بررسی رفتار و خواص مکانیکی آلیاژهای حافظه‌دار در مواد هوشمند و کابرد آن‌ها در صنایع مختلف

مهدی رضوانی توکل

کارشناس ارشد- گروه مکانیک- دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه آزاد اسلامی– ایران – همدان
rezvanitavakol@yahoo.com

چکیده

با رشد و بهبود تکنولوژی اطلاعات در طی بیست سال گذشته، واژه "هوشمند" به شکل فزآینده‌ای در مورد مواد، اشیاء و محیط به کار گرفته شده است. هوشمندی خاصیتی می-باشد که در تمام گروه‌های مواد یافت شده است. در هردسته از مواد مثل کامپوزیت‌ها، پلیمرها، سرامیک‌ها و فلزات پیشرفته می‌توان موادی یافت که با اعمال یک سری فرآیندها، خواص هوشمند پیدا کنند. همچنین مواد هوشمند به آن دسته از مواد گویند که می‌توانند محیط و شرایط اطراف خود را درک نمایند و نسبت به آن واکنش نشان دهند. هم اکنون کامپوزیت‌ها و فلزات هوشمند در موارد بسیاری کاربرد دارند و جایگاه خود را در صنعت پیدا کرده‌اند. در این مقاله به بررسی آلیاژهای حافظه‌دار و همچنین کارایی این نوع مواد هوشمند در صنعت پرداخته شده است. آلیاژهای حافظه‌دار[1] که در واکنش به تغییرات دما دچار تغییر شکل ناشی از تبدیل فاز می‌شوند و یکسری مواد دیگر که از خود قابلیت حسگری[2] و تحریک‌پذیری[3] نشان می‌دهند را می‌توان به عنوان مواد هوشمند نام برد.

واژگان کلیدی

مواد هوشمند، آلیاژهای حافظه‌دار، بررسی آلیاژهای حافظه‌دار، کاربردهای آلیاژ حافظه‌دار

Behavior and mechanical properties of shape memory alloys in smart materials and its application in various industries

Mahdi Rezvani Tavakol

Master of Science- Department of Mechanics- Faculty of Engineering-Hamedan Branch- Islamic Azad University- Iran- Hamedan
rezvanitavakol@yahoo.com

Abstract

With the growth and improvement in information technology over the past twenty years, the word "smart" increasingly on the materials, objects and the environment have been used. Hashmi the property that materials have been found in all groups. In Hadith of materials such as composites, polymers, ceramics and metals can be advanced that the materials found by a series of processes, intelligent properties found. Smart materials are those materials also say that they can understand their surrounding environment and react to it. Now smart composites and metals are used on many occasions and have found their place in the industry. In this paper, the shape memory alloy as well as the efficiency of this type of smart materials in the industry have been discussed. Shape memory alloys that change shape in response to temperature changes caused by the conversion phase and some other materials that show and irritability sensing capability can be a range of smart materials.

Keywords

Smart Materials, Shape memory alloys, Study of shape memory alloys, Applications of shape memory allow

1. Shape Memory Alloy
2. Sensing
3. Actuating

۱- مقدمه

مواد در تاریخ زندگی بشر همواره از اهمیت بسزایی برخوردار بوده‌اند، بطوری که برهه‌های مخصوصی از تاریخ را با توجه به مواد مصرفی و یا با اهمیت آن دوران نامگذاری کرده‌اند. به عنوان مثال عصر سنگ، عصر آهن، عصر برنز و... . به نظر می‌رسد پس تأثیرات شگرفی که فن‌آوری اطلاعات بر زندگی انسان‌ها گذاشته، بار دیگر نوبت به مواد رسیده است تا جایگاه اصلی خود را در این عرصه بازیابند. این نوع مواد می‌توانند برای بهبود عملکرد، بدون افزودن اجزای مکانیکی و الکترونیک جدید بکار روند. تلاش‌های فناوری نانو در جهت دستکاری اتم‌ها، مولکول‌ها و اندازه ذرات با روش‌هایی دقیق و کنترل شده و با هدف ساخت مواد با ساختاری جدید و در نتیجه خصوصیات جدید می‌باشد. از جهت دیگر سازه‌های هوشمند، موادی هستند که شرایط و محرک‌های مکانیکی، گرمایی، شیمیایی، الکتریکی، مغناطیسی را درک می‌کنند و به آن‌ها عکس‌العمل نشان می‌دهند. اولین مشاهدات ثبت شده در مورد پدیده حافظه‌داری به سال ۱۹۳۲ میلادی و در مورد آلیاژ Au-Cu بر می‌گردد. در سال ۱۹۳۸ آلیاژ Cu-Zn پیدایش و پس از آن در این آلیاژ از بین رفتن یک فاز معین در اثر کاهش و افزایش دما، گزارش شد.[۱-۲] در نهایت پایه و اساس رفتار حافظه‌داری و ترموالاستیک (کشسانی حرارتی) بین سال‌های ۱۹۴۹ تا ۱۹۵۱ تشریح و تفسیر گردید. از آن زمان به بعد این آلیاژها به مرور، کاربرد فراوانی یافتند تا این که امروزه ردپای این آلیاژها را در صنایع هوافضا، پزشکی، خودروسازی و رباتیک به وضوح می‌توان مشاهده نمود.

