فصلنامه آموزش مهندسی ایران، سال سیزدهم، شماره ۴۹، بهار ۱۳۹۰، صص. ۱۵۱-۱۳۱

بررسی وضعیت مواد نو و کاربردهای آن در ایران و چند کشور جهان*

محمود شاکری[۱]، سروش صادق نژاد لیموئی[۲] و حمید شهسواری علویجه[۳]

چکیده: پیشرفت روزافزون بشر، استفاده از مواد نو را به امری اجتناب ناپذیر و غیرقابل انکار بدل کرده است. شاید بشر دیروز هرگز نمی‌توانست تصور کند که روزی این مواد بتوانند چنین نقش کلیدی را در زندگی وی ایفا کنند. امروزه دیگر فلزاتی نظیر آهن و مس نمی‌توانند به تنهایی پاسخگوی نیازهای بشر باشند، و بالطبع رفع کردن این نیازها مستلزم تمرکز بیش‌تر بر تحقیق و بررسی در زمینه مواد نو است. یقیناً افزایش دانش جوامع علمی و صنعتی کشور در رابطه با مواد نو مهندسی مقدمه‌ای برای گسترش کاربرد این مواد و سود جستن از ویژگیهای فوق العاده آنها در قسمتهای مختلف زندگی است. به همین منظور در این مقاله به بررسی مواد نو پرداخته شده است. مواد نو به طور کلی به پنج دسته کلی طبقه‌بندی شده است. این طبقه‌بندی شامل، مواد هدفمند، مواد هوشمند، آلیاژهای حافظه‌دار، مواد مرکب و نانو موادها است. در این مقاله ابتدا ساختار و به دنبال آن کاربردهای مواد نو به صورت خلاصه مرور شده، و در ادامه آمار مقالات و اختراعات به ثبت رسیده در کشورهای مختلف طی سالیان اخیر مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان، از این آمار، نتایجی مانند سطح کمی و کیفی دانش مواد نو، میزان استقلال کشورها در زمینه دانش مواد نو و ... استخراج شده است.

واژه‌های کلیدی: مواد نو، تحقیق و بررسی، ساختار مواد نو، کاربردهای مواد نو، مقالات و اختراعات، دانش مواد نو.

---

* این پژوهش با حمایت مالی فرهنگستان علوم ج. ا. ا. انجام شده است.

۱. استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ایران، تهران. Shakeri@aut.ac.ir

۲. کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ایران، تهران. S.Sadeghnejad@aut.ac.ir

۳. کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ایران، تهران. H.Shahsavari@aut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۸/۱۹)

(پذیرش مقاله:۱۳۹۰/۲/۲۱)

۱. مقدمه

منظور از مواد نو، آن دسته از مواد مهندسی هستند که در سالهای اخیر به شدت توسعه یافته و دریچه‌ای تازه در مقابل بشر گشوده‌اند. نانو مواد، سرامیکهای پیشرفته، مواد هدفمند و آلیاژهای حافظه دار از جمله مواد مهندسی جدید هستند. ویژگیهای منحصر به فرد این مواد مانند استحکام و سختی بالا، انعطاف پذیری و مقاومت به سایش مطلوب، خواص الکتریکی و مغناطیسی جالب و منحصر به فرد منجر به افزایش علاقه و توجه به این مواد شده است. بسیاری از این مواد صنایعی چون هوا فضا، الکترونیک، اتومبیل‌سازی، پزشکی و... را متحول کرده و در آینده نزدیک نیز از کاربرد آنها بیشتر شنیده خواهد شد. با کاربرد این مواد می توان محصولات کوچک‌تر، سبک تر، هوشمندتر و چند منظوره‌تر تولید کرد [۱].
به طور کلی مواد نو را می‌توان به پنج دسته کلی تقسیم بندی کرد که عبارتند از:

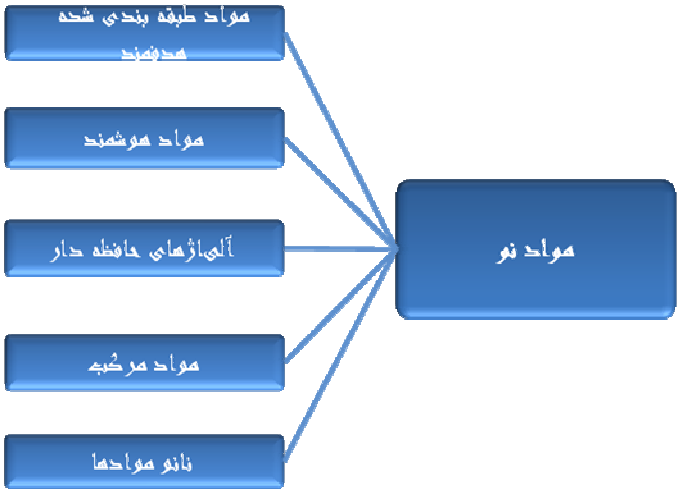
- مواد هدفمند[۱]
- مواد هوشمند[۲]
- آلیاژهای حافظه‌دار[۳]
- مواد مرکب[۴]
- مواد نانو[۵]

مواد هدفمند جزء موادی محسوب می‌شوند که خواص آنها در یک یا دو جهت بر اساس تابعی از قبل تعیین شده و به طور پیوسته تغییر می‌کند. این گونه مواد در حالی که معمولاً ترکیبی از مواد سرامیکی و فلزی هستند، به نظر می‌رسند که کارآیی مطلوب هرکدام از مؤلفه‌های تشکیل دهنده خود را دارند. به عنوان مثال در ترکیبات سرامیک ـ فلز علاوه بر آنکه مقاومت در مقابل خوردگی یا حرارتی سرامیکها را دارند، از استحکام و مقاومت مکانیکی فلزات نیز بهره برده‌اند. به طور کلی مواد هوشمند به آن دسته از مواد گویند که می‌توانند محیط و شرایط اطراف خود را درک کنند و به آن واکنش نشان دهند. هم اکنون فلزات و کامپوزیتهای هوشمند در موارد بسیاری کاربرد و جایگاه خود را در صنعت پیدا کرده‌اند.

---

1. Functionally Graded Materials
2. Smart Materials
3. Shape Memory Alloys
4. Composite Materials
5. Nano Materials

آلیاژهای حافظه‌دار، دارای دو ویژگی اساسی هستند: یکی اینکه تا حدودی الاستیک هستند و دیگر آنکه حافظه دار هستند. یعنی قابلیت ذخیره سازی انرژی مکانیکی و نیز آزاد سازی 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 چیده‌مان مجدد دارند، قابلیت بازگشت به شکل اولیه را دارند. البته لازم به ذکر است که در بسیاری از موارد آلیاژهای حافظه‌دار را به صورت زیر مجموعه از مواد هوشمند در نظر می‌گیرند[۲].



