بررسی مواد تابعی (FGM)، خواص و کاربرد آن‌ها در صنایع مختلف

امین اسکندرزاده ثابت*، محسن جباری

دانشکده مهندسی مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران



مهندس امین اسکندرزاده ثابت، نویسنده مسئول مقاله، دانشگاه آزاد اسلامی تهران

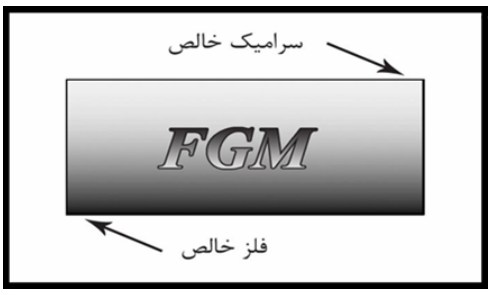
* st_a_eskandarzadeh@azad.ac.ir

چکیده: امروزه استفاده از مواد تابعی (Functionally Graded Material) در حال افزایش می‌باشد، در علم مواد به موادی جدید و پیشرفته با ساختاری ناهمگن مواد تابعی گفته می‌شود. ایده مواد مرکب (کامپوزیت‌ها) در پایان دهه ۱۹۴۰ و آغاز دهه ۱۹۵۰ در صنایع دریایی ارتش آمریکا عملی شد. خواص مکانیکی این مواد به طور پیوسته از یک سطح به سطح دیگر تغییر می‌کند و این تغییرات به وسیله‌ی تغییر تدریجی نسبت حجمی مواد تشکیل دهنده ی آن‌ها ایجاد می‌شود. مواد FGM به طور معمول از دو ماده‌ی سرامیک و فلز ساخته می‌شوند، با توجه به اینکه ماده‌ی ساختاری سرامیک ضریب انتقال حرارت پایین و مقاومت بالایی در برابر درجه حرارت دارد می‌تواند حرارت بالا را تحمل کند و از طرفی ساختار ماده دیگر یعنی فلز انعطاف‌پذیری مورد نیاز را فراهم می‌کند. قابل توجه است که به علت تغییرات پیوسته خواص مکانیکی مشکلات عدم پیوستگی که در سازه‌های کامپوزیتی موجود است در مواد تابعی به وجود نمی‌آید. در این مقاله به بررسی مواد FGM، خواص و کاربرد آن‌ها در صنایع مختلف از جمله هوافضا، خودروسازی و... پرداخته‌ایم.

کلمات کلیدی: مواد طبقه‌بندی شده (FGM)؛ ناهمگن؛ خواص؛ کاربرد.

۱- مقدمه

FGMها مواد کامپوزیتی با ریز ساختار ناهمگن هستند، که خواص مکانیکی آنها بطور ملایم و پیوسته از یک سطح به سطح دیگر جسم تغییر می‌کند. نوع رایج آن ترکیب پیوسته‌ای از سرامیک و فلز است. این مواد از اختلاط پودر فلز و سرامیک بدست می‌آیند. تغییر فلز و سرامیک از یک سطح به سطح دیگر کاملاً پیوسته است. بگونه‌ای که یک سطح از جنس سرامیک خالص و یک سطح فلز خالص است. بین دو سطح ترکیب پیوسته‌ای از هردو است. خواص مکانیکی نیز با توجه به نوع ترکیب، تغییرات پیوسته‌ای در جهت ضخامت دارد. این مواد با توجه به پیوستگی ترکیب مواد تشکیل دهنده، دارای خواص مکانیکی موثری نسبت به مواد کامپوزیت لایه‌ای هستند. همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌گردد نمایی شماتیک از ماده FGM با ترکیب سرامیک – فلز نشان داده شده است [۴-۱].



شکل ۱- نمایی شماتیک از ماده FGM با ترکیب سرامیک- فلز

۲- کاربرد مواد FGM

این مواد بصورت گسترده در پوشش عایق حرارتی برای پره‌های توربین‌ها، سیستم‌های حفاظت زرهی برای استفاده‌های نظامی، تجهیزات هم‌جوشی مواد، مواد زیست پزشکی شامل استخوان و

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.2.62.3.7]

ایمپلنت‌های دندانپزشکی، صنایع هوافضا (این دسته از مواد قابلیت استفاده در دیواره‌ی سفینه‌های فضایی و قسمت‌هایی از موتور راکت‌ها را دارا هستند.)، خودروسازی، کاربردهای الکترومغناطیسی و MEMS شامل پیزوالکتریک، وسایل ترموالکتریکی و سنسورها، شاتل‌های فضایی با مواد مقاوم به حرارت‌های بالا، موتورهای سرامیکی، اجزای در معرض فرسودگی و سایش، اجزای مکانیکی به مقاومت حرارتی بالا، تجهیزات ورزشی، سرامیک فلزات، پلاستیک فلزات، اتصال فلزات غیرهمسان، سرامیک‌های ناهمگن، فلزات با ساختار الماسی، پلاستیک فلزات تقویت شده با کربن، موارد هسته‌ای کاربرد دارند [۵-۲، ۸].

مهمترین کاربرد مواد FGM بهبود مشخصه‌های مکانیکی و ترمودینامیکی اجزا به طرق زیر است [۵-۲، ۸]:

۱- اندازه تنش‌های حرارتی می‌تواند کمینه گردد و همچنین نواحی بحرانی که بیشینه تنش حرارتی در آن قسمت بوجود می‌آید می‌تواند کنترل شود.

۲- شروع تسلیم پلاستیک و شکست برای یک بارگذاری ترمودینامیکی می‌تواند با تأخیر اتفاق بیفتد.

۳- جلوگیری از تمرکز تنش‌های شدید در محل تقاطع بعدها و نقاط تکین.

۴- مقاومت باندهای واسط بین جامدات غیر همگن مانند فلز و سرامیک با کاهش پیوسته ترکیب یا جهت‌دار کردن تغییر خواص مکانیکی می‌تواند افزایش پیدا کند.

۵- نیروی پیشران برای رشد ترک می‌تواند با انتخاب مناسب درجه بندی خواص مکانیکی کاهش پیدا کند.

۶- قرارگیری پوشش سخت روی نمونه فرعی با جنس نرم بوسیله درجه‌بندی پیوسته خواص مکانیکی و جهت‌دار کردن تغییر خواص مواد می‌تواند آسان‌تر شود.

۷- درجه‌بندی ترکیب در لایه‌های سطح می‌تواند میدان‌های تکین ناشی از بریدگی و فرورفتگی‌های نوک تیز را از بین ببرد و مشخصه‌های تغییر شکل پلاستیک اطراف فرو رفتگی‌ها را تغییر می‌دهد.

