

بررسی خواص مکانیکی آلیاژ حافظه دار نایتینول متخلخل تولید شده به روش متالورژی پودر

سروش پرویزی¹، حمیدرضا حفیظ پور²، سید خطیب الاسلام صدرنژاد³،
علی سنگ قلعه²، مجید عباسی قرچه²، پدram مهدیزاده تهرانی⁴

چکیده

آلیاژهای حافظه دار به دلیل خواص ویژه و بالقوه ای که دارند، به عنوان موادی نو در کاربردهای مهندسی مانند محرک های روباتیک، کامپوزیت های حافظه دار و ایمپلنت های پزشکی مورد استفاده قرار گرفته است. تولید آلیاژ نایتینول با ترکیب شیمیایی دقیق و بدون آلودگی های مضر از مشکلات مهم در ساخت این آلیاژها به روش ریخته گری بشمار می رود. متالورژی پودر به عنوان یک روش مناسب برای ساخت و تولید آلیاژ نایتینول، مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این پژوهش از فرآیند پرس گرم که نقش مهمی در بهبود استحکام و تغییرات ابعادی قطعات دارد استفاده شد. همچنین با توجه به نتایج آزمایش های چگالی سنجی، بعد سنجی، سختی سنجی، آزمون پانچ برشی و آنالیز فازی XRD، اثر پارامترهای موثر بر فرآیند شکل دهی و تفجوشی نمونه ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شرایط بهینه برای تولید آلیاژ متخلخل نایتینول (تخلخل 30٪) با کمترین ترکیبات ناخواسته، قطعه پرس شده به روش گرم (دمای 120°C، فشار 500 MPa) و تفجوشی در دمای 980°C و زمان 4 ساعت با استحکام کششی 147 MPa می باشد.

کلمات کلیدی: آلیاژهای حافظه دار، آلیاژ نایتینول متخلخل، متالورژی پودر، پرس گرم، آزمون پانچ برشی

مقدمه

آلیاژهای حافظه دار مواد تقریباً جدیدی هستند که دارای خواصی مانند حافظه داری، سوپرالاستیسیته و میرایی بالا می باشند [1]. از مهم ترین آلیاژهایی که رفتار حافظه داری از خود نشان می دهند می توان به NiTi اشاره کرد که با نام نایتینول شناخته می شود. خاصیت حافظه داری این ترکیب به گونه ای است که تا 8 درصد کرنش پلاستیک را بازیابی می کند. رفتار حافظه داری نایتینول ناشی از استحاله مارتنزیتی است. معمولاً آلیاژهای NiTi دارای ترکیبات Ti_2Ni و $TiNi_3$ نیز می باشند و مقاومت خوردگی، استحکام خستگی و چقرمگی مناسبی دارند، بنابراین کاربردهای فراوانی در صنایع نظامی و پزشکی یافته اند [1-3]. ریخته

¹ - کارشناسی ارشد مهندسی مواد، پژوهشگاه مواد و انرژی

² - کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شریف

³ - استاد، پژوهشگاه مواد و انرژی

⁴ - کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت

گ
ری

و متالورژی پودر، مهمترین روشهای ساخت این آلیاژها می باشد. از مهمترین مزایای متالورژی پودر می توان به کاهش مصرف انرژی، دسترسی به ترکیب شیمیایی همگن در آلیاژ، سرعت بالای تولید، به حداقل رساندن آلودگی و قابلیت تولید قطعاتی با اشکال پیچیده اشاره کرد. روش ها و تکنیک های مختلف متالورژی پودر شامل پرس ایزواستاتیک داغ [2]، پرس داغ تحت اتمسفر خنثی [4]، اکستروژن پودر [4]، قالب گیری تزریقی پودر [5] و تفجوشی جرقه ای پلاسما¹ [6]، به منظور ساخت آلیاژ نایتینول مورد استفاده قرار گرفته است. از سوی دیگر تولید آلیاژ متخلخل نایتینول به منظور کاربرد آن در بافت های سخت مصنوعی با استفاده از روش های متالورژی پودر عنصری [7] و سنتز خود انتشار دمای بالا² [8] انجام شده است. ساختار متخلخل این آلیاژها به بافت های جدید استخوانی اجازه نفوذ و رشد بدرون حفره ها را می دهد و منجر به بهبود کارکرد بافت مصنوعی می شود. بنابراین تولید آلیاژی متخلخل با استحکام مکانیکی مناسب از اهداف مهم می باشد. اغلب آلیاژهای حافظه دار متخلخل تولیدی به روشهای متالورژی پودر، استحکام کافی را بعنوان بافتهای سخت بدن ندارند [9]. به این منظور تحقیقاتی در جهت ارائه روشهای نوین شکل دهی انجام شده تا قطعاتی با خواص مکانیکی و حافظه داری مناسب تولید شود. کاربرد فرآیند پرس گرم³ توسط Hoganaes (1994) ارائه شد. در این روش، دمای پودر و قالب از 75 تا 150°C تغییر می کند و به دلیل کاهش استحکام تسلیم در دماهای بالا، چگالی بالاتر با اعمال فشارهای کمتر امکان پذیر است. پرس گرم سبب بهبود یکنواختی چگالی، توزیع حفره ها، استحکام و تغییرات ابعادی می شود و برای بسیاری از پودرها قابل اعمال است [10 و 11]. هدف اصلی این پژوهش، دسترسی به نایتینول متخلخل با ترکیب همگن و خواص مکانیکی مناسب است. اثر فرآیند شکل دهی بر خواص نایتینول متخلخل نیز بررسی می شود.

