

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)

چکیده: مواد گرادیانی یا FGM به موادی گفته می‌شود که ساختار و خواص آنها به طور 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 و برشی 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.



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

۱- مقدمه

ماهیت 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 وقیعه 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 سایندها 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^۱ هستند که باید یک پوشش سرامیکی روی زیر لایه‌ای فلزی قرار بگیرد و بنابراین نیازمند یک لایه میانی بین این دو لایه است که خواصی مرکب از خواص دو لایه دیگر داشته باشد.

یکراه برای فراهم آوردن این ویژگی‌ها استفاده از مواد چندسازه^۲ است. مواد چندسازه دسته‌ای از مواد پیشرفته هستند که از ترکیب دو یا چند ماده تشکیل شده‌اند 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 پراکنده شده‌اند، نمی‌توان در جایی که نیاز به خواص بیشتری از یکی از دو ماده باشد، آن خاصیت را تأمین کرد. برای مثال در مورد سایندها، مطلوب‌تر آن است که در سطح مواد با سختی بالاتر و در بدنه موادی با انعطاف‌پذیری بیشتر به کاربرده شود. یا در مورد لایه میانی پوشش سرامیکی و زیر لایه فلزی، بهتر است ماده چندسازه به کاربرده شده در نزدیکی لایه فلزی، فلز بیشتر و در نزدیکی لایه سرامیکی، سرامیک بیشتری داشته باشد تا براثر اختلاف ضربی انبساط حرارتی پدیده لایه‌ای شدن رخ ندهد. لذا در این چنین مواردی از FGM ها که نسل جدیدتری از مواد مرکب هستند استفاده می‌شود^[۵-۶].

نمونه‌ای از ساختار FGM در به شکل طرحواره شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل یک اتصال فلز- سرامیک دیده می‌شود که در آن تغییر فاز به شکل تدریجی انجام شده است. ابتدا ناخالصی‌هایی از هر فاز در زمینه‌ای از فاز دیگر وارد می‌شود. بعد از آن 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

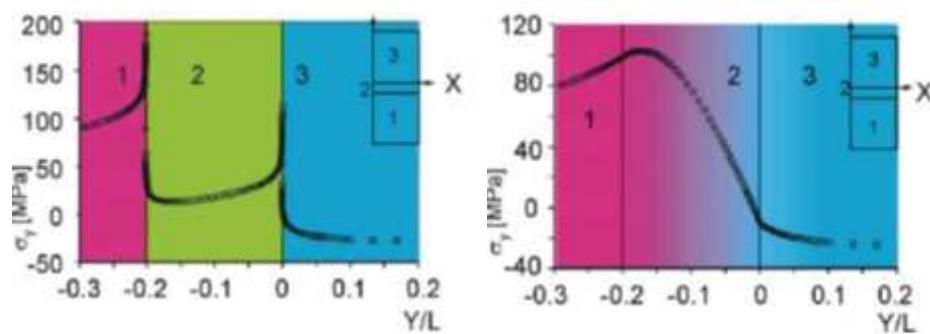
² Composites



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 وقتی که دو فاز متفاوت با یک‌دیه 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 محاسبه شده در دو فصل مشترک لایه میانی همگن با لایه‌های دیگر تجمع تنش رخداده است (شکل ۲-الف) در حالی که در مورد ساختار با لایه میانی FGM شده این تجمع تنش رخ نداده و حداقل مقدار تنش به مراتب کمتر است. (شکل ۲-ب) که این به معنی عمر طولانی‌تر قطعه هست [۷].
- ۵- کاهش تنش حرارتی در نقطه اتصال [۸، ۴].



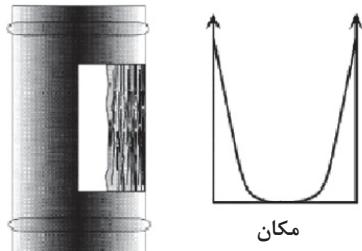
شکل ۲- توزیع تنش در دو ساختار چندلایه: بالا فاز میانی همگن و متفاوت از دو فاز دیگر؛ پایین فاز میانی FGM از دو فاز دیگر [۷]

۲- قاریخچه توسعه

با اینکه در انتهای قرن بیستم تلاش علمی برای توسعه مواد FGM آغاز شد، اما این مواد کاملاً جدید محسوب نمی‌شوند. در واقع تغییر ریزساختار مواد در اندام زنده وجود داشته است. در خیزان^۱ و جو و بسیاری از گیاهان دیگر ریزساختارهایی به شکل گردیانی شکل گرفته است تا ساختاری با عملکرد بهینه و با حداقل استفاده از ماده به وجود آید. مثلاً ساقه خیزان متشکل از

^۱ Culm of bamboo

رشته‌های طبیعی با استحکام بالاست که در زمینه‌ای از سلول‌های عادی قرار گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود رشته‌ها در مقطعه عرضی ساقه خیزان به شکل یکنواخت توزیع نشده است و به سمت درون میزان رشته‌ها کاهش 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 ساختار تدریجی است [۳]. نمونه‌هایی از ساختارهای گرادیانی طبیعی در شکل ۴ دیده می‌شود.



