

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده فنی
گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
گرایش طراحی کاربردی

عنوان:

تحلیل ترمو الاستیک دیسک دوار از جنس مواد تابعی (FGM) به روش المان محدود

اساتید راهنما:

دکتر سامرند رش احمدی، دکتر رسول شعبانی

تنظیم و نگارش:

محمد علیزاده

بهمن ۱۳۹۱

چکیده

تجهیزات دوار به عنوان یکی از اجزای اصلی صنایع مختلف نقش ایفا می‌کنند. صنعت تجهیزات دوار با توجه به نقش راهبردی در صنایع مختلف و همچنین پارامترهای فراوانی که بر عملکرد و بهره‌وری صنعت موجود اثر گذارند، نیازمند انجام پژوهش و بررسی در حوزه‌های مختلف صنعت می‌باشد. از جمله اجزای دوار که در صنعت کاربرد فراوانی دارند و نقش مهمی ایفا می‌کنند می‌توان به دیسک دوار اشاره نمود. کاربرد روز افزون این جزء دوار در صنایع گوناگون از جمله صنایع هوافضا، صنایع خودروسازی، صنایع دریایی و ... حاکی از اهمیت و جایگاه مهم این جزء دوار در صنعت می‌باشد. با توجه به نقش دیسک دوار در صنایع مختلف، تجزیه و تحلیل دیسک‌ها در شرایط متفاوت بارگذاری از اهمیت و جایگاه خاصی برخوردار است.

برای بهبود کارایی دیسک‌ها در صنعت و ارتقاء بهره‌وری از مواد FGM استفاده می‌شود. در این راستا، در این پژوهش تلاش شده تا تحلیل مناسبی جهت بررسی مطالعه رفتار دیسک FGM استخراج گردد. در این راستا با توجه به استخراج معادلات حاکم، به کمک روش المان محدود به حل معادله پرداخته شده است. با توجه به روابط موجود، به دو حالت دیسک بدون خروج از مرکز و دیسک با خروج از مرکز خواهیم پرداخت. روش‌های گوناگونی برای تولید قطعات دوار از جمله دیسک دوار وجود دارد. با این وجود امکان بوجود آمدن خطایی هر چند چربی در فرایند ساخت این اجزاء دور از ذهن نیست. یکی از این خطاها جابجا شدن مرکز دیسک در حین فرایند ساخت دیسک می‌تواند باشد. یعنی مرکز اصلی دیسک در همان راستا خط مرکزی دیسک کمی بالاتر یا پایین‌تر از نقطه مد نظر ایجاد گردد. بررسی و تحلیل رفتاری چنین دیسکی می‌تواند کمک شایانی به تولید و صنعت نماید. در این پژوهش دیسک دوار تحت بار ترمومکانیکی بررسی می‌شود. نیروهای اعمالی بر دیسک دوار در این مسئله ناشی از دوران دیسک دوار و توزیع دمایی در راستای دیسک و تغییر دمای سطح داخل و خارج می‌باشد. با کنترل این پارامترها، می‌توان تغییرات در دیسک را کنترل کرد. با تغییر پارامترهایی چون سرعت زاویه‌ای، نسبت شعاعی دیسک، دمای سطح داخل دیسک و دمای سطح خارج دیسک تغییرات رفتاری دیسک نشان داده خواهد شد. برای حل مسئله با در نظر گرفتن دیسک تحت شرایط بارگذاری مکانیکی و حرارتی مختلف، تحلیلی از رفتار حاکم بر دیسک ارائه شده است.

فصل ۱

مقدمه

۱	
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ اهمیت و جایگاه مواد کامپوزیت در صنعت
۳	۳-۱ مزایای مواد کامپوزیتی
۳	۱-۳-۱ سبکی
۴	۲-۳-۱ مقاومت مکانیکی نسبت به وزن بالا
۴	۳-۳-۱ مقاومت در برابر خوردگی بالا
۴	۴-۳-۱ خصوصیات خستگی عالی نسبت به فلزات
۴	۴-۱ روشهای ساخت مواد کامپوزیت
۵	۱-۴-۱ لایه گذاری دستی یا Hand lay up
۵	۲-۴-۱ تزریق رزین (RTM)
۶	۳-۴-۱ پاشش رزین (Spray up)
۶	۴-۴-۱ آمیزه های قالب گیری
۷	۵-۴-۱ رشته پیچی
۷	۶-۴-۱ پالترژن
۷	۵-۱ اهمیت و جایگاه دیسک دوار و مواد FGM
۸	۶-۱ روشهای ساخت مواد FGM
۸	۱-۶-۱ CVD/PVD (نشت بخار مواد، توسط روشهای شیمیایی یا فیزیکی)