مواد و روش تحقیق

پودرهای نیکل و تیتانیم 120 μm برای تهیه مخلوط پودری، مواد اولیه این تحقیق را تشکیل می دهند. نمونه ها پس از توزین، به مدت 2 ساعت با نسبت 50-50 درصد اتمی مخلوط شدند. برای جلوگیری از چسبندگی پودر به دیواره قالب و سطح سنبه ها، از اسپری تفلون استفاده شد. نمونه ها (قرصهای 8 گرمی)

1- Spark Plasma Sintering

2- Self Propagation High Temperature Synthesis

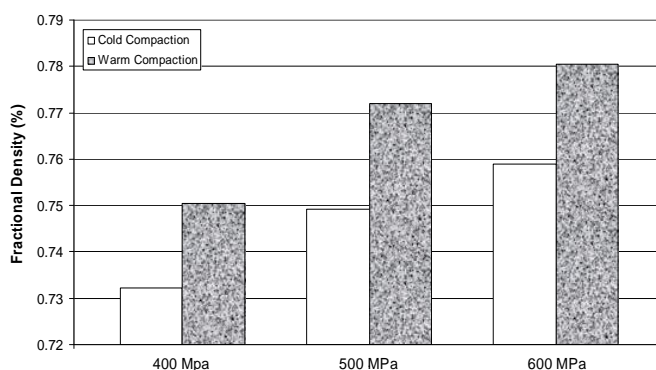
3- Warm Compaction

تحت فشار تک محوری 400-600 MPa و با نرخ حرکت فک 0/12 mm/sec فشرده شدند. برای گرم کردن قالب و شکل دهی گرم در دمای 120 °C، از یک گرم کن استفاده شد. برای کنترل دما از ترموکوپل و ترموستات استفاده شد. کاهش اتلاف حرارتی سیستم به کمک پشم شیشه صورت گرفت. پس از بعد سنجی و توزین نمونه ها، چگالی قطعات خام و تفجوشی شده بروش حجمی محاسبه شد. چگالی سنجی نمونه های تفجوشی شده در فاز مایع (بدلیل تغییرات ابعادی) با استفاده از روش ارشمیدوس (DIN3369) انجام شد. تفجوشی قطعات در یک کوره خلاء (10^{-4} Torr) انجام شد. نمونه ها در دمای 980 و 1050 °C و بمدت 2 و 4 ساعت تفجوشی شدند. نوع فازهای تشکیل شده بعد از تفجوشی به روش پراش اشعه ایکس (PHILIPS) تشخیص داده شد. نمونه های تفجوشی شده به روش راکول-B سختی سنجی شده و استحکام برشی و کششی آنها با استفاده از آزمون پانچ برشی مطابق استاندارد (ASTM D732) صورت گرفت. با استفاده از وایرکات و کاغذ سمباده، ضخامت نمونه تا $900 \pm 10 \mu\text{m}$ کاهش یافت. نمونه ورقه ای نازک در داخل دستگاه پانچ برشی قرار گرفته و این آزمون با استفاده از دستگاه کشش/فشار Instron و نرخ اعمال بار 0/2 mm/min صورت گرفت. قطر سنبه دستگاه پانچ 3 میلیمتر بود. پانچ هر نمونه سه مرتبه تکرار و میانگین داده ها محاسبه شد.

