

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه علم و صنعت ایران

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی

**بررسی تاثیر پارامترهای پوشش دهی بر مقاومت به
اکسیداسیون دمای بالای پوشش آلومیناییدی فاز گازی بر
سوپر آلیاژ GTD-111**

مریم عزیزی قرامحمدی

اساتید راهنما:

دکتر سعید رستگاری

دکتر حسین عربی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مواد گرایش شناسایی و انتخاب مواد فلزی

تیر ماه ۱۳۸۶

کلیه حقوق مادی و معنوی این پایان نامه متعلق به دانشگاه علم و صنعت ایران است.

بسمه تعالی

اینجانب مریم عزیزی قرامحمدی به شماره دانشجویی ۱۳۷۳۱۰۱۴ دانشجوی رشته مهندسی مواد در گرایش شناسایی و انتخاب مواد فلزی مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد بدین وسیله صحت و درستی نتایج موجود در این پایان نامه را تایید نموده و گواهی می‌نمایم که در این نتایج هرگونه دخل و تصرفی صورت نگرفته باشد. همچنین متعهد می‌گردم که کلیه نتایج علمی موجود در این پایان نامه حاصل کار اینجانب بوده و متعلق به هیچ یک از محققین قبلی نمی‌باشد. چنانچه خلاف موارد فوق حتی بصورت جزئی و در هر زمان مشخص گردد دانشگاه علم و صنعت ایران حق دارد که این پایان نامه را باطل نماید. در این صورت تعهد می‌نمایم که تبعات قانونی این مسأله و همچنین کلیه خسارات ناشی از آن به عهده اینجانب باشد.

نام و نام خانوادگی

امضاء و تاریخ

مجوز بهره برداری

- بهره برداری از این پایان نامه در چارچوب مقررات کتابخانه بلامانع است.
- بهره برداری از قسمت‌های زیر با اخذ مجوز کتبی اساتید راهنما مجاز است:
-
-
-
-
-
- بهره برداری از این پایان نامه در مدت پنج سال از تاریخ دفاع به هیچ عنوان مجاز نیست

نام و نام خانوادگی اساتید راهنما:

امضاء اساتید راهنما:

تقدیم به:

بهترین هدیه خداوند، همسر عزیز و نازنینم

چکیده

مقاومت سوپرآلیاژها در برابر اکسیداسیون دمای بالا از اهمیت بسزایی برخوردارست. از جمله روش‌های موثر برای افزایش مقاومت به اکسیداسیون سوپرآلیاژها در دمای بالا، استفاده از پوشش‌های مقاوم به حرارت است. یکی از انواع این پوشش‌ها که به میزان زیادی در صنعت کاربرد دارند، پوشش‌های نفوذی آلومینایدی می‌باشند. پوشش‌دهی بروش فاز گازی روشی نوین و مناسب برای آلومینایزینگ قطعات پیچیده، حفرات و کانال‌های خنک‌کننده هوا در پره‌های توربین‌های گازی است.

در این تحقیق ابتدا پوشش‌های آلومینایدی در دمای 1050°C و مدت زمان ۴ ساعت بر نمونه‌هایی از آلیاژ پایه نیکل GTD-111 به روش گازی ایجاد گردید و سپس مقاومت پوشش‌های تشکیل شده در برابر اکسیداسیون سیکلی دمای بالا (1100°C) مورد بررسی قرار گرفت. هدف از انجام این تحقیق بررسی مقاومت به اکسیداسیون این نوع پوشش با استفاده از سه نوع فعالساز کلرید آمونیم، فلئورید آمونیم و کریولیت و بهینه‌سازی پوشش ایجاد شده با فعالساز برتر بود. نهایتاً ریزساختار نمونه‌ها و میزان تخریب آنها در اثر اکسیداسیون با استفاده از روش میکروسکوپی و وزنی مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج بدست آمده از این بررسی‌ها نشان داده است که نمونه سوپرآلیاژ پوشش‌داده شده بوسیله فعالساز NH_4Cl با مقدار ۱۵٪ وزنی (و مقدار آلومینیم ۳۰٪ وزنی) بهترین پوشش و مناسب‌ترین مقاومت را در برابر اکسیداسیون دمای بالا در مدت زمان ۱۲۰ ساعت از خود نشان می‌دهد.

