به نام خدا

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک

تحلیل رفتار الاستیک-پلاستیک استوانه‌ی توخالی هدفمند دوار با درنظرگرفتن تغییرات چگالی و تنش تسلیم

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک-طراحی کاربردی

محمدرضا همتی

استاد راهنما

دکتر مهدی سلمانی‌تهرانی

۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک – طراحی کاربردی آقای محمدرضا همتی

تحت عنوان

تحلیل رفتار الاستیک-پلاستیک استوانه‌ی توخالی هدفمند دوار با درنظرگرفتن تغییرات چگالی و تنش تسلیم

در تاریخ ۹۲/۶/۲۷ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر مهدی سلمانی‌تهرانی
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر محمود کدخدایی
۳- استاد داور	دکتر محمد مشایخی
۴- استاد داور	دکتر صالح اکبرزاده
۵- سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر محمدرضا سلیم‌پور

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و دورد بر محمّد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز...

پدر و مادر عزیزم... این دو معلم بزرگوارم... که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یاوری بی چشم داشت برای من بوده اند؛ چشم های پر از برق شوق و زیبایی حضور مهربان همسرم در کنارم، که خستگی های این راه را به امید و روشنی راه تبدیل کرده، امیدوارم بتوانم در آینده ی نزدیک جوابگوی این همه محبت او باشم...

استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر مهدی سلمانی تهرانی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛ باشد که این خرد ترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به

پدرم،

از تو هر چه می گویم باز هم کم می آورم، اکنون حاصل دستان خسته ات رمز موفقیتم شد

ای مادرم،

ای شوق زیبایی نفس کشیدن، ای روح مهربان هستی ام

و تو مهربان همسرم، اسطوره زندگی ام، پناه خستگی ام و امید بودنم.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت
فهرست شکل‌ها ..... ده
فهرست جدول‌ها ..... دوازده
چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه ۲
۱-۲ آشنایی با مواد هدفمند ۳
۱-۳ تاریخچه‌ی مواد هدفمند ۷
۱-۴ کاربردهای مواد هدفمند ۱۱
۱-۵ مقایسه‌ی مواد هدفمند با مواد مرکب لایه‌ای ۱۲
۱-۶ روش‌های ساخت مواد هدفمند ۱۴
۱-۷ مدل‌های ریاضی مواد هدفمند ۱۷
۱-۸ مروری بر پژوهش‌های صورت گرفته ۱۹
۱-۸-۱ پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه‌های مختلف مواد هدفمند ۱۹
۱-۸-۲ پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی تحلیل رفتار الاستیک-پلاستیک استوانه‌ی همگن ۲۳
۱-۸-۳ پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی تحلیل رفتار الاستیک استوانه‌ی ساخته‌شده از موادهدفمند ۲۳
۱-۸-۴ پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه‌ی تحلیل رفتار الاستیک پلاستیک استوانه‌ی ساخته‌شده از موادهدفمند ۲۷
۱-۹ جنبه‌ی نوآوری پایان‌نامه‌ی حاضر ۲۹
۱-۱۰ ساختار پایان‌نامه‌ی حاضر ۳۰
۱-۱۱ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۳۰

فصل دوم: معادلات حاکم

۲-۱ مقدمه ۳۱
۲-۲ معادلات حاکم بر رفتار الاستیک ۳۳
۲-۲-۱ بررسی شروع تسلیم و تعیین سرعت دورانی آستانه‌ی تسلیم ۳۶
۲-۲-۲ بررسی اثر نسبت شعاعی، چگالی و تنش‌تسلیم متغیر بر الگوی تسلیم ۳۸
۲-۳ معادلات حاکم بر رفتار الاستیک-پلاستیک ماده ۳۸
۲-۳-۱ توزیع تنش در ناحیه‌های الاستیک و پلاستیک ۳۸
۲-۳-۲ توزیع جابه‌جایی و کرنش در ناحیه‌های الاستیک و پلاستیک ۴۵
۲-۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۴۹

فصل سوم: نتایج و بحث

۳-۱ مقدمه ۵۰
۳-۲ بررسی نتایج بخش الاستیک ۵۳
۳-۲-۱ ارزیابی و اعتبارسنجی سرعت دورانی آستانه‌ی تسلیم استوانه ۵۳
۳-۲-۲ بررسی جابه‌جایی شعاعی ۵۴
۳-۲-۳ بررسی مؤلفه‌های کرنش ۵۵
۳-۲-۴ بررسی مؤلفه‌های تنش ۵۷
۳-۲-۵ نتایج بررسی اثر چگالی و هندسه بر ترتیب مؤلفه‌های تنش ۶۳
۳-۲-۶ بررسی اثر هندسه بر شروع تسلیم ۶۶
۳-۲-۷ بررسی اثر چگالی بر شروع تسلیم و سرعت دورانی آستانه‌ی تسلیم ۶۹
۳-۲-۸ بررسی اثر تنش تسلیم بر شروع تسلیم و سرعت دورانی آستانه‌ی تسلیم ۷۰
۳-۳ بررسی نتایج ناحیه‌ی الاستیک-پلاستیک ۷۲
۳-۳-۱ پیشروی ناحیه‌ی پلاستیک ۷۲
۳-۳-۲ پیشروی ناحیه‌ی پلاستیک برای مادهی همگن ۷۲
۳-۳-۳ پیشروی ناحیه‌ی پلاستیک با در نظر گرفتن تغییرات مدول الاستیسیته ۷۳
۳-۳-۴ پیشروی ناحیه‌ی پلاستیک با در نظر گرفتن تغییرات مدول الاستیسیته، چگالی و تنش تسلیم ۷۴
۳-۳-۵ تنش‌های الاستیک-پلاستیک ۷۵
۳-۳-۱ توزیع جابه‌جایی شعاعی ۷۸
۳-۳-۲ توزیع مؤلفه‌های کرنش پلاستیک ۷۹
۳-۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۸۱