(الف) ساقه خیزان (ب) توزیع رشته

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

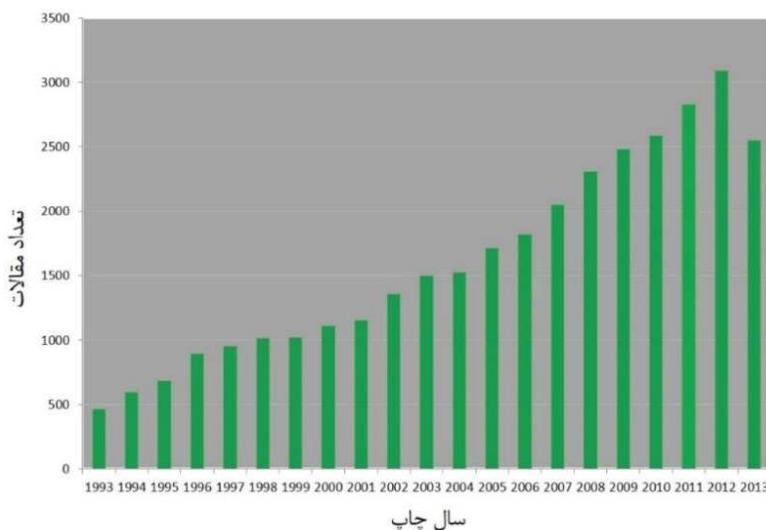


شکل ۴- نمونه‌هایی از ساختار گرادیانی در طبیعت [۳]

مثال‌های هم برای ساختار FGM در مواد ساخت بشر دیده می‌شود. معروف‌ترین آن‌ها فولاد کربن‌دهی شده است که برای 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 در عین حال انعطاف‌پذیری بدن 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 به لحاظ نظری سودمند است، اما شاید به علت محدودیت‌های فناورانه 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 فضای‌پیماها به جو ایجاد می‌شود مقاومت کند. این تحقیقات که منجر به توسعه مواد FGM گردید [۱۸].

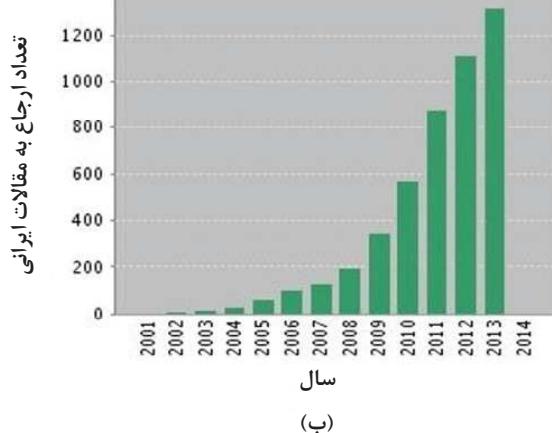
از آن زمان تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه مواد FGM صورت پذیرفته است و این مواد کاربردهای زیادی پیدا کرده‌اند. روند مقالات منتشر شده در زمینه FGM در بیست سال اخیر در شکل ۵ نشان از رشد مداوم علاقه محققان به این موضوع است. در ایران هم از سال ۲۰۰۲ روند جدی تحقیقات روی این مواد آغاز شده و به سرعت رشد یافته است، به گونه‌ای که مطابق جدول ۱ هم‌اکنون ایران از نظر تعداد مقاله رتبه ۱۲ را در چاپ مقالات ISI مرتبط با مواد گرادیانی دارد. از نظر کیفی هم مقالات ایرانی مرتبط با FGM رشد قابل توجهی داشته‌اند. این را می‌توان از افزایش ارجاع به مقالات ایرانی دریافت که در شکل ۶ نشان داده شده است. با این وجود هنوز با کشورهای پیشرو فاصله‌ی محسوسی وجود دارد. متوسط ارجاع به هر مقاله آمریکایی مرتبط با FGM برابر ۲۳/۹۸ و آلمانی ۱۶/۵۰ است، درحالی که این مقدار برای مقالات ایرانی ۵/۶۹ می‌باشد.