تشکر و قدردانی:

از اساتید گرامی آقایان دکتر حسین عربی و دکتر سعید رستگاری به خاطر راهنمایی‌های ارزنده و حمایت‌های بی‌دریغ در انجام این تحقیق صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم. از کمک‌ها و مساعدت‌های شرکت مهندسی موادکاران جاهد نوآور (وابسته به موسسه جهاد تحقیقات کشاورزی) به خاطر تامین مواد اولیه سپاسگزارم.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل ۱. مقدمه
۲	۱-۱. مقدمه
۴	فصل ۲. مروری بر منابع مطالعاتی
۵	۱-۲. سوپرآلیاژ پایه نیکل GTD-111
۷	۲-۲. پوشش‌های نفوذی
۷	۱-۲-۲. نحوه تشکیل پوشش‌های نفوذی
۷	۲-۲-۲. پوشش‌های آلومینایدی
۸	۳-۲-۲. آلومینایزینگ بروش فاز گازی
۱۰	۴-۲-۲. تشکیل پوشش‌های نفوذی بروش فاز گازی
۱۸	۳-۲. اکسیداسیون
۱۸	۱-۳-۲. مقدمه
۱۸	۲-۳-۲. روش‌های تخریب سوپرآلیاژها در اثر اکسیداسیون
۱۹	۱-۲-۳-۲. پوسته‌ای شدن اکسیدهای سطحی بعد از اکسیداسیون
۲۱	۳-۳-۲. اکسیداسیون سوپرآلیاژها
۲۲	۱-۳-۳-۲. اکسیداسیون آلیاژهای Ni-Cr-Al
۲۳	۲-۳-۳-۲. اکسیداسیون داخلی
۲۴	۴-۳-۲. نقش دما در اکسیداسیون سوپرآلیاژها
۲۵	۵-۳-۲. تأثیر عناصر آلیاژی بر اکسیداسیون سوپرآلیاژها
۲۶	۶-۳-۲. مقایسه اکسیدهای محافظ Al_2O_3 و Cr_2O_3
۲۷	۷-۳-۲. مقاومت حرارتی آلومینایدها
۲۷	۸-۳-۲. مقاومت حرارتی سوپرآلیاژهای پوشش‌دار
۲۸	۱-۸-۳-۲. مقاومت حرارتی سوپرآلیاژهایی با پوشش‌های نفوذی
۳۲	۹-۳-۲. آزمایش مقاومت حرارتی
۳۵	فصل ۳ روش تحقیق
۳۶	۱-۳. مواد اولیه

۳۶	۳-۱-۱. آلیاژ پایه
۳۶	۳-۱-۲. مخلوط پودر
۳۷	۳-۲. آماده سازی نمونه‌ها
۳۷	۳-۳. محفظه پوشش‌دهی
۳۸	۳-۴. روش پوشش‌دهی
۳۹	۳-۵. روش انجام آزمایش اکسیداسیون
۴۰	۳-۶. بررسی‌های ریزساختاری
۴۰	۳-۷. اندازه‌گیری ضخامت پوشش و پوسته اکسیدی
۴۰	۳-۸. آنالیز فازی
۴۲	فصل ۴ نتایج
۴۳	۴-۱. مقدمه
۴۴	۴-۲. فاز اول
۴۴	۴-۲-۱. بررسی پوشش
۴۴	۴-۲-۱-۱. نمونه پوشش داده شده با فعالساز NH_4Cl
۴۹	۴-۲-۱-۲. نمونه پوشش داده شده با فعالساز NH_4F
۵۲	۴-۲-۱-۳. نمونه پوشش داده شده با فعالساز Na_3AlF_6
۵۶	۴-۲-۲. بررسی اکسیداسیون و پوسته اکسیدی
۵۶	۴-۲-۲-۱. نمونه پوشش داده شده با فعالساز NH_4Cl
۵۹	۴-۲-۲-۲. نمونه پوشش داده شده با فعالساز NH_4F
۶۲	۴-۲-۲-۳. نمونه پوشش داده شده با فعالساز Na_3AlF_6
۶۵	۴-۲-۲-۴. بررسی‌های وزنی
۶۶	۴-۲-۳. جمع‌بندی بررسی‌های فاز اول
۶۸	۴-۳. فاز دوم
۶۸	۴-۳-۱. بررسی پوشش
۶۸	۴-۳-۱-۱. بررسی پوشش نمونه پوشش داده شده با ۱۰٪ فعالساز NH_4Cl
۷۱	۴-۳-۱-۲. بررسی پوشش نمونه پوشش داده شده با ۱۵٪ فعالساز NH_4Cl
۷۴	۴-۳-۲. بررسی اکسیداسیون و پوسته اکسیدی
۷۴	۴-۳-۲-۱. نمونه پوشش داده شده با ۱۰٪ فعالساز NH_4Cl
۷۶	۴-۳-۲-۲. نمونه پوشش داده شده با ۱۵٪ فعالساز NH_4Cl
۷۸	۴-۳-۳. بررسی‌های وزنی
۷۹	۴-۳-۳. جمع‌بندی بررسی‌های فاز دوم
۸۲	۴-۴. بررسی اکسیداسیون نمونه بدون پوشش - سوپرآلیاژ پایه نیکل GTD-111
۸۷	نتیجه گیری و پیشنهادات
۹۰	مراجع
	چکیده انگلیسی