فصل چهارم: جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۴-۱ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۸۲
۴-۱-۱ تحلیل نتایج الاستیک ۸۳
۴-۱-۲ تحلیل نتایج الاستیک-پلاستیک ۸۵
۴-۲ پیشنهادها ۸۶

فهرست نمادها ۸۷

مراجع ۸۸

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل(۱-۱): ترکیب پیوسته‌ی سرامیک-فلز به‌عنوان ماده‌ی هدفمند	۵
شکل (۱-۲): مقایسه‌ی مواد هدفمند و مواد متداول [۱]	۶
شکل (۱-۳): برخی کاربردهای مواد هدفمند	۱۲
شکل (۱-۴): معایب و مزایای مواد مرکب (مواد مرکب لایه‌ای‌ها)	۱۳
شکل (۱-۵): نمایش طرح‌واره‌ی تغییرات ناگهانی و پیوسته‌ی جنس، الف- تغییرات ناگهان جنس و ب- تغییر پیوسته‌ی جنس	۱۹
شکل (۱-۶): دیسک ساخته شده از مواد هدفمند در حال دوران [۴۱]	۲۵
شکل (۱-۷): تقسیم مختصه‌ی شعاعی به زیردامنه‌ها برای به‌دست آوردن معادلات خطی	۲۶
شکل (۲-۱): نمایش طرح‌واره‌ی هندسه‌ی مسأله‌ی مورد بررسی و پارامترهای اصلی مسأله	۳۲
شکل (۲-۲): تغییر خواص ماده‌ی هدفمند به‌ازای برخی توان‌ها در محدوده‌ی $-۲\leq n_i\leq ۲$	۳۲
شکل (۲-۳): شروع تسلیم از شعاع داخلی استوانه	۳۹
شکل (۲-۴): شروع تسلیم از شعاع خارجی استوانه	۴۳
شکل (۲-۵): شروع تغییرشکل پلاستیک از شعاع داخلی و خارجی استوانه	۴۴
شکل (۳-۱): بررسی اثر چگالی بر جابه‌جایی شعاعی	۵۴
شکل (۳-۲): خطای چشم‌پوشی از تغییر چگالی بر جابه‌جایی شعاعی	۵۴
شکل (۳-۳): بررسی اثر تغییرات چگالی بر کرنش شعاعی	۵۵
شکل (۳-۴): خطای چشم‌پوشی از تغییرات چگالی برای کرنش شعاعی	۵۶
شکل (۳-۵): بررسی اثر در نظر گرفتن چگالی متغیر بر کرنش محیطی	۵۶
شکل (۳-۶): خطای چشم‌پوشی از تغییرات چگالی بر کرنش محیطی	۵۷
شکل (۳-۷): مقایسه‌ی توزیع تنش شعاعی بی‌بعدشده به‌ازای پارامترهای توان در بازه‌ی $-۲\leq n_E=n_\rho\leq ۲$	۵۸
شکل (۳-۸): بررسی اثر در نظر گرفتن تغییرات چگالی بر توزیع تنش شعاعی، الف- $n_E=n_\rho=۲$ و ب- $n_E=n_\rho=-۲$	۵۸
شکل (۳-۹): خطای چشم‌پوشی از تغییرات چگالی بر تنش شعاعی	۵۹
شکل (۳-۱۰): مقایسه‌ی توزیع تنش محیطی بی‌بعدشده به‌ازای پارامترهای توان در بازه‌ی $-۲\leq n_E=n_\rho\leq ۲$	۵۹
شکل(۳-۱۱): بررسی اثر در نظر گرفتن تغییرات چگالی بر توزیع تنش محیطی، الف- $n_E=n_\rho=۲$ و ب- $n_E=n_\rho=-۲$	۶۰
شکل (۳-۱۲): خطای چشم‌پوشی از تغییرات چگالی بر تنش محیطی	۶۰
شکل(۳-۱۳): مقایسه‌ی توزیع تنش طولی بی‌بعدشده به‌ازای پارامترهای توان در بازه‌ی $-۲\leq n_E=n_\rho\leq ۲$	۶۱
شکل (۳-۱۴): بررسی اثر در نظر گرفتن تغییرات چگالی بر توزیع تنش طولی، الف- $n_E=n_\rho=۲$ و ب- $n_E=n_\rho=-۲$	۶۲
شکل (۳-۱۵): خطای چشم‌پوشی از تغییرات چگالی بر تنش طولی	۶۲
شکل (۳-۱۶): بررسی اثر هندسه و چگالی متغیر بر ترتیب تنش‌ها به‌ازای $n_i=۲$	۶۴
شکل (۳-۱۷): بررسی اثر هندسه و چگالی متغیر بر ترتیب تنش‌ها به‌ازای $n_i=۱$	۶۴
شکل (۳-۱۸): بررسی اثر هندسه و چگالی متغیر بر ترتیب تنش‌ها به‌ازای $n_i=-۱$	۶۵
شکل (۳-۱۹): بررسی اثر هندسه و چگالی متغیر بر ترتیب تنش‌ها به‌ازای $n_i=-۲$	۶۵
شکل(۳-۲۰): بررسی اثر هندسه بر شروع تسلیم به‌ازای $n_E\neq 0,\ n_\rho=n_\sigma=0$	۶۶
شکل (۳-۲۱): نمودار تابع تنش بی‌بعد ترسکا، $\bar{\sigma}_{\mathbf{Tresca}}(\bar{r})$ در آغاز تسلیم، به‌ازای مقادیر مختلف نسبت شعاعی الف- $(a/b=۰/۵)$، ب- $(a/b=۰/۷)$ و ج- $(a/b=۰/۹)$ برای $n_i=۲$	۶۸
شکل (۳-۲۲): نمودار تابع تنش بی‌بعد ترسکا، $\bar{\sigma}_{\mathbf{Tresca}}(\bar{r})$ در آغاز تسلیم، به‌ازای مقادیر مختلف نسبت شعاعی الف-	۶۸

