنواختی چگالی در قطعات کار تولیدی مورد بررسی قرار نگرفته است و این موضوع در مقاله دیگری در آینده ارائه خواهد شد.

## 2- چیدمان تجربی آزمون

### 2-1- مواد آزمون

دو نوع پودر آلومینیوم خالص AA1100 با شکل نامنظم و اندازه ذرات <40 $\mu\text{m}$  (AA) و آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V با شکل کرووی و اندازه ذرات <45 $\mu\text{m}$  (Ti64) مورد استفاده قرار گرفته است. تصویر SEM<sup>1</sup> از شکل و اندازه ذرات پودر در شکل 1 و ترکیب شیمیایی دو نوع پودر در جدول 1 ارائه شده است.

### 2-2- طراحی و ساخت چیدمان آزمون فشردن داغ پودر

به منظور انجام آزمون‌های فشردن داغ یک قالب شناور استوانه‌ای از جنس گرافیت مورد استفاده قرار گرفته است.

<sup>1</sup> Scanning Electron Microscopy (SEM)

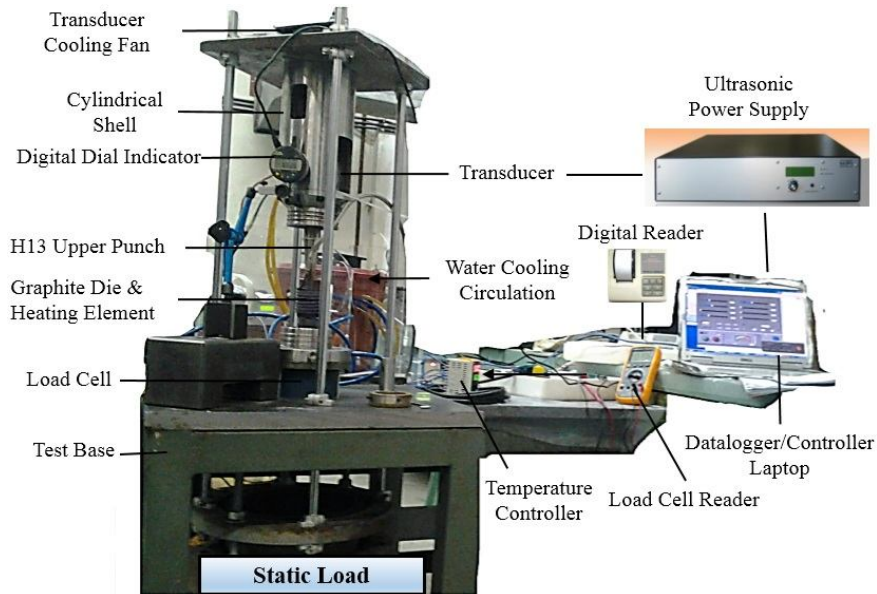


Fig. 2 Schematic view of ultrasonic assisted hot powder pressing setup and data logger equipment's

شکل 2 نمای چیدمان آزمون فشردن داغ پودر به کمک ارتعاشات فراصوت و تجهیزات داده‌برداری

حرکت خطی سنبه بالا توسط یک ساعت اندیکاتور دیجیتال (با تفکیک‌پذیری  $2\mu\text{m}$  و دقت  $3\mu\text{m}$ )، متصل به خواننده<sup>1</sup> و همچنین دستگاه کامپیوتر برای ضبط داده‌ها نسبت به زمان، از ابتدای اعمال فشار در شرایط هم‌دما تا زمان برداشتن فشار در انتهای فرایند اندازه‌گیری می‌شود.

### 2-3- اعمال ارتعاشات فراصوت

اعمال ارتعاشات فراصوت در فرایند فشردن سرد پودر به روش‌های مختلفی مانند اعمال ارتعاش طولی به سنبه، شعاعی به قالب و یا ترکیبی از آن‌ها انجام می‌گیرد [24]. اما در عملیات فشردن داغ به دلیل دمای بالای قالب حین عملیات و جنس گرافیت آن، نمی‌توان ارتعاشات را به صورت شعاعی به قالب اعمال نمود. به همین دلیل در طراحی چیدمان ارتعاشی در عملیات فشردن داغ پودر، اعمال فراصوت از بالا و به صورت طولی به ناحیه فشردن پودر اعمال می‌گردد.

به منظور اعمال ارتعاشات فراصوت از ترانس‌دیوسر ساندویچی پیزوالکتریک با توان  $2\text{kW}$  و فرکانس رزونانس  $25\text{kHz}$  و منبع تغذیه  $2\text{kW}$  ساخت شرکت  $\text{MPI}^2$  با قابلیت تنظیم خودکار فرکانس رزونانس<sup>3</sup> استفاده شده است. توسط نرم‌افزار منبع تغذیه می‌توان مشخصه‌های سلفی و خازنی، محدوده فرکانسی و دامنه و توان خروجی را تنظیم نمود تا در حین آزمون، کنترل خودکار مجموعه ارتعاشی انجام گیرد. حین انجام آزمون فشردن داغ به

با قرار دادن لودسل در زیر مجموعه و به دلیل شناور بودن قالب می‌توان نیروی اعمالی بر پودر حین عملیات فشردن را اندازه‌گیری نمود (شکل 3). در فشردن داغ پودر AA1100 گرمادهی قالب گرافیت توسط کوئل المنتی پیچیده شده به دور آن تامین شده است. اندازه‌گیری دما توسط یک ترموکوپل نوع K درون قالب گرافیت انجام می‌گیرد و دما توسط یک کنترلر و رله قطع و وصل برق المنت، تنظیم می‌گردد (شکل 2). در فشردن داغ پودر Ti-6Al-4V به دلیل دمای بالای مورد نیاز از حرارت‌دهی القایی برای گرمایش قالب گرافیت استفاده گردیده است. تنظیم دما در قالب گرافیت با استفاده از ترموکوپل نوع K و تنظیم فرکانس منبع تغذیه القایی تا رسیدن به دمای ثابت آزمون انجام می‌شود (شکل 3).

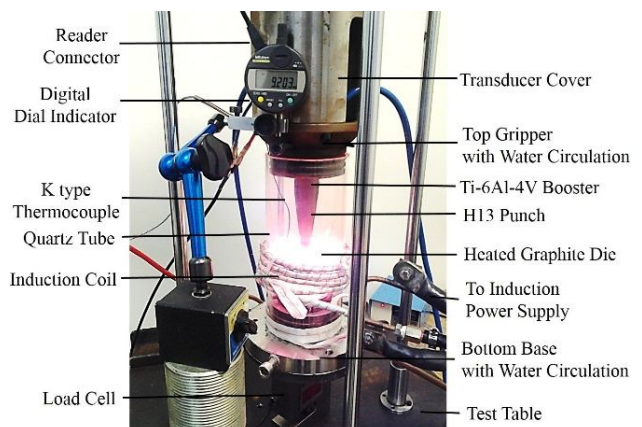


Fig. 3 Schematic view of ultrasonic assisted hot powder pressing setup  
شکل 3 نمای چیدمان آزمون فشردن داغ پودر به کمک ارتعاشات فراصوت

<sup>1</sup> Mitutoyo DP-1HS

<sup>2</sup> MPI welding generator

<sup>3</sup> Self-tuning

مد نظر قرار گرفته است. باید توجه نمود در ناحیه فرکانس رزونانس سری ترانسدیوسر نباید به هیچ وجه در هوا و یا در حالت با بار کم عمل نماید و باید با روشن نمودن منبع تغذیه بارگذاری کامل انجام شده باشد.

