مواد گرادیانی (FGM): روش‌های ساخت و کاربردها

ناصر بیات، محمد مسعود محبی، شیوا رودشتی

گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)



مهندس ناصر بیات، نویسنده مسئول این مقاله، دانشجوی فوق‌لیسانس سرامیک دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

naserbayatt@gmail.com

چکیده: مواد گرادیانی یا Functionally Graded Materials (FGM) به موادی گفته می‌شود که ساختار و خواص آن‌ها به‌طور تدریجی در نقاط مختلف قطعه تغییر می‌کند. این نوع طراحی منجر به ایجاد ساختاری متناسب با عملکرد و شرایط کاری هر بخش از قطعه می‌شود. پوشش‌های سد حرارتی، مواد دندانی، ابزارهای سایشی وبرشی و سلول‌های سوختی از کاربردهای FGM است که توسعه یافته است. در این مقاله ابتدا مواد FGM معرفی شده‌اند. سپس روش‌های ساخت آن بررسی شده و در پایان برخی از کاربردهای آن ذکر شده است.

کلمات کلیدی: FGM، مواد گرادیانی، مواد با ساختار تدریجی، مواد چندسازه.

۱- مقدمه

FGM ها موادی هستند که دارای تغییری تدریجی در ترکیب یا ساختار بوده که در یک یا چند جهت از قطعه رخ می‌دهد و منجر به تغییر خواص در آن جهات می‌شود[۱]. این مواد معمولاً وقتی به کار می‌روند که قطعه‌ای همزمان نیاز به ویژگی‌های متفاوت داشته باشد یا اینکه بخواهیم دو ماده با خواص متفاوت را به هم اتصال دهیم. مثلاً سایندهها که همزمان نیاز به سختی و انعطاف‌پذیری بالا دارند تا هم بتوانند کار سایش را انجام دهند و هم در برابر تنش‌های واردشده دچار شکست نشوند. مثال دیگر پوشش‌های سد حرارتی[1] هستند که باید یک پوشش سرامیکی روی زیر لایه‌ای فلزی قرار بگیرد و بنابراین نیازمند یک‌لایه میانی بین این دولایه است که خواصی مرکب از خواص دو لایه دیگر داشته باشد.

یک‌راه برای فراهم آوردن این ویژگی‌ها استفاده از مواد چندسازه[2] است. مواد چندسازه دسته‌ای از مواد پیشرفته هستند که از ترکیب دو یا چند ماده تشکیل‌شده‌اند و خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها ترکیبی مطلوب از مواد اولیه است. درواقع بخشی از خواص موردنظر را یکی از مواد و بخش دیگر را ماده دوم تأمین می‌کند. اما استفاده از این مواد محدودیت‌های خاصی دارند. به علت اینکه هر دو فاز در تمام قطعه به یک نسبت پراکنده‌شده‌اند، نمی‌توان درجایی که نیاز به خواص بیشتری از یکی از دو ماده باشد، آن خاصیت را تأمین کرد. برای مثال در مورد سایندهها، مطلوب‌تر آن است که در سطح مواد با سختی بالاتر و در بدنه موادی با انعطاف‌پذیری بیشتر به‌کاربرده شود. یا در مورد لایه میانی پوشش سرامیکی و زیر لایه فلزی، بهتر است ماده چندسازه به‌کاربرده شده در نزدیکی لایه فلزی، فلز بیشتر و در نزدیکی لایه سرامیکی، سرامیک بیشتری داشته باشد تا براثر اختلاف ضریب انبساط حرارتی پدیده لایه‌ای شدن رخ ندهد. لذا در این‌چنین مواردی از FGM ها که نسل جدیدتری از مواد مرکب هستند استفاده می‌شود[۲-۵]

نمونه‌ای از ساختار FGM در به شکل طرحواره شکل ۱ نشان داده‌شده است. در این شکل یک اتصال فلز- سرامیک دیده می‌شود که در آن تغییر فاز به شکل تدریجی انجام‌شده است. ابتدا ناخالصی‌هایی از هر فاز در زمینه‌ای از فاز دیگر وارد می‌شود. بعدازآن شاهد یک ناحیه انتقالی هستیم که تقریباً هر دو فاز میزانی برابر دارند و اتصال در همین ناحیه رخ می‌دهد. [۶]

[1] Thermal barrier coating
[2] Composites

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.4.8]



شکل ۱- طرحواره‌ای از ساختار یک نمونه FGM [۲]

استفاده از مواد با ساختار FGM دارای مزایایی است که عبارتند از:

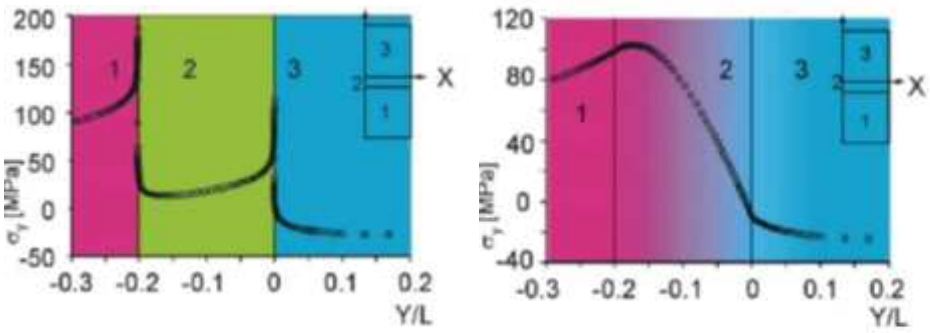
۱- کاهش نیرومحرکه رشد ترک

۲- افزایش استحکام اتصالات

۳- کنترل خواص به شکل موضعی

۴- جلوگیری از افزایش ناگهانی تنش در فصل مشترک: برای درک بهتر این موضوع دو ساختار را در نظر می‌گیریم. اول وقتی‌که دو فاز متفاوت با یک‌لایه میانی همگن به هم متصل باشند، و دیگری وقتی ترکیب لایه میانی به آرامی از یکی از فازها به دیگری تغییر می‌کند. توزیع تنش این دو حالت در دیده می‌شود. ملاحظه می‌شود که تنش محاسبه‌شده در دو فصل مشترک لایه میانی همگن با لایه‌های دیگر تجمع تنش رخداده است (شکل ۲-الف) درحالی‌که در مورد ساختار با لایه میانی FGM شده این تجمع تنش رخ نداده و حداکثر مقدار تنش به‌مراتب کمتر است. (شکل ۲- ب) که این به معنی عمر طولانی‌تر قطعه هست[۷].

۵- کاهش تنش حرارتی در نقطه اتصال [۴, ۸].



