دانشگاه صنعتی امیرکبیر

عنوان:

تحلیل ترموالاستیسیته کوپل برای تیر FGM

ارایه شده برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

توسط:
محمد حسین بابایی

استاد راهنما:
پرفسور محمد رضا اسلامی

استاد مشاور:
پرفسور محمود شاکری

دانشکده مهندسی مکانیک
اسفند 1384

بسمه
تعالي

شماره :
تاريخ :۸۴/۱۲/۸

معاونت پژوهشي
فرم پروژه تحصيلات
تكميلي ۷

فرم اطلاعات پايان‌نامه كارشناسي ارشد و دكترا

دانشگاه صنعتي
اميركبير
(پلي تكنيك تهران)

مشخصات دانشجو

نام و نام خانوادگي : محمد حسين بابايي ■ **دانشجوآزاد** □ **بورسيه** □ **معادل**

نام و نام خانوادگي استاد راهنما : دكتر محمد رضا اسلامي

عنوان به فارسي : تحليل ترموالاستيسيته كوپل براى تير FGM
عنوان به انگليسي : Coupled Thermoelasticity Analysis of FGM Beams

■ **كارشناسي ارشد**
□ **دكترا**

نوع پروژه : **كاربردي** □ **بنيادي** ■ **توسعه اي** □ **نظري** □

تاريخ شروع : مهر ۸۳ **تاريخ خاتمه :** ۸۴/۱۲/۶ **تعداد واحد :** ۶
سازمان تأمين كننده اعتبار :

واژه‌هاي كليدي به فارسي : ترموالاستيسيته كوپل، FGM، تير
واژه‌هاي كليدي به انگليسي : Coupled Thermoelasticity, FGM, Beam

---

نظرها و پيشنهادها به منظور بهبود فعاليت‌هاي پژوهشي دانشگاه : -

استاد راهنما : -

دانشجو : -

امضا استاد
راهنما : **تاريخ :**

نسخه ۱) معاونت پژوهشي
نسخه ۲) كتابخانه و به انضمام دو جلد پايان نامه به منظور تصفيه حساب با كتابخانه و مركز اسناد ومدارك علمي

اعلان منحصر به فرد بودن پایان‌نامه :

بدينوسيله اعلان مي‌گردد كه مطالب مندرج در اين پايان‌نامه تاكنون براي اخذ هيچ نوع مدركي توسط اينجانب و فرد ديگري ارائه نشده است.

محمدحسين بابايي

امضا :

چکیده

ترموالاستیسیته کوپل کلاسیک برای تیر اولر ـ برنولی ساخته شده از FGM مورد بررسی قرار گرفته است. برای این کار معادلهٔ حرکت و معادلات انرژی نهایی به صورت همزمان برای مجهولات به روش المان محدود گلرکین حل شده اند. پروفیل تغییرات دما در راستای ضخامت تیر به صورت خطی با ضرایب مجهول فرض گردیده است که پس از حل محاسبه می شوند. با استفاده از تبدیل لاپلاس و در نهایت پس از حل المان محدود، با استفاده از معکوس لاپلاس عددی با مسألهٔ تابع زمان بودن، برخورد شده است. پروفیل تغییرات خواص FGM به کلی ترین صورت آن که از روابط کسر حجمی مواد تشکیل دهنده پیروی می کند فرض شده است. نتایج برای پروفیلهای مختلف تغییرات تحت بارهای حرارتی و مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته اند. در روش المان محدود از توابع شکلی C^1 استفاده گردیده که به همگرایی شدید جوابها انجامیده است. نتایج با مقاله ای دیگر که تیر در آن همگن بوده است تطبیق داده شده است.

