بسم الله الرحمن الرحيم

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و
نوآوریهای 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

تحلیل ارتعاشات آزاد و اجباری در استوانه FGM به روش المان محدود

استاد راهنما:

دکتر مهرداد فروتن

نگارش:

اکبر لطفی پور

آبان‌ماه ۱۳۸۹

تقدیر و سپاس

با حمد و ستایش بیکران از ایزد منان و با تشکر از پدر و مادر عزیز و یگانه خواهر مهربانم که آفتاب پر فروغ وجودشان روشنگر راه زندگیم بوده است و محبتشان را در قلب هیچ واژه‌ای نمی‌توان گنجاند. بر خود لازم می دانم از راهنمایی‌های علمی استاد ارجمند جناب آقای دکتر مهرداد فروتن تقدیر و تشکر نمایم. در انتها از دوست عزیزم جناب آقای مهندس مرادی که وجود ایشان را به عنوان یک برادر همواره در کنار خود احساس می‌کردم قدردانی و تشکر نموده و برای ایشان آرزوی موفقیت می‌نمایم.

تقدیم به پدر و مادر

و

خواهر عزیزم

چکیده

مواد هدفمند مواد جدید و نوظهوری هستند که اکثراً از ترکیب دو ماده مختلف که یکی فلز و دیگری سرامیک است ساخته می‌شوند به طوری که خواص ترکیب حاصل به طور یکنواخت تغییر می‌کند و این امر موجب برتری این مواد نسبت به مواد همگن شده است.

در پایان‌نامه حاضر تحلیل دینامیکی استوانه‌های از جنس مواد هدفمند که خواص مکانیکی در راستای شعاع طبق مدل‌های مختلفی تغییر می‌کند با استفاده از روش المان محدود و بکارگیری دو فرمولبندی سازگار و متمرکز مورد مطالعه قرار گرفته است. با مقایسه نتایج کار انجام شده با نتایج کارهای قبلی مطابقت خوبی در هر دو حالت حاصل شد.

با توجه به الگوریتم حل این مسائل به روش‌المان محدود، در نرم‌افزار MATLAB کدی توسعه یافته که به وسیله آن تحلیل دینامیکی استوانه FGM، انجام شده است. در این تحلیل تأثیر ابعاد هندسی استوانه، نوع تکیه‌گاه‌ها و از همه مهم‌تر نحوه تغییرات خواص مکانیکی ماده بر فرکانس‌های طبیعی، ارتعاشات اجباری و همچنین بر انتشار موج تنش بررسی شده است. با توجه به اینکه روش‌های عددی قابلیت انعطاف پذیری زیادی روی حل این نوع مسائل دارند، این تحقیق و نتایج آن برای طراحی مخازن و یا لوله‌های تحت فشار از جنس مواد هدفمند بسیار مناسب می‌باشد.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه‌ای بر مواد هدفمند ۱
۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- ماهیت مواد هدفمند ۳
۱-۳- مبدأ پیدایش مواد هدفمند ۴
۱-۴- انواع مواد هدفمند ۴
۱-۵- روشهای تولید مواد هدفمند ۶
۱-۵-۱- متالورژی پودر ۷
۱-۵-۲- روش پلاسما اسپری و درجه حرارت بالا ۸
۱-۵-۳- رسوب گیری از تبخیر شیمیایی ۸
۱-۵-۴- روش‌های الکتروفیزیکی ۹
۱-۵-۵- روش سانتریفیوژی (تفکیک گریز از مرکز) ۹
۱-۶- کاربردهای مواد هدفمند ۱۰
۱-۶-۱- دانش هوانوردی ۱۰
۱-۶-۲- ابزارهای انرژی ۱۰
۱-۶-۳- ابزارهای صنعتی ۱۱
۱-۶-۴- الکتریک نوری ۱۱
۱-۷- نمونه‌های ساخته شده از مواد هدفمند ۱۲
۱-۷-۱- ساعت‌های تیتانیوم ۱۲
۱-۷-۲- کفش بیسبال ۱۲
۱-۷-۳- تیغ ریش تراشی ۱۲
۱-۷-۴- سطح خارجی اجزای خودرو ۱۲
۱-۸- مدل‌های ریاضی به منظور بیان خواص مکانیکی ماده هدفمند ۱۳
۱-۸-۱- مدل اول- استفاده از تابع نمایی ۱۳
۱-۸-۲- مدل دوم- استفاده از توابع یک یا چند جمله‌ای ۱۳
۱-۸-۳- مدل سوم- استفاده از روابط غیرخطی ۱۳
۱-۸-۴- مدل چهارم- استفاده از رابطه غیرخطی متاثر از دمای مواد ۱۴
۱-۸-۵- مدل پنجم- پروفیل تابع توانی ساده ۱۴
۱-۸-۶- مدل ششم- پروفیل تغییرات به صورت ضریبی از کسر حجمی ۱۵
فصل دوم: مقدمه‌ای بر ارتعاشات ۱۶
۲-۱- مقدمه ۱۷
۲-۲- مبدأ ارتعاشات ۱۷
۲-۳- اهمیت مطالعه ارتعاشات ۱۸
۲-۴- دسته بندی ارتعاشات ۱۹