شکل ۲- توزیع تنش در دو ساختار چندلایه: بالا فاز میانی همگن و متفاوت از دو فاز دیگر؛ پایین فاز میانی FGM از دو فاز دیگر [۷]

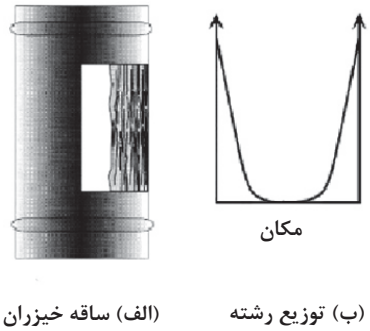
۲- تاریخچه توسعه

با اینکه در انتهای قرن بیستم تلاش علمی برای توسعه مواد FGM آغاز شد، اما این مواد کاملاً جدید محسوب نمی‌شوند. درواقع تغییر ریزساختار مواد در اندام زنده وجود داشته است. در خیزران[1] و جو و بسیاری از گیاهان دیگر ریزساختارهایی به شکل گرادیانی شکل‌گرفته است تا ساختاری با عملکرد بهینه و با حداقل استفاده از ماده به وجود آید. مثلاً ساقه خیزران متشکل از

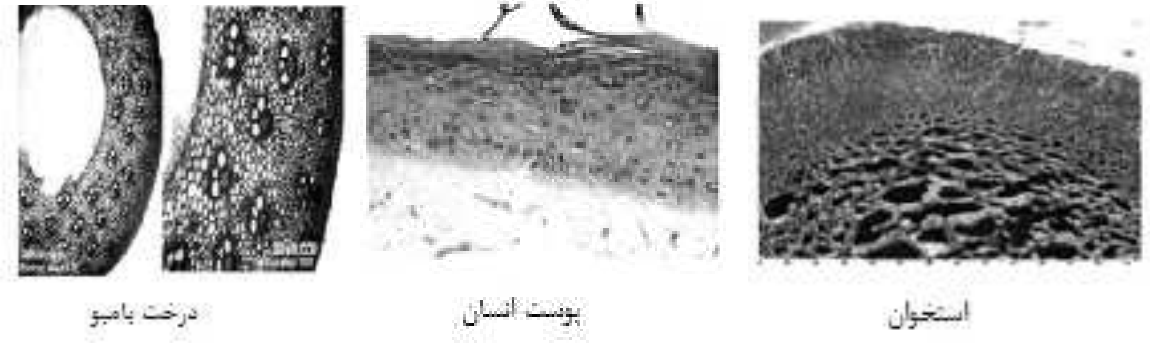
[1] Culm of bamboo

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.4.8]

رشته‌های طبیعی با استحکام بالاست که در زمینه‌ای از سلول‌های عادی قرار گرفته شده است. همان‌طور کـه در شـکل ۳ دیـده می‌شود رشته‌ها در مقطعه عرضی ساقه خیزران به شکل یکنواخت توزیع نشده است و به سـمت درون میـزان رشـته‌هـا کـاهش می‌یابد [۹]. صدف حلزون و بسیاری از بافت‌های بدن انسان مانند استخوان‌ها، دندان‌ها، رگ‌ها و پوست بدن هم ساختار تدریجی دارند[۱۰]. استخوان‌ها هم ساختار گرادیانی دارند [۱۱]. حتی پوست انسان هم دارای سـاختار تـدریجی اسـت [۳]. نمونـه‌هـایی از ساختارهای گرادیانی طبیعی در شکل ۴ دیده می‌شود.



شکل ۳- برش افقی از یک ساقه خیزران و توزیع رشته در آن [۹]



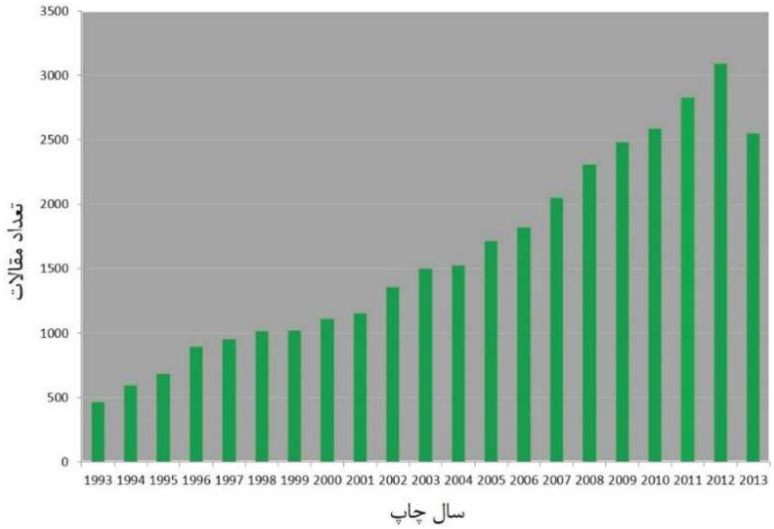
شکل ۴- نمونه‌هایی از ساختار گردایانی در طبیعت [۳]

مثال‌هایی هم برای ساختار FGM در مواد ساخت بشر دیده می‌شود. معروف‌ترین آن‌ها فولاد کـربن‌دهـی شـده اسـت کـه بـرای ساخت شمشیر از آن استفاده می‌شده است.می‌توان با عملیات کربن‌دهی سطحی سختی سطح فولاد را که در معرض سایش قرار دارد، افزایش داد و درعین‌حال انعطاف‌پذیری بدنه فولاد را نیز حفظ کرد [۱۲-۱۴].

در سال ۱۹۷۲ بور و داوز [۱۵] و شن و بور [۱۶] نشان دادند استفاده از مواد چندسازه با ساختار FGM بـه لحـاظ نظـری سـودمند است، اما شاید به علت محدودیت‌های فنّاورانه تا ۱۵ سال کار آن‌ها در جامعه علمی اثر چندانی نداشت. اولین تحقیقات گسترده و هدفمند در ژاپن برای تولید مواد با ساختار FGM و در یک برنامه تحقیقاتی ملی آغاز شد [۱۷]. از سال ۱۹۸۴ دانشمندان ژاپنی به دنبال ماده‌ای می‌گشتند که بتواند در مقابل شار گرمایی بالایی که در اثر بازگشت فضاپیماها به جو ایجاد می‌شـود مقاومـت کنـد. این تحقیقات که منجر به توسعه مواد FGM گردید[۱۸].

از آن زمان تاکنون تحقیقات زیادی درزمینه مواد FGM صورت پذیرفته است و این مواد کاربردهـای زیـادی پیـداکرده‌انـد. رونـد مقالات منتشرشده در زمینه FGM در بیست سال اخیر در شکل ۵ نشان از رشد مداوم علاقه محققان به ایـن موضـوع اسـت. در ایران هم از سال ۲۰۰۲ روند جدی تحقیقات روی این مواد آغازشده و به‌سرعت رشد یافته است، به‌گونه‌ای که مطـابق جـدول ۱ هم‌اکنون ایران از نظر تعداد مقاله رتبه ۱۲ را در چاپ مقالات ISI مرتبط با مواد گرادیانی دارد. از نظر کیفی هـم مقـالات ایرانـی مرتبط با FGM رشد قابل‌توجهی داشته‌اند. این را می‌توان از افزایش ارجـاع بـه مقـالات ایرانـی دریافـت کـه در شـکل ۶ نـشان داده‌شده است. با این وجود هنوز با کشورهای پیشرو فاصله‌ی محسوسی وجود دارد. متوسط ارجاع به هر مقاله آمریکـایی مـرتبط با FGM برابر ۲۳/۹۸ و آلمانی ۱۶/۵۰ است، درحالی‌که این مقدار برای مقالات ایرانی ۵/۶۹ می‌باشد.

