

به نام خدا



# مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

[www.Iran-mavad.com](http://www.Iran-mavad.com)



## نوع فرایندهای پیشرفته و مدرن PVD :

۱- رسوبدهی از طریق تبخیرسازی سطحی (Evaporation deposition) :

فرایندی است که در آن مواد ابتدا به وسیله یک قطعه مقاومت الکتریکی تحت شرایط خلاء کم حرارت داده شده سپس بر روی یک زیرپایه رسوب داده می شوند.

۲- رسوبدهی فیزیکی بخار توسط اشعه الکترونی (Electron beam pvd) :

فرایندی که در آن مواد جهت رسوب دهی بایستی ابتدا به وسیله یک منبع تحت شرایط خلا زیاد بمباران الکترونی شده و تحت فشار بخار زیاد تبخیر شوند.

۳- رسوبدهی توسط کاتدپرانی (Sputter depestion) :

در این فرایند یک محیط پلاسمای گرم و پر انرژی و خنثی مواد هدف را بمباران کرده و تبخیر می شوند.

۴- رسوبدهی به وسیله قوس کاتدی (cathodic Arc vapor deposition) :

فرایندی که در آن مواد پوسته هدف به وسیله یک قوس الکتریکی مستقیم و پر انرژی به حالت بخار تبدیل در می آیند .

هریک از فرایندهای بالا به طور جداگانه و به طور مفصل در قسمت های بعد توضیح داده خواهد شد ولی قبل از آن لازم است که درباره فرایندهای پوشش دهی سطح و عوامل مؤثر بر آن توضیحاتی داده شود.

### فرایندهای سطحی :

این فرایند شامل تغییر دادن خواص سطح و مناطق نزدیک سطح می باشد که می تواند توسط فرایند روکش کاری یا فرایند ترمیم سطحی انجام شود.

در فرایند پوشش دهی یک ماده بر سطح اضافه می شود و روی سطح را کاملاً می پوشاند به طوری که سطح اولیه دیگر قابل رویت نمی باشد. اما در فرایند ترمیم سطحی، خواص سطح تغییر می کند اما ماده اولیه سطح هنوز بر روی سطح وجود دارد.

هر فرایندی مزایا، معایب و کاربردهای خاص خود را دارا می باشد. در بعضی موارد فرایند ترمیم سطحی می تواند جهت ترمیم و بهبود سطح زیرپایه مورد استفاده قرار گیرد قبل از اینکه بخواهیم فرایند رسوبدهی و پوشش دهی بر روی سطح را شروع کنیم. به عنوان مثال سطح یک فولاد می تواند به وسیله محیط پلاسما نیتروژن سخت شود قبل از اینکه توسط فرایند PVD یک رسوب سخت بر روی آن ایجاد شود.

گاهی اوقات فرایند ترمیم و بهبود سطح می تواند پس از انجام فرایند رسوبدهی جهت تغییر خواص و ویژگی های پوشش ایجاد شده مورد استفاده قرار گیرد. برای مثال خواص مکانیکی پوشش های ایجاد شده توسط فرایند کاتدپرانی بر روی سطح پره توربین یک هواپیما را می توان توسط فرایند ساچمه زنی بهبود بخشید و

شدن پوشش و دانسیته آنها را افزایش داد. فرایند رسوبدهی فیلم ها و لایه ها به صورت اتمی فرایندی است که در آن مواد تبخیر شده اتم به اتم بر روی سطح مورد نظر رسوب داده می شوند.

لایه های به دست آمده می تواند از محدوده تک کریستال تا آمورف، کاملاً متراکم تا کمی متراکم، خالص تا ناخالص و نازک تا ضخیم تغییر کند .

معمولاً واژه لایه های نازک برای لایه هایی به کار برده می شود که ضخامتی در حدود یک نانومتر تا چند میکرون داشته باشند و می تواند به نازکی لایه های چند اتمی باشد.

قطعات نیمه هادی الکترونیکی و پوشش های نوری، اصلی ترین کاربردهای سودمند این لایه ها می باشد .

در اغلب موارد، خواص این لایه ها توسط مواد زیر پایه تحت تأثیر قرار می گیرد و این خواص می تواند در سر تا سر ضخامت لایه تغییر کند. لایه های با ضخامت بیشتر معمولاً روکش نامیده می شوند. فرایندهای رسوبدهی اتمی می تواند در یک محیط خلا، پلاسما، گازی یا الکترولیتی انجام گیرد .

فرایندهای PVD که اغلب فرایندهای فیلم نازک نامیده می شوند جز فرایندهای رسوبدهی اتمی می باشند که در آن مواد از یک منبع مایع یا جامد بخار شده و به شکل بخار از طریق یک محیط خلاء یا محیط با گازهای کم فشار (پلاسما) به سمت یک زیرپایه انتقال یافته و بر روی آن رسوب داده شده و متراکم می شوند. در بعضی از منابع آورده شده که این فرایند جز فرایندهای رسوبدهی مولکولی یا یونی نیز می باشد .

به طور نمونه فرایندهای PVD برای رسوب فیلم های با ضخامت در حدود چند نانومتر تا هزار نانومتر به کار برده می شوند اگرچه می توان از آنها برای تشکیل پوشش های چند لایه ای، رسوبدهی لایه هایی از جنس ترکیب زیرپایه و رسوب های بسیار ضخیم نیز استفاده کرد.

اندازه زیرپایه می تواند کوچک یا بزرگ باشد و شکل آنها نیز می تواند به صورت ساده یا پیچیده تغییر کند. سرعت رسوبدهی در فرایند PVD از ۱۰ - ۱۰۰ آنگستروم بر ثانیه متغیر می باشد .

فرایندهای PVD در واقع یک فرایند جایگزین روش آبرکاری می باشد و از جهاتی شبیه به فرایند CVD می باشد اما نسبت به آن مزایا و معایبی دارد .

در فرایندهای CVD رشد لایه ها در دماهای بالا رخ می دهد که منجر به تشکیل محصولات گازی خورنده می شود و ممکن است باعث ایجاد ناخالص در لایه های پوشش داده شده گردد اما فرایندهای PVD می تواند در دماهای رسوبدهی پایین تر و بدون ایجاد محصولات خورنده و ناخالص در لایه ها انجام گیرد ولی سرعت رسوبدهی آن پایین است و باعث ایجاد تنش های پس ماند فشاری در لایه ها خواهد شد .

## روش های رسوب فیزیکی بخار:

### انواع روش های رسوب فیزیکی بخار (Physical Vapor Deposition Techniques)

به دو روش عمده انجام می گیرند که عبارتند از:

- تبخیر (Evaporation)

- کندوپاش (Sputtering)

ساده ترین روش تبخیر، استفاده از گرمایش مقاومتی است. در این روش، منبع، گرم تر از زیرپایه است و مواد از منبع تبخیر شده و روی زیرپایه سردتر متراکم می شوند. در این مورد باید نکاتی رعایت شوند که عبارتند از:

1- ماده اولیه باید به فشار بخار مطلوبی برسد.

2- ترکیب بخار تولید شده باید طبق فرمول شیمیایی ترکیب نشانده شده روی زیرپایه، تنظیم شود.

3- بخار تولید شده به زیرپایه بچسبد.

شکل روبرو طرح ساده ای از دستگاه PVD است. صفحه ای با قطر 20 cm تقریباً در 20 cm منبع تبخیر قرار دارد. سرعت رشد فیلم نازک از فرمول زیر به دست می آید:

$$G = \frac{m}{\pi \rho r^2} \cos \phi \cos \theta$$

m: سرعت تبخیر (g/s)

$\rho$ : چگالی بخار

r: فاصله زیرپایه از منبع cm

$\Phi$ : زاویه منبع تا خط عمود بر زیرپایه

اگر تحت چنین شرایطی فیلم نازکی با ضخامت 10 $\mu$ m نشانده شود، ضخامت لبه های فیلم 9 $\mu$ m است. در واقع فیلم غیریکنواختی ایجاد می شود. این پدیده ناشی از هندسه دستگاه است. می توان برای تهیه فیلم یکنواخت، سطح فیلم مورد نظر را به صورت کره ای بزرگ تغییر داد. در این صورت کسینوس معادله فوق، به شکل  $r/2r$  تغییر می کند و  $r_0$  برابر با شعاع کره است. همچنین برای تهیه فیلم یکنواخت تر، می توان از زیرپایه چرخان استفاده کرد.

به دلیل ساده بودن این روش، هنوز به عنوان یک روش معمولی مورد استفاده قرار می گیرد. از مزایای دیگر این روش می توان به سرعت بالای رسوب و نیز سرد بودن زیرپایه اشاره کرد. به دلیل سرد بودن زیرپایه می توان فیلم نازک را روی زیرپایه پلیمری آلی نشانده. فرآیند متراکم کردن باید در خلا بالا انجام شود تا از انجام واکنش شیمیایی جلوگیری شود. همچنین فیلمی با درصد خلوص بالاتری ایجاد می شود.