عنوان **صفحه**

۲-۵- اندازه‌گیری و کاربردهای ارتعاشات ۱۹
۲-۶- کنترل فرکانس‌های طبیعی ۲۰
۲-۷- مروری بر کارهای گذشته ۲۰
۲-۷-۱- تحقیقات اخیر در مورد مواد همگن ۲۰
۲-۷-۲- تحقیقات اخیر در مورد مواد هدفمند ۲۱
۲-۷-۲-۱- تحلیل سازه‌های از جنس مواد هدفمند تحت بار استاتیکی و حرارتی در حالت پایدار ۲۱
۲-۷-۲-۲- تحلیل سازه‌های از جنس مواد هدفمند تحت بار دینامیکی و حرارتی در حالت گذرا ۲۳
۲-۷-۲-۳- تحلیل رفتار ترموالاستیسیته در سازه‌های از جنس مواد هدفمند ۲۳
۲-۷-۲-۴- تحقیقات صورت گرفته در مورد کمانش پوسته‌های استوانه‌ای از جنس مواد هدفمند ۲۴
۲-۷-۲-۵- تحلیل رفتار ارتعاشی سازه های از جنس مواد هدفمند و بررسی گسترش موج در آنها ۲۴
فصل سوم: فرمول‌بندی مسأله ۲۸
۳-۱- مقدمه ۲۹
۳-۲- مقدمه‌ای بر روش المان محدود ۲۹
۳-۳- بیان مسأله ۳۰
۳-۳-۱- روابط حاکم بر مسائل متقارن محوری ۳۱
۳-۳-۲- فرمول‌بندی المان محدود ۳۲
۳-۳-۳- روابط لازم برای حل مسأله دینامیکی ۳۴
۳-۴- الگوریتم حل مسأله ۳۵
۳-۴-۱- مرحله پیش پردازش ۳۶
۳-۴-۱-۱- تعیین ورودی‌های مسأله ۳۶
۳-۴-۱-۲- المان‌بندی حوزه حل مسأله ۳۶
۳-۴-۱-۳- وارد کردن نحوه تغییرات خواص مواد ۳۶
۳-۴-۲- مرحله حل ۳۷
۳-۴-۲-۱- محاسبه ماتریس‌های جرم و سختی ۳۸
۳-۴-۲-۲- محاسبه بردار نیرو ۳۸
۳-۴-۲-۳- اعمال شرایط مرزی اساسی ۳۸
۳-۴-۲-۴- محاسبه فرکانس‌های طبیعی سیستم ۳۹
۳-۴-۲-۵- محاسبه میدان جابجایی در هر زمان ۳۹
۳-۴-۳- مرحله پس پردازش ۴۰
۳-۵- جمع بندی ۴۰
فصل چهارم: مثال‌های حل شده و نتیجه‌گیری ۴۱
۴-۱- مقدمه ۴۲
۴-۲- بررسی ارتعاشات آزاد ۴۲
۴-۲-۱- بررسی ارتعاشات آزاد استوانه‌های همگن ۴۲

عنوان **صفحه**

۴-۲-۲- بررسی ارتعاشات آزاد استوانه‌های FGM ۴۵
۴-۳- بررسی ارتعاشات اجباری در استوانه‌هایی FGM..... ۵۱
۴-۳-۱- تحلیل ارتعاشات اجباری در استوانه‌های FGM با طول بلند..... ۵۱
۴-۳-۲- تحلیل ارتعاشات اجباری در استوانه‌های FGM با طول کوتاه..... ۵۷
۴-۴- بررسی انتشار موج تحت بار ضربه‌ای در استوانه‌های FGM..... ۶۰
۴-۳-۱- بررسی انتشار موج تحت بار ضربه‌ای در استوانه‌های FGM با طول بلند..... ۶۰
۴-۳-۲- بررسی انتشار موج تحت بار ضربه‌ای در استوانه‌های FGM با طول کوتاه..... ۶۴
۴-۵- نتیجه گیری..... ۷۳
۴-۶- پیشنهادهایی برای ادامه کار حاضر ۷۴
مراجع ۷۵
چکیده انگلیسی ۸۱