فـهـرست مـطـالـب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه و تاریخچه ----------۱

فصل دوم: کلیات مواد هدفمند و معادلات پایه----------۶

۲-۱- کلیات مواد هدفمند----------۷

۲-۱-۱- فیزیک مواد هدفمند ----------۷

۲-۱-۲- تاریخچه مواد هدفمند ---------- ۸

۲-۱-۳- فرآیندهای ساخت مواد هدفمند ----------۱۰

۲-۱-۴- ماهیت مکانیکی مواد با خواص تابعی FGM ----------۱۱

۲-۲- معادلهٔ حرکت ----------۱۵

۲-۲-۱-مقدمه ---------- ۱۵

۲-۲-۲- تئوری اولر ـ برنولی برای تیر----------۱۵

۲-۲-۳- محور خنثی برای تیر FGM و بحثی راجع به تغییر مکان لایه میانی---------- ۱۶

۲-۲-۴- رابطه هوک و گشتاور حاصل از تنش---------- ۱۸

۲-۳- معادلات انرژی حاکم ----------۲۱

۲-۳-۱-مقدمه ---------- ۲۱

۲-۳-۲-کاستن خطای ناشی از فرض خطی بودن دما و یافتن معادلات انرژی نهایی حاکم بر تیر FGM ---------- ۲۲

فصل سوم: حل معادلات حاکم ----------۲۵

۳-۱- بی‌بعد سازی معادلات----------۲۶

۳-۲- لاپلاس‌گیری از معادلات بی‌بعد شده----------۲۷

۳-۳- مروری بر روش المان محدود و اعمال آن بر معادلات حاکم در فضای لاپلاس---------- ۲۸

۳-۴- تکنیک معکوس لاپلاس به روش عددی---------- ۳۳

فصل چهارم: نتایج و بحث ---------- ۳۵
۴-۱- صحه‌گذاری بر نتایج ---------- ۳۶
۴-۲- بررسی همگرایی حل ---------- ۳۸
۴-۳- بررسی اثر پروفیلهای مختلف FGM بر پاسخها ---------- ۳۹
۴-۴- بررسی اثرات کوپلینگ معادله انرژی و معادله حرکت ---------- ۴۶
۴-۴-۱- تیر تحت بارگذاری ناگهانی حرارتی ---------- ۴۶
۴-۴-۲- تیر تحت بارگذاری مکانیکی ---------- ۵۱
۴-۵- نتیجه گیری ---------- ۵۵
منابع و مراجع ---------- ۵۷
پیوست

فهرست نمودارها و اشکال:

(۱-۱) ـ توزیع خواص در مواد مرکب و هدفمند ---------- ۳

(۱-۲) ـ تیر و محورهای مختصات ---------- ۱۶

(۲-۲) ـ المان تیر تحت بارگذاری ---------- ۱۹

(۳-۱) ـ المان خطی بکار رفته در حل FEM ---------- ۲۹

(۴-۱) ـ تاریخچهٔ خیز در وسط طول تیر با مشخصات ابعادی ذکر شده در زیر شکل برای Al شکل برگرفته از مقالهٔ [۳] ---------- ۳۷

(۴-۲) ـ تاریخچه خیز در وسط تیر با مشخصات ابعادی ذکر شده در شکل قبل برای همان ماده. نمونهٔ حاصل از نتایج پروژه ---------- ۳۷

(۴-۳) ـ تاریخچهٔ خیز در وسط تیر برای جنس همگن سرامیک، بررسی همگرایی پاسخها ----- ۳۸

(۴-۴) ـ توزیع خیز برای جنس همگن سرامیک $۳۰s$ پس از اعمال شوک حرارتی، بررسی همگرایی پاسخها ---------- ۳۹

(۴-۵) ـ نحوه تغییرات مدول یانگ در راستای ضخامت تیر. بررسی اثر پارامترهای FGM مختلف ---------- ۴۱

(۴-۶) ـ تاریخچهٔ خیز در وسط طول تیر، بررسی FGM های مختلف ---------- ۴۲

(۴-۷) ـ تاریخچه خیز در وسط تیر. بررسی FGM های مختلف ---------- ۴۲

(۴-۸) ـ توزیع خیز، بررسی FGM های مختلف ---------- ۴۳

(۴-۹) ـ تاریخچه دما روی سطح بالایی تیر در نقطه‌ای وسط طول تیر. بررسی اثرات FGM - ۴۳

