

## تأثیر شرایط تفجوشی بر خواص آلیاژ نایتینول

سید خطیب الاسلام صدرنژاد    استاد دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف  
امید لشکری    دانشجوی دکتری دانشکده علوم کاربردی، دانشگاه کبک، کانادا  
امیر فرزادفر    دانشجوی کارشناسی دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

### چکیده

در این تحقیق نمونه‌هایی از آلیاژ حافظه دار نیکل - تیتانیوم (نایتینول) با استفاده از پودرهای خالص نیکل و تیتانیوم به روش تفجوشی در فاز مایع تولید شد. تأثیر عواملی همچون فشار پرس، تثبیت کننده حجم و دما و زمان تفجوشی بر درصد تخلخل و درصد ترکیب NiTi تولید شده طی عملیات تفجوشی تعیین گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که تأثیر دما و زمان تفجوشی بر درصد تخلخل به شروع و خاتمه واکنشهای تشکیل ترکیبات فازی در درون آلیاژ در حین تفجوشی و نیز فشار پرس بستگی دارد. به منظور کاهش تخلخل و جلوگیری از تغییر ابعاد نمونه، از تثبیت کننده حجم (فیکسچر) استفاده شد. اگر چه تثبیت کننده توانست جلوی افزایش حجم را تا حدی بگیرد، اما تشکیل فازهای جدید در حین تفجوشی و انقباض بعد از انجماد که موجب افزایش تخلخل می‌شود را بلا تغییر برجا گذاشت.

کلمات کلیدی: تفجوشی، فاز مایع، تخلخل، آلیاژ حافظه‌دار، نایتینول، متالورژی پودر.

## Effect of Sintering Conditions on Properties of Nitinol Alloy

S. K. Sadrnezhaad and A. Farzadfar    Department of Materials Science and Engineering, Sharif University of Technology  
O. Lashkari    Department of Applied Sciences, University of Quebec., Canada

### Abstract

Liquid phase sintering of pure nickel and titanium powders was used in this research to produce samples of Ni-Ti memory alloy (Nitinol). Effect of compaction pressure, volume fixation, sintering temperature and sintering time on porosity and percentage of the NiTi phase produced during sintering were investigated. Results showed that the effect of temperature and time on porosity depends on the compaction pressure and start and finish of the compound formation reactions during sintering. In order to reduce porosity and prevent volume change, the samples were refrained inside a rigid container (fixture). Although the fixture could cease the changing of the volume to some extent, formation of the new phases as well as post-solidification contraction of the samples caused an increase in porosity of the sample.

**Key words:** Sintering, Liquid phase, Porosity, Memory alloy, Nitinol, Powder metallurgy.

## ۱- مقدمه

هزینه بالایی دارد. اما به سبب کاهش ماشینکاری، سریع بودن تولید و تقلیل اتلاف ماده، برای ساخت قطعات حافظه‌دار کوچک و پیچیده مطلوب به نظر می‌رسد. معایب این روش نیاز به سرمایه سنگین، تخلخل بالا و گرانی پودر است. در این شیوه مخلوط پودری در یک قالب فلزی به شکل نهایی در آمده و پس از تفجوشی در کوره دارای اتمسفر کنترل شده به صورت محصول قابل مصرف در می‌آید. آلیاژ نایتینول را به هر دو روش تفجوشی در فاز جامد و تفجوشی در فاز مایع می‌توان تولید کرد. روش اول قطعه‌ای با حداقل تخلخل و تغییرات ابعادی ایجاد می‌کند؛ ولی انرژی لازم برای تشکیل فاز NiTi را فراهم نمی‌آورد. روش دوم برای حصول یک فاز همگن مناسبتر است. تحقیقات انجام شده برای کاهش تخلخل بسیار محدود بوده و به عدد انگشتان دست نمی‌رسد. بررسی تأثیر پارامترهایی همچون فشار، دما، زمان، اندازه پودر، شکل ذرات، آسیاب کاری اولیه مواد و اعمال فشار ایزو استاتیک گرم بر خواص فیزیکی، مکانیکی و حافظه داری آلیاژ حائز اهمیت به نظر می‌رسد [۵-۱۰].

