



مهندس ناصر بیات، نویسنده
مسئول این مقاله، دانشجوی
فوق لیسانس سرامیک دانشگاه
بین المللی امام خمینی (ره)

مواد گرادیانی (FGM): روش های ساخت و کاربردها

ناصر بیات، محمد مسعود محبی، شیوا رودشتی

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

چکیده: مواد گرادیانی یا Functionally Graded Materials (FGM) به موادی گفته می شود که ساختار و خواص آن ها به طور تدریجی در نقاط مختلف قطعه تغییر می کند. این نوع طراحی منجر به ایجاد ساختاری متناسب با عملکرد و شرایط کاری هر بخش از قطعه می شود. پوشش های سد حرارتی، مواد دندان، ابزارهای سایشی و برشی و سلول های سوختی از کاربردهای FGM است که توسعه یافته است. در این مقاله ابتدا مواد FGM معرفی شده اند. سپس روش های 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 می دهد و منجر به تغییر خواص در آن جهات می شود [۱]. این مواد معمولاً وقتی به کار می روند که قطعه ای همزمان نیاز به ویژگی های متفاوت داشته باشد یا اینکه بخواهیم دو ماده با خواص متفاوت را به هم اتصال دهیم. مثلاً ساینده ها که همزمان نیاز به سختی و انعطاف پذیری بالا دارند تا هم بتوانند کار سایش را انجام دهند و هم در برابر تنش های وارد شده دچار شکست نشوند. مثال دیگر پوشش های سد حرارتی^۱ هستند که باید یک پوشش سرامیکی روی زیر لایه ای فلزی قرار بگیرد و بنابراین نیازمند یک لایه میانی بین این دو لایه است که خواصی مرکب از خواص دو لایه دیگر داشته باشد.

یک راه برای فراهم آوردن این ویژگی ها استفاده از مواد چندسازه^۲ است. مواد چندسازه دسته ای از مواد پیشرفته هستند که از ترکیب دو یا چند ماده تشکیل شده اند و خواص فیزیکی و شیمیایی آن ها ترکیبی مطلوب از مواد اولیه است. در واقع بخشی از خواص مورد نظر را یکی از مواد و بخش دیگر را ماده دوم تأمین می کند. اما استفاده از این مواد محدودیت های خاصی دارند. به علت اینکه هر دو فاز در تمام قطعه به یک نسبت پراکنده شده اند، نمی توان درجایی که نیاز به خواص بیشتری از یکی از دو ماده باشد، آن خاصیت را تأمین کرد. برای مثال در مورد ساینده ها، مطلوب تر آن است که در سطح مواد با سختی بالاتر و در بدنه موادی با انعطاف پذیری بیشتر به کار برده شود. یا در مورد لایه میانی پوشش سرامیکی و زیر لایه فلزی، بهتر است ماده چندسازه به کار برده شده در نزدیکی لایه فلزی، فلز بیشتر و در نزدیکی لایه سرامیکی، سرامیک بیشتری داشته باشد تا بر اثر اختلاف ضریب انبساط حرارتی پدیده لایه ای شدن رخ ندهد. لذا در این چنین مواردی از FGM ها که نسل جدیدتری از مواد مرکب هستند استفاده می شود [۲-۵]

نمونه ای از ساختار FGM در به شکل طرحواره شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل یک اتصال فلز- سرامیک دیده می شود که در آن تغییر فاز به شکل تدریجی انجام شده است. ابتدا ناخالصی هایی از هر فاز در زمینه ای از فاز دیگر وارد می شود. بعد از آن شاهد یک ناحیه انتقالی هستیم که تقریباً هر دو فاز میزانی برابر دارند و اتصال در همین ناحیه رخ می دهد. [۶]

¹ Thermal barrier coating

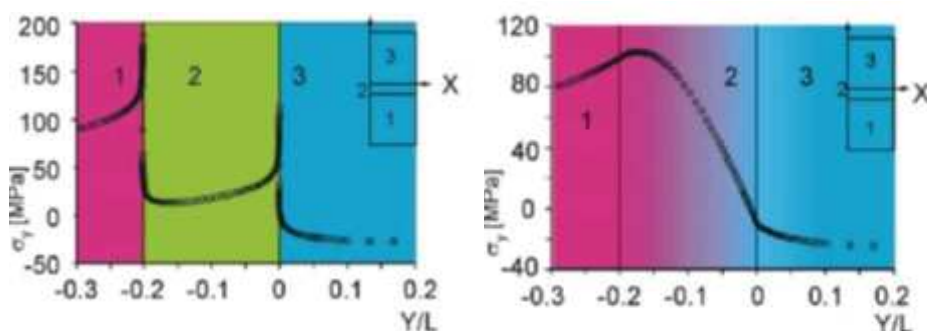
² Composites



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

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

- ۱- کاهش نیروی محرکه 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 یک لایه 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 رخ داده است (شکل ۲-الف) درحالی که در مورد ساختار با لایه میانی FGM شده این تجمع تنش رخ نداده و حداکثر 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 [۴، ۸].



