



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دانشکده مهندسی مکانیک

پروژه دکتری

تحلیل همزمان حرارتی مکانیکی پوسته استوانه‌ای جدار ضخیم از جنس مواد هدفمند (FGM)

توسط:

سید محمود حسینی

اساتید راهنما:

دکتر مهدی اخلاقی

دکتر محمود شاکری

اردیبهشت ۱۳۸۶



بسمه تعالی

فرم اطلاعات پایان نامه
دکتر

شماره :
تاریخ: 86/3/30
معاونت پژوهشی
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی 7

مشخصات دانشجو

نام و نام خانوادگی : سید محمود حسینی
شماره دانشجویی : 74226946
دانشکده : مکانیک
رشته تحصیلی : مهندسی مکانیک
دانشجو آزاد بورسیه معادل

نام و نام خانوادگی اساتید راهنما : دکتر مهدی اخلاقی - دکتر محمود شاکری

عنوان به فارسی : تحلیل همزمان حرارتی مکانیکی پوسته استوانه‌ای جدار ضخیم از جنس مواد هدفمند
عنوان به انگلیسی : Coupled thermo – mechanical analysis of functionally graded cylindrical shell

نوع پروژه : کارشناسی ارشد
 کاربردی بنیادی توسعه‌ای نظری
دکتر

تاریخ شروع : 84/9/9
تاریخ خاتمه : 86/3/26
تعداد واحد : -
سازمان تأمین کننده اعتبار : معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

واژه‌های کلیدی به فارسی : مواد هدفمند، ترموالاستیسیته کوپل، پوسته‌های استوانه‌ای
واژه‌های کلیدی به انگلیسی : Functionally graded materials, Coupled thermoelasticity, Cylindrical shells

نظرها و پیشنهادهای به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه : -

اساتید راهنما : -

دانشجو : -

امضا اساتید

تاریخ :

راهنما :

نسخه 1) معاونت پژوهشی

نسخه 2) کتابخانه و به انضمام دو جلد پایان نامه به منظور تصفیه حساب با کتابخانه و مرکز اسناد و مدارک علمی

چکیده:

در این رساله رفتار دینامیکی استوانه جدار ضخیم از جنس مواد هدفمند با طول بلند و کوتاه مورد تحلیل قرار می‌گیرد. بطور کلی، سعی شده است مواردی که تا کنون توسط سایر محققین به آنها پرداخته نشده است، مورد بحث و تحلیل قرار گیرد.

برای تحلیل دینامیکی استوانه جدار ضخیم هدفمند با طول بلند تحت شوک مکانیکی، فرض شده است که استوانه از چندین لایه در راستای ضخامت تشکیل شده و نیز جنس هر لایه همسانگرد و در بخشی دیگر هدفمند خطی باشد. برای تحلیل در حوزه تغییر مکان از روش المان محدود گلرکین و در حوزه زمان از روش نیومارک استفاده می‌شود. رفتار دینامیکی تغییر مکانهای مکانیکی، تنشهای شعاعی و محیطی در دو حالت لایه‌های همسانگرد و هدفمند خطی بررسی شده است تحلیل ارتعاشی به منظور تعیین فرکانسهای طبیعی و نیز تعیین سرعت متوسط گسترش موج تنش شعاعی و نیز بحث پیرامون نتایج حاصل در زمانها و حالات مختلف ماده هدفمند از دیگر موارد میباشد.

به منظور تحلیل ترموالاستیسیته غیر همزمان (غیر کوپل) استوانه جدار ضخیم هدفمند با طول بلند، با استفاده از توابع بسط و یک راه حل تحلیلی، ابتدا توزیع درجه حرارت در استوانه محاسبه شده سپس با استفاده از این توزیع درجه حرارت و با استفاده از روشی تحلیلی تغییر مکان مکانیکی شعاعی و تنشهای حرارتی تعیین شده‌اند. همچنین با استفاده از این روش مقادیر ویژه مساله نیز مشخص شده و برای حالات مختلف ماده هدفمند ارائه شده‌اند. بررسی و بحث پیرامون توزیع درجه حرارت در استوانه جدار ضخیم و تنشهای حرارتی در زمانها و حالات مختلف ماده هدفمند، در قسمتی دیگر مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

تحلیل ترموالاستیسیته همزمان (کوپل) استوانه جدار ضخیم هدفمند با طول کوتاه از دیگر موارد انجام شده در رساله می‌باشد. در محاسبات از روابط ترموالاستیسیته کوپل بر اساس تئوری گرین-نقدی بهره گرفته شده و نیز فرض شده است که استوانه در راستای ضخامت به چند لایه همسانگرد تقسیم شده، همچنین تغییر مکانهای مکانیکی در راستای طولی بسط فوریه داده شده‌اند. بارگذاری بر استوانه بصورت متقارن محوری است و کلیه شرایط پیوستگی در سطح تماس بین هر دو لایه برآورده شده‌اند. جهت تحلیل از روش المان محدود گلرکین در حوزه تغییر مکان و از روش نیومارک در حوزه زمان بهره گرفته شده است. مساله برای دو حالت مختلف بارگذاری پیاده‌سازی شده و نتایج حاصل در زمانها و حالات مختلف ماده هدفمند بحث و بررسی شده‌اند. همچنین در هر دو مثال رفتار موجی شکل در توزیع دما و تغییر مکانهای مکانیکی مشاهده شده است.