## ۲- روش تحقیق

پودر تیتانیم با خلوص ۹۹/۹ درصد و اندازه ذره ۲۱ میکرون ساخت شرکت مرک آلمان و پودر نیکل با خلوص ۹۹/۶ درصد و اندازه ذره ۳-۷ میکرون ساخت شرکت فولوکای سوئیس برای ساخت نمونه قرصی شکل به قطر ۱۵ میلی‌متر و ضخامت ۱/۹ الی ۲/۳ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. بعد از توزین دقیق، پودرها با یکدیگر مخلوط شده و ۲ گرم از محصول درون قالب استوانه‌ای فولادی ریخته شد. مخلوط توسط سمبه ماتریس شناور تا ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال فشرده شد. تفجوشی در ۹۵۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ ساعت انجام شد. نمونه در داخل فیکسچری از جنس فولاد نسوز با استاندارد DIN 1.4828 پوشش داده شده توسط آلومینا محبوس شده و عملیات تفجوشی تحت خلاء  $5 \times 10^{-5}$  تور انجام شد.

بعد از تفجوشی، نمونه‌ها مانت گرم و پولیش شدند. سپس به کمک محلول اسیدی (۱۰ سی سی HF، ۱۵ سی سی HNO<sub>3</sub>، ۷۵ سی سی آب) در دمای محیط و به مدت ۴ الی ۶ دقیقه اچ شدند. از نمونه‌ها عکسهای متالوگرافی تهیه شد. به منظور محاسبه تغییر ابعاد، نمونه‌ها قبل و بعد از تفجوشی با کولیس بعد

چند سال است که آلیاژ حافظه‌دار NiTi (نایتینول) حاوی ۵۰ درصد اتمی Ti جذابیت فراوانی در مهندسی و پزشکی کسب کرده است. ویژگی‌هایی همچون سوپرالاستیسیته، حافظه‌داری، سبکی، استحکام، خورده نشدن، زیست سازگاری و خاصیت جذب ارتعاش، توسعه کاربرد آلیاژ در صنایع پزشکی، هوایی و سازه‌هایی که جذب ارتعاش نیاز دارند را به شدت مطرح ساخته است [۱۱]. تولید قطعه مطلوب از جنس نایتینول به روش ذوب تحت خلاء مثلاً در کوره القایی یا قوس الکتریکی و سپس ریخته‌گری، کار گرم و ماشین‌کاری امکان‌پذیر است. اما عیوب ناشی از فرایندهای ذوب و انجماد به لحاظ تأثیر بر کارپذیری و حافظه‌داری، مشکل‌ساز می‌باشند. تفجوشی فاز مایع به عنوان روشی که این عیوب را به حداقل رسانده و ویژگی‌های حافظه‌داری را همزمان بهبود می‌بخشد، امروز مورد توجه محققین قرار دارد.

به دلیل حساسیت تیتانیوم به اکسیژن، نیتروژن، کربن و هیدروژن، تولید نایتینول به شیوه‌های متداول آسان نیست. برای مثال در هنگام ذوب، ریخته‌گری، نورد، آنیلینگ و تفجوشی باید از حضور گازها در جوار فلز به شدت جلوگیری کرد؛ زیرا گازها بر خواص مکانیکی آلیاژ اثر سوء می‌گذارند. فازهای غیر تعادلی همچون Ti<sub>4</sub>Ni<sub>2</sub>N، Ti<sub>4</sub>Ni<sub>2</sub>O، Ti<sub>2</sub>Ni<sub>3</sub>، Ti<sub>3</sub>Ni<sub>4</sub>، Ti<sub>2</sub>Ni، TiNi<sub>3</sub> در هنگام ذوب متولد شده و آلیاژ را شکننده و غیر قابل تغییر فرم می‌سازند. امکان شکل‌دهی آلیاژ دارای حتی اندکی از این ترکیبات تقریباً غیرممکن به نظر می‌رسد [۳]. برخلاف فازهای غیر تعادلی، ترکیب TiNi خصوصیات بسیار جالبی دارد. مثلاً می‌تواند تغییر شکل شبه الاستیک تا ۸ درصد را در آلیاژ باعث شود. مقاومت خستگی آلیاژ را بالا ببرد و خواص میرایی ارتعاش و صوت به آلیاژ بدهد [۴]. فاز TiNi پارامغناطیس است، بیش از ۷۵۸ مگاپاسکال استحکام کششی و تا ۱۵ درصد قابلیت افزایش طول دارد. سختی ۳۵ راکول سی و چقرمگی قابل ملاحظه و قابلیت کار سرد فراوان جزء ویژگی‌های مطلوب این فاز است. هیچ یک از روشهای متداول، ساخت یک نمونه همگن حاوی فقط TiNi با مصرف انرژی محدود، هزینه معقول، نرخ تولید بالا و آلوده‌کنندگی حداقل را تضمین نمی‌کنند. لذا لازم است براساس شکل، ابعاد و خواص مطلوب، روش بهینه‌ای برای ساخت قطعات حافظه‌دار حاوی TiNi تدارک شود.