۱۲..... Plasma Spray ۲-۶-۱

۱۳..... ۷-۱ انواع اسپری

۱۳..... ۱-۷-۱ اسپری قوسی سیمی

۱۳..... ۲-۷-۱ پلاسما اسپری با انرژی بالا

فصل ۲

۱۶..... **مروری بر کارهای گذشته**

۱۷..... ۱-۲ مروری بر تحقیقات گذشته

فصل ۳

۲۳..... **تحلیل ترمو الاستیک دیسک دوار متقارن FGM**

۲۴..... ۱-۳ مقدمه

۲۴..... ۲-۳ استخراج معادلات

۲۹..... ۳-۳ روش گلرکین

۳۵..... ۴-۳ نتایج

فصل ۴

۴۶..... **تحلیل دیسک دوار FGM نابالانس به کمک روش المان محدود**

۴۷..... ۱-۴ مقدمه

۴۷..... ۲-۴ استخراج معادلات

۵۷..... ۳-۴ نتایج

فصل ۵

۷۳..... **جمع بندی نتایج و پیشنهادهای برای کارهای بعدی**

۷۴ ۵-۱ جمع بندی

۷۵ ۵-۲ پیشنهادات

۷۶ مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۳-۱. تغییرات تنش در دو راستای شعاعی و قطبی در سرعت‌های زاویه ای متفاوت برای تابع خطی دما ۳۶
- شکل ۳-۲. تغییرات تنش در دو راستای شعاعی و قطبی در سرعت‌های زاویه ای متفاوت برای تابع سهموی دما ۳۷
- شکل ۳-۳. تغییرات کرنش در دو راستای شعاعی و قطبی در سرعت‌های زاویه ای متفاوت برای تابع خطی دما ۳۸
- شکل ۳-۴. تغییرات کرنش در دو راستای شعاعی و قطبی در سرعت‌های زاویه ای متفاوت برای تابع سهموی دما ۳۹
- شکل ۳-۵. تغییرات تنش در نسبت شعاعی متفاوت برای تابع خطی دما ۴۱
- شکل ۳-۶. تغییرات تنش در نسبت شعاعی متفاوت برای تابع سهموی دما ۴۲
- شکل ۳-۷. تغییرات تنش دمای اولیه متفاوت برای تابع خطی دما ۴۳
- شکل ۳-۸. تغییرات تنش در دمای اولیه متفاوت برای تابع سهموی دما ۴۴
- شکل ۴-۱. نمایه ایی از دیسک دوار همراه با خروج از مرکز ۴۷
- شکل ۴-۲. توزیع دمایی در سطح دیسک ۵۷
- شکل ۴-۳. تغییرات جابجایی در سرعت زاویه ای متفاوت ۵۸
- شکل ۴-۴. تغییرات تنش در راستای شعاعی و قطبی در سرعت زاویه ای متفاوت ۵۹
- شکل ۴-۵. تغییرات کرنش در راستای شعاعی و قطبی در سرعت های زاویه ای متفاوت ۶۱
- شکل ۴-۶. تغییرات جابجایی در نسبت شعاعی متفاوت ۶۲
- شکل ۴-۷. توزیع تنش در راستای شعاعی و قطبی در نسبت شعاعی متفاوت ۶۳
- شکل ۴-۸. توزیع کرنش را در دو راستای شعاعی و قطبی در نسبت شعاعی متفاوت ۶۵
- شکل ۴-۹. تغییرات جابجایی در دمای ورودی متفاوت ۶۶
- شکل ۴-۱۰. توزیع تنش در راستای شعاعی و قطبی در دمای ورودی متفاوت ۶۷
- شکل ۴-۱۱. توزیع کرنش را در دو راستای شعاعی و قطبی در دمای ورودی ۶۸
- شکل ۴-۱۲. تغییرات جابجایی در دمای خروجی متفاوت ۶۹
- شکل ۴-۱۳. توزیع تنش در راستای شعاعی و قطبی در دمای خروجی متفاوت ۷۰
- شکل ۴-۱۴. توزیع کرنش را در دو راستای شعاعی و قطبی در نسبت دمای خروجی متفاوت ۷۱

فصل ۱

مقدمه

۱-۱ مقدمه

سال‌هاست که بررسی و تحلیل رفتار اجزاء مرتبط با صنعت مورد توجه همه محققین قرار گرفته است. اهمیت ارائه تحلیلی دقیق و درست و جامع از این اجزا بکار گرفته شده در صنعت، بر کسی پوشیده نیست. ارائه تحلیلی دقیق موجب افزایش کارایی این اجزا گردیده و به پیش بینی رفتاری این اجزا در شرایط متفاوت کاری کمک شایانی می‌کند. با توجه به بکارگیری قطعات در شرایط کاری متفاوت و تازه‌تر و همچنین بکارگیری مواد جدید در ساخت این اجزاء، ارائه تحلیلی تازه‌تر و روشی جدید برای تحلیل رفتاری این اجزاء غیر قابل اجتناب است. همچنین برای افزایش کارایی این قطعات که از جمله می‌توان به دیسک‌ها اشاره کرد، از موادی به نام FGM¹ که خود نوعی از مواد کامپوزیت می‌باشند استفاده می‌شود. در این پژوهش سعی شده تا با ارائه تحلیلی از دیسک دوار FGM متقارن محوری، تغییرات رفتاری این دیسک‌ها مورد بررسی قرار گیرد. با تغییر پارامترهای سرعت زاویه‌ای، نسبت شعاعی، دمای سطح داخلی و سطح خارجی دیسک این تغییرات رفتاری مورد بررسی قرار گرفته شده است. علاوه بر آن در فصل چهارم تحلیلی از تغییرات رفتاری دیسک دوار FGM با در نظر گرفتن اثر نابالانسی، ارائه شده است. در این فصل همچنین با تغییر پارامترهای سرعت زاویه‌ای، نسبت شعاعی، دمای سطح داخلی و خارجی دیسک به بررسی این تغییرات پرداخته شده است.

در زیر به جایگاه و نحوه ساخت مواد کامپوزیت و FGM اشاره شده است.

