



www.ElitesJournal.ir

مجله نخبگان علوم و مهندسی

Journal of Science and Engineering Elites

ISSN 2538-581X

جلد ۲- شماره ۱- سال ۱۳۹۶



مروری بر بررسی تئوری و تقریب خواص مکانیکی مواد تابعی FGM با معرفی این مواد در طبیعت و کاربردهای آن در صنعت

مهدی رضوانی توکل

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

Rezvanitavakol@yahoo.com

ارسال: اسفند ماه ۹۵ پذیرش: اردیبهشت ماه ۹۶

خلاصه

مواد تابعی FGM^۱ نوع جدیدی از کامپوزیت‌هایی هستند که به واسطه تغییرات یکنواخت مواد در آن‌ها، می‌توانند ویژگی‌های مهمی مانند مقاومت بالا در برابر حرارت، فرسایش، شکست و خوردگی را از خود به نمایش بگذارند. همچنین به منظور تهیه موادی مناسب برای انجام تست‌های پایانی (تست‌های دینامیکی تعیین کننده انواع رفتارهای دینامیکی مواد) که دارای ویژگی‌های مکانیکی قابل توجه بوده نیز کاربردهای گسترده‌ای داشته باشند. در صنعت پیشرفته امروز نیز، مانند این ویژگی‌ها باعث شده، که استفاده از این نوع مواد در فناوری‌های جدید و به خصوص صنایع هوا فضا به سرعت افزایش یابد و در نهایت باعث ایجاد قطعات و مکانیزم‌هایی با خواص و ابعاد مطلوب شود. در این مقاله به بررسی مواد FGM از لحاظ ساخت و همچنین بررسی تقریب خواص مکانیکی این مواد پرداخته شده است. وجود این مواد در طبیعت باعث شده است تا محققین تلاش‌های فراوانی را در خصوص مطالعه و بررسی این مواد انجام دهند که در این اینجا به نمونه‌هایی از این مواد در طبیعت و همچنین کاربردهای مختلف آن در صنعت نیز اشاره شده است.

کلمات کلیدی: مواد تابعی، مواد FGM، خواص مکانیکی مواد تابعی، کاربرد مواد تابعی.

۱. مقدمه

مطالعات اخیر بر روی مواد کاربردی جدیدی که FGM نامیده می‌شوند نشان می‌دهد که این مواد قابلیت مقاومت در دماهای بسیار بالا و تحمل تغییرات دمای زیاد بین دو سطح خود را دارا می‌باشند. تفکر در مورد این گونه مواد در سال ۱۹۸۴ میلادی به وسیله دانشمندان سنندای ژاپن آغاز گردید. این تحقیقات به منظور مهیا کردن موادی صورت گرفت که در ساختارهای فضایی، بدنه هواپیما یا جت‌ها و همچنین در رآکتورهای فوزیون هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. مواد FGM ترکیبی از مواد مختلفی مانند سرامیک و یا فلزات می‌باشند که از لحاظ میکروسکوپی خواص ماده هموژن و یا همگن را ندارند. تغییرات پیوسته در خواص میکروسکوپی این مواد عاملی است که باعث تفاوت این مواد کامپوزیتی می‌شود. در سال ۱۳۸۷، حافظ-

¹ Functionally Graded Materials

الکتاب در پروژه خود به نحوه ساخت مواد FGM و نمونه‌ای این مواد در طبیعت پرداخت که در تحقیقات خود انواع مکانیزم‌ها و دستگاه‌های تولید برای ساخت این مواد همچنین نمونه‌های این مواد در طبیعت مورد مطالعه و بررسی قرار داد. همچنین در سال ۱۳۹۰، جعفری فشارکی^۱ و همکاران به بررسی کیفی روش‌های ساخت و تولید مواد تابعی FGM پرداختند که در این مقاله انواع روش‌های ساخت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج خوبی نیز به همراه داشت. در سال ۱۳۹۲ حسنی سعدی به مطالعه و بررسی مواد درجه‌بندی شده‌ی تابعی و روش‌های ساخت آن پرداخت.

۲. تاریخچه مواد FGM

نیاز بشر برای یافتن موادی که دارای ویژه‌گی‌های بهتری نسبت به مواد خالص و مرکب موجود در صنایع بودند، دانشمندان را به سمت تولید FGM هدایت نمود. هرچند اولین پیشنهاد در مورد ساخت و تولید مواد دارای تغییرات تابعی در خواص را سال ۱۹۷۲ میلادی، بور و دووز ارائه کردند و قبل از آن هم یکسری تحقیق در مورد آن به صورت گسسته صورت گرفته بود. در سال ۱۹۷۲ میلادی، سودمندی کامپوزیت‌های از جنس FGM توسط بور^۲ و دووز^۳ [۱]، و شن^۴ و بور [۲] مطرح شد. اما به دلیل فقدان روش‌های تولید مناسب این مواد در آن زمان، این امر مورد توجه قرار نگرفت. ۱۵ سال به طول انجامید تا آن که تحقیقات بنیادی در زمینه شیوه‌های تولید مواد FGM در کشور ژاپن آغاز گردید. از آن زمان بود که بخش عمده‌ای از پژوهش‌ها بر روی مواد FGM، بر روی نحوه ساخت این مواد متمرکز گردید و روش‌های تولید بسیاری برای این مواد به وجود آمدند [۳-۶]. برای اولین بار نام FGM که مخفف Functional Graded Materials (مواد درجه‌بندی شده تابعی) می‌باشد توسط محققان ژاپنی در دهه ۱۹۸۰ میلادی به این مواد داده شد و پس از آن به تدریج این مواد در سطح بین‌المللی ساخته شدند. نینو و کویزومی از جمله افرادی بودند که در آن زمان در ژاپن مأمور تحقیق در مورد مواد جدید شدند و به علت نیاز کشور به این مواد برای توسعه صنایع هوایی این تحقیقات به صورت جدی دنبال شد.