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل(۱-۱)- مثال‌هایی از انواع مختلف مواد هدفمند ۵
شکل(۱-۲)- استوانه از جنس مواد هدفمند لایه لایه‌ای ۶
شکل(۱-۳)- شماتیک تولید FGM به روش متالورژی پودر ۷
شکل(۱-۴)- شماتیک تولید FGM به روش پلاسما اسپری ۸
شکل(۱-۵)- شماتیک تولید FGM به روش گریز از مرکز ۹
شکل(۱-۶-۱)- نمودار کسر حجمی ماده بکار رفته در سطح داخلی استوانه به ازای nهای مختلف ۱۴
شکل(۱-۶-۲)- نمودار کسر حجمی ماده بکار رفته در سطح خارجی استوانه به ازای nهای مختلف ۱۴
شکل(۱-۷)- نحوه تغییرات کسر حجمی ماده بکار رفته در شعاع داخلی ۱۵
شکل(۳-۱-۱)- نمایی از یک مسئله متقارن محوری و حوزه حل آن ۳۰
شکل(۳-۱-۲)- نمایی از یک استوانه توخالی تحت فشار داخلی و خارجی (حالت متقارن محوری) ۳۰
شکل(۳-۲)- فلوچارت مرحله پیش‌پردازش برنامه ۳۶
شکل(۳-۳)- فلوچارت مرحله حل برنامه ۳۷
شکل(۴-۱-۱)- نحوه تغییرات چگالی (ضریب پواسون) برحسب شعاع استوانه، طبق رابطه (۱-۵) ۴۸
شکل(۴-۱-۲)- نحوه تغییرات مدول یانگ برحسب شعاع استوانه، طبق رابطه (۱-۵) ۴۸
شکل(۴-۲-۱)- مود شیپ اول استوانه FGM یکسرگیردار برای حالت n = 10 ..... ۴۹
شکل(۴-۲-۲)- مود شیپ دوم استوانه FGM یکسرگیردار برای حالت n = 10 ..... ۴۹
شکل(۴-۲-۳)- مود شیپ سوم استوانه FGM یکسرگیردار برای حالت n = 10 ..... ۵۰
شکل(۴-۲-۴)- مود شیپ چهارم استوانه FGM یکسرگیردار برای حالت n = 10 ..... ۵۰
شکل(۴-۳)- تغییرات فشار داخلی با زمان طبق روابط (۴-۱و۲)، (مدل‌های اول و دوم بارگذاری) ۵۲
شکل(۴-۴)- تغییرات فشار داخلی با زمان طبق روابط (۴-۳و۴)، (مدل‌های سوم و چهارم بارگذاری) ۵۲
شکل(۴-۵)- ارتعاشات شعاعی نقطه‌ای واقع در شعاع میانی استوانه FGM، تحت بارگذاری مدل اول ۵۴
شکل(۴-۶)- ارتعاشات شعاعی نقطه‌ای واقع در شعاع میانی استوانه FGM، تحت بارگذاری مدل دوم ۵۴
شکل(۴-۷)- ارتعاشات شعاعی نقطه‌ای واقع در شعاع میانی استوانه FGM، تحت بارگذاری مدل سوم ۵۶
شکل(۴-۸)- ارتعاشات شعاعی نقطه‌ای واقع در شعاع میانی استوانه FGM، تحت بارگذاری مدل چهارم ۵۶
شکل(۴-۹)- ارتعاشات شعاعی نقطه‌ای واقع در شعاع میانی استوانه FGM ضخیم‌تر، تحت بارگذاری مدل اول ۵۷
شکل(۴-۱۰)- ارتعاشات شعاعی نقطه‌ای واقع در مختصات r = 0.375, z = 0.75، در استوانه FGM با شرایط تکیه‌گاهی دو سرگیردار با ابعاد ri = 0.25، ro = 0.5 و L = 1.5 m، تحت بارگذاری مدل اول ۵۸
شکل(۴-۱۱)- ارتعاشات شعاعی نقطه‌ای واقع در مختصات r = 0.375, z = 1.5، در استوانه FGM با شرایط تکیه‌گاهی دوسرگیردار با ابعاد ri = 0.25، ro = 0.5 و L = 3 m، تحت بارگذاری مدل اول ۵۹
شکل(۴-۱۲)- ارتعاشات شعاعی نقطه‌ای واقع در مختصات r = 0.375, z = 0.75، در استوانه FGM با شرایط تکیه‌گاهی یکسرگیردار، با ابعاد ri = 0.25، ro = 0.5 و L = 1.5 m، تحت بارگذاری مدل اول ۵۹

