



دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک
گرایش طراحی کاربردی

عنوان پایان نامه

تحلیل استاتیکی پوسته استوانه ای باز ارتوتروپیک هدفمند (FGM)

استاد راهنما:

دکتر محمدحسین یاس

نگارش: سهراب تنهاقزلی

مهرماه ۱۳۸۸

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و
نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه
متعلق به دانشگاه رازی است.



دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک
گرایش طراحی کاربردی

عنوان پایان نامه

تحلیل استاتیکی پوسته استوانه ای باز ارتوتروپیک هدفمند (FGM)

استاد راهنما:

دکتر محمدحسین یاس

نگارش: سهراب تنهاقزلی

مهرماه ۱۳۸۸

تشکر و قدردانی:

از زحمات بی‌دریغ استاد راهنمای عزیزم جناب آقای دکتر محمدحسین یاس که در طول انجام پروژه با رهنمودهای خود مرا در انجام آن یاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تقدیم به پدر
و مادرم

چکیده

آنچه در این پروژه مورد بررسی و تحلیل تنش قرار می‌گیرد، پوسته استوانه‌ای باز¹ با طول نامحدود می‌باشد که شرایط بارگذاری آن به صورت فشار داخلی و یا خارجی می‌باشد. علاوه بر آنکه جنس ورق به صورت ارتوتروپیک و هدفمند می‌باشد، با توجه به هندسه پوسته، مساله به صورت کرنش صفحه ای می‌باشد. برای ایجاد شرایط همزمان ارتوتروپیک و هدفمند، ماده به صورت مرکب در نظر گرفته می‌شود به نحوی که درصد الیاف نسبت به زمینه در راستای شعاع متغیر باشد و این تغییر می‌تواند وابسته به یکی از توابع مانند تابع غیرخطی، توانی و یا نمایی باشد. لازم به ذکر است که در این پروژه فرض بر آن است که الیاف ماده مرکب همراستا با محور طولی استوانه و یا کاملاً عمود بر آن باشد. معادلات حاکم از روش اجزای محدود و با استفاده از روش حداقل انرژی پتانسیل استخراج گردیده است. در گام بعدی رفتار استاتیکی پوسته هدفمند با استفاده از تابع توانی بررسی می‌گردد. در این حالت نیز مانند حالت قبل از روش اجزای محدود و حداقل انرژی پتانسیل استفاده شده است. در نهایت، رفتار استاتیکی پوسته هدفمند ارتوتروپیک برای مقادیر متفاوت از توان هدفمند و بارگذاری‌های متفاوت در توابع غیرخطی و توانی بحث شده و نتایج عددی با مراجع موجود مقایسه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: مواد هدفمند، پوسته استوانه‌ای باز، روش المان محدود، کرنش صفحه‌ای

¹ panel

فهرست مطالب

| موضوع | صفحه |
|---|------|
| فصل اول | |
| معرفی مواد هدفمند و روابط حاکم بر آنها..... | ۱ |
| ۱-۱- مقدمه..... | ۲ |
| ۲-۱- مواد هدفمند و روش‌های تولید آنها..... | ۳ |
| الف. روش متالورژی پودر..... | ۶ |
| ب. روش پلاسماجت..... | ۷ |
| ج. روش گریزاز مرکز..... | ۷ |
| د. روش رسوب شیمیایی - فیزیکی..... | ۸ |
| ه. روش‌های الکتروفیزیکی..... | ۹ |
| ۱-۲-۱- مدل‌های ریاضی به منظور بیان خواص مکانیکی ماده هدفمند..... | ۱۰ |
| فصل دوم | |
| مروری بر تحقیقات گذشته..... | ۱۴ |
| فصل سوم | |
| تحلیل سه بعدی استاتیکی پوسته استوانه‌ای هدفمندار توتروپیک تحت بارگذاری مکانیکی..... | ۱۷ |
| ۱-۳- مقدمه..... | ۱۸ |
| ۲-۳- روابط حاکم..... | ۱۹ |
| ۳-۱-۲- روابط حاکم بر ماده هدفمند با تابع غیر خطی..... | ۲۵ |
| ۳-۲-۲- روابط حاکم بر ماده هدفمند با تابع توانی..... | ۲۷ |
| ۳-۳- استخراج معادلات اجزای محدود..... | ۲۸ |
| ۳-۳-۱- روش حداقل انرژی پتانسیل..... | ۳۴ |
| فصل چهارم | |
| بحث و نتایج عددی..... | ۴۰ |
| ۱-۴- مقدمه..... | ۴۱ |
| ۲-۴- مثال اول..... | ۴۲ |
| ۳-۴- مثال دوم..... | ۴۷ |
| ۴-۴- مثال سوم..... | ۵۷ |
| ۵-۴- مثال چهارم..... | ۶۱ |