(۴-۱۰) ـ توزیع دما روی سطح پایینی تیر، بررسی اثرات FGM ---------- ۴۴

(۴-۱۱) ـ توزیع دما در راستای ضخامت تیر در نقطه‌ای وسط تیر s ۰،۵ پس از اعمال شوک حرارتی. بررسی اثراتFGM ---------- ۴۴

(۴-۱۲) ـ تاریخچهٔ تنش روی سطح بالایی تیر در نقطه‌ای وسط تیر، بررسی اثرات FGM ----- ۴۵

(۴-۱۳) ـ توزیع تنش روی سطح بالایی تیر در زمان $۳۰s$ ، بررسی اثرات FGM ---------- ۴۵

(۴-۱۴) ـ توزیع تنش در راستای ضخامت تیر در نقطه‌ای وسط تیر در زمان $30s$ ، بررسی اثرات FGM ---------- ۴۶

(۴-۱۵) ـ تاریخچهٔ خیز در نقطهٔ میانی تیر همگن سرامیک، بررسی اثرات کوپلینگ ---------- ۴۸

(۴-۱۶) ـ تاریخچه دما در بازه زمانی $5s$ تا $6s$ روی سطح بالایی تیر با $n=10$ ، بررسی اثرات کوپلینگ ---------- ۴۸

(۴-۱۷) ـ تاریخچه دما روی سطح بالایی تیر با $n=10$ ، بررسی اثرات کوپلینگ ---------- ۴۹

(۴-۱۸) ـ تاریخچه دما در بازه زمانی $5s$ تا $6s$ روی سطح بالایی تیر $n=30$ ، بررسی اثرات کوپلینگ ---------- ۴۹

(۴-۱۹) ـ تاریخچه دما روی سطح بالایی تیر با $n=30$ ، بررسی اثرات کوپلینگ ---------- ۵۰

(۴-۲۰) ـ تاریخچه دما در تیر همگن آلومینیومی تیموشنکو برگرفته از مقاله [۴] ---------- ۵۰

(۴-۲۱) ـ تاریخچه تنش روی سطح بالایی تیر همگن سرامیکی به ازای مقادیر کوپلینگ متفاوت ۵۱

(۴-۲۲) ـ تاریخچه خیز نقطه میانی تیر همگن تحت بار مکانیکی، اثر کوپلی ---------- ۵۲

(۴-۲۳) ـ تاریخچه دما روی سطح بالایی تیر تحت بار مکانیکی برای تیر همگن اثرات کوپلینگ -- ۵۳

(۴-۲۴) ـ توزیع دما در راستای ضخامت چندین ثانیه پس از اعمال بار مکانیکی در وسط تیر، بررسی کوپلینگ ---------- ۵۳

(۴-۲۵) ـ توزیع دما روی سطح بالایی تیر چندین ثانیه پس از اعمال بار مکانیکی $c=1$، بررسی اثر کوپلینگ ---------- ۵۴

(۴-۲۶) ـ توزیع تنش در راستای ضخامت تیر در وسط تیر برای بار مکانیکی، $c=1$ ---------- ۵۴

فـهـرست جـدا ول :

(۲-۱) ـ روشهای مختلف ساخت FGM ---------- ۱۱

(۴-۱) ـ جدول نشان‌دهنده خواص فلز و سرامیک به کار رفته در پروژه ---------- ۴۰

فـهـرست علایم :