یافته ها و بحث

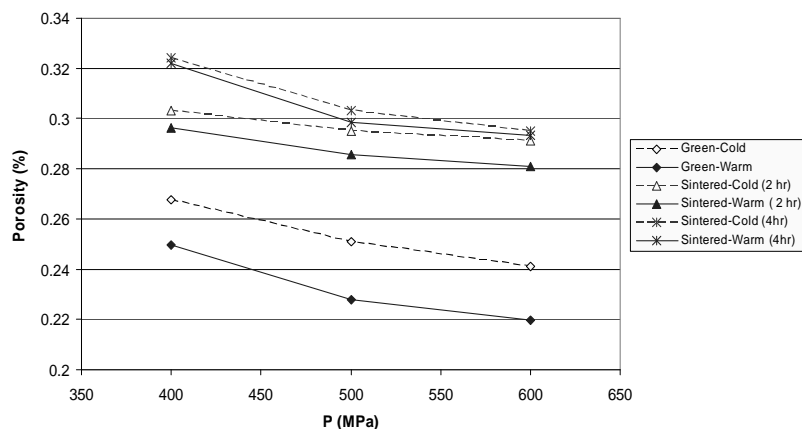
1- بررسی چگالی خام و تفجوشی شده آلیاژ نایتینول متخلخل

شکل (1) نتایج چگالی سنجی نمونه های خام متراکم شده بروشهای پرس سرد/گرم را نشان می دهد. مشاهده می شود که افزایش دما، سبب افزایش قابلیت چگالش نمونه شده است. مثلاً با اعمال پرس گرم در فشار 500 MPa، حدود 2/4٪ افزایش در چگالش نسبت به پرس سرد حاصل می شود. افزایش دما، پلاستیسیته و تغییر فرم ذرات را افزایش داده و پر شدن فضاهای خالی با سهولت بیشتری انجام می شود [10-12].



شکل 1- اثر فشار و دمای متراکم سازی بر چگالش مخلوط پودری Ni و Ti

اثر فشار، دمای پرس و زمان تفجوشی بر میزان تخلخل در شکل 2، آمده است. افزایش فشار، موجب تغییر فرم پلاستیک موثر تر ذرات پودری شده و در نتیجه سیلان پلاستیک، درصد تخلخل کاهش می یابد. این اثر در نمونه های تولید شده بروش پرس گرم محسوس تر است. همچنین نرخ کاهشی مقدار تخلخل ها با افزایش فشار کاهش می یابد. تفجوشی در دمای 980°C باعث افزایش تخلخل نمونه های خام می شود. بعلاوه با افزایش زمان تفجوشی تا 4 ساعت، روند افزایش تخلخل در نمونه ها ادامه می یابد. با این وجود اختلاف تخلخل در نمونه های پرس شده بروش سرد و گرم، بسیار ناچیز می باشد، اما بیشترین نرخ افزایش تخلخل، مربوط به نمونه های پرس گرم شده است. میزان تخلخل آلیاژهای تفجوشی شده به دو عامل بستگی دارد. الف) تشکیل حفره های جدید که منجر به افزایش میزان تخلخل می شوند و ب) انقباض حفره ها که افزایش چگالی در نمونه را به همراه دارد. به نظر می رسد که تشکیل حفره های جدید و کاهش چگالی نمونه ها که بواسطه اختلاف در نرخ نفوذ عناصر نیکل و تیتانیم در حین فرآیند تفجوشی رخ می دهد [7 و 13]، مکانیزم غالب در زمان های تفجوشی تا 4 ساعت می باشد. نرخ نفوذ اتم های نیکل در حین تفجوشی بیش از تیتانیم می باشد، در نتیجه موضعی که ابتدا توسط اتم های نیکل اشغال شده بود با حفره ها جایگزین می شود. چنانچه زمان برای انجام واکنش های تبدیلی کافی نباشد، تخلخل ها افزایش می یابد.

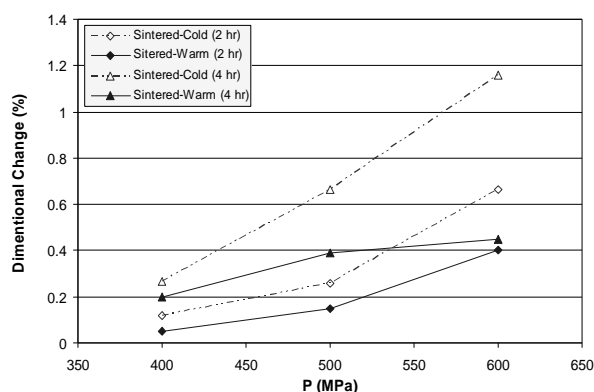


شکل 2- اثر فشار/دمای متراکم سازی بر تخلخل نهایی نمونه های خام و تفجوشی شده در دمای 980°C

2- بررسی تغییرات ابعادی نمونه های تفجوشی شده

نتایج تغییرات ابعادی نمونه های تفجوشی شده در شکل (3) نشان داده شده است. تفجوشی نمونه ها در دمای 980°C و به مدت 2 و 4 ساعت صورت گرفته است. مشاهده می شود که با افزایش فشار متراکم سازی، مقدار تغییرات ابعادی نمونه ها افزایش می یابد. این اثر بویژه در مورد قطعات شکل داده شده بروش پرس سرد نمود بیشتری دارد. همچنین تغییرات ابعادی نمونه های پرس گرم شده در مقایسه با نمونه های پرس شده بروش متداول، بسیار کمتر است. همانطور که اشاره شد در فرآیند پرس گرم، انتقال موثرتر انرژی اعمالی بر