فصل اول

مقدمه

مقدمه

در یک توربین گازی، انرژی جنبشی جریان گازهای گرم توسط پره‌های آن به انرژی مکانیکی چرخشی تبدیل می‌شود. این انرژی برای به حرکت درآوردن محور کمپرسور و به چرخش درآوردن یک ژنراتور یا پمپ و غیره بکار می‌رود. طی این تبدیل انرژی، پره‌ها تحت ارتعاش، دمای بالا، تنش، خوردگی و اکسیداسیون و سایش قرار دارند [۱].

تحت این شرایط، جنس پره‌ها به سوپرآلیاژهایی نظیر سوپرآلیاژهای پایه نیکل و پایه کبالت محدود می‌شود. گزارش شده است که سوپرآلیاژهای پایه نیکل که عموماً برای پره‌های متحرک استفاده می‌شوند تا دمای حدود 1100°C می‌توانند استحکام خود را حفظ کنند ولی در دماهای بالاتر فاز بین فلزی γ' با ترکیب شیمیایی Ni_3Al در زمینه آستنیتی γ حل شده و موجب کاهش استحکام آنها می‌شود. لازم به ذکر است که در دمای 1100°C و حتی دماهای بالاتر می‌توان از سوپرآلیاژهای پایه نیکل در پره‌های ثابت توربین‌ها استفاده کرد [۲،۳].

آسیب‌های ناشی از اکسیداسیون و خوردگی به پره‌های توربین موجب تخریب شدید خواص مکانیکی پره‌ها و کوتاه شدن عمر کاری آنها می‌گردد. به همین دلیل حفاظت از سطوح پره‌های توربین در برابر این نوع آسیب‌ها یک مسئله مهم است. لذا به منظور جلوگیری از آسیب‌های سطحی، معمولاً از پوشش‌ها که به روش‌های مختلف بر روی سطوح پره‌های توربین اعمال می‌شوند، استفاده می‌گردد [۴].

پوشش‌های بکار رفته بر سوپرآلیاژها علاوه بر خواص حفاظتی بایستی نیازهای ذیل را نیز برآورده نمایند [۲]:

- در برابر تنش‌های حرارتی مقاوم باشند
- پیوند محکمی با زمینه داشته باشند
- ضخامت آنها کم و یکنواخت باشد
- چقرمگی مناسبی داشته باشند
- تاثیر مخرب بر روی خواص مکانیکی آلیاژ زمینه نداشته باشند

- در برابر نفوذ عناصر پایدار^۱ باشند
 - قابلیت ترمیم پذیری خودبخودی^۲ مناسب داشته باشند
- جهت مرتفع کردن این نیاز تلاشهای مستمری برای بهبود فرایند پوشش‌دهی آلومینایدی صورت گرفته است. روش آلومینایزینگ فاز گازی در رسیدن به این هدف، گام مهمی بوده است [۵].
- در این پژوهش از روش آلومینایزینگ فاز گازی برای پوشش‌دهی استفاده شده است. سوپراآلیاژ مورد استفاده از جنس پایه نیکل GTD-111 بوده است. هدف از انجام این آزمایشات بررسی تاثیر پارامترهای آلومینایزینگ بر رفتار اکسیداسیون سیکلی دما بالای پوشش‌های اعمالی بوده است.

¹ diffusion stability

² self-healing

فصل دوم

مروری بر منابع مطالعاتی

۲-۱. سوپرآلیاژ پایه نیکل GTD-111

این آلیاژ در اواسط دهه ۱۹۷۰ میلادی توسط شرکت جنرال الکتریک بعنوان آلیاژ مناسب برای تولید پره‌های متحرک توربین گازی طراحی شد و از اواخر دهه ۱۹۸۰ مورد استفاده قرار گرفت [۶].