در زیر به تعدادی از کاربردهای مواد FGM اشاره می‌نماییم:

۲-۱- کاربرد FGM به عنوان بیومتریال[1] در مهندسی پزشکی

بدن ما دویست و شش تکه استخوان دارد. آسیب هر کدام از آن‌ها مشکلات جدی به دنبال دارد. جهت رفع این مشکل محققان به دنبال مواد قابل جایگزین جدیدی برای مفاصل و استخوان‌ها هستند. به این منظور، تنها مقاومت عالی در برابر خوردگی[2] و سختی کافی نیست بلکه باید بی‌ضرر و سازگار با بدن نیز باشند. با توجه به شرایط مورد نیاز و قابلیت‌های فراوان مواد FGM، امروزه از آن‌ها برای تقویت ساختار کلاژن[3] که پروتئین اصلی در ساختار پوست، تاندون، غضروف و استخوان است نیز استفاده می‌شود [۵-۲، ۸].

۲-۲- کاربرد FGM در ژنراتورهای ترموالکتریک[4]

هر گاه دو فلز غیر همجنس از یک طرف به هم متصل شوند و نقطه اتصال آن‌ها در دمای T قرار گیرد، در دو سر آزاد آن‌ها emf ایجاد می‌شود که به اثر سیبک[5] معروف است. حال اگر هر دو سر به هم متصل شوند و در دماهای T_1 و T_2 قرار گیرند emf ایجاد شده متناسب با اختلاف دمای T_1 و T_2 خواهد بود. در اثر emf ایجاد شده، در این مدار بسته جریان الکتریکی به وجود می‌آید [۵-۲، ۸].

۲-۳- کاربرد برای بهبود مقاومت اتصال و کاهش تنش‌های پسماند

در محل اتصال دو ماده مختلف‌به این معنی که به جای اتصال مستقیم دو ماده ناهمسان، لایه‌ای از FGM بین آن دو قرار می‌دهند و این FGM تغییر خواص را هموارتر می‌کند [۲، ۳، ۸].

۲-۴- کاربرد در لایه‌های پوششی

این مواد به عنوان لایه مقاوم پوششی در چرخ دنده‌ها، بادامک‌ها، یاتاقان‌های کروی (ساچمه‌ای) و غلتکی به منظور کاهش اثرات ساییدگی در ابزارهای ماشین استفاده می‌شوند. این لایه‌ها را طوری می‌سازند که رسانایی حرارتی آنها نیز زیاد باشد [۵-۲، ۸].

---

[1] Biomaterial
[2] Corrosion resistance
[3] Collagen
[4] Thermoelectric Generator (TEG)
[5] Seebeck

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.2.62.3.7]

۲-۵-کاربرد در حوزه هوا و فضا

مفهوم FGM اولین بار برای کابرد در این زمینه ابداع شد. چرا که FGM می‌توانست خواص ناسازگاری مثل هدایت حرارتی خوب و مقاومت در برابر گرمای مناسب را با هم داشته باشد. این امر امکان تولید مواد سبک و محکم و با دوام را فراهم می‌کند. لذا در این حوزه، در مواردی چون سازه راکت و ایستگاه‌های فضایی و نیز دیواره خارجی سفینه‌های فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵-۲، ۸].

۲-۶-کاربرد FGM در مواد صنعتی

مواد FGM در مصارف صنعتی نیز کاربرد وسیعی دارد. به عنوان مثال، در ابزارهای فرم‌دهی از آنجا که مواد مصرفی پیشرفته‌ای که مورد استفاده قرار می‌گیرند روز به روز سخت تر می‌شوند، لذا به ابزارهای پیشرفته‌تری برای برش و فرم دهی آنها نیاز می‌باشد. آن‌چه که در این زمینه مورد نیاز است سازگاری بین مقاومت پوششی و چقرمگی برای مواد ابزارهای برش و فرم دهی است، لذا کاربرد FGM در این زمینه می‌تواند نقش کلیدی داشته باشد. به علاوه برای برش خشک که سیال خنک کننده‌ای مورد استفاده قرار نمی‌گیرد به مواد مقاوم در برابر گرما نیاز است، چنین ماده‌ای هم اکنون ساخته شده که پوشش بیرونی آن از الماس و درون آن از فولاد است. با این وضع پیش بینی می‌شود که به زودی ابزارهای برش سریع، بدون محدودیت در شکل و اندازه ساخته شوند [۵-۲، ۸].

۳- مشخصه‌های متمایز FGM با سایر مواد

مواد (FGM) از نظر میکروسکوپی غیرهموژن بوده و خواص مکانیکی آنها به طور پیوسته از یک سمت سازه تا سمت دیگر تغییر می‌کند. این تغییرات مواد به صورت تدریجی با تغییر نسبت حجمی دو ماده ساختاری ایجاد می‌شود. معمولاً این مواد از دو ماده ساختاری سرامیک و فلز ساخته می‌شود. ماده ساختاری سرامیک به علت ضریب انتقال حرارت کم و مقاومت زیاد در مقابل درجه حرارت، درجات حرارت بسیار بالا را تحمل کرده و ماده ساختاری فلز انعطاف پذیری لازم را فراهم می‌کند. به علاوه اختلاط سرامیک و فلز با تغییرات پیوسته از یک سطح تا سطح دیگر در یک سازه به آسانی قابل ساختن می‌باشد. به‌علت تغییرات پیوسته خواص مکانیکی مشکلات عدم پیوستگی که در سازه‌های کامپوزیت وجود دارد در مواد FGM به وجود نمی‌آید. مزیت استفاده از این مواد این است که قادر به تحمل درجات حرارت بالا، اختلاف درجه حرارت بسیار بالا بوده و نیز مقاومت بالایی در مقابل خوردگی، سایش و شکست دارند. درحال حاضر از این مواد برای سازه‌هایی که در مقابل درجات حرارت بالا باید مقاوم باشند استفاده می‌شود [۳-۱، ۱۴-۹].

برخی از مشخصات متمایز مواد FGM بر سایر مواد را می‌توان بصورت زیر بیان کرد [۳-۱، ۱۴-۹]:

۱- یک ترکیب شیمیایی متغیر
۲- یک ساختمان میکروسکوپی متغیر
۳- یک تراکم (چگالی) متغیر
۴- حالت‌های ساختاری مختلف از یک ماده یکسان

۴- روش‌های تولید مواد FGM

انواع روش‌های تولید مواد FGM: [۳-۱، ۷-۴، ۱۷-۱۵]

۱- پلاسما اسپری[1]
۲- متالوژی پودر[2]
۳- سنتز احتراقی[3]
۴- روکش فلزی لیزری[4]

[1] Plasma Spraying
[2] Powder Metallurgy
[3] Combustion Synthesis
[4] Laser Cladding

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.2.62.3.7]

۵- رسوب دهی بخار شیمیایی[1]
۶- ریخته‌گری گردابی[2]
۷- پرینت ۳ بعدی[3]
۸- روش تزریق[4]

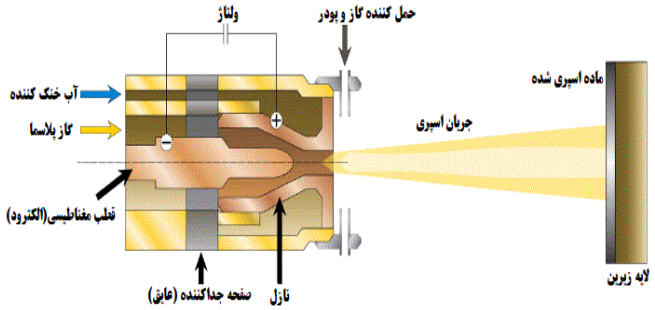
به طور کلی فرآیندهای تولید مواد FGM به دو دسته عمده لایه به لایه و مبتنی بر جریان سیال تقسیم‌بندی می‌شوند.