شکل ۱: طبقه بندی مواد نو [۲]

در مهندسی مواد، کامپوزیت یا ماده مرکب معمولاً به موادی گفته می‌شود که از یک فاز زمینه (ماتریس) و یک تقویت کننده (الیاف) تشکیل شده باشند. طبق تعریف انجمن متالورژی آمریکا، به ترکیب ماکروسکوپی دو یا چند ماده‌ی مجزا که سطح مشترک مشخصی بین آنها وجود داشته باشد، ماده مرکب گفته می‌شود. کامپوزیت از دو قسمت اصلی ماتریس و تقویت کننده تشکیل شده است. ماتریس با احاطه کردن تقویت کننده آن را در محل نسبی خودش نگه می‌دارد. تقویت کننده موجب بهبود خواص مکانیکی ساختار می‌شود.

علم همواره از دو دید ماکروسکوپی و میکروسکوپی تحولات جهان را هدف قرار داده است و در هر دو جهت با بی‌صبری به پیش می‌تازد. در جهان ماکروسکوپی مولکولها، اتمها و در نهایت ذرات بنیادی مورد پژوهش قرار می‌گیرند. اما آنچه که اخیراً موجب حیرت دنیای علم شده است، نتایج حاصل از تحقیقات دنیای میکروسکوپی است که باعث تکوین دانش نوینی بنام فناوری نانو شده است. گستره کاربردی این فناوری جوان در اندک زمان از صنایع دارویی و غذایی تا صنایع الکترونیک، کامپیوتر، ارتباطات، حمل و نقل، انرژی، محیط زیست و ... را در بر گرفته است[۳].

نانو مواد به این معناست که موادی با ابعاد ساختاری که حداقل یک بعد را در مقیاس نانو داشته باشند. از لحاظ کمی، یک نانومتر دارای ابعادی معادل 10^{-9} متر است. نانو مواد با موادی سروکار دارد که ذراتی در مقیاسی که گفته شد دارند و ویژگیهای جدیدی را از خود نشان می‌دهند که با ویژگیهایی که تاکنون از مواد شناخته شده است، متفاوت هستند. نانو مواد در واقع پلی است میان دنیای اتمها و ملکولها و مقیاسهای بالاتر و فراتر در حد ماکرو و به همین دلیل ویژگیهایی خاصی دارند که تا پیش از آن شناخته نشده بود.

۲. پیدایش مواد نو

مواد نو افق تازه‌ای از علم را در برابر بشر گشوده‌اند و توجه به آنها رویاهای دیرینه‌ای از بشر را تحقق خواهد بخشید. جهانی که از تحریک کننده‌ها و حسگرهای شبکه شده اشباع باشد، نوید دهنده بهبود، بهینه‌سازی و مشتری‌گرایی سیستمهای حسگر از طریق دسترسی بیشتر به اطلاعات و تحریک‌پذیری هر چه مستقیم‌تر است. ارتباطات قابل دسترس مستمر، فهرست‌بندی و مکان‌یابی اقلام شخصی برچسب‌دار(برچسبهای الکترونیکی، شیمیایی و غیره) و هماهنگی کارکردهای پشتیبان، دستاوردهایی هستند که تا سال ۲۰۱۵ به تدریج تحقق خواهند یافت. توسعه مداوم حسگرهای بیومتریک پنهان و ریز، همراه با تحقیق پیرامون شناسایی صدا و دست‌خط و اثر انگشت، به اثربخشی سیستمهای ایمنی فردی می‌انجامد. از این سیستمها می‌توان برای مقاصد پلیسی، نظامی، سازمانی، شخصی و تفریحی استفاده کرد. با ترکیب این سیستمها و فناوریهای اطلاعات امروزی، بسیاری از دغدغه‌ها پیرامون مسائل امنیتی و حریم خصوصی افراد مرتفع خواهد شد.

برخی کاربردهای مواد نو که احتمالاً تا سال ۲۰۱۵ میلادی تحقق خواهند یافت عبارتند از :

- لباسهایی که به شرایط مختلف آب و هوایی حساس‌اند، با سیستمهای اطلاعات تعامل دارند، علائم حیاتی را کنترل می‌کنند، قادر به ترشح مواد دارویی هستند و جراحات را به طور خودکار محافظت می‌کنند؛

- ایرفویل‌هایی که خود را با شرایط آب و هوایی سازگار می‌کنند؛
- ساختمانهایی که خود را با شرایط آب و هوایی سازگار می‌کنند؛
- پلها و جاده‌هایی که ترک را احساس و آن را مرمت می‌کنند؛
- آشپزخانه‌هایی که با دستورات بی‌سیم آشپزی می‌کنند؛
- تلفنها و مراکز تفریحی که از روشهای "واقعیت مجازی" استفاده می‌کنند؛
- تشخیص پزشکی شخصی (احتمالاً در تعامل مستقیم با مراکز درمانی).

افزایش عملکرد مواد، چه در منابع انرژی (مثل باتریها) و چه قابلیتهای حسگری و تحریک‌پذیری و همچنین یکپارچه‌سازی این عملکردها با قدرت محاسبات کامپیوتری، راه ظهور کاربردهای یاد شده را هموارتر خواهد ساخت. این روندهای بالقوه، دغدغه‌ها و تنشهایی نیز به همراه خواهد داشت. اطلاعات حسگری و دسترسی به پایگاه‌های داده‌ای، نگرانیهایی را پیرامون حریم خصوصی افراد ایجاد می‌کنند. سرانجام اینکه، آهنگ توسعه مواد نو احتمالاً به سطوح سرمایه‌گذاری و پیشرانهای بازار بستگی خواهد داشت. در بسیاری موارد منافع و صرفه‌جوییهای آنی ناشی از کاربرد مواد هوشمند، پیشران توسعه خواهند بود، اما نباید تردید داشت که تحقیقات نامتعارف مواد، نیازمند حمایت افکار عمومی و ایمان به سرمایه‌گذاریهای بلند مدت‌تر است.

چنانکه ملاحظه می‌شود فناوری مواد نو، فناوری کم اهمیت و با کاربردهای محدودی نیست. این فناوری، برحسب آنکه چه زمانی به مراحل رشد سریع خود در بازار برسد، تحولات وسیعی را در کاربردهای مختلف خود به همراه خواهد داشت. برای نمونه در بعد نظامی می‌تواند بسیاری از روشهای عملیاتی را دستخوش تحول کند.

