



معرفی و مروری بر سیر تکاملی آلیاژ نایتینول تا کاربرد در صنعت

عرفان محمدزاده

دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

نایتینول (نیکل-تیتانیوم یا Ni-Ti) یکی از پرکاربردترین آلیاژهایی است که به دلیل خواص سوپرالاستیک، در حال حاضر یک ماده مهندسی رایج و شناخته شده است که استفاده از آن را در بسیاری از کاربردها مانند هوافضا، خودروسازی، زیست پزشکی و غیره ممکن می سازد. توسعه فناوریهای ساخت افزودنی امکان ایجاد جدیدترین محصولات 4D time dependent را از نایتینول ایجاد می کند که می تواند اثر حافظه شکل را پس از چاپ سه بعدی ایجاد کنند. نکته قابل توجه نایتینول پردازش شده این می باشد که، به تغییرات ترکیبی و حرارتی بسیار حساس است و بر ساختار فاز نهایی و در نتیجه دمای تبدیل مارتنزیتی تأثیر می گذارد. همچنین آلیاژ NiTi به دلیل زیست سازگاری بهتر و استحکام خستگی از نظر تجاری آلیاژهای حافظه دار (SMAs) ضروری است. این آلیاژ دارای دانه بندی نسبتاً کوچک، شکل پذیری و ناهمسانگردی کم است. تبدیل NiTi SMAs از مارتنزیت به آستنیت خاصیت اساسی آن است که طی آن بازیابی کرنش صورت می گیرد. تولید آلیاژ حافظه دار شکل NiTi توسط فرآیند معمولی باید همگن باشد، در غیر این صورت، تغییر قابل توجهی در دمای تبدیل با تغییر نسبت Ni و Ti رخ خواهد داد. به خاطر این گونه از ویژگی ها و با کنترل بهینه آنها، می توان نقش نایتینول را در آینده، در صناعی همچون در صنعت پزشکی و سایر صنایع، بیشتر از قبل پر رنگ تر کرد.