عنوان **صفحه**

شکل(۴-۱۳)- تغییرات فشار داخلی با زمان طبق رابطه (۴-۵)[۵۳] ۶۱
شکل(۴-۱۴)- تغییرات تنش محیطی نسبت به زمان در شعاع میانی استوانه بلند ($r = 0.375$ m) به روش المـان محدود و مقایسه با مرجع [۵۳] ۶۱
شکل(۴-۱۵)- تغییرات فشار داخلی با زمان طبق رابطه (۴-۶) ۶۲
شکل(۴-۱۶)- ارتعاشات شعاعی نقطه‌ای با شعاع $r = 0.375$ m (شعاع میانی) در استوانه بلند ۶۳
شکل(۴-۱۷)- تاریخچه زمانی تنش شعاعی استوانه بلند در شعاع $r = 0.375$ m (شعاع میانی) ۶۳
شکل(۴-۱۸)- تاریخچه زمانی تنش محیطی استوانه بلند در شعاع $r = 0.375$ m (شعاع میانی) ۶۴
شکل(۴-۱۹)- ارتعاشات شعاعی نقطه‌ی $r = 0.375, z = 0.75$ m در استوانه با طول کوتاه ۶۵
شکل(۴-۲۰)- تاریخچه زمانی تنش شعاعی نقطه‌ی $r = 0.375, z = 0.75$ m در استوانه کوتاه ۶۶
شکل(۴-۲۱)- تاریخچه زمانی تنش محیطی نقطه‌ی $r = 0.375, z = 0.75$ m در استوانه کوتاه ۶۷
شکل(۴-۲۲)- تاریخچه زمانی تنش محوری نقطه‌ی $r = 0.375, z = 0.75$ m در استوانه کوتاه ۶۷
شکل(۴-۲۳-۱)- تاریخچه زمانی تنش فون میزز نقطه‌ای در وسط استوانه کوتاه در شعاع داخلی ۶۸
شکل(۴-۲۳-۲)- تاریخچه زمانی تنش فون میزز نقطه‌ای در وسط استوانه کوتاه در شعاع میانی ۶۹
شکل(۴-۲۳-۳)- تاریخچه زمانی تنش فون میزز نقطه‌ای در وسط استوانه کوتاه در شعاع خارجی ۶۹
شکل(۴-۲۴-۱)- توزیع تنش محیطی در حوزه حل مسئله در زمان $t = 0.15$ (ms) برای $n = 10$ ۷۰
شکل(۴-۲۴-۲)- توزیع تنش محیطی در حوزه حل مسئله در زمان $t = 0.15$ (ms) برای $n = 1$ ۷۰
شکل(۴-۲۴-۳)- توزیع تنش محیطی در حوزه حل مسئله در زمان $t = 0.15$ (ms) برای $n = 0.1$ ۷۱
شکل(۴-۲۵-۱)- توزیع تنش محیطی در حوزه حل مسئله در زمان $t = 0.6$ (ms) برای $n = 10$ ۷۱
شکل(۴-۲۵-۲)- توزیع تنش محیطی در حوزه حل مسئله در زمان $t = 0.6$ (ms) برای $n = 1$ ۷۲
شکل(۴-۲۵-۳)- توزیع تنش محیطی در حوزه حل مسئله در زمان $t = 0.6$ (ms) برای $n = 0.1$ ۷۲

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول(۴-۱)- همگرایی و مقایسه پنج پارامتر فرکانس اول برای ارتعاشات تقارن محوری یک استوانه توپر همگن آزاد مقایسه با مراجع [۲۷] و [۳۰] و [۳۱]..... ۴۳
جدول(۴-۲)- پنج پارامتر فرکانس اول برای ارتعاشات تقارن محوری یک استوانه توپر همگن آزاد-گیردار برای نسبت طول به شعاع خارجی متفاوت و مقایسه با مراجع[۲۸] و [۳۱]..... ۴۳
جدول(۴-۳)- هشت پارامتر فرکانس اول برای ارتعاشات تقارن محوری استوانه توپر و توخالی همگن گیردار-گیردار برای نسبت طول به شعاع خارجی متفاوت و مقایسه با مرجع[۳۱]..... ۴۴
جدول(۴-۴)- خواص مکانیکی اجزا FGM..... ۴۵
جدول(۴-۵)- مقادیر پنج پارامتر فرکانس اول برای استوانه FGM آزاد-گیردار با سطح داخلی سیلیکون کاربید و سطح خارجی فولاد ضد زنگ، به ازای تغییرات ثابت کسر حجمی (ro/ri = 2 , L/ro = 3)..... ۴۶
جدول(۴-۶)- مقادیر پنج پارامتر فرکانس اول برای استوانه FGM آزاد-گیردار با سطح داخلی سیلیکون کاربید و سطح خارجی فولاد ضد زنگ، به ازای تغییرات ثابت کسر حجمی (ro/ri = 2 , L/ro = 6)..... ۴۶
جدول(۴-۷). مقادیر پنج پارامتر فرکانس اول برای استوانه FGM آزاد-گیردار با سطح داخلی سیلیکون کاربید و سطح خارجی فولاد ضد زنگ، به ازاء تغییرات ثابت کسر حجمی (ro/ri = 1.5 , L/ro = 3)..... ۴۷
جدول(۴-۸). مقادیر پنج پارامتر فرکانس اول برای استوانه FGM که سطح داخلی سیلیکون کاربید و سطح خارجی فولاد ضد زنگ به ازای شرایط مرزی مختلف (ro/ri = 2 , L/ro = 6)..... ۴۸