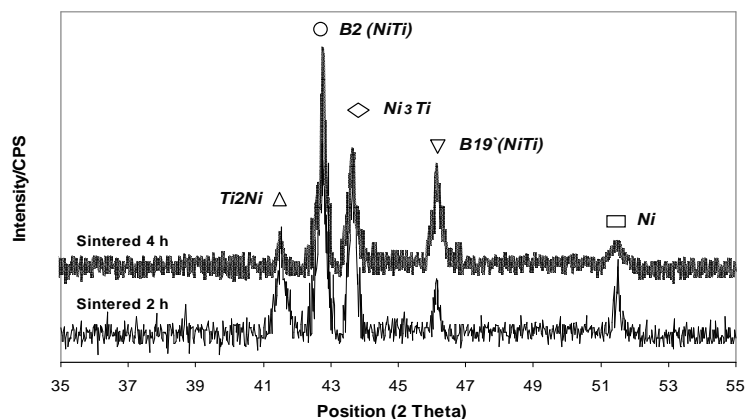
نمونه، منجر به توزیع یکنواخت تر چگالی در نمونه می شود. در نتیجه چگالی خام همگن تر، منجر به تغییرات ابعادی یکنواخت تر در تمامی قسمت های نمونه پس از تفجوشی می شود. زمان تفجوشی نیز اثر قابل ملاحظه ای بر تغییرات ابعادی نمونه ها دارد، بطوریکه با افزایش زمان تا 4 ساعت، تفاوت ابعاد نمونه های خام با نمونه های تفجوشی شده افزایش می یابد. افزایش تغییرات ابعادی با افزایش انرژی درونی آلیاژ در اثر واکنش های تبدیلی ترکیبات بین فلزی و تشکیل فازهای جدید، توجیه می شود. این امر سبب می شود که ترکیب آلیاژی در حین تفجوشی افزایش حجم یافته و ابعاد آن در جهت شعاعی بیشتر شود.



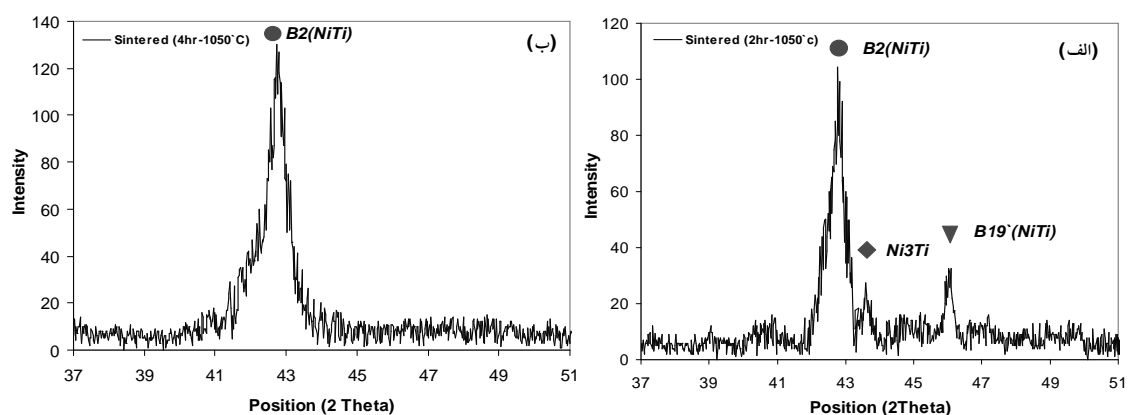
شکل 3- اثر فشار/دمای متراکم سازی و زمان تفجوشی بر تغییرات ابعادی قطعات آلیاژی NiTi