- لاتـین

a ـ پارامتر لازم در محاسبهٔ عددی معکوس لاپلاس

a_z ـ شتاب در راستای ضخامت

c ـ ضریب استفاده شده در ترم کوپلینگ

$[C]$ ـ ماتریس میرایی برای یک المان

c_v ـ گرمای ویژه در حجم ثابت

E ـ مدول یانگ

f ـ جزء حجمی

$[F]$ ـ ماتریس نیرو برای یک المان

F_z ـ نیرو در جهت ضخامت

h ـ ضخامت تیر

h_c ـ ضریب همرفتی حرارت

K ـ ضریب هدایت حرارتی

$[K]$ ـ ماتریس سختی برای یک المان

L ـ طول تیر

$\bar{l}$ ـ طول بی‌بعد یک المان

M_y ـ ممان خمشی

$[M]$ ـ ماتریس جرم برای یک المان

p ـ بار مکانیکی اعمالی بر تیر

N_i ـ توابع شکلی در FEM

q ـ شار حرارتی

q_{av} ـ میانگین شار حرارتی

Q ـ گرمای تولیدی در داخل جسم

R ـ باقیماندهٔ معادله‌های دیفرانسیل

s ـ پارامتر لاپلاس

T ـ دما

T ـ دمای محیط

T_1 ـ ترم اول در فرض توزیع خطی دما

T_2 ـ ترم دوم در توزیع خطی دما

u ـ مولفه تغییر مکان محوری

$u.$ ـ تغییر مکان محوری لایه خنثی

v ـ نیروی برشی

w ـ خیز تیر

$(\bar{\ })$ـ مقدار بی‌بعد ( )

ـ یونانی

a ـ ضریب انبساط حرارتی

r ـ چگالی

e_{ii}ـ کرنش عمودی

s_x ـ تنش محوری

n ـ ضریب پواسون

b_{ij} ـ تانسور ترموالاستیسیته

m و l ـ ضرایب لامه

l_i ـ ضرایب بی‌بعد به کار رفته در بی‌بعدسازی

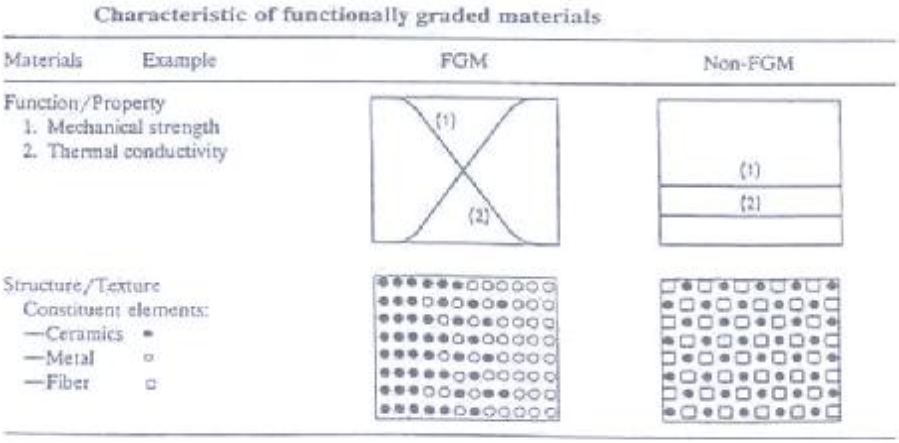
1

مقدمه وتاریخچه

در دو دهۀ اخیر پیشرفت‌های تکنولوژی در زمینه‌های مهندسی هوافضا و هسته‌ای، ترموالاستیسیته را به عنوان یک شاخۀ اصلی از مهندسی کاربردی درآورده است. درجه حرارت های بالا در بسیاری از سازه ها و قطعات ماشینها نظیر سازه های هوا ـ فضایی، موتورهایی که در هواپیماهای پرسرعت به کار می‌روند، مخازن مورد استفاده در نیروگاههای اتمی و هسته ای و یا در فرآیندهای صنعتی مانند آنهایی که از اشعه لیزر با دانسیته انرژی بالا جهت تولید استفاده می کنند، بوجود می آید. این سازه ها و یا قطعات تحت شرایط حرارتی غیریکنواخت ناپایدار که با تغییر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی همراه است، کار می کنند. این مساله باعث ایجاد تنش های حرارتی می گردد که در طراحی سازه ها یا قطعه ها باید مورد توجه قرار بگیرد، چرا که همراه با تنش های مکانیکی ناشی از بارهای خارجی، باعث ترک و شکست در قطعه می شود. تنش های حرارتی می توانند اثراتی نظیر خستگی حرارتی و کمانش حرارتی از خود نشان بدهند. همچنین پاره ای از مواد در میدان درجه حرارت غیردائم در اثر گرادیان بالای درجه حرارت، ماهیت ترد پیدا خواهند کرد و در نهایت قابلیت تحمل گرادیانهای بالای درجه حرارت را نخواهند داشت که می‌تواند فاجعه بار باشد [۱].