اگر نتوان با استفاده از روش گرمایش مقاومتی ماده موردنظر را تبخیر کرد، می توان از منابع گرمایی دیگر مانند باریکه الکترونی استفاده کرد. در نشست فیزیکی بخار با استفاده از باریکه الکترونی (EB-PVD) به طور مستقیم یک باریکه پرفدردت الکترونی ( $\sim 20\text{kv}$ ،  $\sim 500\text{mA}$ ) به عنوان منبع گرمایی استفاده می شود.

الکترون ها توسط ماده مورد نظر جذب شده و انرژی آن ها به ماده منتقل می شود. در نتیجه ماده اولیه به صورت منطقه ای ذوب می شود. بنابراین در این روش تمام ماده گرم نمی شود، بلکه فقط منطقه ای که باریکه الکترونی به آن می تابد، گرم می شود.

باریکه الکترونی عموماً به یکی از دو روش نشان داده شده در شکل روبرو استفاده می شود؛ به صورت خمیده و مستقیم. به دلیل اینکه ذرات تحت باریکه الکترونی باردار می شوند، در نتیجه می توانند به وسیله صفحات ولتاژ بالا و یا مغناطیسی هدایت، متمرکز و یا دستکاری شوند. سرعت رسوب فیلم در روش EB-PVP از  $10\text{\AA}$  تا  $0.1\text{mm}$  در هر دقیقه متغیر است. به دلیل اینکه الکترون ها نیز همراه ماده مورد نظر روی سطح فیلم قرار می گیرند، در نتیجه باید زیرپایه هادی جریان الکترونی باشد. بهترین گزینه برای زیرپایه فلز مس است.

متداول ترین سیستم رسوب فیزیکی بخار در مقیاس صنعتی، کندوپاش است. اصول روش کندوپاش با سایر روش های PVD متفاوت است. در کندوپاش بخار ماده به وسیله گرما تولید نمی شود. بلکه کندن اتم ها از روی سطح به صورت مکانیکی است. نیروی جنبشی مورد نیاز از طریق یون های پر انرژی تامین می شود. یون های پر انرژی به وسیله تخلیه الکتریکی تولید شده و با سرعت زیادی به سطح ماده اولیه برخورد می کند. عموماً از گاز آرگون برای تهیه یون های پر انرژی استفاده می شود. این یون ها در منطقه تخلیه تابان یونیزه می شوند. یکی از مشکلات این روش، ایجاد قطعات بزرگ در طی عمل کندوپاش است. برای جلوگیری از رسیدن این قطعات به زیرپایه، می توان از تکنیکی موسوم به نشست قوس خلا فیلتر شده استفاده کرد. در این روش پلاسمای ایجاد شده به وسیله میدان مغناطیسی، ذرات بخار را از قطعات بزرگتر جدا می کنند.

بخار تولیدشده صرف نظر از نحوه تولید آن، باید در نهایت روی زیرپایه نشانداده شود. عموماً ضخامت فیلم های تشکیل شده غیر یکنواخت است. مخصوصاً اگر ضخامت فیلم بسیار زیاد باشد. برای تولید فیلمی با ضخامت یکنواخت می توان از زیرپایه چرخان استفاده کرد. روش دیگر طراحی ویژه دستگاه رسوب دهی است. به گونه ای که بخار تولیدی و زیرپایه موردنظر در یک ستون قرار نگیرند. این روش نشست با زاویه متحرک نامیده می شود. در این روش زیرپایه با توجه به جهت بخار ورودی کج می شود. در نهایت با استفاده

از این روش می توان مورفولوژی جالبی را بر روی سطح طراحی کرد. این فیلم‌ها برای سطوح متخلخل و آنیزوتروپیک مورد استفاده قرار می‌گیرند

### گرد آوری شده توسط دپارتمان پژوهشی شرکت پاکمن

مسعود صلواتی نیاسری ، نانو شیمی ، انتشارات علم و دانش ، ۱۳۸۸.

ماهنامه الکترونیکی مهندسی مواد و متالورژی

### روش های رسوب فیزیکی بخار از دید :

انواع فرایندهای پیشرفته و مدرن رسوب فیزیکی بخار عبارتست از:

- رسوبدهی از طریق تبخیرسازی سطحی (Evaporation deposition): فرایندی است که در آن مواد ابتدا به وسیله یک قطعه مقاومت الکتریکی تحت شرایط خلاء کم حرارت داده شده سپس بر روی یک زیرپایه رسوب داده می شوند.

- رسوبدهی فیزیکی بخار توسط اشعه الکترونی (Electron beam pvd): فرایندی که در آن مواد جهت رسوب دهی بایستی ابتدا به وسیله یک منبع تحت شرایط خلا زیاد بمباران الکترونی شده و تحت فشار بخار زیاد تبخیر شوند.

- رسوبدهی توسط کاتدپرانی (Sputter depestion): در این فرایند یک محیط پلاسمای گرم و پر انرژی و خنثی مواد هدف را بمباران کرده و تبخیر می شوند.

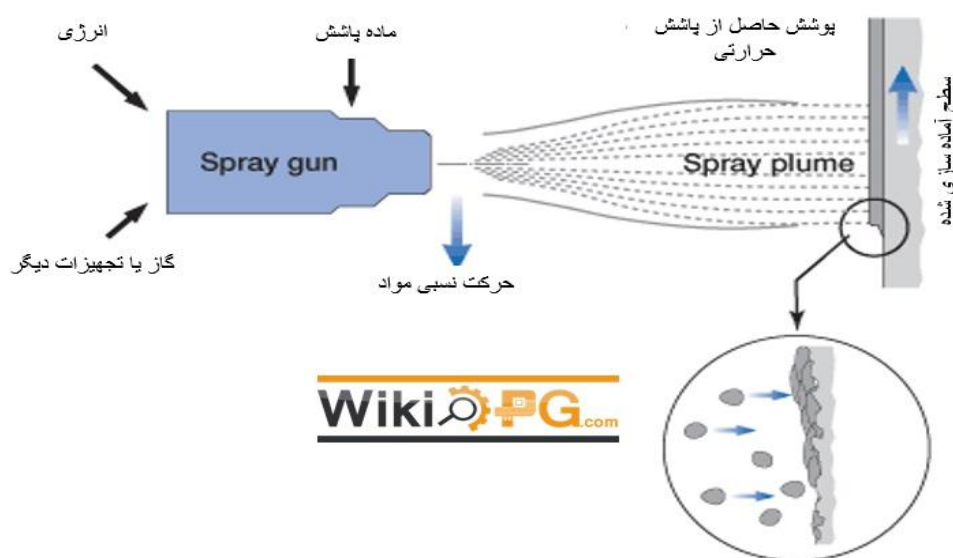
- رسوبدهی به وسیله قوس کاتدی (cathodic Arc vapor deposition): فرایندی که در آن مواد پوسته هدف به وسیله یک قوس الکتریکی مستقیم و پر انرژی به حالت بخار تبدیل در می آیند ... ادامه

### پاشش حرارتی

پاشش حرارتی (thermal Spray) نامی کلی از روش‌هایی است که برای ایجاد پوشش در سطح قطعات، با استفاده از ترکیبی از انرژی حرارتی و انرژی جنبشی انجام می‌گیرد. مواد اولیه مورد استفاده در این فرایندها، به شکل پودر، سیم و یا میله است.



در تمامی فرایندهای حرارتی، مواد مصرفی پوشش به تفنگ پاششی (spray gun) تغذیه شده سپس منابع انرژی، مواد اولیه را به صورت ذوب و یا خمیری در آورده و در مرحله بعد، ذرات ماده پوششی توسط یک گاز خنثی (آرگون، هلیوم، ازت و یا مخلوطی از این گازها) سرعت داده شده و با شتاب، به سطح آماده شده قطعه، پرتاب شده و در اثر شتاب زیاد، در هنگام برخورد ذرات به سطح قطعه، بین ذرات و سطح، یک پیوند مکانیکی قوی به وجود آمده و ذرات در یکدیگر قفل می‌شوند و بتدریج پوشش با ضخامت مورد نظر ساخته می‌شود. چگالی پوشش به مواد، دمای مواد به هنگام برخورد با قطعه کار و انرژی ضربه آن بستگی دارد. از این جهت تقسیم بندی های مختلفی برای فرایندهای پاشش حرارتی ارائه شده است.



دسته بندی فرایندهای پاشش حرارتی



فرآیندهای پاشش حرارتی به سه دسته کلی تقسیم بندی می‌شوند:

۱. فرآیندهای با انرژی کمتر

این فرآیند به صورت پاشش قوس و شعله‌ای بوده و به عنوان فلزپاشی (metallising) دسته بندی می‌شود.

