بسم الله الرحمن الرحيم

کلیه حقوق مادی مرتبط بر نتایج مطالعات، ابتکارات و

نو آوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه

متعلق به دانشگاه رازی است.

دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک
گرایش طراحی کاربردی

عنوان:

تحلیل استاتیکی استوانه های از جنس مواد هدفمند ارتوتروپیک، به روش بدون المان

استاد راهنما:

دکتر مهرداد فروتن

نگارش:

فرشاد لرستانی

دی ماه ۱۳۹۲

چکیده:

با توجه به مزایایی که روش های بدون المان نسبت به روش‌های المان محدود دارند،در سال‌های اخیر جایگاه ویژه‌ای در حوزه مسائل مکانیک جامدات پیدا کرده‌اند.در این پایان‌نامه یک روش جدید بدون المان برای تحلیل استاتیکی استوانه‌های از جنس مواد هدفمند تقویت شده با الیاف بکار گرفته شده است.خواص مکانیکی استوانه بکار گرفته شده در راستای شعاع استوانه و طبق پروفیل‌های مختلفی تغییر می‌کند.این روش بر پایه‌ی تقریب بدون المان حداقل مربعات متحرک و فرم ضعیف معادله تعادل بنا نهاده شده است و برای انتگرال گیری،دامنه حل مسأله به تعدادی سلول پس زمینه افراز شده و انتگرال روی هر سلول به روش انتگرال‌گیری عددی گوس انجام شده است.نتایج بدست آمده با نتایج کارهای قبلی مقایسه شده و مطابقت خوبی مشاهده شده است.تاثیر پارامترهای مختلف از جمله شرایط مرزی،نحوه تغییرات خواص،هندسه استوانه و زاویه الیاف بر روی پاسخ‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. برای حل مسأله کدی توسعه یافته در نرم افزار مطلب تهیه شده است که با توجه به انعطاف پذیری کد مورد نظر می‌توان برای تحلیل استاتیکی لوله ها و مخازن جدار ضخیم و جدار نازک و سازه‌های استوانه ای دیگر از کد مورد نظر استفاده کرد.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول ۱