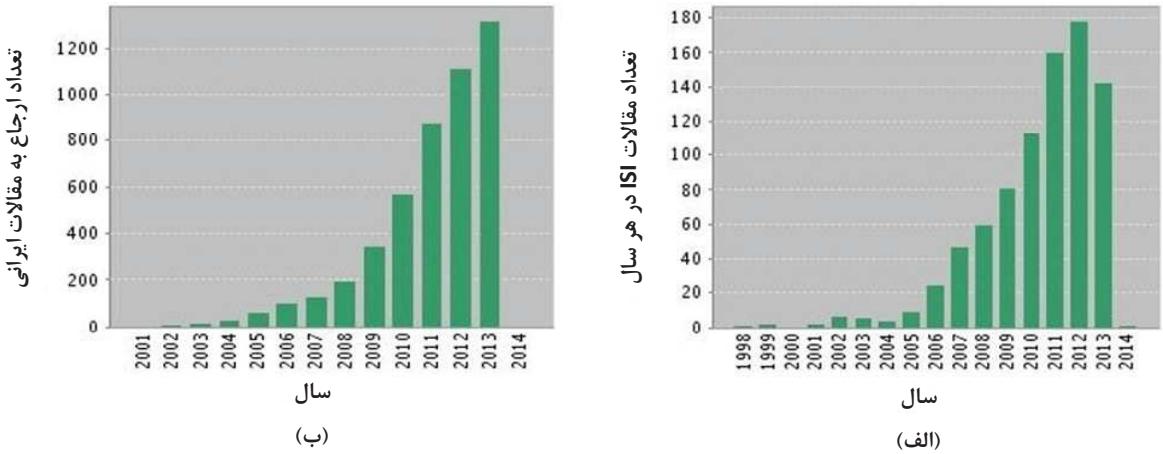
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.4.8]



شکل ۵- مقالات ISI چاپ‌شده در ۲۰ سال اخیر با موضوع مواد FGM [۱۹]

جدول ۱- رده‌بندی کشورهای جهان برای تولید مقالات ISI در مورد FGM [۱۹]

ردیف	نام کشور	تعداد مقالات ISI	درصد	ردیف	نام کشور	تعداد مقالات	درصد
۱	آمریکا	۸۷۹۳	۲۹/۰۴	۹	کانادا	۱۳۴۲	۳/۹۸
۲	آلمان	۳۱۵۷	۹/۳۷	۱۰	ترکیه	۱۰۸۹	۳/۲۳
۳	چین	۲۶۲۲	۷/۷۸	۱۱	کره جنوبی	۱۰۵۳	۳/۱۳
۴	ژاپن	۲۲۲۵	۶/۶۱	**۱۲**	**ایران**	**۸۵۳**	**۲/۲۵**
۵	انگلیس	۱۷۹۲	۵/۳۲	۱۳	اسپانیا	۸۳۹	۲/۴۹
۶	فرانسه	۱۴۷۴	۴/۳۸	۱۴	سوئد	۸۱۷	۲/۴۳
۷	ایتالیا	۱۴۴۷	۴/۳۰	۱۵	استرالیا	۷۷۴	۲/۳۰
۸	هند	۱۳۷۶	۴/۰۹				



شکل ۶- روند تحقیقات FGM در ایران الف) تعداد مقالات ISI در هر سال؛ ب) تعداد ارجاع به مقالات ایرانی [۱۹]

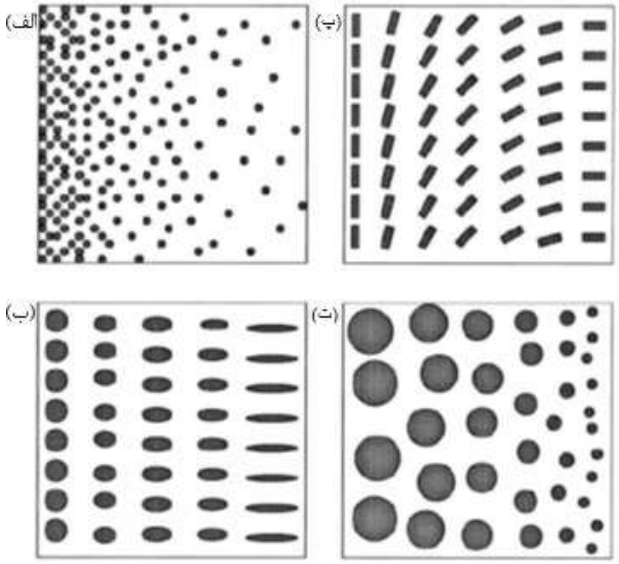
۳- انواع ساختار FGM

ساختارهای FGM را می‌توان از جهات گوناگون دسته‌بندی کرد که در اینجا به چند مورد مهم اشاره می‌شود:

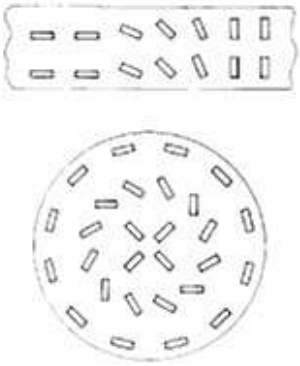
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.4.8]

۳-۱- نوع تدریجی شدن

در این تقسیم‌بندی که برای مواد چندسازه کاربرد دارد، بر اساس اینکه فاز پخش‌شده[1] چگونه در فاز زمینه توزیع‌شده است، انواع مختلفی از FGM خواهیم داشت که در شکل ۷ و شکل ۸ نشان داده‌شده است.



شکل ۷- انواع مواد چندسازه FGM با تدریجی شدن فاز پخش‌شده در:
الف) مقدار ب) شکل پ) جهت ت) اندازه[۹]



شکل ۸- گرادیان در جهت‌گیری فاز دوم
الف) در صفحه ب) در استوانه [۱۵]

ملاحظه می‌شود که با تغییر در مقدار، شکل، جهت‌گیری و اندازه فاز پخش‌شده در فاز زمینه می‌توان انواع مختلفی از FGM داشت. در همه این انواع ویژگی در نقاط مختلف ماده بسته نوع ریزساختار متفاوت خواهد بود. مثلاً در مورد تغییر در مقدار (شکل۷- الف) می‌توان این تغییر را با یک تابع انتقال[2] f(x,y,z) بیان کرد؛ که در f درصد حجمی یکی از فازها برحسب موقعیت است. در عمل اغلب این تغییر به یک‌جهت، مثلاً Z، محدودشده و تابع انتقال این‌چنین خواهد بود:

$$f(z)=\left[\frac{z}{d}\right]^{p} \qquad (۱$$

که f درصد حجمی یکی از فازها، d ضخامت ناحیه گرادیان شده، و p اصطلاحاً توان گرادیان شدن[3] هستند.[۹]

۳-۲- اندازه ناحیه گرادیان شده

در این تقسیم‌بندی ۳ دسته اصلی از FGM قرار دارند: لایه‌نازک FGM[4]، فصل مشترک‌های FGM[5]، بدنه‌های FGM[6].
لایه‌های نازک FGM پوشش‌هایی باضخامت ۱ تا ۱۰۰ میکرومتر هستند که به‌عنوان راه‌حلی مناسب برای مشکل عدم تطبیق خواص پوشش با زیر لایه مطرح است. FGM های فصل مشترک با ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میکرومتر ضخامت برای اتصال دو ماده متفاوت استفاده می‌شوند. این نوع FGM به شکل تجاری هم مورد استفاده زیادی داشته و فنّاوری ایجاد آن‌ها رشد یافته است. در FGM های بدنه اما ناحیه بزرگ‌تری گرادیان شده است (۱ تا ۱۰ سانتی‌متر) و حجم نسبتاً زیادی از هر دو ماده مورداستفاده قرار گرفته است.[۲۰]

۳-۳- پیوسته- پله‌ای

مطابق این دسته‌بندی دو نوع FGM داریم: ساختار FGM پیوسته[1]، ساختار FGM پله‌ای[2]

[1] Dispersed phase
[2] Transition function
[3] Gradation exponent
[4] FGM films
[5] Interface-FGMs
[6] Bulk-FGMs

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.4.8]

این دو ساختار در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. در ساختار پیوسته شکل ۹- الف) تغییر آرامی در ریزساختار داریم درحالی‌که در ساختار پله‌ای شکل ۹- ب) تغییرات ناگهانی در ساختار و ترکیب شیمیایی رخ می‌دهد که به ایجاد ساختاری چندلایه همراه با وجود فصل مشترک در بین لایه‌ها می‌شود. اغلب به علت نبودن روش مناسب برای ایجاد ساختار پیوسته از این ساختار استفاده می‌شود. [۲۱, ۲۲]