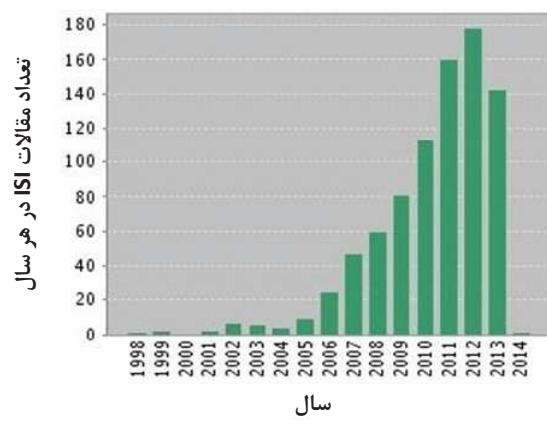
شکل ۵- مقالات ISI چاپ شده در ۲۰ سال اخیر با موضوع مواد FGM [۱۹]

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

ردیف	نام کشور	تعداد مقالات ISI	ردیف	نام کشور	تعداد مقالات ISI	ردیف	درصد	تعداد مقالات	ردیف	نام کشور	تعداد مقالات	ردیف
۱	آمریکا	۸۷۹۳	۲۹/۰۴	کانادا	۱۳۴۲	۳/۹۸	۱۳۴۲	۱۰۸۹	۳/۲۳	ترکیه	۱۰۸۹	۳/۲۳
۲	آلمان	۳۱۵۷	۹/۳۷	کره جنوبی	۱۰۵۳	۳/۱۳	۱۰۵۳	۸۵۲	۲/۲۵	ایران	۸۵۲	۲/۲۵
۳	چین	۲۶۲۲	۷/۷۸	اسپانیا	۸۳۹	۲/۴۹	۸۳۹	۸۱۷	۲/۴۳	سوئد	۸۱۷	۲/۴۳
۴	ژاپن	۲۲۲۵	۶/۶۱	استرالیا	۷۷۴	۲/۳۰	۷۷۴	۷۷۴	۲/۳۰	ایتالیا	۱۴۴۷	۲/۳۰
۵	انگلیس	۱۷۹۲	۵/۳۲								۱۳۷۶	
۶	فرانسه	۱۴۷۴	۴/۳۸									
۷	هند	۱۳۷۶	۴/۰۹									



(ب)



(الف)

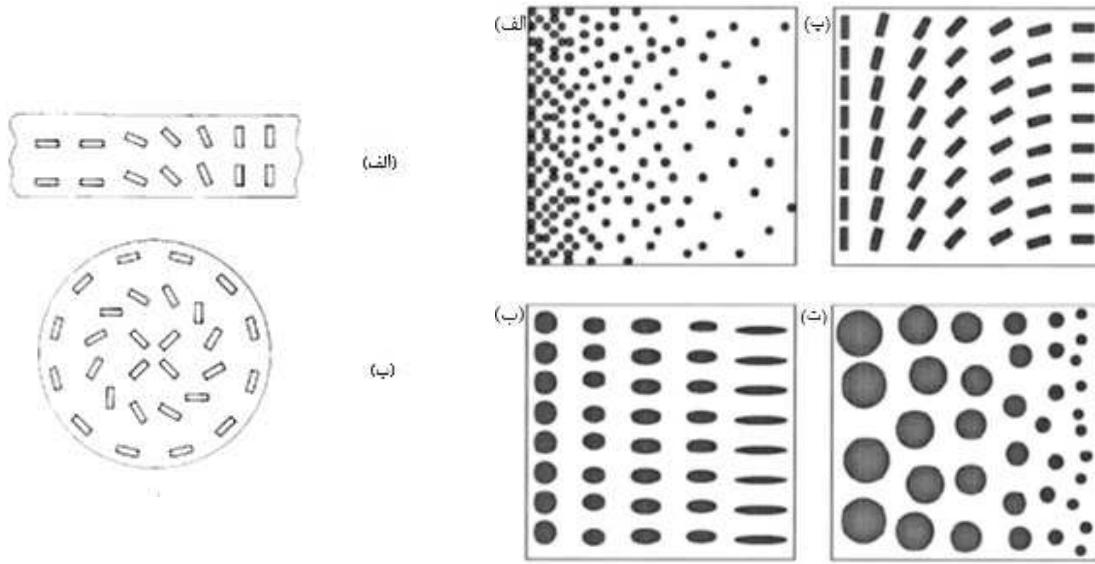
شکل ۶- روند تحقیقات FGM در ایران (الف) تعداد مقالات ISI در هر سال؛ ب) تعداد ارجاع به مقالات ایرانی [۱۹]

۳- انواع ساختار FGM

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

۳-۱-۳- نوع تدریجی شدن

در این تقسیم‌بندی که برای مواد چندسازه کاربرد دارد، بر اساس اینکه فاز پخش شده^۱ چگونه در فاز زمینه توزیع شده است، انواع مختلفی از FGM خواهیم داشت که در شکل ۷ و شکل ۸ نشان داده شده است.