#### 2-4- اجرای آزمون فشردن داغ به کمک ارتعاشات فراصوت

در شکل 6 تأثیر اعمال فشار، دما و ارتعاشات فراصوت بر عملیات فشردن داغ پودر نشان داده شده است. در آزمون‌های بدون حضور ارتعاشات فراصوت ابتدا در حالت سرد فشار 20MPa اعمال شده و برداشته می‌شود (پیش بارگذاری). سپس دما با نرخ  $100^{\circ}\text{C}/\text{min}$  تا  $0/6$  دمای نهایی آزمون افزایش یافته و پس از 5 دقیقه ماندن در دمای ثابت دوباره با نرخ  $50^{\circ}\text{C}/\text{min}$  تا دمای نهایی آزمون گرم می‌شود و ده دقیقه تا زمان اعمال فشار دما ثابت نگه داشته می‌شود. پس از دستیابی به شرایط هم‌دما، فشار 20MPa اعمال می‌گردد و حین عملیات چگالش ثابت نگه داشته می‌شود. پس از پایان زمان عملیات، فشار برداشته شده و نمونه تا دمای محیط سرد می‌گردد. زمان عملیات اعمال فشار برای هر دو نوع پودر برابر 10min در نظر گرفته شده است.

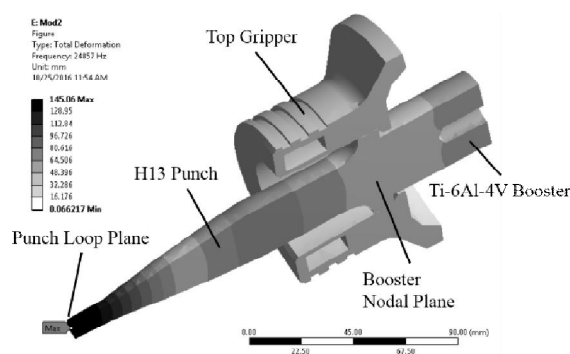


Fig. 4 Modal analysis of resonating setup with ANSYS Workbench software

شکل 4 تحلیل مودال مجموعه ارتعاشی در نرم‌افزار انسیس

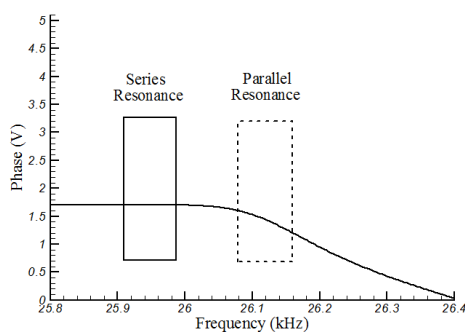


Fig. 5 Typical scanning curve (wide scanning range) of resonating setup under test condition

شکل 5 نمودار اسکن فرکانس رزونانس مجموعه ارتعاشی تحت شرایط آزمون فشردن داغ

دلیل تغییر دما و طول نمونه پودر و همچنین تغییر در شرایط مرزی، فرکانس رزونانس تغییر می‌نماید. منبع تغذیه با پایش پارامترهای جریان خروجی و فاز ولتاژ و جریان، توان و دامنه خروجی را بر روی مقدار مد نظر تنظیم می‌نماید.

تحلیل درست رفتار مجموعه ارتعاشی و مشخصه‌های اصلی آن شامل شکل مود و فرکانس رزونانس، لازمه ساخت آن می‌باشد. به منظور عملکرد درست چیدمان ارتعاشی، یکسان بودن فرکانس رزونانس ترانسدیوسر و مجموعه ارتعاشی متصل به آن لازم می‌باشد. بدین منظور برای طراحی ترانسدیوسر و مجموعه ارتعاشی از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی اجزاء محدود نظیر انسیس<sup>1</sup> [25] و آباکوس<sup>2</sup> [26] استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر شبیه‌سازی اجزاء محدود مجموعه ارتعاشی در نرم‌افزار انسیس و در ماژول تحلیل مودال<sup>3</sup> انجام گرفته است. مجموعه ارتعاشی به گونه‌ای طراحی شده است که در مود ارتعاش طولی<sup>4</sup> و فرکانس رزونانس مورد نظر (25kHz) انتهای سنبه دارای بیشترین دامنه ارتعاش (شکم ارتعاشی) و ناحیه اتصال بوستر به قطعه نگهدارنده بالا دارای کمترین دامنه ارتعاش (گره ارتعاشی) باشد (شکل 4). نیروی استاتیک شکل‌دهی از طریق قطعه نگهدارنده بالا به بوستر تیتانیومی منتقل می‌گردد. اتصال این دو از نقطه گره بوستر موجب اجتناب از انتقال ارتعاشات به بخش اعمال نیروی استاتیک و دیگر اجزای غیر ارتعاشی دستگاه آزمون می‌گردد.

شکل 5 نمودار اسکن فرکانس رزونانس مجموعه ارتعاشی تحت شرایط آزمون (تحت بار استاتیک و دمای بالا) در عملیات فشردن داغ پودر را نمایش می‌دهد که ناحیه فرکانس موازی<sup>5</sup> و سری<sup>6</sup> به ترتیب با خط چین و خط کامل سفید رنگ مشخص شده‌اند. فرکانس رزونانس موازی ناحیه ایمن عملکرد منبع تغذیه و ترانسدیوسر اولتراسونیک می‌باشد و اغلب در کاربردهایی که بار استاتیک چندانی به مجموعه ارتعاشی وارد نمی‌شود مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرکانس رزونانس سری، ناحیه با قدرت بالای اعمال ارتعاشات و همچنین با ریسک بالا می‌باشد و اغلب به منظور استفاده در فرایندهای با نیروها و تنش‌های زیاد مانند جوشکاری فلزات مورد استفاده قرار می‌گیرد. به دلیل اعمال نیروی استاتیک زیاد مورد نیاز در آزمون فشردن داغ به کمک ارتعاشات اولتراسونیک محدوده فرکانس سری مجموعه ارتعاشی