یکی از راه حلهای مقابله با بارهای شدید حرارتی استفاده از مواد هدفمند ***(FGM)*** می باشد که موادی همگن ولی ایزوتروپ هستند که خواص در آنها از نقطه ای به نقطه دیگر تغییر می کند. مثلاً مقاومت مکانیکی، مقاومت به سایش، سختی و ضریب هدایت حرارتی که به طور پیوسته تغییر می کنند. این تغییرات پیوسته نسبت به تغییرات گسستۀ خواص در مواد مرکب[۱]، مشکل تغییرات ناگهانی را در سطح تماس دو مادۀ متفاوت رفع می کند. شکل زیر تفاوتهای یک ماده مرکب را با یک مادۀ هدفمند از لحاظ چگونگی توزیع خواص و مواد سازنده نشان می دهد.

[۱] . Composites



شکل ۱-۱: توزیع خواص در مواد مرکب و هدفمند با توجه به توزیع مواد سازنده

انگیزه ساخت این مواد برای اولین بار این بود که در صنعت به موادی نیاز بود که بتواند دماها و گرادیانهای شدید آنرا تحمل نماید. مثلاً روی سطح شاتلهای فضایی، معمولاً دما هنگام ورود به جو زمین ۲۱۰۰ کلوین می باشد و این سطح می بایست اختلاف دمای حدود ۱۶۰۰ کلوین را تحمل نماید. به این علت دانشمندان علم مواد در ژاپن در مرکز تحقیقات هوا ـ فضایی در شهر سندایی بر آن شدند که ماده ای با چنین خصوصیاتی طراحی کنند. در سال ۱۹۸۷ سه سال بعد از اولین ایده های ساخت *FGM* یک پروژه ملی برای رسیدن به فن آوری اولیه ساخت این مواد تعریف شد.

پس از به پایان رسیدن این پروژه که موسسه تحقیقات ملی هفده کشور مختلف و چندین دانشگاه و چند شرکت در آن همکاری کردند، چند قطعه آزمایشگاهی، مثلاً یک صفحه مربعی ۳۰۰ میلیمترمربعی و یک پوسته نیمکروی با شعاع ۵۰ میلیمتر ساخته شد.

این مواد در یک طرف ضریب هدایت حرارتی بسیار پایینی داشتند که سد خوبی در مقابل حرارت بودند که معمولاً موادی ترد بودند. در عوض در سطح مجاور *FGM* های ساخته شده، خاصیت چکش خواری خوبی داشتند که این خاصیت باعث می شد که عملیات ماشینکاری از قبیل پیچ کردن و جوشکاری روی آن به راحتی صورت گیرد. *FGM* های ساخته شده اکثراً در یک سطح سرامیک هستند و در سطح مجاور به فلز ختم می شوند [۲]. فصل بعد جزئیات بیشتری را راجع به این مواد توضیح خواهد داد.