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

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

ملاحظه می‌شود که با تغییر در مقدار، شکل، جهت‌گیری و اندازه فاز پخش شده در فاز زمینه می‌توان انواع مختلفی از FGM داشت. در همه این انواع ویژگی در نقاط مختلف ماده بسته نوع ریزاساختار متفاوت خواهد بود. مثلاً در مورد تغییر در مقدار (شکل ۷-الف) می‌توان این تغییر را با یک تابع انتقال^۲ $f(x,y,z)$ بیان کرد؛ که در f درصد حجمی یکی از فازها بر حسب موقعیت است. در عمل اغلب این تغییر به یک جهت، مثلاً Z محدود شده و تابع انتقال این چنین خواهد بود:

$$f(z) = \left[\frac{z}{d} \right]^p \quad (1)$$

که f درصد حجمی یکی از فازها، d ضخامت ناحیه گرادیان شده، و p اصطلاحاً توان گرادیان شدن^۳ هستند.^[۹]

۳-۲- اندازه ناحیه گرادیان شده

در این تقسیم‌بندی ۳ دسته اصلی از FGM قرار دارند: لایه‌نازک FGM^۴، فصل مشترک‌های FGM^۵، بدن‌های FGM^۶. لایه‌های نازک FGM پوشش‌هایی با ضخامت ۱ تا ۱۰۰ میکرومتر هستند که به عنوان راه حلی مناسب برای مشکل عدم تطبیق خواص پوشش بازیز 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 فناوری ایجاد آن‌ها رشد یافته است. در FGM های بدن اما ناحیه بزرگ‌تری گرادیان شده است (۱ تا ۱۰ سانتی‌متر) و حجم نسبتاً زیادی از هر دو ماده مورد استفاده قرار گرفته است.^[۲۰]

۳-۳- پیوسته - پله‌ای

مطابق این دسته‌بندی دو نوع FGM داریم: ساختار FGM پیوسته^۱، ساختار FGM پله‌ای^۲

¹ Dispersed phase

² Transition function

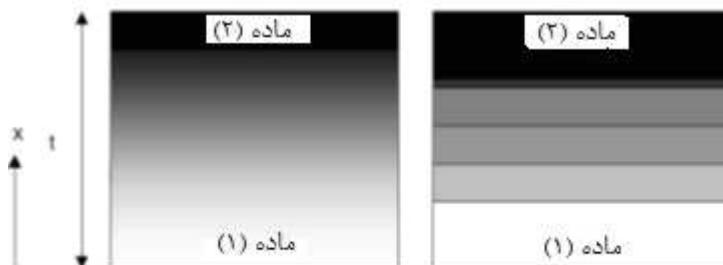
³ Gradation exponent

⁴ FGM films

⁵ Interface-FGMs

⁶ Bulk-FGMs

این دو ساختار در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. در ساختار پیوسته شکل ۹-الف) تغییر آرامی در ریزساختار داریم درحالی که 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]



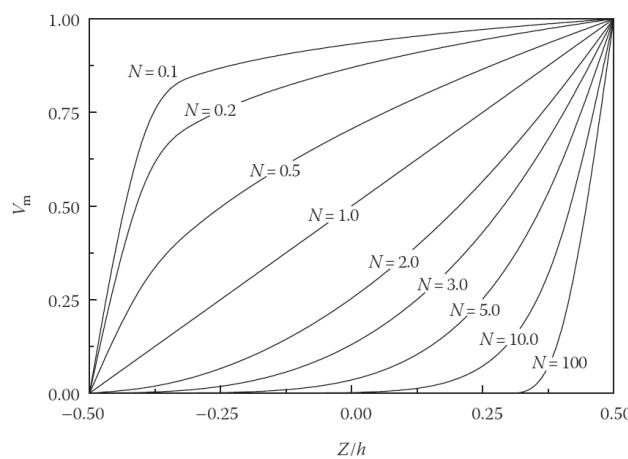
شکل ۹- طرح‌واره دو ساختار FGM: سمت چپ ساختار پیوسته، سمت راست پله‌ای [۱]

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:

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

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:

$$P_f = \sum_{j=1}^l P_j V_{fj} \quad (3)$$

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

$$\sum_{j=a} V_{ij} = 1 \quad (4)$$

با توجه به اينكه مواد FGM اغلب در دماي بالا استفاده می‌شوند، و ويژگی‌های ماده در دماهای بالا متفاوت است، باید عامل دما را هم در نظر بگيريم؛ بنابراین داريم:

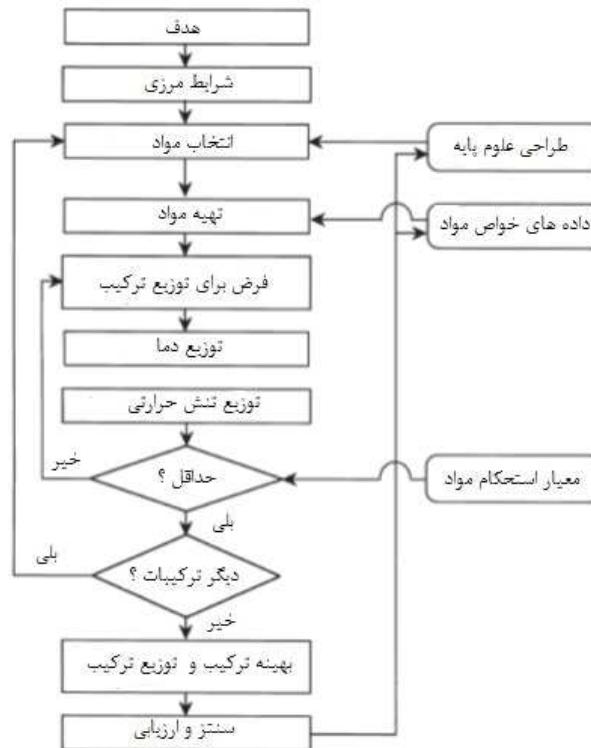
$$P_j = P_0 (P_{-1} T^{-1} + 1 + P_1 T + P_2 T^2 + P_3 T^3) \quad (5)$$

كه ضرايب P_0 ، P_1 ، P_2 ، P_3 و P_{-1} ضرايب دما هستند که برای هر ويژگی متفاوت بوده و مقادير آن در مراجع موجود است.
با توجه به روابط فوق برای يك FGM دو جزبي فلز سراميك داريم:

$$P_f(Z, T) = [P_m(T) - P_c(T)] \left(\frac{2Z + h}{2h} \right)^N + P_c(T) \quad (6)$$

كه در آن P_f ويژگي نهايی، $P_m(T)$ ويژگي فلز، و $P_c(T)$ ويژگي سراميك است. محاسبات فوق نشان می‌دهد که خواص FGM تابعی از دما و مكانی از قطعه است که خواص آن بررسی می‌شود، می‌باشد.^[۲۳]

در طراحی يك سистем FGM دو نکته باید موردنظر قرار گیرد. يك اينكه چگونگي تغيير تركيب چه تأثيری روی خواص نهايی دارد. نکته دوم اين است که چگونه به يك طراحی بهينه در راستاي هدف موردنظر برسيم. مثلاً برای کاهش تنش حرارتی روشی به نام «روش طراحی معکوس»^۱ توسعه یافته است. در اين روش ابتدا ساختار هندسي و شرایط مرزی مشخص می‌شوند. سپس مواد انتخاب شده و بر اساس خواص آنها يك نمونه اوليه ساخته می‌شود. توزيع دما و تنش گرمایي در آنها اندازه‌گيري شده و با مقایسه با استحکام ماده قضاوت می‌کنيم که آيا به شرایط بهينه رسيده‌ایم یا نه. در صورتی که نرسيده باشيم با تغيير نسبت مواد مجدداً عملیات را تكرار می‌کنيم و اين کار را ادامه می‌دهيم تا به شرایط بهينه برسيم.^[۲۴] فلوچارت اين روش در شكل ۱۱ مشاهده می‌شود.



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

^۱ Inverse design procedure

۵- روش‌های ساخت

۱-۵- مقدمه

فرآیند ساخت FGM را به طور کلی می‌توان به دو مرحله تقسیم کرد: ساختن ساختار ناهمگن فضایی^۱ (گرادیانی کردن^۲، انتقال این ساختار به درون یک بدنه^۳ (تبیت^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 الکترومغناطیسی) 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 تبیت معمولاً بعد از گرادیانی شدن انجام شده و شامل خشک کردن و تف جوشی و یا انجماد است[۱۷].

۲-۵- پودر خشک^{۱۰}

در این فرآیند ابتدا مقدار مناسب از هر ماده را با هم ترکیب کرده و لایه‌های با ترکیب مختلف روی هم قرار داده می‌شوند. حداقل ضخامت هر لایه باید حدود ۰/۰ میلی‌متر باشد[۲۵]. در مرحله بعد پودر ترکیب شده به‌وسیله پرس در قالب یا پرس ایزوسستاتیک گرم فشرده می‌شود. علاوه بر گرادیان ترکیب، با تنظیم شکل و اندازه پودر، گرادیان تخلخل و اندازه تخلخل هم با روش پودر خشک قابل دستیابی است. همچنین با استفاده از فاضلاب‌کن‌ها که در حین تف جوشی از ماده خارج شده 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 کامپیوترازی کنترل می‌شوند، این روش نیز برای ساخت ساختارهای FGM قابل کاربرد است[۲۷].