علامت‌های اختصاری

عنوان	علامت
ماتریس رابط، بین بردار تغییرمکان و بردار کرنش	$\mathbf{B}$
ماتریس رابط، بین بردار کرنش و بردار تنش	$\mathbf{D}$
مدول یانگ	E
بردار نیروهای سطحی	$\mathbf{F}$
مدول برشی	G
طول استوانه	L
ماتریس جرم	$\mathbf{M}$
ماتریس جرم اصلاح شده	$\hat{\mathbf{M}}$
توابع شکل	$\mathbf{N}$
تعداد کل گره‌ها	n
خواص مکانیکی	P
شعاع داخلی استوانه	r_i
شعاع خارجی استوانه	r_o
میدان تغییر مکان	$\mathbf{U}$
کسر حجمی مواد	V_f
بردار نیرو	$\mathbf{f}$
بردار نیرو اصلاح شده	$\hat{\mathbf{f}}$
ماتریس سختی	$\mathbf{k}$
ماتریس سختی اصلاح شده	$\hat{\mathbf{k}}$
ضخامت استوانه	h
ثابت کسر حجمی	n
راستای شعاعی استوانه	r
تغییرمکان شعاعی	u_r
تغییرمکان محوری	u_z
بردار شتاب	$\ddot{\mathbf{u}}$
راستای محوری استوانه	z
کرنش برشی	γ_{rz}
کرنش	ε
کرنش شعاعی	ε_r
کرنش جانبی	ε_θ
کرنش محوری	ε_z
ضریب پواسون	υ

عنوان	علامت
چگالی	ρ
تنش	σ
تنش شعاعی	σ_r
تنش جانبی	σ_θ
تنش محوری	σ_z
تنش برشی	σ_{rz}
فرکانس طبیعی	ω_i
قسمتی از مرز مسأله	Γ
حوزه تحت بررسی	$\mathbf{\Omega}$
پارامتر فرکانس	Ω

۱-۱- مقدمه

همگام با پیشرفت 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 می‌شود. 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 سازه‌ها 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 اینگونه سازه‌ها 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. در این راستا تحقیقات صنعتی و دانشگاهی توجه خاصی به شناخت، تولید وگسترش مواد نو دارند. بکارگیری مواد کامپوزیت[۱]، آلیاژهای حافظه‌دار[۲]، نانو مواد[۳] و مواد پیزوالکتریک[۴] و... و همچنین گسترش دامنه استفاده از این مواد از جمله تلاش‌های محققین جهت نیل به اهداف فوق می‌باشد. به طور کلی هر یک از موارد مورد اشاره دارای ویژگی خاصی هستند که حوزه کاری هر دسته را محدود می‌نماید . مواد نو که در سال‌های اخیر تولید و مورد استفاده قرار گرفته اند به صورت زیر دسته بندی می شوند:

- مواد کامپوزیت
- آلیاژهای حافظه‌دار
- مواد پیزوالکتریک
- نانومواد
- مواد هدفمند[۵] (FGM)

[1] Composite material
[2] Shape memory alloy
[3] Nano material
[4] Piezo electricity material
[5] Functionally graded material

گسترش بکارگیری این مواد در صنایع باعث گردید فعالیت‌های علمی و صنعتی بیشماری در زمینه‌های تولید و بررسی خواص متالوژیکی و همچنین تحلیل و بکارگیری این نوع مواد در سازه‌ها و اجزای مکانیکی صورت گیرد. 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 به وجود می‌آورد. اگر در این اجزاء تغییر در ترکیب و خواص مواد از یک ماده تا ماده دیگر به صورت 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 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 غیرهمگن ولی ایزوتروپیک[1] 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 به طور پیوسته و تدریجی تغییر می‌کنند. چنین تغییرات پیوسته‌ای مشکلات مربوط به تغییرات ناگهانی در سطح تماس بین دو ماده متفاوت که در مورد مواد مرکب وجود داشت را مرتفع می‌سازد.

