

تأثیر ارتعاشات فراصوت در فشرده سازی داغ پودرهای آلومینیوم و آلیاژ تیتانیوم - تیتانیوم

فرآیند فشردن داغ پودر با هدف تولید قطعات با خصوصیات مشابه مواد اولیه کار سرد شده انجام میگیرد. مهمترین مشکل در فرآیند متالورژی پودر وجود تخلخل. عدم یکنواختی خصوصیات در نقاط مختلف قطعه، عدم پایداری هندسی و ابعادی و کاهش استحکام قطعات تولیدی می باشد. 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 می باشد. از این رو تلاش ها برای دستیابی به حداکثر چگالی. به همراه توزیع یکنواخت چگالی مورد توجه محققان قرار گرفته است

به منظور نیل به این هدف یکی از راه حل ها استفاده از فرآیندهای کمکی. نظیر اعمال ارتعاشات فراصوت می باشد. که می تواند منجر به بالا رفتن نرخ چگالش فرآیند و در نتیجه افزایش چگالی و استحکام قطعه گردد. در راستای ارزیابی این ایده، در Ti-6Al-4V و آلیاژ تیتانیوم AA1100. این مقاله اثر اعمال ارتعاشات طولی فراصوت در فشرده سازی پودر فلزات آلومینیوم در شرایط دما و تنش ثابت و همچنین برهم کنش آن با پارامترهای مستقل دیگر. نظیر دما و نوع ذرات پودر توسط انجام آزمون های 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 داده اند. که اعمال ارتعاشات فراصوت به سبب موجب دستیابی به چگالی بالاتر می شود. همچنین دما اثر متفاوت بر تأثیر گذاری فراصوت در دو نوع پودر داشته است

در فرآیند متالورژی پودر، ماده اولیه به شکل پودر فلزات و آلیاژها تولید می شود. و با روش های مختلف از قبیل اکستروژن، فشردن و سپس زینتر کردن. و نیز فشردن داغ به شکل قطعه نهایی در می آید. ساخت قطعات با حداقل تخلخل و استحکام بالا، مهمترین هدف در فرآیند متالورژی پودر می باشد. عدم دستیابی به چگالی بالا و وجود تخلخل در قطعه به شدت استحکام آن را کاهش می دهد. در فرآیند فشردن داغ، فشار و دمای بالا به طور همزمان به پودر درون قالب اعمال می گردد. در نتیجه به دلیل اعمال همزمان دما و فشار، مکانیزم های چگالش تسریع می گردند. و می توان به چگالی های بالاتر و نزدیک به چگالی تئوری ماده پودر دست یافت

اعمال فشار زیاد در دمای بالا روشی سنتی برای دستیابی به چگالی های بالاتر می باشد. در صورتی که فشردن به صورت سرد باشد. نیاز به استفاده از دستگاه های با تناژ بالا و مصرف انرژی بالاتر. و در نتیجه صرف هزینه بیشتر در ساخت قطعات است. در صورت فشردن داغ نیاز به پرس های تناژ بالا با هزینه سرمایه گذاری بیشتر کاهش می یابد. برای کاهش بیشتر نیروهای پرس و رسیدن به چگالی کامل تر و استحکام بیشتر. تحقیقات در زمینه استفاده از روش ها و عوامل مکمل در این فرآیند ادامه دارد

انجام می پذیرد. در (HIP) و فشردن همه جانبه داغ (VHP) فشردن داغ در متالورژی پودر به دو صورت فشردن محوری داغ فرآیند فشردن محوری داغ، پودر درون قالب ریخته شده. و دما و فشار بر اساس یک نمودار مشخص با گذشت زمان افزایش می یابند. این عملیات توسط یک دستگاه پرس محوری با قابلیت اعمال نیروی (تنش). ثابت و در شرایط هم دما انجام می پذیرد

در فرآیند فشردن همه جانبه داغ، پودر درون یک قالب انعطاف پذیر 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 می گیرد. هزینه ساخت به دلیل تجهیزات گران قیمت و مصرف انرژی زیاد. بسیار بالاست و اغلب در موارد مورد نیاز برای HIP قطعات در فرآیند دستیابی به چگالی کامل و قطعه بدون تخلخل و ترک. در قطعات دارای کاربرد بحرانی مورد استفاده قرار می گیرد

، ضعف این روش در دستیابی به چگالی های بالا و قطعه همگن. از نظر توزیع HIP نسبت به روش VHP عیب اصلی روش چگالی و خصوصیات میکروساختاری می باشد. دلیل این امر وجود اصطکاک بین ذرات پودر و نیز اصطکاک بین ذرات پودر با به دلیل HIP می باشد. در حالی که در فرآیند VHP جداره قالب. در حرکت خطی ذرات پودر، در راستای فشردن فرآیند اعمال نیروی شعاعی همه جانبه نیروی اصطکاک نزدیک به صفر است

چگالش پودر در دمای بالا را می توان به کمک روش هایی مانند اعمال تنش خارجی. استفاده از مواد روان کار، تبدیل فازها حین عملیات فشردن، اعمال ارتعاشات با فرکانس پایین (ارتعاشی). یا ارتعاشات با فرکانس بالا (فراصوت) تسهیل نمود. به کمک روش های یاد شده می توان بدون نیاز به زمان بالای عملیات. و فشار خیلی زیاد به چگالی های بالاتر و در نتیجه استحکام بالاتر قطعات دست یافت

اولین بار تأثیر اعمال ارتعاشات فراسوت بر خصوصیات استحکام مواد توسط نتایج آزمون های تجربی بلاها و لانگنکر منتشر گردید. آنها نشان دادند با اعمال ارتعاشات فراسوت در آزمون کشش مواد مختلف نظیر آلومینیوم و تیتانیوم. استحکام مواد متناسب با شدت ارتعاشات اعمالی کاهش می یابد. امروزه از اعمال ارتعاشات فراسوت در بهبود و تسریع بسیاری از فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی. در مقیاس صنعتی و تحقیقاتی استفاده می گردد. فراسوت به صورت مستقیم در بسیاری از فرآیندها نظیر جوشکاری پلاستیک ها و ماشین کاری مواد سخت. و ترد کاربرد صنعتی یافته است

و در بسیاری از فناوری های شکل دهی و ماشین کاری قطعات. به عنوان کمک فرایند در حال تحقیق و توسعه میباشد. برآیند نتایج تحقیقات نشان می دهد. که اعمال ارتعاشات فراسوت در شکل دهی فلزات موجب کاهش تنش سیلان ماده. و کاهش نیروهای اصطکاک در سطوح درگیر می گردد. اعمال ارتعاشات فراسوت در فرآیندهای مختلف شکل دهی وابسته به پارامترهای مستقل نظیر نوع فلز یا آلیاژ. ساختار ماده، نیروهای شکل دهی، شرایط دمایی و پیشینه عملیات دارای اثرهای مختلفی می باشد

تحقیقات در برخی زمینه های اعمال ارتعاشات فراصوت در فشردن سرد پودر مواد. مانند صنایع داروسازی به کاربرد صنعتی انجامیده است. اما در عملیات فشردن داغ پودر، به دلیل مشکلات متعدد. در فرآیند فشردن سازی و به طور همزمان اعمال ارتعاشات فراصوت. تحقیقات محدودی بر روی پودرهای نیکل، مس و آهن انجام گرفته است. پوکریشو و همکارانش 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 به حالت پایدار چگالش و افزایش نرخ کرنش کردن خزشی. در مرحله پایدار چگالش گردید است. لefeldات بیان کرد. با اعمال ارتعاشات فراصوت بر فرآیند فشردن داغ پودر آهن می توان. به اندازه ۵۰ سانتی گراد دمای عملیات را Hz کاهش داد. کرامپ و همکارانش آزمون فشردن داغ را بر روی پودر کرومی مس با اعمال ارتعاشات. در فرکانس ۱۵۰ (فراصوت) مورد بررسی قرار دادند (۱KHz ارتعاشی) و (۲۰)