3- بررسی فازهای تشکیل شده در آلیاژ

زمان و دمای تفجوشی با تاثیر بر سرعت و فاصله نفوذ اتمی، از متغیرهای اصلی فرآیند تفجوشی بشمار می روند. شکل (4) اثر زمان تفجوشی را نشان می دهد. با گذشت 2 ساعت، حضور فازهای دیگری غیر از NiTi همچون نیکل عنصری بخوبی مشخص است. به نظری رسد هنوز واکنش های تبدیلی برای تشکیل فاز NiTi کامل نشده است. در نتیجه فازهایی مانند Ni, Ni₃Ti و Ti₂Ni شناسایی شده است. مناطق ناهمگن از نیکل و تیتانیم که قبل از تفجوشی در نمونه حضور دارند، بواسطه نفوذ ناکافی، مناطق غنی از این عناصر را بوجود می آورند که منجر به تشکیل ترکیبات Ni₃Ti و Ti₂Ni می شود. با افزایش زمان و نفوذ اتم ها، نیکل و تیتانیم بصورت همگن تری در نمونه توزیع می شوند که منجر به تشکیل ترکیب NiTi می شود. در نتیجه با گذشت 4 ساعت از زمان تفجوشی، شدت پیک های فاز نایتینول افزایش یافته در حالیکه نیکل خالص و فاز Ti₂Ni در آلیاژ کم شده است. با این وجود ترکیب Ni₃Ti هنوز در نمونه مشاهده می شود، اما از مقدار آن کاسته شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که دما و فشار پرس، اثری بر فازهای ایجاد شده ندارد [5 و 7].



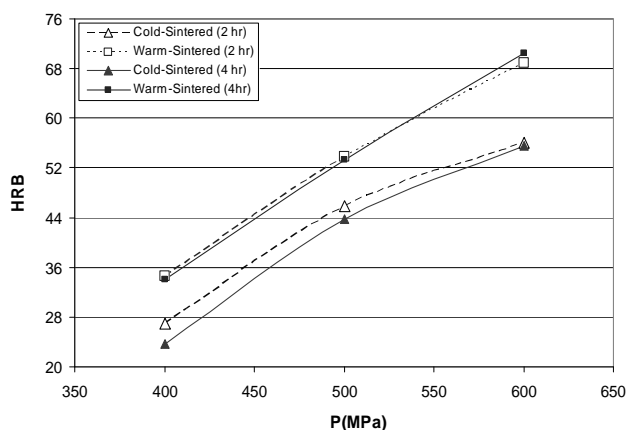
شکل 4- طرح پراش اشعه ایکس برای نمونه پرس گرم/تفجوشی شده در دمای 980°C به مدت الف) 2 و ب) 4 ساعت بررسی دمای تفجوشی با استفاده از نمونه های پرس گرم شده در فشار 500 MPa ، دمای $1050 \pm 5^{\circ}\text{C}$ و بمدت 2 و 4 ساعت انجام شد. الگوی پراش برای نمونه تفجوشی شده بمدت 2 ساعت در دمای مذکور، در شکل (5-الف)، نشان داده شده است. مشاهده می شود که افزایش دمای تفجوشی سبب افزایش تشکیل فاز NiTi می شود و حضور فازهای دیگر به حداقل مقدار ممکن می رسد. افزایش دما موجب همگنی بیشتر آلیاژ شده و اثرات فازهای دیگر در نقشه پراش را از بین می برد. سرعت تشکیل فاز NiTi در این دما به دلیل نقش موثر فرآیند تفجوشی فاز مایع بسیار بالاست و تنها با گذشت 2 ساعت از زمان تفجوشی، ترکیب B2 (NiTi) فاز غالب بوده و تنها مقادیر اندکی فاز مارتزیت B19' (NiTi) و Ni_3Ti در آلیاژ دیده می شود. شکل (5-ب)، الگوی پراش پس از تفجوشی در دمای 1050°C و بمدت 4 ساعت نشان می دهد. مشاهده می شود که بعد از گذشت 4 ساعت از زمان تفجوشی، فاز نایتینول تنها فاز قابل تشخیص در زمینه آلیاژ است.



شکل 5- طرح پراش اشعه ایکس برای نمونه پرس گرم/تفجوشی شده در دمای 1050°C به مدت الف) 2 و ب) 4 ساعت

4- بررسی سختی آلیاژهای تفجوشی شده

در تحلیل نتایج سختی بدست آمده از شکل (6)، می توان به موارد زیر اشاره کرد:
 الف) با افزایش فشار پرس، بدلیل کاهش تخلخل، سختی افزایش می یابد. همچنین پرس گرم، سختی آلیاژ نایتینول را در حدود 35٪ بهبود می دهد. بنظر می رسد کاهش تخلخل در نمونه های شکل داده شده بروش گرم، دلیل اصلی افزایش سختی نمونه ها باشد. ب) افزایش زمان تفجوشی تا 4 ساعت، منجر به کاهش سختی نمونه های شکل داده شده بروش سرد می شود، زیرا مقدار تخلخل افزایش و ترکیبات بین فلزی در زمینه NiTi کاهش می یابد. در نتیجه سختی نمونه های پرس سرد/تفجوشی شده با افزایش زمان تفجوشی کاهش می یابد. از طرفی افزایش زمان اثر محسوسی بر کاهش سختی نمونه های پرس گرم ندارد.