¹ - Functionally Graded Material

۲-۱ اهمیت و جایگاه مواد کامپوزیت در صنعت

بیش از سی سال است که مواد کامپوزیتی، پلاستیک ها و سرامیک ها به عنوان مواد برتر شناخته شده اند. حجم کاربرد مواد کامپوزیت به طور پیوسته رشد پیدا کرده و در بازارهای جدید نفوذ و تسخیر زیادی داشته اند. بسیاری از نیازهای صنعتی مانند صنایع فضایی، راکتورسازی، صنایع خودروسازی، نیروگاه ها و . . . نمی توانند با استفاده از مواد معمولی برآورده شود و نیاز به تغییر گسترده خواص دارد. از طرف دیگر در کاربردهای مهندسی اغلب تلفیق خواص، مورد نیاز است. به عنوان مثال در صنایع هوافضا، کاربردهای زیرآبی، صنایع خودروسازی و . . . امکان استفاده از یک نوع ماده که همه خواص مورد نظر را فراهم نماید وجود ندارد. در این صنایع به موادی نیاز است که ضمن داشتن استحکام بالا، سبک باشد و همچنین مقاومت سایشی و مقاومت به ضربه خوبی داشته باشند. بنابراین استفاده از کامپوزیت ها تنها راه حل مشکل است. یک ماده کامپوزیت، مخلوط فیزیکی در مقیاس میکروسکوپی است که از دو یا چند ماده مختلف به دست آمده است. این مواد خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خود را حفظ کرده ولی در مجموع، مخلوط خواص بهتری از هر یک از اجزا تشکیل دهنده خود را دارا می باشد. به طور کلی یک ماده کامپوزیت ترکیبی است از تقویت کننده (الیاف، ذرات، ورق پوسته ای و یا پرکننده ها) که در زمینه (پلیمر، فلز و یا سرامیک) فرو رفته باشد. زمینه تقویت کننده را نگه می دارد تا فرم مورد نیاز تشکیل شود، در حالیکه تقویت کننده، خواص مکانیکی کلی زمینه را بهبود می بخشد. اگر طراحی مناسب باشد، ماده ترکیبی جدید خواص بهتری را از ماده ترکیب شده قبلی نشان می دهد.

۳-۱ مزایای مواد کامپوزیتی

همان طور که اشاره شد از جمله مزایای مواد کامپوزیتی می توان به این موارد اشاره کرد:

۱-۳-۱ سبکی

این قطعات به خاطر وزن مخصوص کم دارای وزن کمتری نسبت به قطعات فلزی هستند. وزن تا حدود نصف و حتی بیشتر کاهش پیدا می کند.

۲-۳-۱ مقاومت مکانیکی نسبت به وزن بالا

به همان نسبت که وزن قطعات کم می شود، مقاومت مکانیکی آنها در ابعاد مختلف افزایش می یابد و به طور متوسط در تمام خواص مکانیکی خواص بهتری نسبت به فلزات از خود نشان می دهند. این مسئله باعث افزایش عمر قطعات خواهد شد.

۳-۳-۱ مقاومت در برابر خوردگی بالا

بر خلاف فلزات تأثیر مواد نمکی و شیمیایی و اکسید شدن در قطعات کامپوزیتی کم است یا اصلاً وجود ندارد که باعث صرفه جویی در هزینه های نگهداری و افزایش عمر قطعات می شود و استفاده از قطعات در محیط های مرطوب را برای مدت طولانی فراهم می نماید.

۴-۳-۱ خصوصیات خستگی عالی نسبت به فلزات

با توجه به تغییراتی که در ساختار مواد کامپوزیت به نسبت فلزات ایجاد می گردد، خواص خستگی بالایی دارند. محدوده و مقادیر بالاتر خواص استحکام و سختی، استفاده از کامپوزیت ها را برای کاربردهای گوناگون مناسب تر کرده است. همچنین خواص خستگی کامپوزیت ها از فلزات بهتر است و عمر طولانی تری خواهند داشت.

معمولاً در طراحی فلزات خستگی، در نظر گرفتن طراحی بحرانی است. اما به نظر می رسد مهم ترین مزیت این مواد را می توان این دانست که با توجه به نیازها، می توان خواص آنها را کنترل کرد و تقریباً در اغلب موارد با ترکیب مناسب به خاصیت مد نظر دست یافت.

بطور کلی مواد کامپوزیتی (مواد مرکب) به دلیل داشتن جرم بسیار کم و مقاومت بالا نسبت به فلزات، در صنعت هوا و فضا، صنایع نظامی، صنایع خودروسازی و ... کاربرد وسیعی دارند.

۴-۱ روش های ساخت مواد کامپوزیت

برای ساخت مواد کامپوزیت روش های متفاوتی وجود دارد که در زیر به آن ها اشاره می شود.

۱-۴-۱ لایه گذاری دستی یا Hand lay up

در این روش، ابتدا رها ساز روی سطح قالب اسپری می‌شود تا جدا کردن قطعه ساخته شده به سهولت انجام بگیرد. سپس ژل کوت روی آن اعمال می‌شود تا سطح قطعه از نظر کیفیت و ظاهر، سطح مطلوبی باشد. آنگاه الیاف روی درون قالب قرار می‌گیرند و رزین با دست روی آنها ریخته شده، توسط قلم و یا غلطک آغشته سازی کامل می‌شود. همچنین این امکان وجود دارد که الیاف ابتدا به رزین آغشته شود و بعد لایه گذاری انجام گیرد. حباب‌های هوای گیر کرده در قطعه با حرکت قلم یا غلطک و فشار دادن الیاف خارج می‌شوند. لایه گذاری و آغشته سازی تا رسیدن به ضخامت مورد نظر ادامه می‌یابد. قطعه معمولاً در فشار و دمای محیط پخت می‌شود. با کاتالیزور و شتاب دهنده زمان پخت را می‌توان تنظیم نمود.