لازم به ذکر است در کلیه موارد نتایج حاصل به روشهای مختلف مورد ارزیابی و اعتبار سنجی قرار گرفته‌اند که جزئیات بیشتر در هر بخش ارائه شده است، در کلیه موارد وضعیت قابل قبول و بسیار مناسبی برای نتایج ارائه شده در رساله مشاهده می‌شود.

فهرست علائم

شعاع داخلی استوانه	a
شعاع خارجی استوانه	b
ضرایب ثابت	B_{1i}, B_{2i}, B_1, B_2
ظرفیت گرمائی ویژه	C
مدول الاستیسیته	E
نیروی خارجی	F
شار حرارتی خارجی	\dot{g}
ضریب انتقال حرارت جابجایی	h
ضریب انتقال حرارت هدایتی	k
ضریب انتقال حرارت هدایتی بی بعد	\bar{k}
ثابت مواد	k_0
ثابت مواد در تئوری گرین - نقدی	k^*
طول مرجع	l
تعداد مقادیر ویژه	N
ثابت مواد	m_1, m_2
ضرایب ثابت	$P_3, P_2, P_1, P_{-1}, P'$
خاصیت مکانیکی	P
خواص مکانیکی فلز و سرامیک	P_c, P_m
نرخ شار حرارتی	\dot{q}
شعاع استوانه	r
شعاع بی بعد استوانه	\bar{r}
زمان	t
زمان بی بعد	\bar{t}
درجه حرارت	T
درجه حرارت بی بعد	\bar{T}
دمای ثابت	T_0
تغییر مکان شعاعی	u
تغییر مکان شعاعی بی بعد	\bar{u}
سرعت مرجع	v
تغییر مکان محوری	w
تغییر مکان محوری بی بعد	\bar{w}
ضریب انبساط حرارتی	α

حاصلضرب چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه سرامیک	rc_c
ثابت مواد	rc_0
حاصلضرب چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه بی بعد	$r\bar{c}$
چگالی سطح داخلی	r_1
چگالی	r
درجه حرارت بدنه استوانه	q
درجه حرارت سیال جاری درون استوانه	q_1
مقادیر ویژه	$g \cdot g_i$
ضرایب ثابت لام	l, m
ضرایب ثابت لام سطح داخلی	l_1, m_1
ضریب انبساط حرارتی	a
ضریب ثابت	δ
تنش شعاعی	s_r
تنش شعاعی بی بعد	\bar{s}_r
تنش محیطی	s_q
تنش محیطی بی بعد	\bar{s}_q
تنش محوری	s_z
تنش محوری بی بعد	\bar{s}_z
تنش برشی	t_{rz}
تنش برشی بی بعد	\bar{t}_{rz}
کرنش شعاعی	e_r
کرنش محیطی	e_q
کرنش محوری	e_z
کرنش برشی	g_{rz}

فهرست شکلها

فصل اول -

- شکل ۱-۱: پیوستگی ریز ساختار مواد هدفمند [۶] ۴
- شکل ۱-۲: نمودار روش تولید ماده هدفمند با استفاده از متالورژی پودر [۱۰] ۵
- شکل ۱-۳: نمودار روش پلاسمای جهت تولید ماده هدفمند [۱۴] ۶
- شکل ۱-۴: نمودار روش گریز از مرکز [۱۶] ۷
- شکل ۱-۵: یک استوانه ساخته شده از مواد هدفمند ۸
- شکل ۱-۶: تغییرات ضریب f با N در راستای ضخامت استوانه [۳۱] ۱۰