آنها بیان داشتند چگالی حاصل از عملیات فشردن داغ با اعمال ارتعاشات فراصوت. به طور قابل ملاحظه ای بیشتر از آزمون فشردن داغ. با اعمال ارتعاشات فرکانس پایین ارتعاشی می باشد. در تحقیقات اخیر عابدینی و همکاران به بررسی اثر پارامترهای فرآیند مانند دما و فشار و ارتعاشات فراصوت. به طور مجزا، به فشردن داغ پودرهای آلومینیوم و آلیاژ تیتانیوم پرداختند. آنها دریافتند با اعمال ارتعاشات فراصوت می توان. به چگالی نهایی بالاتر و ساختار همگن تری از نظر توزیع چگالی دست یافت. در تحقیقات بیان شده مقایسه ای 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 زمینه ای برای کاربرد صنعتی این فناوری می باشد. بدین منظور آزمون های فشردن داغ بر روی انواع پودرهای فلزی شامل با و بدون اعمال ارتعاشات فراصوت در شرایط مختلف دما و نوع ذرات پودر انجام. AA1100 آلومینیوم و Ti-6Al-4V و آلیاژ AA1100 آلومینیوم 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 گرفته است

چیدمان تجربی آزمون

مواد آزمون

با شکل Ti-6Al-4V و آلیاژ تیتانیوم (AA) $> 40\text{mm}$ با شکل نا منظم و اندازه ذرات AA100 دو نوع پودر آلومینیوم خالص از شکل و اندازه ذرات پودر در شکل ۱ و SEM مورد استفاده قرار گرفته است. تصویر (Ti64) $> \mu\text{m}$ کرومی و اندازه ذرات ۴۵. ترکیب شیمیایی دو نوع پودر. در جدول ۱ ارائه شده است

طراحی و ساخت چیدمان آزمون فشردن داغ پودر

به منظور انجام آزمون های فشردن داغ یک قالب شناور استوانه ای از جنس گرانتیت مورد استفاده قرار گرفته است.

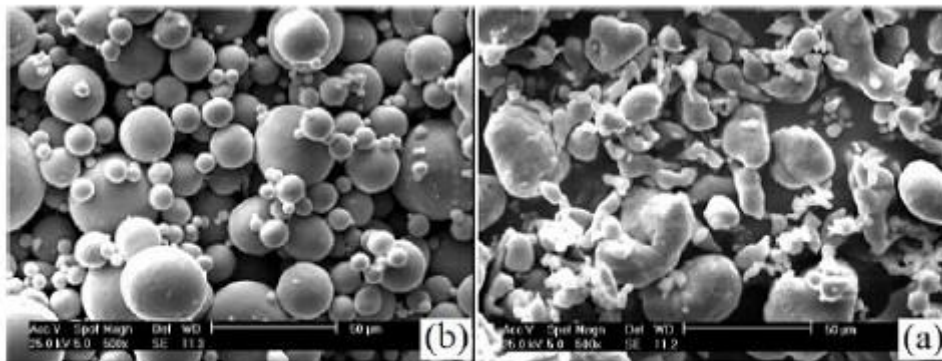


Fig. 1 SEM images of (a) <math><40\ \mu\text{m}</math> irregular AA1100 and (b) <math><45\ \mu\text{m}</math> spherical Ti-6Al-4V powder particles

با اندازه Ti-6Al-4V پودر کروی. (b) میکرومتر و > با اندازه ذرات ۴۰ AA1100 پودر نامنظم (a) SEM شکل ۱ تصویر میکرومتر > ذرات ۴۵.

Ti-6Al-4V و تیتانیوم AA1100 جدول ۱ ترکیب شیمیایی دو نوع پودر آلومینیوم

Table 1 Chemical composition of AA1100 and Ti-6Al-4V powders

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	ASTM
0.19	0.12	3.9	5.9	90	درصد	B384
						Ti-6Al-4V

ساخته شده اند. هر نمونه آلومینیوم و آلیاژ تیتانیوم HRC با سختی ۴۵ (1.2344) H13 سنبه های بالا و پایین از فولاد گرم کار میلیمتر $10 \times H \times \varnothing 10$ به ترتیب از ۲ و ۳ گرم پودر تشکیل شده است. که پس از عملیات فشردن به شکل استوانه ای در ابعاد تبدیل می شود. عملیات فشردن داغ در فشار ثابت ۲۰ مگاپاسکال و دماهای نهایی ۴۰۰، ۶۰۰، ۵۰۰ درجه ی سانتی گراد. برای پودر آلومینیوم و ۸۵۰، ۷۵۰، ۹۵۰ درجه ی سانتی گراد برای پودر آلیاژ تیتانیوم انجام گرفته است

شکل ۲ نمای اجزای چیدمان آزمون فشردن داغ پودر به کمک ارتعاشات فراصوت. و تجهیزات داده برداری را نمایش می دهد. طراحی چیدمان می بایست به گونه ای باشد. که نیروی استاتیک شکل دهی و نیروی دینامیک ارتعاشات فراصوت به طور همزمان به پودر اعمال گردند. بدین منظور ترانسدیوسر درون یک محفظه استوانه ای قرار گرفته. و نیروی استاتیک شکل دهی از طریق

اعمال می گردد. بوستر در نقطه گره به محفظه استوانه ای وصل است. Ti-6Al-4V محفظه استوانه ای به بوستر از جنس آلایژ و در این ناحیه محفظه استوانه ای دارای راهگاه آب برای خنک کاری قطعات می باشد

در بخش پایین مجموعه، سنبه پایین بر روی قطعه ای با امکان تنظیم موقعیت سنبه قرار گرفته است. این قطعه به منظور خنک کاری دارای راهگاه آب. و به منظور تأمین فشار گاز خنثی یا خلاء دارای راهگاه مجزا می باشد. این مجموعه به واسطه یک لودسل بر روی میز اصلی قرار گرفته است

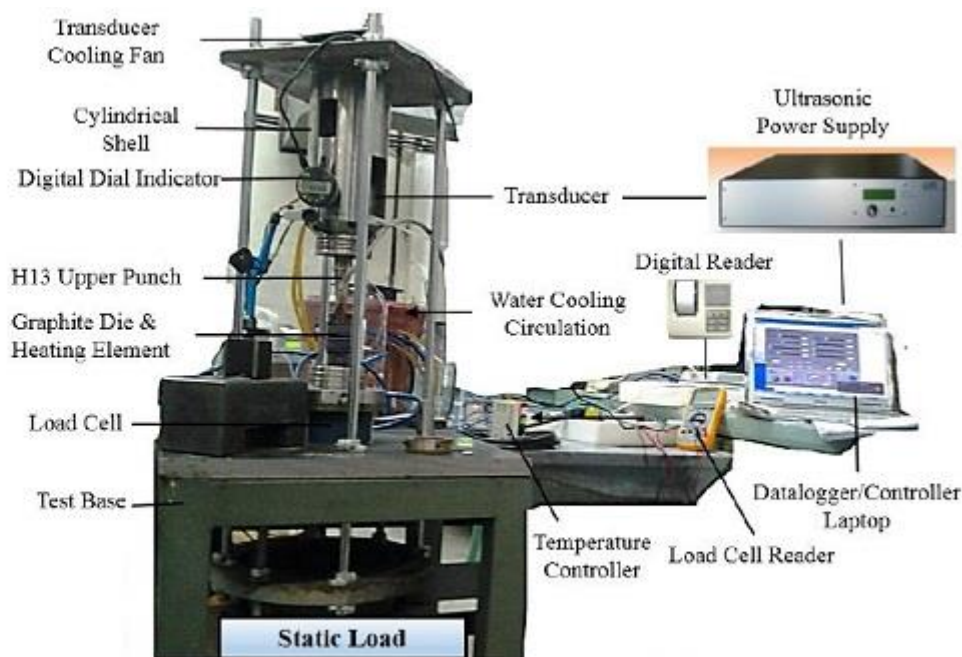


Fig. 2 Schematic view of ultrasonic assisted hot powder pressing setup and data logger equipment's

شکل ۲ نمای چیدمان آزمون فشردن داغ پودر به کمک ارتعاشات فراصوت و تجهیزات داده برداری

با قرار دادن لودسل در زیر مجموعه و به دلیل شناور بودن قالب میتوان نیروی اعمالی بر پودر حین عملیات فشردن را اندازه گرمادهی قالب گرافیک توسط کوئل المنتی پیچیده شده به دور آن AA1100 گیری نمود (شکل ۲). در فشردن داغ پودر درون قالب گرافیک انجام می گیرد. و دما توسط یک کنترلر و K تأمین شده است. اندازه گیری دما توسط یک ترموکوپل نوع (رله قطع و وصل برق المنت، تنظیم می گردد. (شکل ۲