۱-۴-۲ تزریق رزین (RTM¹)

RTM یک فرآیند قالب بسته می‌باشد. در این فرآیند ابتدا الیاف را در یک قالب دو کفه‌نر و ماده قرار می‌دهند. سپس رزین مایع و کاتالیست توسط یک میکسر ایستا مخلوط می‌شوند و مخلوط آنها از طریق منافذ تزریق با یک فشار مختصر وارد قالب می‌شود. فشار تزریق معمولاً کمتر از 700 KPa می‌باشد. هوای محبوس در بین الیاف با ورود رزین، به سمت خروجی‌های قالب رفته، از قالب خارج می‌شوند. کنترل شکل پر شدن قالب برای دستیابی به آغشته سازی کامل الیاف، از اهمیت خاصی برخوردار است. تشکیل نواحی عاری از رزین و آکنده از آن باعث از رده خارج شدن قطعه می‌شود. چرخه پخت به ضخامت قطعه، نوع رزین و دمای قالب دارد. قطعات معمولاً در قالب گرم پخت می‌شوند و عملیات پس پخت برای بهبود خواص مکانیکی بکار می‌رود. RTM برای تولید قطعات بزرگ و پیچیده دارای مزیت است. سرعت نسبتاً بالا، مطلوب بودن دو طرف سطح، به راحتی قابل دستیابی است. امکان پخت قطعه در قالب موجب کاهش قابل ملاحظه زمان فرآیند در مقایسه با فرآیند لایه گذاری دستی است. از آنجایی که RTM مانند اتوکلاو دارای محدودیت ابعاد و فشار نیست، ابزارهای جدید برای ساخت قطعات بزرگ و پیچیده قابل استفاده‌اند.

¹ - Resin Transfer Moulding

۱-۴-۳ پاشش رزین (Spray up)

در تلاش برای افزایش اتوماسیون فرآیند دستی، روشهای مختلف پاشش رزین ابداع شده‌اند. این روشها با کاربرد رشته‌های (roving) ارزانتر، کاهش زمان اعمال رزین و آغشته سازی الیاف و به حداقل رساندن اتلاف مواد، قیمت کلی کامپوزیت حاصل را کاهش می‌دهند.

در فرآیند پاشش رزین، الیاف و رزین بطور همزمان رو یا درون یک قالب پاشیده می‌شوند. الیاف رشته‌ای به یک خردکن وارد شده و بعد داخل جریان رزین همراه کاتالیست قرار می‌گیرند. رزین و کاتالیست ممکن است در یک تفنگ پاشش (spray gun) و یا از دو تفنگ پاشش وارد شوند و در هر حال وقتی به قالب می‌رسند، با هم مخلوط شده‌اند. سیستم پاشش ممکن است با هوا باشد. به منظور سهولت کار با دستگاه، معمولاً تفنگ پاشش به یک میله متحرک آویزان است.

پس از پاشش رزین و الیاف و نشست آنها روی قالب، از الیاف آغشته به رزین، حبابهای هوا توسط غلطک کاری خارج می‌شوند و الیاف کاملاً خوابانده می‌شوند و سطح صاف می‌شود. لایه‌های بعدی رزین و الیاف را نیز می‌توان تا رسیدن به ضخامت مطلوب اعمال نمود. سپس قطعه را در فشار و دمای محیط پخت می‌کنند، هر چند می‌توان با اعمال حرارت، پخت را سریع کرد. رزینهای مورد استفاده در این فرآیند معمولاً پلی استر و اپوکسی هستند.

۱-۴-۴ آمیزه های قالب گیری (SMC^۱, BMC^۲, Compression Molding)

بطور کلی آمیزه قالبگیری را می‌توان مخلوطی از رزین، مواد پرکننده، الیاف تقویت کننده، آغازگر، رها ساز، رنگدانه، پایدار کننده و دیگر مواد افزودنی دانست. این آمیزه‌ها معمولاً به شکلی که مناسب برای قالبگیری نهایی است تولید می‌گردند. بسته به شکل آمیزه فرآیند قالبگیری می‌تواند فشاری، تزریقی و یا انتقالی باشد. کاربرد گسترده این مواد به بهای نسبتاً پائین و امکان بهینه سازی خواص آنها جهت کاربردهای ویژه نسبت داده می‌شود. آمیزه‌های قالبگیری بر پایه اغلب رزین‌های گرما سخت وجود دارند اما آمیزه های بر پایه رزین پلی استر غیر اشباع سهم عمده را بخود اختصاص می‌دهند لذا در اینجا تأکید روی آنها بوده است.

¹ - Sheet Moulding Compound

² - Bulk Moulding Compound

۱-۴-۵ رشته پیچی^۱

رشته پیچی یک روش ساده و کارا برای تولید قطعات مدور مانند لوله و ظروف استوانه‌ای در اندازه‌های مختلف می‌باشد. قطعات با قطر ۲۵ میلی‌متر تا ۶ متر در این فرآیند متداول می‌باشد. در این فرآیند الیاف رشته‌ای یا نوارهای پیوسته الیاف با شرایط کنترل شده روی یک مغزی پیچیده می‌شوند. لایه‌ها با یک طرح یکسان و یا متفاوت پیچیده می‌شوند. به هنگام پیچش الیاف، کشش الیاف بین لایه‌های پخت نشده کامپوزیت فشار ایجاد می‌کند. این فشار بر فشردگی الیاف و درصد حباب هوا در قطعه - که کنترل کننده استحکام و سفتی قطعه می‌باشد - مؤثر است. رزین ممکن است قبل، به هنگام و بعد از پیچش روی الیاف اعمال شود. در نهایت رزین در دمای محیط و یا دمای بالاتر و بدون اعمال فشار پخت شده، مغزی از درون آن بیرون کشیده می‌شود. عملیات تکمیلی مانند ماشین کاری و سنباده زنی معمولاً احتیاج نیست.