۱-۲- ماهیت مواد هدفمند

مواد هدفمند یا FGM، نسل جدیدی از مواد مهندسی هستند که جزئیات ریزساختاری ماده به صورت پیوسته 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.

- تنش‌های حرارتی می‌توانند به کمترین مقدار خود رسیده و نواحی که تنش‌ها در آنها به مقدار ماکزیمم خود می‌رسند به میزان قابل قبولی کنترل می‌شوند.
- شروع تسلیم و شکست برای یک بارگذاری ترمومکانیکی می‌تواند به تأخیر بیفتد.
- تمرکز تنش‌های شدید 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 به طور مثال در مواد مرکب، افزایش می‌یابد.

[1] Isotropic

- 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[1] نرم و داکتیل[2] توسط تغییر مواد به صورت پیوسته یا لایه لایه قابل انجام خواهد بود.
- گرادیان ترکیب در لایه‌های سطحی می‌تواند میدان‌های تکین ناشی از بریدگی و فرورفتگی‌های نوک تیز را از بین برده و مشخصه‌های تغییرشکل پلاستیک اطراف فرورفتگی‌ها را بهبود بخشد.

۱-۳- مبدأ پیدایش مواد هدفمند

با وجود اینکه تاریخچه ظهور و پیدایش مواد هدفمند به دهه‌های اخیر برمی‌گردد، ولی نمونه‌هایی از این مواد در طبیعت یافت می‌شوند. به عنوان مثال می‌توان به ساقه درخت بامبو یا ساختار دندان اشاره کرد که خواص در آنها به صورت تدریجی و پیوسته تغییر می‌کند. باستان شناسان در کشور ژاپن شمشیرهای فولادی را کشف کرده‌اند که سختی آنها از نوک تا میانه شمشیر به صورت تدریجی تغییر می‌کرده است[۱]، در نتیجه می‌توان به گونه‌ای ادعا کرد که این مواد، مواد نوظهوری نیستند.

استفاده از تغییرات تدریجی و پیوسته در مواد به عنوان یک ایده در سال ۱۹۷۲ در آمریکا توسط بور[3] و دیوز[4] بیان شد[۲] و بر پایه این تئوری یک تحقیق ملی در زمینه مواد با تغییر عملکرد تدریجی برای اولین بار در سال ۱۹۸۴ میلادی به وسیله کوئیزومی[5] و همکارانش در آزمایشگاه ملی هوافضای ژاپن به دنبال راهی برای تولید مواد مقاوم در برابر حرارت انجام گرفت[۳].

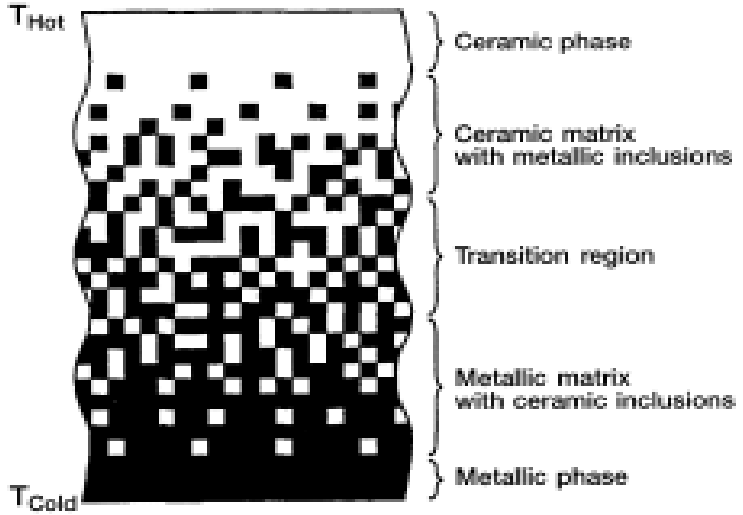
۱-۴- انواع مواد هدفمند

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 می‌دهد. در ساده‌ترین نوع FGMها، دو جزء ماده مختلف با هم ترکیب می‌شوند به نحوی که خواص ماده از یک سطح تا سطح دیگر متغییر است. این تغییر می‌تواند به صورت پیوسته و ملایم، شکل (۱a-۱)، و یا به صورت ناپیوسته و به صورت لایه‌لایه‌ای شکل (۱b-۱) یا شکل (۱-۲) باشد.