۱-۱- مواد هدفمند ۲

۱-۱-۱- مقدمه ۲

۱-۱-۲- ماهیت مواد هدفمند ۲

۱-۱-۳- تاریخچه مواد هدفمند ۳

۱-۱-۴- انواع مواد هدفمند ۶

۱-۱-۵- روش‌های تولید مواد هدفمند ۸

۱-۱-۵-۱-روش متالورژی پودر ۸

۱-۱-۵-۲-روش پلاسما جت ۹

۱-۱-۵-۳-روش گریز از مرکز ۹

۱-۱-۵-۴-روش‌های الکتروفیزیکی ۱۰

۱-۱-۵-۵-نشت بخار،توسط روش‌های شیمیایی و فیزیکی ۱۱

۱-۱-۶- کاربرد مواد هدفمند ۱۱

۱-۱-۷- مدلهای ریاضی تغییر خواص ۱۳

۱-۱-۷-۱- تابع نمایی ۱۳

۱-۱-۷-۲- تابع توانی ۱۳

۱-۱-۷-۳-رابطه ی غیر خطی ۱۴

۱-۲- مواد ارتوتروپیک ۱۴

۱-۳- مروری بر تحقیقات انجام گرفته ۱۷

فصل دوم ۲۲

۲-۱- روش بدون المان ۲۳

۲-۱-۱- مزیت روش بدون المان ۲۴

۲-۱-۲- محدودیت‌های روش المان محدود ۲۴

۲-۲- روند تحلیل مسائل به روشهای بدون المان ۲۵

۲-۳- مقایسه روش اجزاء محدود و روشهای بدون المان از دیدگاه محاسباتی ۲۶
۲-۴- دسته‌بندی روش‌های بدون المان ۲۷
۲-۴-۱- دسته‌بندی بر اساس فرمول‌بندی فرآیند ۲۸
۲-۴-۱-۱- روش های بدون المان بر پایه فرم ضعیف ۲۹
۲-۴-۱-۲-روش های بدون المان بر اساس تکنیک کالوکیشن ۳۰
۲-۴-۱-۳-روش های بدون المان بر پایه ترکیب فرم ضعیف با تکنیک کالوکیشن ۳۰
۲-۴-۲- دسته بندی براساس شماتیک تابع تقریب ۳۱
۲-۴-۲-۱-وش های بدون المان بر اساس تقریب حداقل مربعات متحرک (MLS) ۳۱
۲-۴-۲-۲-روش های بدون المان بر اساس شمای انتگرالی برای تابع تقریب ۳۱
۲-۴-۲-۳-روش های بدون المان بر اساس روش درون یابی نقطه ای ۳۲
۲-۴-۲-۴-روش های بدون المان بر اساس شماتیک های دیگر ۳۲
۲-۴-۳- دسته بندی بر اساس دامنه حل مسئله ۳۲
۲-۴-۳-۱-روش های بدون المان دامنه ای ۳۳
۲-۴-۳-۲-روش های بدون المان مرزی ۳۳
۲-۵- توابع شکل ۳۳
۲-۵-۱- توابع شکل اجزاء محدود ۳۴
۲-۵-۲- توابع شکل حداقل مربعات متحرک (MLS) ۳۵
۲-۵-۲-۱-خواص توابع شکل MLS ۳۸
۲-۶- تابع وزن ۳۹
۲-۶-۱- اندازه حوزه اثر تابع وزن ۴۰
۲-۶-۲- فرمهای ریاضی تابع وزن ۴۱
۲-۷- انتگرال‌گیری در روشهای بدون المان فرم ضعیف ۴۳
۲-۸- اعمال شرایط مرزی اساسی ۴۳
فصل سوم ۴۶
۳-۱- خواص مواد ۴۷
۳-۲- معادله های اساسی ۴۹

۳-۲-۱- روابط الاستیسیته ۴۹
۳-۲-۲- اصل کار مجازی ۵۱
۳-۳-فرمول بندی بدون المان ۵۲
۳-۴- شرایط مرزی ۵۷
فصل چهارم ۵۹
۴-۱- مقدمه ۶۰
۴-۲- مقایسه با کارهای انجام شده ۶۰
۴-۳- مدل اول ۶۴
۴-۴- مدل دوم ۷۲
۴-۵- مدل سوم ۷۶
۴-۶- نتایج ۸۶
۴-۷- پیشنهادات برای ادامه کار حاضر ۸۷
مراجع
چکیده انگلیسی

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل ۱-۱- مثال‌هایی از انواع مختلف مواد هدفمند ٦

شکل ۱-۲- استوانه از جنس مواد هدفمند لایه لایه ای ۷

شکل ۱۱-۳- شماتیک روش تولید ماده با استفاده از متالورژی پودر[۵] ۹

شکل ۱-٤- شماتیک روش پلاسما جت جهت تولید ماده هدفمند[٦] ۹

شکل ۱-۵- شماتیک روش گریز از مرکز[۷] ۱۰

شکل ۱-٦- شماتیک روش نشت بخار مواد، توسط روش های شیمیایی و فیزیکی ۱۱

شکل ۱-۷- ریز ساختار مواد ۱۷

شکل ۲-۱-اتصال گره‌ها به یکدیگر (a) روش اجزاء محدود (b) روش بدون المان ۲٦

شکل ۲-۲-محاسبه تقریب در نقطه (a) روش المان محدود (b) روش بدون المان ۲۷

شکل ۲-۳- تقریب حداقل مربعات استاندارد نظیر بردار پایه خطی ۳٦

شکل ۲-٤- تقریب در گره ها و مقادیر گره ای در تقریب MLS ۳۸

شکل ۲-۵- شکل های مستطیلی ودایره ای حوزه اثر و فرم ضرب تانسوری(مستطیلی) تابع وزن .. ٤۰

شکل ۳-۱-شکل هندسی استوانه ٤۷

شکل ٤-۱-تنش محیطی در راستای ضخامت FGM ٦۲

شکل ٤-۲-تنش شعاعی در راستای ضخامت استوانه FGM ٦۳

شکل ٤-۳-تنش محیطی در راستای ضخامت استوانه FGM،وقتی که $EoEi = 10$ و $rori = 0.1$ ٦٤

شکل ٤-٤-تنش شعاعی در راستای ضخامت برای استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای طول های مختلف ٦۵

شکل ٤-۵-تنش محیطی در راستای ضخامت برای استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای طول های مختلف ٦٦

شکل ٤-٦-تنش محوری در راستای ضخامت برای استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای طول های مختلف ٦٦

