

## مبانی نظری ساختارشناسی فناوری نوین مواد هوشمند حافظه‌دار مغناطیسی و کاربرد آن‌ها در صنایع مختلف

نوع مقاله: علمی پژوهشی

حسین حبیبی<sup>۱</sup>، فرهاد نظری زاده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری آینده‌پژوهی، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه ایوانکی  
<sup>۲</sup> استادیار گروه فناوری و راهبرد، دانشکده مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

\* hosseinhabibi.phd@gmail.com

### چکیده:

مواد هوشمند (Smart Materials) به آن دسته از مواد می‌گویند که می‌توانند محیط و شرایط اطراف خود را درک کنند و به آن واکنش نشان دهند. آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی زیر مجموعه‌ای از مواد هوشمند می‌باشند که شکل ماده و سایر ویژگی‌های مکانیکی آن در پاسخ به میدان‌های مغناطیسی و مکانیکی تغییر می‌کند. آلیاژهای حافظه‌دار در سال‌های اخیر به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان از جمله مقاومت به خوردگی بالا، مقاومت ویژه الکتریکی نسبتاً بالا، خواص مکانیکی نسبتاً خوب، خستگی طولانی، شکل‌پذیری بالا و قابلیت انطباق با بدن در طیف گسترده‌ای از صنایع مورد توجه قرار گرفته‌اند. این آلیاژها مواد هوشمندی هستند که پس از تغییر شکل می‌توانند شکل اولیه خود را به یاد آورند. هدف از ارائه این مقاله آشنایی، کاربرد و بررسی خواص مواد حافظه‌دار مغناطیسی می‌باشد. در واقع با ارائه چند مدل مطالعه شده، معادلات ساختاری، خواص، کاربرد آن‌ها در حوزه‌های مختلف و نمودارها سعی در بررسی این مواد داشته‌ایم و به چالش‌های موجود آن پرداخته‌ایم. از مهم‌ترین نتایج کمی این مواد اثر حافظه‌دار بودن مغناطیسی تا ۶٪ ازدیاد طول، پاسخ بسامد ۲-۱ KHZ، چگالی نیرو ۲ Mpa، میدان مغناطیسی کوچک‌تر از  $T/8$  و دمای کوری حدود  $95-105^{\circ}C$  می‌باشد که ضرورت استفاده این مواد را در صنایع مختلف بیان می‌کند.

### اطلاعات مقاله:

دریافت: ۱۱ اردیبهشت ۱۴۰۱

پذیرش: ۱۷ دی ۱۴۰۱

صفحه ۱ تا صفحه ۱۸

در دسترس در نشانی:

[www.ijcse.ir](http://www.ijcse.ir)

زبان نشریه: فارسی

شاپا چاپی: ۲۳۵۲-۲۳۲۲

شاپا الکترونیکی:

۲۷۸۳-۳۰۰۳

### کلیدواژه:

مبانی نظری، ساختارشناسی،

مواد هوشمند حافظه‌دار

مغناطیسی، کاربرد.

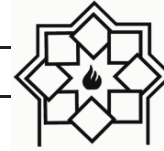
20.1001.1.23222352.1401.11.0.19.9

:DOR

### ۱- مقدمه

محرک‌های خارجی خواص فیزیکی خود مانند حجم، اندازه، شکل، چسبندگی، رنگ و غیره را تغییر دهند و یا تبدیل انرژی انجام دهند. به عبارت دیگر این مواد قادرند شرایط و محیط اطراف خود را درک کرده و نسبت به محرک‌های اطراف خود

مواد هوشمند اصطلاحاً به موادی گفته می‌شود که می‌توانند با درک محیط و شرایط اطراف خود نسبت به آن واکنش مناسب نشان دهند. در واقع موادی هستند که قادرند در مقابل



(شامل محرک‌های مکانیکی، شیمیایی، الکتریکی، مغناطیسی و غیره) واکنش نشان دهند؛ به عنوان مثال اگر یک مایع هوشمند را در مقابل میدان مغناطیسی یا الکتریکی قرار دهیم ظرف یک میلی ثانیه می‌تواند با تغییر چسبندگی از یک مایع به جامد یا ترکیبی شبه جامد تبدیل شود و یا اگر به یک ماده هوشمند کمی حرارت یا فشار وارد کنیم تغییر شکل یا تغییر اندازه قابل توجهی خواهند داشت. امروزه کاربرد این مواد به همراه کامپوزیت‌های هوشمند در بسیاری از حوزه‌های صنعت گسترش یافته است [۱].

در زیر به نمونه‌های مواد هوشمند (Smart Materials) اشاره نموده‌ایم:

۱- مواد پیزوالکتریک (piezoelectric): موادی هستند که زمانی که در شرایط استرس و فشار قرار می‌گیرند، ولتاژ تولید می‌کنند. از آنجایی که این اثر در حالت معکوس نیز ایجاد می‌گردد، القای ولتاژ در این مواد، فشاری را در طول نمونه تولید خواهد کرد. بنابراین ساختارهایی با طراحی مناسب و با استفاده از این مواد می‌توانند در صورت ایجاد یک ولتاژ، خم، منبسط و یا منقبض گردند.

۲- آلیاژهای حافظه‌دار ترکیبی: (Shape memory) و پلیمرهای حافظه‌دار ترکیبی مواد پاسخ‌دهنده به دما هستند که در آن‌ها تغییر شکل با تغییرات دما ایجاد می‌شود.

۳- آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی (Magnetic shape memory): موادی هستند که شکلشان در پاسخ به تغییرات در میدان مغناطیسی تغییر می‌یابد.

۴- مواد هالوکرومیک (Halochromic): موادی هستند که رنگشان در نتیجه تغییرات اسیدیته تغییر می‌کند. یک

کاربرد پیشنهادی برای رنگ دیوارهایی است که بتوانند خوردگی فلزات را در زیر سطح خود را با تغییر رنگ مشخص کنند.

۵- سامانه‌های کروموژنیک (Chromogenic): که رنگشان را در پاسخ به تغییرات دمایی، نوری یا الکتریکی تغییر می‌کند که شامل مواد زیر هستند:  
الف) مواد الکتروکرومیک که رنگشان را در صورت القای ولتاژ تغییر می‌کند (مثل بلور مایع).  
ب) مواد ترموکرومیک که رنگشان بسته به دمایشان تغییر می‌یابد.

پ) مواد فوتوکرومیک که رنگ در پاسخ به نور تغییر می‌یابد، به عنوان مثال عینک‌های حساس به نور که در زمانی که در معرض نور خورشید قرار می‌گیرند تیره می‌شوند.

۶- سیالات غیرنیوتونی (Non-Newtonian): سیالاتی هستند که چسبندگی خود را در پاسخ به برخی انواع فشارها یا نیروها تغییر می‌دهد. یک مثال خوب در این مورد اوبلک (Oobleck) است که تدریجاً در زمان ایجاد یک نیروی سریع از حالت مایع به حالت جامد تغییر می‌یابد. مثال خوب دیگر کاستارد (Custard) است که نوعی آهار یا نشاسته می‌باشد.

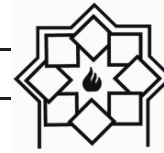
۷- مواد حساس به اسیدیته (pH-sensitive polymers): این مواد بر اثر تغییرات اسیدیته متورم شده یا خرد می‌شوند. آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی دسته جدیدی از مواد هوشمند به شمار می‌آیند که خواصی همچون کرنش‌های برگشت‌پذیر بزرگ و بسامد عملکرد بالا از خود نشان می‌دهند. مشابه با آلیاژهای حافظه‌دار پاسخگو به حرارت، به آلیاژهای حافظه



پیزوالکتریک‌ها می‌باشد. در آلیاژهای حافظه‌دار معمولی، سرعت فرآیند استحاله مارتنزیتی به واسطه مدت زمان نسبتاً زیاد لازم برای انتقال حرارت محدود شده است اما از آنجا که عملگری در آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی بر اثر بازچینی واریانت‌های مارتنزیتی انجام می‌گیرد بسامد عملکرد این آلیاژها بسیار بالاتر از بسامد عملکرد آلیاژهای حافظه‌دار معمولی و در حدود چند کیلوهرتز می‌باشد. کرنش‌های برگشت‌پذیر بزرگ به همراه بسامد عملکرد بالا، این آلیاژها را به عنوان گزینه‌ای مناسب در طراحی عملگرها، حسگرها و برداشت‌کننده‌های انرژی مطرح کرده است. کرنش ناشی از میدان مغناطیسی در آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی، غیر خطی، وابسته به میزان تنش اعمالی، همراه با پسماند و در نتیجه وابسته به تاریخچه بارگذاری است، پدیده غیرخطی پسماند در این آلیاژها یک چالش اساسی در استفاده از آنها می‌باشد. در کنار کرنش غیرخطی و تکرارپذیر ناشی از اعمال بارگذاری مکانیکی و میدان مغناطیسی به طور همزمان، در خواص مغناطیس‌شوندگی ماده تغییرات غیرخطی صورت می‌گیرد. به طور کلی آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی ممکن است بر اثر اعمال میدان مغناطیسی، تنش یا تغییرات دمایی دچار تغییر شکل شوند. در حالتی که تغییرات دمایی مورد نظر نباشند، در دماهای پایین و نزدیک دمای اتاق، ساختار این آلیاژها بلورهای مارتنزیتی است و با اعمال تنش و یا میدان مغناطیسی دچار تغییر شکل می‌شوند. خواص جالب و منحصر به فرد آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی از یک طرف و رفتار پیچیده آنها از طرف دیگر نیاز به مدل‌سازی رفتار این آلیاژها را روشن می‌سازد. تا کنون مدل‌های متعددی برای مدل‌سازی رفتار آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی ارائه شده است. رویکرد