۱-۴-۶ پالتروژن^۲

پالتروژن فرآیند پیوسته‌ای برای تولید انواع پروفیل‌های کامپوزیتی است. در این فرآیند، الیاف تقویت کننده را از یک حمام عبور می‌دهند تا به رزین آغشته شود. سپس الیاف آغشته شده را وارد یک قالب گرم می‌نمایند و نمونه پخت شده را توسط یک دستگاه کشش بیرون می‌کشند. بعد از این مرحله امکان برش محصول در اندازه‌های دلخواه وجود دارد. این فرایند تا حدودی مشابه فرایند اکستروژن پلاستیکها و تولید پروفیل‌های پلاستیکی است.

از جمله مزایای این روش که یکی از باصرفه‌ترین روشهای تولید کامپوزیتهاست، این است که درصد الیاف در آن بالاست و چون الیاف بصورت طولی آرایش می‌یابند، محصول دارای استحکام کششی و فشاری بسیار بالایی است. همچنین سطح محصول نهایی کاملاً صاف است و نیازی به فرآیندهای تکمیلی نیست.

۱-۵ اهمیت و جایگاه دیسک دوار و مواد FGM

اجزاء دوار در صنعت جایگاه ویژه‌ای دارند. با توجه به کارایی و کاربرد روز افزون دیسک دوار در صنعت، ارائه تحلیلی از رفتار و تغییرات این دیسک‌ها در شرایط متفاوت بسیار حائز اهمیت است.

¹ - Filament winding

² - Pultrusion

از جمله کاربردهای دیسک دوار در صنعت می‌توان به کاربردشان در صنایع هوافضا، نیروگاه‌ها، صنایع خودروسازی و... اشاره کرد. که با توجه به کاربردشان در صنایع متفاوت تحت شرایط محیطی متفاوتی قرار دارند. در این بین، تحلیل‌هایی از این دیسک‌ها ارائه شده است که در بخش بعدی به آن‌ها اشاره خواهد شد. با توجه به کاربردهای گوناگون این دیسک‌ها در شرایط محیطی متفاوت، یکی از این شرایط می‌تواند شرایط دمایی متفاوت باشد که به عنوان بار گرمایی اعمالی بر دیسک در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بهبود کارایی و خواص دیسک‌ها که در شرایط دمایی متفاوت کار می‌کنند و تحت بار گرمایی هستند از مواد جدید به نام مواد FGM استفاده می‌شود. FGM مواد کامپوزیتی با ریز ساختار ناهمگن می‌باشند، که خواص مکانیکی آنها بطور ملایم و پیوسته از یک سطح به سطح دیگر جسم تغییر می‌کند. این شیب ملایم باعث می‌شود که خواص ماده بوجود آمده از هر یک از مواد به صورت جداگانه کارایی بهتری داشته باشد. از جمله می‌توان به مقاومت حرارتی، انعطاف پذیری و یا چقرمگی بهتر این ماده نسبت به هریک از ماده‌ها اشاره کرد که کارایی این ماده را در برابر خوردگی، ترک، خستگی، شکست و ... افزایش می‌دهد. زیرا این قطعات آمادگی بالایی جهت واماندگی ناشی از کماتش حرارتی دارند. از دیگر مزایای مواد FGM نسبت به مواد کامپوزیت لایه ای، عدم گسستگی در محل اتصال لایه‌ها می‌باشد، زیرا همانطور که گفته شد در مواد FGM ترکیب سرامیک و فلز پیوسته می‌باشد. جزء فلزی مواد FGM می‌تواند آلومینیوم، مس، کرم، نیکل و یا سرب باشد. قسمت سرامیک نیز می‌تواند از جنس سرامیک بدون اکسید-فلز مانند SiC ، Si_3N_4 ، سرامیک‌های بدون اکسید-فلز ZrC ، TiC ، سرامیک‌های با اکسید- بدون فلز SiO_2 و یا سرامیک‌های با اکسید - با فلز و ZrO_2 انتخاب شود.

۶-۱ روش‌های ساخت مواد FGM

برای تهیه مواد FGM چندین روش وجود دارد، که از جمله آنها می‌توان به مواد زیر اشاره نمود:

۱-۶-۱ $\text{CVD}^1/\text{PVD}^2$ (نشت بخار مواد، توسط روش‌های شیمیایی یا فیزیکی)

روش رسوب یا نشت بخار

انواع مختلفی از تکنیک‌های رسوب بخار وجود دارد، آنها عبارتند از: نشت بخار مواد، رسوب شیمیایی بخار (CVD) و رسوب فیزیکی بخار (PVD) است. روش نشت بخار برای ایجاد چوشش سطحی مواد FGM

¹ - physical Vapor Deposition

² - Chemical Vapor Deposition

استفاده می‌شوند. کیفیت آن‌ها بسیار عالی می‌باشد اما از آن‌ها تنها برای ایجاد پوشش سطحی نازک استفاده می‌شود. از معایب این روش تولید گازهای سمی می‌باشد.