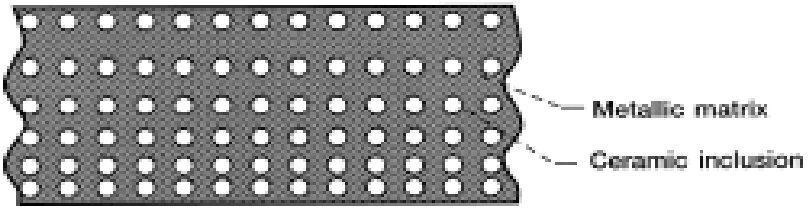
آشناترین نوع FGM، نوعی است که ترکیب ماده به صورت پیوسته و به تدریج از یک سرامیک نسوز تا یک فلز تغییر می‌کند. در این حالت خواص ناسازگاری چون مقاومت حرارتی، مقاومت به سایش و

[1] Substrate
[2] Ductile
[3] Bever
[4] Duwez
[5] Koizumi

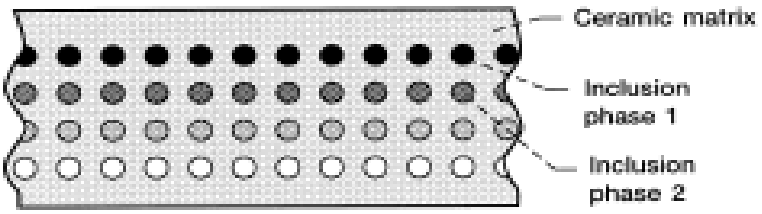
مقاومت در برابر اکسیداسیون[1] سرامیک، با استحکام و چقرمگی بالا، قابلیت ماشین‌کاری و توانایی چسبندگی فلزات در کنار هم قرار می‌گیرند تا FGM به عنوان یک ماده با خصوصیات جدید، کارایی‌های هر دو ماده را در کنار هم داشته باشد. سوراخ‌ها و منافذ نیز اجزای مهمی در FGMها هستند. افزایش تدریجی در توزیع منافذ از داخل تا سطح ماده می‌تواند خواص زیادی همانند مقاومت به شوک مکانیکی، عایق سازی حرارتی، کارآیی کاتالیزوری و کاهش تنش حرارتی را موجب شود.



(a) Continuously graded microstructure.



(b) Discretely graded microstructure.



(c) Multi-phase graded microstructure.

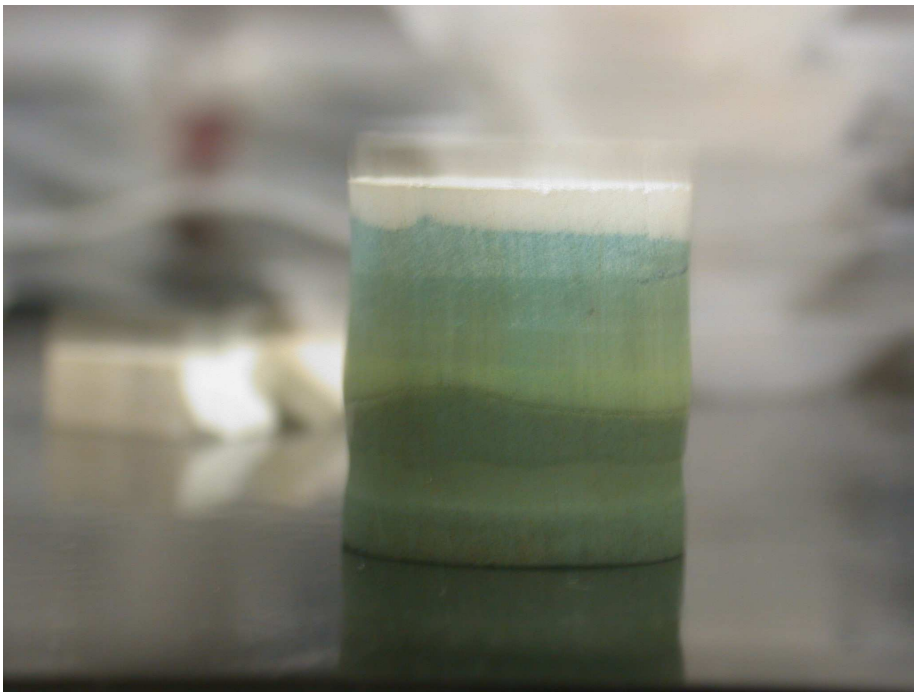
شکل(۱-۱)- مثال‌هایی از انواع مختلف مواد هدفمند.