۲. فرآیندهای با انرژی بیشتر

فرآیندهای با انرژی بیشتر، پلاسما، تفنگ انفجاری و پاشش احتراقی با سرعت بالا برای ایجاد پوشش‌هایی با تخلخل بسیار کمتر و چسبندگی بهتر به زیر لایه و استفاده از مواد با نقطه ذوب بالا بکار می‌روند.

۳. فرآیند پاشش گداخت

فرآیند پاشش-گداخت (spray fuse) برای تولید پوشش آلیاژهای خاص خودروانساناز پایه نیکل یا کبالت مورد استفاده قرار می‌گیرد. دمای پوشش در این فرآیند تا حد دامنه انجماد و ذوب آلیاژ بالا رفته و عمل خودروانسازی امکان پیوند نفوذی بین ذرات پاشیده شده و زیر لایه را فراهم می‌آورد.

مواد مصرفی پاشش حرارتی به دو صورت قابل دسترس می‌باشد. برای فرآیندهای فلزپاشی از سیم جامد کشیده شده و همچنین سیم مغزدار که مواد پوشش در یک چسب آلی پخش شده است، استفاده می‌شود. برای فرآیندهای پرانرژی، از پودر استفاده می‌شود. این روش برای مواد غیر فلزی مزایایی دارد و می‌تواند براحتی به محل مورد نظر برای پاشش حمل شود، همچنین می‌توان در مشعلهایی که برای استفاده در سوراخهای کوچک طراحی شده اند نیز مورد استفاده قرار گیرد.

انواع پاشش حرارتی

انواع پاشش حرارتی عبارتند از:

۱. پاشش سیمی با گاز اکسیژن-سوخت (فلزپاشی)

۲. پاشش پودر با گاز اکسیژن-سوخت (پودرپاشی)

۳. فلزپاشی با قوس

۴. پاشش قوسی پلاسما در هوا (APS)

۵. پاشش پلاسمایی در خلا

۶. پاشش احتراقی سریع

۷. پوشش دهی انفجاری (Detonation coating)

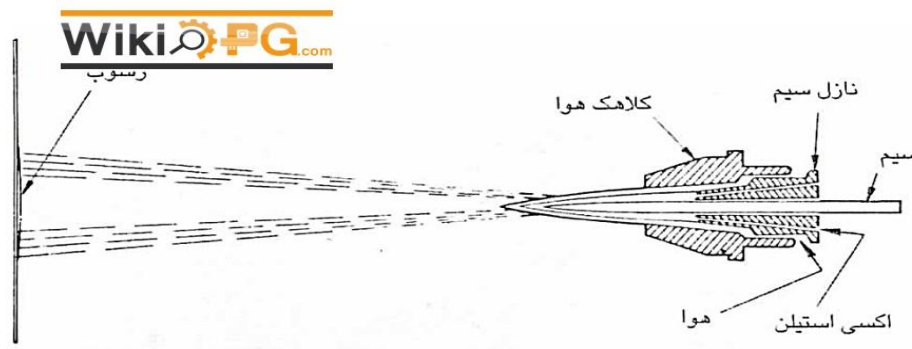
۸. فرآیند Jet kote

۹. سیستم جت الماس



### پاشش سیمی با گاز اکسیژن - سوخت

در پاشش سیمی با گاز اکسیژن-سوخت، مواد پوشش به شکل سیم، میله یا مغزه بوسیله یک موتور با سرعت متغیر به مرکز یک شعله چند ژینگلوره تغذیه و سر سیم ذوب می شود. یک ژینگلور حلقوی برای هدایت گاز، ماده مذاب را به سمت زیر لایه به پیش می برد.



پاشش سیمی عمدتاً در رسوب دهی پوشش های روی و آلومینیم به منظور حفاظت خوردگی به کار می رود. قطعات ساییده شده یا خوب تراشکاری نشده را می توان با فولادها، مس و آلیاژهای آن، نیکل و آلیاژهای آن یا با سرامیکها ترمیم نمود.

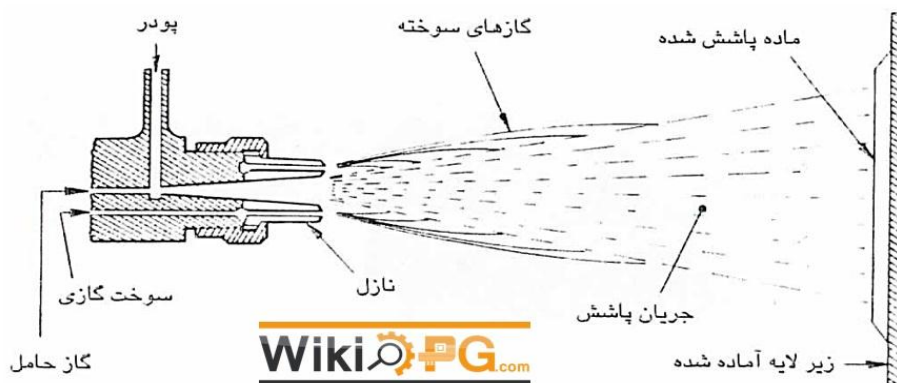
مزایای این روش عبارتند از:

۱. هزینه نسبتاً کم تجهیزات
  ۲. سرعتهای بالای پاشش
  ۳. محدوده وسیع مواد عملیات سطحی که میتواند پاشش شود
  ۴. سازگاری با قطرهای مختلف سیم
  ۵. امکان خودکار سازی عملیات پوشش
- معایب این روش نیز عبارتند از:

۱. محدودیت در شکل سیم مصرفی
۲. چگالی کمتر رسوب و استحکام چسبندگی کمتر نسبت به پاشش قوسی

### پاشش پودر با گاز اکسیژن - سوخت

مواد عملیات سطحی به شکل پودر در یک مخزن نگهداری شده و از آنجا یا توسط یک گاز حامل (معمولاً هوا) و یا از طریق فشار کاهش یافته توسط یک ونتوری در مسیر جریان گاز به شعله پاشش انتقال می یابد. پودر پاشی عمدتاً در پوشش های مقاوم به سایش آلیاژهای پایه کبالت یا نیکل استفاده شده که برای بدست آوردن رسوب کاملاً چگال با پیوند متالورژیکی بعداً گداخته می شوند.



مزایای این روش عبارتند از:

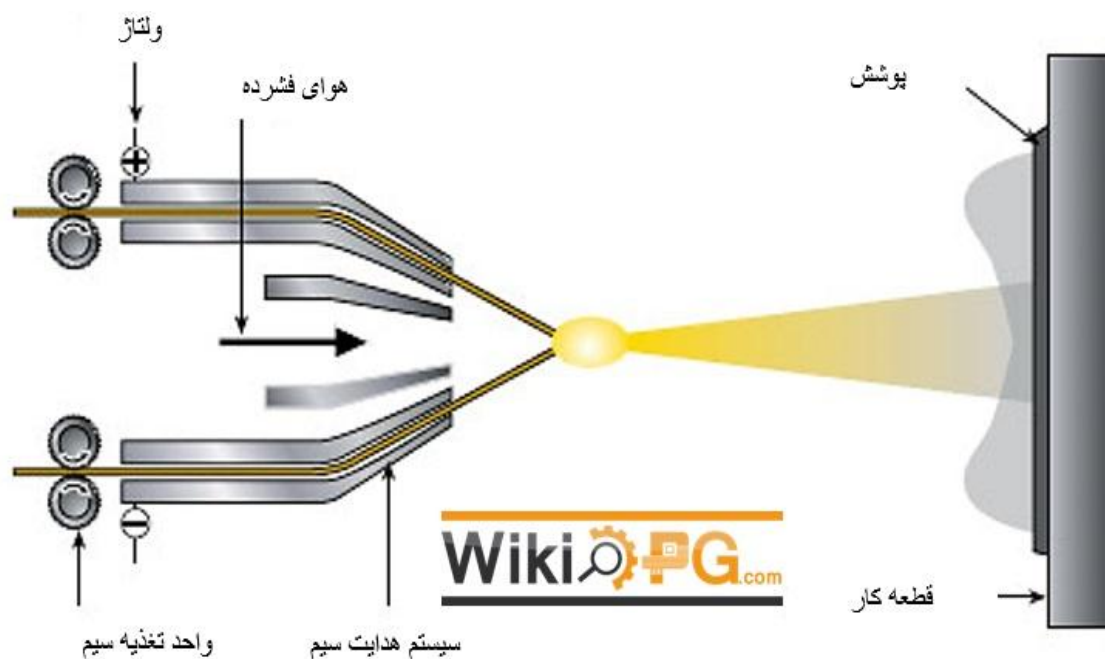
۱. مناسبترین فرآیند پاشش شعله‌ای برای مواد پرآلیاژ و خودروانساناز سطحی
۲. امکان تامین مداوم مواد عملیات سطحی
۳. امکان استفاده در پوشش دهی موادی که نمی‌تواند بصورت سیم یا میله تولید شوند.