رسوب شیمیایی بخار (CVD): رسوب شیمیایی بخار (CVD) یک فرایند شیمیایی مورد استفاده برای تولید خلوص بالا، کارایی بالا مواد جامد است. این فرایند اغلب در صنعت برای تولید فیلم‌های نازک بکار گرفته می‌شود. در یک فرایند معمولی رسوب شیمیایی بخار (CVD) برای تولید سطح مورد نظر بستر با یک یا چند پیش فرار واکنش نشان می‌دهد و یا بر روی سطح تجزیه می‌شود. فرآیندهای CVD به طور گسترده‌ای در ساخت مواد در اشکال متفاوت از جمله monocrystalline، چندبلوری، آمورف و ... بکار گرفته می‌شود. مواد این عملیات عبارتند از: سیلیکون، کربن فیبر، نانوالیاف کربن، رشته، نانولوله‌های کربنی، سیلیکون، ژرمانیوم، تنگستن، کاربید سیلیکون، نیتريد سیلیکون.

روش CVD می‌تواند تحت خلا و یا فشارهای پایین انجام شود. اگر از فشارهای پایین استفاده شود، رسوب دهی شیمیایی بخار فشار پایین¹ LP-CVD نامیده می‌شود. معمولاً در این سیستم جوانه زنی فاز گازی کاهش می‌یابد و بنابراین برای ساخت فیلم جامد روی زیرپایه و بدون ذرات ناخواسته، مناسب است. فیلم جامد می‌تواند به صورت آمورف، چند بلوری و یا تک بلور با خواص ویژه روی زیرپایه مناسب تهیه شود. راکتور CVD می‌تواند به دو صورت افقی و یا عمودی ساخته شود. هنگامی که راکتور به صورت افقی باشد، جریان گاز به صورت موازی با سطح زیرپایه است و هنگامی که راکتور عمودی باشد، جریان گاز عمود بر سطح زیرپایه است. اخیراً با استفاده از پیش ماده‌های آلی-فلزی، دمای رشد کاهش یافته و بنابراین می‌توان فیلم‌های نازک با کیفیت بهتری تهیه کرد. این روش به رسوب دهی شیمیایی بخار آلی-فلز² (MOCVD) معروف است. می‌توان از منابع پر انرژی مثل پلاسما و یا نور فرابنفش نیز در این روش استفاده کرد که در این صورت به ترتیب رسوب دهی شیمیایی بخار پلاسما³ (PE-CVD) و رسوب دهی شیمیایی بخار فوتونی (Photo-CVD) نامیده می‌شود.

در اکثر فرآیندهای CVD، به دلیل از بین رفتن مواد اولیه و نیز ایجاد ذرات ناخواسته در فیلم ایجاد شده، باید از تشکیل ذرات در فاز گازی جلوگیری کرد. اما تحت شرایط آزمایشی مشخصی مانند ساخت نانوپودرها و یا نانوذرات، تشکیل ذرات در فاز گاز مطلوب است. جوانه زنی در فاز گاز و کنترل رشد ذرات از مهم‌ترین فاکتورهای فرآیند رشد است. توزیع اندازه ذرات توسط تعداد جوانه‌های تشکیل شده در راکتور و غلظت تراکم مواد، کنترل می‌شود. به وسیله افزایش دما و فشار کلی، کاهش سرعت جریان کلی و ترکیب محلی

¹ - Low pressure chemical vapor deposition

² - Metal Organic Chemical Vapor Deposition

³ - Plasma Enhanced CVD

فاز گاز به نظر می‌رسد می‌توان تعادلات فاز گازی همگن را به دست آورد. این یکی از ویژگی‌های راکتور با دیواره گرم است. تحت این شرایط، حالت فوق اشباعی در فاز گاز به دست می‌آید.

روش رسوب فیزیکی بخار (PVD) شامل انتقال مواد در سطح اتمی است. این روش، یک روش جایگزین برای آبرکاری الکتریکی است. این فرایند شبیه فرایند رسوب شیمیایی بخار است با این تفاوت که در رسوب بخار فیزیکی مواد یا پیش مواد برای تولید لایه مد نظر به صورت جامد وارد دستگاه یا محفظه واکنش می‌شود اما در حالت رسوب شیمیایی این مواد در حالت گازی وارد محفظه می‌شود.

روش رسوب فیزیکی بخار بیشتر برای تولید فیلم‌های نازک استفاده می‌شود. فیلم نازک اغلب برای پوشش‌های با ضخامت کمتر از 100 nm استفاده می‌شود. اخیراً از این روش برای تولید نانوذررات نیز استفاده شده است. در این روش ماده مورد نظر تبخیر شده و روی زیرپایه نشاندن می‌شود.

نشست فیلم‌ها و پوشش‌های مختلف یعنی تبخیر اتم‌ها، مولکول‌ها و یا خوشه‌های اتمی ترکیبات مورد نظر از سطح با استفاده از روش‌های مختلف تبخیر و نشاندن آن‌ها روی زیرپایه. منبع اتم‌ها و مولکول‌ها می‌تواند به صورت گازی، مایع و یا جامد باشد. تبخیر اتم‌ها و مولکول‌ها از هدف به وسیله منابع حرارتی انجام می‌شود برای این منظور باید ماده اولیه تا رسیدن به فشار بخار مشخصی حرارت داده شوند. همچنین می‌توان از باریکه‌های پراش الکترون‌ها و فوتون‌ها برای تبخیر مواد اولیه استفاده کرد. روش PVD با روش CVD متفاوت است. روش رسوب فیزیکی بخار این روش بر پایه واکنش‌های فیزیکی است و در این روش با استفاده از منابع بخار و یا مایع، اتم‌ها و مولکول‌های واکنش دهنده را به وجود می‌آورند.