۴-۱- فرآیندهای ساخت مواد FGM به صورت لایه به لایه

این نوع از فرآیندها را فرآیندهای ساختمانی می‌نامند، زیرا تغییرات تدریجی در آن‌ها به صورت دقیق در فضا قابل ایجاد هستند. این فرآیندها قابل کنترل توسط کامپیوتر ولی تا حدودی گران و پرهزینه هستند [۷-۱، ۱۷-۱۵].

۴-۱-۱- پلاسما اسپری

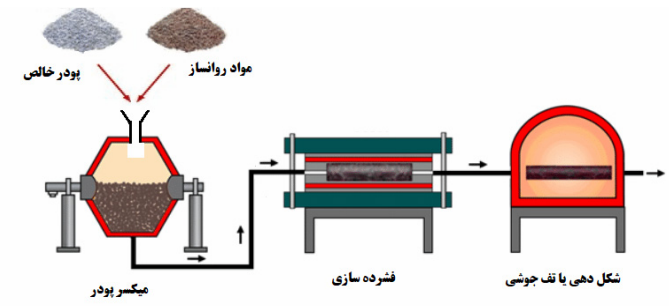
پلاسما اسپری به عنوان یک روش قابل انعطاف و اقتصادی برای تولید پوشش‌های FGM مطرح شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد دراین روش دو یا چند نوع پودر متفاوت با سرعت‌های مختلف به داخل یک جت پلاسما با درجه حرارت بسیار بالا تزریق می‌شود و بر اساس این روش رسوب لایه‌هایی با تغییرات پیوستهٔ در ترکیب، در طول فرآیند تولید می‌شود [۷-۱، ۹، ۱۷-۱۵].



شکل ۲- شماتیک پلاسما اسپری [۲].

۴-۱-۲- متالوژی پودر

فناوری متالورژی پودر یکی از مناسب‌ترین روش‌های تولید FGM است. زیرا با استفاده از این روش امکان کنترل ترکیب، ساختمان میکروسکوپی و نیز شکل FGM به آسانی و در یک بازهٔ وسیع، امکان‌پذیر است، مطابق شکل ۳ در این روش امکان ساخت قطعات بزرگ وجود دارد. در این روش لایه‌های متوالی قطعه با ترکیب متفاوت درون قالب ریخته شده و بعد از پرس شدن، عملیات انجام می‌گردد [۷-۱].



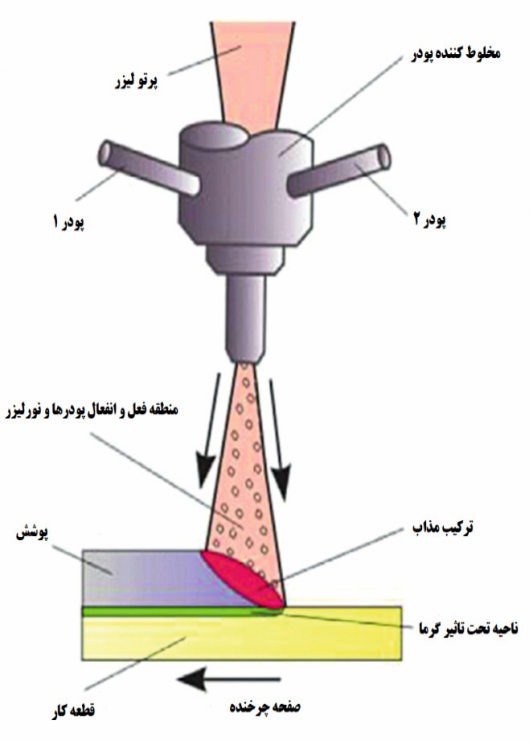
شکل ۳- فرآیند متالوژی پودر [۲].

[1] Chemical Vapor Deposition (CVD)
[2] Centrifugal Casting
[3] Three Dimensional Printing
[4] Extrusion method

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.2.62.3.7]

۴-۱-۳- روکش فلزی

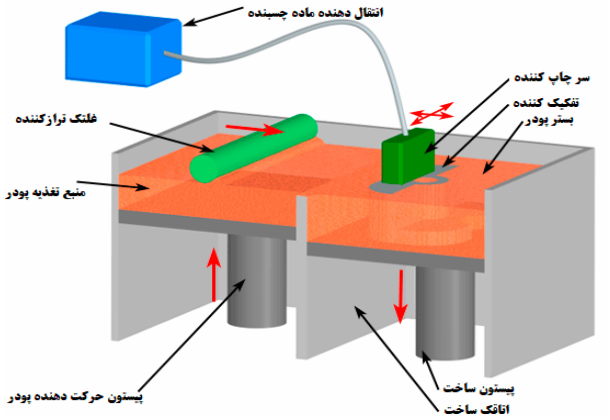
این روش، یکی از روش‌های نوین در تولید FGM محسوب می‌شود. مطابق شکل ۴ بطورکلی Laser cladding بـه منظـور تولیـد پوشش‌ها (coatings)، بوسیلهٔ تزریق مستقیم و پیوسته‌ی پودر به پرتو لیزر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷-۱].



شکل ۴- شماتیک روکش فلزی [۲].

۴-۱-۴- پرینت ۳ بعدی

این روش انعطاف پذیرترین نـوع فنـاوری solid-freeform fabrication (SFF) و یکـی از انـواع تکنولـوژی نمونـه سـازی سـریع (rapid prototyping) است که در دانشگاه M.I.T بسط و توسعه یافته و کاربرد ویژه‌ی آن در تولید سازه‌های FGM اسـت. مطـابق شکل ۵ در این روش احجام جامد بوسیله printing متوالی لایه‌های دوبعدی، تولید می‌شوند. هـر لایـه از قطعـه، بوسـیلهٔ پخـش کردن یک لایهٔ نازک از پودر و اتصال پودرها با استفاده از مادهٔ چسبی (binder) ایجاد می‌گردد. عمل تشکیل لایه‌ها آنقـدر ادامـه می‌یابد تا شکل و ترکیب نهایی حاصل گردد. از طریق کنترل نوع و مقدار چسب مورد استفاده و پارامترهـای printing، مـی‌تـوان قطعات FGM را با هر شکل هندسی، به آسانی با این روش تولید نمود [۵-۱، ۹].