<sup>1</sup> ANSYS Workbench R15.0

<sup>2</sup> ABAQUS

<sup>3</sup> Modal Analysis

<sup>4</sup> Longitudinal vibration mode

<sup>5</sup> Parallel frequency

<sup>6</sup> Serious frequency

اندازه‌گیری ارتفاع نمونه پس از پایان فشرده‌سازی ( $H_f$ ) و خروجی ضبط شده حرکت سنبه طی زمان تعیین شده است. با شروع اعمال فشار، به دلیل کاهش نرخ چگالش و به طبع آن کاهش حرکت سنبه با گذشت زمان، در مراحل ابتدایی، میانه و انتهای عملیات فاصله زمانی 0/25، 1 و 5 ثانیه برای داده‌برداری از حرکت سنبه توسط ساعت دیجیتال انتخاب گردید. تعیین چگالی لحظه‌ای<sup>2</sup> ( $\rho$ ) نمونه‌ها حین آزمون فشردن داغ براساس رابطه (2) و با استفاده از مقادیر چگالی نهایی ( $\rho_f$ )، ارتفاع لحظه‌ای ( $H$ ) و نهایی ( $H_f$ ) نمونه و چگالی تئوری ماده پودر ( $\rho_{Th}$ ) انجام گرفته است.

$$\rho_f = \frac{m_1 \times \rho_{water,25C}}{(m_2 - m_3)} \quad (1)$$

$$D = \frac{H_f \times \rho_f}{H \times \rho_{Th}} \quad (2)$$

### 3- آزمون‌ها و نتایج

جدول 2 به طور خلاصه مشخصه‌های پودر و شرایط آزمون شامل فشار، دما و زمان عملیات و توان ارتعاشات فراصوت را نمایش می‌دهد. شرایط آزمون شامل زمان، فشار، توان ارتعاشات فراصوت و فرکانس رزونانس برای دو نوع پودر یکسان می‌باشد. دمای عملیات فشردن داغ با توجه به اختلاف دمای ذوب دو نوع پودر AA1100 و Ti-6Al-4V متفاوت می‌باشد.

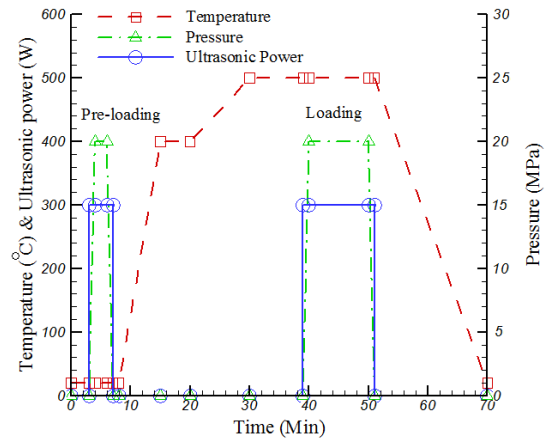
شکل 7 نمونه‌های حاصل از عملیات فشردن داغ پودر AA1100 و Ti-6Al-4V تحت تنش 20MPa در دماهای مختلف را نمایش می‌دهد.

جدول 2 مشخصه‌های پودر و شرایط آزمون فشردن داغ پودر AA1100 و Ti-6Al-4V به کمک ارتعاشات فراصوت

**Table 2** Powder properties and experimental conditions of ultrasonic assisted hot pressing of AA1100 and Ti-6Al-4V powders

مشخصه/ماده	آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V)	آلومینیوم (AA1100)
دمای ذوب	1660°C	660°C
ضریب انتقال حرارت	222 W/m-k	6.7 W/m-k
اندازه ذرات پودر	45 (µm) کروی	40 (µm) نامنظم
فشار عملیات	20 (MPa)	20 (MPa)
دمای نهایی عملیات	750, 850, 950 °C	400, 500, 600 °C
زمان عملیات فشردن	10 (min)	10 (min)
توان ارتعاشات فراصوت	0, 300 W	0, 300 W
فرکانس رزونانس	25 (kHz)	25 (kHz)

<sup>2</sup> Instantaneous density



**Fig. 6** Graph of the ultrasonic assisted hot pressing cycle and temperature (°C), static pressure (MPa), and ultrasonic power (W) variation over time

شکل 6 نمودار تغییر دما (بر حسب درجه سانتی‌گراد)، فشار استاتیک (بر حسب مگاپاسکال) و ارتعاشات فراصوت (توان ارتعاشات بر حسب وات) حین عملیات فشردن داغ پودر

در آزمون‌های همراه با اعمال ارتعاشات فراصوت، به منظور بررسی تأثیرگذاری اعمال ارتعاشات فراصوت بر چگالی اولیه و چگالی نهایی، در دو مرحله پیش بارگذاری (در دمای محیط) و بارگذاری (دمای بالا) قبل از اعمال نیروی استاتیک، ارتعاشات اعمال شده و پس از برداشتن فشار فراصوت خاموش می‌گردد (خط با نشان دایره در شکل 6).

### 5-2- تعیین مشخصه‌های نمونه‌ها

پس از پایان فرایند فشردن داغ و خارج کردن نمونه از قالب، چگالی نهایی نمونه‌ها براساس قانون ارشمیدس (ASTM B311-93) و با اندازه‌گیری وزن و محاسبه حجم نمونه‌ها و با فرض چگالی  $2/71 \text{ g/cm}^3$  برای ماده بالک آلومینیوم AA1100 [27] و چگالی  $4/43 \text{ g/cm}^3$  برای ماده بالک آلیاژ Ti-6Al-4V [28] محاسبه شده است. بدین منظور ابتدا نمونه‌ها با یک ترازوی دقیق با تفکیک‌پذیری 1 میلی‌گرم اندازه‌گیری گردیدند ( $m_1$ ) و سپس درون پارافین مایع داغ غوطه‌ور شدند تا پارافین به داخل خلل و فرج باز نمونه متخلخل نفوذ نماید. سپس وزن نمونه مجدد اندازه‌گیری شده ( $m_2$ ) و در نهایت وزن آن‌ها در حالت غوطه‌وری در آب مقطر اندازه‌گیری گردیده است ( $m_3$ ). در نهایت براساس رابطه (1) چگالی نهایی ( $\rho_f$ ) نمونه‌ها تعیین گردیده است.

برای رسم منحنی چگالش پودر<sup>1</sup> شامل نمودار چگالی نسبی نسبت به زمان، ابتدا ارتفاع لحظه‌ای نمونه ( $H$ ) براساس

<sup>1</sup> Densification curve

(C) و یک حالت با اعمال ارتعاشات فراصوت (UT) در توان 300W انجام شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمامی حالت‌ها، اعمال ارتعاشات فراصوت موجب دستیابی به نرخ چگالش بالاتر و در نتیجه چگالی بالاتر قطعات شده است. همچنین با افزایش دما تأثیر اعمال ارتعاشات فراصوت در افزایش چگالی نهایی کاهش یافته است.

شکل 9 منحنی چگالش پودر کرومی تیتانیوم Ti-6Al-4V در حداکثر اندازه ذرات 45 میکرون را تحت تنش 20MPa در دماهای نهایی 750، 850 و 950 درجه سانتی‌گراد و در حالت‌های بدون (C) و با (UT) اعمال ارتعاشات فراصوت نمایش می‌دهد. با توجه به نمودارها در همه دماها و در فشار ثابت 20MPa، اعمال ارتعاشات فراصوت موجب دستیابی به نرخ چگالش و چگالی نهایی بالاتر شده است. مشاهده می‌شود تأثیرگذاری اعمال ارتعاشات فراصوت در افزایش چگالی نهایی در دماهای بالاتر بیشتر بوده است.