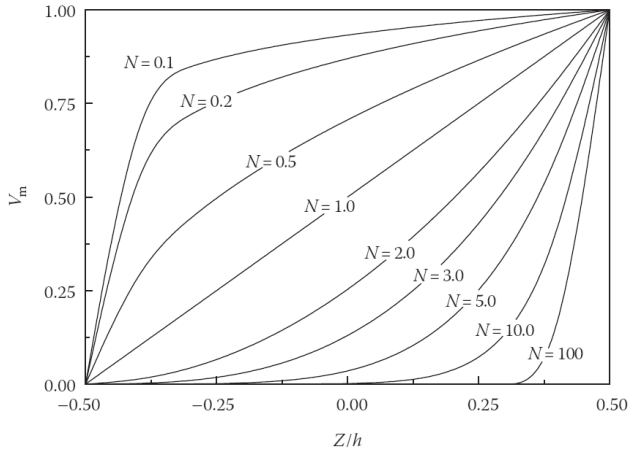
شکل ۹- طرحواره دو ساختار FGM: سمت چپ ساختار پیوسته، سمت راست پله‌ای [۱]

۴- ملاحظات طراحی

برای درک بهتر ارتباط موقعیت در قطعه با خواص یک ساختار FGM پیوسته سرامیک – فلز را در نظر می‌گیریم. می‌توان در جهت Z رابطه زیر را برقرار دانست:

$$V_m = \left(\frac{2Z+h}{2h}\right)^N \qquad (۲$$

که در آن h ضخامت ساختار، Z فاصله از مبدأ و V_m کسر حجمی ماده در آن نقطه است. N توان کسر حجمی است که نوع توزیع را مشخص می‌کند. شکل ۱۰ تغییرات توزیع ترکیب به ازای مقادیر مختلف N را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰-توزیع فلز در ضخامت برای مقادیر مختلف توان کسر حجمی (N) [۲۳]

از طرف دیگر برای مواد چندسازه داریم:

$$P_f = \sum_{j=1} P_j V_{fj} \qquad (۳$$

که در آن P_f ویژگی مؤثر ماده مثل مدول یانگ یا ضریب انبساط حرارتی و غیره هستند و V_{fj} و P_j هم به ترتیب حجم جزیی و ویژگی ماده هستند. لازم به ذکر است که مجموع جزء حجمی مواد باید ۱ باشد، یعنی:

[1] Continuous structure
[2] Stepwise structure

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.4.8]

$$\sum_{j=a} V_{fj} = 1 \qquad (۴$$

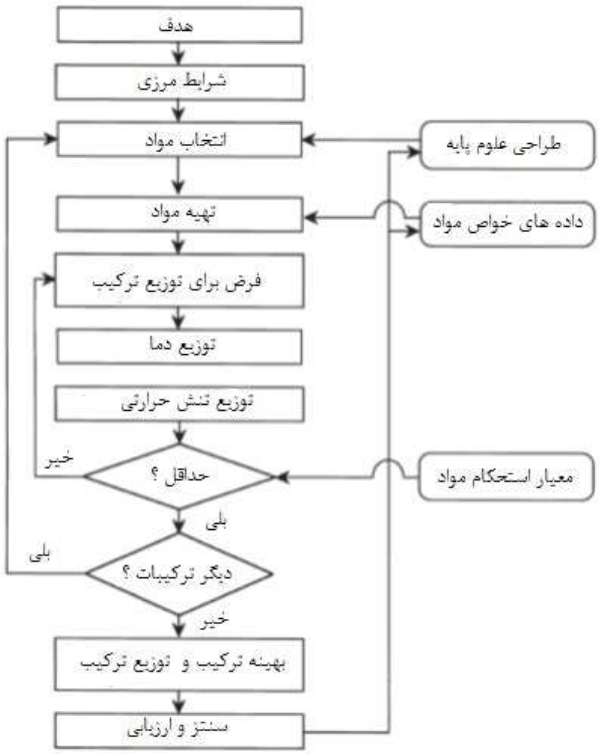
با توجه به اینکه مواد FGM اغلب در دمای بالا استفاده می‌شوند، و ویژگی‌های ماده در دماهای بالا متفاوت است، باید عامل دما را هم در نظر بگیریم؛ بنابراین داریم:

$$P_j = P_0(P_{-1}T^{-1} + 1 + P_1T + P_2T^2 + P_3T^3) \qquad (۵$$

که ضرایب P_0، P_{-1}، P_1، P_2 و P_3 ضرایب دما هستند که برای هر ویژگی متفاوت بوده و مقادیر آن در مراجع موجود است.
با توجه به روابط فوق برای یک FGM دو جزیی فلز سرامیک داریم:

$$P_f(Z,T) = [P_m(T) - P_c(T)]\left(\frac{2Z+h}{2h}\right)^N + P_c(T) \qquad (۶$$

که در آن P_f ویژگی نهایی، $P_m(T)$ ویژگی فلز، و $P_c(T)$ ویژگی سرامیک است. محاسبات فوق نشان می‌دهد که خواص FGM تابعی از دما و مکانی از قطعه است که خواص آن بررسی می‌شود، می‌باشد.[۲۳]
در طراحی یک سیستم FGM دو نکته باید موردتوجه قرار گیرد. یکی اینکه چگونگی تغییر ترکیب چه تأثیری روی خواص نهایی دارد. نکته دوم این است که چگونه به یک طراحی بهینه در راستای هدف مورد نظر برسیم. مثلاً برای کاهش تنش حرارتی روشی به نام «روش طراحی معکوس[1]» توسعه‌یافته است. در این روش ابتدا ساختار هندسی و شرایط مرزی مشخص می‌شوند. سپس مواد انتخاب‌شده و بر اساس خواص آن‌ها یک نمونه اولیه ساخته می‌شود. توزیع دما و تنش گرمایی در آن‌ها اندازه‌گیری شده و با مقایسه با استحکام ماده قضاوت می‌کنیم که آیا به شرایط بهینه رسیده‌ایم یا نه. درصورتی‌که نرسیده باشیم با تغییر نسبت مواد مجدداً عملیات را تکرار می‌کنیم و این کار را ادامه می‌دهیم تا به شرایط بهینه برسیم[۲۴]. فلوچارت این روش در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۱–طرحواره‌ی روش طراحی معکوس برای کاهش تنش حرارتی [۲۴]

[1] Inverse design procedure

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.4.8]

۵- روش‌های ساخت

۵-۱- مقدمه

فرآیند ساخت FGM را به‌طورکلی می‌توان به دو مرحله تقسیم کرد: ساختن ساختار ناهمگن فضایی[۱] (گرادیانی کردن[۲])، انتقال این ساختار به درون یک بدنه[۳] (تثبیت[۴])

گرادیانی کردن خود به فرآیندهای ترکیب کردن[۵]، همگن کردن[۶]، و جداسازی[۷] تقسیم‌بندی می‌شود. فرآیند ترکیب کردن بر مبنای ساخت گام‌به‌گام ساختار گرادیانی از پیش ماده[۸] و یا پودرها قرار دارد. پیشرفت‌های فناوری ماشینی شدن[۹] فرآیند گرادیانی کردن ترکیبی را از نظر اقتصادی و فناوری ممکن ساخته است. در فرآیند همگن‌سازی یک فصل مشترک تند و شدید بین دو ماده با انتقال ماده به فصل مشترکی گرادیانی تبدیل می‌شود. در فرآیند جداسازی یک ماده همگن با انتقال ماده‌ای که در اثر یک میدان خارجی (مانند گرانشی یا میدان الکتریکی) به یک ماده گرادیانی تبدیل می‌شود. فرآیندهای همگن‌سازی و جداسازی می‌توانند ساختارهای گرادیان پیوسته ایجاد کنند، اما در نوع گرادیان‌هایی که می‌توان با آن‌ها ایجاد کرد محدودیت وجود دارد. مرحله تثبیت معمولاً بعد از گرادیانی شدن انجام‌شده و شامل خشک‌کردن و تف جوشی و یا انجماد است[۱۷].