شکل ۵- شماتیک پرینت۳ بعدی [۲].

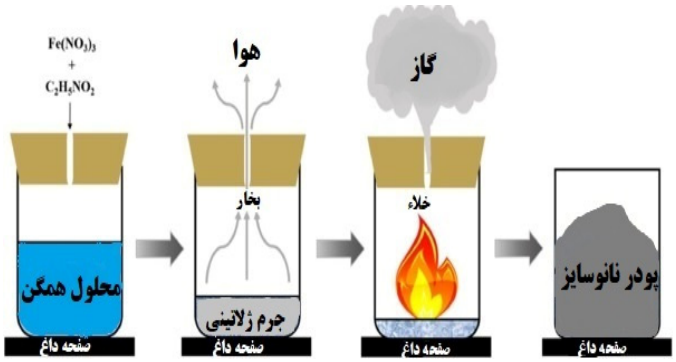
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.2.62.3.7]

۴-۲-فرآیندهای مبتنی بر جریان سیال

به کمک این فرآیندها تغییرات تدریجی در خواص مواد ایجاد می‌گردد. آنچه در این فرآیندها دارای اهمیت است ترم زمان و سرعت می‌باشد [۷-۱، ۱۷-۱۵].

۴-۲-۱- سنتز احتراقی

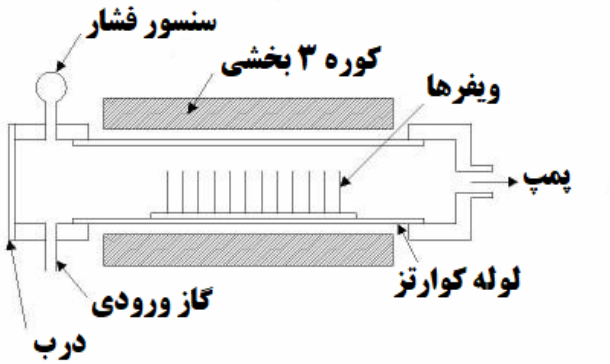
سنتز احتراقی یک روش سریع، ارزان قیمت و در عین حال قابل اطمینان برای تولید قطعات FGM محسوب می‌شود. مطابق شکل ۶ اساس این روش بر واکنش‌های شیمیایی گرماده بین مواد اولیهٔ تشکیل دهندهٔ FGM شکل گرفته است [۷-۱، ۹، ۱۵، ۱۶].



شکل ۶- فرآیند سنتز احتراقی [۲].

۴-۲-۲- رسوب‌دهی بخار شیمیایی

اساس این روش بر رسوب گازهای ورود ی به یک راکتور CVD بنا نهاده شده است. مطابق شکل ۷ بوسیله‌ی تغییر نسبت گازهای ورودی و یا کنترل شرایط CVD، دمای رسوب، فشار و سرعت جریان گاز می‌توان انواع مختلف FGM را با ماکزیمم ضخامت ۱cm تهیه نمود [۷-۱، ۹، ۱۷-۱۵].

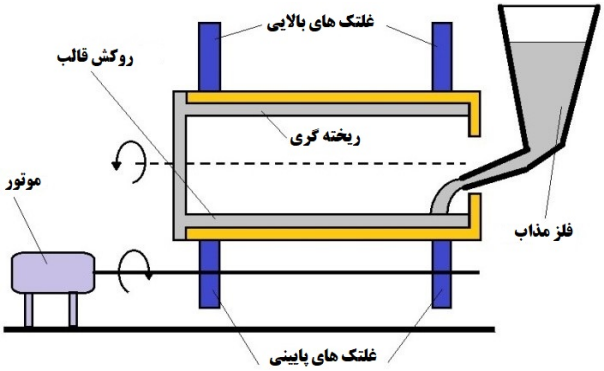


شکل ۷- شماتیک رسوب‌دهی بخار شیمیایی [۲].

۴-۲-۳- ریخته‌گری گردابی

مطابق شکل ۸ مخلوطی از ذرات و ماتریس ذوب شده به داخل قالب سیلندری شکلی که حول محور خود با سرعت ثابتی در حال دوران است، پاشیده می‌شود. در اثر جدایش ذرات و مایع در یک میدان گریز از مرکز، تغییرات تدریجی مورد نظر در ذرات متراکم شده حاصل گشته و در نهایت با سرد کردن دیوارهٔ بیرونی قالب (در حالی که دیوارهٔ داخلی عایق حرارتی شده است)، انجماد شروع و FGM تشکیل می‌گردد. انواع مختلف FGM از جمله ترکیبات فلز- فلز، فلز-سرامیک و آلیاژ فلز- سرامیک با موفقیت، توسط این روش تولید شده‌اند [۷-۱، ۹، ۱۷-۱۵].

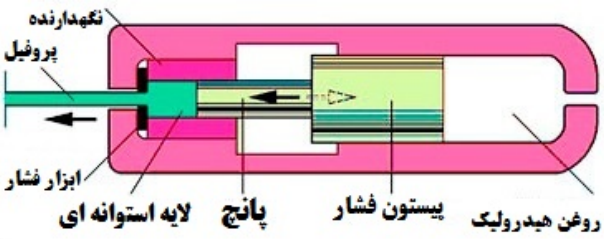
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.2.62.3.7]



شکل ۸- شماتیک ریخته‌گری گردابی [۲].

۴-۲-۴- روش تزریق

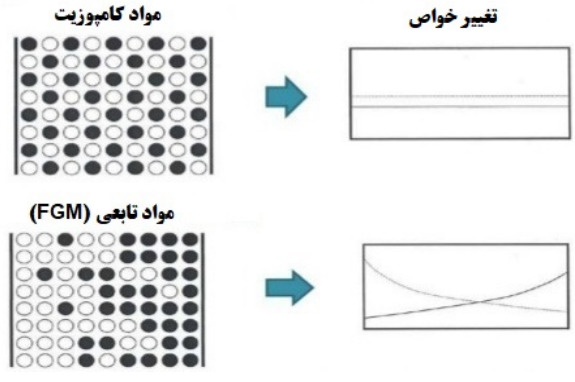
مطابق شکل ۹ فرایند تزریق، با گرم کردن مواد اولیه (در اکستروژن گرم) شروع می‌شود، سپس داخل مخزن دستگاه پرس قرار داده می‌شود. مواد اولیه فلزی، به‌صورت لایه‌های استوانه‌ای ریخته‌گری شده و داخل مخزن دستگاه پرس قرار می‌گیرند، سپس یک قطعه حائل بین لایه‌های استوانه‌ای و پیستون قرار می‌گیرد و لایه‌های استوانه‌ای توسط پیستون به داخل قالب، فشرده می‌شود و محصول اکسترود شده از سمت دیگر کشیده می‌شود تا صاف شود. برای بهبود خواص محصول باید روی آن فرایندهای گرم کاری و سرد کاری انجام شود [۵-۱، ۹].