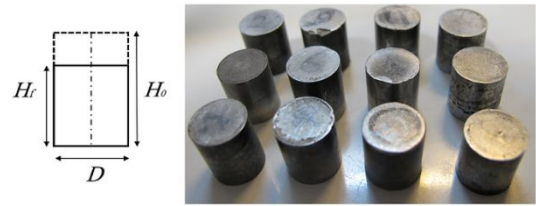


Fig. 7 Hot pressed powder samples and their main dimensions

شکل 7 نمونه‌های حاصل از عملیات فشردن داغ پودر و ابعاد اصلی نمونه فشرده شده

در سمت راست، شکل نمونه‌های حاصل پس از خروج از قالب و در سمت چپ شماتیک ابعاد اولیه و نهایی نمونه فشرده شده نشان داده شده است. نمای ابعاد قطعه قبل و پس از فشردن داغ در سمت راست نشان داده شده است.

شکل 8 منحنی چگالش فشردن داغ پودر AA1100 و شکل نامنظم با حداکثر اندازه ذرات 40 میکرون تحت فشار 20MPa و در دماهای نهایی 400، 500 و 600 درجه سانتی‌گراد را نمایش می‌دهد. آزمون‌ها در یک حالت بدون اعمال ارتعاشات فراصوت

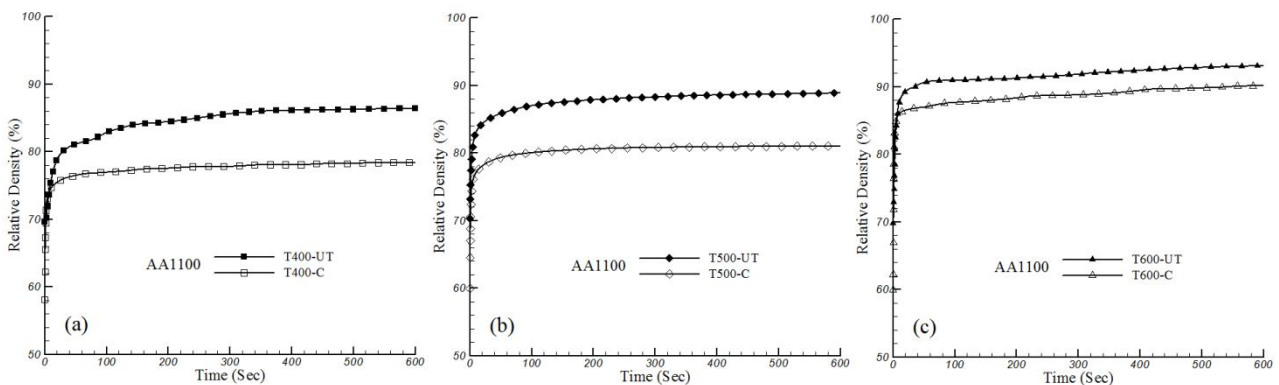


Fig. 8 Densification curve of aluminum powder (relative density vs. time) at (a) 400 °C, (b) 500°C and (c) 600°C under 20 MPa pressure without (C) and with (UT) ultrasonic vibrations

شکل 8 منحنی چگالش (چگالی نسبی-زمان) پودر آلومینیوم AA1100 تحت تنش 20MPa در دماهای نهایی (a) 400°C، (b) 500°C و (c) 600°C بدون (C) و با (UT) اعمال ارتعاشات فراصوت

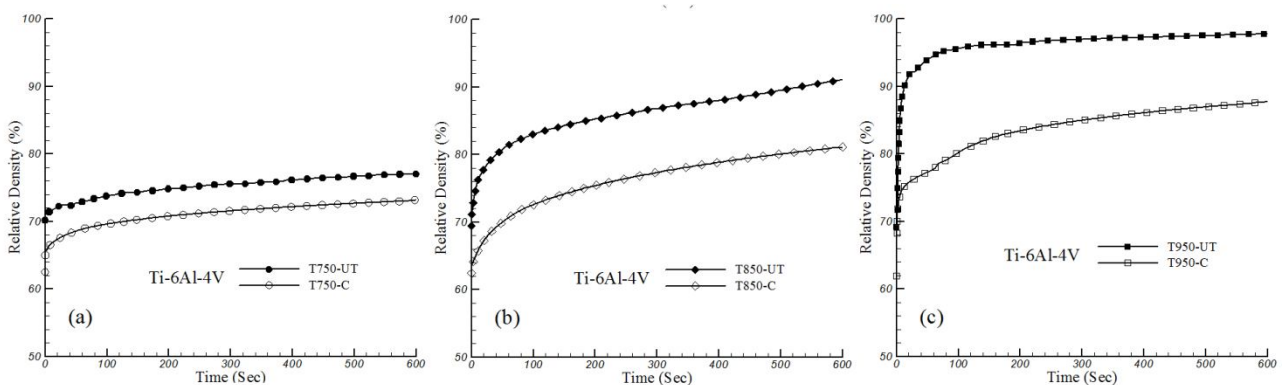


Fig. 9 Densification curve of Ti-6Al-4V powder (relative density vs. time) at (a) 750°C, (b) 850°C and (c) 950 °C under 20 MPa pressure without (C) and with (UT) ultrasonic vibrations

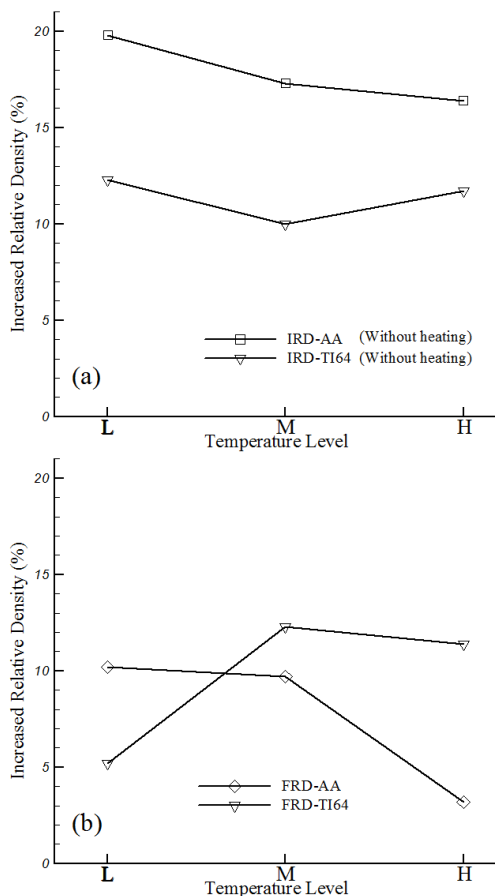
شکل 9 منحنی چگالش (چگالی نسبی-زمان) پودر تیتانیوم Ti-6Al-4V تحت تنش 20MPa در دماهای نهایی (a) 750°C، (b) 850°C و (c) 950°C بدون (C) و با (UT) اعمال ارتعاشات فراصوت

4V را با یکدیگر مقایسه نموده است. در این نمودار دمای آزمون در سه سطح پایین (L)، متوسط (M) و بالا (H) نمایش داده شده است.