معایب این روش نیز عبارتند از:

۱. نیاز به مواد مصرفی پودر شکل با محدوده مناسب دانه بندی
۲. ایجاد رسوب با چگالی و استحکام چسبندگی کمتر نسبت به پاشش قوسمگر در آلیاژهای خودروانساناز که بعداً گداخته می‌شوند.

### فلزپاشی با قوس

در فلزپاشی سیمی با قوس الکتریکی از سیمهای دوقلو استفاده شده که با هم به قسمت سر تفنگ پاشش تغذیه می‌شود، در این قسمت قوس بین انتهای سیمها برقرار شده و قطرات مذاب توسط دمش گاز فشار بالا (معمولاً هوا) پاشیده می‌شود. فرآیند پاشش قوس برای عملیات سطحی قطعات بزرگ مانند غلتک‌های صنایع فولاد، کاغذ، رنگ و عملیات سطحی و ترمیم پیستونها، سنبه‌ها، محورها، یاتاقان‌ها و ... مناسب است.



مزایای این روش عبارتند از:

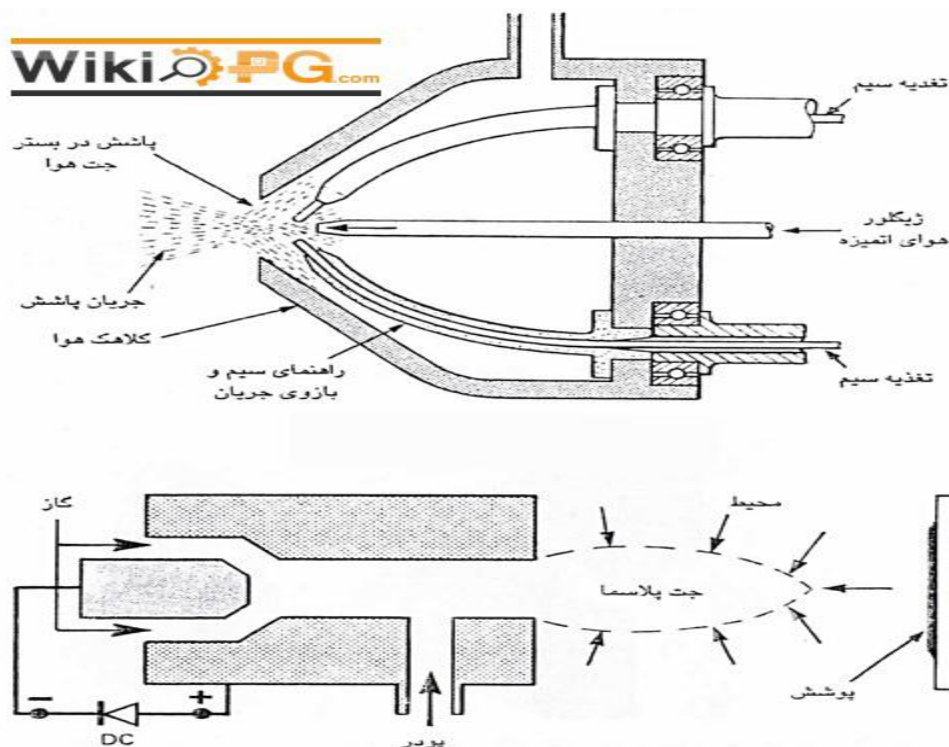
۱. سیمهای جامد (توپر) یا لوله‌ای (توخالی) با محدوده وسیعی از آلیاژهای پوشش می تواند استفاده شود.
  ۲. امکان سرعتهای پاشش خیلی زیاد.
  ۳. با استفاده از دو سیم مختلف می توان پوششهای کامپوزیتی یا آلیاژهای خمیری ایجاد کرد.
- معایب این روش نیز به شرح زیر است:

۱. محدودیت دسترسی مواد مصرفی به شکل سیم.
۲. چگالی و چسبندگی کمتر رسوب نسبت به پلاسما، تفنگ انفجاری و jet kote

### پاشش قوسی پلاسما در هوا (APS)

یک مشعل پاشش قوسی پلاسمایی متشکل از آند لوله‌ای مسی در پشت کاتد تنگستن است. هر دو الکترود آبگرد بوده و توسط بدنه‌ای عایق که آنها را در فاصله مناسب نگهداشته است و بعنوان یک محفظه قوس عمل می کند، احاطه شده است. قوس جریان بالا درون مشعل تولید می شود و گاز به محفظه قوس تزریق و در آنجا گاز گرم شده و با عبور از قسمت باریک در سوراخ آند به یک پلاسما دمای بالا تبدیل می شود. ماده پودری به این جریان پلاسما تزریق شده، گرم می شود و به سوی لایه پرتاب می گردد. این فرآیند بیشتر برای رسوب دهی مواد دیرگداز نقطه ذوب بالا، سرامیکها، کاربیدها و آلیاژهای دمای بالا مثلا اجزا موتور هواپیما، قطعات ماشین آلات نساجی، پوششهای مقاوم به سایش پمپها و... بکار می رود. پوششهای با کیفیت بالا که بوسیله این فرآیند تولید

شده، در قطعات موتورهای هواسوزی بکار می‌روند که برای مقاومت به خوردگی و سایش در دمای بالا با موادی نظیر سری M-Cr-Al-Y پوشش داده می‌شوند.



مزایای این روش به شرح ذیل است:

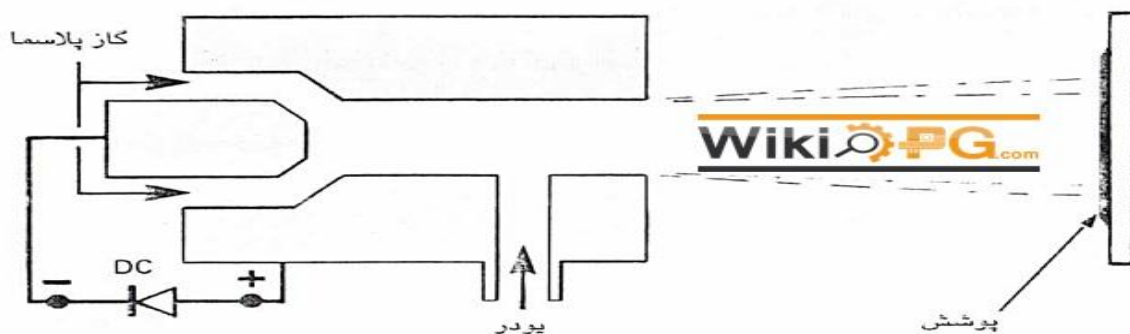
۱. امکان پاشش تقریباً تمامی مواد به دلیل دمای بالا
۲. چگالی زیاد و پیوند قوی رسوب با زیر لایه
۳. حرارت اعمالی خیلی کم به زیر لایه

معایب این روش عبارتند از:

۱. تجهیزات حجیم و هزینه سرمایه گذاری بیشتر نسبت به پاشش قوس و گازی
۲. چگالی و چسبندگی کمتر رسوب به پاشش پلاسمایی در خلا (vps)

### پاشش پلاسمایی در خلا

این فرآیند یا نام‌های پاشش پلاسمایی در خلا یا پاشش پلاسمایی کم فشار (VPS/LPPS) شناخته می‌شود. در این فرآیند پاشش در محفظه‌ای که ابتدا تا فشار  $10^{-2}$  mbar خلا شده و سپس مجدداً با گاز آرگون تا فشار 40 mbar پر شده، انجام می‌شود. خارج ساختن اکسیژن از محیط باعث می‌شود که ذرات پاششی و سطح زیرلایه در طی پاشش اکسید نشده و رسوب چگال با پیوند عالی بدست آید. جت پلاسما در اینجا طویل تر از روش پاشش در هوا بوده و قطعه کار به دماهای بیشتر می‌رسد.