شکل ٤-۷- تنش میسز در راستای ضخامت برای استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای

طول های مختلف ٦٧
شکل ٤-٨- تنش شعاعی در استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای سه شرط مرزی CC-CF-FF ٦٨
شکل ٤-٩- تنش محیطی در استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای سه شرط مرزی CC-CF-FF ٦٨
شکل ٤-١٠- تنش محوری در استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای سه شرط مرزی CC-CF-FF ٦٩
شکل ٤-١١- تنش برش σrz در استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای سه شرط مرزی CC-CF-FF ٦٩
شکل ٤-١٢- تنش ون میسز در استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای سه شرط مرزی CC-CF-FF ٧٠
شکل ٤-١٣- تنش شعاعی استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای n های مختلف .. ٧١
شکل ٤-١٤- تنش ون میسز استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای n های مختلف . ٧١
شکل ٤-١٥- تنش شعاعی در راستای ضخامت برای استوانه ارتوتروپیک همگن تقویت شده با الیاف ٧٢
شکل ٤-١٦- تنش محیطی در راستای ضخامت برای استوانه ارتوتروپیک همگن تقویت شده با الیاف ٧٣
شکل ٤-١٧- تنش محوری در راستای ضخامت برای استوانه ارتوتروپیک همگن تقویت شده با الیاف ٧٤
شکل ٤-١٨- تنش ون میسز در راستای ضخامت برای استوانه ارتوتروپیک همگن تقویت شده با الیاف ٧٤
شکل ٤-١٩- تنش برشی $\sigma r\theta$ در راستای ضخامت برای استوانه ارتوتروپیک همگن تقویت شده با الیاف ٧٥
شکل ٤-٢٠- تنش برشی $\sigma z\theta$ در راستای ضخامت برای استوانه ارتوتروپیک همگن تقویت شده با الیاف ٧٥
شکل ٤-٢١- تنش شعاعی در استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای n های مختلف ٧٦
شکل ٤-٢٢- تنش محیطی در استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای n های مختلف ٧٧
شکل ٤-٢٣- تنش ون میسز در استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای n های مختلف

شکل ٤-٢٤- تنش شعاعی در استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای طول های مختلف ٧٧
شکل ٤-٢٥- تنش محیطی در استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای طول های مختلف ٧٨
شکل ٤-٢٦- تنش ون میسز در استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای طول های مختلف ٧٩
شکل ٤-٢٧- تنش شعاعی در استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای سه شرط مرزی CC-CF-FF ٨٠
شکل ٤-٢٨- تنش محیطی در استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای سه شرط مرزی CC-CF-FF ٨١
شکل ٤-٢٩- تنش ون میسز در استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای سه شرط مرزی CC-CF-FF ٨١
شکل ٤-٣٠- تنش برشی σrz در استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای سه شرط مرزی CC-CF-FF ٨٢
شکل ٤-٣١- تنش برشی $\sigma r\theta$ در استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای سه شرط مرزی CC- CF-FF ٨٢
شکل ٤-٣٢- تنش برشی σzθدر استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای سه شرط مرزی CC-CF-FF ٨٣
شکل ٤-٣٣- تنش شعاعی در استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای ضخامت های مختلف برای n=1 ..... ٨٤
شکل ٤-٣٤- تنش محیطی در استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای ضخامت های مختلف و برای n=1 ..... ٨٤
شکل ٤-٣٥- تنش ون میسز در استوانه ارتوتروپیک FGM تقویت شده با الیاف برای ضخامت های مختلف و برای n=1 ..... ٨٥

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۳–۱-خواص مکانیکی الیاف و ماتریس ۴۸
جدول ۳–۲-خواص مکانیکی گرافیت-اپوکسی ۴۹
جدول ۴–۱- همگرایی و مقایسه تغیرمکانهای شعاعی در راستای شعاع استوانه همگن ۶۰
جدول ۴–۲- همگرایی و مقایسه تغیرمکانهای شعاعی در راستای شعاع استوانهFGM ۶۰