تلاش‌های زیادی صورت گرفته است تا آلیاژ GTD-111 بتواند در ساخت پره‌های متحرک که از طریق فرایند ریخته‌گری دقیق با کیفیت بالا تولید می‌شوند، مورد استفاده قرار گیرد. از سال ۱۹۸۴ پره‌های ردیف اول و اخیراً پره‌های ردیف دوم چندین نوع توربین گازی از جنس آلیاژ GTD-111 ساخته شده‌اند. این قطعات در خلا به صورت ریخته‌گری دقیق تهیه شده و با عملیات حرارتی محلول سازی و رسوب سختی مستحکم می‌شود [۷].

ریزساختار سوپرآلیاژهای GTD-111 شامل سه جزء اصلی است: زمینه آستنیتی γ ، رسوبات γ' اولیه و ثانویه و کاربیدهای ناپیوسته نظیر $M_{23}C_6$ و M_6C در مرزخانه‌ها. البته یوتکتیک $\gamma - \gamma'$ و کاربیدهای پراکنده WC, TiC و TaC در زمینه و مرزخانه‌ها و مقدار کمی فازهای صفحه‌ای شکل سیگما، اتا و لاهه نیز در این آلیاژ مشاهده می‌شوند. شایان ذکر است که ایجاد فاز γ' با مکانیزم رسوب سختی باعث مقاوم شدن آلیاژ می‌گردد [۸ و ۹]. در اینجا به اختصار به معرفی این فازها می‌پردازیم:

الف) فاز زمینه (γ): فاز گاما عمدتاً از عنصر Ni تشکیل شده و دارای ساختار مکعبی fcc می‌باشد. این فاز آستنیتی قابلیت حل کردن درصد زیادی از عناصر همچون کبالت، کروم، مولیبدن و تنگستن را در خود داراست.

ب) فاز رسوبی (γ'): درون دانه‌ای: فاز گاما پرایم در اثر وجود عناصر آلومینیم و تیتانیم موجود در سوپرآلیاژ در زمینه فاز زمینه (γ) تشکیل می‌گردد. ساختار این فاز fcc بوده و در فاز زمینه به صورت هم‌سیما با کرنش عدم تطابق (انطباق) بین $0/5$ تا 1 درصد قرار گرفته است. ترکیب احتمالی این فاز بصورت $(Ni,Co)_3(Al,Ti)$ گزارش شده است [۱۰]. فاز رسوبی گاما پرایم عمدتاً به دو صورت اولیه با مورفولوژی مکعبی شکل و ثانویه با مورفولوژی کروی شکل در این سوپرآلیاژ وجود دارد. در این میان شکل فاز رسوب کرده γ' به میزان کرنش عدم انطباق وابسته است [۱۱ و ۱۰]. اگر درصد عدم انطباق بین $0/5 - 1$ درصد باشد؛ شکل آنها کروی و اگر بین $1 - 0/5$ درصد باشد به صورت مکعبی و در غیر این صورت (بیشتر از 1 درصد) به شکل صفحات نوک تیز در فاز زمینه (γ) ظاهر می‌گردند.

ج) کاربیدها: در سوپرآلیاژهای پایه نیکل حدود $0/1$ تا $0/5$ درصد کربن وجود دارد. این کربن با عناصر دیرگداز و فعال چون تیتانیم، تالیوم و هافنیم به صورت MC رسوب می‌کند. در حین عملیات حرارتی و یا در شرایط کاری، کاربیدها در دماهای بالا ناپایدار گشته و به کاربیدهای ثانویه‌ای چون $M_{23}C_6$ و M_6C تبدیل می‌گردند. این کاربیدها بیشتر در مرزخانه‌ها

رسوب می‌کنند. دامنه پایداری کاربیدهای $M_{23}C_6$ بین ۷۶۰ تا ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد و دامنه پایداری کاربیدهای نوع M_6C بین $815-980^{\circ}C$ گزارش شده است [۱۱].

د) فاز رسوبی (γ') موجود در مرز دانه‌ها: در سوپرآلیاژهای پر استحکام، عملیات حرارتی اعمال شده باعث رسوب فیلم-های نازک از فاز γ' در مرز دانه‌ها می‌شود. این رسوب باعث افزایش مقاومت به شکست خزش سوپرآلیاژ می‌گردد [۱۱].

ه) بوریدها: معمولا ذراتی هستند که بیشتر در مرز دانه‌ها به وجود می‌آیند. گفته شده است [۱۱] داکتیلیته آلیاژ را افزایش می‌دهند.