(a/b=۰/۵)، ب- (a/b=۰/۷) و ج- (a/b=۰/۹) برای n_i=-۲

شکل (۳-۲۳): نمودار تابع تنش بی‌بعد ترسکا، $\bar{\sigma}_{\mathbf{Tresca}}(\bar{\boldsymbol{r}})$ در آغاز تسلیم، به‌ازای (a/b=۰/۵) برای $n_E=n_\sigma$, n_ρ=0 ۶۹

شکل (۳-۲۴): نمودار پارامتر بی‌بعد بارگذاری بیشینه‌ی آستانه‌ی تسلیم، $(NLP)_{\mathrm{Max}}=\left(\bar{\omega}/\sqrt{\bar{\sigma}_0}\right)_{\max}$، بر حسب تغییر مقدار پارامترهای توان، برای دو حالت چگالی ثابت (n_ρ=۰) و چگالی متغیر (n_ρ≠۰) به‌ازای a/b=۰/۵ ۶۹

شکل (۳-۲۵): نمودار تابع تنش بی‌بعد ترسکا، $\bar{\sigma}_{\mathbf{Tresca}}(\bar{\boldsymbol{r}})$ در آغاز تسلیم، برای $n_E=n_\rho$, n_σ=0، توان بحرانی انتقال شروع تسلیم از شعاع داخل به شعاع خارج در حالت تنش تسلیم ثابت:$n_E=n_\rho$=۱/۳۳۴۲۹۶۹۵۶ به‌ازای a/b=۰/۵ ۷۱

شکل (۳-۲۶): نمودار پارامتر بی‌بعد بارگذاری بیشینه‌ی آستانه‌ی تسلیم، $(NLP)_{\mathrm{Max}}=\left(\bar{\omega}/\sqrt{\bar{\sigma}_0}\right)_{\max}$، بر حسب تغییرات مقادیر پارامترهای توان، برای دو حالت تنش تسلیم ثابت (n_σ=۰) و تنش تسلیم متغیر (n_σ≠۰) به‌ازای a/b=۰/۵ ۷۱

شکل(۳-۲۷): پیشروی ناحیه‌ی پلاستیک برای ماده‌ی همگن ۷۳

شکل (۳-۲۸): پیشروی ناحیه‌ی پلاستیک هم‌زمان از شعاع داخلی و خارجی برای a/b=۰/۵۵ ۷۳

شکل (۳-۲۹): پیشروی سرعت پلاستیک با درنظر گرفتن تغییرات چگالی و تنش تسلیم ۷۴

شکل (۳-۳۰): نمودار Ω_{y} و Ω_{fp} بر حسب مقدار پارامتر توان، با در نظر گرفتن تغییرات چگالی و تنش تسلیم، به‌ازای a/b=۰/۵ ۷۵

شکل (۳-۳۱): توزیع تنش برای n_E=۱/۳۸۲۶، $n_\rho=n_\sigma$=۰، شروع تسلیم از شعاع داخلی و خارجی برای a/b=۰/۵۵ و NLP= ۱/۳۰۷ ۷۶

شکل (۳-۳۲): توزیع مؤلفه‌های تنش به‌ازای $n_E=n_\rho=n_\sigma$=۱/۳۸۲۶، (a/b)=۰/۵۵ و $\bar{r}_{\mathrm{ep}}$=۰/۶۵ (Ω=۱/۱۹۹۹)، تسلیم از شعاع داخلی ۷۶

شکل (۳-۳۳): توزیع تنش الاستیک-پلاستیک به‌ازای مقادیر مختلف بارگذاری ۷۷

شکل (۳-۳۴):جابه‌جایی پلاستیک بی‌بعد با در نظرگرفتن تأثیر تغییرات چگالی و تنش تسلیم ۷۸

شکل (۳-۳۵): کرنش پلاستیک بی‌بعد به‌ازای n_E=۱/۳۸۲۶، $n_\rho=n_\sigma$=۰ ۷۹

شکل (۳-۳۶):کرنش پلاستیک بی‌بعد به‌ازای n_i=۱/۳۸۲۶ ۸۰

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول (۳-۱): مشخصه‌های مکانیکی برای ۵ نمونه زوج فلز که نسبت چگالی، مدول یانگ و تنش تسلیم آن‌ها یکسان و برابر است. (در ستون نسبت خصوصیت‌ها، عدد درون پرانتز معکوس عدد بیرون پرانتز است. نسبت شعاع خارجی به داخلی ۲=(b/a) است) ۵۲