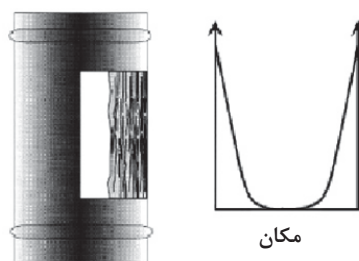
شکل ۲- توزیع تنش در دو ساختار چندلایه: بالا فاز میانی همگن و متفاوت از دو فاز دیگر؛ پایین فاز میانی FGM از دو فاز دیگر [۷]

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^۱ و جو و بسیاری از گیاهان دیگر ریزساختارهایی به شکل گرادانی شکل گرفته است تا ساختاری با عملکرد بهینه و با حداقل استفاده از ماده به وجود آید. مثلاً ساقه خیزران متشکل از

¹ 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 خیزران 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 گرادایانی دارند [۱۱]. حتی پوست انسان هم دارای ساختار تدریجی است [۳]. نمونه‌هایی از ساختارهای گرادایانی طبیعی در شکل ۴ دیده می‌شود.



(الف) ساقه خیزران

(ب) توزیع رشته

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

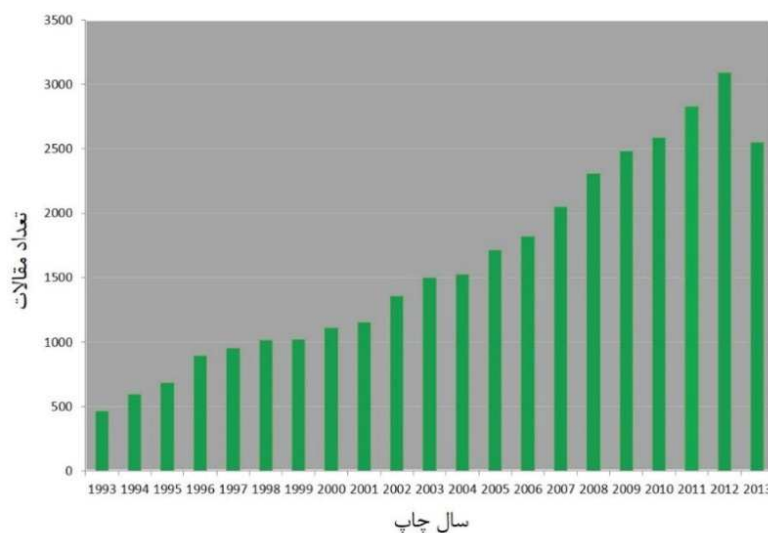


شکل ۴- نمونه‌هایی از ساختار گرادایانی در طبیعت [۳]

مثال‌هایی 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 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 به لحاظ نظری سودمند است، اما شاید به علت محدودیت‌های فناوریانه 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 می‌شود مقاومت کند. این تحقیقات که منجر به توسعه مواد FGM گردید [۱۸].