| | |
|----|--------------------------------------|
| ۷۱ | ۴-۶- مثال پنجم..... |
| ۷۵ | ۴-۷- نتیجه گیری و بحث..... |
| ۷۷ | ۴-۸- نتیجه گیری نهایی..... |
| ۷۸ | ۴-۹- پیشنهادهایی برای ادامه کار..... |
| ۷۹ | فهرست مراجع..... |
| ۸۲ | چکیده انگلیسی..... |

فهرست جدول‌ها و نمودارها

صفحه

الف) فهرست جدول‌ها

جدول ۳-۱ خواص مکانیکی مس و تنگستن ۲۶

ب) فهرست نمودارها

- شکل ۴-۱- تغییرات تغییر مکان محیطی در راستای ضخامت برای مقادیر مختلف l در $\theta = \theta_0/4$ ۴۴
- شکل ۴-۲- تغییرات تنش شعاعی در راستای ضخامت برای مقادیر مختلف l در $\theta = \theta_0/4$ ۴۵
- شکل ۴-۳- مقایسه نتایج به دست آمده (شکل ۴-۱) با نتایج مرجع (۲۷) ۴۵
- شکل ۴-۴- مقایسه نتایج به دست آمده (شکل ۴-۲) با نتایج مرجع (۲۷) ۴۶
- شکل ۴-۵- تغییرات تغییر مکان محیطی در راستای محیطی بر روی سطح داخلی استوانه برای $l = 5$ ۵۰
- شکل ۴-۶- تغییرات تغییر مکان محیطی در راستای محیطی بر روی سطح خارجی استوانه برای $l = 5$ ۵۰
- شکل ۴-۷- تغییرات تغییر مکان شعاعی در راستای ضخامت در $(\theta = \theta_0/2)$ برای $l = 5$ ۵۱
- شکل ۴-۸- تغییرات تغییر مکان شعاعی در راستای محیطی بر روی سطح خارجی استوانه برای $l = 5$ ۵۱
- شکل ۴-۹- تغییرات تنش شعاعی در راستای ضخامت در $(\theta = \theta_0/2)$ برای $l = 5$ ۵۲
- شکل ۴-۱۰- تغییرات تنش محیطی در راستای ضخامت در $(\theta = \theta_0/2)$ برای $l = 5$ ۵۲
- شکل ۴-۱۱- تغییرات تنش شعاعی در راستای محیطی در سطح داخلی استوانه برای $l = 5$ ۵۳
- شکل ۴-۱۲- تغییرات تنش محیطی در راستای محیطی در سطح داخلی استوانه برای $l = 5$ ۵۳
- شکل ۴-۱۳- تغییرات تنش شعاعی در راستای محیطی بر روی سطح خارجی استوانه برای $l = 5$ ۵۴
- شکل ۴-۱۴- تغییرات تنش محیطی در راستای محیطی بر روی سطح خارجی استوانه برای $l = 5$ ۵۴
- شکل ۴-۱۵- تغییرات تنش محیطی در راستای محیطی در سطح میانی استوانه برای $l = 5$ ۵۵
- شکل ۴-۱۶- تغییرات تنش برشی در راستای ضخامت در $(\theta = 3\theta_0/4)$ برای $l = 5$ ۵۵
- شکل ۴-۱۷- تغییرات تنش برشی در راستای محیطی در سطح میانی استوانه برای $l = 5$ ۵۶
- شکل ۴-۱۸- تغییرات تنش برشی در راستای ضخامت $(\theta = \theta_0/4)$ برای $l = 5$ ۵۶
- شکل ۴-۱۹- تغییرات تغییر مکان شعاعی در راستای ضخامت در $(\theta = \theta_0/2)$ برای توانهای مختلف l ۵۸
- شکل ۴-۲۰- تغییرات تغییر مکان محیطی در راستای محیطی بر روی سطح خارجی برای توانهای مختلف l ۵۹
- شکل ۴-۲۱- تغییرات تنش شعاعی در راستای ضخامت در $(\theta = \theta_0/2)$ برای توانهای مختلف l ۵۹
- شکل ۴-۲۲- تغییرات تنش محیطی در راستای ضخامت در $(\theta = \theta_0/2)$ برای توانهای مختلف l ۶۰
- شکل ۴-۲۳- تغییرات تغییر مکان محیطی در راستای محیطی بر روی سطح خارجی برای $d=2$ ۶۴
- شکل ۴-۲۴- تغییرات تغییر مکان محیطی در راستای محیطی بر روی سطح داخلی استوانه برای $d=2$ ۶۴
- شکل ۴-۲۵- تغییرات تغییر مکان شعاعی در راستای ضخامت در $(\theta = \theta_0/2)$ برای $d=2$ ۶۵
- شکل ۴-۲۶- تغییرات تغییر مکان شعاعی در راستای محیطی بر روی سطح خارجی برای $d=2$ ۶۵
- شکل ۴-۲۷- تغییرات تنش شعاعی در راستای ضخامت در $(\theta = \theta_0/2)$ برای $d=2$ ۶۶
- شکل ۴-۲۸- تغییرات تنش محیطی در راستای ضخامت در $(\theta = \theta_0/2)$ برای $d=2$ ۶۶
- شکل ۴-۲۹- تغییرات تنش شعاعی در راستای محیطی در شعاع میانی استوانه برای $d=2$ ۶۷
- شکل ۴-۳۰- تغییرات تنش محیطی در راستای محیطی بر روی سطح داخلی استوانه برای $d=2$ ۶۷