شکل ۹- شماتیک روش تزریق [۲].

۵- مزایای مواد FGM نسبت به کامپوزیت‌ها

مواد FGM موادی مرکب با خواص میکروسکوپی غیر همگن محسوب می‌شوند، اما تغییرات پیوسته در میکروساختار مواد FGM آنها را از مواد مرکب متعارف، مجزا می‌سازد. در واقع ماده FGM نوعی ماده کامپوزیت است که ترکیب آن بر اساس کارایی مورد نیاز تغییر می‌کند. این ماده می‌تواند با تغییر پیوسته کسرهای حجمی مواد تشکیل دهنده که منجر به ایجاد پیوستگی در خصوصیات آن می‌شود، تولید شود. این موضوع فرق اساسی بین مواد کامپوزیت معمول و مواد FGM می‌باشد. در شکل ۱۰ مواد FGM با مواد مرکب رایج مقایسه شده است [۱۷-۱۳، ۹-۱].



شکل ۱۰-مقایسه مواد FGM با مواد کامپوزیت [۲].

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.2.62.3.7]

همان‌طور که مشاهده می‌شود در مواد FGM، تغییرات تدریجی است و به تدریج از یک ماده کاهش و به ماده دیگر اضافه می‌گردد.

اصولاً مواد کامپوزیتی تشکیل شده از رشته‌های جای‌گرفته در ماتریس، دارای ناپیوستگی‌های ناشی از خواص مکانیکی مواد در سطوح اتصال لایه‌ها بوده، بنابراین در بارهای حرارتی بالا مستعد گسسته شدن پیوند بین الیاف و ماتریس هستند. همچنین امکان رشد ترک‌ها از محل پیوند ماتریس و الیاف و گسترش آنها به قسمت‌های دیگر ماده از معایب جدایی ناپذیر کامپوزیت‌ها به شمار می‌رود. ضعف دیگر این مواد، وجود تنش‌های پسماند در مواد کامپوزیتی است که در اثر اختلاف ضریب انبساط حرارتی الیاف و ماتریس ایجاد می‌شود. در مواد FGM این مشکلات، به دلیل تغییرات تدریجی حجم کسری مواد تشکیل دهنده به جای تغییرات ناگهانی، کاهش می‌یابد [۷-۱، ۹، ۱۳، ۱۴].

۶- ترکیبات و فلسفه استفاده از مواد FGM

ترکیبات مختلفی برای تغییرات تدریجی در مواد FGM پیشنهاد شده است و هر کدام هم دارای محاسن و معایب مخصوص به خود هستند. در این ترکیب‌ها خواص FGM از خواص یک ترکیب یا ماده به سمت خواص ماده یا ترکیب دیگر به تدریج تغییر می‌کند. معمولاً نوع ترکیبی که برای این نوع از مواد در نظر گرفته می‌شود به صورتی است که خواص مواد ترکیبی به نوعی مکمل یکدیگر باشند و هر کدام کمبودهای دیگری را جبران نمایند. یکی از معروف‌ترین ترکیب‌های موجود در ساخت FGM مربوط به ترکیب فلز و سرامیک می‌باشد. در این ترکیب، خواص مواد از خواص سرامیک به سمت خواص یک فلز دچار تغییرات تدریجی می‌گردد. فلزات دارای ویژگی‌هایی مانند قابلیت ماشین‌کاری، شکل‌پذیری و استحکام بالا بوده و نیروهای ضربه‌ای را به آسانی تحمل می‌کنند. در پدیده خستگی نیز که تحت بارهای سیکلی قرار می‌گیرند، عمر بالاتری نسبت به سرامیک‌ها دارند. اما در برابر درجه حرارت‌های بالا، خوردگی و سایش و نیز اثرات شیمیایی مخرب بسیار آسیب‌پذیرند. از طرف دیگر سرامیک‌ها دارای خواصی هستند که مکمل خواص فلزات هستند یعنی مقاومت بالایی در برابر حرارت، خوردگی و سایش دارند اما چون چقرمگی آن‌ها بسیار پایین است ترد و شکننده بوده و نیز قابلیت شکل‌پذیری کمی دارند. در نتیجه با ترکیب کردن فلز و سرامیک می‌توانیم ماده‌ای را ایجاد کنیم که دارای خواص هر دو ماده باشد. هدف از تولید مواد FGM نیز استفاده همزمان از محاسن هر دو ماده می‌باشد. بنابراین معمولاً سطحی از جسم را که در معرض مواد شیمیایی و درجه حرارت بالا است از سرامیک و سطح دیگر را از فلز می‌سازند و سطوح مابین را از مخلوط سرامیک و فلز به صورت پیوسته پر می‌کنند. مواد FGM می‌توانند غیر از فلز و سرامیک باشند، ولی در بیشتر موارد از ترکیب این دو ماده استفاده می‌شود. بخش سرامیکی معمولاً از جنس سرامیک‌های بدون اکسید- بدون فلز (SiN_4,SiC)، سرامیک‌های بدون اکسید- با فلز (ZrC,TiC)، سرامیک‌های با اکسید- بدون فلز (SiO_2)، و سرامیک‌های با اکسید- با فلز (Al_2O_3,ZrO_2) انتخاب شده و قسمت فلزی نیز از انواع فلزات از جمله آلومینیوم، آهن، نیکل، سرب، روی، منیزیم و یا آلیاژهای فلزی انتخاب می‌شود. ترکیبات (Al/Al_2O_3)، (St/ZrO_2)، (Ti/B)، (Ti/SiC)، (W/Cu)، (Al_2O_3/Ti_3SiC_2) به عنوان نمونه‌ای از مواد FGM که در کارهای پژوهشی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، هستند [۹-۶، ۲۱-۱۸].

با توجه به متغیر بودن جنس ماده FGM در امتداد ضخامت ورق، شعاع استوانه و یا کره، تمامی خواص مکانیکی ماده (از قبیل مدول الاستیسیته، ضریب انتقال حرارت هدایتی، ضریب انبساط حرارتی، دانسیته و ظرفیت گرمایی ویژه) تابعی از موقعیت مکانی است.

۷- انواع توابع جزء حجمی در FGM

همانطور که ذکر شد تغییر پیوسته‌ی خصوصیات مکانیکی و حرارتی در مواد FGM بواسطه‌ی تغییر در جزء حجمی مواد تشکیل دهنده‌ی آن صورت می‌گیرد. به همین منظور توضیح مختصری در مورد توابع جزء حجمی در این مواد می‌دهیم. بدین منظور یک ورق FGM مرکب از دو فاز مختلف که معمولاً از فلز و سرامیک تشکیل می‌شود را در نظر می‌گیریم [۷-۶، ۲۱-۱۸].