برای تولید نایتینول، روش پودر، لوکس محسوب می‌شود؛ زیرا

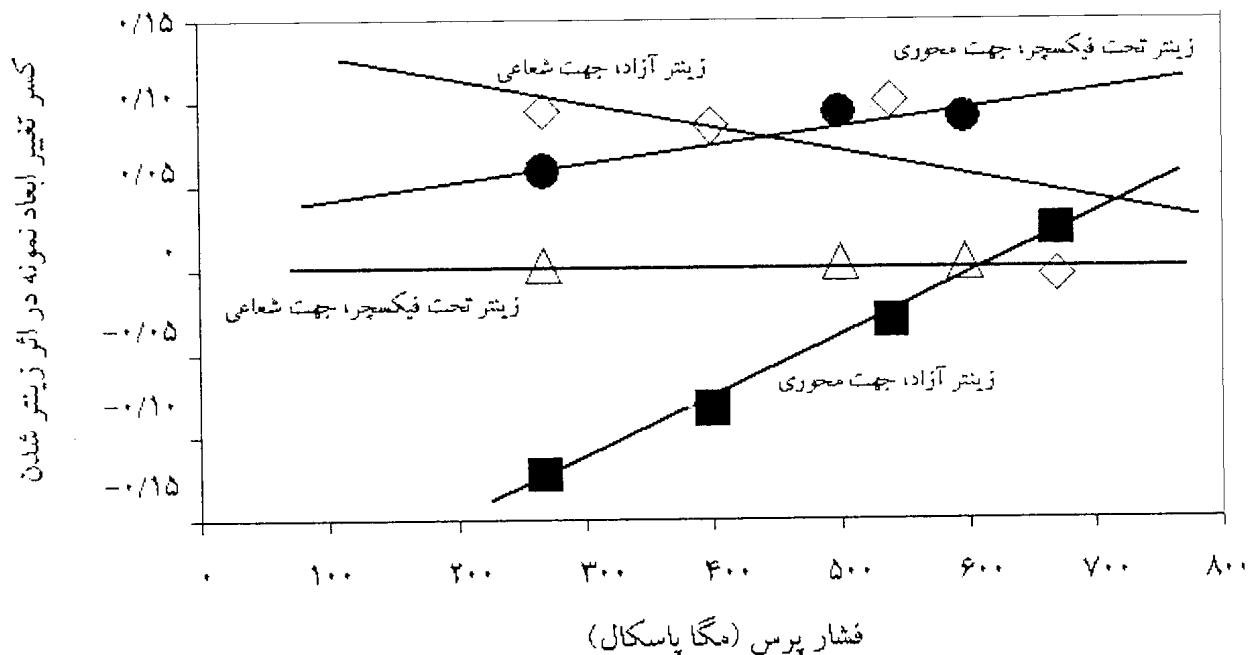
۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت برای دو حالت آزاد و درون فیکسچر در شکل (۱) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، استفاده از فیکسچر می‌تواند جلوی تغییر ابعاد را تا حد زیادی بگیرد. اما حذف کامل تغییر ابعاد حتی با استفاده از سیستم حجم - ثابت نیز میسر نیست. براساس داده‌های شکل، افزایش فشار پرس باعث کم شدن میزان افزایش شعاع و میل تدریجی کاهش طول به سمت افزایش طول در هنگام تفجوشی آزاد می‌شود. این تأثیر بر شعاع نمونه در شرایط تفجوشی با فیکسچر به مراتب کمتر شده و تقریباً به صفر می‌گراید. دیده می‌شود که افزایش فشار پرس در نمونه تثبیت حجم شده نیز مانند نمونه آزاد، باعث بیشتر شدن طول می‌شود ولی تأثیر آن در حالت تثبیت حجم شده بیشتر است. مسبب اصلی تغییر ابعاد نمونه‌ها، انجام تفجوشی در فاز مایع است.