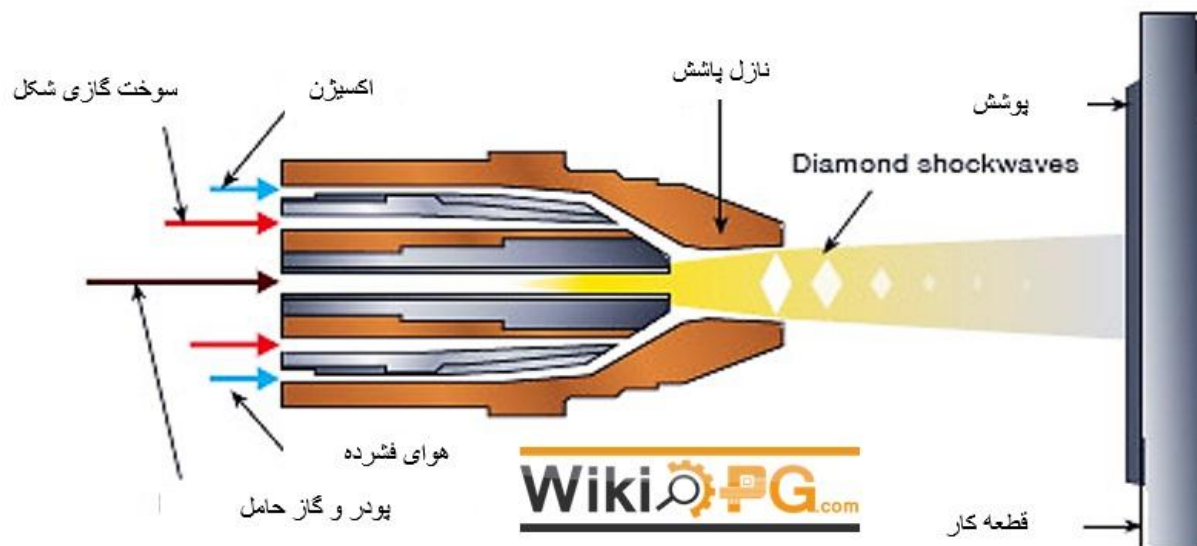
مزایا و معایب این روش در ذیل اشاره شده است:

۱. هزینه زیاد سرمایه گذاری، تجهیزات حجیم و ثابت.
۲. گرمای اعمالی زیاد به قطعه کار ممکن است سبب اعوجاج یا تغییرات متالورژیکی در زیر لایه شود.
۳. فرآیند، دستی نیست.

### پاشش احتراقی سریع

این گروه از فرآیندها برای رسیدن به چگالی بالاتر در پوشش و چسبندگی بیشتر به زیر لایه طراحی شده و می‌تواند از مواد پوشش پودری شکل، از نوع جوش پذیر و غیر جوش پذیر، بکار رود.

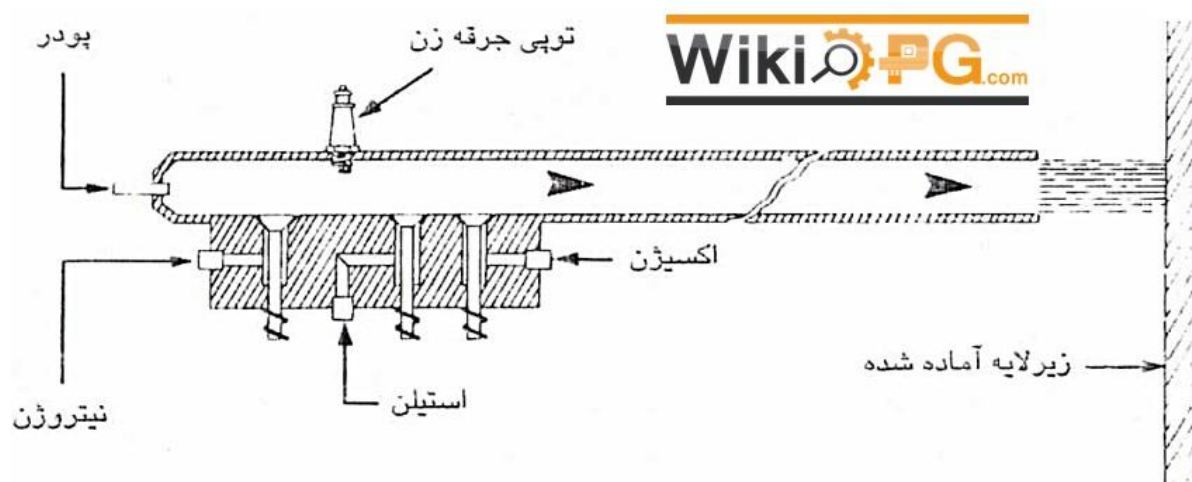
چگالی و چسبندگی پوشش به عواملی نظیر دما و سرعت ذرات پاششی در حین برخورد با قطعه کار بستگی دارد. مقادیر بالاتر این عوامل با استفاده از تفنگهای پاشش حرارتی با طراحی خاص، نسبت به فرآیندهای معمولی قوسی و گازی قابل دستیابی است.



### پوشش دهی انفجاری

در ناحیه‌ای مشابه لوله تفنگ، ماده پودری پوشش و مخلوط گاز اکسی استیلن وارد شده سپس توسط جرقه ناشی از تخلیه الکتریکی آتش گرفته و مخلوط منفجر می‌شود و پودر در حالی که دما و سرعت بالایی دارد

از لوله پرتاب می گردد، برای بدست آمدن مداوم رسوب، چرخه عملیات تکرار می شود، با توجه به ایجاد سر و صدا توسط این فرآیند، عملیات در یک محفظه ضد صدا و بصورت کاملاً خودکار انجام می شود. از کاربردهای این روش می توان به حفاظت قطعات موتور توربین گازی در برابر انواع مختلف سایش در دمای بالا و قطعات ماشینهای نساجی، غلتکهای صنایع فولاد، کاغذ، پلاستیک، ابزارهای برش، یاتاقانها و سایر قطعات برای صنعت نیروگاههای هسته ای اشاره کرد.



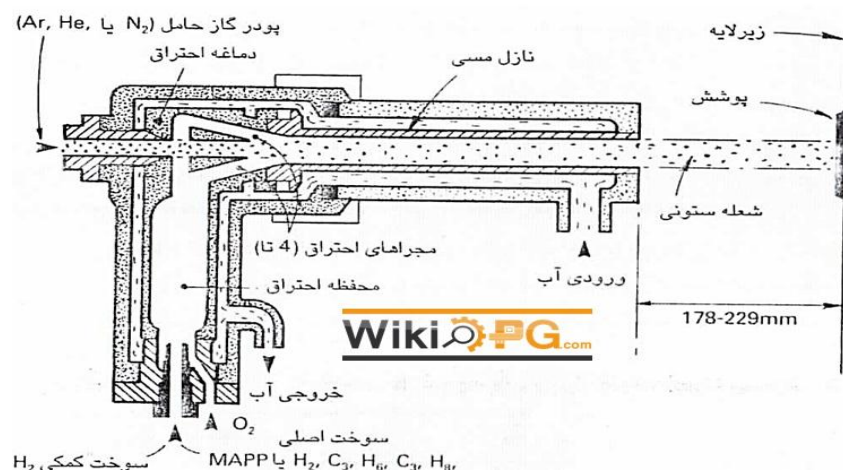
مزایای این روش عبارتند از:

۱. رسوب با چگالی بسیار بالا
۲. چسبندگی زیاد رسوب
۳. عدم نیاز به آماده سازی سطح توسط ساچمه زنی
۴. گرمای اعمالی کم به قطعه کار
۵. فرآیند کنترل شده و کاملاً خودکار

### فرآیند Jet Kote

در این فرآیند از احتراق مداوم اکسیژن و سوخت های گازی برای شتاب دادن و پرتاب مواد پودری پوشش روی سطح قطعه کار در سرعت بالا برای تشکیل پوشش های چگال با استحکام چسبندگی بالا استفاده می شود. تمامی مواد مستقیماً برای پوشش زیر لایه بکار می رود و هیچگونه لایه اتصالی نیاز نیست. این فرآیند می تواند بطور دستی یا کنترل شده و خودکار انجام شود و کنترل جریان گاز بصورت معمولی یا جرمی صورت گیرد، بنابراین هم عملیات در محل و هم ثابت امکان پذیر است.





فرآیند رسوب دهی برای مواد شامل تنگستن و کرم، و برای آلیاژها شامل فولاد زنگ نزن و پایه کبالت و نیکل بکار می رود. از کاربردهای این فرآیند می توان به صنایع نساجی، شیمیایی، شیرآلات خطوط لوله، نیروگاه و هواپیمایی اشاره کرد. از مزایای این روش می توان به موارد زیر اشاره داشت:

۱. رسوب چگال و چسبنده به قطعه کار
۲. گرمای اعمالی کم به قطعه کار
۳. به فاصله تفنگ-قطعه کار حساس نیست
۴. قابلیت عملیات دستی و خودکار

### سیستم جت الماس

در سیستم جت الماس از جریان کنترل شده اکسیژن و سوخت گازی (معمولاً پروپیلن یا هیدروژن) همراه با هوای فشرده برای شتاب دهی مواد مذاب از تفنگ و برخورد سریع با قطعه کار استفاده می شود. این فرآیند برای تولید پوشش هایی با کیفیت بالا در فلزات، کاربیدها و مواد مخصوص نظیر رسوب های مقاوم به سایش برای موتورهای توربین گازی استفاده کرد. این فرآیند بصورت دستی، خودکار و کنترل رایانه ای برای نیازهای مختلف صنعتی قابل انجام است. از جمله مزایای این روش می توان به موارد ذیل اشاره کرد:



۱. پوشش چگال با استحکام پیوند بالا
۲. پوشش های ضخیم کم تنش غیر وابسته به سختی پوشش