چکیده

ریزساختار ناهمگن مواد هدفمند و تغییرات تدریجی و پیوسته‌ی خواص این مواد از یک سطح به سطح دیگر، باعث کاربرد فراوان این مواد در صنایع مختلف مانند سپرهای حرارتی، پوشش توربین گاز برای کاهش تورق و افزایش طول عمر آن، پوشش حرارتی در موتورهای بنزینی برای افزایش تراکم و راندمان، اجزای مبدل‌های حرارتی، روکش‌های پلاسما برای راکتورهای گداخت هسته‌ای، استخوان مصنوعی، فیبر نوری، صنایع ساعت‌سازی، اتصلات الکتریکی و مغناطیسی برای ولتاژهای بالا و غیره شده است. پایان‌نامه‌ی حاضر به مطالعه‌ی تحلیلی تغییرشکل‌های الاستیک-پلاستیک استوانه‌ی ساخته شده از مواد هدفمند در اثر دوران می‌پردازد. مدول الاستیسیته، چگالی و تنش تسلیم به‌صورت تابع توانی از مختصه‌ی شعاعی فرض شده‌اند. تحلیل بر پایه‌ی نظریه‌ی تغییرشکل‌های کوچک و با فرض طولی بسیار بزرگ در حالت کرنش-صفحه‌ای انجام شده است. با افزایش سرعت دورانی استوانه‌ی دوار از سرعت دورانی آستانه‌ی تسلیم که از تحلیل رفتار الاستیک به‌دست می‌آید، برای تحلیل تغییرشکل پلاستیک، از قانون جریان وابسته به معیار تسلیم ترسکا استفاده شده است. برای ارزیابی و اعتبارسنجی تحلیل‌ها، نتایج عددی با نتایج مشابه مربوط به حالت‌های خاص (استوانه‌ی همگن و استوانه‌ی هدفمند با چگالی و تنش تسلیم ثابت) که در مراجع پیشین موجود هستند، مقایسه و اعتبار نتایج نشان داده شده است. آن‌گاه اثر تغییر چگالی و تنش تسلیم، که در پژوهش‌های پیشین از آن چشم‌پوشی شده، بر تغییرشکل الاستیک-پلاستیک استوانه‌ی هدفمند دوار بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد چشم‌پوشی از تغییر چگالی و تنش تسلیم، نه‌تنها می‌تواند در اندازه‌ی جابه‌جایی شعاعی و مؤلفه‌های تنش و کرنش محاسبه شده، بلکه حتی در پیش‌بینی مکان شروع تسلیم و روند گسترش ناحیه‌ی تغییرشکل پلاستیک نیز خطای قابل توجهی را به‌همراه داشته باشد. بر اساس جستجوی نگارنده، در نظر گرفتن اثر تغییرات چگالی و تنش تسلیم بر رفتار مکانیکی استوانه‌ی توخالی هدفمند تازگی دارد و در پژوهش‌های منتشرشده‌ی پیشین، بررسی نشده است. در نظر گرفتن تغییرات چگالی و تنش تسلیم در راستای شعاع اثر قابل توجهی بر رفتار استوانه‌ی دوار دارد.

کلمات کلیدی: ۱- مواد هدفمند ۲- استوانه‌ی توخالی دوار ۳- تغییرشکل الاستیک-پلاستیک ۴- پلاستیسیته‌ی وابسته‌ی ترسکا

فصل اول
مقدمه

۱-۱ مقدمه

امروزه پیشرفت تکنولوژی و بهره‌بری هرچه بیشتر از صنایع در هر کشور جز با طراحی، تحلیل و ساخت مواد پیشرفته در زمینه‌های مختلف امکان‌پذیر نیست. در جهان امروز با توجه به نیازهای روزافزون صنعت، استفاده از مواد ترکیبی برای رسیدن به خواص و کاربردهای مورد نیاز بیش از پیش احساس می‌شود. استفاده از یک ماده‌ی تنها برای رفع نیاز خواسته‌های بشر امروز، هر چند در برخی موارد جوابگوی نیاز اوست اما به‌دشواری می‌توان جنبه‌های اقتصادی و کارایی بالای آن‌را تضمین کرد. از این‌رو تعریف موادی با عملکرد دوگانه به‌این معنا که هم‌زمان خواص دو یا چند ماده را داشته باشند، می‌تواند خواص چندگانه‌ی مورد نیاز صنایع را برآورده سازد.

درسال‌های اخیر با توجه به‌توسعه‌ی توربین‌ها، راکتورهای هسته‌ای، تجهیزات هوا-فضا، ساخت موتورهای سرامیکی و مانند آن‌ها، استفاده از موادی که توانایی تحمل دمای بسیار بالا را داشته باشند و از طرفی دارای خواص مکانیکی لازم از جمله مقاومت در مقابل ضربه و رشد ترک، چکش‌خواری و شکل‌پذیری مناسب و تحمل کرنش‌های نسبتاً بالا، اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است.

فصل حاضر در ابتدا به‌بررسی تاریخچه‌ی مواد هدفمند[1] و کاربردهای آن خواهد پرداخت. در ادامه روش‌های ساخت مواد هدفمند و هم‌چنین برخی مزیت‌های این مواد نسبت‌به مواد مرکب لایه‌ای بحث و بررسی شده است. ازآن‌جا که پژوهش‌های متعددی بر روی این مواد در زمینه‌های مختلف صورت گرفته، مروری بر پژوهش‌های پیشین در ادامه ارائه گردیده است و در انتها نیز جنبه‌ی نوآوری این پایان‌نامه بیان شده است.

۱-۲ آشنایی با مواد هدفمند

موادی که دارای تغییر تدریجی خواص از جمله مدول الاستیسیته، خواص حرارتی و غیره به‌صورت پیوسته هستند را به‌عنوان مواد هدفمند یا مواد مدرج تابعی نام برده می‌شوند. این‌کار با تغییر در کسر حجمی مواد تشکیل‌دهنده و ریزساختار آن ممکن است.