- شکل ۴-۳۱- تغییرات تنش شعاعی در راستای محیطی بر روی سطح خارجی برای $d=2$ ۶۸
- شکل ۴-۳۲- تغییرات تنش محیطی در راستای محیطی بر روی سطح خارجی استوانه برای $d=2$ ۶۸
- شکل ۴-۳۳- تغییرات تنش محیطی در راستای محیطی در شعاع میانی استوانه برای $d=2$ ۶۹
- شکل ۴-۳۴- تغییرات تنش برشی در راستای ضخامت در $(\theta = \theta/4)$ برای $d=2$ ۶۹
- شکل ۴-۳۵- تغییرات تنش برشی در راستای ضخامت در $(\theta = 3\theta/4)$ برای $d=2$ ۷۰
- شکل ۴-۳۶- تغییرات تنش برشی در راستای محیطی در شعاع میانی استوانه برای $d=2$ ۷۰
- شکل ۴-۳۷- تغییرات تغییر مکان شعاعی در راستای ضخامت در $(\theta = \theta/2)$ برای توانهای مختلف d ۷۲
- شکل ۴-۳۸- تغییرات تغییر مکان محیطی در راستای محیطی بر روی سطح خارجی استوانه برای توانهای مختلف d ۷۳
- شکل ۴-۳۹- تغییرات تنش شعاعی در راستای ضخامت در $(\theta = \theta/2)$ برای توانهای مختلف d ۷۳
- شکل ۴-۴۰- تغییرات تنش محیطی در راستای ضخامت در $(\theta = \theta/2)$ برای توانهای مختلف d ۷۴