و) فازهای نوع TCP: تحت شرایط خاص، فازهای صفحه‌ای شکل چون η ، σ و λ در ساختار سوپرآلیاژ به وجود می‌آیند، که این فازها استحکام پارگی و داکتیلیته سوپرآلیاژ را پایین می‌آورند [۱۱].

ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژ GTD-111 در جدول ۲-۱ نشان داده است [۱۲].

جدول ۲-۱. ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژ GTD-111 برحسب درصد وزنی [۱۲].

Ta	Cr	Co	Ti	W	Al	Ni	عنصر
۲/۵-۳/۱	۱۳/۷-۱۴/۳	۹-۱۰	۴/۷-۵/۱	۳/۵-۴/۱	۲/۸-۳/۲	balk	درصد وزنی
Si	Zr	B	C	Fe	Nb	Mo	عنصر
max ۰/۳	۰/۱	۰/۰۱۲	۰/۱	max ۰/۵	۰/۱	۱/۴-۱/۷	درصد وزنی

۲-۲. پوشش‌های نفوذی

در این نوع پوشش‌ها که پرمصرف‌ترین نوع پوشش برای پره‌های توربین گازی محسوب می‌شوند، یک یا دو عنصر که عموماً آلومینیم، کروم و یا سیلیسیم می‌باشند، در تماس با سطح قطعه به داخل آلیاژ پایه نفوذ کرده و ترکیبات بین فلزی آلومینایدی، کرومایدی و سیلیسایدی ایجاد می‌کنند. این ترکیبات در شرایط کاری توربین با تشکیل لایه‌های اکسیدی فشرده مانند Al_2O_3 ، Cr_2O_3 و SiO_2 در سطح قطعه از خوردگی و اکسیداسیون آن جلوگیری می‌کنند [۱۳]. این پوشش‌ها با روش‌های مختلفی از قبیل آلومینایزینگ بصورت سمانتاسیون پودری، ذوب دوغابی و فاز گازی ایجاد می‌گردند [۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶].

پوشش‌های کرومایدی و سیلیکونایزینگ تا درجه حرارت‌های حدود $950^\circ C$ به اکسیداسیون مقاوم بوده و بالاتر از آن دما به علت تشکیل لایه‌های اکسیدی فرار مقاومت خود را از دست می‌دهند؛ در عوض پوشش‌های آلومینایدی تا $1100^\circ C$ پایداری دمایی دارند [۱۷].

پوشش‌های نفوذی آلومینایدی بیشترین کاربرد را در پره‌های متحرک توربین‌های گازی دارند.

۲-۲-۱. نحوه تشکیل پوشش‌های نفوذی

پوشش‌های نفوذی ایجاد شده به روش سمانتاسیون پودری در نتیجه دو فرایند تشکیل می‌شوند [۱۸]: ابتدا ماده پوشش شامل پودر فلز، پودر پرکننده خنثی و یک ماده فعال کننده را در تماس با فلزی که قرار است بر روی آن پوشش ایجاد شود قرار می‌دهند و سپس طی یک عملیات حرارتی ماده پوشش را به درون فلز پایه نفوذ می‌دهند. در مرحله دوم، ترکیبات بین فلزی مختلفی از فلز پوشش و فلز پایه در سطح ایجاد می‌شود که خواص خوردگی داغ و اکسیداسیون دما بالای سطح را بهبود می‌بخشد.

۲-۲-۲. پوشش‌های آلومینایدی

این پوشش‌ها از جمله پوشش‌های نفوذی می‌باشند که در اوایل دهه ۱۹۶۰ ابداع شدند. از آن زمان تا کنون این پوشش‌ها در مسیر تحول خود، تغییرات زیادی را در فرایندهای تولید و ترکیب شیمیایی داشته‌اند. مکانیزم تشکیل پوشش‌های آلومینایدی بر اساس نفوذ آلومینیم از سطح آلیاژ به داخل زمینه و تشکیل ترکیبات بین فلزی با استوکیومتری‌های مختلف می‌باشد. از ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در سوپرآلیاژهای پایه نیکل می‌توان به $NiAl$ ، Ni_3Al ، Ni_2Al_3 اشاره نمود [۹]. کاربرد گسترده این روش تنها به این دلیل است که مخلوط‌های مختلف مصرفی برای آلومینایزینگ، طیف وسیعی از پوشش‌های آلومینایدی با مقادیر آلومینیم ۱۸ تا ۶۹ درصد وزنی را در بر می‌گیرند [۴].