با توجه به مطالب ذکر شده راجع به اهمیت مبحث ترموالاستیسیته و نیز *FGM* ها، لازم است که مروری کوتاه داشته باشیم بر پژوهشهای انجام شده در این زمینه‌ها:

C.V.Massalas و *V.K.Kalpakidis* در سال ۱۹۸۳ مساله ترموالاستیسیته کوپل تیر اولر ـ برنولی را که ماده سازندهٔ آن همگن است، بررسی کردند. در این حل از معادله کلاسیک ترموالاستیسیته کوپل استفاده شده است. برای امکان وجود حل تحلیلی، تغییرات دما در راستای ضخامت، خطی فرض شده است که با توجه به ضخامت ناچیز تیر فرض غیردقیقی نمی باشد [۳]. این دو نویسنده در مقالهٔ بعدی خود تیر تیموشنکو را مورد حل قرار داده و با روش حلی مشابه به مقالهٔ قبلی در سال ۱۹۸۴ آنرا به چاپ رساندند [۴]. گفتنی است که روش حل در دو مقاله ذکر شده تحلیلی می‌باشد نتایج پروژهٔ پیش رو با نتایج [۳] مقایسه شده است.

J.P.Jones ارتعاشات حرارتی تیر را در مقاله ای در سال ۱۹۶۴ بررسی کرد که این بررسی شامل ارتعاشات محوری تیر همگن بود و شوک حرارتی از گوشه های ابتدایی و انتهایی تیر اعمال می شد. او تیرهای تیموشنکو و رایلی را مورد بررسی قرار داده است [۵]. بررسی المان محدودی تیرهای مرکب با فرضهای تیموشنکو حلی بود که *D.Maruthi* و *D.K.Sinha* در سال ۱۹۹۷ به چاپ رساندند. آنها دما را در راستای ضخامت یکنواخت فرض کردند و همچنین مانند سایر مقالات ذکر شده، از تئوری کلاسیک ترموالاستیسیته استفاده نمودند [۶]. *E.J.McQuiLeen* و *M.A.Brull* یکی از اولین دانشمندانی بودند که در کاری خلاقانه چگونگی حداقل کردن خطا را با فرض توزیع دما در مسایل کوپل ارایه کردند. آنها در حل خود پوسته های استوانه ای را مورد تحلیل قرار دادند و توزیع دما را در راستای ضخامت پوسته تابعی درجه سه از راستای ضخامت فرض کردند [۷]. *Eslami* و *Vahedi* در سال ۱۹۹۰ حل کلی ای به روش گلرکین برای ترموالاستیسیته کوپل میلهٔ همگن ارائه کردند که دراین حل معادلات ارتعاشات محوری میله مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله، میلهٔ دو سر آزاد و یک سر گیردار تحت بارهای ناگهانی مکانیکی و حرارتی در راستای میله بررسی شد [۸].

Eslami و همکاران در مقاله ای دیگر در سال ۱۹۹۹ ترموالاستیسیته کوپل پوسته های کروی و استوانه ای همگن را با فرض خطی بودن دما در راستای ضخامت پوسته حل کردند [۹]. تئوری های غیرکلاسیک نیز در این حل مورد بررسی قرار گرفته است.

در همگی مقالات ذکر شده تا به اینجا از معادلات کوپل استفاده شده بود. آنچه در ادامه می آید مروری است بر حلهای غیرکوپل و در این حالت روی تیر *FGM* :

B.V.Sankar و *Jerome. T.Tzeng* در یکی از مقالات خود ترموالاستیسیته غیرکوپل تیر اولر ـ برنولی را مورد بررسی قرار دادند و جوابهای خود را با حل الاستیسیته ارایه شده در همان مقاله مورد مقایسه قرار دادند در حل الاستیسیته دما در راستای ضخامت نمایی اعمال شده و نیز تغییرات خواص *FGM* بدینگونه فرض شده است. اگرچه ممکن است تغییرات خواص در *FGM* ها نمایی نباشد ولی این فرض آنها را قادر ساخت که حل تحلیلی ای با این فرض ارایه دهند [۱۰]. *B.V.Sankar* در مقاله ای دیگر با فرضهای مشابه حالت قبل، خیز مکانیکی تیری *FGM* را به دو روش تئوری خمشی و الاستیسیته به دست آورد و نشان داد که برای تیرهای بلند و نازک این دو حل بسیار به هم نزدیکند [۱۱]. *H.Zhu* و *B.V. Sankar* در سال ۲۰۰۴ با استفاده از روش المان محدود تیری *FGM* را با فرض اولر ـ برنولی و اینکه خواص تابعی درجه سه از ضخامت هستند مورد بررسی قرار داد [۱۲].