۵-۲-پودر خشک[۱۰]

در این فرآیند ابتدا مقدار مناسب از هر ماده را باهم ترکیب کرده و لایه‌های با ترکیب مختلف روی‌هم قرار داده می‌شوند. حداقل ضخامت هر لایه باید حدود ۰/۲ میلی‌متر باشد[۲۵]. در مرحله بعد پودر ترکیب‌شده به‌وسیله پرس در قالب یا پرس ایزوستاتیک گرم فشرده می‌شود. علاوه بر گرادیان ترکیب، با تنظیم شکل و اندازه پودر، گرادیان تخلخل و اندازه تخلخل هم با روش پودر خشک قابل‌دستیابی است. همچنین با استفاده از فضاپرکن‌ها که در حین تف جوشی از ماده خارج‌شده و تخلخل‌هایی به‌اندازه خود را باقی می‌گذارند می‌توان این گرادیان را ایجاد نمود[۲۶]. با توسعه روش‌های ساخت بی‌قالب که در آن ترکیب و شکل هر دو توسط فایل کامپیوتری کنترل می‌شوند، این روش نیز برای ساخت ساختارهای FGM قابل کاربرد است [۲۷]

۵-۳- ریخته‌گری دوغابی[۱۱] و فیلتراسیون تحت‌فشار[۱۲]

ریخته‌گری دوغابی یک روش شکل‌دهی سنتی بر پایه پودر است و درواقع یک فرآیند فیلتراسیون است که روی دوغابی حاوی ذرات پودر اعمال می‌شود[۲۸]. اگر در این روش ترکیب شیمیایی یا اندازه دانه پودر سوسپانسیون را در حین فرآیند ریخته‌گری تغییر دهیم، یک گرادیان ایجاد می‌شود. با این روش FGM های زیرکونیا/ آلومینا و آلومینا/ آلومینیوم تیتانات ساخته‌شده است.[۲۶]

۵-۴- ریخته‌گری نواری[۱۳]

برای ساختن FGM با استفاده از ریخته‌گری نواری ابتدا نوارهای با ترکیب‌های مختلف آماده می‌شود. سپس قطعات مربعی شکل از هرکدام از نوارهای خام بریده‌شده و روی‌هم چیده می‌شوند. بعد از خشک شدن در دمای اتاق، برای تف جوشی حرارت دیده تا چگالی لازم را پیدا کنند. ضخامت لایه‌های به‌دست‌آمده عموماً در حد ۲۰۰ میکرومتر است. لازم به ذکر است که این روش قادر به تولید قطعات پیچیده هندسی نیست [۲۶].

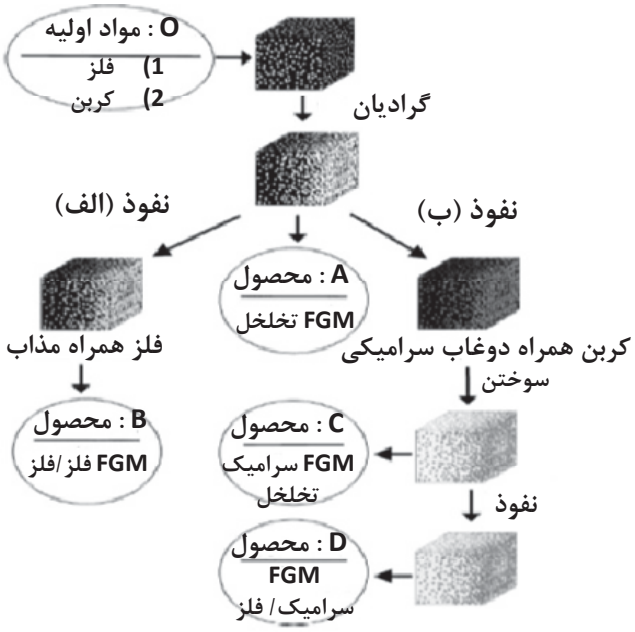
---

[1] Building the spatially inhomogeneous structure
[2] Gradation
[3] Transformation of this structure into abulk material
[4] Consolidation
[5] Constitutive,
[6] Homogenizing
[7] Segregating
[8] Precursor
[9] Automation technology
[10] Dry powder processing
[11] Slip casting
[12] Pressure filtration
[13] Tape casting

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.4.8]

۵-۵- خوراندن[1]

نمونه‌ای از فرآیند ساخت با این روش در شکل ۱۲ دیده می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌شود در این روش ابتدا یک نمونه اولیه ساخته می‌شود. بسته به جنس این ماده می‌توان به FGM های فلز- فلز و فلز سرامیک دست یافت.[۱۸]



شکل ۱۲- طرحواره‌ی فرآیند خوراندن الکتروشیمیایی الفFGM) فلز/ فلز بFGM) فلز/ سرامیک[۱۸]

۵-۶-سنتز دما بالای خود پیش‌رونده[2]

برای ساختن FGM به روش SHS تحقیقات متعددی انجام‌شده است[۲۹-۳۲] یکی از مهم‌ترین این تحقیق‌ها را فنگ[3] و مور[4] انجام دادند.[۳۳, ۳۴] در این روش با تغییر نسبت های استوکیومتری می توان به ترکیبات مختلف و در نتیجه FGM دست یافت.

۵-۷- انباشت الکتروفورتیک[5]

با استفاده از اختلاف بین موبیلیته[6] پودرهای مختلف، سرعت ذرات سرامیکی، اختلاف اندازه ذرات و ویسکوزیته و سایر پارامترهای موثر در انباشت الکتروفورتیک می توان به FGM رسید.

۵-۸- انباشت دوغابی[7]

اگر یک جسم به‌طور متوالی وارد دوغاب‌های با غلظت‌های متفاوت شود، سطوحی با غلظت و ویژگی‌های متفاوت به دست می‌آید. این انباشت می‌تواند با استفاده از روش‌های لایه نشانی چرخشی[8]، پاششی[9] و غوطه‌وری[10] انجام شود[۱۷].

۵-۹-پاشش پلاسما[11]

با اعمال برنامه‌ریزی کامپیوتری، روی این دستگاه پاشش پلاسما می‌توان یک ساختار گرادیانی فلز، فلز - سرامیک، سرامیک تولید کرد [۳۷-۴۰]. از مهم ترین محصولاتی که به این روش FGM شده‌اند می‌توان به پوشش‌های سد حرارتی اشاره کرد[۴۱].

[1] Infiltration
[2] Self-propagating high-temperature synthesis technology
[3] Feng
[4] Moore
[5] Electrophoretic deposition
[6] Mobility
[7] Slurry deposition
[8] Spin coating
[9] Spray coating
[10] Dip coating
[11] Plasma spraying

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.4.8]

۵-۱۰- ریخته‌گری مرکز گریز[1]

می‌توان با استفاده از روش مرکز گریز و با استفاده از اختلاف چگالی بین دو ماده [۴۲]، اختلاف سرعت ذرات [۴۳] و اختلاف اندازه دانه ذرات مقدار نیروی گریز متفاوتی بر ذرات مختلف اعمال کرد و در نتیجه ساختار گرادیانی ایجاد کرد.