واژگان کلیدی: نایتینول، سوپرالاستیک، مارتنزیت، آستنیت، استحکام خستگی

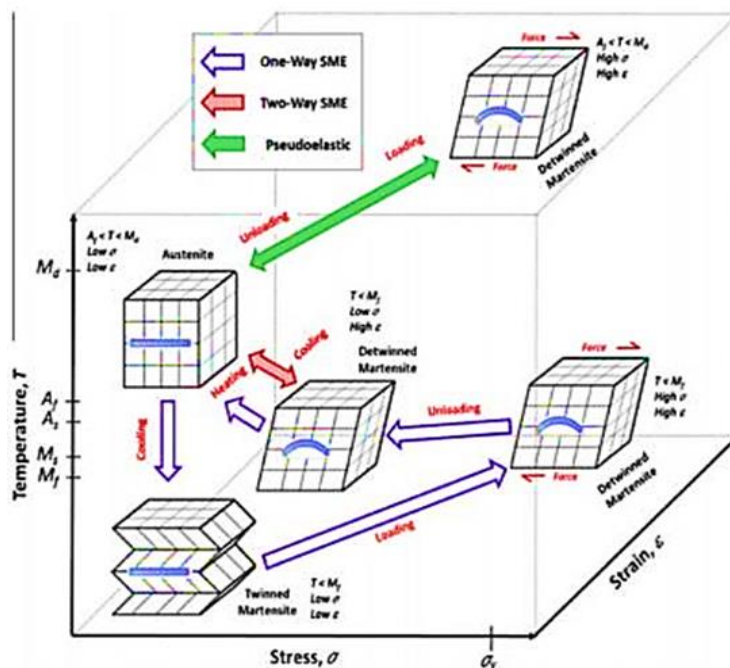


مقدمه

در دنیای مدرن اخیر، بیومواد نقش حیاتی ایفا می کنند، هر ماده یا سطحی که با سیستم های بیولوژیکی در تعامل باشد به عنوان بیومواد شناخته می شود. هر ماده ای که در دسترس است نمی تواند بیومتریال باشد. مواد زیستی باید زیست سازگار و زیست عملکردی باشند. عملکرد زیستی به این معنی است که مواد باید عملکرد های زیستی مانند بازیابی ویژگی و تسهیل بازیابی افراد پس از آسیب یا اختلال و کمک، تقویت یا به روز رسانی بافت آسیب دیده یا یک ویژگی بیولوژیکی را انجام دهند (Sadashiva M et al, 2021). نیکل تیتانیوم (نایتینول) آلیاژی از ترکیب هماتمی تیتانیوم با نیکل است که حدود ۵۵ درصد وزنی آن نیکل و بقیه تیتانیوم است. این آلیاژ در سال ۱۹۶۵ توسط W. Bugar و F. Wang از آزمایشگاه مهمات دریایی به ثبت رسید. ویژگی اصلی این آلیاژ امکان تحقق اثر حافظه شکل (SME) است. پدیده بازگشت به شکل اولیه هنگام گرم شدن پس از تغییر شکل پلاستیک برای اولین بار، این پدیده در آلیاژهای مبتنی بر مس - Cu-Zn و Cu-Sn در سال ۱۹۳۸ کشف شد. قبلاً در اواخر دهه ۱۹۶۰، Nitinol برای اولین بار برای استفاده عملی در صنعت هواپیما مورد استفاده قرار گرفت. یک کلاچ برای اتصال حرارتی مکانیکی خطوط لوله سیستم های هیدرولیک جنگنده F-14 از این آلیاژ به دست آمد (Eduard Farber et al, 2020). NiTi SMAs را می توان به عنوان یک ماده بازیابی رایگان، مواد بازیابی محدود، مواد فوق الاستیک استفاده کرد. همچنین در کاربرد محرک های حرارتی و الکتریکی، زیست سازگار و زیست پزشکی، سیستم های میرایی در مهندسی سازه و کاربردهای دیگر مانند موتورهای حرارتی، قاب های شیشه ای ارتجاعی، آنتن جمع شونده، ایمپلنت های جراحی (انگشت پا هوشمند)، سیم های دندان و خود خم شدن استفاده می شود. همانطور که بررسی شده است، تیتانیوم یک ماده بسیار واکنش پذیر است، بنابراین برای تولید آلیاژ Ni-Ti به محیط کنترل شده استثنایی نیاز است. بنابراین، ساخت آلیاژ Ni-Ti یک کار چالش برانگیز است (Swadhin Kumar Patel et al, 2020). توسعه بیشتر علم و فناوری مستلزم گسترش استفاده از نایتینول، آلیاژهای آن و سایر مواد با SME در زمینه های مختلف علم و فناوری بود. تا به امروز، آلیاژهای دارای اثر حافظه شکل، از جمله نایتینول، با انواع مختلف عناصر در ساخت خودرو، هواپیما سازی، لوازم خانگی و در سایر زمینه های علم و فناوری مانند سنسورهای دما، محرک های حرارتی، ترمومکانیکی استفاده می شوند (Eduard Farber et al, 2020). همچنین برای بدست آوردن سازه های با کارایی بالا با جداسازی لرزه ای و با کنترل ارتعاشات می توان از این آلیاژها در سازه های عمرانی استفاده کرد (Swadhin Kumar Patel et al, 2020).