در سال‌های قبل در صنایع هوا-فضا از مواد سرامیکی خالص جهت پوشش و روکش قطعات با درجه‌ی کارکرد بالا استفاده می‌شد. این مواد عایق های بسیار خوبی هستند. ولی مقاومت زیادی در برابر تنش‌های پس‌ماند ندارند. تنش‌های پس‌ماند در این مواد سبب بروز مشکلات زیادی از جمله ایجاد حفره و ترک می‌شود. برای رفع این مشکل از مواد مرکب لایه‌ای استفاده شده است. اما تنش‌های حرارتی در این مواد نیز موجب بروز پدیده‌ی لایه‌لایه شدن می‌شود. با توجه به این مشکلات، طرح ماده‌ای مرکب که هم مقاومت حرارتی و مکانیکی بالا داشته و هم مشکل لایه‌لایه شدن را نداشته باشد ضرورت پیدا کرد. مواد مرکب هرچند در برخی موارد جواب‌گوی نیاز صنعت است، اما به‌دلیل ماهیت لایه‌ای آن در اثر اعمال بارگذاری‌های مکانیکی و حرارتی نسبتاً بالا، ساختار آن لایه‌ای شده و در نتیجه تسلیم رخ می‌دهد.

جسم مادی همگن به جسمی گفته می‌شود که خواص مواد در هر نقطه از آن جسم یکسان باشد و در مقابل جسم مادی ناهمگن جسمی است که خواص مواد در آن تابعی از مکان بوده و از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر تغییر نماید. جسم مادی ناهمسانگرد، جسمی است که خواص مواد در یک نقطه از جسم در جهات مختلف متفاوت بوده و خواص مادی در اینگونه مواد وابسته به جهت است و از طرفی دیگر جسم مادی همسان‌گرد، جسمی است که کلیه خواص مادی آن در یک نقطه در همه جهات یکسان باشد.

مواد ناهمگن غالباً در دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته‌ی اول مواد «چند ماده‌ای» هستند که این دسته دارای چند فاز متمایز مادی است و دیگری دسته‌ی «مواد با خصوصیات متغیر» که درصد ماده‌ی تشکیل‌دهنده‌ی آن‌ها از

[1] Functionally Graded Material

نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر به‌صورت تابعی تغییر می‌کند. این دسته در واقع کلاس جدیدی از مواد مرکب هستند که خصوصیات مواد در یک و یا چند جهت، به‌ویژه در جهت ضخامت، به‌صورت پیوسته تغییرمی کند. مواد هدفمند یا FGM در واقع ترکیبی از دو یا چند ماده هستند و به‌گونه‌ای طراحی شده‌اندکه نسبت حجمی[1] آن‌ها در یک یا چند جهت تغییر نماید. این امر ماده را از دیدگاه میکروسکوپی ناهمگن ساخته و از دیدگاه ماکروسکوپی خواص مکانیکی را به‌تدریج و به‌طور پیوسته تغییر می‌دهد. این تغییرات پیوسته نسبت به تغییرات گسسته‌ی خواص مواد مرکب، مشکل تغییرات ناگهانی در سطح تماس دو ماده‌ی گوناگون را برطرف می‌کند.

مواد هدفمند مواد ترکیبی با ریزساختار ناهمگن هستند که خواص آن‌ها به‌صورت پیوسته از یک سطح به سطح دیگر تغییر می‌کند. خواص مکانیکی در مواد هدفمند با توجه به‌نوع ترکیب، تغییرات پیوسته‌ای در جهت ضخامت دارد که با توجه به پیوستگی ترکیب اجزای تشکیل دهنده‌شان دارای خواص مؤثرتری نسبت به مواد مرکب متداول هستند. نسبت ترکیب مواد در راستای ضخامت جسم متغیر بوده و چگالی ذرات از یک سطح به سطح دیگر توسط یک تابع معین که می‌تواند خطی یا غیرخطی باشد کاهش یا افزایش می‌یابد.

به‌عنوان مثالی از کاربرد این مواد می‌توان به ترکیب سرامیک و فلز که البته یکی از رایج ترین مواد هدفمند نیز است اشاره کرد. به‌گونه‌ای که سرامیک به‌دلیل دارا بودن ضریب هدایت حرارتی پایین می‌تواند در دماهای بالا مورد استفاده قرار گیرد و فلز باعث جلوگیری از رشد ترک و شکست ماده در اثر بارهای مکانیکی می‌شود.

همان‌گونه که گفته شد نوع رایج این مواد ترکیب پیوسته‌ای از سرامیک و فلز است. این مواد از اختلاط پودر فلز و سرامیک به‌دست می‌آیند. تغییر فلز و سرامیک از یک سطح به سطح دیگر کاملاً پیوسته است. به‌گونه‌ای 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 توحه به‌نوع ترکیب تغییرات پیوسته‌ای در جهت ضخامت دارد. این مواد با توجه به پیوستگی ترکیب مواد تشکیل‌دهنده، خواص مکانیکی مؤثری نسبت به مواد مرکب لایه‌ای دارند. این مواد در ساخت صفحات و پوسته‌های مخازن راکتورها، توربین ها و دیگر اجزای ماشین‌ها کاربرد زیادی دارند. زیرا این قطعات آمادگی خوبی جهت واماندگی ناشی از کمانش حرارتی دارند.از دیگر مزایای مواد هدفمند نسبت به مواد مرکب لایه‌ای، عدم گسستگی در محل اتصال لایه‌ها است. زیرا همان‌طور که گفته شد در مواد هدفمند ترکیب سرامیک و فلز پیوسته است.