۲- مواد هوشمند[1]

مواد هوشمند موادی هستند که برای پاسخگویی به محرک‌های محیطی از خود قابلیت‌های حسگری و تحریک‌پذیری نشان می‌دهند. برای این مواد طبقه‌بندی‌های مختلفی وجود دارد. یک طبقه‌بندی مناسب برای این مواد، براساس حوزه ایست[2] که در آن به ماده، محرک وارد شده و سپس ماده پاسخ خود را در حوزه مکانیکی به معرض نمایش گذارده است و نیز اگر نیروی مکانیکی را به عنوان محرک بگیریم پاسخ‌ها در چه حوزه‌هایی و به چه شکلی ظاهر خواهند شد؛ در واقع مورد دوم با در نظر گرفتن خصلت حسگری و یا تحریک کنندگی برای ماده تعریف می‌شود. [۱]

۳- انواع مولکول‌ها و نانو مواد هوشمند

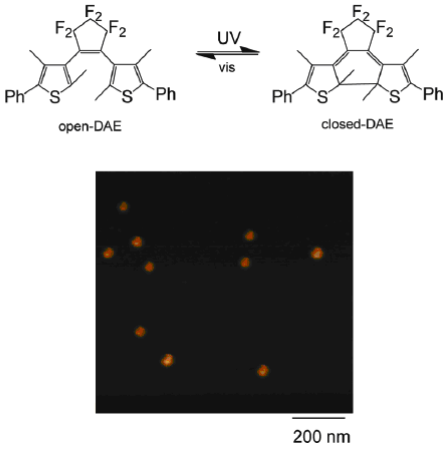
با توجه به تعاریف ارائه شده برای مواد هوشمند و خصوصیات منحصر به فرد این مواد، می‌توان آن‌ها را به دو دسته تقسیم کرد:

گروه اول را به اصطلاح "مواد هوشمند نوع اول" یا مواد کرومیک[3] می‌نامند. این دسته از مواد در پاسخ به محرک‌های محیط خارجی مانند خصوصیات شیمیایی، الکتریکی، مغناطیسی، مکانیکی و حرارتی دچار تغییر رنگ می‌شوند. این تغییر رنگ ناشی از تغییر خصوصیات نوری این مواد مانند ضریب جذب، قابلیت بازتاب و یا شکست نور است که در نتیجه در ساختار این مواد ایجاد می‌شوند. به عنوان مثال می‌توان عینک‌های فتوکرومیک را اشاره کرد که تحت تأثیر اشعه ماوراء بنفش تغییر رنگ می‌دهند. گروه دوم مواد هوشمند، قابلیت تبدیل انرژی را از حالتی به حالت دیگر را دارا می‌باشند. برای مثال ترکیبات فتولتائیک[4] زیر مجموعه مواد هوشمند نوع دوم می‌باشند که انرژی نوری را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. این ترکیبات امروزه به نحوی گسترده در فناوری‌های نوین همچون پیل‌های خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. [۴]

۴- مواد هوشمند نوع اول (ترکیبات کرومیک)

۴-۱- مواد فتوکرومیک[5]