#### 4- بحث

##### 4-1- چگالی اولیه

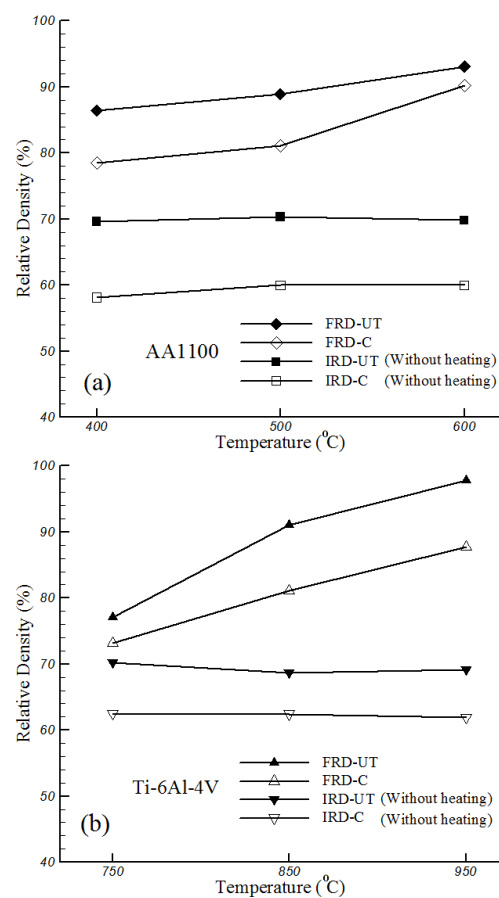
با توجه به نتایج چگالی نسبی اولیه و نهایی در آزمون فشردن داغ پودر AA1100 در حالت فشردن معمول (شکل 10-a)، با اعمال فشار و پیش بارگذاری در دمای محیط، متوسط چگالی اولیه در حالت بدون (AA-IRD-C) و با (AA-IRD-UT) اعمال ارتعاشات فراصوت به ترتیب برابر 59/4 و 69/9 درصد می‌باشد.



**Fig. 11** Increased (a) Initial (IRD) and (b) Final (FRD) Relative Density results as a function of hot powder pressing temperature level with application of ultrasonic vibration for AA1100 and Ti-6Al-4V powders  
شکل 11 نمودار مقایسه افزایش (a) چگالی نسبی اولیه (IRD) و (b) نهایی (FRD) در فشردن داغ پودرهای AA1100 و Ti-6Al-4V در سطوح دماهایی مختلف در اثر اعمال ارتعاشات فراصوت

در نتیجه مشاهده می‌شود در پودر AA1100 اعمال ارتعاشات فراصوت به طور متوسط موجب افزایش چگالی اولیه به میزان

نتایج حاصل از تعیین چگالی نسبی اولیه<sup>1</sup> (IRD) و نهایی<sup>2</sup> (FRD) نمونه‌های حاصل از آزمون فشردن داغ دو نوع پودر AA1100 و Ti-6Al-4V در دو حالت بدون و با اعمال ارتعاشات فراصوت در دماهای مختلف و تحت فشار 20MPa به ترتیب در شکل‌های 10-a و 10-b نمایش داده شده‌اند. چگالی اولیه بیانگر چگالی خسته خام پودر<sup>3</sup> حاصل از اعمال فشار در دمای محیط در مرحله پیش بارگذاری می‌باشد. با توجه به نتایج شکل 10، مشاهده می‌شود چگالی اولیه و نهایی با اعمال ارتعاشات فراصوت در هر دو نوع پودر AA1100 و Ti-6Al-4V افزایش یافته است.



**Fig. 10** Initial (IRD) and Final (FRD) relative density results as a function of hot powder pressing temperature without (C) and with (UT) ultrasonic vibration for (a) AA1100 and (b) Ti-6Al-4V powder

شکل 10 نمودار نتایج چگالی نسبی اولیه (IRD) و نهایی (FRD) فشردن داغ در دماهای مختلف و در دو حالت بدون (C) و با اعمال ارتعاشات فراصوت برای پودر (a) AA1100 و (b) Ti-6Al-4V

شکل 11 درصد افزایش چگالی نسبی<sup>4</sup> اولیه و نهایی نمونه‌های حاصل از آزمون فشردن داغ دو نوع پودر AA1100 و Ti-6Al-

<sup>1</sup> Initial relative density (IRD)

<sup>2</sup> Final relative density (FRD)

<sup>3</sup> Green powder compact

<sup>4</sup> Increased relative density

<sup>5</sup> High, Medium and Low level temperatures



#### 2-4- چگالی نهایی

در آزمون فشردن داغ پودر نامنظم AA1100 بدون اعمال ارتعاشات فراصوت، با  $100^{\circ}\text{C}$  افزایش دما از 400 به 500 و 600 درجه سانتی‌گراد، چگالی نسبی نهایی (AA-FRD-C) به ترتیب 3/3 و 4/8 درصد افزایش یافته است. همچنین در آزمون پودر Ti-6Al-4V، با  $100^{\circ}\text{C}$  افزایش دما از 750 به 850 و 950 درجه سانتی‌گراد چگالی نسبی نهایی (Ti64-FRD-C) به ترتیب 10/8 و 8/2 درصد افزایش یافته است.

در دماهای مختلف، اعمال ارتعاشات فراصوت در فشردن داغ پودر AA1100 به طور متوسط موجب افزایش 7.7 درصدی (حداکثر 10/2 درصد در دمای  $400^{\circ}\text{C}$ ) در چگالی نسبی نهایی شده و در حالی که این میزان برای پودر Ti-6Al-4V برابر 9/6 درصد (حداکثر 12/3 درصد در دمای  $850^{\circ}\text{C}$ ) بوده است. در نتیجه می‌توان بیان داشت که ارتعاشات فراصوت در چگالش پودر داغ تیتانیوم با شکل ذرات کروی دارای تأثیرگذاری بیشتری می‌باشد.

با مقایسه مقادیر افزایش چگالی نهایی با اعمال ارتعاشات فراصوت به ترتیب در دو نوع پودر AA1100 و Ti-6Al-4V در نمودار شکل 12-b می‌توان دریافت که در پودر AA1100 با افزایش دما تأثیرگذاری فراصوت کاهش یافته است در حالی که بالعکس در پودر Ti-6Al-4V با افزایش دما تأثیر ارتعاشات فراصوت افزایش یافته است. با افزایش دما، تأثیرگذاری اعمال ارتعاشات فراصوت به دو عامل دما و میزان تخلخل باقیمانده وابسته می‌گردد. مقدار تخلخل نمونه حاصل از فشردن داغ معمول پودر Ti-6Al-4V بیشتر از مقدار آن در پودر AA1100 می‌باشد. در نتیجه ظرفیت لازم برای تغییر شکل بیشتر در حالت اعمال ارتعاشات فراصوت در پودر Ti-6Al-4V بیشتر می‌باشد.