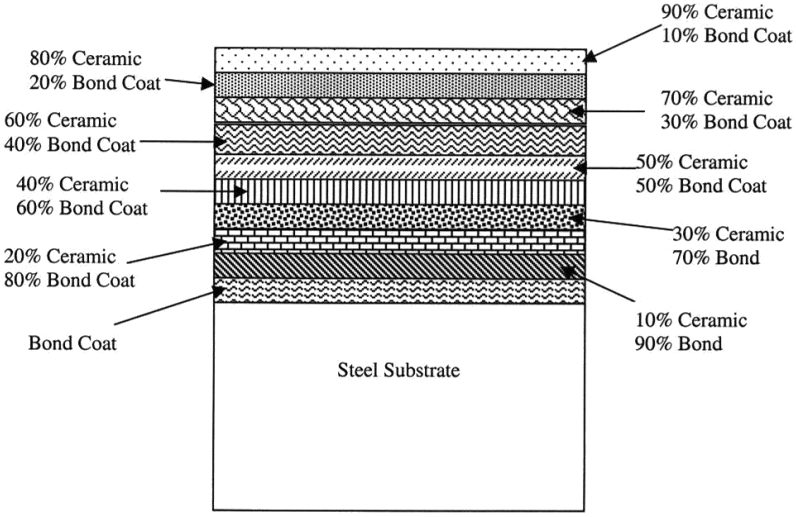
[1] Volume Fraction

بخش فلزی مواد هدفمند می‌تواند آلومینیوم، مس، کرم، نیکل و یا سرب باشد. قسمت سرامیک نیز می‌تواند از جنس سرامیک بدون اکسید فلز مانند SiC و Si_3N_4، سرامیک‌های بدون اکسید فلز مانند TiC و ZrC، سرامیک‌های با اکسید بدون فلز SiO_2 و یا سرامیک‌های با اکسید-با فلز Al_2O_3 و ZrO_2 انتخاب شود [۳ و ۲، ۱].

قبل از ساخت ماده‌ی هدفمند باید مشخص شود که فلز و سرامیک به چه صورتی توزیع شده است، در بعضی مقاله ها هدف یافتن یک پروفیل با توجه به کمینه کردن یک کمیت است. در مواقع دیگر پروفیل توزیع فلز و سرامیک انتخاب می‌شود و یک پارامتر برای اهداف بهینه یا کمینه کردن یک کمیت در آن در نظر گرفته می‌شود.

از کاربردهای صنعتی این مواد می‌توان به استفاده در غشاها و کاتالیست‌ها در صنایع شیمیایی، دیواره‌های داخلی راکتورها، سانتریفیوژها، ساخت دندان و استخوان مصنوعی در مهندسی پزشکی، موتورهای سرامیکی، پوشش در مقابل خوردگی، ساخت موشک‌ها و غیره اشاره کرد.

شکل (۱-۱) مثالی از نحوه‌ی ترکیب فلز-سرامیک نشان می‌دهد. فلز استفاده شده در این ترکیب فولاد است. این شکل تغییر تدیجی از فولاد به سرامیک را نشان می‌دهد به‌نحوی که در ابتدا بیشتر ریزساختار ماده از نوع فولاد و در سوی دیگر، ریزساختار ماده بیشتر از جنس سرامیک است. لازم به ذکر است نحوه‌ی ترکیب مواد با یکدیگر می‌تواند به‌صورت‌های دیگری نیز انجام پذیرد که در ادامه به آن پرداخته خواد شد.



شکل(۱-۱): ترکیب پیوسته‌ی سرامیک-فلز به‌عنوان ماده‌ی هدفمند[۱]

یک نمونه‌ی بارز مواد هدفمند، یک ماده‌ی مرکب غیرهمگن است که از فازهای متفاوت تشکیل‌دهنده‌ی آن ساخته شده است. همان‌گونه که نیز اشاره شد، به‌علت تغییر پیوسته در خواص مواد هدفمند، سطح مشترک بین دو لایه از بین می‌رود بنابراین تنش‌های بزرگ و تمرکز تنش در سطح مشترک مواد مرکب لایه‌ای به‌صورت چشم‌گیری کاهش می‌یابد. استفاده از مواد هدفمند تنش‌های پس‌ماند را به‌صورت قابل توجهی کاهش می‌دهند در نتیجه حذف

سطح مشترک در مواد مرکب یکی از اصلی‌ترین دلایل روآوردن به مواد هدفمند است. این کار باعث می‌شود که مقاومت اتصال بهبود یافته، تنش‌های پس‌ماند کم شده و در نهایت توزیع تنش یکنواخت گردد.

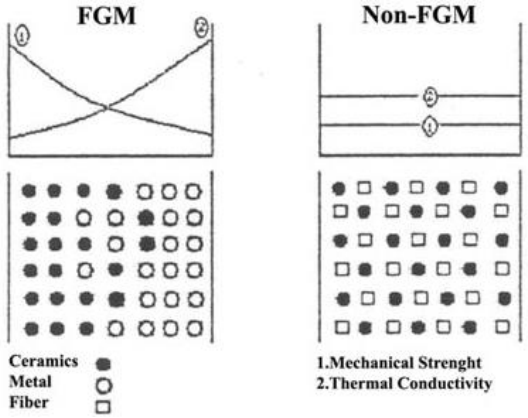
مواد هدفمند دارای کاربردهای زیادی در عملیات سخت و شدید هستند. در چنین شرایط بارگذاری سه گونه ویژگی در طراحی مواد هدفمند باید لحاظ شود.

- ✓ مقاومت حرارتی و خواص آنتی اکسیدان و ضد خوردگی و سایش خوب در طرف با حرارت بالا
- ✓ خواص مکانیکی ازجمله چقرمگی خوب در طرف با حرارت پایین
- ✓ کاهش تنش حرارتی مؤثر در طول ماده

به‌عنوان مثال چرخ‌دنده‌ها باید به‌اندازه‌ی کافی چقرمه باشند تا در مقابل شکست دارای مقاومت بالا باشند و هم‌چنین باید درسطح بیرونی به‌اندازه‌ی کافی سخت باشد تا از سایش آن جلوگیری شود.

به‌طور مشابه یک پره‌ی توربین نیز باید از یک طرف به‌حد کافی چقرمه باشد تا بار وارده را تحمل کند و از طرف دیگر نقطه‌ی ذوب بالایی داشته باشد تا بتواند در مقابل حرارت بالایی که روی سطح آن اعمال می‌شود مقاومت کند.