بر اثر جذب انرژی تابشی، در ساختار شیمیایی مواد فتوکرومیک تغییر ایجاد شده و از ساختاری با یک میزان مشخص از جذب نور به ساختاری متفاوت یا جذب متفاوت تبدیل می‌شوند. این بدان معناست که ساختار جدید، می‌تواند جذب نور را با شدت و یا در طول موجی متفاوت، انجام دهد. به طور معمول از چنین موادی به صورت گسترده در ساخت عینک‌های طبی محافظ چشم استفاده می‌شود. در شکل (۱) نانو بلورهای دی آریل اتن[6] و خواص فتوکرومیک آن‌ها نشان داده شده است. تغییرات ساختار این کریستال‌ها را در حضور نور UV مشاهده می‌شود. [۱]

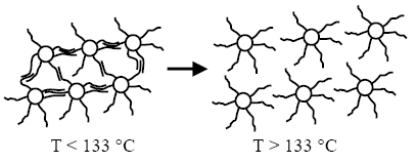


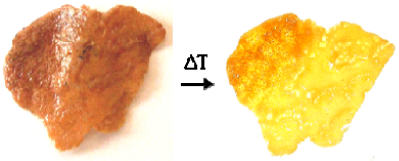
شکل ۱- تغییر ساختار یک نانو کریستال‌های دی آریل تن در برابر اشعه ماوراء بنفش

۴-۲- مواد ترموکرومیک[7]

این مواد در نتیجه جذب گرما یا تغییرات شیمیایی با تغییر فاز مواجه می‌شوند. تغییرات ایجاد شده برگشت‌پذیر است و با از بین رفتن عامل ایجاد کننده تغییرات دمایی این مواد به حالت اولیه باز می‌گردند. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، بر اثر گرم شدن یا سرد شدن، تغییر ساختاری در این نانو ذرات ایجاد شده که همین امر باعث تغییر رنگ در این ترکیبات می‌شود.

1. Smart Materials
2. Field
3. Chromic
4. Photovoltaic
5. Photochromic
6. Diarylethene
7. Thermo chromic

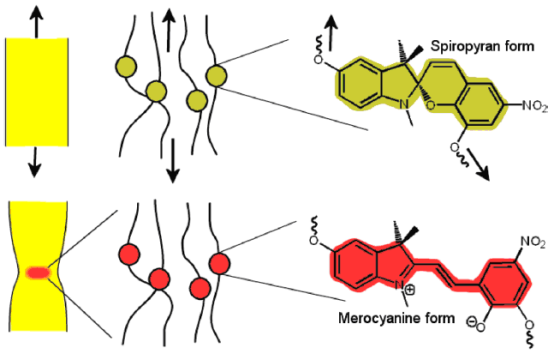




شکل ۲- تغییرات ساختار نانوذرات نقره پوشیده شده با دودسیل تیول در برابر حرارت و تغییر رنگ در این نانو ذرات در اثر حرارت

۴-۳- مواد مکانوکرومیک[1] و کموکرومیک[2]

در برخی از محصولاتی که از این مواد ساخته شده‌اند با تغییر فشار، نوشته‌های مخفی شده در سطح به نمایش درخواهند آمد. کاغذهای تورنسل که در محیط‌های اسیدی و بازی رنگ‌های متفاوتی دارند نمونه‌ای از محصولاتی هستند که بر اساس ویژه‌گی مواد کموکرومیک ساخته شده‌اند. در شکل (۳) مثالی از ماده مکاموکرومیک آورده شده است که در اثر کشش دچار تغییر رنگ می‌شود. از نانو موادی که دارای خاصیت مکانوکرومیک هستند در ساخت نانو غشاها و نانو ربات‌ها استفاده می‌شود.

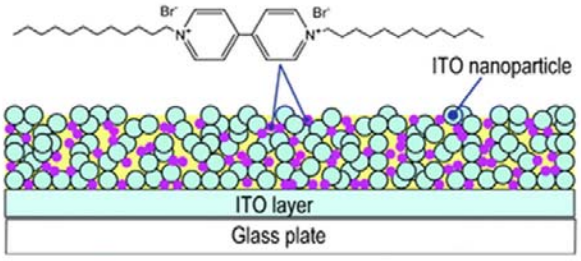


شکل ۳- تغییر ساختار یک ماده مکانوکرومیک در برابر کشش

۴-۴- مواد الکتروکرومیک[3]