۳. فرآیند ساخت مواد FGM

فرآیند ساخت مواد FGM را می‌توان به دو مرحله تقسیم نمود:

الف) ایجاد ساختار درجه‌بندی شده^۵، (ایجاد ساختار ناهمگن فضایی از مواد اولیه یا پودر).

ب) تثبیت^۶، (تبدیل ساختار مرحله قبل به صورت ماده نهایی).

فرآیند ساختار درجه‌بندی شده خود شامل سه مرحله می‌باشد:

الف) فرآیند اولیه^۷، (ایجاد ساختار درجه‌بندی شده از مواد اولیه کلوخی یا پودر).

ب) فرآیند همگن کردن، (هموارسازی گسستگی جنس بین دو ماده).

ج) فرآیند جداسازی^۸، (تبدیل ماده همگن ماکروسکوپی به ماده درجه‌بندی شده).

فرآیند تثبیت معمولاً شامل خشک کردن و سینتر کردن^۹ یا منجمد کردن^{۱۰} می‌شود که بعد از فرآیند ایجاد ساختار درجه‌بندی شده، انجام می‌گیرد. مفهوم سینتر کردن یا تَف جوشی در متالورژی پودر به معنی حرارت دادن به توده‌ای از پودر یک یا چند

¹ Javad Jafari Fesharaki

² Bever

³ Duwez

⁴ Shen

⁵ Gradation

⁶ Consolidation

⁷ Constitutive Process

⁸ Segregating Process

⁹ Sintering

¹⁰ Solidification

نوع ماده تا دمایی پایین تر از دمای ذوب مواد - اما بالاتر از نصف دمای ذوب متوسط مواد به کلومین - است؛ به طوری که بدون آن که مواد ذوب گردند، ذرات به یکدیگر جوش خورده و یک قطعه منسجم شکل می گیرد. تَف جوشی یکی از روش - های شکل دهی است که برای مواد فلزی و سرامیکی کاربرد دارد. اساس کار این روش کاهش انرژی آزاد سطحی ذرات در اثر چسبیدن به یکدیگر است. روش کار بدین صورت است که ابتدا ماده مورد نظر را به صورت پودر در می آورند تا سطح ویژه آن بیشتر شود. سپس پودر حاصل را به شکل دلخواه پرس کرده و در کوره می گذارند. دمای کوره تا حدی بالا می رود که قطعه ذوب نمی شود. در دماهای بالاتر دامنه نوسان اتم ها بیشتر بوده و بنابراین نفوذ اتمی بیشتر می شود. اتم های ذرات مجاور در یکدیگر نفوذ کرده و ذرات را به هم می چسبانند. همچنین نکات مهم تثبیت، عبارت اند از:

✓ این فرآیند باید به نحوی صورت گیرد تا ماده تخریب نگردد. به کوچک شدن ماده در حین عملیات سینتر آزاد^۱ نیز بایستی توجه نمود.

✓ از آن جا که تخلخل، اندازه و شکل ذرات و ترکیب پودر بر فرآیند تثبیت اثر می گذارند؛ باید برای هر نوع مواد از مکانیسم ویژه ای بهره گرفت [۷].

✓ تفاوت در چگالی ذرات ناشی از عملیات فشردن در فرآیند ایجاد ساختار درجه بندی شده، می تواند سبب تغییر شکل قطعه در حین فرآیند تثبیت شود.

✓ برای حل این مشکلات، می توان از برهم نهی نیروهای داخلی و فشار خارجی به روش پرس گرم [۸-۹]، یا پرس ایزواستاتیک گرم [۱۰]، استفاده نمود.

اگر تفاوت نقطه ذوب مواد زیاد باشد، می توان روش سینتر حالت مایع^۲ [۱۱]، سینتر به کمک لیزر^۳ [۱۲]، و یا سینتر جرقه پلازما^۴ [۱۳-۱۴]، را به کار گرفت.

۴. انواع روش های تولید مواد FGM و بررسی کیفی آنان

از زمان ابداع مواد تابعی در دهه ۸۰ میلادی تا کنون روش های بسیار زیادی برای ساخت مواد مدرج تابعی ارائه شده که مبتنی بر انواع فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی بوده است. مطالعه متون و مقالات مرتبط نشان می دهد که هر روش ایجاد کننده نوع خاصی از این گونه مواد می باشد، مانند انواع پوشش ها، ورق ها، نمونه های حجمی و یا ترکیبی از این حالت ها که بر حسب نیاز، مورد استفاده قرار می گیرند. برای تهیه مواد FGM چندین روش وجود دارد که اساس همه این روش ها، ایجاد شیبی از خواص به واسطه تغییرات در ترکیب شیمیایی، ریز ساختار، چگالی و یا نظم اتمی می باشد. از جمله این روش ها می توان به موارد زیر اشاره کرد:

✓ CVD/PVD (نشت بخار مواد، توسط روش های شیمیایی یا فیزیکی)

✓ اسپری پلاسمایی

✓ متالوژی پودر

✓ سنتر احتراقی خود انتشار

✓ سمانتاسیون جعبه ای

✓ رخنه دهی

✓ روکش دهی با استفاده از لیزر

¹ Free Sintering

² Liquid-Phase Sintering

³ Laser Assisted Sintering

⁴ Spark Plasma Sintering

✓ ریخته‌گری گریز از مرکز

✓ لایه‌نشانی الکتروفودتیگ

– حرارت‌دهی ذرات معلق:

از جمله فرآیندهای پوشش‌دهی برای ساخت مواد تابعی می‌توان به فرآیند حرارت‌دهی ذرات معلق به وسیله‌ی نیروی الکتریسته اشاره نمود که ذرات معلق تهیه شده درون یک سوپانسیون تحت نیروی الکتریسته‌ی مستقیم بین دو الکتروود قرار گرفته و به سمت آن‌ها جذب می‌شود. همچنین فرآیند ته‌نشینی شیمیایی بخار که فرآیندی شیمیایی می‌باشد و در طی آن ماده زیر لایه، تحت بخارهای ماده تشکیل دهنده جسم ماده غالب قرار گرفته و با آن واکنش می‌دهد و بدین ترتیب ماده تابعی حاصل می‌شود.