فصل دوم -

- شکل ۱-۲: نمودار ضخامت استوانه و لایه ها ۲۷
- شکل ۲-۲: توزیع تغییرات مدول الاستیسیته در راستای ضخامت استوانه بصورت نمونه ۲۸
- شکل ۲-۳: بار اعمالی بر سطح داخلی استوانه رابطه (۲-۲۰) ۲۵
- شکل ۲-۴: بار اعمالی بر سطح داخلی استوانه رابطه (۲-۲۱) ۲۵
- شکل ۲-۵: توزیع تغییرات تغییر مکان شعاعی در راستای ضخامت استوانه در زمانهای بزرگ در مقایسه با راه حل تحلیلی ۳۵
- شکل ۲-۶: تغییرات تغییر مکان شعاعی بر حسب زمان در نقطه وسط استوانه برای دو مقدار n ۳۵
- شکل ۲-۷: تغییرات تغییر مکان شعاعی بر حسب زمان در نقطه وسط استوانه برای دو مقدار n ۳۶
- شکل ۲-۸: تغییرات تغییر مکان شعاعی بر حسب زمان در نقطه $r = 0,3125 \text{ m}$ استوانه برای $n = 0,5$ ۳۶
- شکل ۲-۹: تغییرات تغییر مکان شعاعی بر حسب زمان در نقطه $r = 0,375 \text{ m}$ استوانه برای $n = 0,5$ ۳۷
- شکل ۲-۱۰: تغییرات تغییر مکان شعاعی بر حسب زمان در نقطه $r = 0,4375 \text{ m}$ استوانه برای $n = 0,5$ ۳۷
- شکل ۲-۱۱: پاسخ تغییر مکان شعاعی در حوزه فرکانس برای مقادیر مختلف n ۳۸
- شکل ۲-۱۲: تغییرات تنش شعاعی بر حسب زمان در نقطه وسط استوانه برای مقادیر مختلف n ۳۸
- شکل ۲-۱۳: تغییرات تنش محیطی بر حسب زمان در نقطه وسط استوانه برای مقادیر مختلف n ۳۹
- شکل ۲-۱۴: تغییرات تنش شعاعی بر حسب زمان در نقطه $r = 0,3125 \text{ m}$ استوانه برای $n = 0,5$ ۳۹
- شکل ۲-۱۵: تغییرات تنش شعاعی بر حسب زمان در نقطه $r = 0,375 \text{ m}$ استوانه برای $n = 0,5$ ۴۰
- شکل ۲-۱۶: تغییرات تنش شعاعی بر حسب زمان در نقطه $r = 0,4375 \text{ m}$ استوانه برای $n = 0,5$ ۴۰
- شکل ۲-۱۷: تغییرات سرعت متوسط گسترش موج تنش شعاعی بر حسب n ۴۱
- شکل ۲-۱۸: نمودار لایه ها ۴۳
- شکل ۲-۱۹: تغییرات تغییر مکان شعاعی بر حسب زمان در نقطه وسط استوانه برای دو مقدار n ۴۹
- شکل ۲-۲۰: تغییرات تغییر مکان شعاعی بر حسب زمان در نقطه وسط استوانه برای دو مقدار n ۴۹
- شکل ۲-۲۱: تغییرات تغییر مکان شعاعی بر حسب زمان در نقطه $r = 0,3125 \text{ m}$ استوانه برای $n = 0,5$ ۵۰
- شکل ۲-۲۲: تغییرات تغییر مکان شعاعی بر حسب زمان در نقطه $r = 0,375 \text{ m}$ استوانه برای $n = 0,5$ ۵۰
- شکل ۲-۲۳: تغییرات تغییر مکان شعاعی بر حسب زمان در نقطه $r = 0,4375 \text{ m}$ استوانه برای $n = 0,5$ ۵۱
- شکل ۲-۲۴: تغییرات تنش شعاعی بر حسب زمان در نقطه وسط استوانه برای مقادیر مختلف n ۵۱
- شکل ۲-۲۵: تغییرات تنش محیطی بر حسب زمان در نقطه وسط استوانه برای مقادیر مختلف n ۵۲
- شکل ۲-۲۶: تغییرات تنش شعاعی بر حسب زمان در نقطه $r = 0,3125 \text{ m}$ استوانه برای $n = 0,5$ ۵۲

شکل ۲-۲۷: تغییرات تنش شعاعی بر حسب زمان در نقطه $m = 0.375$ ، $r = 0.5$ استوانه برای $n = 0.5$

شکل ۲-۲۸: تغییرات تنش شعاعی بر حسب زمان در نقطه $m = 0.4375$ ، $r = 0.5$ استوانه برای $n = 0.5$

فصل سوم -

شکل ۳-۱: توزیع دما در راستای شعاعی در زمان $\bar{t} = 0.5$ و $b/a = 1.5$

شکل ۳-۲: تاثیر تعداد مقادیر ویژه بر جوابها

شکل ۳-۳: توزیع دما در راستای شعاعی در $m_1 = m_2 = 0.5$ و $b/a = 1.5$ برای زمانهای مختلف

شکل ۳-۴: توزیع دما در راستای شعاعی در زمان $\bar{t} = 0.5$ و $b/a = 2$

شکل ۳-۵: توزیع دما در راستای شعاعی در $m_1 = m_2 = 0.5$ و $b/a = 2$ برای زمانهای مختلف

شکل ۳-۶: مقایسه نتایج حاصل از روش ارائه شده و نتایج حاصل از حل عددی

شکل ۳-۷: تغییرات توزیع درجه حرارت در راستای ضخامت استوانه برای زمان های مختلف

و مقادیر $m_1 = 4.018$ و $m_2 = -0.432$

شکل ۳-۸: نمودار تغییرات توزیع تنش شعاعی در راستای ضخامت استوانه در زمان

مشخص و $b/a = 2$ برای مقادیر مختلف m_0

شکل ۳-۹: نمودار تغییرات توزیع تنش شعاعی در راستای ضخامت استوانه در زمان

مشخص و $b/a = 1.5$ برای مقادیر مختلف m_0

شکل ۳-۱۰: نمودار تغییرات توزیع تنش شعاعی در راستای ضخامت استوانه در

m_0 مشخص و $b/a = 2$ برای زمانهای مختلف

شکل ۳-۱۱: نمودار تغییرات توزیع تنش شعاعی در راستای ضخامت استوانه در

m_0 مشخص و $b/a = 1.5$ برای زمانهای مختلف

شکل ۳-۱۲: نمودار تغییرات توزیع تنش محیطی در راستای ضخامت استوانه در

m_0 مشخص و $b/a = 2$ برای زمانهای مختلف

شکل ۳-۱۳: نمودار تغییرات توزیع تنش محیطی در راستای ضخامت استوانه در

m_0 مشخص و $b/a = 1.5$ برای زمانهای مختلف

فصل چهارم -

شکل ۴-۱: نمودار استوانه از جنس مواد هدفمند با طول کوتاه

شکل ۴-۲: توزیع درجه حرارت در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف

در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال اول)

شکل ۴-۳: توزیع درجه حرارت در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف

در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال اول)

شکل ۴-۴: توزیع تغییر مکان شعاعی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های

مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال اول)

شکل ۴-۵: توزیع تغییر مکان شعاعی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف

در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال اول)

شکل ۴-۶: توزیع تغییر مکان محوری در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف

در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال اول)

- شکل ۴-۷: توزیع تغییر مکان محوری در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
 ۹۵ در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال اول)
- شکل ۴-۸: توزیع تنش شعاعی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
 ۹۷ در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال اول)
- شکل ۴-۹: توزیع تنش شعاعی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
 ۹۷ در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال اول)
- شکل ۴-۱۰: توزیع تنش محیطی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
 ۹۷ در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال اول)
- شکل ۴-۱۱: توزیع تنش محیطی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
 ۹۷ در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال اول)
- شکل ۴-۱۲: توزیع تنش محوری در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
 ۹۷ در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال اول)
- شکل ۴-۱۳: توزیع تنش محوری در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
 ۹۷ در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال اول)
- شکل ۴-۱۴: توزیع تنش برشی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
 ۹۹ در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال اول)
- شکل ۴-۱۵: توزیع تنش برشی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
 ۹۹ در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال اول)
- شکل ۴-۱۶: توزیع درجه حرارت در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
 ۹۹ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال اول)
- شکل ۴-۱۷: توزیع درجه حرارت در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
 ۹۹ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال اول)
- شکل ۴-۱۸: توزیع تغییر مکان شعاعی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های
 ۹۹ مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال اول)
- شکل ۴-۱۹: توزیع تغییر مکان شعاعی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های
 ۹۹ مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال اول)
- شکل ۴-۲۰: توزیع تغییر مکان محوری در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های
 ۱۰۱ مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال اول)
- شکل ۴-۲۱: توزیع تغییر مکان محوری در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های
 ۱۰۱ مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال اول)
- شکل ۴-۲۲: توزیع تنش شعاعی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
 ۱۰۱ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال اول)
- شکل ۴-۲۳: توزیع تنش شعاعی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
 ۱۰۱ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال اول)
- شکل ۴-۲۴: توزیع تنش محیطی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف

- ۱۰۱ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال اول)
 شکل ۴-۲۵: توزیع تنش محیطی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
- ۱۰۱ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال اول)
 شکل ۴-۲۶: توزیع تنش محوری در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
- ۱۰۳ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال اول)
 شکل ۴-۲۷: توزیع تنش محوری در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
- ۱۰۳ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال اول)
 شکل ۴-۲۸: توزیع تنش برشی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
- ۱۰۳ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال اول)
 شکل ۴-۲۹: توزیع تنش برشی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
- ۱۰۳ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال اول)
 شکل ۴-۳۰: توزیع درجه حرارت در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
- ۱۰۳ در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال اول)
 شکل ۴-۳۱: توزیع درجه حرارت در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
- ۱۰۳ در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال اول)
 شکل ۴-۳۲: توزیع تغییر مکان شعاعی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
- ۱۰۵ مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال اول)
 شکل ۴-۳۳: توزیع تغییر مکان شعاعی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
- ۱۰۵ مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال اول)
 شکل ۴-۳۴: توزیع تغییر مکان محوری در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
- ۱۰۵ مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال اول)
 شکل ۴-۳۵: توزیع تغییر مکان محوری در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
- ۱۰۵ مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال اول)
 شکل ۴-۳۶: توزیع تنش شعاعی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
- ۱۰۵ در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال اول)
 شکل ۴-۳۷: توزیع تنش شعاعی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
- ۱۰۵ در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال اول)
 شکل ۴-۳۸: توزیع تنش محیطی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
- ۱۰۶ در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال اول)
 شکل ۴-۳۹: توزیع تنش محیطی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
- ۱۰۶ در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال اول)
 شکل ۴-۴۰: توزیع تنش محوری در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
- ۱۰۶ در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال اول)
 شکل ۴-۴۱: توزیع تنش محوری در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
- ۱۰۶ در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال اول)