شکل 6- اثر فشار ادمای شکل دهی و زمان تفجوشی بر سختی آلیاژ نایتینول

5- بررسی استحکام آلیاژ نایتینول تولید شده به روش متالورژی پودر

بررسی دما/فشار شکل دهی و زمان تفجوشی بر استحکام نایتینول، با استفاده از آزمایش پانچ برشی صورت گرفت (شکل 7). اطلاعات لازم از منحنی نیرو- جابجایی و معادلات 1 و 2، قابل دستیابی است.

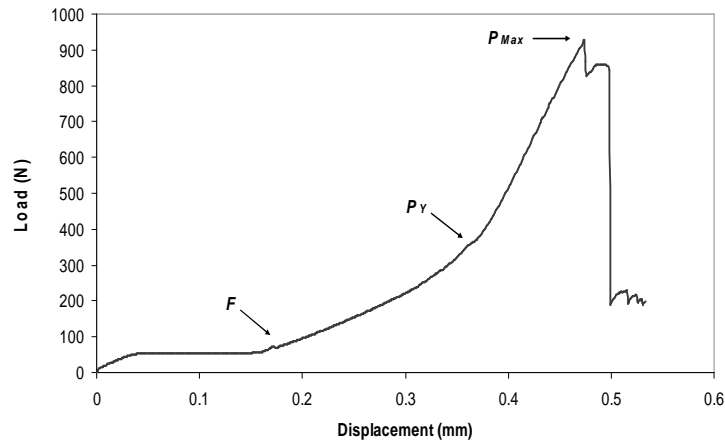
F: نیروی اصطکاک سنبه - ماتریس، P: نیروی اعمالی سنبه، P_Y : نیروی تسلیم و P_{MAX} : نیروی ماکزیمم

(1)

$$\tau_{y, \max} = \frac{P_{y, \max} - F}{2\pi r l} \Rightarrow \sigma_{y, \max} = C_{y, \max} \times \tau_{y, \max}$$

مهمترین عامل موثر بر ضریب تبدیل (C_Y و C_{max})، نوع دستگاه انجام آزمایش پانچ است. لذا در پژوهش حاضر نیز ضریب تبدیل با توجه به نتایج بدست آمده از پژوهش های پیشین، برای استحکام تسلیم و نهایی برترتیب 3/14 و 1/59 در نظر گرفته شد [14]. شکل (8-الف) نتایج استحکام قطعات آلیاژ نایتینول را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش فشار متراکم سازی، استحکام تسلیم قطعات افزایش می یابد. مقایسه استحکام تسلیم نمونه های پرس شده بروش سرد و گرم، تاثیر استفاده از پرس گرم را نشان می

دهد.



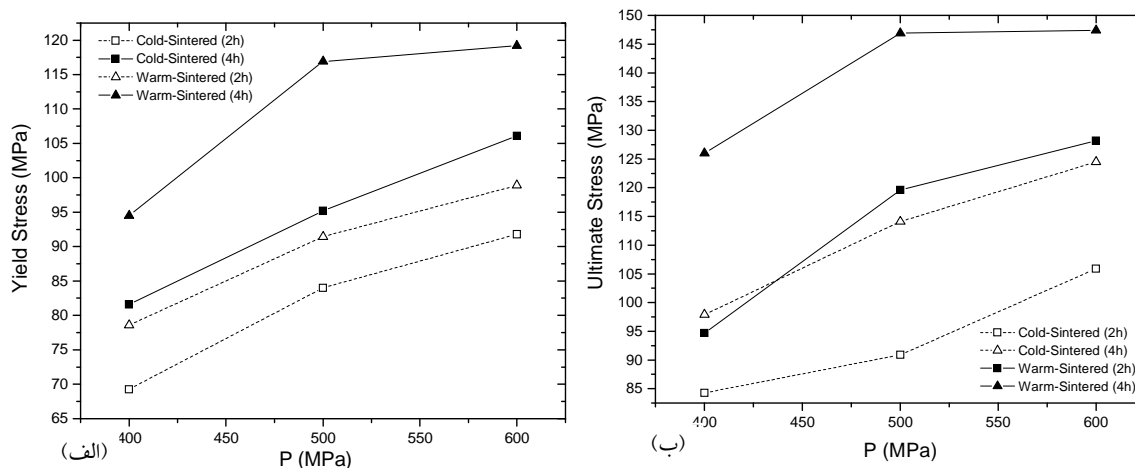
شکل 7- نمودار نیرو-جابجایی بدست آمده از آزمایش پانچ برشی