نمونه‌ها را می‌توان انبوهی از ذرات دو عنصری دانست که هر یک به صورت زوج نفوذ عمل می‌کنند. در دمای تفجوشی، دو عنصر در یکدیگر نفوذ کرده و ترکیبات بین فلزی مختلفی به وجود می‌آورند.

سنجی شدند. نتیجه به دست آمده برای حالت‌های تفجوشی آزاد و تفجوشی با فیکسچر با یکدیگر مقایسه شدند. سختی ویکرز تحت بار ۵ کیلوگرم از ۵ نقطه هر نمونه گرفته شد. سختی میکرو برای فاز مارتزیت در ۳ نقطه از هر نمونه با استفاده از بار ۱۰۰ گرم تعیین شد. درصد تخلخل نمونه‌های قرص به وسیله دستگاه آنالیز تصویری ساخت شرکت BOHLER انگلستان محاسبه گردید. بدین منظور دستگاه در بزرگنمایی ۴۰۰ برابر قرار گرفت و از ۵ نقطه مختلف از سطح هر نمونه، تصویربرداری و میانگین‌گیری به عمل آمد. نمونه‌ها به کمک دستگاه XRD دارای لامپ کبالت با طول موج  $1/7903$  آنگستروم ساخت شرکت PHILIPS بین زاویه‌های ۴۰ تا ۸۰ درجه آنالیز شدند. آزمایش DSC از ۲۵ الی ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ گرم و سرد شدن ۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. اثر دما و زمان تفجوشی در تغییر دماهای Ms, Mf, As و Af بررسی شد. تست کشش با دستگاه کشش یونیورسال Instora انجام شد.

## ۲- نتایج و بحث

تغییرات ابعادی نمونه‌ها پس از عملیات تفجوشی در دمای



شکل ۱- تغییرات ابعادی نمونه‌های تفجوشی شده این تحقیق

شکل (۱) دیده می‌شود، افزایش فشار پرس عموماً موجب کاهش درصد تخلخل نهایی بعد از تفجوشی تحت شرایط حجم - ثابت می‌شود. علت این امر کاهش فضاهای خالی بین ذرات پودر است. نگهداری پودرهای فشرده در دمایی زیر نقطه ذوب، باعث تبدیل پیوندهای مکانیکی حاصل از فشار پرس به پیوندهای فلزی بین عناصر می‌شود. در نتیجه اولاً استحکام قطعه به حد مطلوب می‌رسد و ثانیاً ترکیب بین فلزی به وجود می‌آید. افزایش فشار پرس تا مقداری معین سبب تولید قطعه نهایی با چگالی بیشتر، سختی بالاتر، تخلخل کمتر و خواص مکانیکی بهتر می‌شود. هر چه ذرات پودر ریزتر باشند، درصد تخلخل کمتر و خواص نهایی آلیاژ مطلوبتر می‌گردد. در پودرهایی که از چند اندازه مختلف تهیه شده‌اند، تفاوت اندازه ذرات سبب پر شدن فضاهای خالی توسط ذرات ریز شده و چگالی افزایش می‌یابد. پودرهای کروی در مقایسه با پودرهای دارای شکل غیرمستطیل، چگالی کمتری داشته و فضای خالی بیشتری به وجود می‌آورند. این پودرها هنگام اعمال فشار، توزیع مناسب‌تری را پدیدار ساخته و خواص قطعه را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

جدول (۲) نشان می‌دهد با افزایش فشار، روند تأثیر کاهش می‌یابد. برای مثال اگر میزان تخلخل در فشارهای ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال را با یکدیگر مقایسه کنیم، ملاحظه خواهیم کرد که نرخ تغییر تخلخل بین فشارهای ۵۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال کمتر از نرخ آن بین فشارهای ۴۰۰ و ۵۰۰ مگاپاسکال است. جدول (۲) همچنین نشان می‌دهد که افزایش دمای تفجوشی موجب افزایش تخلخل شده است. علت این موضوع تسریع واکنشهای درون آلیاژ است که باعث آزاد شدن حرارت و انبساط نمونه می‌گردد. این افزایش حجم در شرایط عادی خود را به صورت افزایش تخلخل نشان می‌دهد. اگرچه استفاده از فیکسچر سبب می‌شود که افزایش حجم نمونه محدود شود، اما تشکیل فازهای جدید، با انقباض فلز و افزایش تخلخل همراه است.