۳. ساختمان مواد

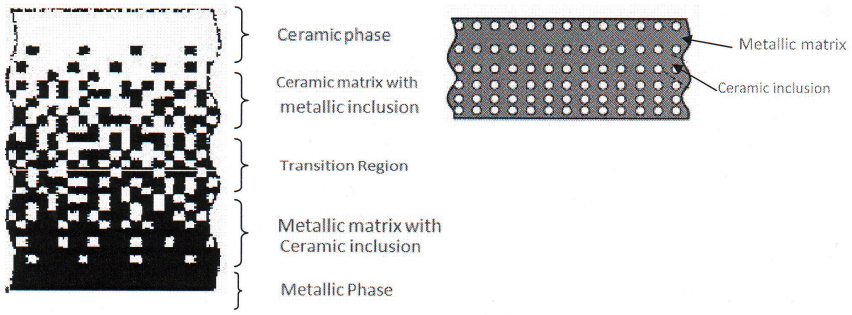
۳. ۱. ساختمان مواد هدفمند

مواد هدفمند(FGM) جزء مواد کامپوزیتی محسوب می‌شوند، که خواص آنها در یک یا دو جهت براساس تابعی از قبل تعیین شده و به طور پیوسته تغییر می‌کند. مواد FGM معمولا ترکیبی از مواد سرامیکی و فلزی هستند. این گونه مواد به نظر می‌رسند که کارآیی مطلوب هرکدام از مؤلفه‌های تشکیل دهنده خود را دارا هستند. برای مثال در ترکیبات سرامیک ـ فلز علاوه بر آنکه مقاومت خوردگی یا حرارتی سرامیکها را دارا هستند، از استحکام و مقاومت مکانیکی فلزات نیز بهره برده‌اند[۴]. نوع رایج آن ترکیب پیوسته‌ای از سرامیک و فلز است. این مواد از مخلوط پودر فلز و سرامیک به دست می‌آیند. تغییر فلز و سرامیک از یک سطح به سطح دیگر کاملا پیوسته است. به گونه‌ای که یک سطح

از جنس سرامیک خالص و یک سطح فلز خالص است. بین دو سطح ترکیب پیوسته‌ای از هر دو است. خواص مکانیکی نیز با توجه به نوع ترکیب، تغییرات پیوسته‌ای در جهت ضخامت دارد. این مواد با توجه به پیوستگی ترکیب مواد تشکیل دهنده دارای خواص مکانیکی مؤثری نسبت به مواد کامپوزیت لایه‌ای است[۴].

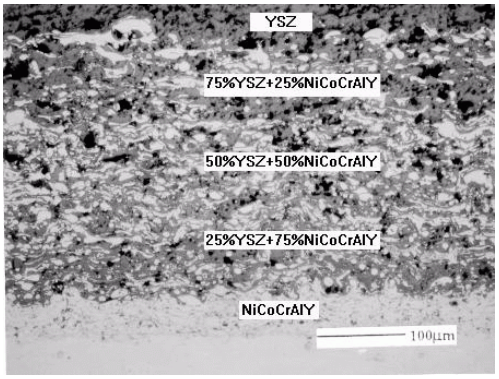
این مواد در ساخت صفحات و پوسته‌های مخازن رآکتورها، توربینها ودیگر اجزای ماشینها کاربرد بالایی دارند، زیرا این قطعات آمادگی بالایی جهت واماندگی ناشی از کمانش حرارتی دارند. از دیگر مزایای مواد FGM نسبت به مواد کامپوزیت لایه‌ای، عدم گسستگی در محل اتصال لایه‌ها است، زیرا همان‌طور که گفته شد در مواد FGM ترکیب سرامیک و فلز پیوسته می‌باشد[۴].

جزء فلزی مواد FGM می تواند آلومینیوم، مس، کرم، نیکل و یا سرب باشد. قسمت سرامیک نیز می‌تواند از جنس سرامیک بدون اکسید ـ بدون فلز مانند SiC, Si_3N_4 ، سرامیکهای بدون اکسید ـ با فلز TiC, ZrC ، سرامیکهای با اکسید ـ بدون فلز SiO_2 و یا سرامیک‌های با اکسید ـ با فلز Al_2O_3 و ZrO_2 انتخاب شود[۵].



شکل ۲: میکروساختار FGM [٦]

در شکل ۲ انواع میکروساختارها نشان داده شده است که در آنها خواص مکانیکی و گرمایی به صورت پیوسته یا گسسته در مقیاس بزرگ یا کوچک تغییر می‌کنند[۷]. شکل ۳ نمونه‌ای از ماده هدفمند با ساختار پیوسته را نشان می‌دهد.



شکل ۳: نمونه‌ای از یک ماده هدفمند پیوسته ساخته شده از روش پاشش پلاسما [۸]

۳. ۲. ساختمان مواد هوشمند

مواد هوشمند به عنوان حسگر می‌توانند متغیرهایی همچون جا به جایی، کرنش، شتاب یا سایر تغییرات مکانیکی در یک سازه را اندازه‌گیری کنند و به عنوان عملگر موجب تغییرات مکانیکی شوند. انواع مواد هوشمند را بر مبنای نوع تبدیل انرژی که صورت می‌گیرد چنین دسته بندی می‌کنند[۱۰ و۹]:

- الکترو مکانیکی: مواد پیزوالکتریک، مواد الکترواستریکتیو، سیالات الکترورئولوژیکال؛
- مکانیکی ـ مغناطیسی: مواد مگنواستریکتیو، سیالات مگنتورئولوژیکال؛
- مکانیکی ـ نوری: فیبرهای نوری؛
- مکانیکی ـ حرارتی: آلیاژهای حافظه دار.

پیزو الکتریسیته در واقع اثری متقابل میان تنش (کرنش) و میدان الکتریکی (ولتاژ) است. این پدیده در مواردی که بلورهایشان تقارن مرکزی ندارد دیده می‌شود. این غیر ایزوتروپ بودن باعث می‌شود که در نبود میدان الکتریکی هم قطبیت حفظ شود. آنچه پیزوالکتریسیته را از الکترواستریکتیو مجزا می‌کند این است که مواد پیزوالکتریک می‌توانند هم افزایش و هم کاهش طول متناسب با جهت میدان داشته باشند[۱۱].

مواد الکترواستریکتیو موادی هستند که با قرارگیری در میدان الکتریکی دچار کرنش می‌شوند. تمام دی الکتریکها دارای چنین خاصیتی هستند اما فقط در دی‌الکتریکهای بسیار قوی نظیر پی. ام. ان قابل مشاهده است (حداکثر کرنش ۰/۱ ٪). شبکه کریستالی این مواد دارای تقارن مرکزی است[۱۱].

سیالات الکترورئولوژیکال دسته دیگری از مواد هوشمند هستند. در این سیالات ویسکوزیته تابعی از میدان الکتریکی است. این سیالات حاوی ذرات دی الکتریک با توزیع اتفاقی هستند. در حضور میدان الکتریکی این ذرات به دنبال هم قرار گرفته‌اند و ساختار زنجیره شکلی را درست می‌کنند. این امر باعث افزایش بسیار زیاد ویسکوزیته و ایجاد تغییرات در سایر خواص سیال می‌شود[۱۱].