به دلیل دمای بالای مورد نیاز از حرارت دهی القایی. برای گرمایش قالب گرافیک استفاده Ti-6Al-4V در فشردن داغ پودر و تنظیم فرکانس منبع تغذیه القایی. تا رسیدن به دمای K گردیده است. تنظیم دما در قالب گرافیک با استفاده از ترموکوپل نوع (ثابت آزمون انجام می شود (شکل ۳

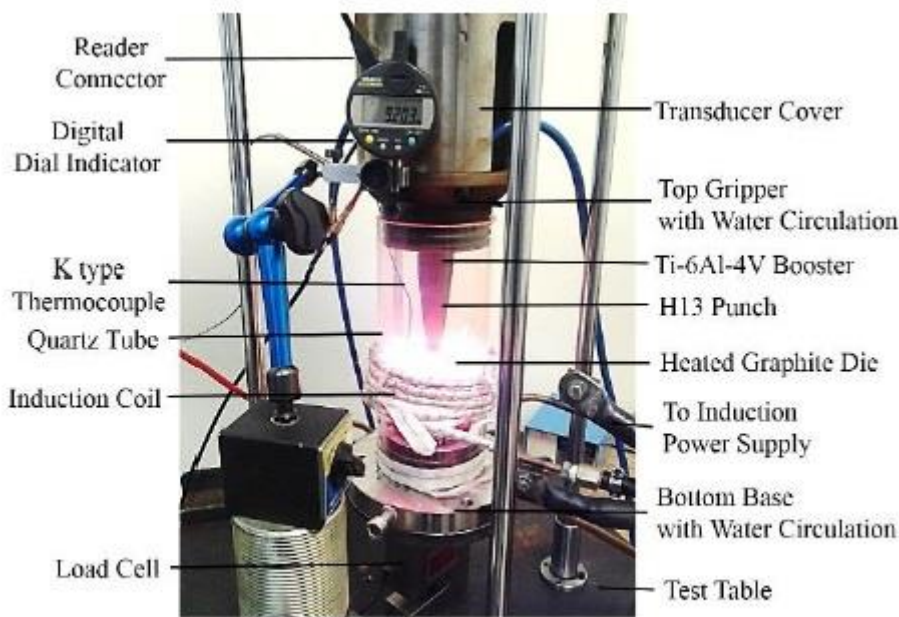


Fig. 3 Schematic view of ultrasonic assisted hot powder pressing setup

شکل ۳ نمای چیدمان آزمون فشردن داغ پودر به کمک ارتعاشات فراصوت. حرکت خطی سنبه بالا توسط یک ساعت اندیکاتور ، متصل به خواننده و همچنین دستگاه کامپیوتر برای ضبط داده ها نسبت به (μm دقت ۳. μm دیجیتال) با تفکیک پذیری ۲ زمان. از ابتدای اعمال فشار در شرایط هم دما تا زمان برداشتن فشار در انتها فرآیند اندازه گیری می شود

اعمال ارتعاشات فراصوت

اعمال ارتعاشات فراصوت در فرآیند فشردن سرد پودر به روش های مختلفی مانند اعمال ارتعاش طولی به سنبه. شعاعی به قالب و یا ترکیبی از آنها انجام می گیرد. اما در عملیات فشردن داغ به دلیل دمای بالای قالب حین عملیات و جنس گرافیت آن. نمی توان 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 می گردد

و منبع KHz و فرکانس رزونانس ۲۵ kw. به منظور اعمال ارتعاشات فراصوت از ترانسدیوسر ساندویچی پیزوالکتریک با توان ۲ با قابلیت تنظیم خودکار فرکانس رزونانس استفاده شده است. توسط نرم افزار منبع تغذیه می MP2 ساخت شرکت kW تغذیه ۲ توان مشخصه های 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 دلیل تغییر دما و طول نمونه پودر. و همچنین تغییر در شرایط مرزی، فرکانس رزونانس تغییر می نماید. منبع تغذیه با پایش پارامترهای جریان خروجی و فاز ولتاژ و جریان. توان و دامنه خروجی را بر روی مقدار مد نظر تنظیم می نماید

تحلیل درست رفتار مجموعه ارتعاشی و مشخصه های اصلی آن. شامل شکل مود و فرکانس رزونانس، لازمه ساخت آن می باشد. به منظور عملکرد درست چیدمان ارتعاشی، یکسان بودن فرکانس رزونانس ترانسدیوسر و مجموعه ارتعاشی، متصل به آن لازم

می باشد. بدین منظور برای طراحی ترانسدیوسر و مجموعه ارتعاشی از نرم افزارهای شبیه سازی اجزاء محدود نظیر انسیس. و آباکوس استفاده می شود. در تحقیق حاضر شبیه سازی اجزاء محدود مجموعه ارتعاشی در نرم افزار انسیس. و در مازول تحلیل مودال انجام گرفته است

انتهای (kHz)مجموعه ارتعاشی به گونه ای طراحی شده است. که در مود ارتعاش طولی و فرکانس رزونانس مورد نظر (۲۵) سنبه دارای بیشترین دامنه ارتعاش (شکم ارتعاشی). و ناحیه اتصال بوستر به قطعه نگهدارنده بالا دارای کمترین دامنه ارتعاشی (گره ارتعاشی) باشد. نیروی استاتیک شکل دهی از طریق قطعه نگهدارنده بالا به بوستر تیتانیومی منتقل می گردد. اتصال این دو از نقطه گره بوستر موجب اجتناب از انتقال ارتعاشات به بخش اعمال نیروی استاتیک. و دیگر اجزای غیر ارتعاشی دستگاه. آزمون می گردد

شکل ۵ نمودار اسکن فرکانس رزونانس مجموعه ارتعاشی تحت شرایط آزمون (تحت بار استاتیک و دمای بالا). در عملیات فشردن داغ پودر را نمایش می دهد. که ناحیه فرکانس موازی و سری به ترتیب با خط چین و خط کامل سفید رنگ مشخص شده اند. فرکانس رزونانس موازی ناحیه ایمن عملکرد منبع تغذیه و ترانسدیوسر اولتراسونیک می باشد. و اغلب در کاربردهایی که بار استاتیک چندانی به مجموعه ارتعاشی وارد نمی شود. مورد استفاده قرار می گیرد. فرکانس رزونانس سری، ناحیه با قدرت بالای اعمال ارتعاشات و همچنین با ریسک بالا می باشد

و اغلب به منظور استفاده در فرآیندهای با نیروها و تنش های زیاد. مانند جوشکاری فلزات مورد استفاده قرار می گیرد. به دلیل اعمال نیروی استاتیک زیاد مورد نیاز در آزمون فشردن داغ به کمک ارتعاشات اولتراسونیک. محدوده فرکانس سری مجموعه ارتعاشی 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

اجرای آزمون فشردن داغ به کمک ارتعاشات فراصوت

در شکل ۶ تأثیر اعمال فشار، دما و ارتعاشات فراصوت بر عملیات فشردن داغ پودر نشان داده شده است. در آزمون های بدون اعمال شده. و برداشته می شود (پیش بارگذاری). سپس دما با نرخ MPa حضور ارتعاشات فراصوت ابتدا در حال سرد فشار ۲۰ تا ۶/۰ دمای نهایی آزمون افزایش یافته. و پس از ۵ دقیقه ماندن در دمای ثابت دوباره. به نرخ ۵۰ /mm ۱۰۰ درجه سانتیگراد تا دمای نهایی آزمون گرم می شود. و ده دقیقه تا زمان اعمال فشار دما ثابت نگه داشته می شود. پس /mm درجه ی سانتیگراد اعمال می گردد. و حین عملیات چگالش ثابت نگه داشته می شود. پس از پایان MPa از دستیابی به شرایط هم دما، فشار ۲۰ زمان عملیات، فشار برداشته شده و نمونه تا دمای محیط سرد می گردد. زمان عملیات اعمال فشار برای هر دو نوع پودر برابر در نظر گرفته شده است ۱۰min