این گروه از مواد هوشمند، موادی هستند که در نتیجه قرار گرفتن در یک جریان یا اختلاف پتانسیل الکتریکی رنگ آن‌ها به صورت بازگشت‌پذیر تغییر می‌کنند. برای مثال در شکل (۴) نانوذرات اکسید قلع ایندیم (Indium Tin Oxide- ITO) و دی دودسیل و بای پیریدینویم دی برمید قرار گرفته برروی شیشه پوشیده شده با ITO نشان داده شده وخواص الکتروکرومیک بررسی شده است. [۲]

1. Mechanochromic
2. Chemo chromic
3. Electro chromic



شکل ۴- تغییر رنگ مواد الکتروکرومیک با عبور جریان الکتریسیته

۵- مواد هوشمند نوع دوم

۵-۱- مواد فتوولتائیک[4]

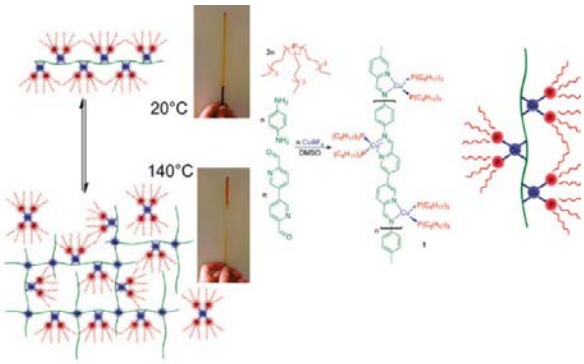
این مواد در پاسخ به محرک نورمرئی جریان الکتریکی ایجاد می‌کنند. نانوذرات دی اکسیدتیتانیم در حضور نور فرابنفش این خاصیت را نشان می‌دهند.

۵-۲- مواد ترموالکتریک[5]

این مواد در مقابل تغییرات دما توانایی تولید برق دارند. این خاصیت در نوع خاصی از نانو لوله کربنی بررسی شده است و مشاهده شده که در ترکیب شبکه کربن نانو لوله با پلی‌آنیلین نه تنها باعث بهبود خاصیت ترموالکتریک پلی‌آنیلین می‌شود بلکه ساختار انعطاف‌پذیری نانو لوله حفظ می‌گردد.

۵-۳- مواد نورتاب (لومینسانس کننده)

لومینسانس به تابش نوری گفته می‌شود که عامل ایجاد آن همانند لامپ‌های رشته‌ای، التهاب ماده نیست. در واقع این مواد، انرژی دریافت شده را به صورت نشر نور آزاد می‌کنند. از خاصیت لومینسانس برخی از نانو ذرات مانند CdTe و نانوذرات ترکیب شده از ZnS:Mn برای تعیین دما با استفاده از خاصیت لومینسانس استفاده می‌شود. در این روش ترمومتری، از موادی استفاده می‌شود که با تغییر دما، تغییر لومینسانس می‌دهند. [۲]



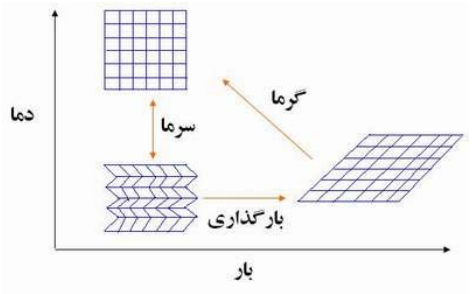
شکل ۵- تغییر ساختار پلیمر در اثر حرارت

۶- آلیاژحافظه‌دار

آلیاژ حافظه‌دار گروهی از آلیاژهای فلزی هستند و این توانایی را دارند که اگر آن‌ها را تا بالای دمای ویژه‌ای گرم کنیم، قادر به بازیابی شکل اولیه