این موضوع با مشاهدات محققین قبلی که حضور Ni خالص در یک طرف، Ti خالص در طرف دیگر و فضاهای مابین حاوی ترکیبات بین فلزی  $TiNi_3$  و  $Ti_2Ni$  بعد از ۶۶ ساعت آنیلینگ در ۹۰۰ درجه سانتیگراد را گزارش کرده‌اند [۱۱]، انطباق دارد. از آنجاکه ترکیب مورد استفاده در این تحقیق، در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد می‌تواند چندین فاز زود ذوب تشکیل دهد، لذا نمونه‌ها می‌توانند به صورت خمیری در آمده و به سادگی تحت تأثیر نیروی ثقل تغییر شکل یابند. این نیرو می‌تواند در شرایط آزاد، نمونه‌ها را در جهت شعاع دچار افزایش و در راستای محور دچار کاهش سازد. این همان چیزی است که در شکل (۱) دیده می‌شود. حضور فیکسچر، روند این تغییرات را به نحو گفته شده تغییر می‌دهد؛ زیرا با اعمال نیروهای محدود کننده، روند تأثیر گذاری نیروی ثقل را کلاً دگرگون می‌سازد.

از آنجاکه ضریب نفوذ نیکل در محدوده ۵۰ درصد اتمی بیش از ضریب نفوذ تیتانیوم است [۱۲ و ۱۳]، لذا حرکت مرز زوج نفوذ به سمت نیکل طبیعی به نظر می‌رسد. در نتیجه جاهای خالی ناشی از فرآیند نفوذ اتمی در محل فصل مشترک تجمع کرده و به صورت تخلخل در ساختار مشاهده می‌گردند. پس قسمتی از تخلخل درون ساختار را می‌توان ناشی از اثر زوج نفوذ دانست. قسمتهای دیگر مربوط به فضاهای خالی بین ذرات پودر، انقباض حجم ناشی از تغییر چگالی و ایجاد فازهای فشرده جدید می‌باشد. جدول (۱) تأثیر استفاده از فیکسچر را در میزان تخلخل درونی آلیاژ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود استفاده از فیکسچر درصد تخلخل را به بیش از نصف تقلیل می‌دهد؛ زیرا تغییرات حجمی آلیاژ را به شدت مورد کنترل قرار داده و بر ایجاد و توزیع فضاهای خالی تأثیر می‌گذارد.

جدول (۲) تأثیر دما، زمان و فشار تولید را بر میزان تخلخل در نمونه‌های تفجوشی شده با فیکسچر نشان می‌دهد. هر یک از ارقام ذکر شده، میانگین ۵ اندازه‌گیری است. همانطور که در

جدول ۱- درصد تخلخل نمونه پس از ۲ ساعت تفجوشی در ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد

فشار پرس (مگا پاسکال)	بدون فیکسچر	با فیکسچر
۴۰۰	۴۷/۱۴۶	۲۲/۷۷۳
۵۰۰	۴۱/۹۷۲	۲۱/۷۶۱

جدول ۲ - تأثیر فشار پرس و زمان تفجوشی با فیکسچر بر درصد تخلخل

(الف) ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد

فشار (مگاپاسکال)	۲ ساعت	۳ ساعت	۴ ساعت	۵ ساعت
۴۰۰	۱۹/۰۹۸	۲۳/۵۲۹	۲۱/۱۴۹	-
۵۰۰	۱۸/۲۴۲	۲۲/۳۹۱	۱۹/۸۳۹	۱۸/۴۱
۶۰۰	۱۷/۹۹۸	۲۱/۵۵۷	۱۹/۳۳۴	۱۶/۶۰۵

(ب) ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد

فشار (مگاپاسکال)	۲ ساعت	۳ ساعت	۴ ساعت	۵ ساعت
۴۰۰	۲۲/۷۷۳	۲۲/۳۴۳	۱۹/۶۵۹	-
۵۰۰	۲۱/۷۶۱	۲۱/۲۳	۱۸/۳۷۵	-
۶۰۰	۲۱/۳۱	۲۰/۷۱۲	۱۷/۵۵۵	-