معمولاً در قسمتی از ماده که به مقاومت حرارتی و سایشی بالا نیاز است از مواد سرامیکی همسان‌گرد شامل سرامیک‌های پیشرفته مانند زیرکونیا، سیلیکون-کاربید و تنگستن-کاربید استفاده می‌شود و در طرفی که به چقرمگی بالا نیاز است از مواد فلزی همسان‌گرد مانند آلیاژهای مهندسی، منیزیوم، آلومینیوم، مس، تیتانیوم، تنگستن، فولاد و سوپر آلیاژها استفاده می‌شود. شکل (۱-۲) تفاوت‌های یک ماده‌ی رایج با یک ماده‌ی هدفمند را از نظر توزیع ویژگی‌ها و مواد سازنده نشان می‌دهد. معمولاً ترکیبی که برای مواد هدفمند در نظر گرفته می شود به‌صورتی است که خواص مواد ترکیبی، به‌نوعی مکمل یکدیگر باشند و هر کدام کمبودهای دیگری را جبران کنند.



شکل (۱-۲): مقایسه‌ی مواد هدفمند و مواد متداول [۱]

گرادیانی کردن مواد به‌طور کلی به روش‌های زیر باعث بهبود مشخصه‌های مکانیکی و ترمومکانیکی اجزای می‌گردد:

- ✓ کمینه‌سازی تنش‌های حرارتی و کنترل بیشینه‌ی تنش‌های حرارتی در نواحی بحرانی
- ✓ به تأخیر انداختن شروع تسلیم پلاستیک و شکست در یک بارگذاری ترمومکانیکی
- ✓ جلوگیری از تمرکز تنش‌های شدید در محل تقاطع لبه‌ها و نقاط تکین
- ✓ افزایش مقاومت باندهای واسط بین جامدات غیر همگن با جهت‌دار کردن تغییر خواص مکانیکی
- ✓ کاهش رشد ترک با انتخاب مناسب درجه‌بندی خواص مکانیکی
- ✓ سهولت قرارگیری پوشش سخت روی یک ماده با جنس نرم به‌وسیله‌ی درجه‌بندی پیوسته‌ی خواص مکانیکی و جهت‌دار کردن تغییر خواص مواد
- ✓ بهبود مشخصه‌های تغییرشکل پلاستیک با درجه‌بندی ترکیب در لایه‌های سطحی

در ساختارهای موجود در طبیعت می‌توان وجود مواد هدفمند را مشاهده کرد. این مواد در بافت‌های زنده گیاهان، حیوانات و بدن انسان وجود دارد. برخی گیاهان با داشتن پوسته‌ی محکم که به‌تدریج به سمت داخل نرم می‌شود از این خاصیت مواد هدفمند سود برده که استفاده از خواص با تغییرات تدریجی باعث کاهش وزن، استحکام بالا در محل‌های آسیب‌پذیر است که می‌توان به گیاه بامبو اشاره کرد. اما ساختار مهمتری که در بدن انسان از مواد هدفمند سود جسته است، ساختمان استخوان و دندان است. دندان‌ها به‌گونه‌ای ساخته شده‌اند که در قسمت ریشه محکم‌تر و با تراکم بالا نسبت به نوک دندان هستند. تراکم متفاوت در استخوان‌های به‌کار رفته در بدن نیز بیانگر این موضوع است. لازم به ذکر است یک نمونه از مواد هدفمند به‌صورت آزمایشگاهی برای اولین باردر قالب یک پروژه‌ی کارشناسی ارشد در دانشگاه تربیت مدرس به‌صورت آزمایشگاهی ساخته شده است.

۱-۳ تاریخچه‌ی مواد هدفمند

ایده‌ی کلی تغییر تدرجی و پیوسته خواص مکانیکی و حرارتی ماده با پیشرفت مواد مرکب لایه‌ای‌ها در سال ۱۹۷۲ بوده است. در این میان مدل‌های متفاوتی برای ترکیب و تراکم این مواد پیشنهاد شده است که برای هر کدام نیز دلایلی ذکر شده است.

مفهوم ماده‌ی هدفمند در سال ۱۹۸۴ برای اولین بار در لابراتورهای هوا-فضای ژاپن پیشنهاد شد. در سال ۱۹۸۷ یک برنامه‌ی تحقیق تحت عنوان "تحقیق روی تکنولوژی پایه برای تولید و توسعه‌ی مواد هدفمند در جهت

تنش‌زدایی حرارتی" زیر نظر وزارت علوم دولت ژاپن انجام گرفت. دانشمندان برروی روش‌های توسعه و سازماندهی کردن فرایند طراحی، تولید و ارزیابی این مواد بحث و تحقیق کردند. در سال ۱۹۸۹نتایج این تحقیق منتشر شد و در سال ۱۹۹۰ اولین کنفرانس دو سالانه‌ی بین‌المللی مواد هدفمند در شهر سنای ژاپن برگزارو در سال ۱۹۹۲ این کنفرانس در سانفرانسیسکو برگزار گردید. در سومین نشست که در لاوسن برگزار گردید تصمیم بر این شد که نام این مواد به Functionally Graded Material تغییر یابد. زیرا دارای مفهوم رسا و دقیق از خواص این مواد است، قبل از آن نام این مواد "مواد با خاصیت درجه‌بندی شده" بود. مواد هدفمند به‌عنوان یکی از ده تکنولوژی برتر و پیشرفته در ژاپن انتخاب شده است. امروزه به‌وضوح می‌توان گسترش و کارایی این مواد را در سرتاسر جهان دید و این کارایی روزبه‌روز نیز افزایش می‌یابد.