اتم‌های تولید شده از منبع به سمت زیرپایه حرکت می‌کنند. انتقال آن‌ها به سطح زیرپایه، به فشار درونی محفظه رسوب دهی بستگی دارد. میانگین پویش آزاد به معنی میانگین فاصله ای است که اتم‌ها و یا مولکول‌ها قبل از برخورد به اتم یا مولکول گازی دیگر، طی می‌کنند. این فاصله با سطح مقطع برخورد اتمی و غلظت مولکول‌های گاز رابطه عکس دارد. بنابراین میانگین پویش آزاد با فشار رابطه عکس دارد. اگر فاصله بین منبع و زیرپایه L باشد، مقدار عدد کونادسن ($Kn=L/\lambda$) نحوه انجام واکنش‌ها را در حین فرآیند نشان می‌دهد:

- اگر $Kn < 0.01$ باشد، فرآیند رسوب به آرامی انجام می‌شود.

- اگر $Kn < 1$ سرعت رسوب مطلوب بوده و فرآیند رسوب به راحتی انجام می‌شود.

- اگر $Kn > 1$ ، اتم‌ها و مولکول‌های گازی، به سرعت با یکدیگر و با دیواره‌های محفظه برخورد کرده و قبل از رسوب روی زیرپایه مورد نظر، روی دیواره‌های محفظه می‌نشینند. سرعت رسوب و یکنواختی فیلم

نازک تشکیل شده، به سرعت جریان بخار ایجاد شده بستگی دارد. معمولاً فرآیند رسوب فیزیکی بخار طی مراحل زیر انجام می شود:

۱- جذب اتم ها و یا مولکول ها روی سطح زیرپایه

۲- نفوذ افقی مواد جذب شده روی سطح

۳- تشکیل پیوند با یکدیگر و نیز با اتم های زیرپایه

۴- جوانه زنی اتم ها و متراکم شدن آن ها

۵- ایجاد ساختار های بلوری توسعه یافته و تشکیل میکرو ساختارها

در مرحله (۱) جذب بخار به صورت فیزیکی و یا شیمیایی صورت می گیرد. فیلم ایجاد شده، چسبندگی قابل توجهی دارد. چسبندگی و مقاومت فیلم ایجاد شده به وسیله PVD بیشتر از روش های CVD و فرآیندهای محلول است.

یکی از محدودیت های روش PVD این است که برای ایجاد فیلم یکنواخت، باید سطح زیرپایه مسطح باشد. زیرا فرآیند نشست، در سطح کاملاً صاف انجام می شود. نفوذ سطحی گونه های جذب شده در مرحله (۲) اجازه می دهد تا در مرحله (۳) جایگاه مناسبی را برای ترکیب با پیرامون خود، پیدا کند. بنابراین ساختار فیلم ایجاد شده از پایداری و استحکام زیادی برخوردار است.

در هنگامی که اتم های فیلم با اتم های زیرپایه پیوند مناسبی نداشته باشند، جوانه های سه بعدی ایجاد می شود. تحرک این جوانه ها و فرآیند استوالد، جوانه های بزرگتری را ایجاد می کند. در نتیجه چگالی فیلم نهایی کاهش می یابد. در مواردی که از سرعت های زیاد نشست استفاده می شود، باید مراقبت های ویژه ای صورت گیرد تا فیلم یکنواخت و صافی ایجاد شود. برای تشکیل فیلم یکنواخت باید از جوانه زنی و فرآیند های لخته شدن جلوگیری به عمل آید. برای این کار از زیرپایه های با دمای پایین استفاده می کنند تا از نفوذ سطحی جلوگیری کنند.

T_h برابر با نسبت دمای زیرپایه و نقطه ذوب فیلم ایجاد شده است. رشد فیلم با مورفولوژی مختلف بستگی به دمای رشد فیلم دارد:

- اگر $T_h \leq 0.3$ و نفوذ سطحی ناچیز باشد، ساختارهای ستونی شکل (با قطر ده ها نانومتر) ایجاد می شود.

- اگر $T_h < 0.5$ قطر ساختار های ستونی افزایش می یابد. همچنین به دلیل افزایش نفوذ سطحی پیوند های محکمی بین آن ها ایجاد می شود.

- اگر $T_h > 0.5$ فیلم یکنواختی تشکیل می شود. سرعت رسوب و یکنواختی فیلم نازک تشکیل شده، به سرعت جریان بخار ایجاد شده بستگی دارد.

Plasma Spray ۲-۶-۱

پلازما^۱ حالتی از ماده است که در دمای خیلی بالا بوجود می آید و ساختارهای مولکولی مفهوم خود را در این وضعیت از دست می دهند. گازهایی که تا حد زیادی یونیزه هستند رساناهای خوبی برای الکتریسته هستند. علاوه بر آن حرکت ذرات باردار گازها هم می تواند میدان الکترومغناطیسی تولید کند. (تابش موج). در حالت پلازما اتم ها و ذرات ریز اتمی مانند الکترون و پروتون و نوترون آزادانه در محیط حرکت می کنند و تغییر موقعیت می دهند. پلازما در فیزیک، یک محیط رسانای الکتریکی است که تعداد ذرات باردار مثبت و منفی آن تقریباً با هم برابرند و زمانی ایجاد می شود که اتم ها در گاز یونیزه می شوند.