فصل اول

مقد مه‌ای بر مواد هدفمند

۱-۱- مواد هدفمند

۱-۱-۱- مقدمه

همگام با رشد سریع علوم و تکنولوژی در دهه‌های اخیر، نیاز به مواد جدیدی که مهندسان را در طراحی و ساخت سازه‌های مهندسی یاری کند به شدت در جای جای صنعت احساس می شود. موادی که در زمینه‌های مختلف مهندسی قابل استفاده بوده و با بهبود خواص مورد نظر، مشخصه‌های بهتری را در عمل نتیجه دهند. به طور مثال، بسیاری از سازه ها و قطعات همچون سازه‌های هوایی، فضایی، مخازن تحت فشار در نیروگاه‌های هسته‌ای و موتورهای احتراق داخلی تحت نیروهای مکانیکی مختلف و نیروهای حرارتی با گرادیان‌های بالا قرار دارند. از این رو در این گونه سازه ها بایستی از موادی استفاده نمود که هم در برابر بارهای حرارتی با گرادیان‌های بالا مقاوم باشند و هم در برابر بارهای مکانیکی استحکام لازم را از خود نشان دهند و در عین حال یکپارچگی مکانیکی خود را نیز حفظ کنند [۱].

از سوی دیگر این نکته نیز مشخص گردیده است که تغییر ناگهانی در ترکیب و خواص مواد در یک جزء تمرکزهای تنش موضعی شدیدی را بوجود می‌آورد. اگر در این اجزاء تغییر در ترکیب و خواص مواد از یک ماده تا ماده دیگر بصورت تدریجی ایجاد گردد، این تمرکز تنش‌ها به میزان زیادی کاهش می‌یابند.

ملاحظات فوق در دهه‌های اخیر منجر به پیدایش نسل جدیدی از مواد به نام مواد هدفمند یا FGM[1] شده است که تا حد زیادی خواسته‌های مطلوب مهندسان طراح را برآورده می‌سازد. مواد هدفمند که در اصل، اولین بار به منظور مواد مقاوم در برابر بارهای حرارتی با گرادیان بالا طراحی شدند، موادی غیر همگن ولی ایزوتروپیک[2] هستند که خواص آنها از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر می‌کند. به طور مثال مقاومت به سایش، مدول الاستیسیته، ضریب هدایت حرارتی، چگالی و سختی در این دسته از مواد بطور پیوسته و تدریجی تغییر می‌کنند. چنین تغییرات پیوسته‌ای مشکلات مربوط به تغییرات ناگهانی در سطح تماس بین دو ماده متفاوت را که در مورد مواد مرکب وجود داشت، مرتفع می‌سازد.

۱-۱-۲- ماهیت مواد هدفمند

مواد هدفمند یا FGM، نسل جدیدی از مواد مهندسی هستند که جزئیات ریز ساختاری ماده بصورت پیوسته

1-Functionally Graded Materials
2-Isotropic

و تدریجی (با استفاده از تغییر در خواص، اندازه و شکل متفاوت تقویت کننده‌ها به همراه تغییر در نقش فازهای تقویت کننده و ماتریس) از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر می‌کند. نتیجه، ریزساختاری است که تغییرات پیوسته یا مجزایی در خواص مکانیکی و حرارتی ماده در مقیاس ماکروسکوپی ایجاد می‌کند.

مواد هدفمند با استفاده از خاصیت ذاتی خود به روش‌هایی که در ادامه برشمرده می‌شوند، مشخصه‌های مکانیکی و ترمومکانیکی یک جزء را بهبود می‌بخشند:

مقدار تنش‌های حرارتی می‌تواند کمینه گردد و نواحی که در آنها تنش‌ها به مقدار ماکزیمم خود می‌رسند به میزان قابل قبولی کنترل می‌شوند.

شروع تسلیم و شکست برای یک بارگذاری ترمومکانیکی می‌تواند به تأخیر بیافتد.

تمرکز تنش‌های شدید و نقاط تکین در مقاطع بین لبه‌های آزاد و سطوح تماس بین وجهی از بین می‌روند.

مقاومت باندهای واسط بین جامدات غیرهمگن مانند فلز با سرامیک، با تغییر خواص به صورت پیوسته یا لایه لایه‌ای از یک سطح تا سطح دیگر، در مقایسه با مقاومت بین جامدات غیر پیوسته بطور مثال در مواد مرکب، افزایش می‌یابد.

نرخ رشد ترک می‌تواند با انتخاب مناسب گرادیان خواص، کاهش یابد.

نشست یک پوشش شکننده ضخیم (نوعاً بیشتر از ۱ میلی‌متر) بر روی یک زیرلایه نرم و داکتیل توسط تغییر مواد بصورت پیوسته یا لایه لایه قابل انجام خواهد بود.