یافته ها

در ابتدا، در سال ۱۹۳۰ اثر حافظه شکل شناسایی شد. یک فیزیكدان سوئدی به نام Arne Olander تشخیص داد که آلیاژهای طلا-کادمیم قادر به نشان دادن این اثر هستند. Wayman و Otsuka رفتار شبه الاستیک آلیاژ Au-Cd را شناسایی کردند. به طور مشابه، اثر حافظه شکل در موادی مانند آلیاژ مس-آلومینیوم-نیکل در دهه ۱۹۵۰ مشاهده شد. دلیو بوهرلر و وانگ این اثر را در آلیاژ NiTi که نیتینول (Ni-Ti) نامیده می شود، بررسی کردند. این آلیاژ نایتینول برای اولین بار توسط آزمایشگاه مقررات نیروی دریایی ایالات متحده کشف شد. از دهه ۱۹۸۰، کاربرد آلیاژ Ni-Ti در بسیاری از مناطق به دلیل ماهیت سبک و فشرده تر بوده است. در دهه ۱۹۹۰، این فناوری در جامعه مواد حافظه Shape معرفی شد. آلیاژ حافظه شکل با ساختارهای کریستالی متنوع در دو فاز مختلف زمانی که در معرض برخی عوامل خارجی قرار می گیرد وجود دارد. SMAها کاربرد ساده ای برای تغییر شکل با اعمال نیرو و بازیابی شکل اصلی خود دارند، یا حرارت دادن به دمای خاصی یا اعمال میدان مغناطیسی. SMAها می توانند تبدیل های شش فازی داشته باشند (دمای فاز بالا - آستنیت و دمای فاز پایین - مارتنزیت). تبدیل توسط اعوجاج شبکه برشی اتفاق می افتد. هنگامی که آلیاژ Shape Memory گرم می شود، دمای آن افزایش می یابد و پس از یک محدودیت دمایی مشخص، ساختار مارتنزیت شروع به تبدیل شدن به ساختار آستنیتی می کند. تغییر ساختار از آستنیت به مارتنزیت با سرد شدن بدون اعمال عامل خارجی اتفاق می افتد. گفته می شود تغییر فاز مارتنزیت به آستنیت تبدیل به جلو است. (M Balasubramanian et al, 2020).



شکل ۱. ساختارها و فازهای کریستالی (M Balasubramanian et al, 2020).

صنعت هوافضا، به دنبال مواد و راه حل های بهبود یافته برای کاربرد های خود است. شکل گیری باد یک راه حل کاربردی است که می تواند در شرایط مختلف برآورده شود. محققان هم حافظه شکل و هم اثرات شبه الاستیک را در حل مشکلات صنعتی هوافضا آشکار کرده اند. اجرای این فناوری در هواپیما های بال ثابت، روتور و فضاپیماها اهمیت پیدا کرده است. کاربرد آلیاژها در هوافضا و چالش های پیش روی طراح چنین سیستمی را تشریح می کند (M Balasubramanian et al, 2020). کاربرد SMA در محرک خودرو به شرح زیر طبقه بندی می شود. (۱) قدرت کم برای راحتی (۲) کنترل وسیله نقلیه با قدرت بالا (۳) کنترل فرکانس بالا. با این حال، دسته اول به طور کلی مناسب ترین نسبت به دو دسته دیگر است. پژوهش های پیشین نشان داده است که مقاومت در برابر سایش و طبیعت زیست سازگار آلیاژها در مقایسه با مواد معمولی بهتر است (JM Jani et al, 2014). از آنجایی که SMA دارای ویژگی هایی مانند سازگاری زیستی و عملکرد زیستی است و هیچ واکنش آلرژیکی به سطح میزبان یعنی پوست ایجاد نمی کند. این دلیل اصلی استفاده در حوزه پزشکی است. مواد مبتنی بر SMA مانند Ni-Ti به طور گسترده در درمان پزشکی استفاده می شود. دستگاه ها/ابزارهای مبتنی بر مواد Ni-Ti برای درمان بیماری های کمی استفاده می شود. ترکیب عناصر نیکل و تیتانیوم موجود در اطراف درصد اتمی یکنواخت این ترکیب را ناپیتینول تشکیل می دهد. این آلیاژهای ناپیتینول دارای خواص منحصر به فردی هستند که مشابه SMA است. دارای ویژگی های خاصی مانند مقاومت در برابر خوردگی است. مقاومت های خوردگی به شرح زیر توضیح داده شده است. بدن انسان یک ماده کاملاً الکتروشیمیایی است. این بدنه به دلیل احاطه شدن توسط مایعات بدن مانند محلول هوادهی (نقطه ۹ درصد کلرید سدیم)، سرم (خون)، یون های نمک، اسید آمینه، مولکول انول سوپر، هیدروکربن آلکالوئید، آلدول، انیدریدهای اسید، هسته استر نیتریک و پروتئین ها، خوردگی تهاجمی ایجاد می کند. همه اینها ممکن است تاثیر خوردگی نزدیک بدن را تغییر دهند. اگر فولاد روی گیاه در بدن باشد تا بیماری را درمان کند، ممکن است فولاد به دلیل وجود مایعات اسیدی بیش از حد در بدن باعث خوردگی و واکنش آلرژیک شود. اسیدپتیه در گیاهان به دلیل واکنش های التهابی بافت محلی که با اکسیژن و ترکیبات نیتروژن واکنش دهنده پراکسید هیدروژن در بدن انسان هماهنگ می شود، می تواند در نزدیکی فولاد تحولاتی ایجاد کند. یک تغییر کوچک در مقدار Ph موضعی ممکن است باعث ایجاد