۳-۵- ریخته‌گری دوغابی^{۱۱} و فیلتراسیون تحت فشار^{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 FGM‌های زیرکونیا/آلومینا و آلومینیوم تیتانات ساخته شده است.[۲۶]

۴-۵- ریخته‌گری نواری^{۱۳}

برای ساختن FGM با استفاده از ریخته‌گری نواری ابتدا نوارهای با ترکیب‌های مختلف آماده می‌شود. سپس قطعات مربعی شکل از هر کدام از نوارهای خام بریده شده و روی هم چیده می‌شوند. بعد از خشک شدن در دمای اتاق، برای تف جوشی حرارت دیده تا چگالی لازم را پیدا کنند. ضخامت لایه‌های به دست‌آمده 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 a bulk material

⁴ Consolidation

⁵ Constitutive,

⁶ Homogenizing

⁷ Segregating

⁸ Precursor

⁹ Automation technology

¹⁰ Dry powder processing

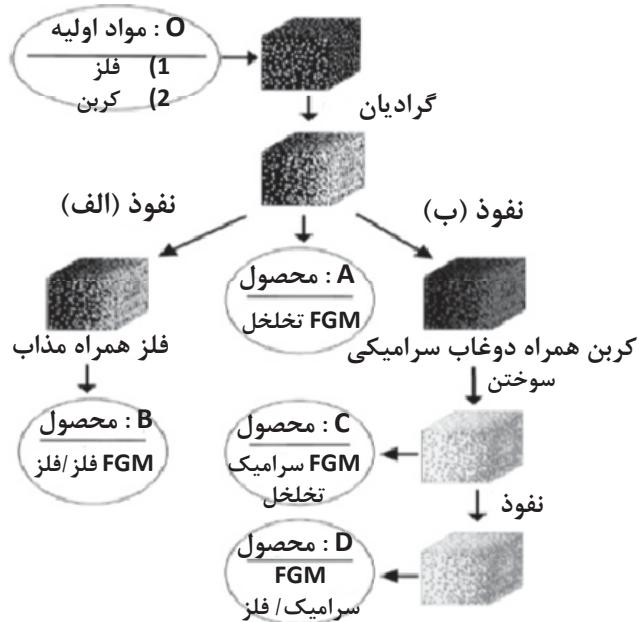
¹¹ Slip casting

¹² Pressure filtration

¹³ Tape casting

۵-۵- خوراندن^۱

نمونه‌ای از فرآيند ساخت با اين روش در شكل ۱۲ دیده می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌شود در اين روش ابتدا يك نمونه اوليه ساخته می‌شود. بسته به جنس اين ماده می‌توان به FGM های فلز- فلز و فلز سراميك دست یافت.[۱۸]



شكل ۱۲- طرحواره‌ی فرآيند خوراندن الکتروشيمياي الف (FGM) فلز / فلز ب (FGM) فلز / سراميك [۱۸]

۶-۵- سنتز دما بالاي خود پيش‌روندۀ^۲

برای ساختن FGM به روش SHS تحقیقات متعددی انجام شده است[۳۲-۲۹] یکی از مهم‌ترین این تحقیق‌ها را فنگ^۳ و مور^۴ انجام دادند.[۳۳، ۳۴] در این روش با تغيير نسبت های استوکيومetri می‌توان به ترکييات مختلف و در نتيجه FGM دست یافت.

۷-۵- انباشت الکتروفورتيک^۵

با استفاده از اختلاف بين موبيليته^۶ پودرهای مختلف، سرعت ذرات سراميكی، اختلاف اندازه ذرات و ويسيکوزيته و ساير پارامترهای موثر در انباشت الکتروفورتيک می‌توان به FGM رسید.

۸-۵- انباشت دوغابی^۷

اگر يك جسم به طور متوالي وارد دوغاب‌های با غلظت‌های متفاوت شود، سطوحی با غلظت و ويژگی‌های متفاوت به دست می‌آید. اين انباشت می‌تواند با استفاده از روش‌های لایه نشاني چرخشی^۸، پاششي^۹ و غوطه‌وری^{۱۰} انجام شود[۱۷].