داری که در پاسخ به میداین مغناطیسی اعمالی خارجی، دچار تغییر شکل و ایجاد تنش می‌شوند، آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی می‌گویند. این مواد، همانند مواد مغناطوکشسان (magnetostrictive) بوده و عموماً آلیاژهایی از نیکل، منگنز و گالیوم می‌باشند. در مواد فرومغناطیس، بازآرایی مجدد مغناطیسی در نتیجه هم‌راستا شدن گشتاورهای مغناطیسی میکروسکوپی، در جهت میدان اعمالی می‌باشد. آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی، هنگامی که حرکات دقیق و سریع نیاز باشد، مانند ربات‌ها، ابزارهای بیومدیکال، سوپاپ‌های حساس، دمپ‌کننده‌ها و ... کاربرد دارند. امروزه انواع زیادی از آلیاژهای حافظه‌دار کشف شده و توسعه پیدا کرده‌اند، بدون شک آلیاژهای حافظه‌دار جلوه‌ای از پیشرفت علم مواد همگام با صنعت و نیازهای روز جامعه است، به طوری که هم‌اکنون آلیاژهای حافظه‌دار در بسیاری از زمینه‌ها، از کاربردهای زیست‌پزشکی تا کاربردهای فضایی، استفاده‌های فراوانی پیدا کرده‌اند.

مواد حافظه‌دار مغناطیسی برای اولین بار در سال ۱۹۹۶، هنگامی که اوکالا و همکاران [۱] توانستند کرنش‌هایی تا میزان ۰/۲٪ را تحت میدان مغناطیسی متوسط و در غیاب تنش مکانیکی در تک بلور  $Ni_2MnGa$  مشاهده کنند، به عنوان نوع جدیدی از مواد هوشمند شناخته شدند. تا به امروز، بیش‌ترین کرنش برگشت‌پذیر مشاهده شده در این آلیاژها، تا میزان ۲۱٪ توسط سوزینوف و همکاران [۲] گزارش شده است، که این میزان کرنش یک یا حتی دو مرتبه بزرگ‌تر از کرنشی است که در اثر میدان مغناطیسی در مواد مغناطوکشسان معمولی ایجاد می‌شود. این میزان کرنش حتی خیلی بزرگ‌تر از کرنش ناشی از میدان الکتریکی در

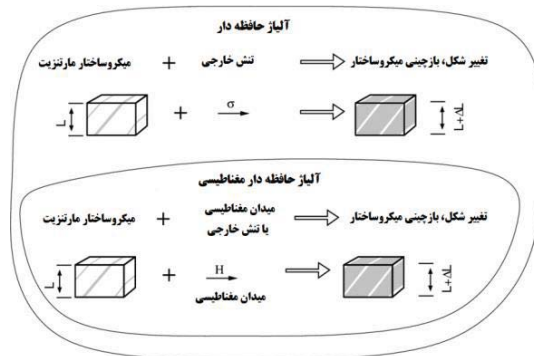


میکروسکوپی بررسی بلورشناسی اطلاعات مکانیکی، چرخشی و مغناطیسی را به همراه دارد. در مقیاس مزوسکوپی، مرزهای بین فاز و نوع، همراه با مطالعه ریزساختار انواع جفت و حوزه‌های وایس مورد بررسی قرار می‌گیرد. در اینجا مروری بر تعدادی مدل ارائه می‌نماییم. مدل‌هایی که در این قسمت ارائه شده در واقع شامل بازآرایی مارتنزیت بشقابی می‌باشد. چرنکو و همکاران، پونز و همکاران و هیرسینگر و همکاران به تحول فاز شبه کشسان پرداخته‌اند. از آنجا که جهت‌گیری مجدد مارتنزیت بشقابی توسط یک میدان مغناطیسی نیروی اصلی تحریک می‌باشد بر روی این اثر تمرکز شده است [۱۰-۷].

### ۳- مدل هندلی، موری و همکاران

در مدل تک بعدی آن‌ها، نویسندگان ۲ شکل از انرژی را در نظر گرفتند. منشاء یکی مکانیکی با یک عملکرد ترکیبی از تنش اعمال شده و دیگری با منشاء مغناطیسی  $M_s H$  متناسب با  $H$ . پارامترهای  $M_s$  و  $\epsilon_0$  و  $\sigma_0$  ثابت می‌باشند. به علاوه فرض می‌شود کرنش دارای ۲ مقدار  $\epsilon_0$  و ۰ می‌باشد، مرز بین این ۲ مقدار از رابطه تعادل انرژی  $M_s H = \epsilon_0 (\sigma + \sigma_0)$  به دست می‌آید. همان نویسندگان رویکرد دومی را بر اساس ترمودینامیک با بیان انرژی آزاد با در نظر گرفتن انرژی زیمن (Zeeman)، انرژی ناشی از ناهمسانگرد مغناطیسی، انرژی کشسان و یک انرژی ناشی از تنش خارجی ارائه نمودند. با به حداقل رساندن انرژی آن‌ها کسر حجمی از مارتنزیت را به عنوان تابع میدان مغناطیسی و تنش به دست آوردند. آن‌ها یک میدان اجباری مغناطیسی (منفی یا مثبت بستگی به جهت تغییرات میدان دارد) که بستگی به تنش داشته را به جهت محاسبه پسماند مکانیکی ایجاد شده اضافه نمودند [۱۲-۱۰].

به کار گرفته شده در اکثر این مدل‌ها کمینه کردن تابع انرژی آزاد سامانه به منظور یافتن ساختار تعادلی می‌باشد. مطابق شکل ۱ آنچه آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی را از آلیاژهای حافظه‌دار معمولی متمایز می‌کند و آن را در بین هر ماده‌ای کاملاً منحصر به فرد می‌کند این است که می‌توان با قرار گرفتن در معرض یک میدان مغناطیسی، ریز ساختار مارتنزیت را دست‌کاری کرد، این پدیده می‌تواند منجر به کرنش‌های بزرگ ماکروسکوپی چندین درصد شود که فقط توسط میدان مغناطیسی القا می‌شوند [۶-۳].



شکل ۱- آلیاژهای حافظه‌دار و رابطه آن با آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی [۲۳]

### ۲- تعدادی مدل ترمومکانیکی مغناطیسی مواد MSMA (حافظه‌دار مغناطیسی)

مدلسازی MSMA در ۲ انجمن مورد بررسی قرار گرفته است. ۱: تیم متخصصان مغناطیس به ویژه مواد مغناطوکشسان. ۲: تیمی متشکل از فیزیکدانان و مهندسين. جنبه اصلی مطالعه ما در پیوستگی نیروها می‌باشد، در انستیتو FEMTO-ST فرانسه یک تیم از مهندسان مکانیک روی این موضوع کار نمودند. تمایز بین مدل‌های مغناطیسی و مکانیکی را می‌توان در انتخاب نوع مقیاس بررسی کرد. در مقیاس



#### ۴- ریز مغناطیس

- مرحله اصلی دیگر تبدیل گردد (شکل ۲).
- مارتنزیت درجه ۲، با تعدیل اتمی از یک دوره تناوبی، ۵ لایه اتمی ۵M نامیده می‌شود، که به وسیله ۲ پارامتر شبکه a مربوط به ۲ محور طولانی و c مربوط به محور کوتاه مشخص شده است.
  - مارتنزیت مونوکلینیک مرکزی همراه با یک مدولاسیون اتمی، با تناوبی از ۷ لایه، ۷M نامیده می‌شود. که به وسیله ۴ پارامتر a و b مرتبط با ۲ محور طولانی، c مرتبط با محور کوتاه و یک زاویه اعوجاج مشخص شده است.
  - مارتنزیت درجه دوم غیرمدولاسیون، هم‌چنین به عنوان NMT (برای ساختار چهارضلعی غیرمدولاسیون) شناخته می‌شود، با ۲ پارامتر شبکه‌ای a مربوط به ۲ محور کوتاه و c محور طولانی مشخص می‌گردد.