مواد مگنواستریکتیو هرگاه در یک میدان مغناطیسی قرار گیرند دچار کرنش می‌شوند، و اگر تحت تنش باشند، تولید جریان الکتریکی می‌کنند به همین دلیل به عنوان حسگر و عملگر می‌توانند به کار روند. تعدادی از مواد، دارای چنین خاصیتی هستند اما اثر اکثر آنها ضعیف است. تنها آلیاژ ترفنول دی به صورت قابل قبول کرنش تا حد ۰/۲٪ می‌تواند تولید کند. علیرغم توانایی خوب این مواد برای استفاده در عملگرها، به دلیل خاصیت ذاتی غیر خطی بودن این مواد و مشکل مدلسازی و تحلیل آنها، کاربرد آنها محدودیت دارد. به علاوه برای استفاده از آنها در سازه‌ها نیاز به تجهیزات مخصوص است[۱۱].

حسگرهای فیبر نوری از جدیدترین نمونه‌های مواد هوشمند هستند. این فیبرها به دلیل قطر نسبتاً کمی که دارند به آسانی می‌توانند درون سازه قرار گیرند. در عمل یک منبع نور سیگنالهایی را به درون یک شبکه از فیبرهای قرار گرفته در ماده میزبان می‌فرستند. این سیگنالها در طرف دیگر جمع آوری و تجزیه و تحلیل می‌شوند. هر تغییر مکانیکی در سازه موجب تغییراتی در سیگنالهای عبوری می‌شود. این تغییرات شامل تغییر فاز، پلاریزاسیون فرکانس، طول موج، شدت و... است. این حسگرها جدای از اندازه‌گیری متغیرهایی مثل کرنش کاربرد وسیعی در سیستمهای سلامتی سازه مثل تشخیص ترک و... یافته‌اند[۱۱].

۳. ۳. ساختمان آلیاژهای حافظه‌دار

برای شناخت ترمودینامیکی و مکانیکی آلیاژهای حافظه‌دار Ti- Ni آزمایشاتی از قبیل اندازه‌گیری مقدار گرما برای انتقال فاز، مقدار کرنش قابل بازیافت، عمر و ضریب میرایی آلیاژ باید انجام پذیرد. برای مطالعه بر روی این آلیاژها و ارائه ترکیب آلیاژهای جدید و ساخت این‌گونه آلیاژها آزمایشات مختلف از جمله ذوب، بررسی فرآیند انجماد، انجام عملیات نورد، انجام عملیات حرارتی و تستهای متالوگرافی انجام می‌گیرد[۱۲].

۳. ۳. ۱. خاصیت حافظه‌داری شکلی

اثر حافظه شکلی عبارت است از قابلیت بازیافت یک شکل معین وقتی که به آلیاژ تا دمای معینی حرارت داده شود. در درجه حرارتهای پایین که آلیاژ در فاز مارتنزیت قرار داشته و در این فاز دارای حد جاری شدن پایینی است، به سادگی تغییر شکل یافته و در شکل جدید باقی می‌ماند. اما اگر در این

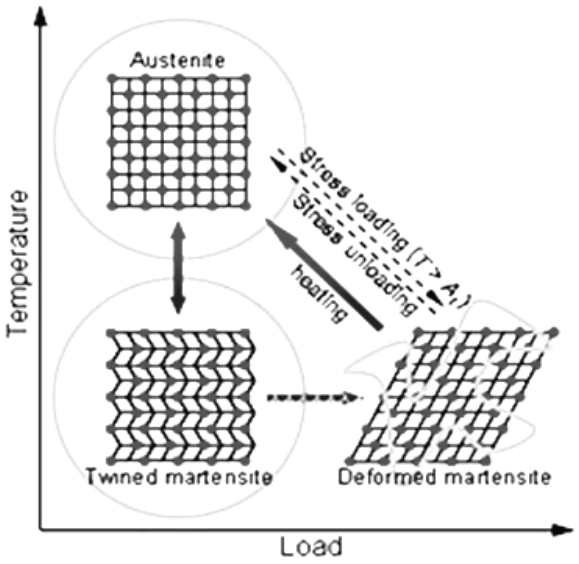
حالت به آن حرارت داده شود، به طوری که دمای آن از حد معینی فراتر رود در آن فاز مارتنزیت به فاز آستنیت تبدیل می‌شود (شکل ۴). در این حین یک تغییر ساختار کریستالی در آلیاژ رخ می‌دهد که باعث می‌شود آلیاژ به شکل و ابعاد اولیه‌اش باز گردد [۱۳].

شکل ٤: پدیده حافظه‌داری شکل با تبدیل دو فاز آستینت و مارتنزیت به یکدیگر [١٤].

تغییر حالت متالورژیکی نمونه جامد، تغییر آرایش اتمها بدون هیچگونه تغییری در ترکیب شیمیایی فاز زمینه را نشان می‌دهد. این تغییر آرایش منجر به ایجاد ساختار کریستالی فازی جدید و پایدار می‌شود. تغییر حالت بدون نیاز به حرکت و جا به جایی اتمها به صورت مجزا، را می‌توان مستقل از زمان دانست و به همین دلیل می‌توان وابستگی دما را به عنوان تنها عامل پیشرفت این تغییر نشان داد[۱۴].
تغییر حالت متالورژیکی جامدات به دو طریق زیر امکان پذیر است. (شکل ۵)

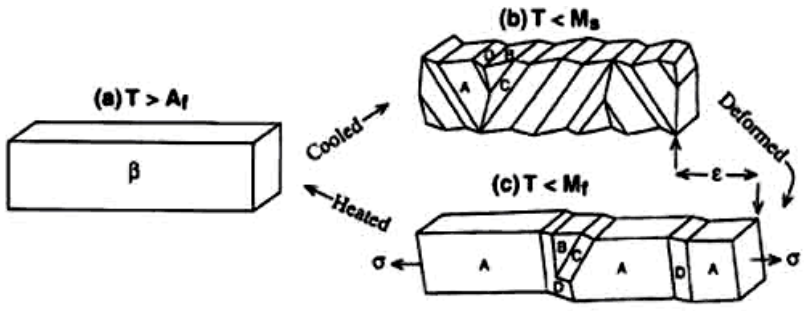
- حرکت و جابجایی اتمها وابسته به درجه حرارت و زمان با تغییر در ترکیب شیمیایی فاز جدید نسبت به زمینه قبلی؛
- تغییر آرایش اتمی به صورت هماهنگ وابسته به دما و بدون وابستگی به زمان و هیچ گونه تغییری در ترکیب شیمیایی فاز جدید نسبت به زمینه قبلی[۱۵]؛

در استحاله مارتنزیتی مانند هر تغییر حالت دیگر، درجه حرارت و تنش، متغیرهای ترمودینامیکی خارجی مؤثر بر استحاله هستند[۱۶]. SMAها دارای دو فاز کریستالی شناخته شده‌ی آستینت و مارتنزیت هستند. (شکل ۶) مارتنزیت فازی است که در حالت بدون تنش تنها در دمای پایین پایدار است. علاوه بر آن این فاز می‌تواند بر اثر تنشها ایجاد شود. مارتنزیت می‌تواند به آسانی تغییر شکل یابد و به کرنش‌های زیاد در حد ۸٪ برسد. اگر مارتنزیت بر اثر دما ایجاد شود، مارتنزیت دوقلو نامیده می‌شود که دارای ۲۴ نوع مختلف دارد[۱۷].