– روکش کردن لیزری:

از دیگر روش‌های پوشش‌دهی و لایه‌سازی می‌باشد، به گونه‌ای که پودر به طور پیوسته به داخل حوضچه مذاب و بر روی ماده زیر لایه تزریق می‌شود؛ هم‌زمان با پایدار نگهداشتن حوضچه‌ی مذاب با لیزر و به دلیل وجود دو ماده ترکیبی از آن‌ها به وجود خواهد آمد و حالت تابعی مورد نظر حاصل می‌شود.

همچنین می‌توان با اسپری نمودن ماده گرم شده یا مذاب بر روی ماده زیرین که می‌تواند شامل فلز، آلیاژ، پلاستیک، سرامیک و کامپوزیت‌ها باشد صورت پذیرد و تغییرات تدریجی را ایجاد نماید. برای حالت ورقه‌ای سازی می‌توان با ترکیب کردن پودر فلز یا سرامیک به همراه یک ماده منعقد کننده‌ی مناسب پلیمری درون یک محفظه و تحت حرارت قرار دادن آن، پوشش مورد نظر را با کیفیت بسیار خوب بدست آورد که به این روش انجماد سریع گویند.

– نمونه سازی حجیم:

از پرکاربردترین روش‌های ایجاد مواد تابعی است که فرآیندهای متنوعی برای ایجاد آن‌ها ارائه شده است و هر روش، ایجاد کننده‌ی شکل خاصی از این مواد است؛ به طور مثال فرآیند (MIM) Metal Powder Injection Modeling ترکیبی است از متالوژی پورد و قالب ریزی تحت فشار که مواد خام اولیه از پودر فلز و الیاف منعقد کننده پس از جدا سازی و پخت، متراکم و محکم می‌شوند.

– روش همجوشی با لیزر:

از جمله روش‌های سریع سازی است که با انتخاب لیزری با قدرت بالا (مثل لیزرهای CO₂) با توجه به مدل بخش‌های خاصی از مخلوط پودر را زینتر نموده که طی آن ذرات پورد گرفته می‌شوند و پیوند محکمی بین آن‌ها ایجاد می‌شود و منجر به تولید قطعه نهایی حجیم می‌شود.

– فرآیند (Infiltration Processing):

روش مناسب برای استفاده در مواردی است که فازهایی با نقطه ذوب‌های خیلی متفاوت وجود دارد. در این روش ابتدا فاز محکم‌تر با خلل و فرج پیش تولید سپس با افزایش دما، مذاب فاز دوم به درون منافذ آن نفوذ کرده و ترکیب ناهمگن به وجود می‌آید. این فرآیند برای ترکیبات فلز-سرامیک و همچنین سرامیک-شیشه نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

– روش زینتر کردن:

از دیگر روش‌های کاربردی برای مدل‌سازی حجیمی می‌توان به روش زینتر کردن پودر فلزات به کمک خلاء اشاره کرد. بدین صورت که ابتدا مخلوط پودر داخل ظرف فولادی ریخته شده، سپس برای خارج کردن رطوبت و هوا ظرف حاوی مخلوط و پس از آب‌بندی تحت فشار گاز خنثای آرگون در دمای بالا قرار می‌گیرد و سینترینگ مورد نظر رخ داده و منجر به ایجاد پیوندهای متالورژیکی مستحکمی می‌شود و نمونه حجیم ایجاد می‌شود [۱۶].

با مطالعه دقیق فرآیندهای ذکر شده ساخت مواد تابعی و مقایسه آن‌ها با دیگر روش‌های مرسوم می‌توان نتایج زیر را در قالب یک جدول (۱) استخراج نمود تا بتوان مقایسه بهترین بین فرآیندها را انجام داد:

جدول ۱- مقایسه و بررسی کیفی انواع روش‌های تولید FGM

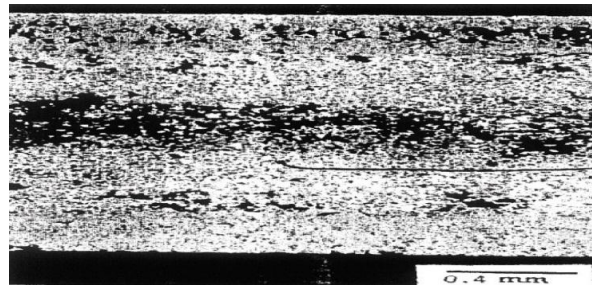
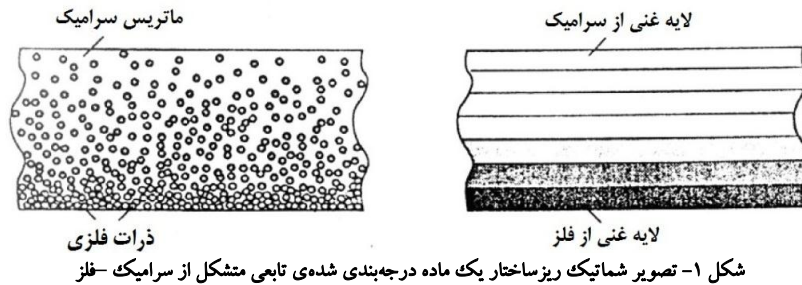
فرآیند	ضخامت لایه‌ها	قابلیت تغییر فاز	قابلیت تولید هندسه-های مخلف	نوع ماده تولیدی	قابلیت تولید گرادیان
Powder Stacking	M, L	خیلی خوب	متوسط	حجیم	خیلی خوب
Sheet Lamination	T, M B	خیلی خوب	متوسط	حجیم	خیلی خوب
Wet Powder Spraying	UT, T B	خیلی خوب	متوسط	حجیم	خیلی خوب
Slurry Dipping	UT, T B	خیلی خوب	خوب	پوشش دهی	خیلی خوب
Jet Solidification	M, L	خیلی خوب	خیلی خوب	حجیم	خیلی خوب
Sedimentation/Centrifuging	C	خیلی خوب	ضعیف	حجیم	خوب
Filtration/Slip Casting	C	خیلی خوب	خوب	حجیم	خیلی خوب
Laser Cladding	M	خیلی خوب	خیلی خوب	حجیم، پوشش دهی	خیلی خوب
Thermal Spraying	T	خیلی خوب	خوب	حجیم، پوشش دهی	خیلی خوب
Directed Solidification	C	متوسط	ضعیف	حجیم	متوسط
Selective Laser Sintering (SLS)	M, L	خیلی خوب	خوب	حجیم	خیلی خوب