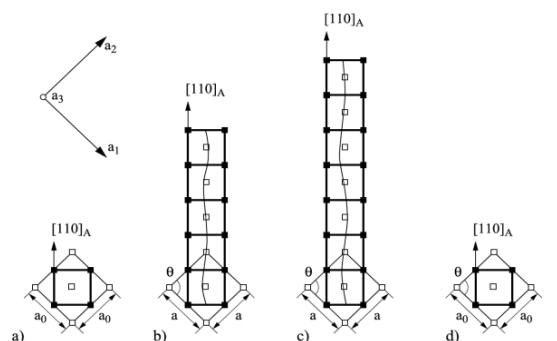
تیکل و جیمز یک مدل ۳ بعدی که در آن ۳ گونه مارتنزیتی برای تبدیل مکعب به درجه دوم می‌باشد را در نظر گرفتند. با اضافه نمودن اثر میدان مغناطیس‌زدایی، مقدار تغییرات با حداقل نمودن انرژی به دست می‌آید. دسیمور و جیمز نظریه ریزمغناطیس که برای مواد مغناطوکشسان و مغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گرفت را به MSMA بسط دادند. هدف از چنین مدلی توصیف تغییرات ریز ساختار مغناطیسی به عنوان تابع میدان مغناطیسی اعمال شده و استنباط روابط ماکروسکوپی بین تغییر شکل و میدان مغناطیسی می‌باشد [۱۲، ۱۳].

#### ۵- بلورشناسی Ni<sub>2</sub>MnGa

در روش مورد بررسی توسط مولنر و همکاران خصوصیات مکانیکی به ریزساختارهای ماده وابسته می‌باشد. با استفاده از اندازه‌گیری پراش پرتو ایکس همراه با میکروسکوپ الکترونی عبوری، میتوان شبکه‌های آستنیتی و مارتنزیتی را شناسایی نمود و بررسی کرد که چه تحول بلورشناسی در حال انجام می‌باشد، هم‌چنین پارامترهای شبکه اندازه‌گیری می‌گردد. این کار روی یک نمونه NiMnGa توسط Ga و همکاران انجام گرفت [۱۳، ۱۴].

#### ۵-۱- انواع فازها

در اینجا نیکل، منگنز-گالیوم با ترکیبی مشابه ترکیب استوکیومتری Ni<sub>2</sub>-Mn-Ga مورد مطالعه قرار گرفته است. در دمای بالا، فاز آستنیت A یک ساختار هویسلر L2<sub>1</sub> را که مجموعه‌ای از هشت شبکه مکعب می‌باشد را نشان می‌دهد. یک نمایش ساده را در نظر میگیریم: یک مکعب با طول ضلع a<sub>0</sub> در پی خنک شدن یا اعمال تنش این ماده می‌تواند به ۳



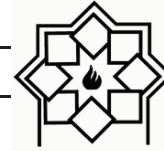
شکل ۲- ساختار بلورشناسی NiMnGa. (الف) آستنیت L2<sub>1</sub>. (ب)

مارتنزیت درجه ۲ (۵M). (ج) مارتنزیت مونوکلینیک مدوله

شده (۷M). (د) مارتنزیت درجه ۲ غیرمدوله شده (NMT)

[۲۳، ۲۴]

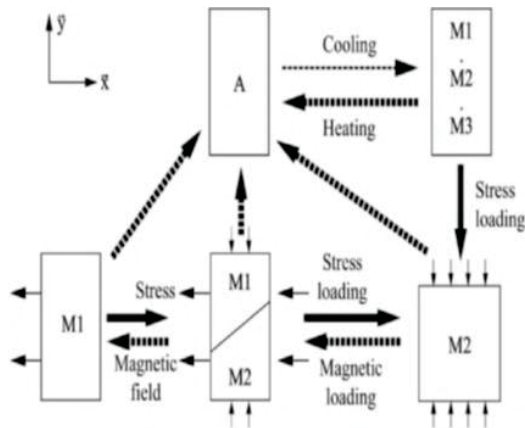
مقادیر پارامترهای شبکه‌ای بسته به ترکیب آلیاژ مورد نظر متفاوت است. با این حال، حداکثر مقادیر تغییر شکل با بازآرایی مارتنزیتی به ترتیب ۶٪-۵، ۱۱٪-۱۰ و ۱۹٪-۱۵ برای مارتنزیت ۵M، ۷M و NMT می‌باشد. فعالسازی میدان



از علامت‌های  $M_1$ ،  $M_2$  و  $M_3$  برای نشان دادن انواع مختلفی از مارتنزیت که به ترتیب محور کوتاه خود را در امتداد محوره‌های  $x$ ،  $y$  و  $z$  دارند استفاده می‌نماییم [۱۷-۱۴].

## ۵-۲- تبدیل و بازچینی

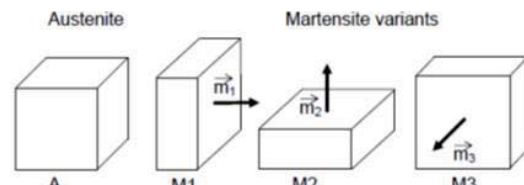
شکل ۵ رفتار کلی یک MSMA را نشان می‌دهد. در دمای بالا، آلیاژ در حالت آستنیتی قرار دارد. پس از خنک شدن، نمونه شامل ۳ نوع مارتنزیت با نسبت مساوی است. در نتیجه هیچ تغییر شکل ماکروسکوپی رخ نمی‌دهد. استفاده از تنش فشاری باعث ایجاد آن می‌شود که محور کوتاه آن در جهت آن تنش قرار داشته باشد ( $M_2$  در شکل ۵) و در نتیجه شکل هندسی نمونه را تغییر می‌دهد. استفاده از میدان مغناطیسی گزینه‌ایست که محور مغناطیسی ساده (یکسان با محور کوتاه) در امتداد جهت میدان می‌باشد ( $M_1$  در شکل ۵) و سبب تغییر شکل می‌گردد. از تعادل بین این ۲ اثر می‌توان برای ایجاد محرک استفاده کرد [۱۷].



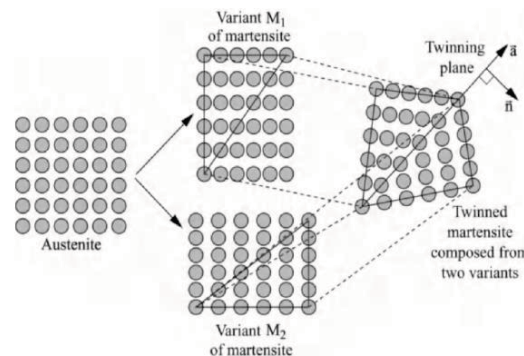
شکل ۵- طرح‌واره تبدیل و بازآرایی مارتنزیتی [۲۳، ۲۴]

در شکل ۶ چرخه طرح‌واره خطی MSMA نشان داده شده است. حالت اول شرایط بدون بار؛ حالت دوم حالت تک

مغناطیسی اکنون در دو مورد اول امکان‌پذیر است. با این حال در مورد مارتنزیت NMT فقط بازآرایی توسط تنش مکانیکی در آزمایشات مشاهده شده است. جزئیات بیشتری در خصوص مارتنزیت YM و NMT توسط سوزینو و همکاران بررسی گردیده است. از این پس ما بر روی مارتنزیت  $\delta M$  تمرکزی بیشتری خواهیم نمود زیرا در حال حاضر این ساختار پرکاربردترین ماده مارتنزیتی می‌باشد، در نتیجه آزمایشات بیشتری در این خصوص وجود دارد و مواد به راحتی در دسترس هستند. با این وجود ابزارهای مورد استفاده به اندازه کافی عمومی بوده که در انواع مختلف MSMA قابل استفاده هستند. یک مارتنزیت  $\delta M$  ممکن است در ۳ فرم وجود داشته باشد. این به دلیل ساختار درجه دوم آن می‌باشد. این اقسام در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند.



شکل ۳- ۳ نوع مارتنزیت با تغییر شکل از شبکه مکعبی به شبکه درجه ۲ [۲۳]



شکل ۴- طرح‌واره موقعیت دو بعدی: یک مکعب (چپ) و دو نوع مارتنزیت  $M_1$  و  $M_2$  کنار هم [۲۳، ۲۴]



$$U_3 = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

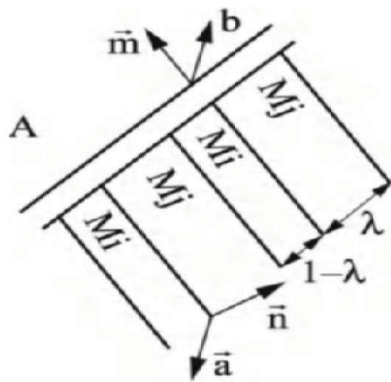
$$\text{و } \beta = \frac{c}{a_0}, \alpha = \frac{a}{a_0} \text{ (شکل ۳)}$$

برای تغییر جهت مجدد  $M_k$  به  $M_L$  تانسور کرنش به صورت زیر می‌باشد [۱۷]:

$$E_{kl}^{tr} = \frac{1}{2} (U_1^2 - U_2^2) \quad (4)$$

توجه داشته باشید که رابطه بین آستنیت و مارتنزیت فقط در قالب دو قلو در مقابل آستنیت می‌تواند وجود داشته باشد (شکل ۷). در واقع، CTM (نظریه بلورشناسی مارتنزیت) راه حل معادله دوقلوسازی را ارائه می‌دهد [۱۷]:

$$QU_i - U_j = a \otimes \hat{n} \quad (5)$$



شکل ۷- مارتنزیت دوقلو و تشکیل یک رابط با آستنیت [۲۳]