شکل ٥: تغییر حالت متالورژیکی نمونه جامد [١٤]

تغییر حالتهای مارتنزیتی به طریقه دوم مرتبط است. در حافظه دار شدن نظم اتمهای آلیاژ نباید به هم بخورد.[۱۳]



شکل ٦: a) تک کریستال آستنیت، b) تشکیل واریانتهای A,B,C,D در اثر سرد شدن نمونه زیر دمای Mf، c) رشد واریانت A در اثر حذف واریانتهای دیگر[۱۹].

فاز آستنیت تنها در دمای بالا پایدار است و تنها یک نوع دارد. تغییر فاز مارتنزیتی رفتار بازیابی شکل SMA را ایجاد می‌کند. این تغییر در محدوده دمایی خاصی که بستگی به درصد شیمیایی مواد مختلف آلیاژ دارد، بوجود می‌آید. در این مواد چهار دمای تغییر حالت می‌تواند تعریف شود. Mf, Ms که دمای شروع و پایان تشکیل فاز مارتنزیت است و Af, As که دمای شروع و پایان فاز آستینت است [۱۷].

٤. کاربردهای مواد نو

کاربردهای مواد هدفمند رو به افزایش است. به طور کلی مواد FGM از لحاظ کاربرد در زمینه‌های مختلف قابل بررسی است که می‌توان به صنایع هوافضا، ابزار صنعتی، الکترونیک نوری، سیستمهای تولید انرژی، پزشکی و غیره اشاره کرد.

مواد هوشمند نیز به عنوان دسته‌ی دیگری از مواد نو دارای کاربردهای منحصر به فرد خود است. فواید استفاده از مواد هوشمند را می‌توان چنین طبقه بندی کرد [۱۸]:

- تفکیک‌پذیری بی‌نهایت کوچک: یک عملگر می‌تواند جا به جاییهایی تا کمتر از یک نانومتر ایجاد کند، کوچکترین تغییر در ولتاژ، حرکتهای بسیار ملایمی را ایجاد می‌کند؛
- تولید نیروی بزرگ: عملگرها می‌توانند نیرویی به بزرگی چند ده کیلونیوتن با همان دقت زیاد ایجاد کنند؛

- پاسخ سریع: عملگرها سریع‌ترین پاسخ زمانی را از خود نشان می‌دهند که در حد میکروثانیه است؛
- عدم حساسیت به میدان مغناطیسی: عملگرها نه میدان مغناطیسی تولید می‌کنند و نه از آن اثر می‌پذیرند؛
- مصرف کم انرژی: در حالت استاتیکی حتی با تحمل بارهای سنگین مصرف انرژی صفر است و در حالت دینامیکی، فقط در طول زمان حرکت، انرژی کمی مصرف می‌کنند؛
- عدم وجود سایش و فرسایش: عملگرها نه دارای چرخ دنده‌اند و نه محور دوار دارند لذا پتانسیل چندین میلیارد سیکل بدون تغییر کارایی را دارند؛
- قابلیت سازگاری با خلاء و اتاق تمیز (Cleaning Room) در دماهای بسیار پایین: چون این عملگرها نیاز به روغن کاری ندارند و در دمای صفر نیز خاصیت آنها تغییر نمی‌کند لذا برای اتاق تمیز بسیار مناسب هستند.

با توجه به فواید استفاده از مواد هوشمند، می‌توان به تعدادی از کاربردهای این دسته از مواد در صنعت اشاره کرد:

- کاربرد در صنعت اندازه گیری نور و فوتون شامل: تثبیت تصویر، عکس برداری اتوماتیک، سیستم تمرکز اتوماتیک، هموگرافی، تحریک ارتعاش؛
- کاربرد در دیسک گردان شامل: تست ام آرهد، پایه‌های چرخشی دیسک، از بین بردن ارتعاش؛
- کاربرد در فیلروالکتریک شامل: اندازه‌گیری در حد نانو، سیستم‌های بازرسی، میکرولیتوگرافی، از بین بردن ارتعاش؛
- کاربرد در مهندسی مکانیک دقیق شامل: از بین بردن ارتعاش، تغییرشکلهای ساختاری، تنظیم ابزار، چکشهای پیزو، کنترل لبه چاقو در ابزار برش، میکروپمپها، سیستم حکاکی ریز، تولید موج شوک، رباتیک.

کاربردهای عمده و متداول آلیاژهای حافظه‌دار که به واسطه‌ی خواص استثنایی و منحصر به فرد آن روز به روز گسترده‌تر و بیش‌تر می‌شود، عبارتند از:

- کاربردهای آلیاژهای حافظه‌دار در رباتیک
- موتورهای میل‌لنگ‌دار
- ربات جمع‌آوری‌کننده زباله در اعماق دریا
- موتورهای توربینی

- حرکت ربات خرچنگی
- کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار در صنایع هوافضا
- افشانک خروجی موتورهای توربینی گازسوز
- اتصال لوله‌ها و چفتها
- سپرهای محافظ
- کاربرد آلیاژ حافظه‌دار در موتور حرارتی
- کاربرد در لرزه‌گیر ساختمان
- موتورهای گرانشی
- کاربرد در MEMS
- میکروپمپها
- میکرو چنگکها
- میکروگیرها
- میکروسنسورها و میکروسوئیچها
- ابزارهای کنترل غیرفعال سازه‌ها

از سایر کاربردهای تجاری این نوع مواد می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تهویه مطبوع تلفیقی
- محفظه‌های خشک‌کن خودکار
- قلمهای ثبات
- سوئیچها و فیوزهای دما

از کاربردهای آلیاژهای حافظه دار در پزشکی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- صفحات جااندازی استخوان
- فاصله اندازها[۲]
- اسپلینت برای بهبود انحراف انگشت شست پا[۴]
- سیستم عروقی (قلبی ـ رگی)[۵]
- میخهای میانی (مغزی)[۶]
- صفحات فکی[۱].
- بستها[۳]
- مطالعه بیماری‌ای معده و روده
- دندانپزشکی (ارتدنسی)
- تصحیح انحراف غیر طبیعی ستون فقرات