۵-۱۱- روش ساخت بی قالب (SFF)[2]

در این روش با کنترل ترکیبی از مخلوط چند جوهر سرامیکی در چاپگرهای جوهر افشان [۴۴] و یا لایه نشانی ارتعاشی مخلوطی از پودرهای فلزی[۴۵] می‌توان به FGM هایی دست یافت که ترکیب آنها با کامپیوتر قابل کنترل باشد. در این نوع چاپگرها که کنترل ترکیب توسط یک فایل کامپیوتری صورت می‌گیرد، می‌توانند علاوه بر ساخت قطعات FGM برای ایجاد مجموعه نمونه در پژوهش مواد به روش کامبیناتوریال[3] به کار گرفته شوند[۴۶].از مزایای روش SFF می‌توان به این موارد اشاره کرد: سرعت بالای تولید، مصرف انرژی نسبتاً کم، بیش‌ترین بهره‌وری ماده، توانایی تولید شکل‌های پیچیده[۴۷]. به کارگیری SFF برای لایه‌نشانی پودری همراه با کنترل ترکیب می‌تواند به ساخت قطعات FGM بیانجامد[۴۸].

۵-۱۲-رسوب‌دهی شیمیایی از فاز بخار[4] (CVD)

با تغییر مداوم ترکیب گاز ورودی حین پوشش‌دهی یا کنترل شرایط CVD مانند دمای رسوب‌دهی و فشار گاز می‌توان ساختار FGM تولید کرد.[۴۹, ۵۰]

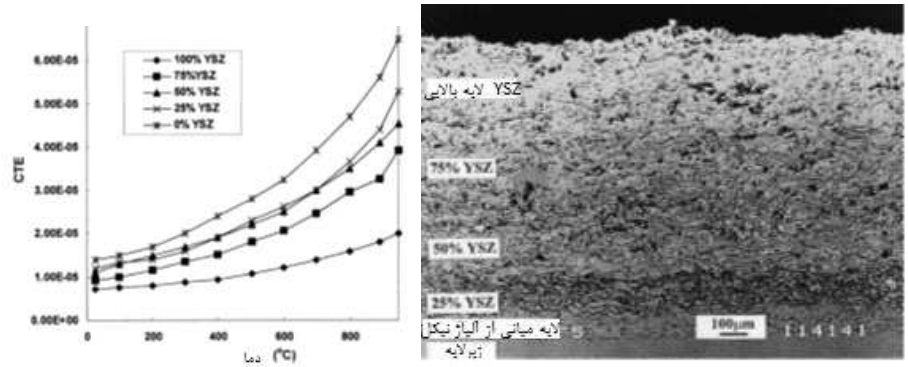
۵-۱۳- رسوب‌دهی فیزیکی از فاز بخار[5] (PVD)

در این روش هم با تغییر ترکیب گازها و سایر شرایط می‌توان به ساختار FGM رسید. همچنین پوشش‌های TBC هم به روش باریکه الکترونی رسوب‌دهی فیزیکی فاز بخار (EB-PVD) با ساختار FGM پوشش داده‌شده‌اند [۴, ۲۴]

۶- کاربردها

۶-۱- پوشش‌های سد حرارتی[6]

پوشش‌های سد حرارتی (TBC) پوشش‌های سرامیکی هستند که روی تیغه‌های توربین‌های گازی اعمال می‌شوند و با افزایش دمای کارکرد، بازده موتور را افزایش می‌دهند [۵۱] اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین پوشش سرامیکی و زیر لایه فلزی منجر به تجمع تنش در مرز بین آن‌ها و درنهایت جدا شدن پوشش از زیر لایه می‌شود. یک‌راه برای کم کردن این اختلاف استفاده از ساختارهای FGM است. در شکل۱۳- الف یک پوشش سد حرارتی پنج لایه با تغییر تدریجی ترکیب نشان داده‌شده است. همان‌طور که در شکل۱۳- ب دیده می‌شود FGM کردن پوشش کاهش اختلاف ضریب انبساط حرارتی میان لایه‌ها را به دنبال داشته است. [۵, ۵۲]

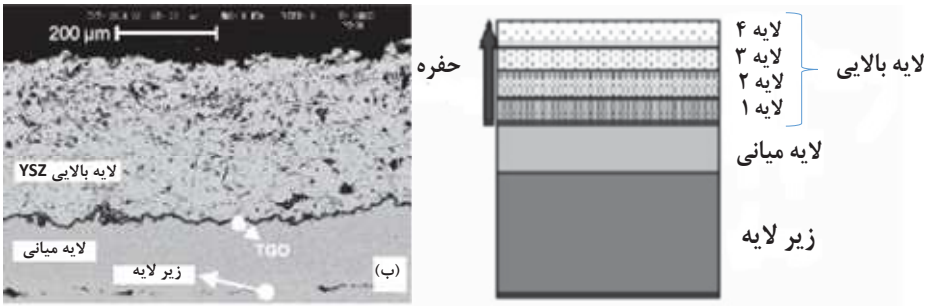


شکل ۱۳- الف) ریزساختار یک ساختار FGM پنج لایه ب) ضریب انبساط حرارتی لایه‌ها [۵۲]

[1] Centrifugalcasting
[2] Solid Freeform Fabrication Method
[3] Combinatorial
[4] Chemical Vapor Deposition
[5] Physical Vapor Deposition
[6] Thermal Barrier Coating

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.4.8]

روش دیگر ایجاد گرادیان در تخلخل موجود در لایه فوقانی است. می‌دانیم که افزایش تخلخل هدایت حرارتی را کاهش می‌دهد. اما اگر مقدار آن از حدی بیشتر شود باعث افت سایر خواص می‌شود. از جمله اینکه هماهنگی خواص بین لایه‌ها از بین می‌رود که خود عامل شکست است. حال اگر تخلخل از زیر لایه به سمت سطح لایه فوقانی افزایش یابد، هم هماهنگی بین لایه‌ها از بین نمی‌رود و هم هدایت حرارتی کاهش‌یافته است. نمونه‌ای از این ساختار در شکل ۱۴ دیده می‌شود[۵۳].



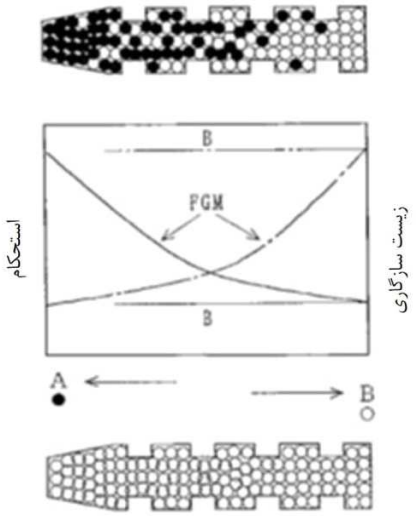
شکل ۱۴- برش عرضی از یک پوشش FGM با گرادیان در تخلخل الف: طرحواره ب: ریزساختار SEM[۵۳]

۶-۲-ابزارهای سایشی و برشی

یکی از موادی که در ساخت ابزارهای برش استفاده می‌شود، ماده چندسازه کاربید تنگستن- کبالت است که در آن سختی با مقدار کبالت رابطه عکس دارد. همچنین در مقادیر یکسان کبالت، با کاهش اندازه دانه سختی افزایش می‌یابد. با کنترل این عوامل می‌توان سختی سطح نسبت به داخل بیشتر کرد که برای یک ابزار برش با سرعت‌بالا مناسب است. [۵۴]

۶-۳- کاربردهای پزشکی

ساختار استخوان‌ها در بدن انسان ساختاری تدریجی است و از نظرگاه مهندسی مواد استخوان یک ماده چندسازه با ساختار موضعی-عملکردی به شمار می‌رود[۵۵]. برای ساخت جایگزین استخوان در بدن از ساختار FGM استفاده می‌شود تا ماده حاصل همزمان خواص مکانیکی و زیست سازگاری[1] مناسبی داشته باشد (شکل ۱۵) به این منظور می‌توان یک‌لایه آپاتیتی که ساختاری مشابه با استخوان دارد را روی زیر لایه‌ای فلزی قرارداد و برای اینکه اتصال بین آن‌ها در فصل مشترک محکم باشد، نسبت به زیر لایه تدریجی خواهد بود. زیر لایه فلزی هم می‌تواند آلیاژی زیست فعال[2] مانند Ti-6Al-4V باشد [۲۴, ۵۶].