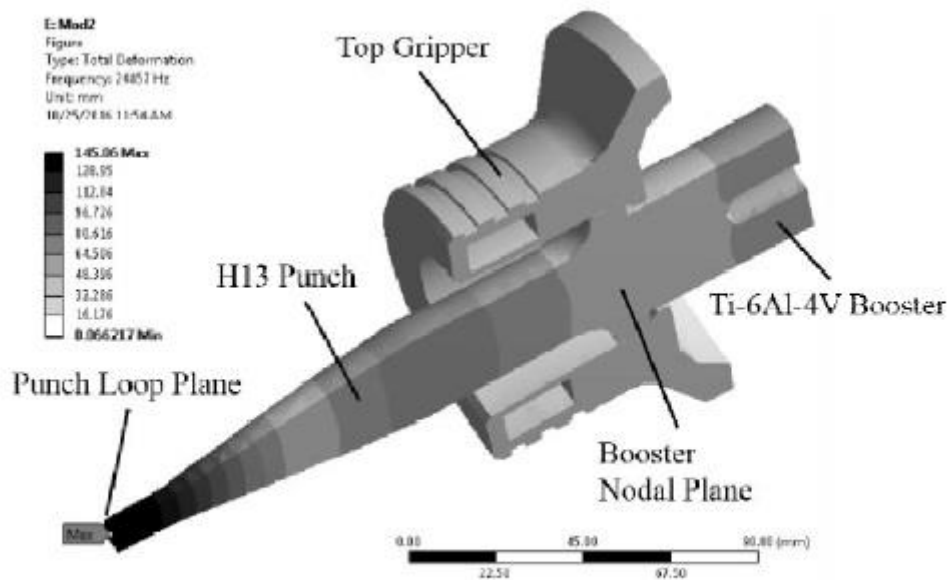


Fig. 4 Modal analysis of resonating setup with ANSYS Workbench software

شکل ۴ تحلیل مودال مجموعه ارتعاشی در نرم افزار انسیس

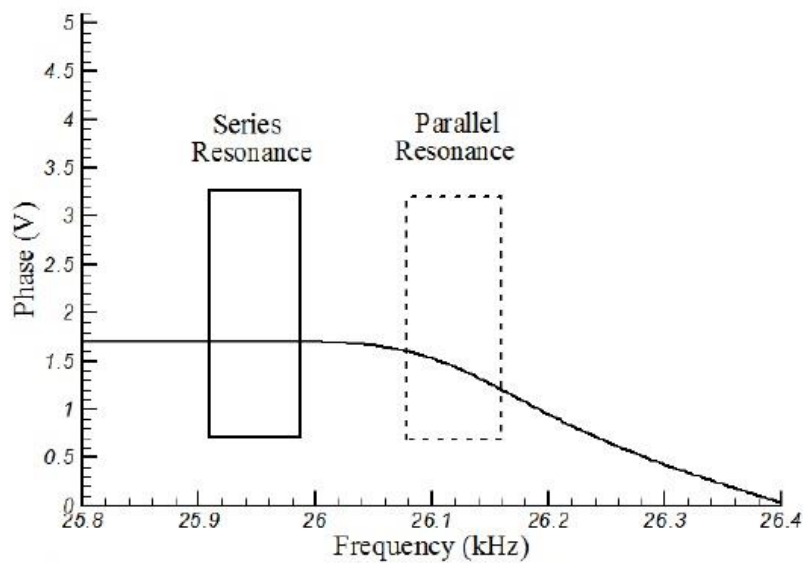


Fig. 5 Typical scanning curve (wide scanning range) of resonating setup under test condition

شکل ۵ نمودار اسکن فرکانس رزونانس مجموعه ارتعاشی تحت شرایط آزمون فشرده شدن داغ

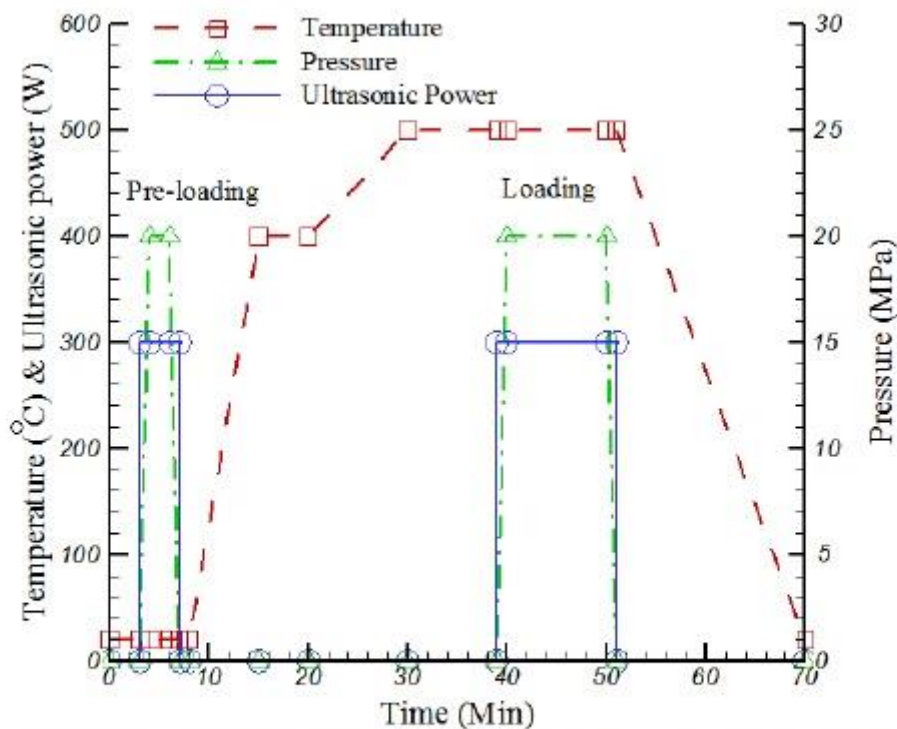


Fig. 6 Graph of the ultrasonic assisted hot pressing cycle and temperature ($^{\circ}\text{C}$), static pressure (MPa), and ultrasonic power (W) variation over time

شکل ۶ نمودار تغییر دما (بر حسب درجه سانتی گراد)، فشار استاتیک (بر حسب مگاپاسکال) و ارتعاشات فراصوت (توان) ارتعاشات بر حسب وات). حین عملیات فشردن داغ پودر

تعیین مشخصه های نمونه ها

(ASTM پس از پایان فرآیند فشردن داغ و خارج کردن نمونه از قالب چکالی نهایی نمونه ها. بر اساس قانون ارشمیدس B311-93) برای ماده بالک آلومینیوم 2/71 g/cm^3 با اندازه گیری وزن و محاسبه حجم نمونه ها. و با فرض چکالی (AA1100. ۴۳/۴) محاسبه شده است. بدین منظور ابتدا نمونه ها با یک Ti-6Al-4V برای ماده بالک آلیاژ g/cm^3 و چکالی ۴۳/۴ و سپس درون پارافین مایع داغ غوطه ور شدند. تا (m1). ترازوی دقیق با تفکیک پذیری ۱ میلی گرم اندازه گیری گردیدند و در نهایت وزن (m2) پارافین به داخل خلل و فرج باز نمونه متخلخل نفوذ نماید. سپس وزن نمونه مجدد اندازه گیری شده (m3) در نهایت بر اساس رابطه (۱) چکالی نهایی آنها. در حالت غوطه وری در آب مقطر. اندازه گیری گردیده است. نمونه ها تعیین گردیده است

بر اساس اندازه (H) برای رسم منحنی چکالی پودر شامل نمودار چکالی نسبی نسبت به زمان، ابتدا ارتفاع لحظه ای نمونه و خروجی ضبط شده حرکت سنبه طی زمان تعیین شده است. با شروع (Hf) گیری ارتفاع نمونه پس از پایان فشردن سازی اعمال فشار، به دلیل کاهش نرخ چکالی. و به طبع آن کاهش حرکت سنبه با گذشت زمان، در مراحل ابتدایی. میانه و انتهای عملیات فاصله زمانی ۰/۲۵، ۱ و ۵ ثانیه برای داده برداری. از حرکت سنبه توسط ساعت دیجیتال انتخاب گردید. تعیین چکالی

ارتفاع لحظه ای (pf) نمونه ها حین آزمون فشردن داغ بر اساس رابطه (۲). و با استفاده از مقادیر چگالی نهایی (p) لحظه ای انجام گرفته (Pth) نمونه و چگالی تئوری ماده پودر (Hf) و نهایی (pth) نمونه و چگالی تئوری ماده پودر (Hf) و نهایی (H) است.