فهرست علائم:

| | |
|----------------------|---|
| C | تانسور سختی الاستیک (N/m^2) |
| C_{ij} | مولفه‌های تانسور سختی الاستیک (N/m^2) |
| C_{ij}^0 | ثابت‌های تانسور سختی الاستیک (N/m^2) |
| E | مدول یانگ (N/m^2) |
| R_a | شعاع داخلی استوانه (m) |
| R_b | شعاع خارجی استوانه (m) |
| U_i | تغییر مکان شعاعی گره i ام (m) |
| V_i | تغییر مکان محیطی گره i ام (m) |
| U_r | مولفه‌های شعاعی بردار تغییر مکان (m) |
| U_θ | مولفه‌های محوری بردار تغییر مکان (m) |
| ε | تانسور کرنش |
| ε_r | کرنش شعاعی |
| ε_θ | کرنش محیطی |
| ε_z | کرنش محوری |
| ε_{rz} | کرنش برشی |
| σ | تانسور تنش (N/m^2) |
| σ_r | تنش شعاعی (N/m^2) |
| σ_z | تنش محوری (N/m^2) |
| σ_θ | تنش محیطی (N/m^2) |
| $\sigma_{r\theta}$ | تنش برشی (N/m^2) |
| ν | ضریب پواسون |
| G | ضریب الاستیسیته برشی (N/m^2) |
| ρ | مولفه شعاعی مختصات محلی |
| φ | مولفه محوری مختصات محلی |
| r_i | مولفه شعاعی مختصات قطبی هر المان |
| θ_i | مولفه محیطی مختصات قطبی هر المان |
| e_r | تعداد المان‌ها در راستای شعاعی |
| e_θ | تعداد المان‌ها در راستای شعاعی |
| u_e | تابع تغییر مکان شعاعی هر المان |
| v_e | تابع تغییر مکان محیطی هر المان |
| N_i | تابع شکل مود |
| \prod_n | انرژی پتانسیل هر المان |
| q_n | بردار تغییر مکان در المان n ام |
| K_n | ماتریس سختی هر المان (N/m) |
| F_r | فشار خارجی وارد بر استوانه |

| | |
|------------|--|
| P_n | برآیند نیروهای مکانیکی مرزی (N) |
| Q | تغییر مکان کل گره‌ها (m) |
| k | ماتریس سختی کل سیستم (N/m) |
| p | نیروی وارد بر کل گره‌ها |
| n_r | تعداد گره‌ها در راستای شعاع |
| n_θ | تعداد گره‌ها در راستای محیطی |
| l | توان رابطه توانی تغییر خواص ماده هدفمند |
| d | توان رابطه غیرخطی تغییر خواص ماده هدفمند |

فصل اول

معرفی مواد هدفمند و روابط حاکم بر آنها

۱-۱- مقدمه:

با گسترش روزافزون علوم و فنون و در همین ارتباط تکنولوژی نوین، شناخت و به کارگیری مواد نو در صنایع، روز به روز از اهمیت بیشتری برخوردار می‌شود. در این راستا تحقیقات صنعتی و دانشگاهی، توجه خاصی به شناخت، تولید و گسترش مواد نو دارند. به کارگیری مواد کامپوزیت، آلیاژهای حافظه‌دار و مواد پیزوالکتریک و... و گسترش دامنه استفاده از این مواد از جمله تلاش‌های محقق جهت نیل به اهداف فوق می‌باشد. به طور کلی هر یک از مواد مورد اشاره دارای ویژگی و خواصی هستند که هر دسته را محدود می‌نماید. مواد نو که در سال‌های اخیر تولید و مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

- مواد کامپوزیت^۱

- آلیاژهای حافظه‌دار^۲

- مواد پیزوالکتریک^۳

- نانو مواد^۴

- مواد هدفمند^۵

گسترش به کارگیری این مواد در صنایع باعث گردیده فعالیت‌های علمی و صنعتی بی‌شماری در زمینه‌های تولید و بررسی خواص متالورژیکی و همچنین تحلیل و به کارگیری این نوع مواد در سازه‌ها و اجزا مکانیکی صورت گیرد.

یک دسته از این مواد نو، مواد هدفمند هستند که در بخش‌های بعد در این فصل به خواص و کاربردهای این مواد، بیشتر پرداخته می‌شود.