[1] Oxidation

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 که به صورت لایه‌لایه‌ای در راستای محوری گرادیانی شده است را نشان می‌دهد.



شکل(۱-۲)- استوانه از جنس مواد هدفمند لایه لایه‌ای.

۱-۵- روشهای تولید مواد هدفمند

اصولاً از چندین روش می‌توان مواد هدفمند را تولید کرد ولی از آن میان برخی از این روش‌ها معروف‌ترند. البته ممکن است روش‌های متداول‌تر، سریع‌تر و ارزان‌تر باشند، لیکن معایب خود را دارند. برای مثال برخی از ترکیبات سرامیک را نمی‌توان با آن سازگار ساخت و یا در برخی طراحی‌ها و ویژگی‌های مطلوب خواسته شده، روش تولید خاص خود را می‌طلبند ولی به طور کلی می‌توان برای ساخت مواد هدفمند به روش‌های زیر اشاره کرد.

۱-۵-۱- متالورژی پودر

در این فرایند مواد هدفمند از قرار گرفتن مناسب لایه‌های 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 و این روند به تدریج تا جایی ادامه پیدا می‌کند که پودر لایه نهایی کاملاً از ماده دوم تشکیل شده باشد. پس از اقدامات اولیه جهت تولید ماده هدفمند، محصول اولیه جهت فرایند نهایی که شامل چهار قسمت می باشد آماده می‌شود. در زیر به طور مختصر به آنها اشاره شده است.

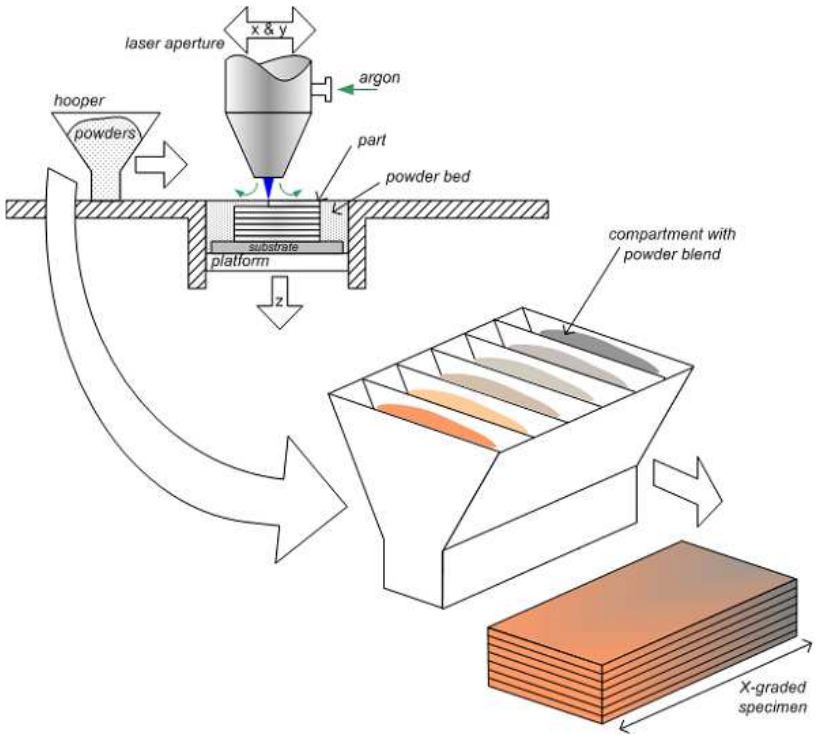
۱) محصول نخست به قسمتی موسوم به بخش پیش‌گرم[1] در کوره می‌رود. در آنجا روان کارهایی که به منظور ایجاد سهولت در فشرده سازی پودر فلز به آنها اضافه شده بود، زدوده می‌شوند.

۲) با وارد شدن پودر فشرده در بخش حرارت بالای کوره، پودر فشرده به درجه حرارت زنیترشدن[2] رسیده و اکسیدهای سطح و ذرات پودری آن کاهش می‌یابد.

۳) در بخش حرارت بالا آلیاژها پراکنده شده و ذرات به هم می‌پیوندند و تشکیل کلوخه‌ای جدید می‌دهند که تخلخل کمتری داشته و در طبیعت شفاف‌تر است.

۴) در پایان در اتمسفر ساکن کلوخ سرد می‌شود تا به دمایی برسد که هیچ اکسیداسیونی صورت نگیرد[۴].

در شکل (۱-۳) شماتیکی از تولید مواد هدفمند به روش متالورژی پودر نشان داده شده است.



شکل(۱-۳)- شماتیک تولید FGM به روش متالورژی پودر[۵].

[1] Pre-heat
[2] Sintering