هماتوم عفونی تا زمان استفاده یا نزدیک به هماتوم در مقدار کمی شود که ممکن است تغییر کند می تواند روش های بیولوژیکی را دوباره طراحی کند و همچنین شیمی در سراسر ایمپلنت را تغییر دهد. مواد کاشت باید زبری سطح و پرداخت سطح بهتری داشته باشد، اینها مهمترین عوامل برای افزایش جلوگیری از خوردگی و از این رو زیست سازگاری ابزارها یا دستگاه های پزشکی هستند. برای مطالعه پیشگیری از خوردگی SMA در داخل بدن بر روی حیوانات و گیاهان انجام شده است. چند ماه است که استنت در گوسفند و سگ قرار داده شده است. تست های خوردگی با کمک میکروسکوپ مشاهده شده و استنت ها بر روی حفره های مناسب برداشته شده است. در نتیجه مشاهده شده است و بهبود مقاومت در برابر خوردگی توسط پوشش ها انجام می شود و در برخی موارد اندازه حفره ها از ۱۰۰ میکرومتر به قطر ۱۰ میکرومتر تغییر می کند. هیدروکسی آپاتیت به طور طبیعی به شکل آپاتیت فسفر کلسیم، کلسیم معدنی و اکسیژن وجود دارد که ساختار آن شش ضلعی است. هیدروکسی آپاتیت خالص یک رنگ سفید است که رنگ متفاوتی ندارد. هیدروکسی آپاتیت برای ساختن شکل استخوان انسان و ساختن مینای دندان استفاده می شود. با وجود اینکه دانشمندان در حال بررسی پیشرفت های کنونی هیدروکسی آپاتیت در زمینه علم مواد و فناوری نانو برای استفاده در مصارف پزشکی هستند. دارایی استخوان ها و مینای دندان رشد می کنند (Sadashiva M et al, 2021). یک نکته قابل توجه در فرآیند ساخت در این حوزه می توان به این نکته اشاره کرد که در طی پرینت سه بعدی محصولات نایتینول با استفاده از روش SLM، تغییر در محدوده دمایی تبدیلات مارتنزیتی به دو دلیل اصلی می باشد (Eduard Farber et al, 2020).

۱ - اولین دلیل تبخیر نیکل در حین پردازش لیزر است. از آنجایی که نیکل دمای تبخیر کمتری نسبت به تیتانیوم دارد، ترکیب ماتریس به سمت محتوای تیتانیوم بالاتر (نیکل تبخیر می شود) تغییر می کند و محدوده دمایی تبدیل های مارتنزیتی به سمت دماهای بالاتر تغییر می کند.