۵. آمار مقالات ارائه شده مواد پیشرفته در دنیا

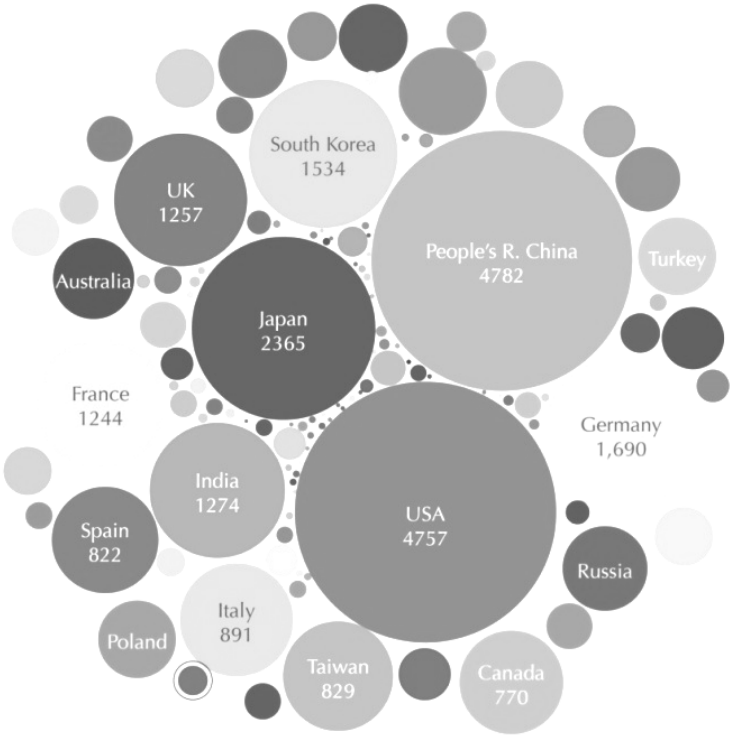
در سالهای ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ در مجموع ۲۵۳۹۷ مقاله در کل جهان در زمینه مواد پیشرفته چاپ شده است. شکل ۷، تعداد مقالات چاپ شده در سالهای ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ توسط کشورهای مختلف در زمینه مواد پیشرفته را نشان می‌دهد. کشور چین با تولید ۴۷۸۲ مقاله، از لحاظ تعداد، بیشترین تولید علم را در این زمینه داشته است. آمریکا با تولید ۴۷۵۷ مقاله در جایگاه دوم و ژاپن و آلمان هم به ترتیب با

---

1. Jaw Plates
2. Spacers
3. Staples & Clamps
4. Splint for Hallux Valgus
5. Cardiovascular
6. Medullary Nails

۲۳۶۵ و ۱۶۹۰ مقاله مقامهای بعدی را دارند. لازم به ذکر است که این آمار تنها بر اساس مقالات چاپ شده در ژورنال‌های ISI می‌باشد و موارد دیگر را شامل نمی‌شود.

همان طور که از جدول ۱ مشاهده می‌شود، تحقیقات و پیشرفت[۱] در زمینه مواد مرکب و کامپوزیتی[۲] سهم قابل توجهی از مقالات که حدود ۷۸۸۶ مقاله می‌باشد را به خود اختصاص داده است که به دنبال آن مقالات با موضوعیت پلیمرها و فناوری ساخت آنها[۳] با ۵۲۸۳ عدد است. فلزات و آلیاژها با ۳۵۴۰ مقاله، مواد هوشمند با ۳۲۹۶ مقاله، پوسته‌ها و غشاها با ۲۸۷۸ مقاله، سرامیک‌ها با ۲۳۸۲ مقاله و پوششها با ۱۴۲۳ مقاله از لحاظ تعداد مقاله، در جایگاههای بعدی قرار دارند.



شکل ۷: تعداد مقالات چاپ شده در زمینه مواد پیشرفته[۱]

---

1. R&D
2. Composite and Hybrid Material
3. Polymers and Polymer Processing Technologies

میانگین تأثیر مقالات[1] نوشته شده توسط یک کشور، با شمارش تعداد ارجاعات تمام مقالات به مقالات نوشته شده توسط نویسندگان آن کشور و نسبت این تعداد به تعداد مقالات چاپ شده توسط همان کشور محاسبه می‌شود. به عنوان نمونه چنانچه کشوری ۵۰ مقاله چاپ کند و ۱۰۰ مقاله در متن خود به یک یا تعدادی از این مقالات رجوع کرده باشند، میانگین تأثیر مقالات آن کشور برابر ۲ است. بین سالهای ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ کشور آمریکا بالاترین میانگین تأثیر مقالات را با ۱/۸۱ و به دنبال آن سنگاپور با ۱/۵۳ و انگلستان با ۱/۴۳ دارند. در جدول ۲ تعداد مقالات، تعداد ارجاعات آنها و میانگین تأثیر مقالات در زمینه مواد پیشرفته در تعدادی از کشورها آورده شده است.

جدول۱: تعداد مقالات در انواع مواد پیشرفته [مؤلف]

موضوعات	تعداد مقالات
Composite and Hybrid Materials	۷۸۸۶
Polymers and Polymer Processing Technologies	۵۲۸۲
Metals and Alloys	۳۵۴۰
Smart Materials	۳۲۹۶
Membrane	۲۸۷۸
Ceramics	۲۳۸۲
Coatings	۱۴۲۳

در حقیقت تعداد ارجاعات به مقالات نوشته شده توسط محققان یک کشور نشان دهنده میزان تأثیرگذاری آن کشور در زمینه مواد پیشرفته در کل جهان است. شکل ۸ میزان تأثیرگذاری هر کشور نمایش داده شده است.

مقالات تحقیقاتی و توسعه‌ای در زمینه مواد پیشرفته در هزاران دانشگاه و مؤسسه در بیش از ۱۲۰ کشور دنیا نوشته می‌شوند. یکی از تحقیقات دیگری که انجام شده است، بررسی میزان همکاری محققان در کشورهای مختلف در نوشتن مقالات است. این میزان همکاری به وسیله میانگین گرفتن تعداد آدرسهای نویسندگان یک مقاله به دست می‌آید . بنابراین هرچه این مقدار به عدد یک نزدیکتر باشد، نشان از استقلال بیشتر آن کشور در زمینه علوم مواد پیشرفته است. از لحاظ سطح همکاری

---

1 . Average Publication Impact

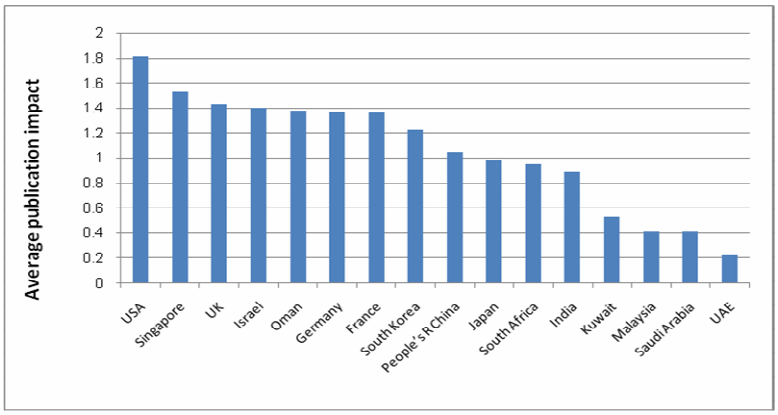
بین‌المللی، چین کمترین همکاری و کشور عمان بیشترین همکاری بین‌المللی را دارد، که این نشان دهنده این است که کشور چین در زمینه علم مواد پیشرفته، بیشترین استقلال و کشور عمان در این زمینه بیشترین وابستگی را دارد.