L: large (>1mm); M: medium (100-1000 m); T: thin (10-100 m); UT: very thin (<10 mm); C: continuous; B: depending on available powder size; D: maximum is limited

۵. تعریف مواد درجه‌بندی شده تابعی

مواد درجه‌بندی شده تابعی یا مواد FGM، مواد کامپوزیتی با ریز ساختار ناهمگنی می‌باشند که خواص مکانیکی آن‌ها به طور ملایم و پیوسته از یک سطح به سطح دیگر تغییر می‌کند. این خاصیت ویژه به وسیله تغییر یکنواخت در نسبت مواد تشکیل دهنده آن‌ها بدست می‌آید. در سال‌های قبل در صنایع هوافضا از مواد سرامیکی خالص جهت پوشش دهی و روکش نمودن قطعات تحت اثر دمای کاری بالا استفاده می‌شد. این مواد عایق‌های بسیار خوبی بودند ولی مقاومت زیادی در برابر تنش‌های وارده نداشتند. به ویژه تنش‌های پسماند در این مواد مشکلات زیادی از جمله حفره و ترک ایجاد می‌نمود؛ بعدها برای رفع این مشکل از مواد کامپوزیت لایه‌ای استفاده شد که تنش‌های حرارتی در این مواد نیز موجب پدیده لایه لایه شدن می‌گردید. با توجه به این مشکلات، طرح ماده‌ای مرکب که هم مقاومت حرارتی و مکانیکی بالا داشته و هم مشکل لایه لایه شدن را نداشته باشد ضرورت پیدا کرد. نوع رایج این مواد ترکیب پیوسته‌ای از فلزات و سرامیک‌ها می‌باشد که از مخلوط نمودن پودر آن‌ها بدست می‌آیند. به طوری که تغییر فلز و سرامیک از یک سطح به سطح دیگر کاملاً پیوسته می‌باشد. به گونه‌ای که مثلاً یک سطح از جنس سرامیک خالص و سطح دیگر از جنس فلز خالص است و بین این دو سطح ترکیب پیوسته‌ای از هر دو ماده -

باشد. از این روی خواص مکانیکی نیز با توجه به پیوستگی ترکیب اجزای تشکیل دهنده شان دارای خواص مکانیکی مؤثرتری نسبت به مواد کامپوزیت لایه‌ای می‌باشند. نسبت این ترکیب در راستای ضخامت جسم متغیر بوده و چگالی ذرات فلز معلق در بستر سرامیک از سطح فلزی تا سطح سرامیکی توسط یک تابع معین که می‌تواند خطی، غیر خطی و یا نمایی باشد کاهش و یا افزایش یابد. تصویر شماتیک یک ماده FGM متشکل از سرامیک - فلز در شکل‌های (۱) مشاهده می‌شود. همچنین در شکل (۲) تصویر عکس‌برداری شده توسط میکروسکوپ نوری از مقطع یک FGM از جنس الماس - آلومینیوم (Al/Sic) مشاهده می‌شود [۱۵].



هنوز تعریف کلی، دقیق و روشنی در مورد مواد FGM به صورت بین‌المللی وجود ندارد اما می‌توان گفت، FGM ماده‌ای است ناهمگن با گرادیان حساب شده در ترکیبات، ساختار و خواص مهندسی آن در یک راستای معین ایجاد شده است و همین گرادیان سبب می‌شود که FGM به ویژه‌گی‌های مهندسی بهتری نسبت به ماده همگن ساخته شده با همان ترکیبات دست یابد.

۶. تقریب خواص مکانیکی مواد FGM

یک ماده FGM غالباً از ۲ جزء تشکیل گردیده است (به عنوان مثال سرامیک و فولاد) که برای تحلیل فرض می‌شود، این اجزاء کاملاً در هم آمیخته هستند. خواص هر یک از این اجزاء به تنهایی از نظر مکانیکی و حرارتی مشخص است. در اینجا نیاز به فرضیاتی است که برای ترکیب این اجزاء یا نسبت‌های مختلف تقریبی از خواص مخلوط مانند نسبت پواسون، ضریب انبساط حرارتی و ضریب انتقال حرارت داشته باشیم. این فرضیات غالباً در زمان قبل از پیدایش صفحات FGM و مرتبط با مواد کامپوزیت معمولی ارائه شده است و محققین در رابطه با تحلیل مواد FGM از آن‌ها به وفور بهره برده‌اند.

۱.۶. مدل کلاسیک خطی مخلوط‌ها

مدل کلاسیک خطی مخلوط‌ها ساده‌ترین و شایع‌ترین مدل می‌باشد که فرض می‌کند خواص مؤثر مکانیکی مواد برابر است با مجموع حاصل ضرب خاصیت هر جزء در نسبت جزئی از آن جزء. این رابطه به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$p(V_1, V_2) = p_1 V_1 + p_2 V_2 \quad (1)$$

$$V_1 + V_2 = 1 \quad (2)$$

که در آن V_1 و V_2 نسبت‌های جزئی مواد یک و دو در مخلوط و p_1 و p_2 خواص مکانیکی هر کدام از دو ماده و p خاصیت مکانیکی مخلوط مورد نظر می‌باشد.