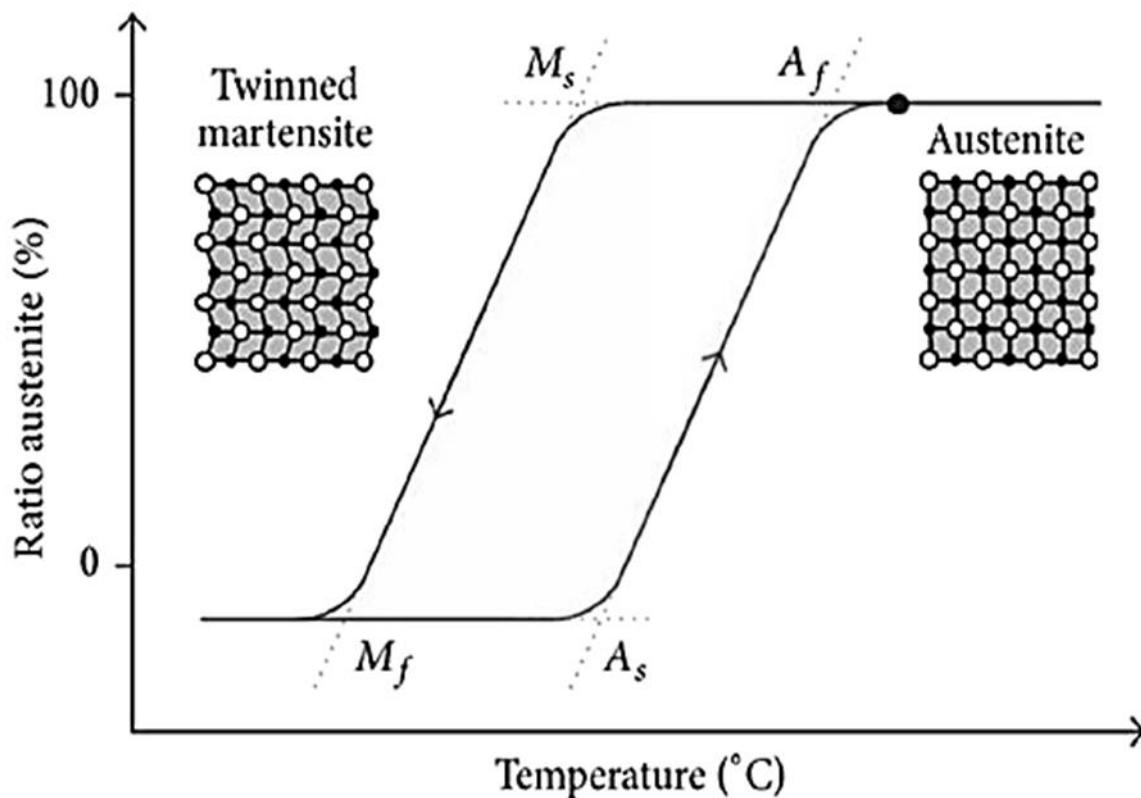
۲ - دلیل دوم در این واقعیت نهفته است که در $NiTi$ با محتوای نیکل بالا، فازهای ثانویه غنی شده با نیکل مانند Ni_3Ti_2 ، Ni_4Ti_3 و Ni_3Ti که در دمای ۲۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد تشکیل می شوند، می توانند در طی عملیات حرارتی بالا تشکیل شوند. در نتیجه تشکیل این فازها، ماتریس به دلیل محتوای نیکل موجود در آن تخلیه می شود. در نتیجه، ترکیب ماتریس به محتوای تیتانیوم بالاتری می رود، در نتیجه، محدوده دمایی تبدیل های مارتنزیتی به سمت افزایش دما تغییر می کند، که به نوبه خود، از این وابستگی ناشی می شود که هرچه محدوده دمایی تبدیل های مارتنزیتی کمتر باشد، حافظه قوی تر می شود. اثر خود را نشان می دهد، منجر به کاهش تظاهرات SME می شود.

فوق الاستیسیته، یکپارچگی ساختاری، زیست سازگاری، اثر حافظه شکل (SME) ویژگی های مختلف آلیاژهای $NiTi$ هستند. اثر حافظه شکل دو نوع است (Swadhin Kumar Patel et al, 2020):

۱ - یک طرفه

۲ - دو طرفه

ساختار کریستالی آلیاژ $NiTi$ در دمای بالا یک فاز آستنیتی پایدار است. هنگامی که از طریق یک محدوده دمایی تبدیل بحرانی خنک می شود، آلیاژ تغییرات قابل توجهی را در خود نشان می دهد. در فاز مارتنزیتی، آلیاژ $NiTi$ در مقایسه با فاز آستنیتی انعطاف پذیرتر است. (شکل ۲).