در شکل ۹، محور افقی میانگین سطح همکاری بین‌المللی، محور عمودی میانگین تأثیر مقالات و مساحت دایره‌ها نشان دهنده تعداد مقالات چاپ شده توسط یک کشور است.

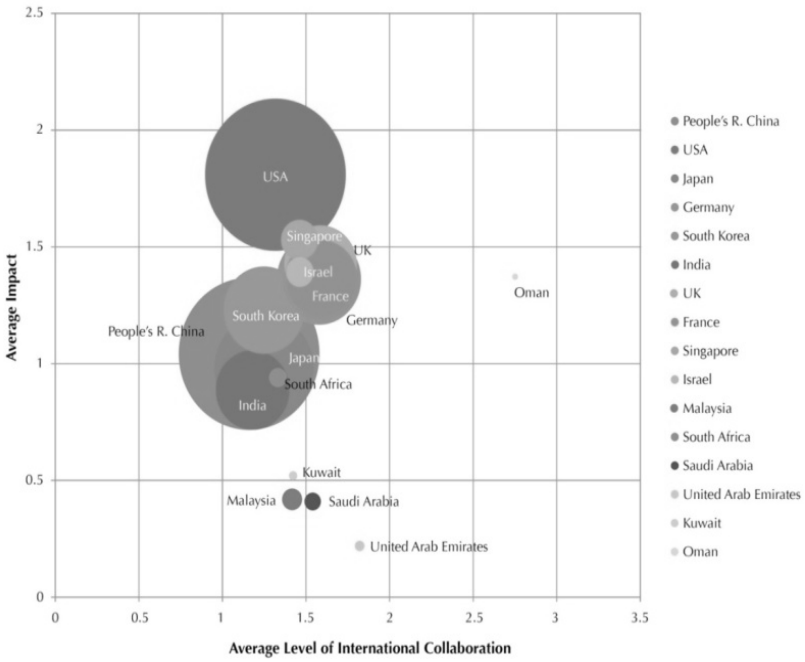
جدول ۲: تعداد مقالات، تعداد ارجاعات و میانگین تأثیر مقالات تعدادی از کشورها[۲]

کشور	تعداد مقالات	تعداد ارجاعات	میانگین اعتبار نشریه [1]
USA	۴۷۷۵	۸۶۰۷	۱/۸۱
Singapore	۳۲۹	۵۰۴	۱/۵۳
UK	۱۲۵۷	۱۷۹۵	۱/۴۳
Israel	۱۷۷	۲۴۷	۱/۴۰
Oman	۸	۱۱	۱/۳۸
Germany	۱۶۹۰	۲۳۰۷	۱/۳۷
France	۱۲۴۴	۱۶۹۷	۱/۳۶
South Korea	۱۵۳۴	۱۸۹۴	۱/۲۳
People’s R China	۴۷۸۲	۵۰۰۱	۱/۰۵
Japan	۲۳۶۵	۲۳۱۶	۰/۹۸
South Africa	۷۳	۶۹	۰/۹۵
India	۱۲۷۴	۱۱۳۶	۰/۸۹
Kuwait	۱۹	۱۰	۰/۵۳
Malaysia	۹۹	۴۲	۰/۴۲
Saudi Arabia	۶۷	۲۸	۰/۴۲
UAE	۲۲	۳	۰/۲۳

1. Average Publication Impact



شکل ۸: میانگین تأثیر مقالات با موضوعیت مواد پیشرفته در تعدادی از کشورها[۲]



شکل ۹: همکاری بین‌المللی و تأثیر مقالات برای کشورهای مختلف در سالهای ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷[۲]

۵. ۱. آمار اختراعات کار شده مواد پیشرفته دنیا

در بین سالهای ۲۰۰۲ و ۲۰۰۶، تعداد ۸۹۷۳ اختراع در زمینه مواد پیشرفته از همه کشورها به ثبت رسیده است. همان طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، آمریکا با ۴۹۸۸ اختراع در رتبه اول و به دنبال آن ژاپن با ۱۵۵۱ اختراع و آلمان و کره جنوبی به ترتیب با ۷۲۱ و ۳۸۶ اختراع در مقامهای بعدی قرار دارند.

لازم به ذکر است دلیل اینکه کشورهایی نظیر چین و روسیه به دو دلیل در این فهرست نیستند که عبارتند از:

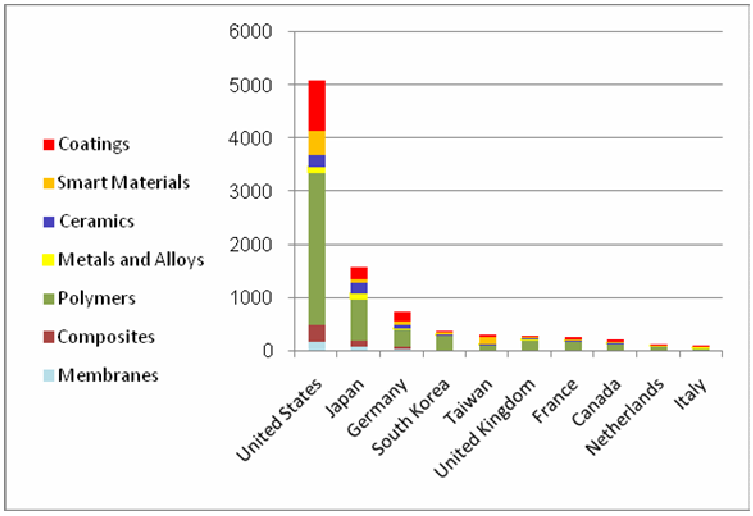
- بیشتر اختراعات این کشورها برای کاربرد نظامی است و به همین دلیل هیچ وقت به ثبت رسمی نمی‌رسند؛
- به دلیل نوع حکومت در این کشورها، بسیاری اطلاعات نظیر این‌گونه آمارها، هیچ وقت در دسترس عموم قرار نمی‌گیرد.