به عنوان مثال، استحکام تسلیم نمونه های تفجوشی شده بمدت 2 ساعت در کلیه فشارهای اعمالی در حدود 10 درصد با اعمال پرس گرم بهبود می یابد، که این مقدار با افزایش زمان تفجوشی (4 ساعت) حدود 16 درصد افزایش یافته است. استحکام کششی نمونه ها نشان می دهد (شکل 8-ب) که قطعات تولیدی به روش پرس گرم، در شرایطی هستند که می توان از آنها در ساخت قطعات ساده هندسی برای کاربردهای پزشکی استفاده کرد. مثلا نمونه پرس گرم تفجوشی شده به مدت 4 ساعت (دمای 980°C) با تخلخل حدود 30٪ دارای استحکام کششی 147 MPa می باشد. در تحلیل نتایج شکل 9، می توان به موارد زیر اشاره کرد:

الف) با افزایش فشار متراکم سازی بدلیل کاهش تخلخل در نمونه ها، استحکام نهایی بهبود یافته است.

ب) پرس گرم منجر به بهبود استحکام کششی نمونه ها شده، بطوریکه استحکام قطعات پرس گرم/تفجوشی شده بمدت 2 ساعت، از استحکام نمونه های پرس سرد/تفجوشی شده بمدت 4 ساعت بیشتر است. همانطور که اشاره شد، پرس گرم منجر به بهبود استحکام خام، توزیع چگالی و حفره ها در ساختار می شود.

ج) با افزایش زمان تفجوشی، استحکام نهایی افزایش می یابد. بنظر می رسد استحکام نمونه ها تنها تابع مقدار تخلخل موجود در قطعات نمی باشد بلکه اندازه و توزیع حفره ها نقش اصلی را ایفا می کنند [5 و 7]. به منظور بررسی استحکام نمونه های تفجوشی شده در فاز مایع (دمای 1050°C)، پانچ برشی بر روی نمونه های پرس گرم شده (فشار 500 MPa) انجام شد. تخلخل و استحکام این نمونه ها در جدول (1) ارائه شده است.



شکل 9- اثر فشار/دمای شکل دهی و زمان تفجوشی بر استحکام آلیاژ نایتینول

جدول 1- نتایج آزمایش پانچ برشی برای نمونه های تفجوشی شده در دمای 1050 °C و زمان های 2 و 4 ساعت

نمونه	درصد تخلخل	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)
2 ساعت تفجوشی	20/2	126/9	288/2
4 ساعت تفجوشی	25/1	115/2	269/6

استحکام آلیاژهای تفجوشی شده در فاز مایع، نسبت به نمونه های تفجوشی شده در دمای 980 °C، افزایش چشمگیری دارد، بطوریکه استحکام نهایی نمونه ها در حدود 90 درصد بهبود یافته است. به نظر می رسد دلیل اصلی این امر، اولاً حضور فاز مذاب و در نتیجه افزایش استحکام زمینه اطراف حفره ها و ثانیاً تخلخل کمتر موجود در نمونه های تفجوشی شده در فاز مایع باشد. اما بعلت تغییرات ابعادی زیاد (ناشی از افزایش سیالیت و خروج گازها) نمی توان نمونه ای با ابعاد مناسب را بدون ماشینکاری بوجود آورد.

نتیجه گیری

- 1- متالورژی پودر آلیاژ نایتینول متخلخل، روشی مناسب برای تولید این آلیاژ می باشد. آلیاژ همگن در صورت انتخاب مناسب دما و زمان تفجوشی قابل دستیابی است.
- 2- در تفجوشی حالت جامد، با افزایش زمان و بدلیل نفوذ مناسب اتم ها، نیکل و تیتانیم بصورت یکنواخت تری توزیع می شوند. با گذشت 4 ساعت از زمان تفجوشی، شدت پیک های فاز نایتینول افزایش یافته در حالیکه نیکل عنصری و ترکیبات بین فلزی در آلیاژ کاسته شده است.
- 3- تفجوشی فاز مایع روشی مناسب برای دسترسی سریع به فاز نایتینول با حداقل ترکیبات ناخواسته می باشد.

- 4- نتایج بدست آمده از آزمایش پانچ برشی نشان می دهد که شکل دهی گرم منجر به بهبود استحکام نمونه ها شده است، بطوریکه استحکام تسلیم و کششی نمونه های پرس گرم/تفجوشی شده در فاز جامد به ترتیب حدود 15 و 20 درصد نسبت به نمونه های شکل داده شده به روش متداول، بالاتر است.
- 5- تفجوشی فاز مایع سبب افزایش 90 درصدی استحکام کششی نایتینول می شود. به هر صورت تغییرات ابعاد این نمونه ها زیاد بوده و نمی توان نمونه ای با ابعاد مناسب را بدون ماشینکاری نهایی بوجود آورد.
- 6- افزایش فشار پرس بدلیل محدودیت های ساخت و افزایش هزینه های تولید مقرون به صرفه نمی باشد. بنابراین شرایط بهینه برای تولید آلیاژ متخلخل نایتینول (تخلخل 30٪) با کمترین ترکیبات ناخواسته، قطعه پرس شده به روش گرم (دمای 120°C، فشار 500 MPa) و تفجوشی در دمای 980°C و زمان 4 ساعت با استحکام کششی 147 MPa می باشد.