گرادیان ترکیب در لایه‌های سطحی می تواند میدان‌های تکین ناشی از بریدگی و فرورفتگی‌های نوک تیز را از بین برده و مشخصه‌های تغییرشکل پلاستیک اطراف فرورفتگی‌ها را بهبود بخشد.

۱-۱-۳- تاریخچه مواد هدفمند

با وجود این‌که تاریخچه ظهور و پیدایش مواد هدفمند یا FGM به دهه‌های اخیر برمی‌گردد، ولی نمونه‌هایی از این مواد در طبیعت یافت می‌شوند. به عنوان مثال می توان به ساقه درخت بامبو یا ساختار دندان اشاره کرد که خواص در آنها بصورت تدریجی و پیوسته تغییر می‌کند. باستان شناسان در کشور ژاپن شمشیرهای فولادی را کشف کرده‌اند که سختی آنها از نوک تا میانه شمشیر بصورت تدریجی تغییر می‌کرده است[۲]، در نتیجه می توان

بگونه‌ای ادعا کرد که این مواد، مواد نوظهوری نیستند.

ایده عمومی گرادیان‌های ساختاری اولین بار برای کامپوزیت‌ها و مواد پلیمری در سال ۱۹۷۲ مطرح شد. در آن زمان دو دانشمند به نام‌های دوئیز[1] و بور[2] [۳] ایده اولیه ترکیب دو فاز مختلف را با تغییر در نحوه آرایش و ترتیب هر کدام از فازها در هر لایه به منظور بهبود خواص مکانیکی مطرح کردند. ایده آنها عموماً مربوط به ضعف مواد مرکب در بسیاری از کاربردها بود که گوتزل[3] در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ با تحقیقات ارزشمند و گسترده‌ای که بر روی مواد مرکب انجام داده بود، این ضعف‌ها را مشخص کرده بود.

نیاز به ساخت موادی که بتوانند گرادیان‌های شدید دما را تحمل کنند انگیزه اولیه ساخت مواد هدفمند یا FGM را در ذهن محققان ایجاد کرد. این نیاز در ابتدا در صنایع هوافضا بیشتر از بخش‌های دیگر صنعت به چشم می‌خورد. دانشمندان علم مواد در ژاپن در مرکز تحقیقات هوافضایی در شهر سندایی[4] اولین پیشگامان طراحی و ساخت چنین موادی بودند.

در سال ۱۹۸۴ برای اولین بار در کشور ژاپن واژه FGM به عنوان یک مفهوم فرمول‌بندی شده و یک جهش تحقیقاتی بین المللی در علم مواد و مهندسی، بر این دسته از مواد نهاده و از آن پس عصر جدیدی در تحقیقات گسترده بر روی این مواد گشوده شد. در آن سال در ژاپن یک گروه دولتی پیش بینی کرد که درگیری شدید ژاپن در تحقیقات فضایی و رشد روزافزون این تحقیقات، نشان دهنده وابستگی شدید صنعت فضایی این کشور به تولید چنین موادی است. در آن زمان چند تن از دانشمندان ژاپنی تحقیقات خود را روی پروژه سفینه فضایی آغاز کردند. تحقیقات آنها نشان داد که اجزای سازه‌های بکار رفته در بدنه این سفینه فضایی، تحت بارهای بسیار شدید دمایی قرار می گیرند و بنابراین در ترکیب و گرادیانی کردن ریزساختارهای سازه‌های بدنه بایستی به دو نکته مهم و اساسی توجه نمود:

- نکته اول این‌که بایستی بهترین استفاده کلی از مواد موجود و قابل دسترس، در ساخت این اجزاء مقاوم به دماهای بالا صورت پذیرد.
- نکته دوم این‌که بایستی به نحوی از تمرکز تنش‌های ایجاد شده در اثر ناپیوستگی‌های موجود که عموماً در مواد مرکب چند لایه‌ای ایجاد می شوند، جلوگیری به عمل آید.

1-Duwez
2-Bever
3-Gotzel
4-Sendai

نتایج این یافته‌ها موجب تشکیل سازمانی متشکل از دانشمندان علوم مختلف در سال ۱۹۸۷ (سه سال بعد از طرح اولین ایده‌های ساخت مواد FG) در کشور ژاپن شد که به ویژه روی اجزایی کار می‌کردند که هنگام رویارویی یک سطح آن با محیط بسیار گرم، سطح دیگر سرد بماند.