اجازه دهید این را برای مکعب به کار ببریم، ما باید اقسام ۱ و ۲ را مشابه محاسبات زیر به دست آوریم. در اینجا  $R$  چرخش ۱۸۰ درجه ماتریس حول محور  $\hat{e}$  بوده که به صورت زیر به دست می‌آید [۱۷]:

$$\hat{e} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

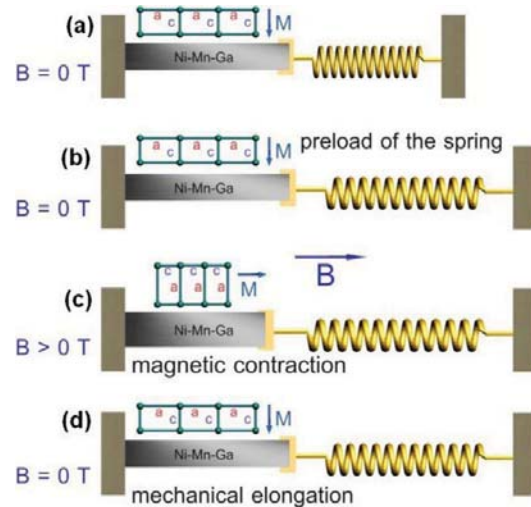
به راحتی  $R^T U_1 R = U_2$  و به دست می‌آوریم [۱۷]:

$$a = \frac{\sqrt{2}(\beta^2 - \alpha^2)}{\beta^2 + \alpha^2} \begin{pmatrix} -\beta \\ \alpha \\ 0 \end{pmatrix}, \hat{n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$a = \frac{\sqrt{2}(\beta^2 - \alpha^2)}{\beta^2 + \alpha^2} \begin{pmatrix} -\beta \\ \alpha \\ 0 \end{pmatrix}, \hat{n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

توجه شود که تمام این محاسبات در شکل ۴ نشان داده شده

واریانت اولیه بعد از پیش‌بارگذاری مکانیکی. (ج) تحریک ماده توسط یک میدان مغناطیسی خارجی. (د) تنظیم مجدد حرکت. ابعاد معمولی فویل‌های مورد استفاده دارای طول ۱۵-۶ میلی‌متر و عرض ۳-۲ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۶- شماتیک خطی مواد MSMA در حالت‌های مختلف

[۲۳]

### ۵-۳- محاسبه میکروساختارها

در اینجا به طور خلاصه تعدادی المان را بررسی می‌کنیم.  $F_k$  تانسور شیب تبدیل آستنیت  $A$  به نوع مارتنزیت  $M$  به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۷]:

$$dx(M) = F_k \cdot dX(A) \quad (1)$$

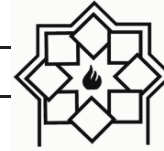
تانسور کرنش لاگرانژ گرین به صورت رابطه زیر به دست می‌آید [۱۷]:

$$E_k^{tr} = \frac{1}{2} (F_k^T F_k - 1) = \frac{1}{2} (u_k^2 - 1) \quad (2)$$

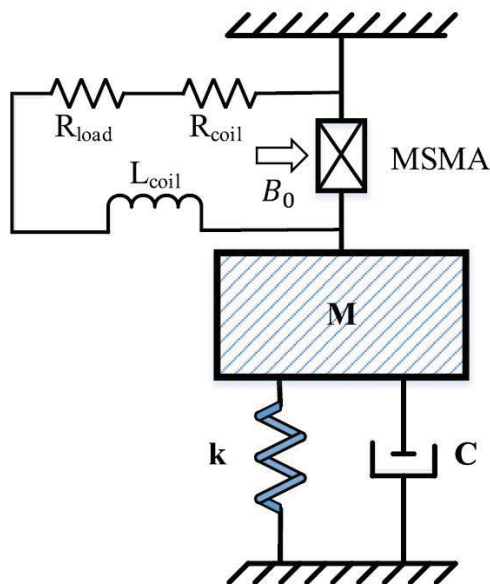
با تنوع سه‌گانه برای مکعب (تبدیل درجه ۲) [۱۷]

$$U_1 = \begin{bmatrix} \beta & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix}$$

$$U_2 = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix}$$



به صورت نور، صدا، گرما، لرزش و یا حرکت باشد. شکل ۸ شماتیکی از پارامترهای مربوط به MSMA بر پایه‌ی ذخیره انرژی را نشان می‌دهد.  $K$  ضریب سختی هسته،  $C$  ضریب سختی دمپینگ،  $R_{coil}$  مقاومت هسته،  $L_{coil}$  مقاومت القایی،  $R_{load}$  مقاومت بار خارجی و  $B_0$  میدان تحریک شده می‌باشد [۲۵، ۲۶].



شکل ۸- شماتیکی از پارامترهای MSMA بر پایه برداشت انرژی [۲۵، ۲۷]

پاسخ ولتاژ در شکل ۹ نشان داده شده است. شتاب به کار رفته در فرکانس ۱۹,۱ HZ و مقدار RMS  $g \cdot 0/3$  (g شتاب گرانش  $\frac{m}{s^2}$  ۹,۸۱) با استفاده شتاب‌سنج اندازه‌گیری شده است. فاصله نسبی بین ۲ پارامتر مغناطیسی نیازمند یک میدان  $T \cdot 0/19$  با سطح MSMA بوده که به وسیله میدان‌سنج (gaussmeter) اندازه‌گیری می‌شود. ولتاژ خروجی در یک مدار باز با مقدار RMS  $mv \cdot 130$  اندازه‌گیری می‌شود [۲۵، ۲۶].

است. در صورت لزوم  $Q$  از معادله ۵ به دست می‌آید. معادله سازگاری بین آستنیت و چند نوع مارتنزیت  $M_i/M_j$  به ترتیب  $1 - \lambda$  و  $\lambda$  به صورت زیر است [۱۷]:

$$Q'(\lambda Q U_j - (1 - \lambda) U_i) = 1 + b \otimes m \quad (۹)$$

ما فرض خواهیم کرد که معادله دوقلو برای انواع  $i$  و  $j$  یک راه حل دارد. بال و جیمز روشی را برای دستیابی به راه حل معادله رابط آستنیت/مارتنزیت ارائه داده‌اند [۱۷، ۱۸].

(۱) محاسبه

$$\delta = a \cdot U_i (U_i^2 - 1)^{-1/n} \quad (۱۰)$$

$$\eta = \text{tr}(U_i^2) - \det(U_i^2) - 2 + \frac{\|a\|^2}{2\delta} \quad (۱۱)$$

معادله برای رابط آستنیت/مارتنزیت راه حلی دارد اگر و تنها اگر:

$$\delta \leq -2 \quad \text{و} \quad \eta \geq 0 \quad (۱۲)$$

(۲) برای پیدا کردن راه حل، محاسبه می‌نماییم:

$$\lambda = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{2}{\delta}} \right) \quad (۱۳)$$

$$\beta = \frac{c}{a_0} = 0.9589 \quad \alpha = \frac{a}{a_0} = 1.0188 \quad \text{برای Ni}_2\text{-Mn-Ga}$$

$$\text{و} \quad \lambda = 0.3083$$

برای  $M_1$  به  $M_2$ :

$$E_{12}^{tr} = \frac{1}{2} (U_2^2 - U_1^2) = \text{diag}(0.0593, -0.593, 0) \quad (۱۴)$$

برای  $A$  به  $(M_2, M_1)$ :

$$E^{tr} = \frac{1}{2} (U_{tw}^2 - 1) \quad (۱۵)$$

برای  $U_{tw} = \lambda U_2 + (1 - \lambda) U_1$  و نهایتاً

$$E^{tr} = \text{diag}(-0.0224, 0.0004, 0.0190)$$

## ۶- برداشت‌کننده انرژی در سازه‌های MSMA تحت ارتعاش

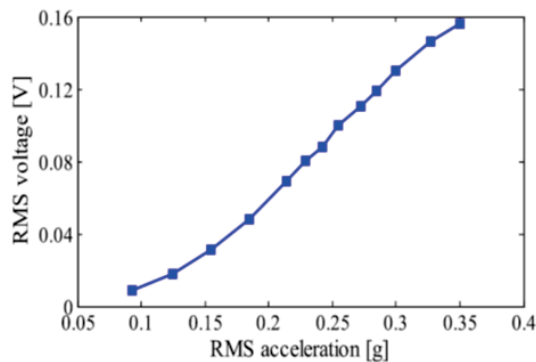
برداشت انرژی یا جمع‌آوری انرژی به معنای جمع‌آوری انرژی‌های کوچکی است که ممکن است به هر شکلی هدر رود. می‌تواند





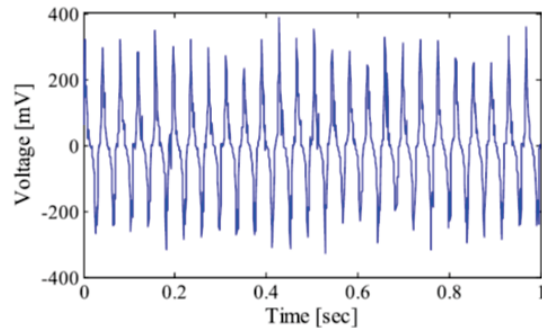
کوپل شده با MSMA واحد) انجام شده است و فرکانس‌های طبیعی با نقطه سبز نشان داده شده است. مقدار اوج  $130 \text{ mV}$  متناظر با فرکانس طبیعی پایه‌ای به وسیله ذخیره انرژی در فرکانس  $19/1$  اتفاق می‌افتد. یک نکته قابل توجه این‌که محدوده فرکانس بالای  $1,5 \text{ KHZ}$  دارای ولتاژ قابل توجهی نمی‌باشد. این اثر از آن جا که در محدوده بالای  $1/5 \text{ KHZ}$  دینامیک مرتبط با دوران بردار مغناطیسی آهسته‌تر از نرخ تغییرات نیروی به کار رفته می‌باشد اتفاق می‌افتد [25-27].