خواص حفاظتی این پوشش‌ها بر اساس نکات زیر تعیین می‌شوند [۱۹]:

- توانایی ترکیبات بین فلزی در تشکیل لایه اکسیدی Al_2O_3
- چسبندگی لایه اکسیدی بر سطح پوشش
- میزان نفوذ آلومینیم به داخل آلیاژ

- وجود رسوبات، عناصر آلیاژی و کاربیدهای آلیاژی در درون پوشش
- مقاومت لایه اکسیدی در برابر نمک‌های مذاب
- داکتیلیته لایه اکسیدی.

طبق تحقیقات گوارد [۲۰]، پوشش‌های آلومینایدی بر اساس مکانیزم تشکیل به دو دسته پوشش‌های نفوذی داخلی و خارجی تقسیم می‌شوند. اختلاف اساسی در این دو مکانیزم ناشی از درجه حرارت آلومینایزینگ و فعالیت آلومینیم در داخل محفظه پوشش‌دهی است.

۲-۲-۳. آلومینایزینگ بروش فاز گازی

با طراحی کانال‌های گردش هوای خنک‌کننده در پره‌های جدید و پیشرفته، سطوح این کانال‌ها در معرض اکسیداسیون و خوردگی قرار دارند، بنابراین به ناچار بایستی سطوح داخلی این حفرات نیز پوشش داده‌شوند. در مواردی که این کانال‌ها اشکال پیچیده‌ای دارند، امکان پوشش‌دهی آنها به کمک پودر یا دوغاب وجود ندارد چرا که حتی در صورتی که وارد کردن پودر یا دوغاب به داخل کانال‌ها امکان پذیر باشد، نمی‌توان مطمئن بود که تمام سطوح با محیط پوشش‌دهنده پوشش داده‌شود. ضمن اینکه حذف کامل پودر و ذرات باقیمانده و تمیز کردن کانال‌ها پس از پوشش‌دهی بسیار دشوار خواهد بود [۵ و ۲۷-۲۱].

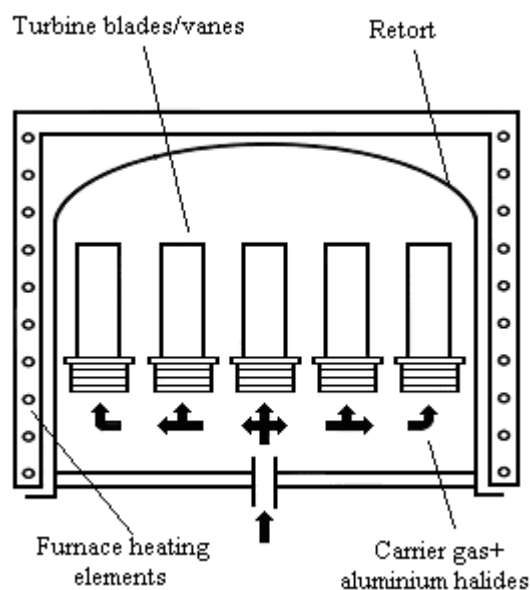
روش فاز گازی یک روش اصلاحی فرایند سمانتاسیون پودری است که در آن آلیاژ پایه در تماس با مخلوط پودری قرار نمی‌گیرد و توان کافی برای رسوب آلومینیم را بطور یکنواخت بر سطوح داخلی نمونه‌ها دارد و در واقع یکی از روش‌های مورد استفاده برای پوشش‌دهی کانال‌های داخلی می‌باشد. واکنش‌های شیمیایی، درجه حرارت و زمان مورد نیاز در این روش بسیار شبیه به روش سمانتاسیون پودری است [۵ و ۲۷-۲۱]. این فرایند را می‌توان در فشار پایین، در خلاء یا با جریان یک گاز محافظ اجرا نمود.

اولین کار در این زمینه، آلومینایزینگ پالسی بود که توسط Restall و همکارانش [۲۸] در اواخر دهه ۷۰ انجام شد. این روش بر پایه چرخاندن گاز داخل محفظه پوشش‌دهی از طریق تغییر منظم فشار داخلی محفظه استوار است [۲۹]. البته این روش امروزه توسعه بیشتری یافته و برای ایجاد پوشش محافظ آلومینایدی بر روی سطوح کانال‌های خنک‌کننده داخلی پره‌های سوپرآلیاژ نیازی به تغییرات فشار نیست [۲۶].