۲.۶. قانون مخلوط‌های اصلاح شده

یک روش دیگر، قانون مخلوط‌های اصلاح شده می‌باشد که توسط تامورا^۱ و همکارانش در سال ۱۹۷۳ ارائه شده و یک مدل تجربی می‌باشد که آثار برهم‌کنش‌های داخلی را به تنش و کرنش هر فاز مرتبط می‌کند.

۳.۶. Fan

Fan و همکارانش در سال ۱۹۹۴ یک قاعده عمومی را ارائه کردند که تابعی از نسبت‌های جزئی دانه‌ها و توزیع فازها می‌باشد و به خوبی با نتایج تجربی تطبیق می‌کند. ایراد اساسی این روش، تعداد زیاد داده‌های ورودی مورد نیاز می‌باشد و در عمل فقط برای تخمین مدول یانگ و حد تسلیم مناسب است.

۴.۶. مدل موری-تاناکا

دو مدل بسیار مطرح دیگر که به طور وسیعی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، مدل‌های موری - تاناکا و خودسازگار می‌باشند. مزیت هر دو مدل قابلیت تخمین برای اکثر پارامترهای فیزیکی مورد نیاز فقط بر اساس نسبت‌های جزئی و خواص فیزیکی اجزاء می‌باشد. این دو مدل به وفور در مبحث تحلیل عددی صفحات FGM استفاده شده‌اند. ابتدا به توضیح مدل موری - تاناکا می‌پردازیم:

ریتزر^۲ در سال ۱۹۹۷ و دووارک^۳ در سال ۱۹۹۸ با مدل‌سازی المان محدود ریزسازه‌ای نشان دادند، مدل موری - تاناکا در مواقعی که کامپوزیت از جزء غالب و جزء تقویت کننده (به صورت مشخص) تشکیل شده است به خوبی می‌تواند خواص فیزیکی کامپوزیت را تخمین بزند. مدل موری - تاناکا فرض می‌کند که جزء غالب کامپوزیت (زمینه) توسط اجزاء جزء دوم (تقویت کننده) تقویت می‌شود. بر این اساس اندیس ۱ در این مدل به جزء زمینه و اندیس ۲ به جزء تقویت کننده اطلاق می‌شود. تخمین موری - تاناکا برای مدول بالک چنین است:

$$\frac{K-K_1}{K_2-K_1} = \frac{V_2}{1+3(1-V_2)(K_2-K_1)/(3K_1+4G_1)} \quad (۳)$$

$$\frac{\mu-\mu_1}{\mu_2-\mu_1} = \frac{V_2}{1+3(1-V_2)(\mu_2-\mu_1)/(3\mu_1+4f_1)} \quad (۴)$$

$$f_1 = \mu_1(9\mu_1 + 8\mu_2)/6(K_1 + 2\mu_1) \quad (۵)$$

α ، f ، μ و K به ترتیب مدول انبساط حرارتی و ضریب انتقال حرارت و مدول برشی و مدول بالک هستند. همچنین هاتا و تایا در سال ۱۹۸۶ نشان دادند که برای مدل کامپوزیت با اجزاء غالب و تقویت کننده، ضریب انتقال حرارت و ثابت انبساط حرارتی در مواد کامپوزیت چنین می‌شود:

$$\frac{k-k_1}{k_2-k_1} = \frac{V_2}{1+(1-V_2)(k_2-k_1)/3k_1} \quad (۶)$$

$$\frac{\alpha-\alpha_1}{\alpha_2-\alpha_1} = \frac{1/K-1/K_1}{1/K_2-1/K_1} \quad (۷)$$

و سایر پارامترهای مورد نظر از جمله E مدول یانگ و ν نسبت پواسون به سادگی از روابط مشهور الاستیسیته قابل استخراج هستند.

¹ Tamura

² Reiter

³ Dovrak

۵.۶. مدل خودسازگار

این مدل تفاوتی میان جزء غالب و تقویت کننده قائل نمی‌شود و چنانچه ریتر نشان داد، در مواردی که میان ماتریس و دانه‌ها واضح نیست و نسبت فازهای تشکیل دهنده به هم نزدیک است، جواب‌هایی رضایت بخش می‌دهد. روابط مربوط با این مدل در قسمت زیر نشان داده شده است:

$$\frac{\zeta}{K} = \frac{V_1}{K-K_2} + \frac{V_2}{K-K_1} \quad (8)$$

$$\frac{\tau}{\mu} = \frac{V_1}{\mu-\mu_2} + \frac{V_2}{\mu-\mu_1} \quad (9)$$

$$\zeta = 3 - 5r = \frac{K}{K+\frac{4}{3}\mu} \quad (10)$$

و در نتیجه مدول بالک برابر خواهد بود:

$$K = \frac{1}{\left[\frac{V_1}{K_1+\frac{4}{3}\mu} + \frac{V_2}{K_2+\frac{4}{3}\mu} \right]} - \frac{4}{3}\mu \quad (11)$$

و مدول برشی از رابطه زیر حل می‌شود:

$$\frac{V_1 K_1}{K_1+\frac{4}{3}\mu} + \frac{V_2 K_2}{K_2+\frac{4}{3}\mu} + 5 \left[\frac{V_1 \mu_2}{\mu-\mu_2} + \frac{V_2 \mu_1}{\mu-\mu_1} \right] + 2 = 0 \quad (12)$$

و معادله تخمین ضریب انتقال حرارت برای این دسته از کامپوزیت‌ها نیز برابر است با:

$$\frac{V_1(K_1-K)}{K_1+2K} + \frac{V_2(K_2-K)}{K_2+2K} = 0 \quad (13)$$

ضریب انبساط حرارتی در این روش با استفاده از مدول بالک و معادله زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\alpha-\alpha_1}{\alpha_2-\alpha_1} = \frac{1/K-1/K_1}{1/K_2-1/K_1} \quad (14)$$

همانطور که مشاهده می‌شود، استفاده از روش خودسازگار (به واسطه نیاز به حل معادله مدول برشی) دشوارتر از روش موری - تاناکا است. با توجه به آن که در صفحات FGM نسبت حجمی هر یک از اجزاء از ۰ تا ۱ تغییر می‌کند، در این محدوده شاهد کاربرد هر دو مدل هستیم. چنانکه در محدوده‌ای که یکی از نسبت‌های حجمی نزدیک به ۱ باشد، شاهد یک جزء غالب و یک جزء تقویت کننده و در محدوده بینابین جزء غالب مشخصی مشاهده نمی‌شود. لذا ریتر و دووارک در سال ۱۹۹۸ خاطر نشان کردند که دقیق‌ترین مدل، استفاده ترکیبی از مدل‌های موری - تاناکا و خودسازگار و به ویژه مناسب برای حل‌های عددی در صفحات FGM است.