4. Photovoltaic
5. Thermoelectric

خود خواهند بود و می‌توان از آن‌ها برای انجام آزمایشات سرگرم کننده استفاده کرد. به عنوان مثال اگر یک فنر فلزی معمولی را از دو طرف بکشید تا صاف شود، راهی برای بازگشت فنر به شکل اولیه خود وجود ندارد. در حالی که یک فنر ساخته شده از فلز حافظه‌دار می‌تواند به راحتی به فرم مارپیچ خود با حرارت دادن تا دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به آن می‌تواند به طور قابل توجهی کشیده شود بدون اینکه از شکل خارج شود. وقتی فنر فلز حافظه‌دار ساخته می‌شود، قابلیت کشش و انبساط دارد و شبکه کریستالی قابل تغییر است بدون این که خراب شود. وقتی فنر تا دمای خاصی حرارت داده می‌شود، اتم‌های شبکه‌ی کریستالی مجدداً نظم و ترتیب اولیه‌ی خود را به دست می‌آورند و فنر مارپیچ می‌شود. به عبارت دیگر فنر شکل اولیه خود را به یاد می‌آورد. همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود نمونه‌ای از این آلیاژ بعد از سرد کردن و گرم کردن به حالت اولیه خود باز می‌گردد. [۲]



شکل ۶ – نمونه‌ای از آلیاژ حافظه‌دار [۲]

۷- معرفی برخی آلیاژهای حافظه‌دار

۱- آلیاژ تیتانیوم / نیکل: نایتینول[1] و تینل[2]
۲- آلیاژهای آلومینیوم / روی / مس
۳- آلیاژ نیکل / مس
۴- آلیاژ کادمیوم / نقره
۵- آلیاژ کادمیوم / طلا
۶- آلیاژ قلع / مس
۷- آلیاژ روی / مس
۸- آلیاژ تیتانیم / ایندیم
۹- آلیاژ آلومنیوم / نیکل
۱۰- آلیاژ آهن / پلاتین
۱۱- آلیاژ مس / منگنز
۱۲- آلیاژ آهن / منگنز / سیلسیم

۸- بررسی رفتار آلیاژهای حافظه‌دار

رفتار آلیاژهای حافظه‌دار بر اساس یک دگرگونی فازی و تغییر ساختار بلوری رخ می‌دهد که در آن آلیاژ از یک ساختار مستحکم و پایدار در دمای بالاتر (آستنیت)، به یک ساختار تغییر فرم‌پذیر پایدار در دمای پایین‌تر (مارتنزیت)، تبدیل می‌گردد. به طور خاصه، خاصیت حافظه‌داری به صورت استاندارد به پدیده‌ای گفته می‌شود که در آن آلیاژ را در دمای پایین، تغییر شکل داده و این آلیاژ تغییر شکل یافته را به منظور تغییر فاز و رساندن آن به فاز مادر (فاز آستنیت) و متعاقباً به شکل اولیه، حرارت داده و آن را به همان شکل قبل از تغییر شکل، باز می‌گردانند. بر این اساس خاصیت حافظه‌داری به دو دسته‌ی عمده تقسیم می‌شوند:

۸-۱- آلیاژ حافظه‌دار یک طرفه

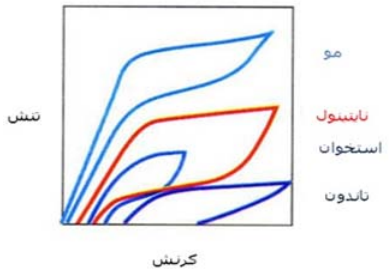
در این نوع آلیاژ، تغییر شکل ایجاد شده فقط با گرم کردن به حالت اولیه‌ی قبل از تغییر شکل باز می‌گردد و اگر جسم را دوباره سرد کنیم، تغییر جدیدی در شکل آن مشاهده نمی‌شود. در آلیاژهایی که دارای این ویژه‌گی می‌باشند، هدف بازیابی شکل اولیه‌ی نمونه می‌باشد که تحت بارگذاری مکانیکی قرار گرفته و تغییر شکل داده است.

۸-۲- آلیاژ حافظه‌دار دو طرفه

این نوع آلیاژها قادر هستند با سرد و گرم شدن در محدوده‌ی معینی از دما، دوباره به حالت قبلی خود باز گردند؛ یعنی در دو طرف محدوده‌ی تغییر دما، شکل مشخصی از خود به نمایش می‌گذارند. آلیاژهایی که در این گروه هستند، کاربردی متفاوت دارند؛ بدین گونه در این نوع کاربرد، نیازی به اعمال نیرو نمی‌باشد و فقط با فراهم کردن شرایط دمایی معین و از پیش تعیین شده‌ای برای این دسته از این آلیاژها رسید. با ساختار میکروساختار آلیاژهای حافظه‌دار دو طرفه، می‌توان به خواص پایدارتری رسید. [۳]