در فرایند آلومینایزینگ فاز گازی، هالیدهای فرار آلومینیم که در دماهای بالا تولید می‌گردند، بوسیله یک گاز حامل به سطح قطعات منتقل شده و در سطح قطعه مورد نظر واکنش داده و یک لایه غنی از آلومینیم تشکیل می‌دهند. با نفوذ آلومینیم به داخل زمینه و تشکیل پوشش مطلوب میزان فعالیت فرایند کاهش می‌یابد [۳۰]. تصویر شماتیک دستگاه مورد استفاده در فرایند آلومینایزینگ فاز گازی در شکل ۲-۱ ارائه شده است.

گفته شده است که فرایند آلومینایزینگ فاز گازی از نظر یکنواختی ضخامت پوشش، تمیزی سطح و کنترل بهتر ریزساختار نسبت به سمانتاسیون پودری برتری دارد [۵، ۲۱، ۲۶ و ۲۷]. همچنین به علت قرار گرفتن قطعات در خارج از پودر امکان

آلوده شدن پوشش با ذرات پودر که معمولاً در هنگام رشد به سمت خارج پوشش در فرایند آلومینایزینگ با اکتیویته پایین رخ می‌دهد به شدت کاهش پیدا می‌کند. در ضمن در صورتی که بتوان محفظه قرارگیری قطعات را از مخلوط پودر جدا کرد، انجام عملیات پوشش‌دهی و پس از آن عملیات حرارتی بازیابی (انحلال و پیرسازی) قطعاتی که تازه پوشش داده شده‌اند بطور همزمان^۱ در این فرایند وجود دارد؛ بدین ترتیب در هزینه‌ها صرفه‌جویی خواهد شد. علاوه بر این وقتی که قطعات بصورت آزاد در محفظه معلق باشند، گذاشتن آنها به راحتی صورت می‌گیرد؛ بنابراین امکان اتوماسیون این روش بیشتر از روش سمانتاسیون پودری است [۳۰].



شکل ۲-۱. نمای کلی از دستگاه آلومینایزینگ گازی [۲۶].

مخلوط پودر مورد نیاز جهت ایجاد پوشش در فرایند گازی شامل ترکیبات زیر است [۳۲، ۳۱، ۱۳]:

- پودر فلز یا آلیاژ مورد نظر مانند پودر کروم یا آلومینیم
- پودر پرکننده خنثی مانند پودر آلومینا که از چسبیدن ذرات به یکدیگر جلوگیری می‌کند
- پودر یک ماده فعال کننده مانند NH_4Cl که نقش تولید فاز گازی و انتقال عنصر پوشش‌دهنده به سطح فلز پایه را ایفا می‌کند.

با حرارت دادن این مجموعه در یک اتمسفر خنثی مانند آرگون، پودر فلز با ماده فعالساز واکنش کرده و گازی تولید می‌شود که در تماس با سطح قطعه، سطح را از فلز مربوطه غنی می‌سازد [۱۳].

¹ In Situ

از مزایای این روش عدم محدودیت در اندازه قطعه جهت پوشش‌دهی، عدم محدودیت در تعداد قطعه بشرط آنکه ظرفیت و اندازه کوره محدودیتی ایجاد نکند، ارزان بودن، چسبندگی عالی پوشش به زیرپایه و امکان پوشش‌دهی اجزاء توربین با اشکال پیچیده می‌باشد [۳۲].

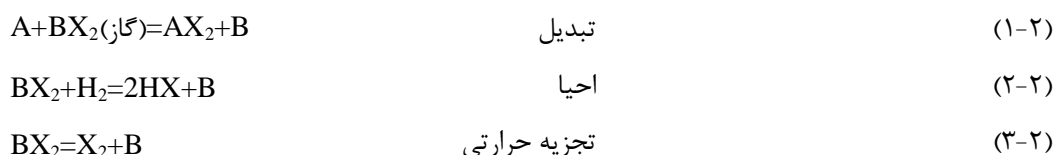
از معایب این روش می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۳۲]:

- عدم کنترل دقیق ترکیب شیمیایی پوشش‌های تشکیل شده
- محدودیت ضخامت پوشش بگونه‌ای که با افزایش ضخامت پوشش، داکتیلیته آن کاهش یافته و نهایتاً خواص مکانیکی فلز پایه را تحت تاثیر قرار می‌دهد.
- عدم امکان پوشش‌دهی نفوذی برخی آلیاژها، چرا که حرارت‌دهی سوپرآلیاژها در دماهای بالا ممکن است ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ را تغییر دهد.