وابستگی ولتاژ خروجی متناسب با شتاب در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در هر گام فرکانس تحریک متناسب با تشدید آن هماهنگ شده و ولتاژ RMS اندازه‌گیری می‌شود. همانطور که انتظار می‌رفت وابستگی خطی ولتاژ RMS روی پایه شتاب قابل مشاهده می‌باشد [25-27].



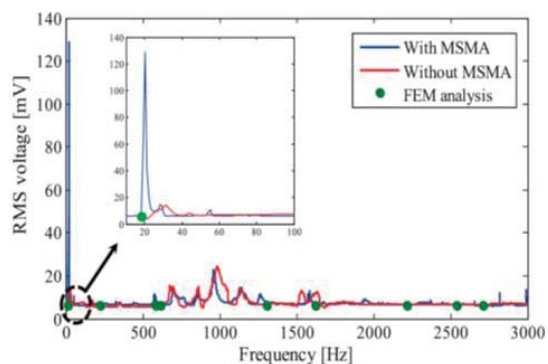
شکل ۱۱- ولتاژ RMS در برابر شتاب ورودی (میدان  $19 \text{ T}$ ) [27]

یکی از نتایج اصلی این گزارش بررسی وابستگی ولتاژ RMS متناسب با میدان می‌باشد که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، با استفاده از تنوع فاصله نسبی بین آهنربای دائمی، میدان MSMA در محدوده  $0/54 \text{ T}$  -  $0/04 \text{ T}$  می‌باشد. واضح



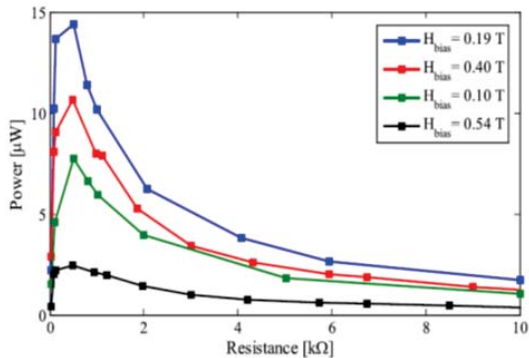
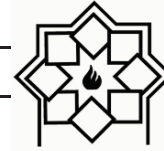
شکل ۹- اثر زمان ولتاژ القایی در فرکانس القایی  $1/19 \text{ HZ}$ ، RMS شتاب  $0/3 \text{ g}$  و میدان  $19 \text{ T}$  [27]

شکل ۱۰ ولتاژ RMS خروجی در برابر فرکانس هنگامی که سیستم تحت فرکانس هماهنگ  $1 \text{ HZ}$  -  $3 \text{ KHZ}$  و میدان  $19 \text{ T}$  تحریک شده است را نشان می‌دهد [25، 26].



شکل ۱۰- ولتاژ RMS در برابر فرکانس تحریک (RMS شتاب  $0/3 \text{ g}$  و میدان  $19 \text{ T}$ ) [27]

به منظور درک این موضوع که کدام قسمت از ولتاژ تولید شده از تغییر میدان مغناطیسی MSMA نشأت گرفته و کدام قسمت مربوط به دیگر پدیده‌ها می‌باشد نمونه MSMA با یک بخش غیر فروگرافیک با ابعاد مشابه جایگزین شده و تست تکرار می‌گردد. منحنی قرمز رنگ در شکل ۱۰ ولتاژ تولید شده در زمان عدم وجود MSMA را نشان می‌دهد. به علاوه، آنالیز المان محدود (FEM) بر روی یک وسیله برداشت انرژی (تیر

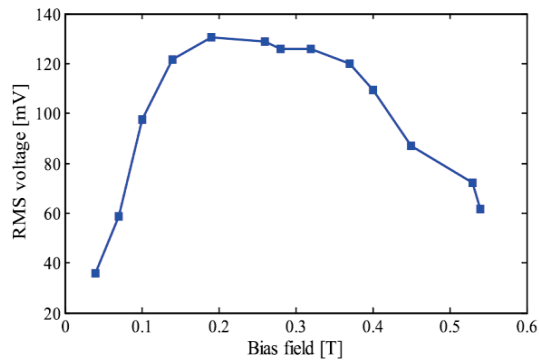


شکل ۱۳- توان خروجی در برابر مقاومت (فرکانس تحریک ۱۹/۱ HZ و شتاب ۰/۳ g RMS) [۳۰]

### ۷- محاسبه خواص مکانیکی

روش‌های متنوعی برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی این دسته از مواد ارائه شده است. یک نمونه ساده از این روش‌ها به این صورت است (شکل ۱۴) که نمونه‌ی الاستومر مغناطیسی بین دو عدد آهنربای سیلندری با قطر ۵۰ و ارتفاع ۱۲/۵ میلی‌متر قرار گرفته است. ساختار دستگاه از یک قاب فلزی برای تثبیت محل آهن‌رباها تشکیل شده است. محل هر دو آهن‌ربا به کمک دستگیره‌های تعبیه شده قابل تنظیم است، بنابراین میتوان میدان مغناطیسی متفاوتی به نمونه آزمایش القا کرد. با یک دستگاه گوس‌متر شدت میدان مغناطیس اندازه گرفته می‌شود. همچنین می‌توان با روش‌های معمول میزان نیروی وارده و تغییر طول قطعه الاستومر مغناطیسی را اندازه گرفت. مدول یانگ برای الاستومرهای مغناطیسی در این آزمایش به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود. به طوری که در این رابطه E مدول یانگ، F نیروی اعمالی، A<sub>0</sub> سطح مقطع اولیه که نیرو به آن اعمال می‌شود، Δl تغییر طول الاستومرهای مغناطیسی و l<sub>0</sub> طول اولیه آن می‌باشد [۲۷-۳۱].

است حداکثر مقدار ولتاژ ذخیره در کمینه میدان می‌باشد. مشاهدات مقایسه شده با تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که میدان حول ۰/۶ T منجر به ولتاژ ماکزیمم متناظر با میدان مغناطیسی برای شروع رفتار شبه الاستیک می‌شود [۲۵-۳۱].



شکل ۱۲- ولتاژ RMS در برابر میدان (فرکانس تحریک ۱۹/۱ HZ و شتاب ۰/۳ g RMS) [30]

شکل ۱۳ توان پراکندگی رزیستور را در برابر بار الکتریکی در میداین مختلف نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رفت مقدار بار بهینه  $R = 500 \Omega$  بوده که با مقدار نظری تعریف شده توسط Spreeman و Manoli یکسان است [۲۵-۲۸]. رابطه  $R_{opt} = R_{coil} + \frac{(NBL)^2}{d_m}$  را داریم که  $R_{coil}$  مقاومت داخلی هسته، N تعداد چرخش، L طول هر چرخش و  $d_m$  ضریب اصطکاک مکانیکی می‌باشد. مقاومت بهینه متناظر با حداکثر توان مستقل از میدان می‌باشد. علاوه بر این توان  $15 \mu W$  برای شتاب ۰/۳ g RMS و فرکانس تحریک ۱۹/۱ HZ ذخیره شده است. این مقدار توان سبب افزایش اثر بهینه همانند ابعاد ذخیره‌سازی، خصوصیات ماده تیر و پارامترهای مربوط به هسته می‌گردد. در این قسمت به صورت خلاصه امکان ذخیره انرژی از طریق ارتعاشات سازه‌ای MSMA را بررسی نمودیم [۲۵-۲۸].