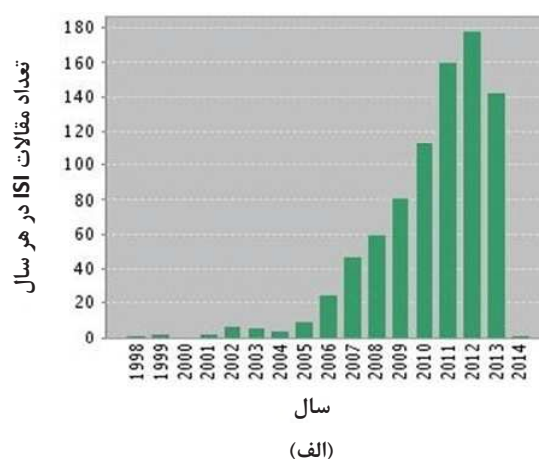
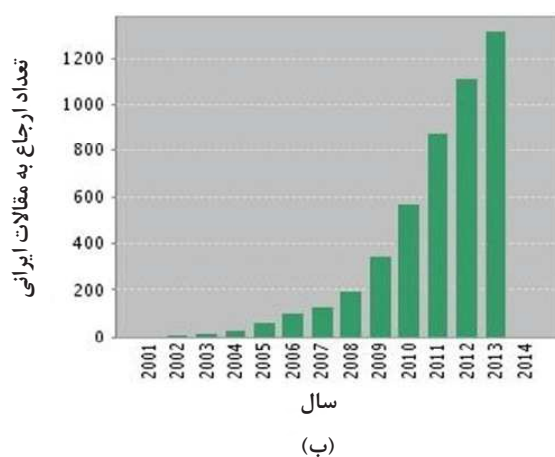
از آن زمان تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه مواد FGM صورت پذیرفته است و این مواد کاربردهای زیادی پیدا کرده‌اند. روند مقالات منتشرشده در زمینه FGM در بیست سال اخیر در شکل ۵ نشان از رشد مداوم علاقه محققان به این موضوع است. در ایران هم از سال ۲۰۰۲ روند جدی تحقیقات روی این مواد آغاز شده و به سرعت رشد یافته است، به گونه‌ای که مطابق جدول ۱ هم‌اکنون ایران از نظر تعداد مقاله رتبه ۱۲ را در چاپ مقالات ISI مرتبط با مواد گرادایانی 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، در حالی 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- رده بندی 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				



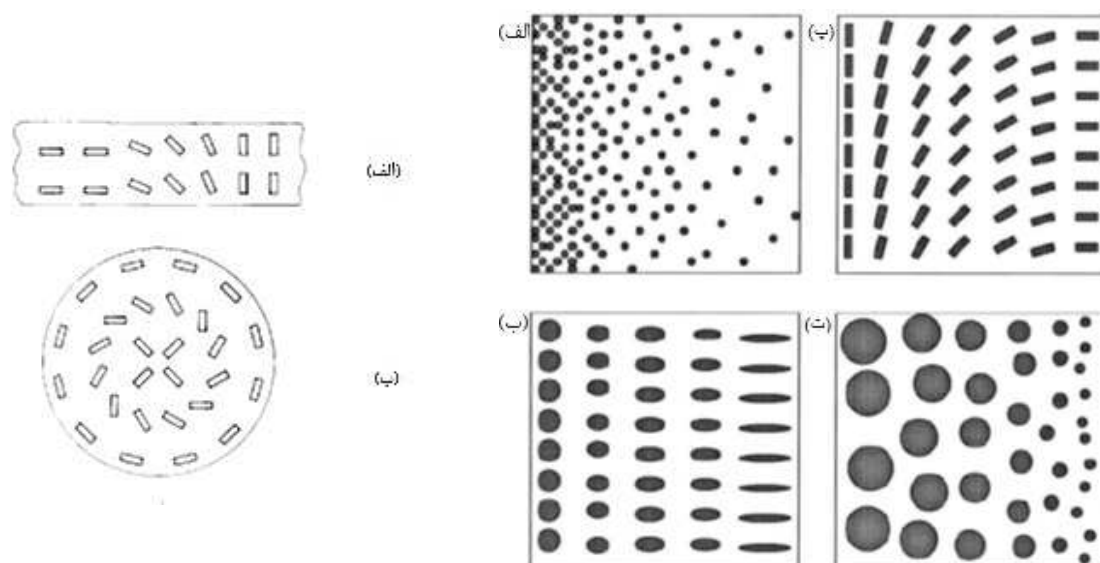
شکل ۶- روند تحقیقات FGM در ایران الف) تعداد مقالات ISI در هر سال؛ ب) تعداد ارجاع به مقالات ایرانی [۱۹]

۳- انواع ساختار FGM

ساختارهای FGM را می توان از جهات گوناگون دسته بندی کرد که در اینجا به چند مورد مهم اشاره می شود:

۳-۱- 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 ۷- انواع مواد چندسازه FGM با تدریجی شدن فاز پخش شده در: (الف) مقدار (ب) شکل (پ) جهت (ت) اندازه [۹]

شکل ۸- گرادیان در جهت گیری فاز دوم (الف) در صفحه (ب) در استوانه [۱۵]

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 ریزساختار 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 برحسب موقعیت است. در عمل اغلب این تغییر به یک‌جهت، مثلاً z ، محدود شده و تابع انتقال این چنین خواهد بود:

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

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

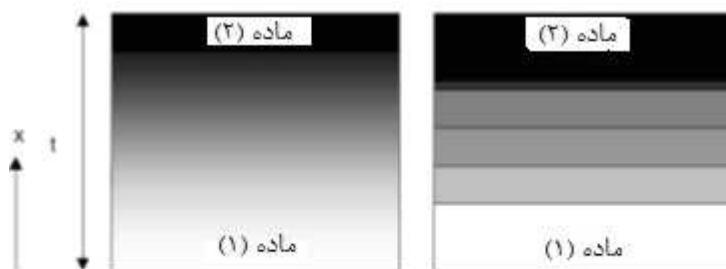
در این تقسیم‌بندی ۳ دسته اصلی از FGM قرار دارند: لایه‌نازک FGM^۴، فصل مشترک‌های FGM^۵، بدنه‌های FGM^۶. لایه‌های نازک FGM پوشش‌هایی با ضخامت ۱ تا ۱۰۰ میکرومتر هستند که به‌عنوان راه‌حلی مناسب برای مشکل عدم تطبیق خواص پوشش با زیر لایه مطرح است. FGM های فصل مشترک با ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میکرومتر ضخامت برای اتصال دو ماده متفاوت استفاده می‌شوند. این نوع FGM به شکل تجاری هم مورد استفاده زیادی داشته و فناوری 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 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 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]



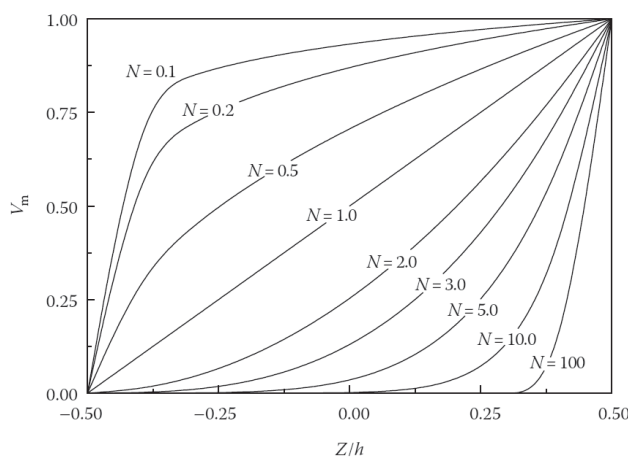
شکل ۹- طرح‌واره دو ساختار FGM: سمت چپ ساختار پیوسته، سمت راست پله‌ای [۱]

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:

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

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:

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

که در آن 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

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

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:

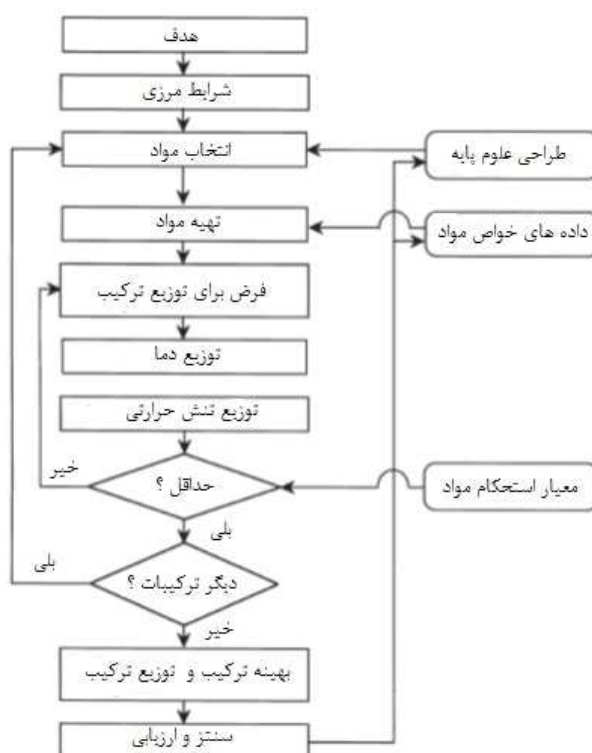
$$P_j = P_0(P_{-1}T^{-1} + 1 + P_1T + P_2T^2 + P_3T^3) \quad (5)$$

که ضرایب $P_0, P_{-1}, P_1, P_2, P_3$ و 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:

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

که در آن 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 مورد توجه 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»^۱ توسعه یافته است. در این روش ابتدا ساختار هندسی و شرایط مرزی مشخص می‌شوند. سپس مواد انتخاب شده 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. در صورتی که 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

۵- روش‌های ساخت

۵-۱- مقدمه

فرآیند ساخت FGM را به‌طور کلی 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 خشک کردن 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 روی هم 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 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 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 روی هم 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 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

۲۸

۵-۱۰- 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 دانه ذرات مقدار نیروی گریز متفاوتی بر ذرات مختلف اعمال کرد و در نتیجه ساختار گرادینانی ایجاد کرد.