(ج) ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد

فشار (مگاپاسکال)	۲ ساعت	۳ ساعت	۴ ساعت	۵ ساعت
۴۰۰	-	-	-	-
۵۰۰	۲۳/۴۸۱	-	-	-
۶۰۰	۲۲/۰۰۷	-	-	-

تشکیل فازها است. پس درصد تخلخل نمونه در این زمان به حداکثر خود می‌رسد. اما با افزایش زمان به ۳ و ۴ ساعت، واکنشها تکمیل شده و کاهش تخلخل مشاهده می‌شود جدول (۲). اطلاعات آزمایشی ما برای دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد کامل نیست. اما از طریق مقایسه می‌توان نتیجه گرفت که ۲ ساعت، زمانی کافی برای تکمیل واکنشها بوده و پس از آن درصد تخلخل کاهش خواهد یافت. پیش بینی تخلخل بالاتر در نمونه‌های ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد، به دلیل انتظار سرعت بیشتر برای واکنشها و در نتیجه هیجانان درونی آلیاژ است.

مقادیر سختی که به روش ویکرز و با بار ۵ کیلوگرم تعیین شده در جدول (۳) ارائه شده است. ترکیبات بین فلزی  $Ti_2Ni$  و  $TiNi_3$  بسیار سخت هستند. هرچه دما یا زمان تفجوشی فاز مایع بیشتر باشد، امکان تشکیل این ترکیبات کمتر شده و دانه‌ها نیز درشت‌تر می‌شوند. لذا سختی آلیاژ کمتر می‌گردد.

بعد از تکمیل واکنشهای درونی، درصد تخلخل با افزایش دما کاهش می‌یابد. بنابراین متغیر زمان دارای اهمیت است. چنانچه زمان برای انجام واکنشهای تشکیل فاز کافی نباشد، درصد تخلخل با افزایش زمان افزایش خواهد یافت. اما اگر زمان کافی برای انجام واکنشها وجود داشته باشد، گذشت بیشتر زمان نه تنها باعث افزایش تخلخل نخواهد شد، بلکه موجب کاهش درصد تخلخل درونی آلیاژ نیز می‌گردد. برای مثال ۲ ساعت تفجوشی در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد براساس داده‌های جدول (۲)، زمانی کوتاه است. در حالی که ۳ ساعت تفجوشی، زمان اوج حرارت‌زایی و ایجاد حداکثر تخلخل است. زمانهای ۴ و ۵ ساعت، زمان آرامش واکنشها است. لذا با کاهش حرارت تولید شده، هیجانان درونی افت کرده و از درصد تخلخل کاسته می‌شود.

در ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۲ ساعت زمان اوج واکنشهای

جدول ۳ - تأثیر فشار پرس و دما و زمان تفجوشی بر سختی و بکرز نمونه‌ها

سختی HV5	دما و زمان (°C و ساعت)	فشار (مگاپاسکال)	سختی HV5	دما و زمان (°C و ساعت)	فشار (مگاپاسکال)
۶۷/۱۶	۳ و ۱۰۰۰	۵۰۰	۷۸/۸۲	۲ و ۹۵۰	۴۰۰
۵۲/۶۴	۴ و ۱۰۰۰	۵۰۰	۵۸/۶۶	۳ و ۹۵۰	۴۰۰
۵۲/۲۸	۳ و ۱۰۵۰	۵۰۰	۸۶/۳۸	۴ و ۹۵۰	۴۰۰
۸۷/۲۸	۲ و ۹۵۰	۶۰۰	۵۹/۸۶	۲ و ۱۰۰۰	۴۰۰
۷۴/۲۴	۳ و ۹۵۰	۶۰۰	۵۷/۳۸	۳ و ۱۰۰۰	۴۰۰
۱۱۵/۰۶	۴ و ۹۵۰	۶۰۰	۵۱/۱۴	۴ و ۱۰۰۰	۴۰۰
۱۶۰/۰۸	۵ و ۹۵۰	۶۰۰	۸۱/۰۳	۲ و ۹۵۰	۵۰۰
۷۳/۰۶	۲ و ۱۰۰۰	۶۰۰	۶۷/۹	۳ و ۹۵۰	۵۰۰
۶۹/۶۸	۳ و ۱۰۰۰	۶۰۰	۸۹/۴۲	۴ و ۹۵۰	۵۰۰
۵۹	۴ و ۱۰۰۰	۶۰۰	۱۴۸/۶۸	۵ و ۹۵۰	۵۰۰
۵۶/۵۲	۲ و ۱۰۵۰	۶۰۰	۷۲/۸	۲ و ۱۰۰۰	۵۰۰