۹- نایتینول

یکی از آلیاژهایی که امروزه در میان گروه‌های مختلف آلیاژهای حافظه‌دار، نظیر آلیاژهای حافظه‌دار پایه‌ی مس و پایه‌ی آهن، در صنایع مختلف کاربردهای فراوانی یافته، نایتینول می‌باشد. در دهه ۱۹۶۰ بهلر و همکارانش در آزمایش‌های خود، ویژه‌گی حافظه‌داری را در آلیاژ نیکل-تیتانیوم با نسبت اتمی معادل کشف نمودند. دلیل انتخاب این اسم برای آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیوم آن بود که این آلیاژ، برای اولین بار در آزمایشگاهی به نام (**N**aval **O**rdnance **L**aboratory) شناسایی شد. نایتینول به دلیل ویژه‌گی‌های مطلوبی که از خود به معرض نمایش گذاشت، به زودی کاربردهای خاص خود را در علم پزشکی پیدا کرد. همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، نایتینول رفتار مکانیکی بسیار مشابهی با اعضای بدن از خود نشان می‌دهد.

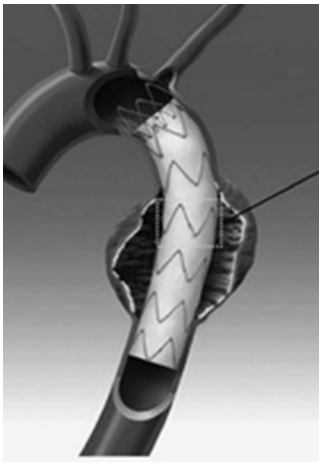


شکل ۷- تشابه رفتار مکانیکی نایتینول با اعضای بدن

آستنیت‌هایی که به وسیله‌ی فولادهای زنگ نزن و یا آلیاژهای پایه‌ی کبالت، به طور رایج مورد استفاده قرار می‌گیرند، تنها قادرند در حدود ۱٪ از کرنشی که توسط نیرو به آن‌ها اعمال شده است را بازیابی کنند؛ در صورتی که این مقدار در مقایسه با کرنشی که مواد طبیعی (استخوان،

1. Nitinol
2. Tinel

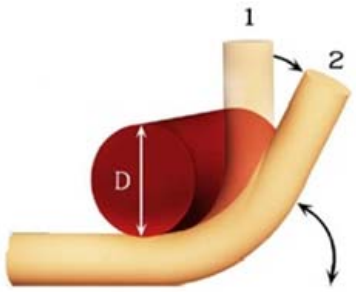
تاندون و ...) قادر به بازیابی آن هستند (در حدود ٪۱۰)، ناچیز است. با مقایسه این اعداد و شکل شماره (۸) می‌توان دلیل افزایش کاربرد نایتینول را در علم پزشکی دریافت. [۵]



شکل ۸- کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار در پزشکی به عنوان استنت

۱۰- آلیاژهای حافظه‌دار پایه مس

گروهی دیگر از آلیاژهای حافظه‌دار، آلیاژهای حافظه‌دار پایه مس می-باشند که از جمله آلیاژهای حافظه‌دار تجاری متداول به شمار می‌روند. این نوع آلیاژها با توجه به خواص منحصر به فرد خود در بسیاری از صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. از جمله مزایای آلیاژهای حافظه‌دار پایه مس می‌توان به دمای کاری بالا، قیمت پایین‌تر و راحت‌تر بودن فرآیند تولید در مقایسه با آلیاژهای حافظه‌دار نایتینول اشاره کرد. مهمترین کاربرد آن‌ها در حسگرها و محرک‌ها می‌باشد. در شکل (۹) نمونه‌ای از این آلیاژ مشاهده می‌شود[۶]



شکل ۹- نمونه‌ای از آلیاژ حافظه‌دار پایه مس

از میان آلیاژهای حافظه‌دار تجاری پایه مس؛ آلیاژ Cu-Al-Ni یکی از پرکاربردترین آن‌ها است. از این رو، شناخت و توسعه‌ی روش‌های تولید این آلیاژ که از لحاظ اقتصادی به صرفه بوده و خواص مطلوبی ایجاد می‌نمایند، ضروری به نظر می‌رسد.