در پودر AA1100 با  $100^{\circ}\text{C}$  افزایش دما چگالی نهایی به طور متوسط 4/1 درصد افزایش می‌یابد، در حالی که با اعمال ارتعاشات فراصوت این مقدار برابر 7/7 درصد می‌باشد. همچنین در پودر Ti-6Al-4V مقدار افزایش چگالی نهایی در اثر  $100^{\circ}\text{C}$  افزایش دما و اعمال ارتعاشات فراصوت به ترتیب برابر 9/5 و 9/6 درصد می‌باشد. با مقایسه نتایج افزایش چگالی نهایی توسط دو عامل مستقل افزایش دما و اعمال ارتعاشات فراصوت، می‌توان بیان داشت اعمال ارتعاشات فراصوت معادل حداقل  $100^{\circ}\text{C}$  افزایش دمای عملیات فشردن داغ پودر می‌باشد.

#### 3-4- تأثیر ارتعاشات فراصوت بر مکانیزم‌های چگالش

رفتار کلی چگالش به دلیل تفاوت در وابستگی مکانیزم‌های غالب

17/8 درصد گردیده است (شکل 11-a). همچنین، برای پودر Ti-6Al-4V با اعمال ارتعاشات فراصوت، متوسط مقدار چگالی اولیه در حالت فشردن سرد از 62/3 درصد (TI64-IRD-C) به 69/4 درصد (TI64-IRD-UT) رسیده (شکل 10-b) که 11/3 درصد افزایش در چگالی نسبی اولیه را نشان می‌دهد (شکل 11-b).

میزان چگالی اولیه در حالت پیش بارگذاری بدون اعمال ارتعاشات فراصوت به طور مستقیم به شکل و جنس ذرات پودر وابسته است. در پودر آلومینیوم به دلیل شکل نامنظم ذرات (شکل 1) فضای خالی بیشتری بین ذرات مجاور هم بوجود می‌آید و از طرفی تعداد ذرات همسایه در این حالت پایین‌تر است. اما در پودر تیتانیوم به دلیل شکل کروی ذرات و همچنین وجود تعداد ذرات مجاور بیشتر، چگالی اولیه بالاتری بدست آمده است. اگرچه، مدول الاستیسیته و تنش تسلیم ذرات پودر آلومینیوم پایین‌تر بوده و انتظار می‌رفت چگالی اولیه بیشتری نتیجه دهد.

در هر دو نوع پودر با اعمال ارتعاشات فراصوت و در نتیجه تغییر در چیدمان ذرات، پودرها متراکم‌تر شده و چگالی اولیه افزایش می‌یابد. کاهش ضریب اصطکاک (قابلیت جابجایی بهتر ذرات پودر)، افزایش دمای موضعی در نقاط تماس و نرم‌شدگی آکوستیکی (تغییر شکل و حذف فضای خالی بین ذرات پودر) را می‌توان از عوامل تأثیرگذار در افزایش چگالی نسبی اولیه با اعمال ارتعاشات فراصوت دانست. با فرض افزایش دمای موضعی یکسان برای دو نوع پودر به واسطه اعمال ارتعاشات فراصوت، به دلیل دمای ذوب متفاوت دو نوع پودر AA1100 ( $660^{\circ}\text{C}$ ) و Ti-6Al-4V ( $1660^{\circ}\text{C}$ )، مشاهده می‌شود نرم‌شدگی آکوستیک در پودر با دمای ذوب پایین‌تر (آلومینیوم AA1100) بیشتر بوده است.

در حالت پیش بارگذاری استاتیک و اعمال ارتعاشات فراصوت در دمای محیط بر روی پودر AA1100 به دلیل جذب انرژی ارتعاشی در پودر و قالب، در توان 100W افزایش دما در حدود 60 درجه سانتی‌گراد مشاهده شده است، بعلاوه در توان بالاتر اعمال ارتعاشات (300W)، به مدت 2 دقیقه، دما تا 170 درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. این مقدار افزایش دما در مقایسه با دمای ذوب پودر آلومینیوم قابل ملاحظه می‌باشد. این افزایش دمای محدود در اثر اعمال ارتعاشات فراصوت در دستیابی به چگالش بیشتر پودر AA1100 در مرحله پیش بارگذاری و دستیابی به چگالی اولیه بالاتر تأثیرگذار بوده است.

[31]. در تحقیقات لانگنکر [13]، ایجاد حرارت موضعی در نابعایی‌های مهمترین عامل نرم‌شدگی آکوستیکی بیان شده است. در فرایند فشردن داغ پودر مرز ذرات پودر و دانه‌ها در میکروساختار مهمترین منابع نابعایی می‌باشند. از طرفی خزش نابعایی‌ها بخصوص در مرز دانه‌ها و ذرات پودر مهمترین عامل چگالش در دمای بالا می‌باشد. اعمال ارتعاشات فراصوت موجب افزایش دما در نابعایی‌ها شده و در نتیجه حرکت حجمی ذرات و تغییر شکل ماده را تسهیل می‌نماید. هر مقدار انرژی ارتعاشی وارد شده به ماده بیشتر باشد انرژی بیشتری در نابعایی‌ها آزاد می‌شود و در پی آن دمای موضعی بیشتر افزایش یافته و تنش سیلان ماده کاهش می‌یابد. در این ارتباط، لانگنکر [13] بیان داشته است برای دستیابی به یک مقدار مشخص کاهش تنش سیلان ماده، انرژی گرمایی لازم برای افزایش دمای کل ماده  $10^7$  برابر انرژی ارتعاشات فراصوت مورد نیاز برای اعمال به ماده می‌باشد. این نسبت اثرگذاری بسیار بالاتر اعمال ارتعاشات فراصوت را در مقایسه با افزایش دمای کل ماده نشان می‌دهد. افزایش نرخ چگالش و چگالی نهایی در فشردن داغ پودر AA1100 و Ti-6Al-4V را می‌توان به همین عامل ایجاد حرارت موضعی در نقاط اتصال مرز ذرات و دانه‌های درون ذرات نسبت داد. اما اختلاف در تأثیرگذاری حرارت را باید به اختلاف ضریب انتقال حرارت دو ماده نسبت داد. در پودر AA1100 به دلیل ضریب انتقال حرارت بالای آلومینیوم ( $222\text{W/m}\cdot\text{k}$ )، حرارت موضعی ایجاد شده در نابعایی‌ها به سرعت در کل ماده پخش می‌شود و دمای کل ماده را افزایش می‌دهد. در حالی که در پودر Ti-6Al-4V به دلیل ضریب انتقال حرارت پایین آن ( $6/7\text{W/m}\cdot\text{k}$ )، حرارت موضعی ایجاد شده به سختی به دیگر نقاط ماده منتقل می‌شود و بیشتر در نقاط تغییرشکل با حجم بالاتر نابعایی‌ها متمرکز می‌ماند و در نتیجه موجب تغییرشکل بیشتر ماده می‌گردد.