۷. نمونه‌هایی از مواد FGM در طبیعت

با توجه به این که مواد FGM و تکنیک تولید آن برای مهندسين کاملاً جدید به نظر می‌رسد، ولی نمونه‌های زیادی از این مواد را می‌توان در طبیعت یافت که از نظر ساختار ریزساختاری بسیار ظریف تر و یکنواخت تر از ساخته‌های بشر می‌باشند. به عنوان مثال سنگ‌های رسوبی و یا بسیاری از بافت‌های حیوانات و گیاهان، مانند اسکلت خارجی سخت پوستان، استخوان و دندان حیوانات، پوسته‌های دانه گیاهان و تنه‌های درختان را نیز نام برد. در ادامه به بررسی نمونه‌هایی از این مواد می‌پردازیم:

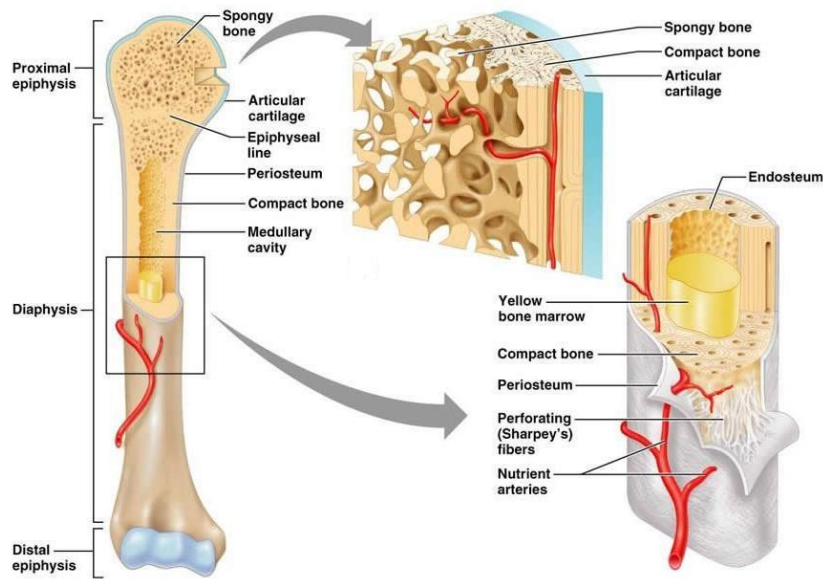
۱.۷. استخوان‌ها

استخوان، نمونه‌ای کامل از مواد FGM در طبیعت است که دارای تغییرات تابعی اجزاء تشکیل دهنده می‌باشد. استخوان‌ها مخلوطی از کلاژان^۱ (یک نوع پروتئین فیبری غیرمحلول که پلیمری شکل پذیر است) و هیدروکسیپاتیت^۲ (فسفات کلسیم که

^۱ Collagen

^۲ Hydroxyapatite

سرامیکی ترد می‌باشد) است. همچنین مغز استخوان زرد^۱ از جنس چربی می‌باشد که وزن را تحمل کرده و مغز استخوان قرمز^۲ محلی است که در آن گلبول‌های قرمز خون ساخته می‌شود. در شکل (۳) نمایی از داخل استخوان و اجزای تشکیل دهنده آن نشان داده شده است.

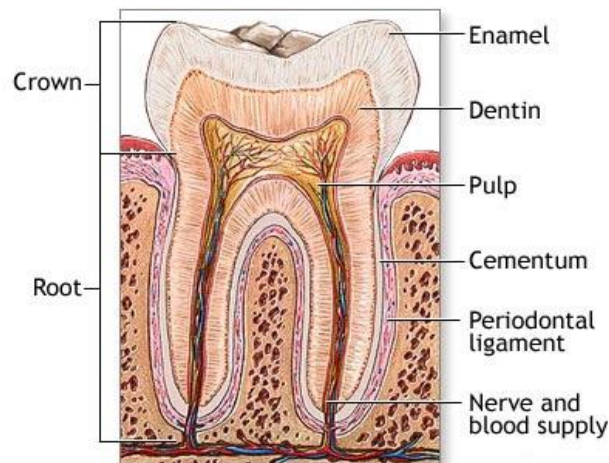


شکل ۳- نمای داخلی استخوان و اجزای تشکیل دهنده آن

افزایش تدریجی توزیع تخلخل از داخل تا سطح استخوان باعث افزایش خواص مکانیکی مانند مقاومت به ضربه، ایزولاسیون حرارتی و آزادسازی تنش‌های حرارتی می‌شود. همچنین توزیع تخلخل بر مدول الاستیسیته و استحکام کششی نیز موثر است.

۲.۲. دندان‌ها

دندان یکی از نمونه‌های حیرت‌انگیز مواد FGM در طبیعت می‌باشد که دارای بافت خارجی سخت (مینای^۳) چند لایه بسیار مقاوم در برابر سایش و همچنین بافت داخلی آن به دلیل مقاومت در برابر خستگی و عدم شکنندگی نرم می‌باشد. در شکل (۴) نمونه‌ای از بافت داخلی دندان نشان داده شده است.