شکل ۲. پسماند تبدیل فاز مارتنزیتی که در آن، $As(f)$: دمای شروع و A_s (پایان) آستنیت، $Ms(f)$: دمای شروع (پایان) مارتنزیت (Swadhin, Kumar Patel et al, 2020)

نایتینول غنی از تیتانیوم به دلیل زیست سازگاری عالی، مقاومت در برابر خوردگی، سازگاری با MRI و مقاومت در برابر پیچ خوردگی، کاربرد وسیعی در زمینه پزشکی به ویژه در ارتودنسی، سیستم های دارورسانی، استنت های خود گشاد شونده، دستگاه های ایمپلنت، دستگاه های انسداد دهلیزی و چشم پزشکی دارد. علاوه بر این، قسمت بینی و گوشه عینک از SMA فوق الاستیک ساخته شده است که راحتی و مقاومت کاربر را در برابر آسیب های تصادفی فراهم می کند. (JW Mwangi et al, 2019).



شکل ۳. پمپ بالون بین آنورتی پیکانی از یک لوله نایتینول برای تحت فشار قرار دادن بالون استفاده می کند. فولاد ضد زنگ به اندازه کافی انعطاف پذیر نخواهد بود و یک لوله پلیمری باید قطر بسیار بیشتری داشته باشد (T. et al, 1999).
(Duerig).

اصطلاح "زیست سازگاری" را می توان به سادگی توانایی یک ماده برای پذیرفته شدن توسط بدن تعریف کرد. از آنجایی که همه مواد هنگام کاشت در بدن یک "واکنش بدن خارجی" ایجاد می کنند، درجه زیست سازگاری با میزان این واکنش مرتبط است. بنابراین، زیست سازگاری مستقیماً با رفتار خوردگی مواد در یک محلول مشخص و تمایل آلیاژ به انتشار یون های سمی بالقوه مرتبط است. بررسی های متون عموماً نشان می دهند که نایتینول به دلیل تشکیل یک لایه اکسید تیتانیوم غیرفعال (TiO_2) سازگاری زیستی بسیار خوبی دارد (Duerig T et al, 1999). تلاش هایی برای تشکیل لایه های غنی از Ti بر روی NiTi از طریق رسوب Ti از محلول های مختلف یا از طریق لایه نشانی شیمیایی که در ابتدا برای Ti خالص ایجاد شده بودند، انجام شده است. بنابراین، سطوح NiTi مشتق از سل-ژل می توان ارزیابی کرد (S. Shabalovskaya et al, 2008).

بحث و نتیجه گیری

تقاضا برای آلیاژهای SMA روز به روز به شدت افزایش یافته است. به ویژه در کاربردهای زیست پزشکی، اختراعات زیادی به جامعه معرفی شده است. جدا از کاربرد های تولیدی مانند هواافزا و خودرو، زمینه های زیست پزشکی نیز آلیاژهای جدید SMA را معرفی می کنند. طراحی SMA برای کاربرد های آینده در میان جوامع در نظر گرفته شده است. پیشرفت های جدید در زمینه ساخت و درمان SMAها در طراحی هر برنامه ای قوی تر خواهد بود. با معرفی رویکرد های طراحی جدید و برنامه های کاربردی جدید نیز در روند های آتی توسعه یافته و در نهایت، مدل های محاسباتی رفتار SMA برای پیشرفت های بیشتر مورد مطالعه قرار می گیرند. رفتار منحصر به فرد مواد SMA اثر حافظه شکل، زیست سازگاری، عملکرد زیستی و دوستانه با بدن انسان، این ویژگی باعث شده است که در درمان های پزشکی مورد استفاده قرار بگیرند. مواد SMA مانند دهلیزی، سپتال، سیم های ارتودنسی، منگنه ارتوپدی و دستکش نقش حیاتی در بخش پزشکی دارند. در حوزه سازه های عمرانی، دستگاه های مبتنی بر مواد SMA مانند سیستم ایزولاسیون زمین، سیستم اتلاف انرژی، دستگاه های مرکزیت مجدد و ایزوله لرزه ای با کاهش ارتعاش از تغییر شکل زیاد سازه های باریک جلوگیری می کند و در اتلاف انرژی موثر هستند. نایتینول در فناوری فضایی نیز استفاده می شود. می توان انتظار داشت که نایتینول در آینده نزدیک کاربرد خود را در تمامی این زمینه ها گسترش دهد. در آخر پیشنهاد می شود که با طراحی شرایط مناسب آزمایشگاهی و آماده سازی سطح، بازده کاربرد نایتینول به ویژگی در حوزه پزشکی را افزایش داد.