خواص چنین ورقی در جهت ضخامت آن به صورت پیوسته و تدریجی و مطابق با رابطه ۱ به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$p(z) = p_m + p_{cm} v_{fc}(z) \quad p_{cm} = p_c - p_m \qquad (۱$$

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.2.62.3.7]

که در آن p یک خاصیت ماده و m و c به ترتیب به فازهای فلز و سرامیک اشاره دارند و رابطه ۳ نیز معرف جزء حجمی سرامیک در ساختار FGM است و توسط توابع ریاضی مختلفی قابل تعریف است که به پرکاربردترین آنها اشاره می‌کنیم [۹-۶، ۲۱-۱۸].

۷-۱- قانون توانی FGM

تابع جزء حجمی به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود:

$$\nu_f(z)=\left(\frac{z}{h}+\frac{1}{2}\right)^n \qquad (۲$$

که در رابطه ۲، n شاخص ماده FGM و h ضخامت کل ورق است. تغییرات تابع جزء حجمی ماده‌ی اول (غالباً سرامیک) از رابطه ۳ و تغییرات تابع جزء حجمی ماده‌ی دوم از رابطه ۴ بدست می‌آید [۶، ۷، ۲۱-۱۸].

$$\nu_{fc}(z)=\nu_f(z) \qquad (۳$$

$$\nu_{fm}(z)=1-\nu_{fc}(z) \qquad (۴$$

۷-۲- سیگموئیدی FGM

این نوع FGM از تعریف دو تابع قانون توانی استفاده می‌نماید تا توزیع تنش در حد فاصل‌ها را تعدیل نماید. تابع جزء حجمی به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود: [۶، ۷، ۲۱-۱۸]

$$\nu_f(z)=\begin{cases}1-\frac{1}{2}\left(1-\frac{2z}{h}\right)^n & 0\le z\le\frac{h}{2}\\ \frac{1}{2}\left(1+\frac{2z}{h}\right)^n & -\frac{h}{2}\le z\le 0\end{cases} \qquad (۵$$

۷-۳- دولایه FGM

برای یک FGM دولایه، تابع جزء حجمی به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شود: [۶، ۷، ۲۱-۱۸]

$$\nu_f(z)=\begin{cases}\left(1-\frac{2z}{h}\right)^n & 0\le z\le\frac{h}{2}\\ \left(1+\frac{2z}{h}\right)^2 & -\frac{h}{2}\le z\le 0\end{cases} \qquad (۶$$

در حالت n=0 جزء حجمی ماده اول صد در صد است و در n=∞ صد در صد جزء حجمی ماده اول در وسط پوسته اتفاق می‌افتد که به تدریج با حرکت به سمت طرفین ضخامت از میزان آن کاسته می‌شود و شدت این درجه بندی به شاخص ماده یعنی n بستگی دارد [۶، ۷، ۲۱-۱۸].

۷-۴- نمایی FGM

نوع دیگری از ماده FGM وجود دارد که خواص مکانیکی آن از توزیع نمایی تبعیت می‌کند. در این حالت تغییرات خواص این نوع ماده به صورت رابطه ۷ تعریف می‌شود: [۶، ۷، ۲۱-۱۸]

$$p(z)=p_m e^{\frac{1}{h}\ln\frac{p_c}{p_m}\left(z+\frac{h}{2}\right)} \qquad (۷$$

در این حالت نیز وقتی $P_m=P_c=P$ باشد، خاصیت P_z همانند ماده ایزوتروپیک مقدار ثابت P را اختیار می‌کند [۶، ۷، ۲۱-۱۸].

۸- ارتباط تنش و کرنش مواد و خاصیت آن‌ها

قانون هوک برای مواد الاستیک را می‌توان به صورت رابطه زیر تعریف کرد: [۶، ۲۱-۱۸]

$$\sigma_{ij}=C_{ijkl}\varepsilon_{kl} \qquad (۸$$

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.2.62.3.7]

که در رابطه ۸، σ_{ij} و ε_{kl} به ترتیب مولفه‌های تانسور مرتبه دوم تنش و کرنش را نشان می‌دهند، C_{ijkl} نشان دهنده درایه‌های تانسور مرتبه چهار سختی الاستیک است [۶، ۲۱-۱۸].

C_{ijkl} در حالت کلی در رابطه ۸ دارای ۸۱ مولفه می‌باشد [۶، ۲۱-۱۸].

رابطه انرژی کرنشی بر واحد حجم به صورت زیر بیان می‌شود:

$$u = \frac{1}{2}\sigma_{ij}\varepsilon_{ij} \qquad (۹$$

رابطه زیر با جای‌گذاری رابطه ۸ در ۹ بدست می‌آید:

$$u = \frac{1}{2}C_{ijkl}\varepsilon_{ij}\varepsilon_{kl} \qquad (۱۰$$

رابطه زیر با مشتق‌گیری از رابطه ۱۰ ابتدا نسبت به ε_{ij} و سپس نسبت به ε_{kl} حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial\varepsilon_{ij}\partial\varepsilon_{kl}} = C_{ijkl} \qquad (۱۱$$

به طور مشابه رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial\varepsilon_{kl}\partial\varepsilon_{ij}} = C_{klij} \qquad (۱۲$$

از مقایسه روابط ۱۱ و ۱۲ رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$C_{ijkl} = C_{klij} \qquad (۱۳$$

رابطه ۱۳ تقارن تانسور مرتبه چهار سختی الاستیک را نشان می‌دهد. لذا مولفه‌های ماتریس سختی از ۸۱ مولفه به ۳۶ مولفه مستقل کاهش می‌یابد [۶، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱].

همچنین تانسور مرتبه دو تنش و کرنش نیز متقارن هستند. لذا مولفه‌های ماتریس سختی از ۳۶ مولفه به ۲۱ مولفه مستقل کاهش می‌یابد [۶، ۲۱-۱۸].

رابطه تنش و کرنش به صورت ساده شده زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_i = C_{ij}\varepsilon_j \qquad (۱۴$$

در حقیقت در رابطه ۱۴ هیچ صفحه تقارنی برای خصوصیات مواد فرض نشده، به این مواد، مواد غیر ایزوتروپیک[1] گویند. مواد تری کلینیک نام دیگری است که برای این مواد استفاده می‌شود و به صورت معادله ۱۵ نشان داده می‌شود: [۶، ۲۱-۱۸]

$$\begin{Bmatrix}\sigma_r\\ \sigma_\theta\\ \sigma_z\\ \sigma_{\theta z}\\ \sigma_{rz}\\ \sigma_{r\theta}\end{Bmatrix} = \begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16}\\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26}\\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36}\\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46}\\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56}\\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{45} & C_{56} & S_{66}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_r\\ \varepsilon_\theta\\ \varepsilon_z\\ 2\varepsilon_{\theta z}\\ 2\varepsilon_{rz}\\ 2\varepsilon_{r\theta}\end{Bmatrix} \qquad (۱۵$$