- شکل ۴-۴۲: توزیع تنش برشی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
 ۱۰۶ در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال اول)
- شکل ۴-۴۳: توزیع تنش برشی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
 ۱۰۶ در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال اول)
- شکل ۴-۴۴: توزیع درجه حرارت ارائه شده در مرجع [۱۰۰] در مقایسه با نتایج حاصل
 ۱۰۷ در پایان نامه در مقطع وسط استوانه برای $n = 0$
- شکل ۴-۴۵: توزیع تغییر مکان شعاعی ارائه شده در مرجع [۱۰۰] در مقایسه با نتایج
 ۱۰۷ حاصل در پایان نامه در مقطع وسط استوانه برای $n = 0$
- شکل ۴-۴۶: توزیع تنش شعاعی ارائه شده در مرجع [۱۰۰] در مقایسه با نتایج حاصل
 ۱۰۷ در پایان نامه در مقطع وسط استوانه برای $n = 0$
- شکل ۴-۴۷: توزیع تنش محیطی ارائه شده در مرجع [۱۰۰] در مقایسه با نتایج حاصل
 ۱۰۷ در پایان نامه در مقطع وسط استوانه برای $n = 0$
- شکل ۴-۴۸: توزیع درجه حرارت در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
 ۱۰۸ در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۴۹: توزیع درجه حرارت در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
 ۱۰۸ در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۵۰: توزیع تغییر مکان شعاعی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های
 ۱۰۸ مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۵۱: توزیع تغییر مکان شعاعی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های
 ۱۰۸ مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۵۲: توزیع تغییر مکان محوری در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های
 ۱۰۸ مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۵۳: توزیع تغییر مکان محوری در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های
 ۱۰۸ مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۵۴: توزیع تنش شعاعی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
 ۱۱۰ در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۵۵: توزیع تنش شعاعی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
 ۱۱۰ در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۵۶: توزیع تنش محیطی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
 ۱۱۰ در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۵۷: توزیع تنش محیطی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
 ۱۱۰ در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۵۸: توزیع تنش محوری در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
 ۱۱۰ در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۵۹: توزیع تنش محوری در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
 ۱۱۰ در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال دوم)

- شکل ۴-۶۰: توزیع تنش برشی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
 ۱۱۲ در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۶۱: توزیع تنش برشی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
 ۱۱۲ در مقطع $\bar{z}/L = 0.3$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۶۲: توزیع درجه حرارت در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
 ۱۱۲ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۶۳: توزیع درجه حرارت در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
 ۱۱۲ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۶۴: توزیع تغییر مکان شعاعی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
 ۱۱۲ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۶۵: توزیع تغییر مکان شعاعی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
 ۱۱۲ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۶۶: توزیع تغییر مکان محوری در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
 ۱۱۴ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۶۷: توزیع تغییر مکان محوری در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
 ۱۱۴ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۶۸: توزیع تنش شعاعی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
 ۱۱۴ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۶۹: توزیع تنش شعاعی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
 ۱۱۴ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۷۰: توزیع تنش محیطی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
 ۱۱۴ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۷۱: توزیع تنش محیطی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
 ۱۱۴ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۷۲: توزیع تنش محوری در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
 ۱۱۶ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۷۳: توزیع تنش محوری در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
 ۱۱۶ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۷۴: توزیع تنش برشی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
 ۱۱۶ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۷۵: توزیع تنش برشی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف
 ۱۱۶ در مقطع $\bar{z}/L = 0.5$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۷۶: توزیع درجه حرارت در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف
 ۱۱۶ در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۷۷: توزیع درجه حرارت در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف

- ۱۱۶ در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال دوم)
- شکل ۴-۷۸: توزیع تغییر مکان شعاعی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال دوم)
- ۱۱۸ شکل ۴-۷۹: توزیع تغییر مکان شعاعی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال دوم)
- ۱۱۸ شکل ۴-۸۰: توزیع تغییر مکان محوری در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال دوم)
- ۱۱۸ شکل ۴-۸۱: توزیع تغییر مکان محوری در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال دوم)
- ۱۱۸ شکل ۴-۸۲: توزیع تنش شعاعی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال دوم)
- ۱۱۸ شکل ۴-۸۳: توزیع تنش شعاعی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال دوم)
- ۱۱۸ شکل ۴-۸۴: توزیع تنش محیطی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال دوم)
- ۱۱۹ شکل ۴-۸۵: توزیع تنش محیطی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال دوم)
- ۱۱۹ شکل ۴-۸۶: توزیع تنش محوری در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال دوم)
- ۱۱۹ شکل ۴-۸۷: توزیع تنش محوری در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال دوم)
- ۱۱۹ شکل ۴-۸۸: توزیع تنش برشی در راستای ضخامت برای \bar{t} معین و n های مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال دوم)
- ۱۱۹ شکل ۴-۸۹: توزیع تنش برشی در راستای ضخامت برای n معین و \bar{t} های مختلف در مقطع $\bar{z}/L = 0.7$ (مثال دوم)

فهرست جداول

فصل دوم -

- جدول ۱-۲: فرکانس طبیعی پایه با ازای چند مقدار مختلف n ۳۳
- جدول ۲-۲: سرعت متوسط گسترش موج تنش شعاعی برای چند n مختلف ۳۴
- جدول ۳-۲: فرکانس طبیعی پایه به ازای چند مقدار مختلف n ۴۷
- جدول ۴-۲: سرعت متوسط گسترش موج تنش شعاعی برای چند n مختلف ۴۸