۱۱- کاربردهای مختلف آلیاژهای حافظه‌دار

۱۱-۱- کاربردهایی با بازیابی آزاد (استفاده از حرکت)

کاربردهایی که در آن‌ها، آلیاژهای حافظه‌دار در حین سرد و گرم شدن آزادانه شکل اولیه‌ی خود را بازیابی می‌کنند، بدون آنکه یک تنش بیرونی از این کار ممنعات به عمل آورد و بنابراین تولید یک کرنش را بازیابی می-کنند. برای مثال در آنتن‌های سفینه‌های فضایی که پس از قرار گرفتن سفینه در فضا، بدون اعمال تنش بیرونی و فقط با استفاده از گرم کردن باز می‌شوند.

۱۱-۲- خاصیت میراکنندگی ارتعاشی

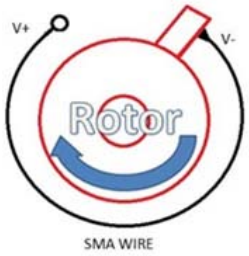
از این خاصیت برای مهار ارتعاشات در سازه‌هایی که تحت ارتعاشات شدید قرار دارند استفاده می‌گردد. به عنوان مثال می‌توان به صفحات آزاد میرا کننده‌ی ارتعاش در سفینه‌های فضایی اشاره کرد. همچنین از این آلیاژ در پی ساختمان، برای میرا کردن ارتعاشات ناشی از زلزله استفاده می‌شود.

۱۱-۳- کاربردهای ابرکشسانی (ذخیره انرژی مکانیکی)

این کاربرد بر اساس وجود درصد بسیار بالای کشسانی یا بازگشت فنر در اکثر آلیاژهای Ti-Ni یافت می‌شود. بنیان، نهاد شده است و باعث ذخیره شدن انرژی مکانیکی می‌شود و در کابردهایی نظیر فنرها مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر چه محدوده دمایی بروز این خاصیت کوچک است، ولی در همین محدوده آلیاژ می‌تواند رفتار الاستیکی معادل ۱۵ برابر فولادهای فنری را از خود نشان دهد.

۱۱-۴- کاربردهای بازیابی تحت فشار (استفاده از کار)

به کاربردهایی اطلاق می‌شود که در آن‌ها، هم تنش و هم کرنش در حین گرم کردن بازیابی شده و کار مکانیکی ایجاد شده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این خاصیت در محرک‌ها نیز می‌باشد. این محرک‌ها به دو نوع محرک‌های گرمایی و الکرتیکی تقسیم می‌شوند.



شکل ۱۰- کاربرد سیم از جنس آلیاژ حافظه‌دار

در شکل (۱۰) نمونه‌ای از کاربرد یک سیم از جنس آلیاژ حافظه‌دار را می‌توان مشاهده نمود که با تغییر دمای ناشی از مقاومت سیم در برابر جریان و بسته به شرایطی که برای سیم حافظه‌دار تعریف شده است، سیم در محدوده‌ی معینی انبساط و انقباظ می‌یابد.

۱۲- نتیجه‌گیری

دنیای امروز به سرعت در حال تغییر و دگرگونی است و محققین به دنبال خصلت‌های جدید در مواد هستند. مزیت‌های فراوانی که مواد هوشمند به همراه خود دارند، عرصه را روز به روز به مواد سنتی و قدیمی

تنگ‌تر خواهند کرد. مواد هوشمند، موادی هستند که شرایط و محرک-هایی مانند تحریکات مکانیکی، گرمایی، شیمیایی، الکتریکی و مغناطیسی را درک کرده و به آن‌ها عکس‌العمل نشان می‌دهند. این مواد دارای کاربردها زیادی در صنایع مختلف هستند که از جمله این مواد می‌توان به آلیاژهای حافظه‌دار نام برد. آلیاژهای حافظه‌دار گروه جدیدی از مواد می-باشند که اگر با ترکیب شیمیایی مشخص تحت عملیات حرارتی مناسب قرار گیرند، توانایی بازگشت به شکل یا اندازه از قبل تعیین شده را از خود نشان می‌دهند. این مواد قالبیت تبدیل انرژی گرمایی (الکتریکی) را به انرژی مکانیکی دارند و اگر گرم و سرد کردن این آلیاژ با جریان الکتریکی کنترل شود، می‌توان حرکت‌های سیکلی با قابلیت تکرار (حرکت رفت و برگشتی در یک مدار بسته) در دفعات متوالی ایجاد کرد. آلیاژهای حافظه-دار دارای دو ویژه‌گی مهم می‌باشند: ۱- تا حدودی الاستیک هستند. ۲- حافظه‌دار می‌باشند، یعنی قابلیت ذخیره‌سازی انرژی مکانیک و نیز آزادسازی آن را دارا هستند. درست مانند آب که در دماهای مختلف از حالتی به حالت دیگر تبدیل می‌شود، این دسته از فلزات نیز به علت اینکه مولکول‌ها در آن‌ها قابلیت چیدمان مجدد را دارا می‌باشند، دوباره قابلیت بازگشت به شکل اولیه خود را دارند. از این آلیاژها در مصارف مختلفی از جمله هوافضا، پزشکی، ساختمان سازی، خودروسازی، نساجی، رباتیک و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱۳- مراجع