سریع و یا گذشت زمان طولانی فراهم می‌گردد. اگرچه تفجوشی فاز جامد می‌تواند قطعه‌ای با حداقل تخلخل پدید آورد و ابعاد نهایی مطلوب را ایجاد کند، اما انرژی لازم برای تشکیل TiNi را پدید نمی‌آورد. در عوض تفجوشی فاز مایع، فلز را به این شرایط نزدیکتر می‌کند. به جز مورد خاص تولید پودر حافظه‌دار، وجود تخلخل در آلیاژ مطلوب نیست. با این وجود، دستیابی به فاز بین فلزی TiNi آن قدر مهم هست که تفجوشی در فاز مایع را بتوان به عنوان روش تولید آلیاژ نایتینول ذکر کرد.

چنانچه در ترکیب پودر هیچ عنصر زود ذوبی وجود نداشته باشد، لازم است حرارت تولید شده در اثر واکنش بین عناصر باعث حصول انرژی لازم برای دستیابی به نفوذ سریع و تولید فاز دلخواه شود. در این حالت قطعه نهایی از ابعاد خود خارج شده و تخلخل درونی ساختار بسیار زیاد می‌شود. علاوه بر حفره‌های تخلخل بین ذرات پودر، کشیدگی‌های انقباضی بعد از انجماد نیز بر درصد تخلخل نهایی نمونه خواهند افزود. برای ایجاد شرایط تفجوشی در فاز مایع، همچنین می‌توان یک ماده دارای نقطه ذوب پایین به مخلوط پودرها افزود تا در دمای تفجوشی ذوب شده و از این طریق اتصال ذرات به یکدیگر میسر شود. این شیوه به منظور حصول استحکام بالا و حداقل تخلخل ساختاری قابل استفاده است. بنابراین در صورتی که مشکل تخلخل را از طریق اصلاح فناوری تولید بتوان رفع کرد، تفجوشی در فاز مایع به عنوان روشی مناسب برای حصول فاز بین فلزی TiNi می‌تواند

فشار پرس نیز می‌تواند باعث کاهش تخلخل و افزایش سختی شود. داده‌های جدول (۳) نشان می‌دهد که با فشار پرس ۴۰۰ مگا پاسکال و دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد، تفجوشی به مدت ۲ ساعت سبب افزایش سختی شده؛ در حالی که ۳ ساعت سبب کاهش سختی و ۴ ساعت باعث افزایش بیشتر سختی گردیده است. می‌توان افزایش اول را به تشکیل ترکیبات سخت، کاهش دوم را به ازدیاد تخلخل و افزایش سوم را به کاهش تخلخل نسبت داد. فشار پرس از ۴۰۰ مگاپاسکال به ۵۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال موجب افزایش نسبی سختی آلیاژ می‌گردد. دمای تفجوشی نیز تأثیر قابل ملاحظه‌ای در جهت کاهش سختی دارد. بدین ترتیب با نسبت دادن تغییرات نشان داده شده در جدول به تغییر در نوع فازها و میزان تخلخل، تفاوت‌های سختی آلیاژ را می‌توان توجیه کرد.

تسریع واکنش‌های تبدیل در اثر افزایش دما پدیده شناخته شده‌ای است که در سنتز احتراقی آلیاژ نایتینول نیز دیده شده است. در این واکنشها چنان افزایش حرارتی درون آلیاژ به وجود می‌آید که واکنش‌های تبدیل فاز حالت انفجار به خود می‌گیرند و آلیاژ مذاب به اطراف پراکنده می‌شود. نمونه‌های تولید شده به این روش بسیار متخلخلند و امکان استفاده برای ساخت مستقیم قطعه از آنها معمولاً وجود ندارد. تغییرات غلظت فازهای بین فلزی به گونه ایست که تشکیل فازهای TiNi<sub>3</sub> و TiNi<sub>2</sub> را آسانتر از TiNi می‌کند. از این لحاظ تولید فاز TiNi تنها در شرایط نفوذ