¹ Composites

² Shape memory alloy

³ piezoelectricity material

⁴ Nanomaterial

⁵ Functoinally garded material

۱-۲- مواد هدفمند و روش‌های تولید:

در سال‌های اخیر با توسعه موتورهای پرقدرت صنایع هوافضا، توربین‌ها و راکتورها و دیگر ماشین‌ها نیاز به موادی با مقاومت حرارتی بالا و مقاومتر از لحاظ مکانیکی احساس شده است. در سال‌های قبل، در صنایع هوافضا از مواد سرامیکی خالص جهت پوشش و روکش قطعات با درجه کارکرد بالا استفاده می‌شد. این مواد، عایق‌های بسیار خوبی بودند ولی مقاومت زیادی در برابر تنش‌های پسماند نداشتند. تنش‌های پسماند در این مواد مشکلات زیادی از جمله ایجاد حفره و ترک می‌نمود. بعدها برای رفع این مشکل از مواد کامپوزیت لایه‌ای استفاده شد. تنش‌های حرارتی در این مواد نیز موجب پدیده لایه لایه شدن می‌گردید. با توجه به این مشکلات طرح ماده‌های مرکب که هم مقاومت حرارتی و مکانیکی بالا داشته و هم مشکل لایه لایه شدن نداشته باشد، ضرورت پیدا کرد. بنابر مشکلاتی که در صنایع مختلف برای مواد تحت تنش‌های حرارتی بالا وجود داشت، دانشمندان علم مواد در ۱۹۸۴ در منطقه سندایی ژاپن برای اولین بار مواد هدفمند^۶ را به عنوان مواد با تحمل حرارتی بالا پیشنهاد نمودند.

مواد هدفمند، مواد مرکب با ریزساختار ناهمگن می‌باشند، که خواص مکانیکی آنها بطور ملایم و پیوسته از یک سطح به سطح دیگر جسم تغییر می‌کند. نوع رایج آن ترکیب پیوسته‌ای از سرامیک و فلز می‌باشد. این مواد از اختلاط پودر فلز و سرامیک به دست می‌آیند. تغییر فلز و سرامیک از یک سطح به سطح دیگر کاملاً پیوسته می‌باشد. بگونه‌ای که یک سطح از جنس سرامیک خالص و یک سطح فلز خالص است. بین دو سطح ترکیب پیوسته‌ای از هر دو می‌باشد، ماده ساختاری سرامیک به علت ضریب انتقال حرارت کم و مقاومت زیاد در مقابل درجه حرارت، درجات حرارت بسیار بالا را تحمل کرده و ماده ساختاری فلز انعطاف پذیری لازم را فراهم می‌کند. به علاوه اختلاط سرامیک و فلز با تغییرات پیوسته از یک سطح تا سطح دیگر در یک سازه به آسانی قابل ساختن می‌باشد. به علت تغییرات پیوسته خواص مکانیکی، مشکلات عدم پیوستگی که در سازه‌های کامپوزیت وجود دارد در مواد هدفمند به وجود نمی‌آید. این مواد ابتدا برای ایجاد سپر حرارتی در سازه‌های مختلف است. خواص مکانیکی نیز با توجه به نوع ترکیب تغییرات پیوسته‌ای در جهت ضخامت دارد. این مواد با توجه به پیوستگی ترکیب مواد تشکیل دهنده دارای خواص مکانیکی موثری نسبت به مواد مرکب لایه‌ای می‌باشد. در حال حاضر از این مواد برای سازه‌هایی که در مقابل درجات حرارت بالا باید مقاوم باشند استفاده می‌شود.