[۱] شفیعیان، محمد " مواد هوشمند و کاربرد آن‌ها در صنعت خودرو"مجله مهندسی مکانیک و ارتعاشات، دوره ۲، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۰

[۲] آئینی، حامد-رفعت،محسن-حسنی، محمدرضا "بررسی ساختار مواد هوشمند و تأثیر به کارگیری آن‌ها در توسعه صنعت خودرو و پزشکی" نخستین کنگره ملی توسعه خوشه صنعتی خودرو، NCVCC2012 اردیبهشت ۱۳۹۱

[3] Lulu Ma, L., Wang, Q., Lu, G., Chen, R., Sun, X." Photochromic Nanostructures Based on Diarylethenes with Perylene Diimide"Langmuir Vol.26, pp.6712, (2111).

[4] Carotenuto, G., Nicolais, F. Reversible "Thermochromic Nanocomposites Based on Thiolate-Capped Silver Nanoparticles Embedded in Amorphous Polystyrene" Materials Vol. 2, pp.1323, (2119). [3] Lee, C. K., Davis,

[5] D.A., White, S.R., Moore, J. S., Sottos, N. R., Braun, P.V. "Force-Induced Redistribution of a Chemical Equilibrium", Journal of American Chem. Society. Vol. 132, PP. 16117–16111, (2111).

[6] Nakajima, R., Yamada, Y., Komatsu, T., Murashiro, K., Saji, T., Hoshino, K. "Electrochromic properties of ITO nanoparticles/viologen composite film electrodes" RSC Advance., Vol. 2, pp.4377, (2112).

[7] Zhou, H., Gan, X., Wang, J., Zhu, X., Li, G." Hemoglobin-Based Hydrogen Peroxide Biosensor Tuned by the Photovoltaic Effect of Nano Titanium Dioxide"Analytical Chemistry, Vol. 77, No. 18, (2115).

[8] Jikun Chen,J., Xuchun Gui, X. "Superlow Thermal Conductivity 3D Carbon Nanotube Network for Thermoelectric Applications". Applide. Material and. Interfaces, Vol.4, pp. 81–86, (2112).

[9] Wang, s., Westcott, s., Chen, w. "Nanoparticle Luminescence Thermometry"Journal of. Physical. Chemistry. B, Vol. 116, No. 43, (2112).

[10] Hatten, X, D., Bell, N., Yufa, N., Christmann, G., Nitschke. J. R. "A Dynamic Covalent, Luminescent Metallopolymer that Undergoes Sol-to-Gel Transition on Temperature Rise" Journal of the American Chemical Society. Vol. 133, PP. 3158–3164, (2111).

[11] http://www.indiantextilejournal.com/articles/FAdetails.asp?id=1742.

[12] Hu, J., Wang, Li., Cai, W., Li, Y., Zeng, H., Zhao, L. " Smart and Reversible Surface Plasmon Resonance Responses to Various Atmospheres for Silver Nanoparticles Loaded in Mesoporous SiO2" Journal of Physical Chemistry. C. Vol.113, pp.19139-19145, (2119).

[13] Weitai, W., Ting, Z., Alexandra, B., Probal, B., Shuiqin, Z. " Smart Core-Shell Hybrid Nanogels with Ag Nanoparticle Core for Cancer Cell Imaging and Gel Shell for pH-Regulated Drug Delivery" Chemistry of Materials, Vol.22, pp.1966 - 1976 (2111).