۹-۵- پاشش پلاسما^{۱۱}

با اعمال برنامه‌ريزي کامپيوتری، روی اين دستگاه پاشش پلاسما می‌توان يك ساختار گراديانی فلز، فلز - سراميك، سراميك توليد کرد [۳۰-۳۷]. از مهم‌ترین محصولاتی که به اين 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

^۱ Centrifugalcasting^۲ Solid Freeform Fabrication Method^۳ Combinatorial^۴ Chemical Vapor Deposition^۵ Physical Vapor Deposition^۶ Thermal Barrier Coating

۵-۱۰-۵- ریخته‌گری مرکز گریز^۱

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

۵-۱۱- روش ساخت بی قالب (SFF)^۲

در این روش با کنترل ترکیبی از مخلوط چند جوهر سرامیکی در چاپگرهای جوهر افشن [۴۴] و یا لایه نشانی ارتعاشی محلولی از پودرهای فلزی [۴۵] می‌توان به FGM هایی دست یافت که ترکیب آنها با کامپیوتر قابل کنترل باشد. در این نوع چاپگرهای کنترل ترکیب توسط یک فایل کامپیوتری صورت می‌گیرد، می‌توانند علاوه بر ساخت قطعات FGM برای ایجاد مجموعه نمونه در پژوهش مواد به روش کامبیناتوریال^۳ 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- رسوبدی شیمیایی از فاز بخار (CVD)^۴

با تعییر مداوم ترکیب گاز ورودی حین پوشش دهی یا کنترل شرایط CVD مانند دمای رسوبدی و فشار گاز می‌توان ساختار FGM تولید کرد [۴۹، ۵۰].

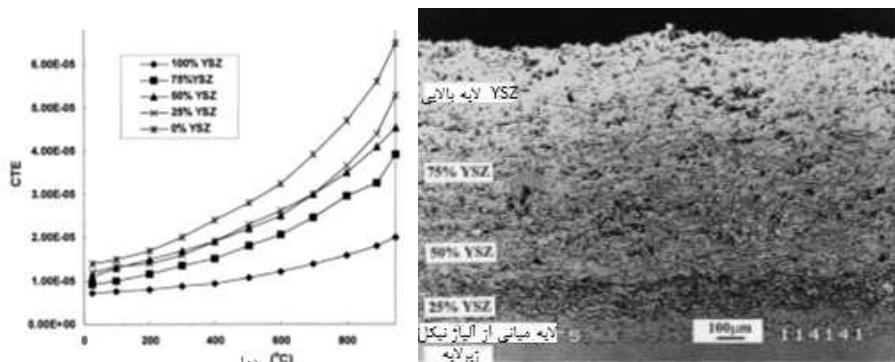
۵-۱۳- رسوبدی فیزیکی از فاز بخار (PVD)^۵

در این روش هم با تعییر ترکیب گازها و سایر شرایط می‌توان به ساختار FGM رسید. همچنین پوشش‌های TBC هم به روش باریکه الکترونی رسوبدی فیزیکی فاز بخار (EB-PVD) با ساختار FGM پوشش داده شده‌اند [۴، ۲۴].

۶- کاربردها

۶-۱- پوشش‌های سد حرارتی^۶

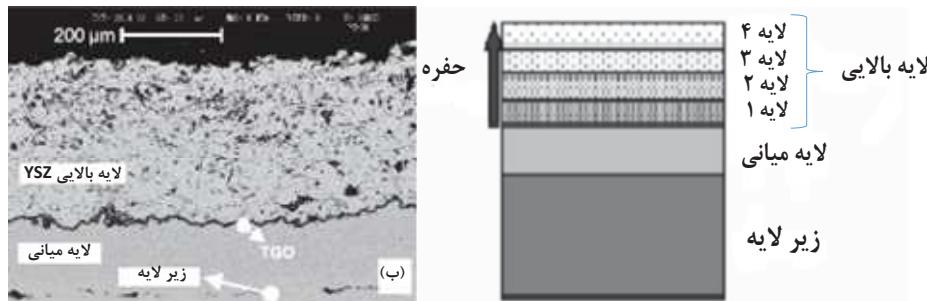
پوشش‌های سد حرارتی (TBC) پوشش‌های سرامیکی هستند که روی تیغه‌های توربین‌های گازی اعمال می‌شوند و با افزایش دمای کارکرد، بازده موتور را افزایش می‌دهند [۵۱] اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین پوشش سرامیکی و زیر لایه فلزی منجر به تجمع تنش در مز بین آنها و درنهایت جدا شدن پوشش از زیر لایه می‌شود. یکراه برای کم کردن این اختلاف استفاده از ساختارهای FGM است. در شکل ۱۳-الف یک پوشش سد حرارتی پنج لایه با تعییر تدریجی ترکیب نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳-ب دیده می‌شود FGM کردن پوشش کاهش اختلاف ضریب انبساط حرارتی میان لایه‌ها را به دنبال داشته است. [۵۲، ۵]



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

^۱ Centrifugalcasting^۲ Solid Freeform Fabrication Method^۳ Combinatorial^۴ Chemical Vapor Deposition^۵ Physical Vapor Deposition^۶ Thermal Barrier Coating