فعالیت‌های دیگر سازمان، شامل فرآیندهای ساخت، طراحی و ارزیابی سیستم‌های کامپوزیتی غیر آلی مختلفی بود که قابلیت گرادیان شدن بوسیله فلز و سرامیک را داشتند. به طور مثال تحقیقات انجام گرفته بر روی بدنه شاتل‌های فضایی نشان می‌داد که دمای سطوح خارجی در هنگام ورود به جو تا حدود ۲۰۰۰ درجه کلوین در یک محیط اکسید کننده می‌رسید، در نتیجه مواد سرامیکی برای این محیط‌ها انتخاب شدند. در نزدیک سطوح سرد با دمای پایین‌تر، حدود ۱۰۰۰ درجه کلوین، مواد قوی با چقرمگی بالا و با هدایت حرارتی خوب انتخاب شدند. بین دو سطح ساختارهای کامپوزیتی با ماتریس کربن یا فلز و با نرخ درجه بندی محاسبه شدهٔ سرامیک–ماتریس (کربن یا فلز) توسط یکی از فرآیندهای متالورژی پودر، نشت بخار فیزیکی یا شیمیایی، اسپری پلاسما و ترکیب احتراقی دمای بالای خود انتشار تولید شدند.

به محض اتمام کار در سال ۱۹۹۱، برنامه دیگری در سال ۱۹۹۳ بر روی سیستم‌های تبدیل انرژی شروع به کار کرد. دومین برنامه بطور اصلی و هدفدار مواد FGM را نشانه گرفته بود و هدف آن تبدیل بهینه انرژی حرارتی به الکتریسیته با استفاده از مواد ترموالکتریک یا ترمویونیک بود.

خارج از ژاپن، تحقیق بر روی مواد هدفمند به سرعت گسترش یافت، به طور مثال محققان در اواخر دهه ۸۰ و اوایل دهه ۹۰ در چند کشور همچون آلمان، سوئیس، آمریکا، چین و روسیه، تحقیقات گسترده‌ای را بر روی این گونه مواد آغاز کردند [۴].

در آلمان یک برنامه شش ساله دولتی در سال ۱۹۹۵ شروع به کار کرد که تعداد زیادی آزمایشگاه در اختیار داشت. این برنامه در چهار گروه تحقیقاتی اصلی سازماندهی شده بود که روی

۱) مسیرها و فرآیندهای شامل ذوب (ریخته‌گری، تصفیه و نفوذ، رشد کریستالی)

۲) فرآیندهای پودری

۳) پوششها و مدل‌سازی ترمودینامیکی

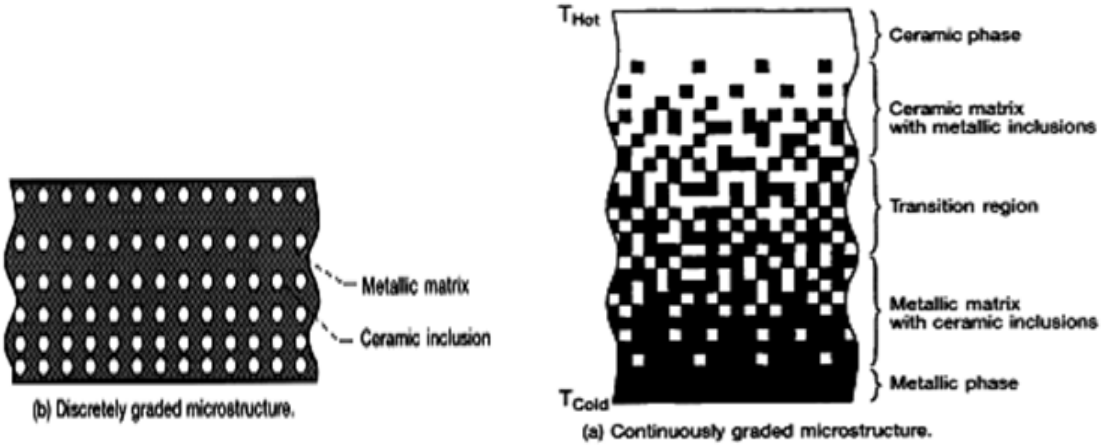
۴) مواد هدفمند در بیوپزشکی

تمرکز داشتند.