جدول ۳: دانشگاه و مؤسسه برتر از لحاظ تعداد مقالات ارائه شده در زمینه مواد پیشرفته[۲]

Country	Total	Membranes	Composite and Hybrid Materials	Polymers & Polymer Processing Technologies	Metals and Alloys	Ceramics	Smart Materials	Coatings
United States	۴۹۸۸	۱۷۹	۳۲۱	۲۸۴۴	۱۲۳	۲۳۲	۴۳۹	۹۶۴
Japan	۱۵۵۱	۸۳	۱۱۰	۷۷۴	۱۱۹	۱۹۶	۷۵	۲۲۲
Germany	۷۲۱	۲۸	۷۱	۳۲۱	۱۹	۶۲	۶۴	۱۷۱
South Korea	۳۸۶	۱۷	۴	۲۷۸	۹	۱۵	۴۶	۲۶
Taiwan	۳۱۶	۸	۸	۹۹	۱۱	۱۷	۱۳۲	۴۷
United Kingdom	۲۹۵	۱۳	۱۹	۱۹۱	۵	۱۱	۲۵	۳۴
France	۲۵۷	۱۱	۲۲	۱۵۴	۱۷	۵	۱۴	۳۹
Canada	۲۱۴	۱۹	۱۱	۱۱۵	۱۱	۶	۲۵	۳۲
Netherlands	۱۲۳	۵	۰	۱۰۰	۲	۳	۹	۷
Italy	۱۰۸	۱۲	۸	۴۷	۷	۱۷	۳	۱۶

همیشه مقالات در یک زمینه علمی، نشان از درک مفهوم آن زمینه است ولی اختراعات در یک زمینه خاص در یک کشور، نشان از میزان کاربردی شدن آن علم در همان کشور است. بنابراین با توجه به

شکل ۱۰ می‌توان به این نتیجه رسید که آمریکا در زمینه مواد پیشرفته از لحاظ کاربردی، فاصله بسیار زیادی با دیگر کشورها دارد.



شکل ۱۰: اختراعات ثبت شده در کشورهای مختلف در زمینه مواد پیشرفته[۳]

٦. نتیجه‌گیری

فناوری مواد نو، فناوری کم اهمیت و با کاربردهای محدودی نیست. این فناوری، برحسب آنکه چه زمانی به مراحل رشد سریع خود در بازار برسد، تحولات وسیعی را در کاربردهای مختلف خود به همراه خواهد داشت. برای نمونه در بعد نظامی می‌تواند بسیاری از روشها و تاکتیکهای عملیاتی را دستخوش تحول کند. برنامه علمی و تحقیقاتی روی مواد نو در کشورهای مختلف جهان شروع خوبی داشته است. در حال حاضر، طیف فرآیندها و کاربردهای مواد نو بسیار گسترده شده است و نتایج زیادی از گروه‌های تحقیقاتی در این زمینه منتشر می‌شود که حاوی نکات جالبی است. این تحقیقات می‌تواند در آینده نیاز صنعت را در انتخاب روشهای تولید و کاربردها پاسخگو باشد. در بین کشورهای پیشرفته در زمینه مواد نو، چین و آمریکا بیشترین تولید مقالات در این زمینه و آمریکا با اختلاف زیادی نسبت به سایر کشورها، دارای استقلال بیشتری در تولید علوم مواد نو است. از جنبه کاربردی مواد نو، در آسیا کشور ژاپن، در اروپا کشور آلمان و آمریکا با فاصله بسیار زیادی نسبت به این دو کشور، جایگاه نخست در دنیا را دارد.

مراجع

1. http://newmaterials.ir/

2. http://emerc.ir/index.php/fa/research/46/329

3. http://emerc.ir/index.php/fa/research/46/328

4. Somiya, Sh. (Editor-in-Chief) Aldinger, F., N. Claussen, M. Richard, K. Uchino, K. Koumoto, and M. Kaneno, **Handbook of Advanced Ceramics** (Vol. II Processing and their Applications), Elsevier Inc., 2003.

5. Jacek, J. Skrzypek, Artur, W. Ganczarski, F. Rustichelli and H. Egner, **Advanced Materials and Structures for Extreme Operating Conditions**, -Verlag Berlin Heidelberg, Springer, 2008.

6. http://www.grc.nasa.gov/WWW/RT/RT2000/5000/5920arnold3.html

7. Hirai, T., **Functional Gradient Materials. Processing of Ceramics**, pt. 2, vol. 17B, Richard J. Brook, et al., eds., Weinheim, New York, NY, 1996.

8. http://www3.ntu.edu.sg/mae/Research/Programmes/Adv_Materials/FGM.htm

9. Oh, S. Y.: "Therrmoelastic Modeling and Vibration of Functionally Graded Thin-Walled Rotating Blades", **AIAA Journal**, Vol. 41, 2051-2061, 2003.

10. Ling, Y. H., Li, J. T., Ge and C. C., Bai, X. D., **Fabrication and Evaluation of sic/cu Functionally Graded Material Used for Plasma Facing Components in a Fusion Reactor, J. of Nuclear Materials**, Vol. 303, 188-195, 2002.

11. Kambe, M. and H. Shikata, **Intensive Energy Density Thermoelectric Energy Conversion Ssystem by Using FGM Compliant Pads**, Acta Astronautic, Vol. 51, 161-171, 2002.

12. Machado, L. G. and M. A. Savi, **Medical Applications of Shape Memory Alloys**, Braz J Med Biol Res, Vol. 36 (6) 683-691 (Review), June 2003.

13. P. Sevilla, C. Aparicio, J. A. Planell, F.J. Gil, "Comparison of the Mechanical Properties Between Tantalum and Nickel–Titanium Foams Implant Materials for Bone Ingrowth Applications", **Journal of Alloys and Compounds,** 439, 67–73, 2007.

14. Machado L. G. and M. A, Savi, **Medical Applications of Shape Memory Alloys**, Braz, J. Med Biol Res, Vol. 36(6) 683-691 (Review), June, 2003,

15. Paul. K. Chu, **Plasma Surface Treatment of Artificial Orthopedic and Cardiovascular Biomaterials**, Surface & Coatings Technology 201, 5601–5606, 2007.

16. E. Asua, V. Etxebarria and A. Garcı´ a-Arribas, **Neural Network-Based Micropositioning Control of Smart Shape Memory Alloy Actuators**, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2007.

17. Paul, K. Chu, **Enhancement of Surface Properties of Biomaterials Using Plasma-Based Technologies**, Surface & Coatings Technology 201, 8076–8082, 2007.

18. Wu, C. C. M., Kahn, M. and Moy, W., **Piezoelectric Ceramics With Functional Gradients: A New Application in Material Design**, J. Am. Ceramic Soc., Vol. 79, No. 3, 809-12, 1996.

19. http://fgmdb.kakuda.jaxa.jp/e_whatsfgm.html