2

کلیات مواد هدفمند ومعادلات پایه

۲-۱- کلیات مواد هدفمند

۲-۱-۱- فیزیک مواد هدفمند

طبق تعریف مواد هدفمند یا *FGM* [۱] موادی هستند که برای بوجود آوردن تغییرات تدریجی در مشخصه‌های اجزاء ریزساختار یا ترکیبات بکار می روند. مهمترین کاربرد *FGM* بهبود مشخصه‌های مکانیکی و ترمومکانیکی اجزاء به طریق زیر می باشد:

اندازه تنش های حرارتی می تواند کمینه گردد، همچنین نواحی بحرانی که بیشینه تنش حرارتی در آن قسمت بوجود می آید، می تواند کنترل شود.

شروع تسلیم پلاستیک و شکست برای یک بارگذاری ترمومکانیکی می تواند با تاخیر اتفاق بیافتد.

جلوگیری از تمرکز تنش های شدید در محل تقاطع لبه ها و نقاط تکین.

مقاومت باندهای واسط بین جامدات غیرهمگن مانند فلز و سرامیک با کاهش پیوسته ترکیب یا جهت دار کردن تغییر خواص مکانیکی می تواند افزایش پیدا کند.

نیروی پیشران برای رشد ترک می تواند با انتخاب مناسب درجه بندی خواص مکانیکی کاهش پیدا کند.

قرارگیری پوشش سخت روی نمونه فرعی با جنس نرم بوسیله درجه بندی پیوسته خواص مکانیکی و جهت دار کردن تغییر خواص مواد می تواند آسان تر شود.

درجه بندی ترکیب در لایه‌های سطح می تواند میدان های تکین ناشی از بریدگی و فرورفتگی‌های نوک تیز را از بین برده و مشخصه‌های تغییر شکل پلاستیک اطراف فرورفتگی‌ها را تغییر دهد.

---

[۱] . Functionally Graded Material

۲-۱-۲- تاریخچه مواد هدفمند

برای اولین بار در سال ۱۹۷۲، *Bever* و *Duwez* [۱۳]، ایده ترکیب دو فاز مختلف را با تغییر در نحوه آرایش و ترتیب هر کدام از فازها در هر لایه در جهت بهبود خواص مکانیکی مطرح کردند. ایده آنها عموماً مربوط به ضعف مواد مرکب در بسیاری از کاربردها بود که *Goetzel* [۱۴] در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ با تحقیقات گسترده ای که روی مواد مرکب انجام داده بود، آنها را نشان داد. در اواسط دهه ۱۹۸۰ برای اولین بار در کشور ژاپن نام علمی *FGM* به این مواد داده شد و عصر جدیدی برای تحقیقات گسترده روی این مواد گشوده گشت. در آن سال در ژاپن یک گروه دولتی پیش بینی کردند که درگیری شدید ژاپن در تحقیقات فضایی و رشد این تحقیقات نشان داده است که پیشرفت ژاپن در این زمینه قویاً به تولید مواد جدید وابسته می باشد. سه تن از دانشمندان به نامهای *Niino* ، *Koizumi* و *Hirai* [۱۰] تحقیقات خود را روی پروژه هواپیمای فضائی آغاز کردند. تحقیقات این سه تن نشان داد که اجزای سازه‌های بکار رفته در بدنه هواپیمای فضایی تحت بارهای بسیار شدید قرار می گیرند و بنابراین در ترکیب و درجه بندی ریزساختارهای سازه های بدنه بایستی به دو مورد توجه شود. اولاً، از مواد موجود و در دسترس، اجزای سازه ای تولید گردند که بهترین استفاده را در اکثریت اهداف صنعتی داشته باشند. ثانیاً، جلوگیری از تمرکز تنش یا کرنشی که ناشی از بوجود آمدن سطوح نوک تیز بدلیل جدا بودن مواد مختلف می باشد. نتیجه این یافته ها موجب گشت که در سال ۱۹۸۷در کشور ژاپن سازمانی متشکل از دانشمندان تاسیس شد و بودجه تحقیقاتی بسیار زیادی به آن اختصاص پیدا کرد و کار آن تحقیقات گسترده در ارتباط با *FGM* بود. این سازمان تحقیقات خود را روی اجزایی که یک وجه آنها سرد شده‌اند و وجه دیگرشان در محیط بسیار داغ نگهداری می شوند معطوف نمود. کمیته علمی این سازمان مأمور طراحی و ارزیابی سیستم های مرکب *Inorganic* گشت که نهایتاً به سمت فلزات و سرامیک ها هدایت شدند. برای سطح داغ، دما حدود ۲۰۰۰ درجه کلوین در محیطی اکسیدکننده در نظر گرفته شد و آزمایش ها سرامیک را ماده مناسبی برای سطح داغ نشان داد. سطح سردتر در دمای ۱۰۰۰ درجه کلوین قرار داشت و بدینسان مقاومت و سختی و هدایت حرارتی مواد انتخاب شدند. بین دو سطح داغ و سردتر