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

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

آزمون ها و نتایج

جدول ۲ به طور خلاصه مشخصه های پودر و شرایط آزمون شامل فشار، دما و زمان عملیات و توان ارتعاشات فراصوت را نمایش می دهد. شرایط آزمون شامل زمان، فشار، توان ارتعاشات فراصوت و فرکانس رزونانس برای دو نوع پودر یکسان می باشد. متفاوت می باشد Ti-6Al-4V و AA1100 دمای عملیات فشردن داغ با توجه به اختلاف دمای ذوب دو نوع پودر

در دماهای مختلف را ۲۰ MPa تحت تنش Ti-6Al-4V و AA1100 شکل ۷ نمونه های حاصل از عملیات فشردن داغ پودر نمایش می دهد.

به کمک ارتعاشات فراصوت Ti-6Al-4V و AA1100 جدول ۲- مشخصه های پودر و شرایط آزمون فشردن داغ پودر

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 ⁰ C	660 ⁰ 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 ⁰ C	400, 500, 600 ⁰ C
زمان عملیات فشردن	10 (min)	10 (min)
توان ارتعاشات فراصوت	0, 300 W	0, 300 W
فرکانس رزونانس	25 (kHz)	25 (kHz)



Fig. 7 Hot pressed powder samples and their main dimensions

شکل ۷ نمونه های حاصل از عملیات فشردن داغ پودر و ابعاد اصلی نمونه

در سمت راست، شکل نمونه های 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.

و MPa. و شکل نامنظم با حداکثر اندازه ذرات ۴۰ میکرون تحت فشار ۲۰ AA1100 شکل ۸ منحنی چگالش فشردن داغ پودر دماهای نهایی ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد را نمایش می دهد. آزمون ها در یک حالت بدون ارتعاشات فراصوت انجام شده اند. همانطور که مشاهده می شود. در تمامی W در توان ۳۰۰ (UT) و یک حالت با اعمال ارتعاشات فراصوت (C). حالت ها، 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.

در MPa. با حداکثر اندازه ذرات ۴۵ میکرون را تحت تنش ۲۰ Ti-6Al-4V شکل ۹ منحنی چگالش پودر کروم تیتانیوم اعمال ارتعاشات فراصوت نمایش می (UT) و با (C). دماهای نهایی ۷۵۰، ۸۵۰، ۹۵۰ درجه سانتیگراد و در حالت های بدون اعمال ارتعاشات فراصوت موجب دستیابی به نرخ چگالش و MPa. دهد. با توجه به نمودارها در همه دماها و در فشار ثابت ۲۰ چگالی نهایی بالاتر شده است. مشاهده می شود تأثیر گذاری اعمال ارتعاشات فراصوت در افزایش چگالی نهایی در دماهای بالاتر بیشتر بوده است.

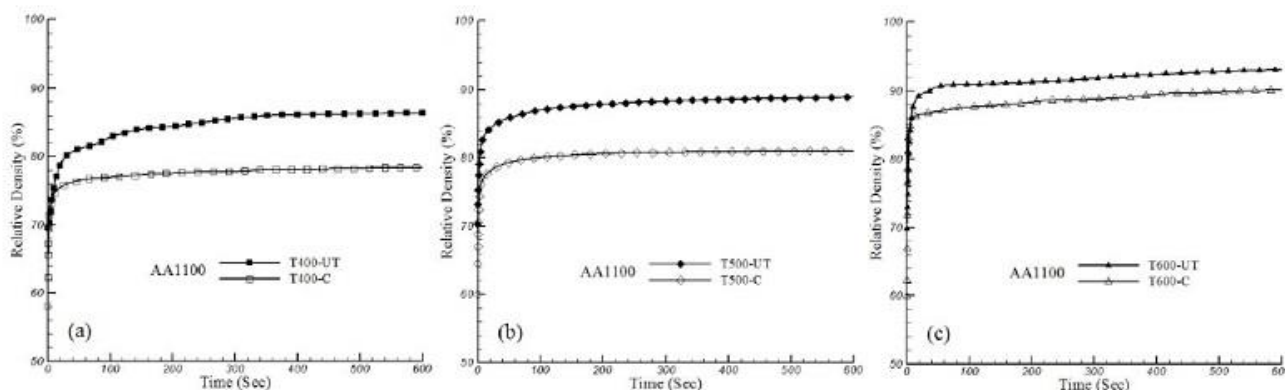


Fig. 8 Densification curve of aluminum powder (relative density vs. time) at (a) 400 °C, (b) 500 °C and (c) 600 °C under 20 MPa pressure without (C) and with (UT) ultrasonic vibrations

و 400 (a) ، در دماهای نهایی 20 MPa تحت تنش ۲۰ AA1100 شکل ۸ منحنی چگالش (چگالش نسبی - زمان) پودر آلومینیوم اعمال ارتعاشات فراصوت (UT) و با (C) درجه سانتیگراد بدون (c) و ۶۰۰ (b) 500

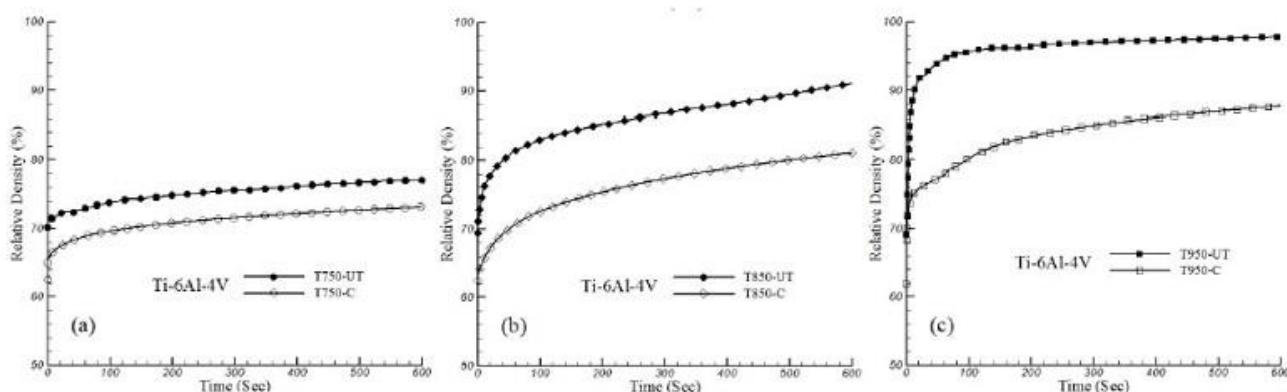


Fig. 9 Densification curve of Ti-6Al-4V powder (relative density vs. time) at (a) 750°C, (b) 850°C and (c) 950 °C under 20 MPa pressure without (C) and with (UT) ultrasonic vibrations

، 750 (a) در دماهای نهایی 20 MPa تحت تنش ۲۰ Ti-6Al-4V شکل ۹ منحنی چگالش (چگالش نسبی - زمان) پودر تیتانیوم اعمال ارتعاشات فراصوت (UT) و با (C) درجه سانتیگراد بدون (c) و ۹۵۰ (b) 850

نمونه های حاصل از آزمون فشردن داغ دو نوع پودر (FRD) و نهایی (IRD) نتایج حاصل از تعیین چگالی نسبی اولیه به ترتیب در دو حالت بدون و با اعمال ارتعاشات فراصوت در دماهای مختلف. و تحت فشار ۲۰۰ Ti-6Al-4V و AA1100. نمایش داده شده اند. چگالی اولیه بیانگر چگالی خسته پودر حاصل از اعمال فشار در دمای 10-b و 10-a در شکل های محیط در مرحله پیش بارگذاری می باشد

و AA1100 با توجه به نتایج شکل ۱۰، مشاهده می شود. چگالی اولیه و نهایی با اعمال ارتعاشات فراصوت در هر دو نوع پودر افزایش یافته است Ti-6Al-4V