۵-۱۱- روش ساخت بی قالب (SFF)^۲

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 کامبیناتوریل^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- رسوب‌دهی شیمیایی از فاز بخار^۴ (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]

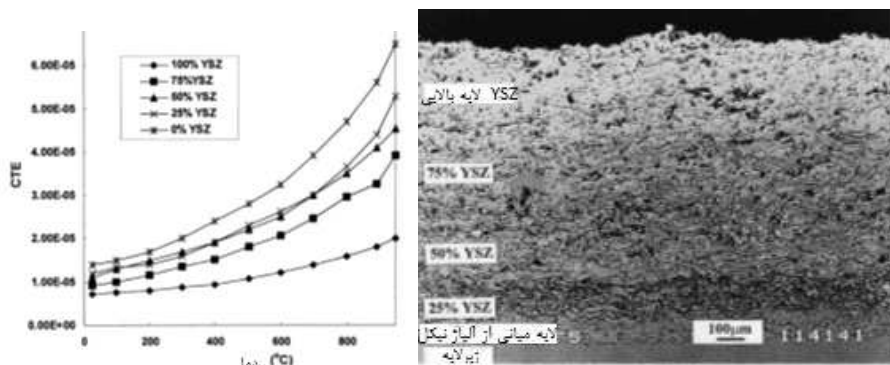
۵-۱۳- رسوب‌دهی فیزیکی از فاز بخار^۵ (PVD)

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 از 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 مرز بین آن‌ها و در نهایت 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 تغییر 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. [۵، ۵۲]



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

¹ Centrifugalcasting

² Solid Freeform Fabrication Method

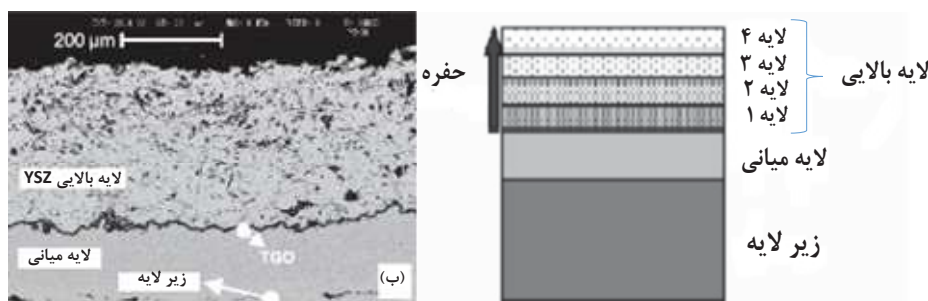
³ Combinatorial

⁴ Chemical Vapor Deposition

⁵ Physical Vapor Deposition

⁶ Thermal Barrier Coating

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 کاهش یافته است. نمونه‌ای از این ساختار در شکل ۱۴ دیده می‌شود [۵۳].



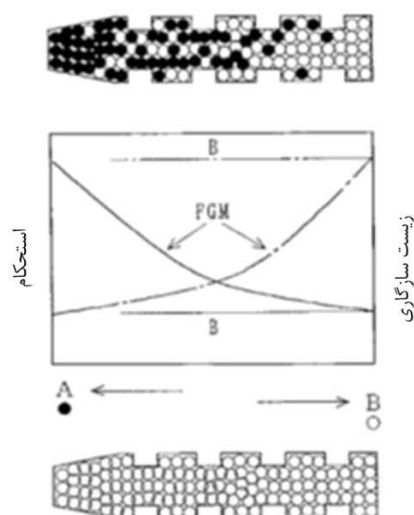
شکل ۱۴- برش عرضی از یک پوشش FGM با گرادیان در تخلخل الف: طرح‌واره ب: ریزساختار SEM [۵۳]

۲-۶- 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 سرعت بالا مناسب است. [۵۴]

۳-۶- 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^۱ مناسبی داشته باشد (شکل ۱۵) به این منظور می‌توان یک لایه 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^۲ مانند Ti-6Al-4V باشد [۲۴، ۵۶].



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

^۱ Biocompatibility

^۲ 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/Co ، Ti/SiO_2 ، 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 آنود 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^۳، 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 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. Teger, "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 graded hard metals," *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., ed Oxford: 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. Eppe, 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. 741-746, 1972.
- [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. 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 Document 1989.
- [30] E. Ma, M. A. Nicolet, and M. Nathan, "NiAl₃ 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 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 SocDent Mater Devic*, vol. 12, pp. 595-612, 1993.