- [4] Y. Furuya, H. Kimura, T. Masumoto, "Mechanical Damping of Rapidly Quenched Ti-Ni-Cu Alloys", Mater. Sci. Eng. A, Vol. 181/182, 1994, pp.1074-1080.
- [5] L. P. Lefebvre, Y. M. Henuset and G. Pleizier, "Improving Iron Compact Green Strength Using Powder Surface Modification", Powder Met., Vol. 42, No. 1, 1999, pp. 325-330.
- [6] E. Powier, P. Doremus, "Triaxial Characterization of Iron Powder Behavior", Powder Met., Vol. 42, No. 4, 1999, pp. 345-353.
- [7] S. Turennes, G. Gordere, P. E. Mongeon, "Evaluation of Friction Condition in Powder Compaction for Admixed and Die Wall Lubrication", Powder Met., Vol. 42, No. 3, 1999, pp. 263-268.
- [8] A. Molinar, T. Piectorka, J. Kazior, S. Gialanella and G. Straffellini, "Study of Sintering Behavior of Boron - Alloyed Fe-1.5% Mo Powder", Metal Mater. Trans. A, Vol. 31A, No. 6, 2000, pp. 1493-1708.
- [9] H. G. Morgan, "Strengthening Mechanism in Powder Metallurgy Al-Li-Hf Alloys", Mater. Sci. Tech., Vol. 9, 1993, pp. 228-234.
- [10] H. N. Han, K. H. Oh and D. N. Lee, "Analysis of Forging Limit for Sintered Porous Metals", Scripta Mater., Vol. 32, No. 12, 1995, pp. 1937-1944.
- [11] S. M. Green, D. M. Grant and N. R. Kelly, "Powder Metallurgical Processing of Ni-Ti Shape Memory Alloy", Powder Met., Vol. 40, No. 1, 1997, pp. 43-47.
- [12] G. F. Bastin and G. D. Rieck, "Diffusion in the Titanium - Nickel System - Part 1", Metal. Trans. A, Vol. 5, 1974, pp. 1817-1826.
- [13] G. F. Bastin and G. D. Rieck, "Diffusion in the Titanium - Nickel System - Part 2", Metal. Trans. A, Vol. 5, 1974, pp. 1827-1831.

در نظر گرفته شود. نتایج ارائه شده می‌تواند در راستای تحقق این هدف مورد استفاده قرار گیرند.

#### ۴- نتیجه گیری

برای تولید آلیاژ همگن TiNi برای ساخت قطعه‌ای نزدیک به شکل نهایی همراه با حداقل عملیات ماشینکاری، حداقل جذب عناصر آلاینده، حداقل ترکیبات غیر دلخواه همچون Ti<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> و TiNi<sub>3</sub>، کاهش هزینه تولید، کاهش مواد اولیه مصرفی و کنترل دقیق ترکیب شیمیایی، روش تفجوشی فاز مایع امکان‌پذیر است. بهترین دما برای حصول ترکیب بین فلزی TiNi، ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد است. اگر چه بعد از تفجوشی فاز مایع، تغییراتی در ابعاد قطعه به وجود می‌آید، ولی انجام عملیات تحت شرایط حجم - ثابت برای جلوگیری از افزایش ابعاد میسر است. افزایش فشار پرس در هنگام تولید نمونه‌های خام، کاهش اندازه ذرات پودر تیتانیوم، افزایش نرخ حرارت‌دهی طی فرایند تفجوشی و استفاده از روش‌های فشار همه جانبه در حین تفجوشی از راه‌های کاهش درصد تخلخل و افزایش چگالی نمونه‌های تولید شده است. افزایش زمان تفجوشی در فاز مایع، می‌تواند سبب کاهش درصد تخلخل درونی نمونه‌ها شود.

#### مراجع

- [1] J. V. Humbeek, "Non Medical Application of Shape Memory Alloys", Mater. Sci. Eng. A, Vol. 273-275, 1999, pp.134-148.
- [2] T. Duerig, A. Pelton and D. Stockel, "An Overview of Nitinol Medical Applications", Mater. Sci. Eng. A, Vol. 273-275, 1999, pp.149-160.
- [3] F. M. H. Zarandi and K. Sadrnezhaad, "Thermomechanical Study of Combustion Synthesized Ti-Ni Shape Memory Alloy", Materials and Manufacturing Processes, Vol. 12, No. 6, 1997, pp. 1093-1105.