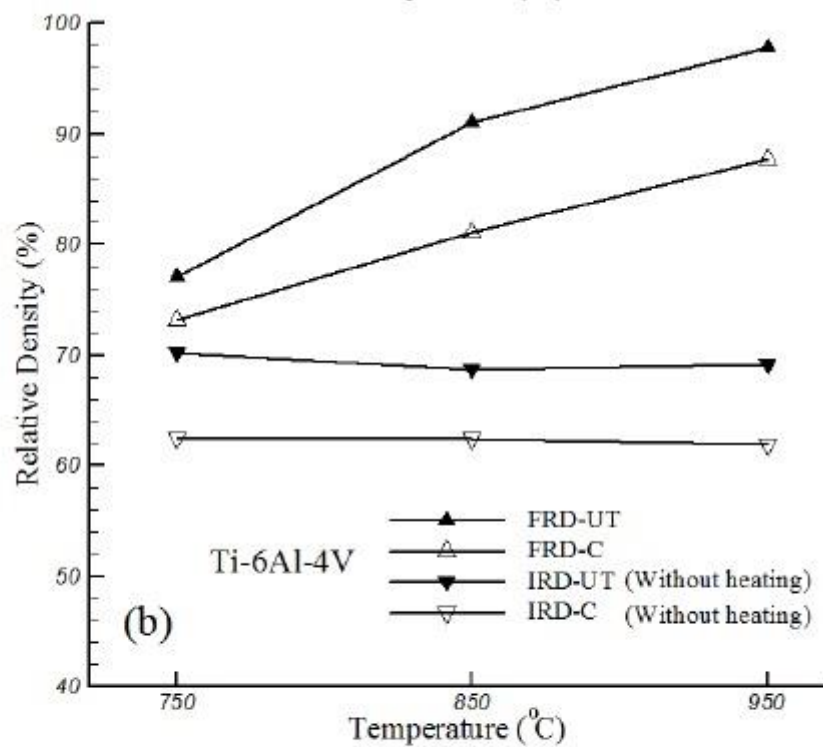
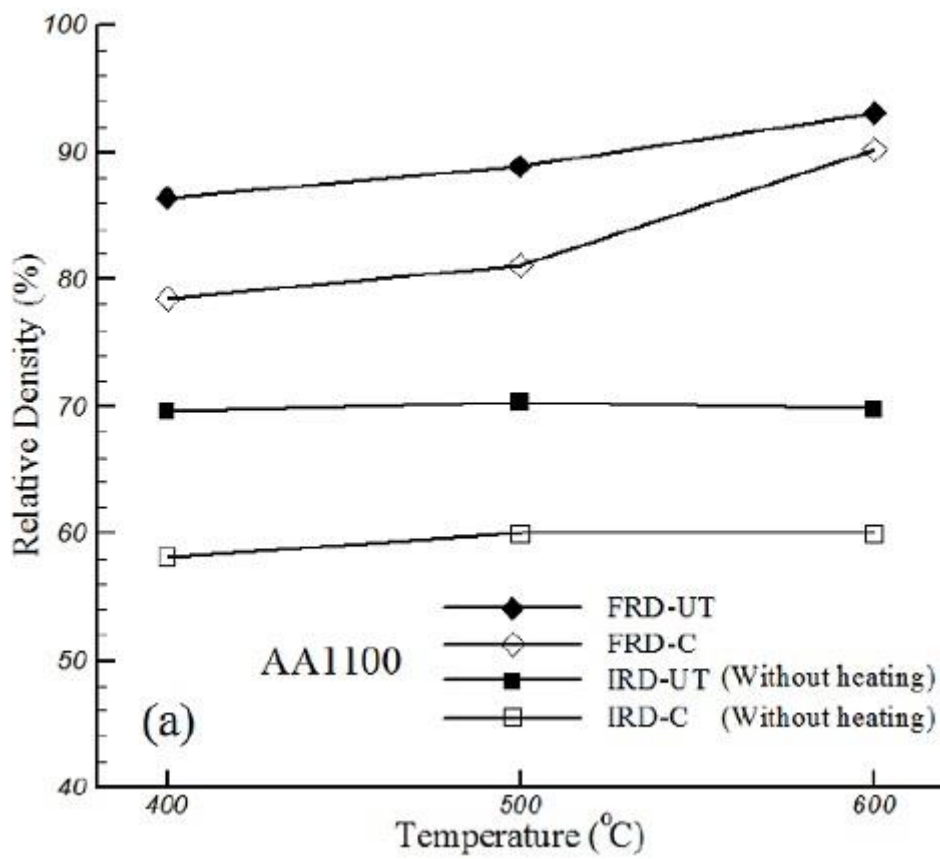


Fig. 10 Initial (IRD) and Final (FRD) relative density results function of hot powder pressing temperature without (C) and with ultrasonic vibration for (a) AA1100 and (b) Ti-6Al-4V powder

و با (C) فشردن داغ در دماهای مختلف. و در دو حالت بدون (FRD) و نهایی (IRD) شکل ۱۰ نمودار نتایج چگالی نسبی اولیه و (b) Ti-6Al-6V و (a) AA1100 اعمال ارتعاشات فراصوت برای پودر (UT)

Ti-6Al-6V و AA1100 شکل ۱۱ درصد افزایش چگالی نسبی اولیه و نهایی نمونه های حاصل از آزمون فشردن داغ. دو نوع پودر نمایش (H) و بالا (M)، متوسط (L) را با یکدیگر مقایسه نموده است. در این نمودار دمای آزمون در سه سطح پایین 6A1-4V داده شده است.

بحث

چگالی اولیه

، با (a-10) در حالت فشردن معمول (شکل AA1100. با توجه به نتایج چگالی نسبی اولیه و نهایی در آزمون فشردن داغ پودر اعمال (AA-IRD-UT) و با (AA-IRD-C) اعمال فشار و پیش بارگذاری در دمای محیط، متوسط چگالی اولیه. در حالت بدون ارتعاشات فراصوت به ترتیب برابر ۴/۵۹ و ۹/۶۹ درصد می باشد

پایگاه اطلاع رسانی
دانشگاه اراک
دانشکده مهندسی مکانیک
گروه مهندسی مواد

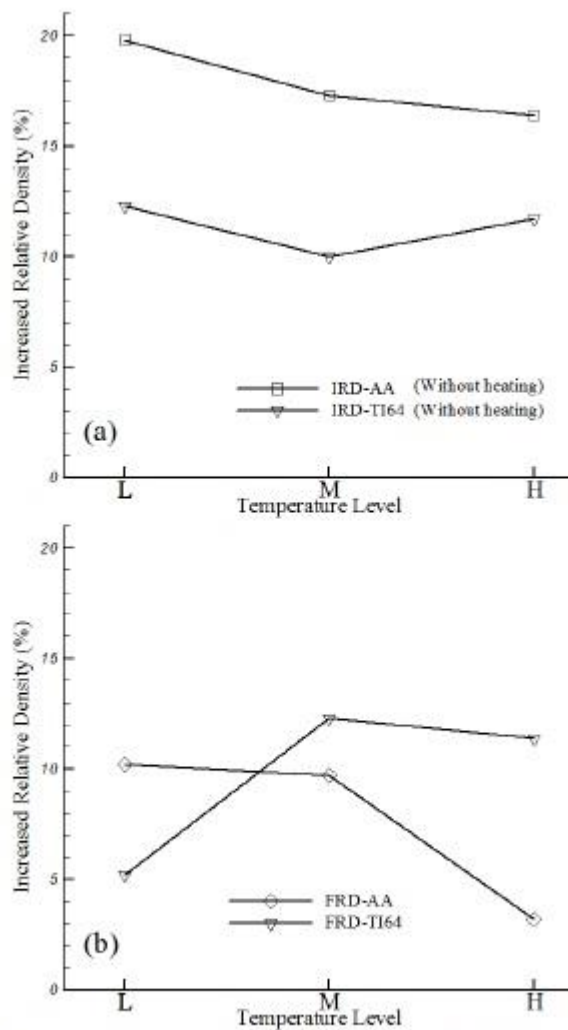


Fig. 11 Increased (a) Initial (IRD) and (b) Final (FRD) Relative Density results as a function of hot powder pressing temperature level with application of ultrasonic vibration for AA1100 and Ti-6Al-4V powders

AA1100 و Ti-6Al-4V در فشردن داغ پودرهای (a) چگالی نسبی اولیه و (b) نهایی (FRD). شکل 11 نمودار مقایسه افزایش در سطوح دماهایی مختلف در اثر اعمال ارتعاشات فراصوت 6A1-4V.