اگر این مواد دارای یک صفحه تقارن باشند، به آنها مواد مونوکلینیک[2] گفته می‌شود و تعداد ضرایب مستقل ماتریس سختی نیز به ۱۳ کاهش می‌یابد. ارتباط تنش - کرنش این مواد به صورت رابطه ۱۶ بیان می‌گردد: [۶، ۲۱-۱۸]

[1] Anisotropic
[2] monoclinic

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.2.62.3.7]

$$\begin{Bmatrix}\sigma_r\\ \sigma_\theta\\ \sigma_z\\ \sigma_{\theta z}\\ \sigma_{rz}\\ \sigma_{r\theta}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16}\\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26}\\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36}\\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0\\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0\\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & S_{66}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_r\\ \varepsilon_\theta\\ \varepsilon_z\\ 2\varepsilon_{\theta z}\\ 2\varepsilon_{rz}\\ 2\varepsilon_{r\theta}\end{Bmatrix} \qquad (۱۶$$

اگر ماده نسبت به دو صفحه عمود بر هم دارای تقارن باشد، حتما تقارن نسبت به صفحه سوم نیز دارد که به صورت زیر مطرح می‌گردد: [۶، ۲۱-۱۸]

$$\begin{Bmatrix}\sigma_r\\ \sigma_\theta\\ \sigma_z\\ \sigma_{\theta z}\\ \sigma_{rz}\\ \sigma_{r\theta}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0\\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0\\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_r\\ \varepsilon_\theta\\ \varepsilon_z\\ 2\varepsilon_{\theta z}\\ 2\varepsilon_{rz}\\ 2\varepsilon_{r\theta}\end{Bmatrix} \qquad (۱۷$$

رابطه ۱۷ بیانگر خصوصیات مواد ارتوتروپیک[1] می‌باشد. نکته حائز اهمیت در این مواد، نداشتن ارتباط بین تنش‌های نرمال σ_r، σ_θ و σ_z با کرنش‌های برشی $\varepsilon_{\theta z}$، ε_{rz} و $\varepsilon_{r\theta}$ می‌باشد. به همین ترتیب تنش‌های برشی $\sigma_{\theta z}$، σ_{rz} و $\sigma_{r\theta}$ ارتباطی به کرنش‌های نرمال ε_r، ε_θ و ε_z ندارند. لذا تحلیل این مواد نسبت به مواد تری کلینیک و مونوکلینیک به مراتب ساده‌تر می‌باشد. همچنین تعداد ضرایب ثابت مستقل به ۹ کاهش یافته است [۶، ۲۱-۱۸].

اگر در هر نقطه از مواد، یک تقارن چرخشی حول یکی از محورها وجود داشته باشد، این مواد را ایزوتروپ عرضی[2] می‌نامند. در این حالت تعداد ضرایب ثابت مستقل به ۵ کاهش یافته و رابطه تنش- کرنش به صورت رابطه ۱۸ تعریف می‌شود [۶، ۲۱-۱۸].

$$\begin{Bmatrix}\sigma_r\\ \sigma_\theta\\ \sigma_z\\ \sigma_{\theta z}\\ \sigma_{rz}\\ \sigma_{r\theta}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0\\ C_{12} & C_{11} & C_{23} & 0 & 0 & 0\\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_r\\ \varepsilon_\theta\\ \varepsilon_z\\ 2\varepsilon_{\theta z}\\ 2\varepsilon_{rz}\\ 2\varepsilon_{r\theta}\end{Bmatrix} \qquad (۱۸$$

$$C_{66}=\frac{C_{11}-C_{12}}{2}$$

اگر تقارن چرخشی حول دو محور عمود برهم وجود داشته باشد، مواد را ایزوتروپیک[3] نامیده و تعداد ضرایب ثابت مستقل به ۲ تقلیل می‌یابد. رابطه ۱۹ بیانگر ارتباط تنش و کرنش مواد ایزوتروپیک می‌باشد [۶، ۲۱-۱۸].

$$\begin{Bmatrix}\sigma_r\\ \sigma_\theta\\ \sigma_z\\ \sigma_{\theta z}\\ \sigma_{rz}\\ \sigma_{r\theta}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0\\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0\\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_r\\ \varepsilon_\theta\\ \varepsilon_z\\ 2\varepsilon_{\theta z}\\ 2\varepsilon_{rz}\\ 2\varepsilon_{r\theta}\end{Bmatrix} \qquad (۱۹$$

[1] Orthotropic
[2] Transversely Isotropic
[3] Isotropic

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.2.62.3.7]

$$C_{44} = \frac{C_{11} - C_{12}}{2}$$

همچنین می‌توان روابط تنش و کرنش را بر اساس رابطه ۱۴ بیان کرد:

$$\varepsilon_i = S_{ij}\sigma_j \qquad (۲۰$$

ماتریس نرمی S_{ij} را هم می‌توان مانند ماتریس سختی مطابق روابط ۲۱ تا ۲۵ دسته‌بندی کرد [۶، ۲۱-۱۸].
رابطه ۲۱ حالت غیر ایزوتروپیک (بدون صفحه تقارن و ۲۱ ضریب مستقل) را نشان می‌دهد: [۶، ۲۱-۱۸]

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \\ 2\varepsilon_{\theta z} \\ 2\varepsilon_{rz} \\ 2\varepsilon_{r\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & S_{45} & S_{55} & S_{56} \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & S_{45} & S_{56} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \sigma_{\theta z} \\ \sigma_{rz} \\ \sigma_{r\theta} \end{Bmatrix} \qquad (۲۱$$

رابطه ۲۲ حالت مونوکلینیک (یک صفحه تقارن و ۱۳ ضریب مستقل) را نشان می‌دهد: [۶، ۲۱-۱۸]

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \\ 2\varepsilon_{\theta z} \\ 2\varepsilon_{rz} \\ 2\varepsilon_{r\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & S_{36} \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & S_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{45} & S_{55} & 0 \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \sigma_{\theta z} \\ \sigma_{rz} \\ \sigma_{r\theta} \end{Bmatrix} \qquad (۲۲$$

رابطه ۲۳ حالت ارتوتروپیک (دو صفحه تقارن و ۹ ضریب مستقل) را نشان می‌دهد: [۶، ۲۱-۱۸]

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \\ 2\varepsilon_{\theta z} \\ 2\varepsilon_{rz} \\ 2\varepsilon_{r\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \sigma_{\theta z} \\ \sigma_{rz} \\ \sigma_{r\theta} \end{Bmatrix} \qquad (۲۳$$

رابطه ۲۴ حالت ایزوتروپیک عرضی (یک صفحه تقارن چرخشی و ۵ ضریب مستقل) را نشان می‌دهد: [۶، ۲۱-۱۸]