فصل سوم -

- جدول ۱-۳: مقایسه مقادیر ویژه بدست آمده از روش ارائه شده و مقادیر ارائه شده در مرجع [۴۹] ۶۹
- جدول ۲-۳: هشت مقدار ویژه اول استوانه تو خالی ساخته شده از مواد هدفمند ($b/a=۱,۵$) ۷۰
- جدول ۳-۳: هشت مقدار ویژه اول استوانه تو خالی ساخته شده از مواد هدفمند ($b/a=۲$) ۷۰

فصل اول

مقدمه و مرور تحقیقات قبلی

۱-۱ مقدمه

با گسترش روز افزون علوم و فنون و در همین ارتباط تکنولوژی نوین، شناخت و بکارگیری 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. بکارگیری مواد کامپوزیت، آلیاژهای حافظه دار و مواد پیزوالکتریک و.... و گسترش دامنه استفاده از این مواد از جمله تلاشهای محققین جهت نیل به اهداف فوق الذکر میباشد. بطور کلی هریک از مواد مورد اشاره دارای ویژهگی و خواصی هستند که حوزه کاری هر دسته را محدود می نماید. مواد نو که در سالهای اخیر تولید و مورد استفاده قرار گرفته اند، به صورت زیر دسته بندی میشوند:

- مواد کامپوزیت^۱
- آلیاژهای حافظه دار^۲
- مواد پیزوالکتریک^۳
- نانو مواد^۴
- مواد هدفمند^۵

گسترش بکارگیری این نوع مواد در صنایع باعث شد فعالیت های علمی و صنعتی بیشماری در زمینه های، تولید و بررسی خواص متالورژیکی و همچنین تحلیل و بکارگیری این نوع مواد در سازه ها و اجزاء مکانیکی صورت گیرد. یکی از این دسته مواد، مواد هدفمند میباشند که در سال ۱۹۸۴ برای اولین بار توسط مهندسين ژاپنی تولید شد، [1]، که در بخش بعد به خواص و کاربردهای این ماده بیشتر پرداخته خواهد شد.

¹ Composites

² Shape memory alloy

³ Piezoelectricity material

⁴ Nanomaterial

⁵ Functionally graded material

۲-۱ مواد هدفمند

پیشرفت روز افزون در صنایع هوا و فضا باعث شد نیاز به موادی با مقاومت بالای حرارتی و مکانیکی گسترش یابد. براین اساس محققین به دنبال ماده‌ای با خاصیت سرامیکی-فلزی بودند و مواد هدفمند که اولین بار در سال ۱۹۸۴ تولید شدند، پاسخ مناسبی به این نیاز صنایع به شمار می رود.

مهمترین مزایای این مواد عبارتند از:

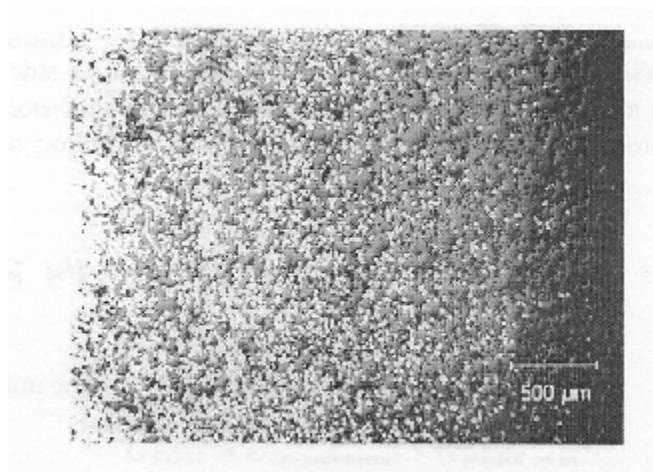
- قابلیت بالای مقاومت حرارتی
- قابلیت بالای مقاومت مکانیکی
- قابلیت بالای مقاومت خوردگی
- تولید این نوع مواد منطبق با شرایط بهینه

همانطور که مشخص است از مهمترین مزایای این ماده می توان 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 می خورد. علاوه بر کاربرد وسیع این ماده در صنایع هوا و فضا میتوان به موارد دیگری از مصارف این ماده در صنایع مانند:

- تولید پره های توربین
- تولید ابزار برشی
- بکارگیری در راکتورهای صنایع هسته ای
- بکارگیری در سیستمهای تبدیل انرژی
- بکارگیری در مهندسی پزشکی

اشاره نمود [5-2]. خواص مکانیکی مواد هدفمند شامل: مدول الاستیسیته، چگالی، ضریب انتقال حرارت هدایتی بصورت تابعی پیوسته میباشند. به عبارت دیگر ریزساختار این مواد به گونه ای است که بصورت پیوسته و تدریجی از یک ماده، در راستایی مشخص به ماده ای کاملاً متفاوت میل میکند. در برخی از این مواد، خواص مکانیکی و نیز ریز ساختار آن از ماده سرامیک به سمت ماده

فلزی میل میکند که این دسته از مواد هدفمند بیشترین کاربرد را در ارتباط با تحمل تنشهای حرارتی دارا میباشد. همانطور که در شکل ۱-۱ مشخص است در هیچ نقطه ای از این ماده گسستگی یا انفصال در زیر ساختار مشاهده نمیشود و تغییرات بصورت کاملاً یکنواخت و با نرخی مشخص بصورت پیوسته میباشد [6].