۳. قابل دسترس بودن مشعلهایی برای پاشش سطوح تا قطر ۱۰ میلیمتر

۴. عملیات و تعمیر و نگهداری راحت و ساده

### فرایند CDS

در فرآیند انفجاری مداوم (continuous detonation process) از اکسیژن و سوخت گازی پروپان یا پروپیلن استفاده می شود. این فرآیند طراحی شده تا بتوان پوشش‌های چگال چسبنده با مقاومت سایشی عالی را با استفاده از موادی نظیر کاربید تنگستن/کبالت، کاربید کرم/نیکل کرم، اینکونل و پودرهای سرامیکی بدست آورد. مزایای این روش عبارت است از:

۱. قابلیت تکرار زیاد مقادیر تنظیم شده برای پاشش

۲. سیستم تغذیه پودر بصورت تکی با دوتایی

۳. محدوده وسیع کنترل سرعت

۴. پوشش‌های چگال با چسبندگی زیاد به زیر لایه

فرآیندهای پاشش حرارتی محدوده وسیعی از امکانات برای کاربرد پوشش‌ها، از جمله مقاومت سایشی، خوردگی، اکسایشی و گرمایی بالایی، ایجاد کرده و همچنین می‌توان برای عایق‌های حرارتی و الکتریکی نیز استفاده کرد. تهیه پوشش‌های پایدار به عوامل زیر بستگی دارد:

۱. انتخاب صحیح مواد پوشش

۲. استفاده از روش‌های صحیح پوشش دهی

۳. آماده سازی مناسب سطح

۴. پارامترهای صحیح عملیات

۵. خودکار کردن فرآیند

۶. کنترل دقیق کیفیت مواد مصرفی پودر

گردآوری شده توسط دپارتمان پژوهشی شرکت پاکمن

استن گرینچر، مسعود بینش، تکنیک‌های پوشش دادن طراحی و کاربرد، چاپ اول، ۱۳۸۴

Thermal Spray Materials Guide, SulzerMetco, May 2012

ماهنامه الکترونیکی مهندسی مواد و متالورژی

### کندوپاش

در فرآیند کندوپاش (**Sputtering**)، با استفاده از ذراتی پر انرژی (۵۰-۱۰۰۰ الکترون ولت) سطح هدف بمباران می شود. در نتیجه برخورد ذرات پر انرژی به هدف، یک و یا تعداد بیشتری از اتم‌های هدف به بیرون پرتاب می شود. این روش برای ایجاد پوشش و تولید نانو لایه ها استفاده می شود. کاتد به ولتاژ

منفی متصل می شود و از جنس ماده پوشش دهنده انتخاب می شود. آند که در واقع زیرپایه پوشش است می تواند به صورت صاف، زاویه دار یا شناور قرار گیرد.

گاز و یا مخلوطی از گاز های مختلف با فشاری از چند میلی تور تا چند صد میلی تور، از طریق شیرهای ویژه ای به صورت کنترل شده وارد محفظه کندوپاش می شوند. متداول ترین گاز مورد استفاده برای محفظه کندوپاش آرگون است. زیرا نسبت به سایر مواد کندوپاش شده، ضریب نشر ثانویه بزرگتری دارد. می توان از گازهای نجیب دیگر مانند هلیوم و یا نئون نیز برای این منظور استفاده کرد. استفاده از گازهای سبک تر در فرآیند اسپاترینگ می تواند مشکلات مربوط استوکیومتری را در کندوپاش واکنشی (Reactive Sputtering) یا کندوپاش ترکیبات مختلف کاهش دهد. در این صورت گازهای  $O_2$  و  $N_2$  با نسبت های مشخص نسبت به گاز خنثی وارد محفظه کندوپاش می شوند.

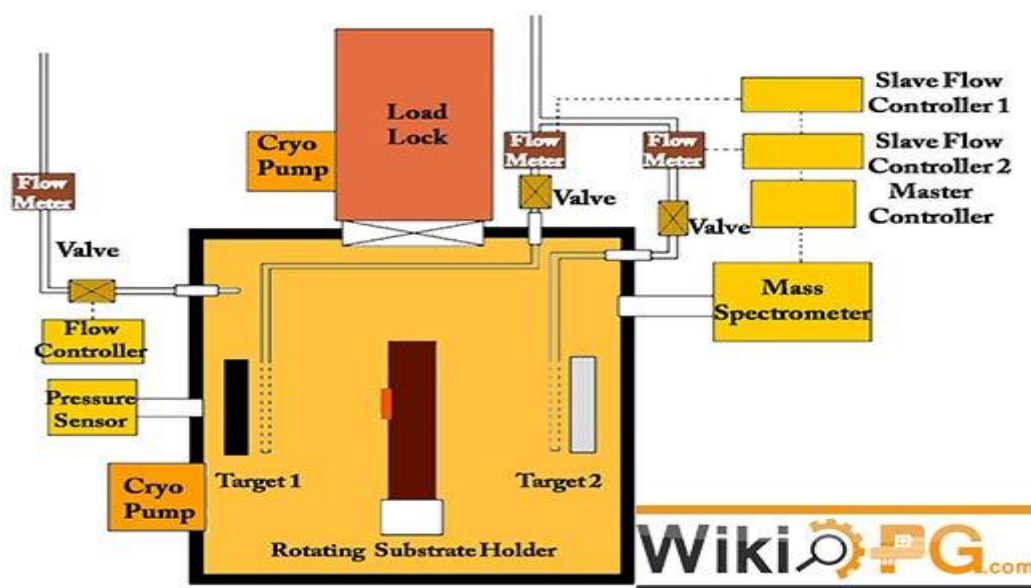
فرآیند کندوپاش با توجه به پدیده های زیر درک می شود:

یون های مثبت که از یونیزاسیون گاز توسط تخلیه الکتریکی، ایجاد شده اند، به سطح هدف برخورد کرده و از طریق انتقال انرژی و مومنتم اتم هایی را از هدف جدا می کنند. این اتم های با مقادیر مشخصی انرژی هدف را ترک می کنند روی زیرپایه تجمع می کنند و در نتیجه یک لایه نازک ایجاد می شود. حد کندوپاش (Sputter Yield) که به عنوان مقیاسی برای بازده فرآیند مد نظر قرار می گیرد عبارتست از نسبت اتم های جدا شده از هدف به تعداد بمباران های صورت گرفته.

### انواع روش های کندوپاش

روش کندوپاش DC برای مواد هادی و روش RF برای مواد عایق استفاده می شود. اما معمول ترین روش، کندوپاش با مگنترون است. در روش کندوپاش با مگنترون، میدان مغناطیسی پلازما را در اطراف سطح هدف محدود می کند. مزایای استفاده از مگنترون کندوپاش عبارت است از اندازه کاتد بزرگ، افزایش سرعت کندوپاش، بمباران کمتر هدف.

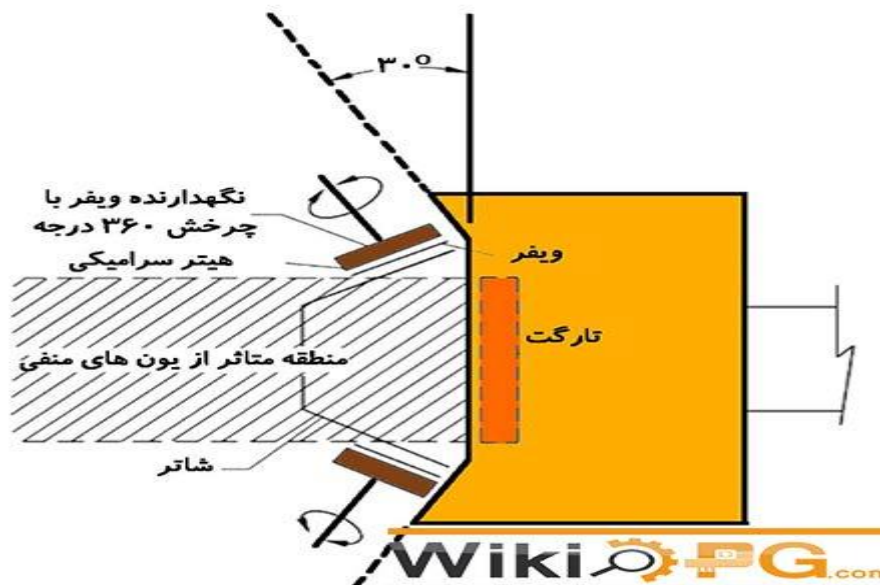
شکل زیر طرح شماتیکی از سیستم کندوپاش را نشان می دهد. این سیستم برای ساخت فیلم نازک چند لایه ای  $TiN/VN$  و یا  $TiN/NbN$  توسط یاشار و اسپرول در سال 1999 طراحی شده است. زیرپایه های مورد نظر روی صفحه گردان قرار گرفته است. زیرپایه باید به حد کافی بزرگ انتخاب شود تا جریانات متقاطع کندوپاش رخ ندهد. این نوع دستگاه برای ساخت بسیاری از سیستم های چند لایه ای استفاده شده است.