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \\ 2\varepsilon_{\theta z} \\ 2\varepsilon_{rz} \\ 2\varepsilon_{r\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \sigma_{\theta z} \\ \sigma_{rz} \\ \sigma_{r\theta} \end{Bmatrix} \qquad (۲۴$$

$$S_{66} = \frac{S_{11} - S_{12}}{2}$$

رابطه ۲۵ حالت ایزوتروپیک (دو صفحه تقارن چرخشی و ۲ ضریب مستقل) را نشان می‌دهد: [۶، ۲۱-۱۸]

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.2.62.3.7]

$$\begin{Bmatrix}\sigma_r\\ \sigma_\theta\\ \sigma_z\\ \sigma_{\theta z}\\ \sigma_{rz}\\ \sigma_{r\theta}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}S & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0\\ S & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0\\ S & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_r\\ \varepsilon_\theta\\ \varepsilon_z\\ 2\varepsilon_{\theta z}\\ 2\varepsilon_{rz}\\ 2\varepsilon_{r\theta}\end{Bmatrix} \quad (۲۵$$

$$S_{44}=\frac{S_{11}-S_{12}}{2}$$

۹- نتیجه‌گیری

امروزه مفهوم FGM یک ایده بسیار نوین و جدید است که نه تنها برای موادی که تحت سایش و بارگذاری ترمومکانیکی واقع می‌شوند بلکه برای تولید مواد الکترونیکی، مواد زیست سازگار و مقاوم حرارتی به کار گرفته می‌شوند. با توجه به موارد ذکر شده در این مقاله، در زیر به مزایای مواد FGM اشاره شده است:

- کاهش تمرکز تنش در جسم جامد: به کمک مواد FGM می‌توان آثار تمرکز تنش را به نحو چشم‌گیری کاهش داد. در بسیاری از اجسام به دلیل وجود شکل‌های خاصی مانند لبه‌های جسم و نزدیکی سوراخ‌ها و گشودگی‌ها، تمرکز تنش در برخی از نقاط جسم ایجاد می‌شود.
- مقاومت زیاد در برابر بارهای مکانیکی بالا: در مواد FGM، با افزایش استحکام می‌توان از ورود اجسام به ناحیه مومسان و حتی شکست تا حدود زیادی جلوگیری شود.
- مقاومت زیاد در برابر گرادیان دمایی بالا: به کمک مواد FGM می‌توان در نواحی که تنش‌های حرارتی به حالت بحرانی می‌رسند، آنها را کنترل کرد. اینگونه مواد با کاهش تنش حرارتی، آثار منفی آن را به نحو قابل توجهی کاهش می‌دهند.
- مقاومت زیاد در برابر رشد ترک: مواد FGM، با بهترین ترکیب از حیث تغییر خواص ماده ، مانع ایجاد یا رشد ترک می‌شوند.
- مقاومت زیاد در برابر احتمال جدا شدن لایه ترد بر روی مواد نرم: با توجه به این که معمولا پوشش ترد بر روی مواد نرم به صورت لایه‌های جدا انجام می‌شود به کمک مواد FGM، با تغییر پیوسته و تدریجی احتمال جدا شدن لایه ترد را کاهش می‌دهند.

مراجع

[1] Ruys, Andrew and Sun, D, “Functionally graded materials (FGM) and their production methods,” URL: http://www. azom. com/article. Aspx,(2002)
[2] available at Wikipedia on https://en.wikipedia.org/wiki/Functionally_graded_material
[3] Mahamood, Rasheedat M and Akinlabi, Esther T and Shukla, Mukul and Pityana, Sisa “Functionally graded material: an overview,” International Association of Engineers (IAENG), 2012.
[4] R. K. Rajput,. “Manufacturing technology: (manufacturing processes),” Laxmi publications (P) limited, New Delhi, India, (2008).
[5] Kieback, B and Neubrand, A and Riedel, H, “Processing techniques for functionally graded materials,” Materials Science and Engineering,2003.
[6] Sadd, Martin H,“Elasticity: theory, applications, and numerics,” Academic Press,(2009).
[7] E. Ruocco, and V. Minutolo, “Two-dimensional stress analysis of multiregion functionally graded materials using a field boundary lement model,” Composites Part B: Engineering, vol. 43(2), (2012), pp. 663-672.
[8] Uemura, S, “ The activities of FGM on new application,” Materials Science Forum, vol.423,(2003).
[9] M. Niino, T. Hirai and R. Watanabe, “The functionally gradient materials,” J Jap Soc Compos Mat, vol. 13, pp. 257-264.
[10] P. Shanmugavel, G. B. Bhaskar, M. Chandrasekaran, P. S. Mani and S. P. Srinivasan, “An overview of fracture analysis in functionally graded materials,” European Journal of Scientific Research, vol. 68 No. 3 (2012), pp.412-439.
[11] V. E. Beal, P. Erasenhiran, C. H. Ahrens, and P. Dickens, “Evaluating the Use of Functionally Graded Materials Inserts Produced by Selective Laser Melting on the Injection Moulding of Plastic Parts,” Proceedings of ImechE Part B Journal of Engineering Manufacture, vol. 221(6), pp. 945–954.
[12] T. R. Jackson, H. Liu, N. M. Patrikalakis, U. E. M. Sachs, and M. J. Cima “Modeling and designing functionally graded material components for fabrication with local composition control,” Materials and

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.2.62.3.7]

Design, vol.20, (1999), pp.63-75.
[13] H. Chung and S. Das, “Functionally graded Nylon-11/silica nanocomposites Produced by Selective Laser Sintering,” Materials Science and Engineering A, vol. 487(1–2), (2008), 251–257.
[14] V. Birman and L.W. Byrd “Modeling and analysis of Functionally graded materials and structures,” Appl Mech Rev, vol. 60(1–6), (2007), pp.195–216.
[15] X. Y. Koua, G. T. Pars, and S. T. Tana, “Computer-Aided Optimal design of functionally graded materials using a procedural model and particle swarm optimization,” Design, vol. 44, (2012), pp. 300–310.
[16] M. Erdal S. Dag, Y. Jande and C. M. Tien, “Manufacturing of Functionally Graded Porous Product Produced by Selective Laser Sintering,” Material Science Forum, vol. 631-632, (2009), pp. 253258.
[17] M. M. Gasik, “Functionally graded materials: bulk processing techniques,” International Journal of Materials and Product Technology, vol. 39, (1-2), (2010), pp. 20 – 29.
[18] Reddy, Junuthula Narasimha. An introduction to continuum mechanics. Cambridge university press, 2007.
[19] Cowin, Stephen C., and Morteza M. Mehrabadi. "Anisotropic symmetries of linear elasticity." (1995): 247-285.
[20] Gal, Doron, and Jack Dvorkin. "Stresses in anisotropic cylinders." rn 2 (1995): a2n.
[21] Cowin, Stephen C. "The relationship between the elasticity tensor and the fabric tensor." Mechanics of materials 4.2 (1985): 137-147.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1399.2.62.3.7]