- اثر آلیاژ حافظه‌دار با تغییر شکل ناشی از اعمال میدان مغناطیسی همانند تغییر شکل ناشی از دما می‌باشد.
- اگر ماده کاملاً کشیده یا فشرده شود تغییری در مقاومت ایجاد می‌شود.
- خواص فنر کنترل شده را به نمایش می‌گذارد.
- خصوصیات ماده در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- خصوصیات ماده حافظه‌پذیر مغناطیسی

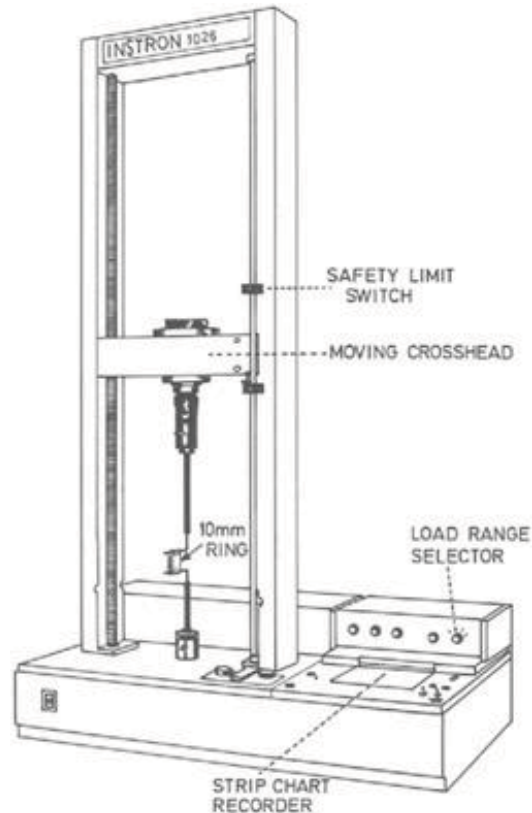
ماده	NiMnGa تک بلور
افزایش طول در میدان مغناطیسی	تا ۰.۶٪ - غالباً ۰.۵٪ - ۰.۳٪
پاسخ	۱-۲ KHZ
چگالی نیرو	حدود ۲ Mpa
میدان مغناطیسی	< ۰.۸ T
دمای کوری	۹۵-۱۰۵°C
حد دمای بالا	تبدیل مارتنزیت به آستنیت در ۷۰°C

## ۸-۲- کاربرد

### ۸-۲-۱- عملگرها

وظیفه عملگر، یا Actuator که نوعی موتور است در شیرهای کنترل، تأمین نیروی لازم جهت باز و بسته کردن شیر و قرار دادن آن در موقعیت مطلوب و متناسب با سیگنال ارسالی از طرف کنترلر و ... است. عملگرها در انواع مختلف پنوماتیکی، الکتریکی یا خود عملگر (Self Acting) موجود بوده و با توجه به وضعیت سامانه انتخاب و استفاده می‌گردند. در واقع از اثر مواد حافظه‌پذیر مغناطیسی برای طراحی عملگرهایی استفاده می‌گردد که آن عنصر بر اساس یک میدان مغناطیسی کشیده می‌شود. کشیدگی می‌تواند با استفاده از میدان مغناطیسی در زاویه ۹۰ درجه نسبت به میدان اصلی،

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A_0}{\Delta l/l_0} = \frac{Fl_0}{A_0 \Delta l}$$



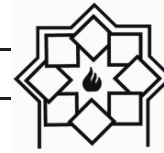
شکل ۱۴- تجهیز اندازه‌گیری مدول [۲۷]

## ۸- خصوصیات و کاربردها

در اینجا به بررسی خصوصیات آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی تولیدی شرکت GoodFellow می‌پردازیم [۱۹-۲۲]:

### ۸-۱- خواص

- اثر حافظه‌دار بودن مغناطیسی تا ۰.۶٪ ازدیاد طول در یک میدان مغناطیسی.
- این مواد اثر معکوس مغناطوکشسان یا ویلاری را به نمایش می‌گذارند.



کشش یا فشرده‌سازی مواد موجب تغییر هر میدان مغناطیسی که در آن قرار گرفته است می‌گردد، که معروف به نفوذپذیری مغناطیسی متغیر تحت تنش متفاوت می‌باشد، که می‌تواند برای برداشت‌کننده‌های انرژی ارتعاشی استفاده شود. [۱۹-۲۳]

#### ۸-۲-۴- دمپ‌های ارتعاشی

از همان خصوصیتی که برای ایجاد برداشت‌کننده‌های انرژی استفاده شده است می‌توان برای کاهش ارتعاشات مکانیکی استفاده نمود. [۱۹، ۲۰]

#### ۸-۲-۵- حسگرها

حسگر (sensor) یا حس‌کننده می‌تواند کمیت‌هایی مانند سرعت، میدان مغناطیسی، کرنش، فاصله، فشار، حرارت، رطوبت، دما، و ... را به کمیت‌های الکتریکی پیوسته (آنالوگ) یا غیرپیوسته (دیجیتال) تبدیل کند و آن‌ها را محاسبه کند بنابراین می‌توان با استفاده از خصوصیات مواد آن‌ها را ساخت. [۱۹، ۲۰]

#### ۹- دسترسی پذیری

به جهت به حداقل رساندن انرژی مغناطیسی مورد نیاز برای کشیدن مواد، یک مقطع عرضی نازک و گسترده ترجیح داده می‌شود و از آنجا که کشش یک مضربی از طول می‌باشد یک نوار نسبتاً طولانی ترجیح داده می‌شود. به عنوان مثال شرکت GoodFellow موادی با ابعاد زیر پیشنهاد می‌دهد:

• ۱ T x 2/5 W x 20 L in mm

• ۱ T x 5 W x 20 L in mm

• ۲ T x 5 W x 20 L in mm

این ابعاد استاندارد شرکت‌های تولیدی می‌باشد. [۱۹]

یا به طور موثر با استفاده از فنر معکوس گردد. تغییر شکل بسیار سریع بوده و سیکل آن ۱ تا ۳ KHz می‌باشد. در طول آزمایش عمر خستگی چندین میلیون چرخه بوده است. این مواد دارای خروجی کرنش بیش‌تری نسبت به مواد دیگر می‌باشند (۱۰ تا ۱۰۰ برابر). آن‌ها هم‌چنین تراکم انرژی بالاتری را به طور معمول تا  $100 \text{ KJ/m}^3$  در مقایسه با  $14-30 \text{ KJ/m}^3$  مواد مغناطوکشسان و  $2-8 \text{ KJ/m}^3$  مواد پیرو دارا می‌باشند. [۱۹-۲۳]

#### ۸-۲-۲- کلیدهای مدار شکن / فیوزها

این قطعه که به آن مدارشکن یا قطع‌کننده مدار گفته می‌شود، یک کلید قطع و وصل (کلید) اتوماتیک است که از مدار الکتریکی در برابر آسیب‌های ناشی از اضافه جریان که معمولاً به خاطر اضافه بار یا اتصال کوتاه ایجاد می‌شود، محافظت می‌کند. [۱۹-۲۱]

#### ۸-۲-۳- برداشت‌کننده‌های انرژی

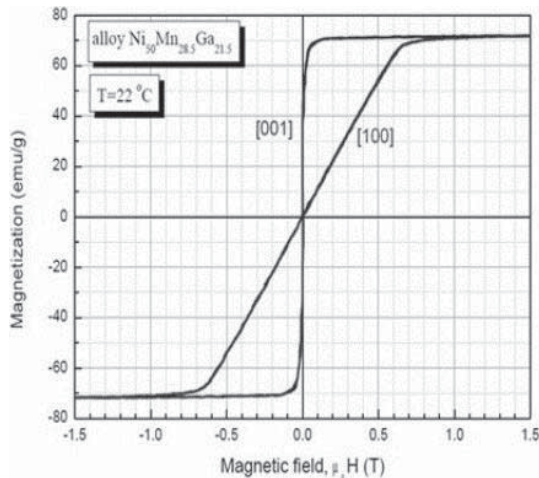
از این انرژی جمع‌آوری شده در موارد زیر استفاده می‌شود:

- افزایش کارایی یا راندمان مانند استفاده از گرمای کامپیوتر برای تامین بخشی از انرژی خود کامپیوتر
- به وجود آمدن تکنولوژی‌های جدید مانند : شبکه حسگرهای بی‌سیم
- هم‌چنین در این روش می‌توان برای وسایل الکترونیکی از باتری‌های بسیار کوچک‌تری استفاده کرد. که این امر خود مزایای بسیاری دارد، از قبیل:
- عدم نیاز به نگهداری و تعمیر باتری
- مناسب با محیط زیست
- استفاده در تجهیزات جدید مانند استفاده از حسگرهای زیر آب



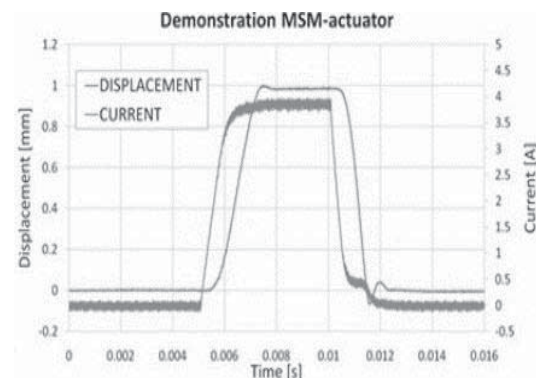
## ۱۰- نمودار

در زیر اشکال ۱۸-۱۵ بررسی عملکرد مواد حافظه‌دار مغناطیسی را نشان می‌دهند [۱۹]:



شکل ۱۷- میدان مغناطیسی در حالت‌های فشاری و کششی

[۱۹]