کاربردهای دیگر مواد هدفمند در سال‌های اخیر به سرعت در حال گسترش‌اند. به عنوان مثال تحقیقات در مورد اتصال فلز و سرامیک، اندام مصنوعی انسان، اجزاء موتورهای انفجاری، وسایل مغناطیسی، ابزارهای برشی، ساختارهای اطفاء حریق، کامپوزیت‌های مقاوم به ضربه و پوشش‌های محفظه پیشرانه موشک با استفاده از این مواد، در حال انجام است.

۱-۱-٤- انواع مواد هدفمند

بر طبق تعریف مواد هدفمند، این نکته واضح است که این مواد از ترکیب دو یا چند جزء تشکیل می‌شوند. شکل (۱-۱) مثال‌هایی از انواع مختلف مواد هدفمند را نشان می دهد. در ساده ترین نوع FGMها، دو جزء ماده مختلف با هم ترکیب می‌شوند به نحوی که خواص ماده از یک سطح تا سطح دیگر تغییر می‌کند. این تغییر می‌تواند به صورت پیوسته و ملایم شکل (۱-۱a)، یا به صورت غیرپیوسته بطور مثال بصورت لایه لایه‌ای شکل (۱-۱b) باشد.



شکل ۱-۱- مثال‌هایی از انواع مختلف مواد هدفمند

آشناترین نوع FGM، نوعی است که ترکیب ماده بتدریج از یک سرامیک نسوز تا یک فلز تغییر می‌کند. در این حالت خواص ناسازگاری چون مقاومت حرارتی، مقاومت به سایش و مقاومت در برابر اکسیداسیون سرامیک، با استحکام و چقرمگی بالا، قابلیت ماشین‌کاری و توانایی چسبندگی فلزات در کنار هم قرار می گیرند تا FGM به عنوان یک ماده با خصوصیات جدید، کارآیی‌های هر دو ماده را در کنار هم داشته باشد.

سوراخ‌ها و منافذ نیز اجزاء مهمی در FGM ها هستند. افزایش تدریجی در توزیع منافذ از داخل تا سطح ماده می تواند خواص زیادی همانند مقاومت به شوک مکانیکی، عایق سازی حرارتی، کارآیی کاتالیزوری و کاهش تنش حرارتی را موجب شود.

به عنوان نمونه از مواد هدفمندی که در کارهای پژوهشی مورد استفاده قرار گرفته‌اند می‌توان به ترکیبات زیر اشاره کرد:

Al/Al_2O_3

Ti/B

Ti/SiC

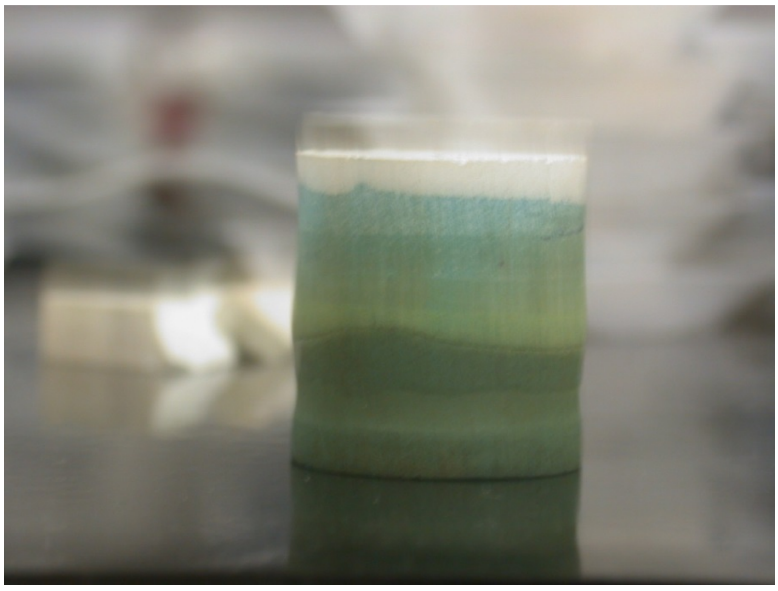
Mullite/Molybdenum

WC/Co

TiCN-WC/Co

SiC/Al

شکل (۱-۲) نمونه‌ای از استوانه از جنس مواد هدفمند را که بصورت لایه لایه‌ای در راستای محوری گرادیانی شده است، نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲- استوانه از جنس مواد هدفمند لایه لایه ای