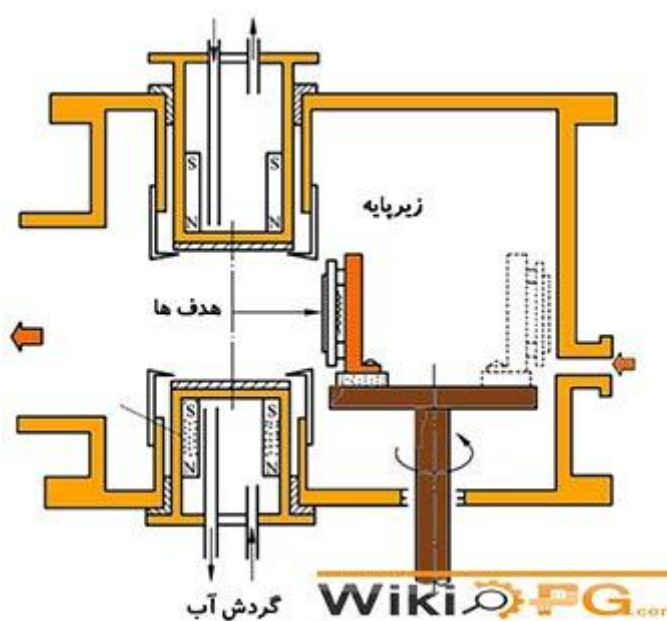
ساخت اکسیدهای چندتایی فلزات مانند  $\text{SrTiO}_3$  و  $\text{YBa}_2\text{Ca}_3\text{O}_7$  توسط روش کندوپاش پیچیده است و باید ترکیب بخار مورد استفاده کنترل شود. بمباران سطح فیلم توسط یون‌های پرانرژی مشکلات جدی در پی دارد مانند صدمه رساندن و یا کنده شدن اتم‌های سطح فیلم تشکیل شده، در اثر برخورد یون‌های منفی. برای کاهش اثر یون‌های منفی دو نظریه وجود دارد:

- 1- استفاده از فشار بالای گاز که انرژی یون‌های منفی را کاهش می‌دهد.
- 2- کندوپاش بدون محور. این روش به طور گسترده‌ای برای ایجاد فیلم‌های نازک ابر رسانا در دماهای بالا استفاده می‌شود.

شکل زیر موقعیت نسبی زیرپایه و هدف را نشان می‌دهد. از عیوب این چیدمان می‌توان به کاهش سرعت نشست و نیز محدودیت نشست برای فیلم‌های بزرگ اشاره کرد.



در هنگام نشست مواد **فرومغناطیس**، نمی توان از کندوپاش با مگنترون معمولی به خوبی استفاده کرد زیرا این مواد قابلیت نفوذ پذیری مغناطیسی بالایی دارند. در این موارد از کندوپاش هدف نما ( Facing Sputtering Target) استفاده می شود. شکل زیر طرح شماتیک این سیستم را نشان می دهد. در سیستم کندوپاش هدف نما، از یک جفت هدف استفاده می شود که نسبت به خود و بستر موازی هستند و در بیرون منطقه پلاسما قرار دارند. این چیدمان نه تنها مزایای کندوپاش مگنترون معمولی را دارد، بلکه از بمباران ذرات باردار به سطح فیلم می کاهد.



گرد آوری شده توسط دپارتمان پژوهشی شرکت پاکمن

Wang. Z, Handbook of Nanophase and Nanostructured Material, Kluwer Academic, 1991

ماهنامه الکترونیکی مهندسی مواد و متالورژی

### کندوپاش از دید

کندوپاش یکی از روش های لایه نشانی فیزیکی است که برای لایه نشانی بسیاری از مواد استفاده می گردد. به خاطر سادگی سامانه کندوپاش در مقایسه با دیگر سامانه های لایه نشانی و همچنین قابلیت لایه نشانی در مقیاس بزرگ از این روش برای کاربردهای صنعتی بطور گسترده استفاده می گردد. به منظور افزایش آهنگ لایه نشانی از کندوپاش مغناطیسی استفاده می گردد. در کندوپاش مگنترونی، یک میدان مغناطیسی موازی سطح کاتد به کار می رود که باعث می شود الکترون ها در تخلیه نورانی به صورت چرخزادی حرکت کنند این دام الکترونی آهنگ برخورد بین الکترون ها و مولکول های گاز کندوپاشی را افزایش می دهد و ما را قادر می سازد که در فشار های پایین تر کار کنیم. میدان مغناطیسی چگالی پلاسما را افزایش می دهد که منجر به افزایش چگالی جریان در هدف کاتدی می گردد و به طور مؤثری آهنگ کندوپاش را افزایش می دهد. به خاطر فشار کاری پایین گاز، ذرات کنده شده فضای تخلیه را بدون برخورد طی می کنند که منجر به آهنگ لایه نشانی بالا می شود. از روش کندوپاش همچنین برای لایه نشانی کربن شبه الماسی استفاده می گردد که معمولاً از هدف گرافیتی، که تحت انرژی جریان مستقیم یا فرکانس رادیویی قرار دارد بدست می آید. همچنین فرآیند کندوپاش واکنشی به منظور تولید کربن شبه الماسی توسط اضافه کردن منابع گازی هیدروکربنی ( متان، استیلن، .. ) یا هیدروژن به آرگون امکان پذیر است

### گالوانیزه کردن

**گالوانیزه کردن (Galvanization)** و به خصوص گالوانیزه گرم قدیمی ترین و مهم ترین روش ایجاد پوشش روی است. سالانه بالغ بر ۲ میلیون تن روی بدین روش استفاده می شود، تا بر روی حدوداً ۴۰ میلیون تن فولاد پوشش داده شود. تمامی انواع فولادهای معمولی و چدن ها را می توان بدین روش پوشش داد، اما نوع پوشش ایجاد شده به عناصر آلیاژی بستگی دارد. نزدیک به نیمی از فولاد تولید شده در دنیا به صورت ورق و یک چهارم به صورت قطعات ساخته شده و بقیه به صورت لوله یا سیم است. گالوانیزه هر یک از چهار نوع محصول، صنعت جداگانه ای را تشکیل داده است. به لحاظ متالورژیکی فرآیند های **گالوانیزه کردن** قطعات ساخته شده و لوله ها، مشابه یکدیگر است. اما در فرآیند مورد استفاده برای ورق ها، مقدار کمی مواد افزودنی به روی اضافه می شود تا پوشش حاصل دارای مقدار کمتری آلیاژ روی – آهن باشد و در نتیجه بسیار انعطاف پذیر بشود.



سطح آهن یا فولاد باید قبل از انجام فرآیند گالوانیزه گرم به خوبی تمیز شود. به طوری که آهن بتواند به راحتی با مذاب روی واکنش دهد. آماده سازی نامناسب سطح معمولاً مهم ترین عامل پیدایش عیب در قطعات گالوانیزه است.

### تمیز کاری سطح برای گالوانیزه کردن

روغن ها، چربی ها و صابون هایی که در حین عملیات ماشین کاری یا شکل دادن روی سطح فلز چسبیده اند را باید با یک یا چند روش مانند چربی زدایی با بخار، تمیزکاری با حلال ها یا امولسیون ها و هم چنین محلول های چربی گیری از بین برد. پس از مرحله چربی گیری، برای از بین بردن رسوبات و اکسیدهای سطحی، قطعات وارد مرحله اسید شویی می شوند، بدین منظور از محلول های آبی اسید سولفوریک با اسید کلریدریک استفاده می شود. غلظت اسید کلریدریک مصرفی حدود ۱۰-۱۵ درصد است ولی دمای آن بین ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد است. برای کوتاه کردن زمان اسید شویی می توان از روش الکتریکی استفاده کرد. در این صورت در حمام اسید سولفوریک از آندهای سربی به همراه ولتاژ کم و چگالی جریان زیاد استفاده می شود. استفاده از این روش علاوه بر آنکه زمان عمل را ۱۰-۲۰ درصد کاهش می دهد، میزان مصرف اسید سولفوریک را نیز کاهش می دهد.



برای از بین بردن سیلیکات ها از سطح چدن های خاکستری و مالیبل از محلول اسید فلوئوریدریک استفاده می شود. بعضی از قطعات مونتاژ شده، هم قطعات ریختگی در آن ها به کار رفته و هم قطعاتی که کار مکانیکی رویشان انجام شده است. این قطعات مونتاژ شده، قبل از گالوانیزه شدن به عملیات آماده سازی اضافی نیاز دارند. تمام قطعات چدنی و فولادی ریخته شده که با فولادهای کار شده مونتاژ می شوند، بعد از

مونتاژ و قبل از اسید شویی باید ساچمه زنی شوند. برای به حداقل رساندن عملیات اسید شویی، بسیاری از قطعات دیگر را نیز می توان ساچمه زنی کرد.