با توجه به نتایج ارائه شده می‌توان بیان داشت که اعمال ارتعاشات فراصوت به دو شکل چگالی نهایی قطعه را افزایش می‌دهد: الف) افزایش چگالی نسبی اولیه پودر فشرده شده در دمای محیط در مرحله پیش بارگذاری و ب) افزایش نرخ چگالش و چگالی نهایی در مرحله بارگذاری در فرایند فشردن داغ در دمای بالا. در فرایند فشردن داغ پودر، اعمال ارتعاشات فراصوت، با افزایش دمای موضعی، موجب تسهیل حرکت حجمی ذرات (تغییرشکل پلاستیک و خزش نابعایی‌ها) می‌شود که افزایش چگالش، یکنواختی ساختار و استحکام قطعه فشرده شده را در پی دارد.

به پارامترهای موثر، پیچیده می‌باشد. مکانیزم‌های چگالش شامل چیدمان مجدد ذرات، پلاستیسیته (تسلیم/ صعود نابعایی‌ها)<sup>1</sup>، خزش توانی (خزش نابعایی‌ها)<sup>2</sup>، نفوذ شبکه‌ای و مرز دانه‌ای<sup>3</sup> می‌باشند [29]. فشردن داغ پودر را می‌توان به دو مرحله گذرا و پایدار تقسیم‌بندی نمود. در مرحله اولیه چگالش پودر به دلیل تمرکز تنش بسیار بالا در نقاط تماس ذرات پودر، تغییرشکل پلاستیک ذرات پودر در تماس با یکدیگر در نقاط گلوبی مکانیزم غالب در چگالش می‌باشد. اما در مراحل نهایی و پایدار، پدیده‌های وابسته به زمان مانند خزش و نفوذ، مکانیزم غالب در چگالش پودر می‌باشند.

از طرفی نرخ چگالش ماده حین فرایند فشردن داغ به پارامترهای مختلفی از جمله خصوصیات ذاتی مواد (استحکام تسلیم، ضرایب خزش و نفوذ)، مشخصه‌های نمونه (چگالی اولیه، هندسه قطعه، اندازه و شکل ذرات پودر) و پارامترهای فرایند فشردن داغ (دما و فشار) وابسته است. در آزمون‌های انجام گرفته با توجه به فشار ثابت 20MPa و محدوده منتخب دمای عملیات، برای هر دو نوع پودر AA1100 و Ti-6Al-4V مطابق با نتایج آزمون‌های تجربی اشی و همکاران [30] مکانیزم غالب در مراحل اولیه گذرا (ناحیه با شیب تند ابتدای عملیات) تغییرشکل پلاستیک و در مرحله پایدار (ناحیه کاهش شیب تا انتهای عملیات فشردن) خزش نابعایی‌ها می‌باشد.

با مقایسه نمودارهای چگالش در حالت‌های بدون و با اعمال ارتعاشات فراصوت می‌توان دریافت اعمال ارتعاشات فراصوت موجب تسریع در ناحیه اولیه گذرا و کاهش زمان رسیدن به ناحیه خزش پایدار می‌گردد (شکل‌های 8 و 9). در نتیجه می‌توان بیان داشت که ارتعاشات فراصوت بر هر دو عامل اصلی چگالش در دمای بالا یعنی تغییرشکل پلاستیک و خزش نابعایی‌ها تأثیرگذار است و باعث تسریع در پدیده‌ها و مکانیزم‌های غالب چگالش می‌گردد.

به منظور تبیین اثر دما بر تأثیرگذاری متفاوت ارتعاشات اولتراسونیک در دو نوع پودر AA1100 و Ti-6Al-4V می‌توان اختلاف ضریب انتقال حرارت را به عنوان یک عامل اساسی مطرح نمود. ضریب انتقال حرارت بیانگر قابلیت انتقال حرارت از نقطه‌ای به نقطه دیگر از ماده می‌باشد. در ابتدا باید بیان داشت، نرم‌شدگی آکوستیکی<sup>4</sup> به عنوان مهمترین عامل در کاهش تنش سیلان به واسطه اعمال ارتعاشات فراصوت شناخته می‌شود

<sup>1</sup> Plasticity (Yielding/dislocation glide)

<sup>2</sup> Power law creep (Dislocation creep)

<sup>3</sup> Lattice and Grain boundary diffusion

<sup>4</sup> Acoustic softening

$H$	ارتفاع لحظه‌ای (mm)
$H_f$	ارتفاع قطعه فشرده شده (mm)
$m_1$	وزن اولیه نمونه متخلخل (g)
$m_2$	وزن نمونه متخلخل پس از غوطه‌وری در پارافین (g)
$m_3$	وزن نمونه متخلخل در آب (g)

#### علایم یونانی

$\rho_{Th}$	چگالی تئوری ماده ( $\text{g/cm}^3$ )
$\rho$	چگالی لحظه‌ای نمونه ( $\text{g/cm}^3$ )
$\rho_{water,25C}$	چگالی آب در دمای $25^\circ\text{C}$ ( $\text{g/cm}^3$ )

#### 7- مراجع

- [1] R. M. German, *Powder metallurgy and particulate materials processing: the processes, materials, products, properties, and applications*, Second Edition, pp. 42-104, Metal powder industries federation Princeton, Princeton: NJ, 2005.
- [2] M. H. Bocanegra, Review hot isostatic pressing (HIP) technology and its applications to metals and ceramics, *Journal of materials science*, Vol. 39, No. 1, pp. 6399-6420, 2004.
- [3] M. F. Ashby, H. J. Frost, *Deformation-Mechanism Maps: The Plasticity and Creep of Metals and Ceramics*, First Edition, pp. 10-50, Oxford: Pergamon Press, 1982.
- [4] D. S. Wilkinson, M. F. Ashby, Pressure Sintering by Power Law Creep, *Acta Metallurgica*, Vol. 23, No. 11, pp. 1277-1285, 1975.
- [5] B. Ye, M. R. Matsen, D. C. Dunand, Enhanced densification of Ti-6Al-4V powders by transformation-mismatch plasticity, *Acta Materialia*, Vol. 58, No. 11, pp. 3851-3859, 2010.
- [6] P. Samal, J. Newkirk, *Powder metallurgy methods and applications*, 2015 Edition, pp. 9-19, ASM International, 2015.
- [7] C. Schuh, P. Noël, D. C. Dunand, Enhanced densification of metal powders by transformation-mismatch plasticity, *Acta Materialia*, Vol. 48, No. 8, pp. 1639-1653, 2000.
- [8] K. H. Staffa, P. Trimmel, W. Kromp, N. Claussen, Vibratory hot pressing of spherical copper powder at 150 and 20 000 Hz, Part II: Comparison of experimental and theoretical results, *powder metal*, Vol. 18, No. 2, pp. 66-70, 1986.
- [9] K. H. Staffa, P. Trimmel, W. Kromp, N. Claussen, Vibratory hot pressing of spherical copper powder at 150 and 20 000 Hz, Part III: Complementary experiments on particle rearrangement, *powder metal*, Vol. 18, No. 4, pp. 271-274, 1986.

در نهایت می‌توان بیان نمود که اعمال ارتعاشات فراصوت در فرایند فشرده‌سازی داغ با توجه به بازده بالای مصرف انرژی در ترانسدیوسرهای فراصوت، می‌تواند روشی مناسب برای کاهش نیروهای استاتیک، کاهش دمای عملیات و کاهش زمان انجام آزمون باشد. در نتیجه بدین طریق، لزوم استفاده از دستگاه‌های با تناژ بالاتر، قالب مستحکم‌تر و مصرف انرژی بالاتر برای رسیدن به یک چگالی و استحکام مشخص کاهش می‌یابد.