شکل ۱۵- طرحواره چگونگی تأثیر FGM کردن روی خواص مکانیکی و زیست سازگاری [۵۸]

[1] Biocompatibility
[2] Bioactive

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.4.8]

در نوع دیگری از ایمپلنت‌های پایه تیتانیوم، در یک‌سو تیتانیوم خالص و در سوی دیگر تیتانیوم حاوی ۲۰ درصد هیدروکسی آپاتیت استفاده‌شده و در میان آن‌ها مقدار هیدروکسی آپاتیت به‌تدریج تغییر می‌کند. در این ایمپلنت تیتانیوم خالص استحکام بالاتر و Ti/20HAP زیست سازگاری بیشتری دارند. از این نوع ایمپلنت برای استخوان‌های فک و دندان‌ها استفاده می‌شود [۵۷،۵۸]. همچنین از FGM های تیتانیوم/ زیرکونیا، Ti/Co، Ti/SiO_2، TiN/HAP به‌عنوان ایمپلنت در کاربردهای پزشکی استفاده‌شده است[۵۹, ۶۰]

۶-۴-سلول‌های سوختی[1]

سلول‌های سوختی ابزارهایی هستند که انرژی شیمیایی را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. یک نوع آن سلول سوختی اکسید جامد[2] (SOFC) است. این سیستم شامل یک کاتد در هوا و یک آند در سمت سوخت است، و این دو با یک الکترولیت اکسیدی از هم جدا می‌شوند[۵۴]. مواد کاتدی نیاز به ویژگی‌های متنوعی دارند: رسانایی الکتریکی و یونی بالا، اکتیویته کاتالیستی بالا برای کاهش اکسیژن[3]، سازگاری شیمیایی با الکترولیت و اتصالات، سازگاری ضریب انبساط حرارتی با سایر اجزای سلول سوختی، پایداری در هوا در دمای بالا، و قابلیت ساخت فیلم نازک با آن. با تدریجی کردن ساختار این پیل‌ها مشکل چسبندگی ضعیف به علت اختلاف ضریب انبساط حرارتی به حداقل می‌رسد و فصل مشترک فعال شیمیایی افزایش‌یافته و افزایش کارایی پیل را به دنبال دارد. [۱]

مراجع

[1] E. Reimanis, "Functionally Graded Materials," in Handbook of Advanced Materials, ed: John Wiley & Sons, Inc., 2004, pp. 465-486.
[2] G. H. Paulino, "Fracture of functionally graded materials," *Engineering Fracture Mechanics,* vol. 69, pp. 1519-1520, 2002.
[3] D. K. Jha, T. Kant, and R. K. Singh, "A critical review of recent research on functionally graded plates," *Composite Structures,* vol. 96, pp. 833-849, 2013.
[4] U. Schulz, M. Peters, F. W. Bach, and G. Tegeder, "Graded coatings for thermal, wear and corrosion barriers," *Materials Science and Engineering: A,* vol. 362, pp. 61-80, 2003.
[5] M. Ferraris, E. Garcia-Lecina, and D. Godlinski, "Optimal ceramic-metal joints with FGM," in *Technology and controlled tailoring of FGM*, R. Astrid, Ed., ed, 2005, pp. 121-127.
[6] S.-h. Chi and Y.-L. Chung, "Cracking in coating–substrate composites with multi-layered and FGM coatings," *Engineering Fracture Mechanics,* vol. 70, pp. 1227-1243, 2003.
[7] W. Lengauer and K. Dreyer, "Functionally gradedhardmetals," *Journal of Alloys and Compounds,* vol. 338, pp. 194-212, 2002.
[8] H. A. Bahr, H. Balke, T. Fett, I. Hofinger, G. Kirchhoff, D. Munz, *et al.*, "Cracks in functionally graded materials," *Materials Science and Engineering: A,* vol. 362, pp.2-16. 2003.
[9] A. Neubrand, "Functionally Graded Materials," in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition)*, K. H. J. B. Editors-in-Chief: , W. C. Robert, C. F. Merton, I. Bernard, J. K. Edward, M. Subhash, *et al.*, Eds., edOxford: Elsevier, 2001, pp. 3407-3413.
[10] K. F. Leong, C. K. Chua, N. Sudarmadji, and W. Y. Yeong, "Engineering functionally graded tissue engineering scaffolds," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials,* vol. 1, pp. 140-152, 4// 2008.
[11] W. Pompe, H. Worch, M. Epple, W. Friess, M. Gelinsky, P. Greil, *et al.*, "Functionally graded materials for biomedical applications," *Materials Science and Engineering: A,* vol. 362, pp. 40-60, 12/5/ 2003.
[12] G. Parrish, *Carburizing: microstructures and properties*: ASM International, 1999.
[13] R. E. Smallman and A. Ngan, *Physical metallurgy and advanced materials*: Butterworth-Heinemann, 2011.
[14] G. E. Totten and M. A. Howes, *Steel heat treatment handbook*: CRC Press, 1997.
[15] M. B. Bever and P. E. Duwez, "Gradients in composite materials," *Materials Science and Engineering,* vol. 10, pp. 1-8, 1972.
[16] M. Shen and M. B. Bever, "Gradients in polymeric materials," *Journal of Materials Science,* vol. 7, pp. 741-7461972.
[17] B. Kieback, A. Neubrand, and H. Riedel, "Processing techniques for functionally graded materials," *Materials Science and Engineering: A,* vol. 362, pp. 81-106, 2003.
[18] R. Jedamzik, A. Neubrand, and J. Rödel, "Functionally graded materials by electrochemical processing and infiltration: application to tungsten/copper composites," *Journal of Materials Science,* vol. 35, pp. 477-486, 2000.

[1] Fuel cells
[2] Solid Oxide Fuel Cell
[3] High catalytic activity for oxygen reduction

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.4.8]