۱-۱-۵- روش‌های تولید مواد هدفمند

جهت تولید مواد هدفمند از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود، به عبارت دیگر روش تولید این مواد بسته به نوع کاربرد آن و شرایط حاکم کاری کاملاً متفاوت است. به طورکلی مهم‌ترین روش‌های موجود جهت تولید این مواد عبارتند از:

روش متالورژی پودر[۱]

روش پلاسما جت[۲]

روش گریز از مرکز[۳]

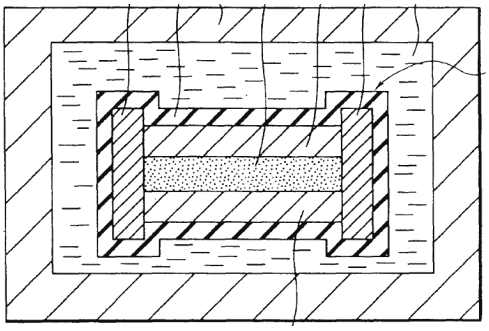
روش های الکتروفیزیکی[٤]

نشت بخار مواد توسط روش های شیمیایی و فیزیکی[۵]

۱-۱-۵-۱-روش متالورژی پودر

در این روش، مواد هدفمند از قرارگرفتن مناسب لایه های پودر ترکیبی از دو نوع ماده مختلف تحت فشار و دمای مناسب ایجاد می‌شود. نخست بر روی لایه خالص از یک ماده، لایه دیگر با درصد کمی از ماده دوم قرار می‌گیرد. این روند به تدریج تا آنجایی ادامه پیدا می‌کند که پودر لایه نهایی کاملاً از ماده دوم تشکیل شده باشد، شکل (۱-۳). بسته به شکل هندسی قطعه‌ای که قرار است با این روش تولید شود لایه ها در قالبی مناسب مطابق روش بیان شده، قرار می‌گیرند و پس از چیدمان مناسب لایه‌ها، فشار و دمای مناسب به لایه ها اعمال می‌گردد[۵].

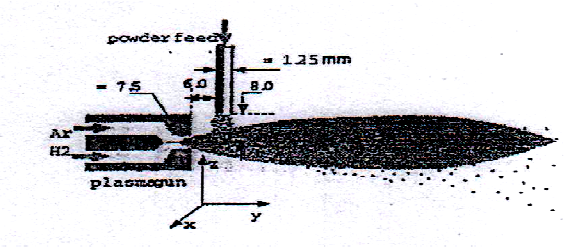
1-Powder Metallurgy
2-Plasma Jet
3-Centrifugal Method
4-Electro Physical Methods
5-CVD/PVD



شکل ۱-۳- شماتیک روش تولید ماده با استفاده از متالورژی پودر[۵]

۱-۱-۵-۲-روش پلاسما جت

در این روش، ابتدا جت سیال با فشار، حرارت و سرعت معین به سطح مشخص هدایت خواهد شد. پس از تزریق پودر خالص از ماده اول به داخل جت سیال، به دلیل فشار و حرارت جت، پودر ماده اول بر سطح مورد نظر قرار می‌گیرد(می‌چسبد)، شکل (۱-۴). پس از گذشت مدت زمان مشخص درصد معین و محدودی از ماده دوم به پودر ماده اول اضافه می‌شود. لازم به ذکر است که این عملیات به صورت یکنواخت و کاملاً پیوسته انجام می‌گیرد به عبارت دیگر اضافه شدن ماده دوم و به همان میزان کم شدن پودر ماده اول تا زمانی ادامه پیدا خواهد کرد تا پودر به صورت کامل از ماده دوم تشکیل شده باشد. همان طور که در شکل (۱-۴) مشخص است تزریق پودر به جت سیال و مکش ایجاد شده در دهانه نازل به دلیل سرعت زیاد جت است[۶].



شکل ۱-٤- شماتیک روش پلاسما جت جهت تولید ماده هدفمند[٦]

۱-۱-۵-۳-روش گریز از مرکز

استفاده از نیروی گریز از مرکز یکی دیگر از روش های تولید مواد هدفمند است. این روش به طورکلی به منظور تولید استوانه‌های مواد هدفمند فلز- فلز به کار می‌رود. عملکرد این روش به این صورت است که ابتدا مذاب