شکل ۴- نمای داخلی از دندان

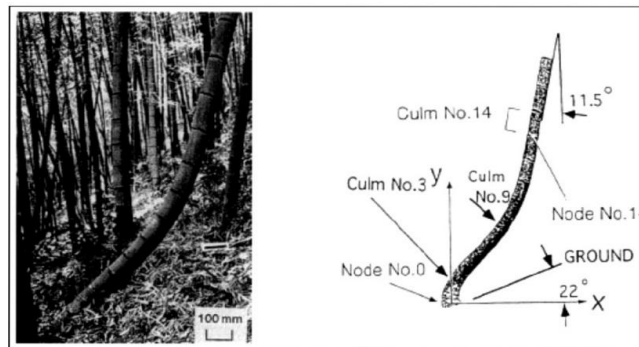
¹ Yellow Bone Marrow

² Red Bone Marrow

³ Enamel

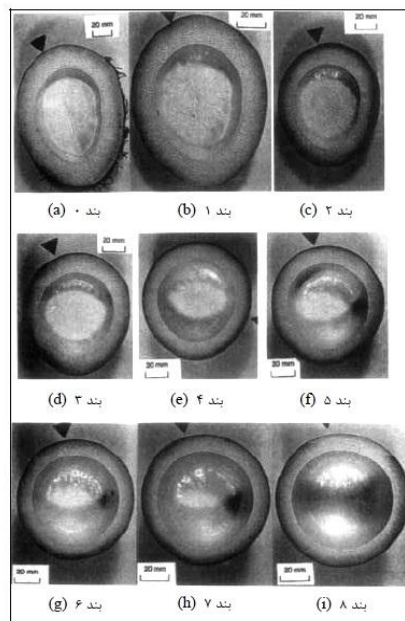
۳.۷. چوب خیزران^۱ (بامبو)

چوب خیزران یا بامبو، نمونه‌ای از یک کامپوزیت طبیعی است که به وسیله الیافی که مجموعه غلاف‌ها نامیده می‌شود، تقویت می‌گردد. خیزران را همچنین می‌توان در زمره مواد FGM یا مواد دارای ساختار سلسله مراتبی در نظر گرفت. خیزران معمولاً در زمین‌های شیب‌دار می‌روید. به خاطر وجود گشتاور خمشی ناشی از وزن، خیزران نمی‌تواند به صورت عمود بر سطح شیب‌دار برود؛ در نتیجه به سمت راستای گرانش خم می‌شود. همچنین قسمت خمیده تنه باید به شکلی تقویت گردد تا تحمل وزن قسمت بالایی را داشته باشد. بنابراین، سطح مقطع تنه این درخت از بیضی در ارتفاع پایین دایره در ارتفاع‌های بالاتر تغییر می‌یابد، که این امر باعث می‌شود تا تنش‌های ناشی از گشتاورهای خمشی کاهش یابد. از این نکته می‌توان نتیجه گرفت که سطح و شکل مقطع درخت، تابع مقدار گشتاور خمشی در آن سطح می‌باشد. شکل (۵) نمونه‌ای از چوب خیزران از نوع خیزران Mosou ۲ ساله و سیستم مختصات در نظر گرفته شده برای آن را نشان می‌دهد.



شکل ۵- نمونه‌ای از چوب خیزران در جنگل و سیستم مختصات در نظر گرفته شده برای آن

این خیزران خمیده تحت گشتاور خمشی ناشی از وزن خود و بارگذاری‌های محیطی قرار دارد. زاویه شیب زمین جنگل از خط افق ۲۲ درجه می‌باشد و قسمت صاف بالای بند خمیده با خط قائم زاویه ۱۱/۵ درجه می‌سازد. بندها از طرف زمین شماره-گذاری شده‌اند. مطابق شکل (۵)، قسمت خمیده با بند شماره ۱۴ پایان می‌یابد. همچنین شکل (۶) سطوح مقطع خیزران را از بند ۰ تا ۸ نشان می‌دهد. در اثر گشتاور خمشی، طرف بالایی سطح مقطع تحت کشش و طرف پایین تحت فشار است. در قسمت خمیده، سطح مقطع به صورت بیضی می‌باشد.



شکل ۶- سطوح مقطع خیزران از بند ۰ تا ۸

¹ Bamboo

۸. FGM های ساخت بشر

در بخش مواد مهندسی ساخته شده به دست بشر عموماً بحث مواد FGM در رابطه با حالت آیزوتروپیک مطرح است. به دلیل دشواری ساخت ماده مهندسی با توزیع نسبت‌های دلخواه و جهت‌ها به صورت دلخواه در فضا (مثلاً توزیع فیبرهای کربن در جهت‌های دلخواه و با چگالی دلخواه) هنوز از دسترس تکنیکی خارج است. اجزاء مورد استفاده برای ساخت این مواد، معمولاً شامل آلیاژهای سرب، آلومینیوم، تیتانیم، نیکل، کرم، فولاد، منیزیم، مس، تنگستن و سوپر آلیاژهای مربوطه با ترکیبی از سایر مواد مهندسی پیشرفته مانند کاربید تنگستن، سرامیک‌ها، زیرکونیا، آلومینا و کاربید تنگستن می‌باشد. در برخی از موارد به خصوص در دماهای پایین، ساخت این مواد با ترکیبی از فیبرهای ارگانیک مانند گرافیک و زمینه اپوکسی کاربرد دارد.

۹. نتیجه‌گیری

امروزه با ظهور روش‌های تولید، مانند ریخته‌گری با نیروی گریز از مرکز، متالوژی پودر و اسپری پلاسما توانایی تولید مواد FGM رو به توسعه می‌باشد. همچنین محققین در حال بررسی برای یافتن راه‌هایی برای پیشنهاد بهترین پروفیل‌ها جهت ساخت این مواد برای مقاصد مشخصی هستند. این کوشش شامل مراحل زیر می‌باشد:

- ✓ ارائه‌ی مدل مناسب برای تحلیل.
- ✓ ارائه‌ی روش‌های دقیق برای تحلیل مدل این مواد، تحت بارهای مشخص و پیش‌بینی رفتار مکانیکی این مواد.
- ✓ ارائه‌ی روش‌هایی برای بهینه کردن کارکرد این مواد و پیشنهاد برای توزیع مناسب ترکیبات این مواد و پروفیل‌های بهینه جهت ساخت.