منابع

Duerig, T., Pelton, A., & Stöckel, D. J. M. S. (1999). An overview of nitinol medical applications. *Materials Science and Engineering: A*, 273, 149-160.

Shabalovskaya, S., Anderegg, J., & Van Humbeeck, J. (2008). Critical overview of Nitinol surfaces and their modifications for medical applications. *Acta biomaterialia*, 4(3), 447-467.

Patel, S. K., Behera, B., Swain, B., Roshan, R., Sahoo, D., & Behera, A. (2020). A review on NiTi alloys for biomedical applications and their biocompatibility. *Materials today: proceedings*, 33, 5548-5551.

Farber, E., Zhu, J. N., Popovich, A., & Popovich, V. (2020). A review of NiTi shape memory alloy as a smart material produced by additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 30, 761-767.

Sadashiva, M., Sheikh, M. Y., Khan, N., Kurbet, R., & Gowda, T. D. (2021). A review on application of shape memory alloys. *transformation [TMT]*, 21, 24.

Balasubramanian, M., Srimath, R., Vignesh, L., & Rajesh, S. (2021, October). Application of shape memory alloys in engineering—A review. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2054, No. 1, p. 012078). IOP Publishing.

Mwangi, J. W., Nguyen, L. T., Bui, V. D., Berger, T., Zeidler, H., & Schubert, A. (2019). Nitinol manufacturing and micromachining: A review of processes and their suitability in processing medical-grade nitinol. *Journal of manufacturing processes*, 38, 355-369.

Jani, J. M., Leary, M., Subic, A., & Gibson, M. A. (2014). A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design* (1980-2015), 56, 1078-1113.

Introduction and overview of the evolution of nitinol alloy until its application in industry

Erfan Mohammadzadeh

Master student, Department of Engineering and Materials Science, Sharif University of Technology

Abstract

Nitinol (Nickel-Titanium or Ni-Ti) is one of the most widely used alloys that, due to its superelastic properties, is currently a common and well-known engineering material that is used in many applications such as aerospace, automotive, biomedicine, etc. Makes possible. The development of additive manufacturing technologies makes it possible to create the latest timedependent 4D products from nitinol, which can create a shape memory effect after 3D printing. The noteworthy point of processed nitinol is that it is very sensitive to compositional and thermal changes and affects the structure of the final phase and consequently the martensitic transformation temperature. Also, NiTi alloy is commercially essential memory alloys (SMAs) due to its better biocompatibility and fatigue strength. This alloy has a relatively small grain size, ductility and low anisotropy. The transformation of NiTi SMAs from martensite to austenite is its essential property, during which strain recovery takes place. The production of NiTi shape memory alloy by the conventional process must be homogeneous, otherwise, there will be a significant change in the transformation temperature as the ratio of Ni and Ti changes. Because of these characteristics and with their optimal control, the role of nitinol can be made more colorful in the future, in industries such as the medical industry and other industries.

Keywords:

Nitinol,
superelastic,
martensite,
austenite,
fatigue
strength