#### 5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق فشرده‌سازی داغ پودر آلومینیوم AA1100 و آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V بدون و با اعمال ارتعاشات فراصوت و تحت فشار ثابت و در دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در بررسی نتایج، پارامترهای حین چگالش، چگالی اولیه و نهایی نمونه‌های تولید شده مورد بررسی قرار گرفت و نتایج ذیل حاصل گردید:

- چگالی اولیه به شکل و جنس ذرات پودر و اعمال و یا عدم اعمال ارتعاشات فراصوت در مرحله پیش بارگذاری در دمای محیط وابسته می‌باشد. اعمال ارتعاشات فراصوت در عملیات پیش بارگذاری موجب افزایش موضعی دما در نقاط تماس ذرات پودر و همچنین حرکت و تغییر چیدمان راحت‌تر ذرات می‌شود و در نتیجه افزایش چگالی اولیه پودر را در پی دارد.

- با اعمال ارتعاشات فراصوت، متوسط افزایش چگالی نهایی در پودرهای AA1100 و Ti-6Al-4V به ترتیب برابر 7/7 و 9/6 درصد بوده است که بیانگر تأثیرگذاری بیشتر در پودر کرومی Ti-6Al-4V در دمای بالا می‌باشد.

- تأثیرگذاری ارتعاشات فراصوت در افزایش چگالی نهایی وابسته به دمای عملیات و ضریب انتقال حرارت ماده در عملیات فشرده‌سازی داغ می‌باشد. به گونه‌ای که در پودر Ti-6Al-4V با افزایش دما اثر فراصوت افزایش و در پودر AA1100 این اثر به مقدار کمی کاهش یافته است.

- اعمال ارتعاشات فراصوت در عملیات فشرده‌سازی داغ موجب شتاب بخشیدن به سینماتیک عملیات چگالش و نیز افزایش چگالی نهایی و بهبود استحکام قطعه می‌گردد. در نتیجه با اعمال ارتعاشات فراصوت می‌توان بدون کاهش بازده عملیات، عملیات فشرده‌سازی داغ پودر را در نیروهای استاتیک فرم‌دهی و زمان کمتر و دمای پایین‌تری انجام داد.

#### 6- فهرست علایم

$D$  قطر نمونه فشرده شده (mm)

- Vol. 17, No. 3, pp. 257-65, 2000.
- [21] E. Lehfeltdt, The effect of ultrasonic vibrations on the compacting of metal powders, *Ultrasonics*, Vol. 5, No. 4, pp. 219-223, 1967.
- [22] R. Abedini, A. Abdullah, Y. Alizadeh, Ultrasonic Assisted Hot Metal Powder Compaction, *Ultrasonics Sonochemistry*, 38 (2017) 704-710.
- [23] [R. Abedini, A. Abdullah, Y. Alizadeh, Ultrasonic hot powder compaction of Ti-6Al-4V, *Ultrasonics Sonochemistry*, 37 (2017) 640-647.
- [24] J. Tsujino, Compacting of various metal, alloy and ceramic powder using 20 kHz ultrasonic vibration compacting equipments with upper and lower vibration punches, *IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings*, pp. 1985-1988, 2009.
- [25] A. Abdullah, A. Pak, Correct prediction of the vibration behavior of a high power ultrasonic transducer by FEM Simulation, *The international journal of advanced manufacturing technology*, Vol. 39, No. 1, pp. 21-28, 2008.
- [26] A. Abdullah, M. Paknejad, S. Dashti, A. Pak, A. Beigi, Theoretical and experimental analysis of ultrasonic-assisted indentation forming of tube, *Proceeding of the institution of mechanical engineers, Part B: Journal of engineering manufacture*, Vol. 228, No. 3, pp. 388-398, 2014.
- [27] J.R. Davis, P. Allen, S. Lampman, *Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, ASM International, Second Edition, pp. 102, 1990.
- [28] G. Welsch, R. Boyer, E. W. Collings, *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*, Fourth Edition, pp. 483-637, ASM International, 1994.
- [29] H. Atkinson, S. Davies, Fundamental aspects of hot isostatic pressing: an overview, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 31, No. 12, pp. 2981-3000, 2000.
- [30] A. Helle, K. E. Easterling, M. Ashby, Hot-isostatic pressing diagrams: new developments, *Acta Metallurgica*, Vol. 33, No. 12, pp. 2163-2174, 1985.
- [31] A. Siddiq, E. Ghassemieh, Thermomechanical analyses of ultrasonic welding process using thermal and acoustic softening effects, *Mechanics of Materials*, Vol. 40, No. 12, pp. 982-1000, 2008.
- [10] V. R. Pokryshev, M. S. Kovalchenko, V. I. Marchenko, Vacuum hot pressing of metal powders under the action of ultrasonic vibrations, *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 10, No. 10, pp. 790-794, 1971.
- [11] V. R. Pokryshev, V. I. Marchenko, Effectiveness of ultrasonic vibrations applied during the hot pressing of iron powder, *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 10, No. 12, pp. 967-969, 1971.
- [12] F. Blaha, B. Langenecker, Tensile deformation of zinc crystal under ultrasonic vibration, *Naturwissenschaften*, Vol. 42, No. 5, pp. 1-10, 1955.
- [13] B. Langenecker, Effects of ultrasound on deformation characteristics of metals, *IEEE transactions on sonics and ultrasonics*, Vol. 13, No. 1, pp. 1-8, 1966.
- [14] V. Fartashvand, A. Abdullah, S. A. Sadough Vanini, Investigation of Ti-6Al-4V alloy Acoustic Softening, *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016.
- [15] O. V. Abramov, *High-intensity ultrasonics: theory and industrial applications*, First Edition, pp. 30-50, CRC Press, 1999.
- [16] J. A. Gallego-Juarez, K. F. Graff, *Power Ultrasonics: Applications of High-intensity Ultrasound*, First Edition, pp. 337-431, Elsevier, 2015.
- [17] R. Abedini, A. Abdullah, Y. Alizadeh, V. Fartashvand, A roadmap for application of high power ultrasonic vibrations in metal forming, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 99, No. 9, pp. 9-99, 2016. (in Persian فارسی)
- [18] M. Vahdati, R. Mahdavejad, S. Amini, A. Abdullah, K. Abrinia, Design and manufacture of vibratory forming tool to develop "ultrasonic vibration assisted incremental sheet metal forming" process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 11, pp. 68-76, 2015. (in Persian فارسی)
- [19] R. Green, Non-linear effects of high power ultrasonics in crystalline solids, *Ultrasonics*, Vol. 13, No. 3, pp. 117-127, 1975.
- [20] M. Levina, M. H. Rubinstein, A. R. Rajabi-Siahboomi, Principles and application of ultrasound in pharmaceutical powder compression, *Pharm Res*,