[19] .(۲۰۱۳/۱۰/۱۱)*web of knowledge*. Available: http://thomsonreuters.com/
[20] A. J. Ruys, E. B. Popov, D. Sun, J. J. Russell, and C. C. J. Murray, "Functionally graded electrical/thermal ceramic systems," *Journal of the European Ceramic Society,* vol. 21, pp. 2025-2029, 2001.
[21] Y. Watanabe and H. Sato, *Review Fabrication of Functionally Graded Materials under a Centrifugal Force*, 2011.
[22] M. Mott and J. R. G. Evans, "Zirconia/alumina functionally graded material made by ceramic ink jet printing," *Materials Science and Engineering: A,* vol. 271, pp. 344-352, 1999.
[23] "Modeling of Functionally Graded Materials and Structures," in *Functionally Graded Materials*, ed: CRC Press, 2009.
[24] L. Chen and T. Goto, "Chapter 16 - 16.1 Functionally Graded Materials," in *Handbook of Advanced Ceramics*, ed Oxford: Academic Press, 2003, pp. 445-464.
[25] A. Neubrand and J. Rödel, "Gradient materials: an overview of a novel concept," *Zeitschrift für Metallkunde,* vol. 88, pp. 358-371, 1997.
[26] A. Chrysanthou, O. Delverdier, E. Garcia-Lecina, S. Sereni, J. Roodel, and A. Rota, "Powder technology methods," in *Technology and controlled tailoring of FGM*, R. Astrid, Ed., ed, 2005, pp. 103-110.
[27] M. Mohebi, S. Yang, and J. Evans, "Computer generation of metal components by simultaneous deposition of mould, cores and part," 2006.
[28] M. N. Rahaman, "Powder Consolidation and Forming of Ceramics," in *ceramic processing and sintering*, second ed, pp. 328-424.
[29] Z. A. Munir and J. Holt, "Combustion and plasma synthesis of high temperature materials," DTIC Document1989.
[30] E. Ma, M. A. Nicolet, and M. Nathan, "$NiAl_3$formation in Al/Ni thin;film bilayers with and without contamination," *Journal of Applied Physics,* vol. 65, pp. 2703-2710, 1989.
[31] S. E. Niedzialek, G. C. Stangle, and Y. Kaieda, "Combustion-synthesized functionally gradient refractory materials," *Journal of Materials Research,* vol. 8, pp. 2026-2034, 1993.
[32] X.-H. Zhang, J.-C. Han, X.-D. He, and V. L. Kvanin, "Combustion Synthesis and Thermal Stress Analysis of TiC–Ni Functionally Graded Materials," *Journal of Materials Synthesis and Processing,* vol. 8, pp. 29-34, 2000.
[33] J. J. Moore and H. J. Feng, "Combustion synthesis of advanced materials: Part I. Reaction parameters," *Progress in Materials Science,* vol. 39, pp. 243-273, 1995.
[34] J. J. Moore and H. J. Feng, "Combustion synthesis of advanced materials: Part II. Classification, applications and modelling," *Progress in Materials Science,* vol. 39, pp. 275-316, 1995.
[35] H. J. Feng and J. J. Moore, "The Effect of Pressure on the Combustion Synthesis of a Functionally-Graded Material: TiB2-Al2O3-Al Ceramic- Metal Composite System," *Journal of Materials Engineering and Performance,* vol. 2, pp. 645-650, 1993.
[36] A. R. Boccaccini, V. Cantavella, O. Delverdier, M. Ferraris, E. Garcia-Lecina, and B. Major, "Deposition methods," in *Technology and controlled tailoring of FGM*, R. Astrid, Ed., ed, 2005, pp. 113-120.
[37] Y. W. Gu, K. A. Khor, Y. Q. Fu, and Y. Wang, "Functionally graded ZrO2-NiCrAlY coatings prepared by plasma spraying using pre-mixed, spheroidized powders," *Surface and Coatings Technology,* vol. 96, pp. 305-312, 1997.
[38] S. Stewart, R. Ahmed, and T. Itsukaichi, "Contact fatigue failure evaluation of post-treated WC–NiCrBSi functionally graded thermal spray coatings," *Wear,* vol. 257, pp. 962-983, 11 2004.
[39] Y. P. Wan, S. Sampath, V. Prasad, R. Williamson, and J. R. Fincke, "An advanced model for plasma spraying of functionally graded materials," *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 137, pp. 110-116, 2003.
[40] K. A. Khor, Y. W. Gu, C. H. Quek, and P. Cheang, "Plasma spraying of functionally graded hydroxyapatite/Ti–6Al–4V coatings," *Surface and Coatings Technology,* vol. 168, pp. 195-201, 2003.
[41] Y. J. Su, "Processing and performance of yttrium-stabilized zirconia-based multilayer thermal barrier coatings," Ph.D. 3033564, Northwestern University, United States -- Illinois, 2001.
[42] Y. Fukui and Y. Watanabe, "Analysis of thermal residual stress in a thick-walled ring of duralcan-base Al-SiC functionally graded material," *Metallurgical and Materials Transactions A,* vol. 27, pp. 4145-4151, 1996/12/01 1996.
[43] Y. Watanabe, E. Miura-Fujiwara, and H. Sato, "Fabrication of functionally graded materials by centrifugal slurry-pouring method and centrifugal mixed-powder method," *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy/Funtai Oyobi Fummatsu Yakin,* vol. 57, pp. 321-326, 2010.
[44] M. M. Mohebi and J. R. G. Evans, "A drop-on-demand ink-jet printer for combinatorial libraries and functionallygraded ceramics," *Journal of Combinatorial Chemistry,* vol. 4, pp. 267-274, Jul-Aug 2002.
[45] M. M. Mohebi, S. Yang, and J. R. G. Evans, "Compositional control in solid freeforming; Fabrication of 3D FGM," in *Science of Engineering Ceramics Iii*. vol. 317, 318 T. Ohji, T. Sekino, and K. Niihara, Eds., ed Zurich-Uetikon: Trans Tech Publications Ltd, 2006, pp. 151-154.
[46] M. M. Mohebi and J. R. G. Evans, "Functional Gradients and Combinatorial Libraries Using an Ink-jet Printer," presented at the 104th Annual Meeting & Exposition of The American Ceramic Society, St. Louis, Missouri, USA, 2002.
[47] R. M. Mahamood, E. T. Akinlabi, M. Shukla, and S. Pityana, "Functionally Graded Material: An Overview," 2012.
[48] S. Yang, M. Mohebi, and J. Evans, "A novel solid freeforming method using simultaneous part and mould

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.4.8]

construction," *Rapid Prototyping Journal,* vol. 14, pp. 35-43, 2008.
[49] K. L. Choy, "Chemical vapour deposition of coatings," *Progress in Materials Science,* vol. 48, pp. 57-170, 2003.
[50] T. Hirai and M. Sasaki, "In-situ processing of inorganic composites by chemical vapor deposition," *Ceramics international,* vol. 17, pp. 275-281, 1991.
[51] C. B. Carter and M. G. Norton, "Coatings and Thick Films " in *Ceramic Materials*, ed: Springer New York. pp. 481-493, 2007.
[52] K. A. Khor and Y. W. Gu, "Thermal properties of plasma-sprayed functionally graded thermal barrier coatings," *Thin Solid Films,* vol. 372, pp. 104-113, 2000.
[53] A. Portinha, V. Teixeira, J. Carneiro, J. Martins, M. F. Costa ,R. Vassen, *et al.*, "Characterization of thermal barrier coatings with a gradient in porosity," *Surface and Coatings Technology,* vol. 195, pp. 245-251, 2005.
[54] Y. Miyamoto, W. A. Kaysser, B. H. Rabin, A. Kawasaki , and R. G. Ford, *Functionally Graded Materials: Design, Processing and Applications*. Boston: Kluwer Academic, 1999.
[55] A. J. Salgado, O. P. Coutinho, and R. L. Reis, "Bone Tissue Engineering: State of the Art and Future Trends," *Macromolecular Bioscience,* vol. 4, pp. 743-765, 2004.
[56] W-.Q. Yan, T. Nakamura, M. Kobayashi, H.-M. Kim, F. Miyaji, and T. Kokubo, "Bonding of chemically treated titanium implants to bone," *Journal of Biomedical Materials Research,* vol. 37, pp. 267-275, 1997.
[57] F. Watari, A. Yokoyama, F. Saso, M. Uo, and T. Kawasaki, "Fabrication and properties of functionally graded dental implant," *Composites Part B: Engineering,* vol. 28, pp. 5-11, 1997.
[58] F. Watari, A. Yokoyama, M. Omori, T. Hirai, H. Kondo, M. Uo, *et al.*, "Biocompatibility of materials and development to functionally graded implant for bio-medical application," *Composites Science and Technology,* vol. 64, pp. 893-908, 5 2004.
[59] M. Mehrali, F. S. Shirazi, M. Mehrali, H. S. C. Metselaar, N. A. B. Kadri, and N. A. A. Osman, "Dental implants from functionally graded materials," *Journal of Biomedical Materials Research Part A,* vol. 101, pp. 3046-3057, 2013.
[60] H. Takahashi, "Mechanical properties of functionally gradient materials of titanium-apatite and titanium-zirconia for dental use," J Jpn SocDent Mater Devic, vol. 12, pp. 595-612, 1993.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.4.8]