مهمترین مزایای این مواد عبارتند از:

- قابلیت بالای مقاومت حرارتی
- قابلیت بالای مقاومت مکانیکی
- قابلیت بالای مقاومت خوردگی

⁶-Functionally graded material

- تولید این نوع مواد منطبق با شرایط بهینه

همانطور که مشخص است از مهمترین مزایای این ماده می‌توان به قابلیت مقاومت بالا در برابر بارهای حرارتی و مکانیکی اشاره نمود که قابلیت تحمل تنش‌های حرارتی و مکانیکی در این مواد نسبت به سایر مواد بیشتر به چشم می‌خورد. علاوه بر کاربرد وسیع این ماده در صنایع هوا و فضا می‌توان به موارد دیگری از مصارف این ماده در صنایع مانند:

- به کارگیری در راکتورهای صنایع هسته‌ای

- تولید پره‌های توربین

- تولید ابزار برش

- به کارگیری در سیستم‌های تبدیل انرژی

- به کارگیری در مهندسی پزشکی

- سیلندر موتورهای احتراق داخلی

اشاره نمود. [۱-۵] زمینه‌های کاربرد مواد هدفمند به علت خواص ذکر شده بسیار متنوع می‌باشد که علاوه بر موارد فوق می‌توان به صنایع نظامی اشاره کرد. زیرا مواد هدفمند دارای سختی بیشتر و همچنین ویسکوزیته ضربه^۷ بیشتر می‌باشند که گاه برای تخریب آن نیرویی ۲۰ برابر فلز همگن لازم است و ویسکوزیته ضربه آن نیز ۳ برابر آلایزهای سخت بیشتر است. همچنین در بیومکانیک در جایگزینی استخوان‌ها و مفاصل و کاشت دندان از مواد هدفمند به علت افزایش استحکام و مقاومت سطحی بالا استفاده می‌شود. و از کاربردهای دیگر می‌توان به استفاده از مواد هدفمند در مواد ترموالکتریک^۸ برای استفاده از انرژی خورشیدی، و در مواد نیمه‌رسانا^۹ برای جلوگیری از اتلاف انرژی، و همچنین استفاده در اپتوالکتریک^{۱۰} در سیستم‌های ارتباطات نوری و... اشاره کرد.

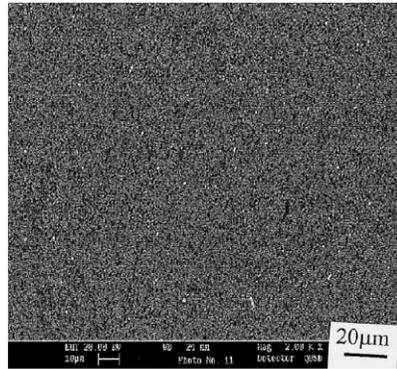
خواص مکانیکی مواد هدفمند شامل: مدول الاستیسیته، چگالی، ضریب انتقال حرارت هدایتی به صورت تابعی پیوسته می‌باشد. به عبارت دیگر ریزساختار این مواد به گونه‌ای است که به صورت پیوسته و تدریجی از یک ماده، در راستایی مشخص به ماده‌ای متفاوت میل می‌کند. در برخی از این مواد، خواص مکانیکی و نیز ریز ساختار آن، از ماده سرامیکی به سمت ماده فلزی میل می‌کند که این دسته از مواد هدفمند بیشترین کاربرد را در ارتباط با تحمل تنش‌های حرارتی دارا می‌باشند. همانطور که در شکل (۱) مشخص است در هیچ نقطه‌ای از این ماده گسستگی یا انفصال در زیر ساختار مشاهده نمی‌شود و تغییرات به صورت کاملاً یکنواخت و با نرخ مشخص به صورت پیوسته می‌باشد. [۶]

⁷-Impact viscosity

⁸-Thermoelectric

⁹- Semiconductor

¹⁰-Optoelectronic



شکل (۱) - پیوستگی ساختار مواد هدفمند [۶]

جزء فلزی مواد هدفمند 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 Al_2O_3 و ZrO_2 انتخاب شود.