۲-۲-۴. تشکیل پوشش‌های نفوذی بروش فاز گازی

در آلومینایزینگ به روش گازی، ترکیب هالوژن دار فلز حل شدنی را به شکل بخار از روی سطحی که قرار است پوشش داده شود عبور می‌دهند، سطح تا دمایی که امکان نفوذ وجود دارد گرم می‌شود. بسته به سیستم مورد نظر دما در این روش بین $500-1300^{\circ}\text{C}$ متغیر است. برای انتقال بخار هالید فلز، اتمسفر پرکننده‌ای وجود دارد که معمولاً گازهای احیا کننده مانند هیدروژن، آمونیاک و یا گازهای خنثی مانند هلیم و آرگون می‌باشد.

سه نوع واکنش اصلی وجود دارند که امکان احیاء هالید فلز، BX_2 به فلز B و سپس نفوذ به فلز حلال A (سوپرآلیاژ زمینه) در آنها وجود دارد. این واکنش‌ها عبارتند از [۳۳]:



واکنش تبدیل (۱-۲) نشان دهنده زدایش یک اتم A در سطح برای جانشین کردن (رسوب کردن) یک اتم B می‌باشد. بنابراین چنین واکنشی با حداقل تغییر وزن و یا تغییر بعد قطعه A انجام می‌شود. اگر اتم‌های A و B وزن اتمی مشابهی داشته باشند (مانند Fe و Cr) واکنش تبدیل باعث تغییر جزئی وزن و افزایش نامحسوسی در بعد، مستقل از ضخامت لایه نفوذی خواهند شد.

از طرف دیگر هر دو واکنش احیا (۲-۲) و تجزیه حرارتی (۲-۳) باعث افزایش وزن می‌شوند، معادل وزن B که رسوب کرده‌است و نیز افزایش کمی در ابعاد که به ترکیب شیمیایی لایه نفوذی بستگی دارد [۳۳].

همانطور که قبلاً اشاره شد، مخلوط‌های پودری مورد استفاده در آلومینایزینگ فاز گازی برای تشکیل پوشش آلومینایدی شامل آلومینیم یا آلیاژهای آن با آهن، کروم، سیلیسیم و عناصر دیگر (بعنوان یک جزء فعال)، اکسید آلومینیم (بعنوان یک

پرکننده خنثی) و یک هالید فعالساز (معمولا NH_4Cl) می‌باشند [۴]، هرگاه ظرف محتوی مخلوط اشباع کننده و اجزاء آلومینایز شده حرارت داده شود، واکنش‌های زیر رخ می‌دهند:



محصولات تجزیه فعالساز جایگزین هوای ظرف شده و تا حدودی اکسیدهای روی سطح پودر فلز و همچنین سطح آلیاژ را احیاء می‌کنند [۴]. سپس کلرید هیدروژن با آلومینیم واکنش کرده، تشکیل کلریدهای آلومینیم می‌دهد:



کلریدهای آلومینیم تولید شده بر روی سطح قرار می‌گیرند (بصورت اشباع شده)، بگونه‌ای که در این سطوح آلومینایدها و کلریدهایی با ظرفیت بالاتر حاصل می‌گردند [۴]:



AlCl_3 حاصل از واکنش به مخلوط پودری رفته و دوباره با آلومینیم واکنش می‌کند.

بنابراین بطور کلی می‌توان گفت واکنش شیمیایی که منجر به رشد پوشش آلومینایدی می‌شود بصورت زیر است [۵]:



گزارش شده است [۵] که سرعت راسب شدن آلومینیم به فشار جزئی AlCl در مخلوط گازی بستگی دارد. شکل ۲-۲ نشان می‌دهد که سرعت رسوب آلومینیم با دمای رسوب‌دهی و دمای اشباع متناسب است [۵] و میزان افزایش جرم با افزایش دمای رسوب‌دهی و دمای اشباع AlCl_3 افزایش می‌یابد.

شکل ۲-۳ وابستگی افزایش جرم را به دمای اشباع در دو دمای رسوب‌دهی ۸۵۰°C و ۱۰۵۰°C نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش درجه حرارت اشباع، مقدار جرم پوشش نیز افزایش می‌یابد. و مقدار افزایش جرم در درجه حرارت پوشش‌دهی ۱۰۵۰°C بسیار بیشتر از ۸۵۰°C است [۵].