شکل ۱-۱ : پیوستگی ریز ساختار مواد هدفمند [6]

جهت تولید این مواد از روشهای مختلفی استفاده میشود. به عبارت دیگر روش تولید این مواد بسته به نوع کاربرد آن و شرایط حاکم کاری کاملاً متفاوت است. بطور کلی مهمترین روشهای موجود جهت تولید این مواد عبارتند از:

- روش متالورژی پودر^۱
- روش پلاسما جت^۲
- روش گریز از مرکز^۳
- روشهای الکترو فیزیکی^۴

¹ Powder metallurgy

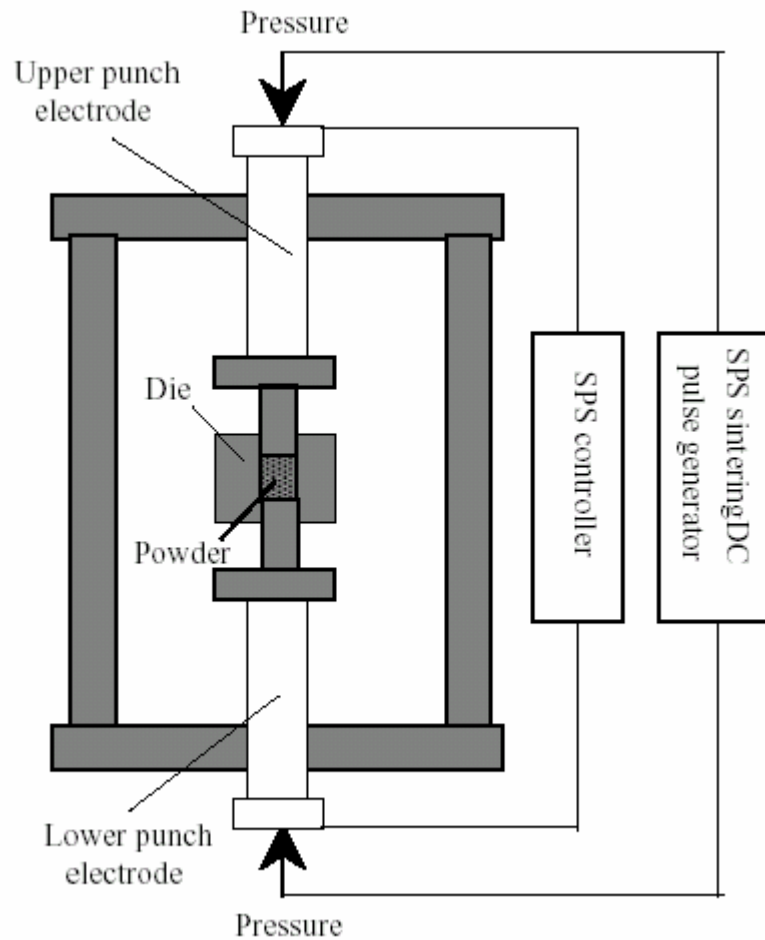
² Plasma jet

³ Centrifugal method

⁴ Electro physical methods

۱-۲-۱ روش متالورژی پودر

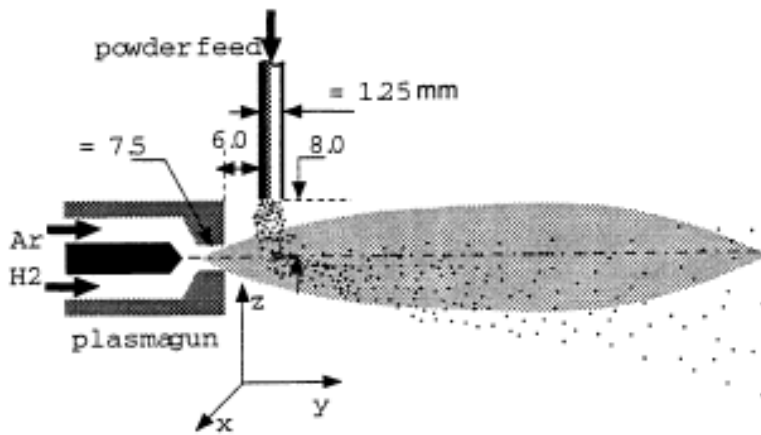
در این روش ماده هدفمند از قرار گرفتن مناسب لایه های پودر ترکیبی از دو نوع مواد مختلف تحت فشار و دمای مناسب ایجاد میشود. نخست بر روی لایه خالص از یک ماده لایه دیگر با درصد کمی از ماده دوم قرار میگیرد. این روند بتدریج تا آنجائی ادامه پیدا میکند که پودر لایه نهائی کاملاً از ماده دوم تشکیل شده باشد، شکل ۱-۲. بسته به شکل هندسی قطعه ای که قرار است با این روش تولید شود لایه ها در قالبی مناسب مطابق روش بیان شده، قرار میگیرند و پس از چیدمان مناسب لایه ها، فشار و دمای مناسب به لایه ها اعمال میگردد [7-10].