گاهی به پلازما حالت چهارم ماده اطلاق می شود که از حالت های سه گانه جامد، مایع، گاز متمایز است. این روش از پر استفاده ترین روش ها در صنعت می باشد که علت آن ارزان بودن سرعت بالای پوشش می باشد در واقع پلازما اسپری روش مناسب برای ایجاد پوشش های دیر گداز و مقاوم به سایش و خوردگی با کیفیتی مناسب می باشد و به عنوان مثال از آن برای پوشش دهی انواع سرامیک ها بر روی غلطک ها استفاده می گردد و عملکرد آن به این صورت است که تفنگ پلاسمایی متشکل از یک آند مسی به صورت آبگرد و یک کاتد تنگستنی و نازل مواد پوشان می باشد طرز کار به این صورت است که ابتدا اختلاف پتانسیلی بین آند و کاتد برقرار شده و سپس گاز بین آند و کاتد یونیزه شده و با برقراری جریان برق گاز به شدت گرم می گردد و حجم آن اضافه می شود در این حال گاز با فشار از دهانه تفنگ خارج شده که اگر ماده پوشان به صورت پودر باشد ذرات ماده پوشان در دهانه خروجی تفنگ به درون شعله تغذیه می گردد و اگر به صورت سیم باشد از عقب تفنگ و به کمک چند غلطک وارد قسمت پلازما می گردد. پی از ورود ذرات به درون شعله پلازما این ذرات بر حسب اندازه ای که دارند ذوب و یا نیمه مذاب می شوند و با سرعت بر روی سطح زیر لایه برخورد می کنند تا پوشش تشکیل شود. شرایط ایده آل شرایطی است که دمای ذرات بر روی سطح برابر نقطه ذوب آنها باشد. در پاشش پلازما مواد پودری توسط پلازما ذوب شده و با انرژی جنبشی زیاد به سطح قطعه پاشیده می شوند.

در سال ۱۹۱۰ اولین دستگاه اسپری حرارتی توسط دکتر شوب ساخته شد. در سال ۱۹۷۵ اولین مشعلهای اسپری پلازما ساخته شده است. پوشش های پلازما اسپری، جهت محافظت سطح قطعات در برابر عواملی مانند دمای بالا، خوردگی داغ، خوردگی دمای محیط و فرسایش مورد استفاده قرار می گیرند، این پوشش ها در صنایع مختلف از جمله صنایع نفت، نساجی، فولاد، نیروگاهی، شیمیایی و ... کاربرد فراوان دارند.

¹ - PLASMA

پلازما توسط ایجاد قوس در گاز آرگون، هلیوم، نیتروژن، هیدروژن و یا ترکیبی از آنها ایجاد می‌گردد. در این حالت قوس بین یک الکتروود مرکزی تنگستن و نازل خنک شونده با آب ایجاد می‌گردد. در ناحیه قوس گاز یونیزه شده و با سرعت بالا بسمت قطعه کار از نازل خارج می‌گردد. ذرات توسط گاز پلازما همزمان ذوب شده و بسمت قطعه شتاب می‌گیرند. در روش پلازما اسپری گاز تشکیل دهنده پلازما دردمایی در حدود ۱۵۰۰۰ درجه سانتیگراد حاصل خواهد شد و مولکولهای منبسط شده گاز با سرعتی نزدیک به صوت ذرات ماده پوشش بصورت پودر را که ذوب شده اند، به سمت سطح قطعه خواهند راند و بدین ترتیب پوششی متراکم باچسبندگی بالا حاصل خواهد شد.

در مشعل پلازما قوسی ما بین کاتد تنگستنی با نوک مخروطی شکل و یک نازل مسی به عنوان آند ایجاد می‌شود. پلازما در نوک کاتد ایجاد گشته و بخشی از گاز پلازما که در امتداد کاتد تزریق شده در ستون پلازما پمپ می‌شود. این ستون در اثر سرد شدن کناره‌ها تثبیت خواهد شد. سرد شدن توسط بخش سرد گاز پلازما و دیواره‌های آند مسی که با آب خنک می‌شوند، انجام می‌پذیرد. زمانی که لایه مرزی سرد که در نزدیکی دیواره است به قدر کافی بوسیله لایه مرزی داغ ستون پلازما گرم شد، این ستون آشفته خواهد شد و در دیواره آند قوس زده می‌شود.

۷-۱ انواع اسپری

۱-۷-۱ اسپری قوسی سیمی

در این روش ماده پوشش دهنده مواد فلزی هستند و فقط به صورت سیم می‌باشند. این روش با رسیدن دو الکتروود مجزا با بار الکتریکی مخالف به طور اتوماتیک در جریانی از هوای اتمیزه و ایجاد قوس بین دو سیم در اثر برقراری اختلاف پتانسیل مابین دو سیم و ذوب کردن سرهای دو الکتروود انجام می‌پذیرد. پاشش ماده مذاب توسط جریانی از هوا یا گاز اتمیزه شده انجام می‌گیرد. از مهم‌ترین مزایای این روش می‌توان به بالا بودن سرعت پوشش اشاره کرد. از این روش برای پوشش‌های ضخیم بر روی سطوح بزرگ استفاده می‌شود.

۲-۷-۱ پلازما اسپری با انرژی بالا

در این روش در ناحیه گرمایش پودر، دما و آنتالپی بالاست. توان و جریان گاز بالاتر سبب افزایش زیاد دمای پودر و متعاقب آن کاهش برهمکنش هوا با پلازما در قسمت خروجی نازل می‌گردد. در این روش دو نوع قوس وجود دارد. تفاوت قوس Non-Transfer و قوس Transfer. در قوس Non-Transfer قسمت اعظم