را با مخلوطی از سرامیک و فلز با درصدهای مشخص پر کردند که این عمل توسط روش متالوژی پودر انجام شد.

تا سال ۱۹۹۱ برنامه های تحقیقاتی دیگری در راستای این پروژه تحقیقاتی انجام شد. در سال ۱۹۹۳، *Koizumi* ، *Miyamoto* ، *Niino* و *Sasaki* [۱۵] توجه خود را روی سیستم های بقاء انرژی معطوف کردند. هدف این برنامه تحقیقاتی دوم، استفاده از مواد هدفمند برای بهینه کردن تبدیل انرژی حرارتی به الکتریسیته بود که در مواد ترموالکتریک و ترمویونیک کاربرد پیدا می کند. *FGM* در اصل برای کمینه کردن تنش های حرارتی بکار می رود. اهمیت خاص پروژه دوم در دستاورد بزرگی است که در زمینه بازدهی بالا در بقاء انرژی در محدوده وسیعی از تغییرات درجه حرارت بدست آمده است. ساخت سازه‌های *FG* به نحوی که بازدهی سیستم بیشینه گردد، دستاورد بزرگی است. در خارج از کشور ژاپن در بین سالهای ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ و در چند کشور از جمله آلمان، ایالات متحده، چین، روسیه مواد هدفمند جزء موضوعات روز در تحقیقات بود و همچنان ادامه دارد. در آلمان یک برنامه تحقیقاتی که از سال ۱۹۹۵ و با مشارکت تعداد زیادی آزمایشگاه قرار شد انجام شود، به مدت شش سال طرح ریزی گشت. برنامه شامل چهار شاخص اصلی بود که عبارت بودند از:

فرآیند تولید *FGM* بر اساس ذوب کردن (ریخته گری، صاف کردن، رشد کریستالی)

فرآیند تولید *FGM* بر اساس پودر کردن

مدل سازی ترمودینامیکی

ساخت مواد زیست پزشکی

در سالهای اخیر *FGM* ها کاربردهای فراوانی پیدا کرده اند. مانند: اتصال فلز به سرامیک، پیوند زدن اعضاء به انسان ها، اجزای موتورهای انفجاری، وسایل مغناطیسی، ابزار برش، وسایل اطفاء حریق در ساختمان‌ها، مواد مرکب پلیمری با مقاومت بالا و پوشش محفظه احتراق پیشران موشک، مواد پیزوالکتریک و فروالکتریک که گوشه هایی از کاربرد فراوان *FGM* هستند.