اعمال ارتعاشات فراصوت به طور متوسط موجب افزایش چگالی اولیه به میزان AA1100 در نتیجه مشاهده می شود. در پودر با اعمال ارتعاشات فراصوت، متوسط مقدار چگالی Ti-6Al-4V همچنین برای پودر. (11-a) ۸/۱۷ درصد گردیده است. (شکل b-10) رسیده (شکل (Ti64-IRD-UT) به ۴/۶۹ درصد (Ti64-IRD-C) اولیه. در حالت فشردن سرد از ۳/۶۲ درصد (11-b) ۳/۱۱ درصد افزایش در چگالی نسبی اولیه را نشان می دهد (شکل

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 ۱) فضای خالی بیشتری بین ذرات مجاور هم بوجود می آید. و از طرفی تعداد ذرات همسایه در این حالت پایین تر 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 الاستیته و تنش تسلیم ذرات پودر آلومینیوم پایین تر بوده. و انتظار می رفت چگالی اولیه بیشتری نتیجه دهد.

در هر دو نوع پودر با اعمال ارتعاشات فراصوت و در نتیجه تغییر در چیدمان ذرات، پودرها متراکم تر شده و چگالی اولیه افزایش می یابد. کاهش ضریب اصطکاک (قابلیت جابجایی بهتر ذرات پودر)، افزایش دمای موضعی در نقاط تماس و نرم شدگی آکوستیکی (تغییر شکل و حذف فضای خالی بین ذرات پودر). را می توان از عوامل تأثیر گذار در افزایش چگالی نسبی اولیه با اعمال ارتعاشات فراصوت دانست. با فرض افزایش دمای موضعی یکسان برای دو نوع پودر به واسطه اعمال ارتعاشات و $Ti-6Al-4V$ و ۶۶۰ درجه ی سانتیگراد و AA1100 فراصوت، به دلیل دمای ذوب متفاوت دو نوع پودر بیشتر بوده است (AA1100 سانتیگراد مشاهده می شود. نرم شدگی آکوستیک در پودر با دمای پایینتر (آلومینیوم

به دلیل جذب انرژی AA1100 در حال پیش بارگذاری استاتیک و اعمال ارتعاشات فراصوت در دمای محیط بر روی پودر افزایش دما در حدود ۶۰ درجه ی سانتیگراد مشاهده شده است. بعلاوه در توان ۱۰۰ W ارتعاشی در پودر و قالب، در توان ۱۰۰ ، به مدت ۲ دقیقه، دما تا ۱۷۰ درجه سانتی گراد افزایش یافته است. این مقدار افزایش دما در (W بالاتر اعمال ارتعاشات ۳۰۰) مقایسه با دمای ذوب پودر آلومینیوم قابل ملاحظه می باشد. این افزایش دمای محدود در اثر اعمال ارتعاشات فراصوت در در مرحله پیش بارگذاری و دستیابی به چگالی اولیه بالاتر تأثیر گذار بوده است. AA1100 دستیابی به چگالش بیشتر پودر

به دلیل جذب انرژی AA1100 در حالت پیش بارگذاری استاتیک و اعمال ارتعاشات فراصوت در دمای محیط بر روی پودر افزایش دما. در حدود ۶۰ درجه ی سانتی گراد مشاهده شده است. بعلاوه در توان ۱۰۰ W ارتعاشی در پودر و قالب، در توان ۱۰۰ ، به مدت ۲ دقیقه، دما تا ۱۷۰ درجه سانتی گراد افزایش یافته است. این مقدار افزایش دما در (W بالاتر اعمال ارتعاشات ۳۰۰) مقایسه با دمای ذوب پودر آلومینیوم قابل ملاحظه می باشد. این افزایش دما محدود در اثر اعمال ارتعاشات فراصوت در در مرحله پیش بارگذاری و دستیابی به چگالی اولیه بالاتر تأثیر گذار بوده است. AA1100 دستیابی به چگالش بیشتر پودر

چگالی نهایی

بدون اعمال ارتعاشات فراصوت، با ۱۰۰ درجه س سانتی گراد افزایش دما از AA1100 در آزمون فشردن داغ پودر نامنظم به ترتیب $۳/۳$ و $۸/۴$ درصد افزایش یافته است. (AA-FRD-C) ۴۰۰ به ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی گراد، چگالی نسبی نهایی با ۱۰۰ درجه سانتیگراد افزایش دما از ۷۵۰ به ۸۵۰ و ۹۵۰ درجه ی سانتیگراد چگالی $Ti-6Al-4V$ همچنین در آزمون پودر به ترتیب $۸/۱۰$ و $۲/۸$ درصد افزایش یافته است. (TI64-FRD-C) نسبی نهایی

به طور متوسط موجب افزایش $۷,۷$ درصدی AA1100 در دماهای مختلف، اعمال ارتعاشات فراصوت در فشردن داغ پودر $Ti-$ حداکثر $۲/۱۰$ درصد در دمای ۴۰۰ درجه ی سانتیگراد). در چگالی نسبی نهایی شده. و در حالی که این میزان برای پودر

برابر ۶/۹ درصد (حداکثر ۳/۱۲ درصد در دمای ۸۵۰ درجه سانتی گراد) بوده است. در نتیجه می توان بیان 6A1-4V داشت. که ارتعاشات فراصوت در چگالش پودر داغ تیتانیوم با شکل ذرات کروی دارای تأثیرگذاری بیشتری می باشد

در Ti-6A1-4V و AA1100 با مقایسه مقادیر افزایش چگالی نهایی با اعمال ارتعاشات فراصوت به ترتیب در دو نوع پودر با افزایش دما تأثیرگذاری فراصوت کاهش یافته است. در حالی که AA1100 می توان دریافت. که در پودر b-نمودار شکل ۱۲ با افزایش دما تأثیر ارتعاشات فراصوت افزایش یافته است. با افزایش دما، تأثیرگذاری اعمال Ti-6A1-4V بالعکس در پودر ارتعاشات فراصوت به دو عامل دما و میزان تخلخل باقیمانده وابسته می گردد. مقدار تخلخل نمونه حاصل از فشردن داغ معمول می باشد. در نتیجه ظرفیت لازم برای تغییر شکل بیشتر در حالت AA1100 بیشتر از مقدار آن در پودر Ti-6A1-4V پودر بیشتر می باشد Ti-6A1-4V اعمال ارتعاشات فراصوت در پودر

با ۱۰۰ درجه سانتی گراد افزایش دما چگالی نهایی به طور متوسط ۱/۴ درصد افزایش می یابد. در حالی AA1100 در پودر مقدار افزایش چگالی Ti-6A1-4V که با اعمال ارتعاشات فراصوت این مقدار برابر ۷/۷ درصد می باشد. همچنین در پودر نهایی در اثر ۱۰۰ درجه سانتیگراد افزایش دما. و اعمال ارتعاشات فراصوت به ترتیب برابر ۵/۹ و ۶/۹ درصد می باشد. با مقایسه نتایج افزایش چگالی نهایی توسط دو عامل مستقل افزایش دما و اعمال ارتعاشات فراصوت، می توان بیان داشت اعمال ارتعاشات فراصوت معادل حداقل ۱۰۰ درجه سانتی گراد افزایش دمای عملیات فشردن داغ پودر می باشد

تأثیر ارتعاشات فراصوت بر مکانیزم های چگالش

رفتار کلی چگالش به دلیل تفاوت در وابستگی مکانیزم های غالب به پارامترهای مؤثر، پیچیده می باشد. مکانیزم های چگالش شامل چیدمان مجدد ذرات، پلاستیسیته (تسلیم/صعود نابجایی ها). خزش توانی (خزش نابجایی ها)، نفوذ شبکه ای و مرز دانه ای می باشند. فشردن داغ پودر را می توان به دو مرحله گذار و پایدار تقسیم بندی نمود. در مرحله اولیه چگالش پودر به دلیل تمرکز تنش بسیار بالا در نقاط تماس ذرات پودر. تغییر شکل پلاستیک ذرات پودر در تماس با یکدیگر. در نقاط کلویی مکانیزم غالب در چگالش می باشد. اما در مراحل نهایی و پایدار، پدیده های وابسته به زمان. مانند خزش و نفوذ، مکانیزم غالب در چگالش پودر می باشند

از طرفی نرخ چگالش ماده حین فرآیند فشردن داغ به پارامترهای مختلفی. از جمله خصوصیات ذاتی مواد (استحکام تسلیم، ضرایب خزش و نفوذ). مشخصه های نمونه (چگالی اولیه، هندسه قطعه، اندازه و شکل ذرات پودر). و پارامترهای فرآیند و محدوده منتخب دمای MPa فشردن داغ (دما و فشار) وابسته است. در آزمون های انجام گرفته با توجه به فشار ثابت ۲۰ مطابق با نتایج آزمون های تجربی اشبی و همکاران. مکانیزم غالب Ti-6A1-4V و AA1100 عملیات. برای هر دو نوع پودر در مراحل اولیه گذرا (ناحیه با شیب تند ابتدای عملیات) تغییر شکل پلاستیک. و در مرحله پایدار (ناحیه کاهش شیب تا انتهای عملیات فشردن) خزش نابجایی ها می باشد