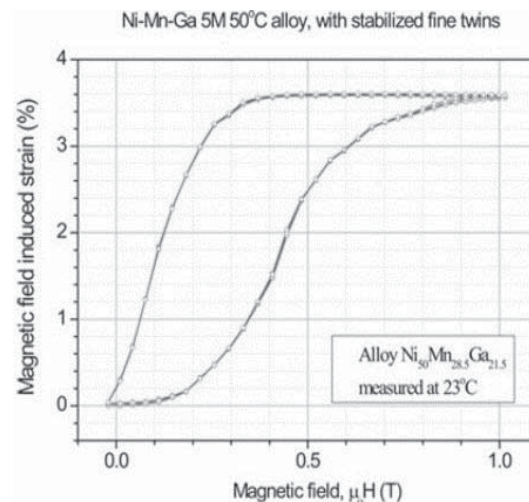
شکل ۱۵- پاسخ آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی به سیگنال کنترلی

[۱۹]

## جدول ۲- مقایسه مواد

چگالی انرژی	بسامد	کرنش	نوع ماده
$<100 \frac{\text{KJ}}{\text{m}^3}$	$<2 \text{ kHz}$	$<6\%$	حافظه‌دار مغناطیسی
$10000 \frac{\text{KJ}}{\text{m}^3}$	$<3 \text{ HZ}$	$<8\%$	ماده حافظه‌دار حرارتی
$0.8 - 2 \frac{\text{KJ}}{\text{m}^3}$	$100\text{s kHz}$	$0/04\% - 0/07\%$	ماده پیزوالکتریک
$14 - 30 \frac{\text{KJ}}{\text{m}^3}$	$100\text{s kHz}$	$-0/14\% - 0/2\%$	ماده مغناطو کشسان

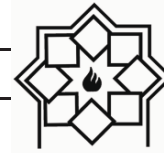
اتصال لوله، فعال‌کننده نیرو در مدارهای الکتریکی، شیر اطمینان، شیر کنترل سیال، قاب عینک، شیشه‌های فوتوکرومیک، دندانپزشکی، ایمپلنت‌های پزشکی، فیلتر خونی از جنس سیم‌های NiTi، ظروف ترموستاتیک قهوه، استنت‌های جراحی، نگهدارنده‌ها (clamps)، مجسمه‌ها، اجزای دمپرهای سازه‌ها برای جلوگیری از خسارات ناشی از زلزله، اتصال تاندون به استخوان در پزشکی، پین‌ها و سیم‌های راهنما در پزشکی، ابزارهای جراحی خم‌شو، آنتن ماهواره، کنترل تعادل تیغه‌های روتور هلی‌کوپترها، کاهنده صدای موتور هواپیما،



شکل ۱۶- وابستگی کرنش به رفتار سطح [۱۹]

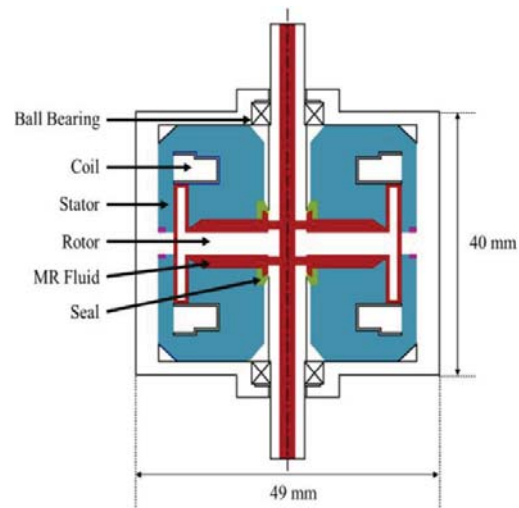
## ۱۱- نمونه‌های کاربردی

این آلیاژها موارد استفاده وسیعی در صنعت، هنر، پزشکی، مهندسی و ... دارند که در زیر به کاربرد آن‌ها اشاره گردیده است:



رباتیکی، کلاچ و ترمز خودرو، سامانه تعلیق و ...

به عنوان مثال یک روش نوین در سامانه ترمز خودرو استفاده از سیال مغناطیسی می‌باشد در واقع وظیفه اصلی سیستم ترمز کاهش سرعت یا توقف کامل مکانیزم در حال حرکت یا خودرو است. از ترمز برای تنظیم یا محدود کردن سرعت خودرو استفاده می‌شود. از فواید ترمزهای سیال مغناطیسی می‌توان به کنترل گشتاور ترمزی مورد نیاز به کمک تنظیم قدرت میدان مغناطیسی، کاهش ارتعاش و نویز، پاسخ سریع، کاهش سایش و انرژی مصرفی پایین و ساختار ساده اشاره کرد. در شکل ۱۸ ساختار متداول این ترمزها را می‌توان مشاهده کرد. همان‌طور که مشخص است، در این کاربرد از مود برشی سیال مغناطیسی استفاده شده است. برای استفاده گسترده سیال مغناطیسی در کاربردهای متنوع مهندسی باید ثبات و پایداری این مواد بررسی شود.



شکل ۱۸- طرح‌واره ترمز سیال مغناطیسی [۲۴]

## ۱۲- نتیجه‌گیری

آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی Ni-Mn-Ga موادی با کاربرد در

حوزه‌های حسگر، محرک و ... با چشم‌انداز بسیار خوبی می‌باشند. هدف از ارائه این مقاله آشنایی، کاربرد و خواص مواد حافظه‌دار مغناطیسی می‌باشد. در واقع با ارائه چند مدل مطالعه شده، معادلات ساختاری، خواص، کاربرد و نمودارها سعی در بررسی این مواد داشته‌ایم. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی وجود هیستریزیس وابسته به نرخ نامتقارن و همراه با اشباع‌های بزرگ می‌باشد. برای رفع این مشکل، رفتار پسماند موجود در این مواد را مدلسازی می‌کنند. مدل پرتل - ایشلینسکی به دلیل سادگی و دارا بودن معکوس تحلیلی، یکی از مدل‌های پرکاربرد در این حوزه می‌باشد. این مدل در دو نوع مستقل از نرخ و وابسته به نرخ ارائه شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش بسامد تحریک، پسماند موجود در رفتار آلیاژهای مغناطیسی افزایش می‌یابد. بنابراین مدل مستقل از نرخ پرتل - ایشلینسکی نمی‌تواند این تغییرات را در نظر بگیرد. برای حل این مشکل با استفاده از تست تجربی، ولتاژ ورودی در بسامدهای تحریک  $0/05$  تا  $0/4$  هرگز به عملگر آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی اعمال شده و خروجی موقعیت عملگر نیز به وسیله حسگر القایی اندازه‌گیری می‌شود. مدل سازی آلیاژ حافظه‌دار مغناطیسی با مدل تعمیم‌یافته پرتل - ایشلینسکی وابسته به نرخ ارائه شده و مدل اصلاح شده آن نیز پیشنهاد شده است. برای افزایش توانایی مدل در توصیف رفتار پسماند اشباع و نامتقارن آلیاژهای مغناطیسی مدل اصلاح شده جدیدی با به کار بردن تابع تانژانت هیپربولیک در خروجی مدل ارائه شده است. برای آموزش مدل‌های مذکور دو بسامد تحریک  $0/05$  و  $0/2$  هرگز انتخاب شده و پارامترهای مدل با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک با



ماتریس قطری	$diag$
جمع عنصرهای قطر اصلی ماتریس	$tr$
بردار نرمال	$\hat{n}$
ابعاد در فاز مارتنزیت	$a$ و $C$
ابعاد در فاز آستنیت	$a_0$

### مراجع

- [1] K. Ullakko, J. Huang, C. Kantner, R. O'handley, V. Kokorin, Large magnetic-field-induced strains in  $Ni_2MnGa$  single crystals, Applied Physics Letters, Vol. 69, No. 13, pp. 1966-1968, 1996.
- [2] A. Sozinov, N. Lanska, A. Soroka, W. Zou, 12% magnetic field-induced strain in Ni-Mn-Ga-based non-modulated martensite, Applied Physics Letters, Vol. 102, No. 2, pp. 021902, 2013.
- [3] R. Kellogg, A. B. Flatau, A. Clark, M. Wun-Fogle, T. A. Lograsso, Temperature and stress dependencies of the magnetic and magnetostrictive properties of  $Fe_{0.81}Ga_{0.19}$ , Journal of applied physics, Vol. 91, No. 10, pp. 7821-7823, 2002.
- [4] I. Chopra, Review of state of art of smart structures and integrated systems, AIAA journal, Vol. 40, No. 11, pp. 2145-2187, 2002.
- [5] J. Tellinen, I. Suorsa, A. Jaaskelainen, I. Aaltio, K. Ullakko, Basic properties of magnetic shape memory actuators, proceeding of the 8th international conference ACTUATOR, June 10-12, 2002.
- [6] Mousavi, Mohammad Reza, and Jamal Arghavani. "A thermodynamically consistent two-dimensional constitutive model for magnetic shape memory alloys." Modares Mechanical Engineering 16.12 (2017): 1-11.
- [7] GAUTHIER J., Modélisation des alliages à mémoire de forme magnétiques pour la conversion d'énergie et leur commande, PhD thesis, University of Franche Comté, 2007.
- [8] Chernenko V., L'vov V., Cesari E., Rudenko A., Date H., Matsumoto M., Kanomatad T., "Stress-strain behaviour of Ni-Mn-Ga alloys: experiment and modelling", Mat. Sc and Eng. A, vol. 378, pp. 349-352, 2004.
- [9] Pons J., Chernenko V., Cesari E., L'vov V., "Stress-strain-temperature behavior for martensitic transformation for Ni-Mn-Ga single crystal compressed along  $\langle 001 \rangle$  and

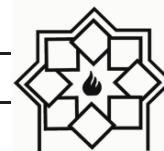
این مجموعه داده به دست آمده است. اعتبارسنجی مدل‌ها نیز در بسامد ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۴ هرتز انجام گرفته است. که نتایج نشان می‌دهد مدل اصلاح شده به دلیل استفاده از تابع تانزانت هیپربولیک بهتر توانسته پسماندهای نامتقارن و بسیار اشباع شده در رفتار آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی را توصیف کند.

کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار مغناطیسی، هنگامی که حرکات دقیق و سریع نیاز باشد، مانند ربات‌ها، ابزارهای بیومدیکال، سوپاپ‌های حساس، دمپ‌کننده‌ها و ... دو چندان می‌گردد. حوزه‌های بررسی شده در خصوص این مواد در مراحل ابتدایی بوده و یکی از اولویت‌های اصلی صنایع مختلف به واسطه نرخ کرنش، فرکانس و چگالی انرژی مناسب می‌باشد.

با اینکه از مواد هوشمند در صنایع چندین دهه است که استفاده می‌شود، اما پتانسیل‌های بالایی برای بهبود مواد موجود و نزدیک کردن خواص آن‌ها به خواص دلخواه و مطلوب دیده می‌شود. برای مثال در سال‌های اخیر تحقیقات روی الاستومرهای مغناطیسی به عنوان جایگزینی مناسب برای سیالات مغناطیسی افزایش یافته است.

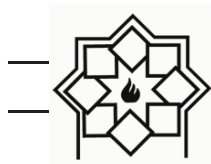
### ۱۳- علائم و اختصارات

فاز مارتنزیت	M
فاز آستنیت	A
تانسور شیب تبدیل آستنیت A به نوع مارتنزیت M	$F_k$
تانسور کرنش لاگرانژ گرین	$E_k^{tr}$
المان خط در پیکربندی مرجع	$dx$
المان خط در پیکربندی جاری	$dX$
تغییر مکان ذره	$U_k$
تانسور چرخش متعامد	R
ضرب کرونکر	$\otimes$



- [22] Chen, Xue, and Yongjun He. "Thermo-magneto-mechanical coupling dynamics of magnetic shape memory alloys." *International Journal of Plasticity* 129 (2020): 102686.
- [23] Golub, V., et al. "Magnetism of nanotwinned martensite in magnetic shape memory alloys." *Journal of Physics: Condensed Matter* 32.31 (2020): 313001.
- [24] Yan, Hai-Le, et al. "Impact of B alloying on ductility and phase transition in the Ni–Mn-based magnetic shape memory alloys: Insights from first-principles calculation." *Journal of Materials Science & Technology* 74 (2021): 27-34.
- [25] Ahamed, Raju, Md Meftahul Ferdaus, and Yancheng Li. "Advancement in energy harvesting magneto-rheological fluid damper: A review." *Korea-Australia Rheology Journal* 28.4 (2016): 355-379.
- [26] Farsangi, M. A. A., Cottone, F., Sayyaadi, H., Zakerzadeh, M. R., Orfei, F., & Gammaitoni, L. (2017). Energy harvesting from structural vibrations of magnetic shape memory alloys. *Applied Physics Letters*, 110(10), 103905.
- [27] Uzun, Y., & Kurt, E. (2013). The effect of periodic magnetic force on a piezoelectric energy harvester. *Sensors and Actuators A: Physical*, 192, 58-68.
- [28] Bruno, N. M., Ciocanel, C., Feigenbaum, H. P., & Waldauer, A. (2012). A theoretical and experimental investigation of power harvesting using the NiMnGa martensite reorientation mechanism. *Smart Materials and Structures*, 21(9), 094018.
- [29] Saren, A., Musiienko, D., Smith, A. R., Tellinen, J., & Ullakko, K. (2015). Modeling and design of a vibration energy harvester using the magnetic shape memory effect. *Smart Materials and Structures*, 24(9), 095002.
- [30] Hoang, N., Zhang, N., Li, W. H., & Du, H. (2013). Development of a torsional dynamic absorber using a magnetorheological elastomer for vibration reduction of a powertrain test rig. *Journal of Intelligent material systems and structures*, 24(16), 2036-2044.
- [31] Jing, Y., Luping, W., & Jin, X. (2020). Design and Implementation of Vibration Energy Harvester Based on MSMA Cantilever Beam. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 21(4), 399-405.
- [32] Yu, Y., Zhang, C., Wang, Y., & Zhou, M. < 110 > axes", *J. de Phys. IV*, vol. 112, pp. 939-942, 2003.
- [10] Hirsinger L., Creton N., Lexcellent C., "Stress-induced phase transformations in Ni-Mn-Ga alloys: experiments and modelling", *Mat. Sc and Eng. A*, vol. 378, pp. 365-369, 2004.
- [11] Murray S., Allen S., O'handley R., Lograsso T., "Magnetomechanical performance and mechanical properties of Ni-Mn-Ga ferromagnetic shape memory alloys", *SPIE Proceedings*, 2000.
- [12] O'handley R., Murray S. J., Marioni M., Nembach H., Allen S. M., "Phenomenology of giant magnetic- field- induced strain in ferromagnetic shape memory materials", *J. of Applied Phys.*, vol. 87, no. 9, pp. 4712-4717, 2000.
- [13] Tickle R., James R. D., Wuttig M., Kokorin V., "Ferromagnetic shape memory in the NiMnGa system.", *IEEE Transactions on magnetism*, vol. 35, no. 5, pp. 4301-4310, 1999.
- [14] Likhachev A., Ullakko K., "Magnetic-field-controlled twin boundaries motion and giant magneto-mechanical effects in Ni-Mn-Ga shape memory alloy", *Physics. Letters A*, vol. 275, pp. 142-151, 2000.
- [15] Richard M., Feuchtwanger J., Schagel D., Lograsso T., Allen S., O'handley R., "Crystal structure and transformation behavior of Ni-Mn-Ga martensites", *Scripta Materialia*, vol. 54, pp. 1797-1801, 2006.
- [16] Sozinov A., Likhachev A., Lanska N., Ullakko K., "Giant magnetic-field-induced strain in NiMnGa seven-layered martensitic phase", *Applied Physics Letters*, vol. 80, pp. 1746-1748, 2002.
- [17] Jiang C., Liang T., Xu H., Zhang M., Wu G., "Superhigh strains by variants reorientation in the nonmodulated ferromagnetic NiMnGa alloys", *Applied Physics Letters*, vol. 81, no. 15, pp. 2818-2820, 2002.
- [18] Lexcellent, Christian. *Shape-memory alloys handbook*. John Wiley & Sons, 2013.
- [19] Ball J. M., James R. D., "Fine phase mixtures as minimizers of energy", *Arch. Rat. Mech. Anal.*, vol. 100, pp. 13-52, 1987.
- [20] *Magnetic Shape Memory Alloy—Introduction, Properties and Applications*, Azo Materials, 2014.
- [21] [https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic\\_shape\\_memory\\_alloy](https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_shape_memory_alloy), 2020.





(2021). Neural-Network-Based Iterative Learning Control for Hysteresis in a Magnetic Shape Memory Alloy Actuator. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 27(2), 928-939.

# **Investigating the Effect of Nickel Oxide on the Microstructure and Mechanical Properties of Zirconia Theoretical Foundations Morphology New Technology of Smart Materials with Magnetic Shape Memory Alloys and Their Application in Various Industries**

Hossein Habibi<sup>1\*</sup>, Farhad Nazarizadeh<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Phd student futures studies, faculty of industry, ivanaki university

<sup>2</sup> Assistant professor, department of technology and strategy, faculty of management and industrial engineering, malek ashtar university of technology

\* hosseinhabibi.phd@gmail.com

**Abstract:** Smart materials are those materials that can understand the environment and conditions around them and react to it. Magnetic memory alloys are a subset of smart materials whose shape and other mechanical properties change in response to magnetic and mechanical fields. Memory alloys in recent years due to their unique features such as high corrosion resistance, relatively high specific electrical resistance, relatively good mechanical properties, long fatigue, high plasticity and ability to adapt to the body in a wide range of Industries have been taken into consideration. These alloys are smart materials that can remember their original shape after being deformed. The purpose of presenting this article is to familiarize, use and examine the properties of magnetic memory materials. In fact, by presenting several studied models, structural equations, properties, their application in different fields and diagrams, we have tried to investigate these materials and addressed their existing challenges. One of the most important quantitative results of these materials is the magnetic memory effect of up to 6% increase in length, frequency response of 1-2 KHZ, power density of 2 Mpa, magnetic field smaller than 0.8T and Curie temperature of about 95-105°C, which is the necessity of using this material. It describes materials in different industries.

**Keywords:** Theoretical foundations, Morphology, Magnetic shape memory alloys, Application.