روش ديگر ايجاد گرادييان در تخلخل موجود در لایه فوقاني است. مي‌دانیم که افزایش تخلخل هدایت حرارتی را کاهش می‌دهد. اما اگر مقدار آن از حدی بيشتر شود باعث افت سایر خواص می‌شود. از جمله اينکه هماهنگی خواص بين لایه‌ها از بين می‌رود که خود عامل شکست است. حال اگر تخلخل از زير لایه به سمت سطح لایه فوقاني افزایش يابد، هم هماهنگی بين لایه‌ها از بين نمي‌رود و هم هدایت حرارتی کاهش يافته است. نمونه‌ای از اين ساختار در شکل ۱۴ دیده مي‌شود.^[۵۳]



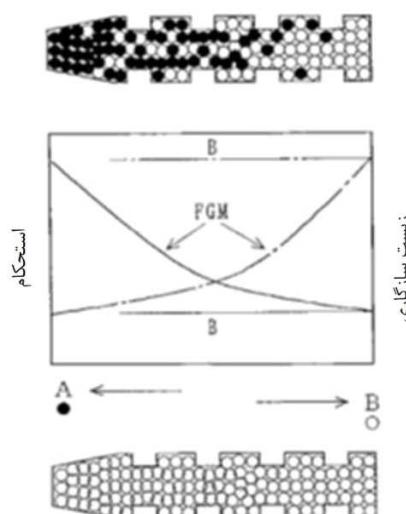
شکل ۱۴- برش عرضی از یک پوشش FGM با گرادييان در تخلخل الف: طرحواره ب: ریزساختار [۵۳] SEM

۶-۲-ابزارهای سایيسي و برشي

يکی 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 مقادير يكسان کبالت، با کاهش اندازه دانه سختی افزایش می‌يابد. با کنترل اين عوامل می‌توان سختی سطح نسبت به داخل بيشتر کرد که برای یک ابزار برش با سرعت بالا مناسب است.^[۵۴]

۳-۶- کاربردهای پژوهشی

ساختار استخوان‌ها در بدن انسان ساختاري تدریجي است و از نظرگاه مهندسي مواد استخوان یک ماده چندسازه با ساختار موضعی-عملکردي به شمار مي‌رود^[۵۵]. برای ساخت جایگزین استخوان در بدن از ساختار FGM استفاده می‌شود تا ماده حاصل همزمان خواص مکانيکي و زيست سازگاري^۱ مناسبی داشته باشد (شکل ۱۵) به اين منظور می‌توان یک لایه آپاتيتی که ساختاري مشابه با استخوان دارد را روی زير لایه‌اي فلزی قرارداد و برای اينکه اتصال بين آن‌ها در فصل مشترك محکم باشد، نسبت به زير لایه تدریجي خواهد بود. زير لایه فلزی هم می‌تواند آلياژي زيست فعال^۲ مانند Ti-6Al-4V باشد^[۲۴, ۵۶].



شکل ۱۵- طرحواره چگونگي تأثير FGM کردن روی خواص مکانيکي و زيست سازگاري [۵۸]

¹ Biocompatibility

² Bioactive

در نوع دیگری از ایمپلنت‌های پایه تیتانیوم، در یک سو تیتانیوم خالص و در سوی دیگر تیتانیوم حاوی ۲۰ درصد هیدروکسی آپاتیت استفاده شده و در میان آن‌ها مقدار هیدروکسی آپاتیت به تدریج 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/SiO₂، Ti/Co، TiN/HAP به عنوان ایمپلنت در کاربردهای پزشکی استفاده شده است [۵۹، ۶۰].

۶-۴- سلول‌های سوختی^۱

سلول‌های سوختی ابزارهایی هستند که انرژی شیمیایی را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. یک نوع آن سلول سوختی اکسید جامد^۲ (SOFC) است. این سیستم شامل یک کاتد در هوا و یک آند در سمت سوخت است، و این دو با یک الکتروولت اکسیدی از هم جدا می‌شوند^۳. مواد کاتدی نیاز به ویژگی‌های متنوعی دارند: رسانایی الکتریکی و یونی بالا، اکتیویته کاتالیستی بالا برای کاهش اکسیژن، سازگاری شیمیایی با الکتروولت و اتصالات، سازگاری ضربی 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 ضربی انبساط حرارتی به حداقل می‌رسد و فصل مشترک فعل شیمیایی افزایش یافته 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. Parish, *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

- [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. Rodel, 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, "NiAl₃formation 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 Fumatsu 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 functionally graded 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

- 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 Soc Dent Mater Devic*, vol. 12, pp. 595-612, 1993.