شکل ۱-۲: نمودار روش تولید ماده هدفمند با استفاده از متالورژی پودر [10]

۲-۲-۱ 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 قرار میگیرد (میچسبد)، شکل ۱-۳. پس از گذشت مدت زمان مشخص درصد معین و محدودی از ماده دوم به پودر ماده اول اضافه میشود. لازم به ذکر است که این عملیات بصورت یکنواخت و کاملاً پیوسته انجام میگیرد به عبارت دیگر اضافه شدن ماده دوم و به همان میزان کم شدن پودر ماده اول تا زمانی ادامه پیدا خواهد کرد تا پودر بصورت کامل از ماده دوم تشکیل شده باشد. تزریق پودر به جت سیال همانطور که در شکل ۱-۳ مشخص است به دلیل مکش ایجاد شده در دهانه نازل به دلیل سرعت زیاد جت است [11-15].

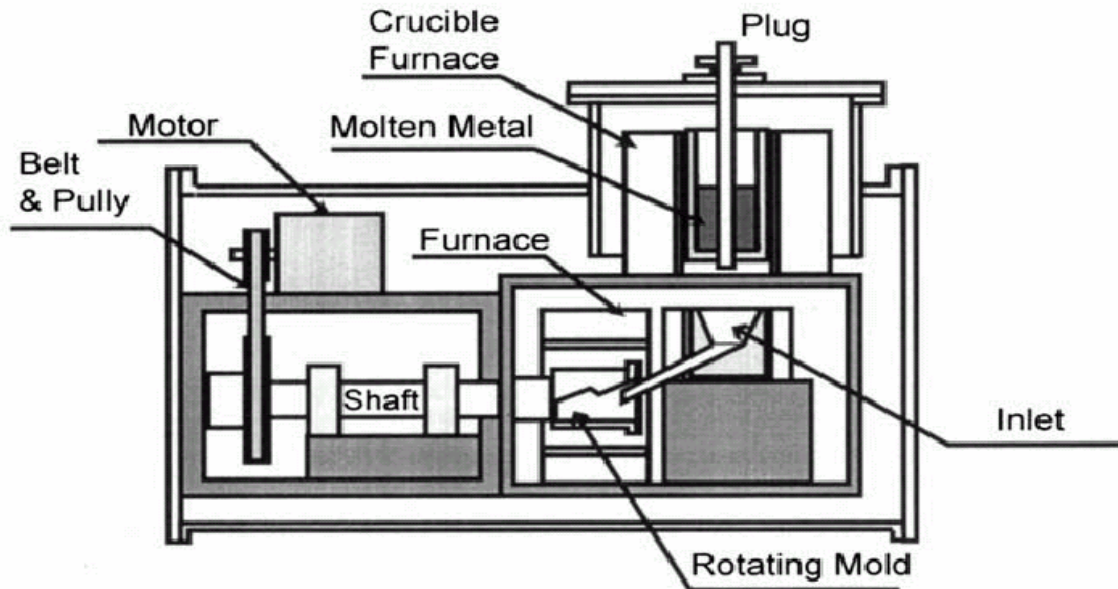


شکل ۱-۳: نمودار روش پلاسما جت جهت تولید ماده هدفمند [14]

۳-۲-۱ روش گریز از مرکز

استفاده از نیروی گریز از مرکز یکی دیگر از روشهای تولید مواد هدفمند است. این روش به طور کلی به منظور تولید استوانه های مواد هدفمند فلز- فلز بکار میرود. عملکرد این روش بدین صورت است که ابتدا مذاب ماده اول به مرکز دوران وارد شده و بر اثر نیروی گریز از مرکز در خارجی ترین

سطح استوانه قرار میگیرد. پس از مدتی کوتاه به مذاب ماده اول درصد کمی مذاب ماده دوم اضافه شده و به همان میزان از مذاب ماده اول کم میشود، شکل ۴-۱.



شکل ۴-۱: شماتیک روش گریز از مرکز [16]

این روند تا آنجا ادامه پیدا میکند که مذاب بطور صددرصد از ماده دوم تشکیل شده باشد [10,16].

۴-۲-۱ روشهای الکتروفیزیکی

بطور کلی همانطور که در بخشهای قبلی ذکر شد، بسته به نوع کاربرد و شرایط کاری استفاده از روشهای تولید، متنوع خواهد بود. از طریق روشهای متفاوت الکتروفیزیکی مواد هدفمند قابل تولید میباشند. از این قبیل میتوان استفاده لیزر، میکروویو و ... را نام برد که از لیزر، جهت زینتر کردن^۱ لایه‌های مواد هدفمند استفاده زیادی میشود [17-25].

در روشهای فوق، نحوه ترکیب پودر و یا مذاب تأثیر بسیار زیادی بر نحوه شکل گیری ریزساختار ماده هدفمند و متعاقب آن خواص ماده دارد. تحقیقات زیادی در مورد اندازه گیری خواص و بیان

^۱ Sintering