گسترش روزافزون علوم و تکنولوژی منجر به شناخت و به کارگیری هرچه بیشتر مواد نو در صنایع مختلف شده است. از این‌رو در سال های اخیر توجه خاصی به شناخت خواص و رفتار این مواد تحت بارگذاری های مختلف صورت گرفته است. این مواد شامل مواد مرکب، مواد پیزوالکتریک، نانومواد ، آلیاژهای حافظه دار و مواد هدفمندمی شوند.پیشرفت های فن آوری در صنایع هوافضا و نیروگاه های حرارتی، نیاز به موادی با مقاومت بالای حرارتی و مکانیکی را گسترش داده و مبحث ترموالاستیسیته را به عنوان یک شاخه اصلی از گرایش طراحی جامدات در رشته مهندسی مکانیک بدل کرده است. بالا بودن درجه‌ی حرارت کارکرد در بسیاری از سازه‌ها و قطعات ماشین‌ها مانند سازه‌های هوا فضایی، موتورهایی که در هواپیماهای پرسرعت به‌کار می‌روند، مخازن مورد استفاده در نیروگاها، ابزار برش و در فرآیندهای صنعتی که با استفاده از اشعه‌ی لیزر با چگالی انرژی بالا شکل‌دهی صورت می‌گیرد، به‌وجود می‌آید. این سازه‌ها و قطعات تحت شرایط حرارتی غیر یکنواخت ناپایدار، که حتی ممکن است تحت شوک‌های حرارتی قرار گرفته و تغییراتی در ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها به‌وجود آید، کار می‌کنند. تنش‌های حرارتی ایجاد شده در این شرایط، همراه با تنش‌های مکانیکی ناشی از بارهای خارجی، ممکن است باعث ترک و شکست در قطعه شود. تنش‌های حرارتی می توانند اثرهایی مانند خستگی حرارتی و کمانش حرارتی را از خود نشان داده وحتی برخی از مواد در میدان درجه حرارت ناپایدار در اثر گرادیان بالای درجه حرارت، ماهیت ترد و شکننده پیداکرده و در نتیجه توانایی تحمل گرادیان‌های بالای درجه حرارت را نخواهند داشت.

به‌منظور مقابله با بارهای شدید حرارتی، محققین ایده‌ی استفاده از مواد هدفمند و ماده ای با خاصیت سرامیک-فلزی را مطرح کردند. این مواد که از آن‌ها با عنوان مواد FGM یاد می‌شوند، موادی ناهمگن[1] ولی همسان‌گرد هستند که ویژگی‌های فیزیکی در آنها از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، ریز ساختار این مواد به‌گونه‌ای است که به‌صورت پیوسته و تدریجی از یک ماده، در راستایی مشخص به ماده‌ای کاملا متفاوت میل می‌کند. مثلاً مدول الاستیسیته، چگالی، مقاومت به سایش، سختی و ضریب هدایت حرارتی در این مواد به طور پیوسته تغییرمی‌کنند. این تغییرات پیوسته خواص در مقایسه با تغییرات گسسته خواص مواد مرکب ، مشکل تغییرات ناگهانی در سطح تماس دو ماده‌ی گوناگون را برطرف کرده و توزیع تنش پیوسته را سبب می شود [۲].

نیاز به موادی یا مقاومت بالای حرارتی و مکانیکی و قابلیت تحمل گرادیان‌های شدید حرارتی، به انگیزه‌ای برای تولید مواد هدفمند تبدیل گشت. به عنوان مثال سطوح سازه‌های فضایی به هنگام ورود به جو زمین اختلاف دمایی درحدود ۱۶۰۰درجه کلوین را می‌بایست تحمل نمایند. به این علت دانشمندان علم مواد در ژاپن در سال ۱۹۸۴ در مرکز تحقیقات هوا و فضا در شهر سندایی تصمیم گرفتند که ماده ای طراحی کنند که گرادیان‌های شدید دما را تحمل کنند [۳]. در سال ۱۹۸۷ سه سال بعد از اولین ایده‌های ساخت مواد هدفمند، یک پروژه‌ی عظیم برای رسیدن به فن آوری اولیه ساخت این مواد تعریف شد که مؤسسات پژوهشی هفده کشور مختلف و چندین دانشگاه و چند شرکت در آن همکاری کردند [۴].

برای نخستین بار در سال ۱۹۷۲، بِوِر و دووز [۵]، ایده‌ی ترکیب دو فاز مختلف را با تغییر در نحوه‌ی آرایش و ترتیب هر کدام از فازها در هر لایه در جهت بهبود خواص مکانیکی مطرح کردند. ایده‌ی آنها عموماً ازنتایج تحقیقات گسترده‌ای که گُتزِل [۶] در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ روی مواد مرکب انجام داده بود، نشأت می‌گرفت. در اواسط دهۀ ۱۹۸۰ برای نخستین بار در کشور ژاپن نام علمی FGM به موادهدفمند داده شد و عصر جدیدی برای تحقیقات گسترده روی این مواد گشوده گشت. سه تن از دانشمندان به نام‌های نینو، کویزومیو هیرای[۴] تحقیقات خود را بر روی پروژۀ هواپیماهای فضایی آغاز کردند. تحقیقات این سه تن نشان داد که با توجه به اینکه اجزای سازه های به کاررفته در بدنه هواپیماهای فضایی تحت بارهای بسیار شدید قرار می‌گیرند، در ترکیب و درجه بندی ریزساختارهای سازه های بدنه بایستی به دو مورد توجه گردد. نخست، اجزای سازه‌ای از مواد موجود و در دسترس ساخته شده، و ثانیاً، از تمرکز تنش در اجزای سازه های فضایی به دلیل به وجود آمدن سطوح نوک تیز پرهیز گردد.

[1] Nonhomogeneous