البته مفاهیم دیگری مانند پیش‌بینی ترکیبات شیمیایی مناسب و تنش‌های پسماند با توجه به روش ساخت نیز دارای اهمیت ویژه می‌باشد. در رابطه با بخش نخست روش‌های متفاوت برای تقریب زدن خواص مکانیکی مواد دو فاز در مواد FGM و تحلیل آن‌ها ارائه شده است. این روش‌ها را می‌توان به دو بخش عمده تحلیل محیط پیوسته و تخمین خواص مکانیکی تقسیم کرد. دلیل اساسی فرض محیط پیوسته، امکان تحلیل سه بعدی محیط‌های پیوسته با روش‌های عددی توسط کامپیوترهای امروزی می‌باشد؛ در حالی که محیط واقعی در ابعاد میکروسکوپی غیرهمگن و ناپیوسته است. بنابراین ما محیط ناپیوسته را در ابعاد میکروسکوپ، جایگزین می‌کنیم. این عمل موجب نیاز به دانستن خواص مکانیکی موثر محیط پیوسته جایگزین شده براساس اجزاء تشکیل دهنده می‌شود. روش‌های جدید عددی در حال پیاده‌سازی برای تحلیل مواد FGM می‌باشد؛ از جمله این مواد می‌توان به روش‌های المان‌های بدون مش یا روش‌های المان محدود معمولی اشاره کرد. در عین حال بررسی روش‌های عددی جدید برای هندسه‌های پیچیده و بدست آوردن نتایج دقیق‌تر ادامه دارد. برای تأیید کردن دقت روش‌های عددی جدید، حل‌هایی مبتنی بر تئوری صفحات یا حل‌های سه بعدی تحلیلی (در صورت امکان) مورد نیاز است. این مواد همچنان در ایران مورد ساخت و تولید انبوه قرار نگرفته است اما در همین راستا برای اولین بار تحقیقاتی در چارچوب یک پایان‌نامه در راستای بومی سازی تکنولوژی مواد درجه‌بندی شده تابعی FGM در دانشگاه تربیت مدرس مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت که منجر به ساخت نمونه آزمایشگاهی این مدل شده است.

۱۰. مراجع

1. M.B. Bever, P.F. Duwez, Mater. Sci. Eng. 10 (1972) 1–8.
2. M. Shen, M.B. Bever, J. Mater. Sci. 7 (1972) 741–746.
3. Mortensen, S. Suresh, Int. Mater. Rev. 40 (1995) 239–265.
4. Neubrand, J. Rödel, Z. Metallkd. 88 (1997) 358–371.

5. Y. Miyamoto, W.A. Kaysser, B.H. Rabin, A. Kawasaki, R.G. Ford, *Functionally Graded Materials*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.
6. T. Hirai, in: R.J. Brook (Ed.), *Materials Science and Technology*, vol. 17B, *Processing of Ceramics*, Part 2, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, Germany, 1996, pp. 292–341.
7. W. Schatt, *Sintervorgänge*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992, p. 275.
8. L.M. Zhang, H.P. Xiong, L.D. Chen, T. Hirai, *J. Mater. Sci. Lett.* 19 (2000) 955–958.
9. Y.-G. Jung, S.-C. Choi, C.-S. Oh, U.-G. Paik, *J. Mater. Sci.* 32 (1997) 3841–3850.
10. Y. Miyamoto, *Mater. Sci. Res. Int.* 6 (2000) 3–8.
11. V. Richter, in: B. Ilschner, N. Cherradi (Eds.), *FGM'94, Proceedings of the 3rd International Symposium on Structural and Functional Gradient Materials 1994*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 1995, pp. 587–592.
12. M. Yuki, T. Murayama, T. Irisawa, A. Kawasaki, R. Watanabe, in: M. Yamanouchi, M. Koizumi, T. Hirai, I. Shiota (Eds.), *FGM'90, Proceedings of the 1st International Symposium on Functionally Gradient Materials*, Sendai, 1990, FGM Forum, Tokyo, 1990, pp. 203–208.
13. M. Omori, H. Sakai, T. Hirai, M. Kawahara, M. Tokita, in: B. Ilschner, N. Cherradi (Eds.), *FGM'94, Proceedings of the 3rd International Symposium on Structural and Functional Gradient Materials*, Lausanne, Switzerland, 10–12 October 1994, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 1995, pp. 71–76.
14. M. Tokita, in: W.A. Kaysser (Ed.), *Functionally Graded Materials 1998, Proceedings of the 5th International Symposium on FGM*.
۱۵. حسینی سعدی، م...، مواد *functionally Graded Materials FGM* و روش‌های ساخت آن، مجله فنی مهندسی ساخت و تولید، شماره ۴۵، صفحه ۳۸ – ۳۹.
۱۶. جعفری فشارکی، ج...، عطریان افیانی، ا...، شهریار، ح...، رجنبران، م...، بررسی کیفی روش‌های ساخت و تولید مواد تابعی *FGM*، سومین کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید، ۱۳۹۰.
۱۷. حافظ‌الکتاب، آ...، اسلامی، م...، نحوه ساخت مواد *FGM* و نمونه‌های این مواد در طبیعت، دانشگاه آزاد تهران جنوب، دی ۱۳۸۷.
18. B. Kieback, A. Neubrand, H. Riedel, *Processing Techniques for Functionally Graded Materials*, *Materials Science and Engineering*, 2003, A362, pp. 81–105.
19. G.E. Knoppers, J. Dijkstra, W.P. van Vliet, *The Design of Graded Material Objects*, TNO Science And Industry, De Rondom 1, 2007, Vol. 8, No. 62, pp. 350–355.