با مقایسه نمودارهای چگالی در حالت های بدون و با اعمال ارتعاشات فراصوت می توان دریافت. اعمال ارتعاشات فراصوت موجب تسریع در ناحیه اولیه گذرا. و کاهش زمان رسیدن به ناحیه خزش پایدار می گردد (شکل های ۸ و ۹). در نتیجه می توان بیان داشت. که ارتعاشات فراصوت بر هر دو عامل اصلی چگالش در دمای بالا یعنی تغییر شکل پلاستیک. و خزش نابجایی ها تأثیر گذار است. و باعث تسریع در پدیده ها و مکانیزم های غالب چگالش می گردد

می توان. $Ti-6Al-4V$ و $AA1100$ به منظور تبیین اثر دما بر تأثیر گذاری متفاوت ارتعاشات اولتراسونیک در دو نوع پودر اختلاف ضریب انتقال حرارت را به عنوان یک عامل اساسی مطرح نمود. ضریب انتقال حرارت بیانگر قابلیت انتقال حرارت از نقطه ای به نقطه دیگر از ماده می باشد. در ابتدا باید بیان داشت، نرم شدگی آکوستیکی به عنوان مهمترین عامل در کاهش تنش سیلان. به واسطه اعمال ارتعاشات فراصوت شناخته می شود. در تحقیقات لانگنر، ایجاد حرارت موضعی در نابجایی های مهمترین عامل نرم شدگی آکوستیکی بیان شده است

در فرآیند فشردن داغ پودر مرز ذرات پودر و دانه ها در میکروساختار مهمترین منابع نابجایی می باشند. از طرفی خزش نابجایی ها بخصوص در مرز دانه ها و ذرات پودر. مهمترین عامل چگالش در دمای بالا می باشد. اعمال ارتعاشات فراصوت موجب افزایش دما در نابجایی ها شده. و در نتیجه حرکت حجمی ذرات و تغییر شکل ماده را تسهیل می نماید. هر مقدار انرژی ارتعاشی وارد شده به ماده بیشتر باشد انرژی بیشتری در نابجایی ها آزاد می شود. و در پی آن دمای موضعی بیشتر افزایش یافته و تنش سیلان ماده کاهش می یابد. در این ارتباط، لانگنر بیان داشته است برای دستیابی به یک مقدار مشخص کاهش تنش سیلان ماده. انرژی گرمایی لازم برای افزایش دمای کل ماده ۱۰ برابر انرژی ارتعاشات فراصوت. مورد نیاز برای اعمال به ماده می باشد

این نسبت اثر گذاری بسیار بالاتر اعمال ارتعاشات فراصوت را در مقایسه با افزایش دمای کل ماده نشان می دهد. افزایش نرخ را می توان. به همین عامل ایجاد حرارت موضعی در $Ti-6Al-4V$ و $AA1100$ چگالش و چگالی نهایی در فشردن داغ پودر نقاط اتصال مرز ذرات. و دانه های درون ذرات نسبت داد. اما اختلاف در تأثیر گذاری حرارت را باید به اختلاف ضریب انتقال حرارت دو ماده نسبت داد

حرارت موضعی ایجاد شده در نابجایی ها به $(W/m-k)$ به دلیل ضریب انتقال حرارت بالای آلومینیوم (۲۲۲ $AA1100$ در پودر به دلیل ضریب $Ti-6Al-4V$ سرعت به کل ماده پخش می شود. و دمای کل ماده را افزایش می دهد. در حالی که در پودر حرارت موضعی ایجاد شده. به سختی به دیگر نقاط ماده منتقل می شود. و بیشتر در $(W/m-k)$ انتقال حرارت پایین آن (۷/۶) نقاط تغییر شکل با حجم بالاتر نابجایی ها متمرکز می ماند. و در نتیجه موجب تغییر شکل بیشتر ماده می گردد

با توجه به نتایج ارائه شده می توان بیان داشت. که اعمال ارتعاشات فراصوت به دو شکل چگالی نهایی قطعه را افزایش می دهد. الف) افزایش چگالی نسبی اولیه پودر فشرده شده در دمای محیط در مرحله پیش بار گذاری. و ب) افزایش نرخ چگالش و

چگالی نهایی در مرحله بارگذاری در فرآیند فشردن داغ در دمای بالا. در فرآیند فشردن داغ پودر، اعمال ارتعاشات فراصوت. با افزایش دمای موضعی. موجب تسهیل حرکت حجمی ذرات (تغییر شکل پلاستیک و خزش نابجایی ها) می شود. که افزایش چگالش، یکنواختی ساختار و استحکام قطعه فشرده شده را در پی دارد.

در نهایت می توان بیان نمود که اعمال ارتعاشات فراصوت در فرآیند فشردن داغ. با توجه به بازده بالای مصرف انرژی در ترانسدیوسرهای فراصوت، می تواند روشی مناسب برای کاهش نیروهای استاتیک. کاهش دمای عملیات و کاهش زمان انجام آزمون باشد. در نتیجه بدین طریق، لزوم استفاده از دستگاه های با تناژ بالاتر، قالب مستحکم تر و مصرف انرژی بالاتر. برای رسیدن به یک چگالی و استحکام مشخص کاهش می یابد.

نتیجه گیری

بدون. و با اعمال ارتعاشات فراصوت و تحت Ti-6Al-4V و آلیاژ تیتانیوم AA1100 در این تحقیق فشردن داغ پودر آلومینیوم فشار ثابت و در دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در بررسی نتایج، پارامترهای حین چگالش، چگالی اولیه و نهایی نمونه های 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 می باشد اعمال ارتعاشات فراصوت در عملیات پیش بارگذاری موجب افزایش موضعی دما. در نقاط تماس ذرات پودر و همچنین حرکت و تغییر چیدمان راحت تر ذرات می شود. و در نتیجه افزایش چگالی اولیه پودر را در پی دارد
- به ترتیب برابر $7/7$ و $6/9$ درصد بوده است. Ti-6Al-4V و AA1100 با اعمال ارتعاشات فراصوت، متوسط افزایش چگالی نهایی در پودرهای در دمای بالا می باشد Ti-6Al-4V که بیانگر تأثیرگذاری بیشتر در پودر کرومی
- تأثیرگذاری ارتعاشات فراصوت در افزایش چگالی نهایی وابسته به دمای عملیات و ضریب انتقال حرارت ماده. در عملیات فشردن داغ می باشد. به این اثر به مقدار کمی کاهش یافته است. AA1100 با افزایش دما اثر فراصوت افزایش و در پودر Ti-6Al-4V گونه ای که در پودر
- اعمال ارتعاشات فراصوت در عملیات فشردن داغ موجب شتاب بخشیدن به سینماتیک عملیات چگالش. و نیز افزایش چگالی نهایی و بهبود استحکام قطعه می گردد. در نتیجه با اعمال ارتعاشات فراصوت می توان. بدون کاهش بازده عملیات، عملیات فشردن داغ پودر را در نیروهای استاتیک فرم دهی. و زمان کمتر و دمای پایین تری انجام داد

فهرست علائم

(mm) قطر نمونه فشرده شده D

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



رضا عابدینی، امیرعبداله، یونس علیزاده، وحید فرتاش وند

فولاد رسول دلاکان

با سالها تجربه ی گرانبها در زمینه ی تأمین و توزیع و عرضه انواع ورق آلیاژی - انواع فولاد آلیاژی. با اشکال مختلف تولیدی. از جمله ورق - میلگرد - تسمه - پروفیل -

میلگرد با استاندارد و گواهینامه های روز دنیا در سراسر ایران فعالیت مینماید.

صنعتگر گرامی از اینکه ما را جهت خرید فولاد آلیاژی مورد نیاز خویش انتخاب می نمایید سپاسگزاریم.

ارتباط یا ما: ۰۹۱۲۲۱۳۶۶۷۵ - ۰۲۱۲۸۴۲۳۸۲۰

fooladrasuldalakan@gmail.com