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

- ۱- روش متالورژی پودر^{۱۱}
- ۲- روش پلاسما جت^{۱۲}
- ۳- روش گریز از مرکز^{۱۳}
- ۴- رسوب بخار شیمیایی- فیزیکی^{۱۴}
- ۵- روش الکترو فیزیکی^{۱۵}

الف: روش متالورژی پودر:

در این روش ماده هدفمند از قرار گرفتن مناسب لایه‌های پودر ترکیبی ازدو نوع ماده مختلف تحت فشار و دمای مناسب ایجاد می‌شود. نخست بر روی لایه خالص از یک ماده، لایه دیگر با درصد کمی از ماده دوم قرار می‌گیرد. این روند تا آنجایی ادامه پیدا می‌کند که پودر لایه نهایی کاملاً از ماده دوم تشکیل شده

¹¹ - Powder metallurgy

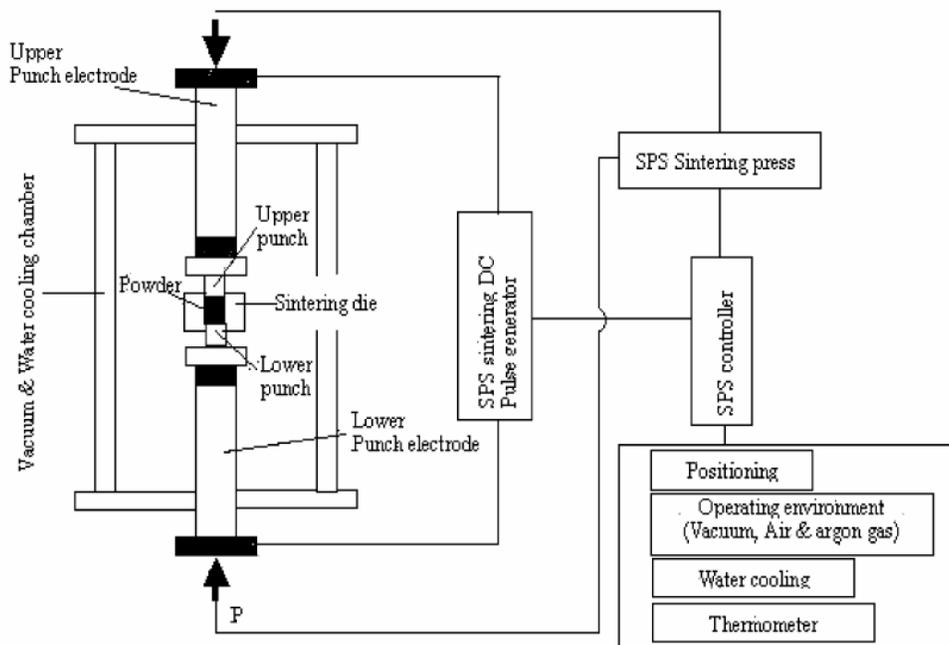
¹² - Plasma jet

¹³ - Centrifugal method

¹⁴ - Chemical/physical vapor deposition

¹⁵ - Electro physical method

باشد، شکل (۲). بسته به شکل هندسی که قرار است با این روش تولید شود لایه‌ها در قالبی مناسب مطابق روش بیان شده، قرار می‌گیرند و پس از چیدمان مناسب لایه‌ها عمل فشردن و تف جوشی در دماهای بالا در یک اتمسفر کنترل شده، انجام پذیرفته و ماده هدفمند متراکم، جوش خورده و به صورت ساختمان همگن محکمی پیوند می‌خورد. [۷]



شکل (۲)-شما تیک روش تولید ماده هدفمند با استفاده از روش متالورژی پودر [۷]

ب: روش پلاسما جت:

در این روش ابتدا جت سیال با فشار، حرارت و سرعت معین به سطح مشخص هدایت خواهد شد. پس از تزریق پودر خالص از ماده اول به داخل جت سیال، به دلیل فشار و حرارت جت، پودر ماده اول بر سطح مورد نظر می‌چسبد، شکل (۳). پس از گذشت مدت زمان مشخص درصد معین و محدودی از ماده دوم به ماده اول اضافه می‌شود. لازم به ذکر است این عملیات به صورت یکنواخت و کاملاً پیوسته انجام می‌گیرد به عبارت دیگر اضافه شدن ماده دوم به همان میزان کم شدن ماده اول تا زمانی ادامه پیدا خواهد کرد تا پودر به صورت کامل از ماده دوم تشکیل شده باشد. تزریق پودر به جت سیال همان طور که در شکل (۳) مشخص است به دلیل مکش ایجاد شده در دهانه نازل به دلیل سرعت زیاد جت است. [۸]