مراجع

- [1] L.G. Machado and M.A. Savi, "Medical applications of shape memory alloys", *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 36, 2003, 683-691
- [2] M. D. McNeese, D. C. Lagoudas, T. C. Pollock, "Processing of TiNi from elemental powders by hot isostatic pressing", *Materials Science and Engineering: A280*, 2000 334-348
- [3] P.E. Zovas, R.M.German, K.S.Hwang and G.J.Li, "Activated and Liquid Phase Sintering-Progress and Problems", *Journal of Metals*, 1983, 28-32
- [4] K.Wang, T.Shen, H.Jiang, M.Quan,"Structural Evaluation of Ni-Ti Systems Caused by Mechanical Alloying in Different Atmospheres", *Mater. Sci. Eng: A179*, 1994, 215-219
- [5] L.Krone, E. Schuller, "Mechanical behavior of NiTi parts prepared by powder metallurgical methods", *Materials Science and Engineering: A 378*, 2004, 185-190
- [6] Y. Zhao, M. Taya, Y. Kang and A. Kawasaki, "Compression behavior of porous NiTi shape memory alloy", *Acta Materialia*, 53, 2005, 337-343
- [7] S.L. Zhu, X.J. Yang, F. Hu, S.H. Deng, "Processing of porous TiNi shape memory alloy from elemental powders by Ar-sintering", *Materials Letters*, 58, 2004, 2369-2373
- [8] B. Y. Li, L. J. Rong, Y. Y. Li and V. E. Gjunter, "A recent development in producing porous Ni-Ti shape memory alloys", *Intermetallics*, 8, 2000, 881-884
- [9] C.Chu, C. Chung, "Fabrication and properties of porous NiTi shape memory alloys for heavy load-bearing medical applications", *Journal of Materials Processing Technology*, 169, 2005, 103-107
- [10] R.C. Leyton, "Ferritic Stainless Steel for High Density Applications", *Euro PM 2003*, High Alloy Steels, Spain, October 2003, 195-203
- [11] G.F. Bochini, "Warm Compaction of Metal Powders:Why it Works,Why it Requires a Sophisticated Engineering Approach", *Powder Metallurgy*, 42, 1991, 171-180
- [12] "Hoganas Handbook For Warm Compaction", Hoganas Corporation, 2001

[13] M.Igharo, J.V.Wood, "Compaction and sintering phenomena in Titanium-Nickel shape memory alloys", *Powder Metallurgy*, 28, 1985, 131-139

[14] M. A .Gharacheh, A.H. Kokabi "The influence of the ratio of rotational speed/traverse speed on mechanical properties of AZ31 friction stir welds", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 2006, 1983-1987

An investigation on the mechanical properties of porous NiTi shape memory alloy prepared by powder metallurgical method

S. Parvizi¹, H.R. Hafizpour², S.K. Sadrnezhad³, A. Sangghaleh², M. Abbasi Gh.², P. Mehdizade. T.⁴

¹-soroush.parvizi@gmail.com, ³-sadrnezh@sharif.edu

Abstract

Because of special properties of shape memory alloys, they are used as a new material in engineering applications, such as; robotic sensors, composite memory alloys and surgical implants. Producing alloy with homogeneous chemical composition and without impurities is one of the problems of making NiTi. Problems associated with casting, increase the interest in powder metallurgical processing techniques which resulting in reduction of production time and cost. In the present study, warm compaction was used to fabricate the porous NiTi shape memory alloy with ideal metallurgical and mechanical properties. Effects of compaction pressure and temperature, sintering time and temperature on internal porosity, overall hardness, dimensional stability and overall strength of PM NiTi alloys were investigated. The influence of processing route i.e.; cold or warm compaction on aforementioned properties is also presented. It was found that when warm compacted samples (P= 500 MPa) were sintered at 980 °C for 4 h, optimum condition for mechanical properties of porous NiTi was attained.

Keywords: shape memory alloys, porous nitinol alloys, powder metallurgy, warm compaction, shear punch test

¹- Materials and Energy Research Center, M. Sc. (Tel: 0912-5844294)

²- Sharif University of Technology, Department of Materials Science and Engineering, M. Sc.

³- Materials and Energy Research Center, Professor

⁴- Iran University of Science and Technology, Department of Materials Science and Engineering, M. Sc.