### روانسازی عمل گالوانیزاسیون

اگرچه عملیات چربی زدایی، اسید شویی، شست و شوی با آب و سایر روش های تمیزکاری، بخش اعظم مواد آلوده کننده سطحی و رسوبات را از سطح آهن و فولاد می زدایند، اما مقادیر ناچیزی ناخالصی به صورت اکسیدها، کلریدها، سولفات ها و سولفورها در سطح باقی می ماند که اگر تمیز نشوند در فعل و انفعال ترکیب آهن با روی در حمام مذاب اخلاص می کنند. در این قسمت سه روش اصلی وجود دارد که در صنایع گالوانیزه به کار می روند. روش خشک قدیمی، خشک و خیس.

در موارد خاصی مانند برخی فرآیندهای گالوانیزه مداوم یا خودکار، از این روش ها به صورت تغییر شکل یافته یا مخلوط شده استفاده می شود. در روش خشک قدیمی، قطعات را پس از اسید شویی در داخل محلول اسید کلریدریک، خشک می کنند که در نتیجه نمک های ناشی از عمل اسیدشویی روی سطح مانده و به هنگام ورود قطعه به داخل مذاب، به صورت روانساز عمل می کند.

اما در روش دیگر، پس از عمل اسیدشویی، قطعات را شسته و سپس وارد حمام روانساز می کنند و پس از آن قطعه را از روانساز خارج و در یک سیستم خشک کن، خشک می کنند (روش خشک) یا اینکه قطعات را پس از شست و شو، مستقیماً به حمام مذابی که سطح آن را یک لایه روانساز مذاب پوشانده است وارد می کنند (روش تر).

برای حمام روانساز از محلول کلرید آمونیم روی ( $ZnCl_2, 3Na_4Cl$ ) با غلظت ۳۰ درصد تا دمای ۸۰ درجه سانتی گراد استفاده می شود. یک ماده تر کننده نیز معمولاً به این محلول افزوده می شود. در مورد روش تر نیز برای لایه روانساز مذاب، یا همین کلرید آمونیوم روی مصرف می شود یا اینکه از کلرید آمونیوم روی به همراه یک ماده کفی مانند گلیسرین، پیه آب کرده یا خاک اره استفاده می شود. این مواد کفی علاوه بر ضخیم تر کردن ضخامت اولیه شناور، باعث کاهش دمای سطحی نیز می شوند که در نتیجه از تبخیر کلرید آمونیوم و دود حاصل کاسته می شود.

می توان برای بهره وری از مزایایی هر دو روش، ابتدا ماده روانساز را روی سطح قطعه اعمال کرد و سپس قطعه خیس را در داخل حمام مذابی که در سطح آن روانساز وجود دارد، فرو برد. در این حالت در عین استفاده از خاصیت روانسازی، از اکسیداسیون حمام مذاب هم جلوگیری می شود. در روش خشک، برای خشک کردن روانساز یا از سیستم حرارتی کوره یا از سیستم صفحه داغ استفاده می شود. برای گرم کردن این سیستم ها معمولاً از گاز متصاعد شده از حمام گالوانیزه استفاده می شود. دمای سیستم خشک کن نباید از ۱۵۰ درجه سانتی گراد بیشتر شود زیرا در غیر این صورت روانساز شروع به تجزیه شدن می کند.



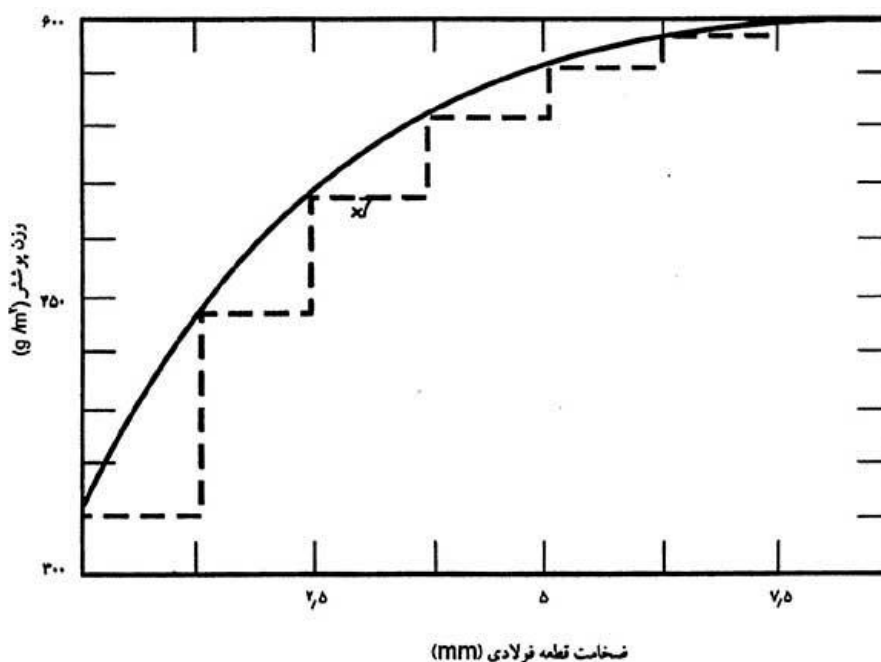
## عمل گالوانیزه

با فروبردن قطعه فولادی یا آهنی تمیز درون مذاب روی، ابتدا روی در اطراف قطعه منجمد می شود، آنگاه با گرم شدن قطعه کار بر اثر انتقال حرارت مذاب به آن، این روی منجمد، مجددا ذوب شده و بر اثر واکنش روی مذاب با سطح قطعه، آلیاژی از آهن و روی در سطح قطعه ایجاد می شوند و با خروج قطعه از داخل مذاب، مقداری از روی مذاب که به آن چسبیده از حمام خارج شده و یک لایه تقریبا خالص روی را در سطح خارجی پوشش ایجاد می کند.



در دمای معمولی حمام **گالوانیزه**، واکنش بین آهن و روی نسبت به زمان به صورت سهموی است یعنی سرعت انجام واکنش ابتدا سریع است، ولی با گذشت زمان به صورت سهموی است یعنی سرعت انجام واکنش ابتدا سریع است، ولی با گذشت زمان این سرعت کاهش می یابد و اگر قطعه مدت طولانی تری درون مذاب قرار گیرد، ضخامت پوشش افزایش زیادی نخواهد یافت. در دامنه حرارتی ۴۸۰-۵۲۰ درجه سانتی گراد و یا در مورد برخی فولادهای ویژه (خصوصا فولادهای پرسلیس) در دمای نرمال **گالوانیزه** (۴۵۰-۴۶۰ درجه سانتی گراد) واکنش بین آهن و روی نسبت به زمان به صورت خطی می باشد، یعنی ضخامت لایه های آلیاژی با افزایش زمان غوطه وری درون مذاب، افزایش می یابد و واکنش ها تقریبا با همان سرعت اولیه ادامه می یابند. در این حالت کنترل پوشش مشکل تر است.

عمل گالوانیزه کردن در دمای ۵۳۰ تا ۵۶۰ نیز مرسوم است که در این حالت پوشش نازکی کاملا آلیاژی به رنگ خاکستری فلزی ایجاد می شود. کاربرد این دما، بیشتر برای قطعات کار شده، مرسوم است. یکی از نکات بسیار مهم در عمل گالوانیزه، افزایش مینیمم وزن پوشش، با افزایش ضخامت قطعه فولادی است. این امر ناشی از تاثیرات زمان گرم شدن قطعه است.



### ترکیب حمام گالوانیزاسیون

درجه خلوص روی مورد مصرف در حمام مذاب اهمیت زیادی ندارد و بدون مشکل می توان از شمش های روی با درجه خلوص کمتر (روی ۹۸-۹۸.۵ درصد) نیز استفاده کرد. این شمش ها حدودا دارای ۱ درصد سرب و مقادیر کمی کادمیم، قلع، مس و آهن می باشند، برخی از ناخالصی ها ممکن است بر روی ضخامت و ساختار پوشش و به دنبال آن در مقاومت به خوردگی پوشش تاثیر بگذارند.

حد انحلال سرب در مذاب روی حدود ۱ درصد می باشد، اما میزان سرب موجود در شمش های روی کمی بیش از این مقدار است. اگر از این نوع شمش ها در حمام گالوانیزه استفاده شود، سرب اضافی آن در کف حمام جمع می شود و موجب می شود تا تفاله های ناخالصی به کف حمام نچسبند و در نتیجه جمع آوری دوره ای این تفاله های را آسان می کند. شمش های روی دارای مقادیر بسیار جزئی آهن و آلومینیم می باشند. معمولا حدود ۱ درصد نیکل به مذاب روی می افزایند. حضور این نیکل واکنش میان فولاد با مذاب را کاهش می دهد، خصوصا در مورد فولادهایی که دارای ۰.۰۴ - ۰.۱۲ سیلیسیم اند.

### سانتریفیوژ کردن پس از گالوانیزاسیون

قطعات کوچکی که ممکن است روی اضافی موجود در سطح پوشش، موجب چسبیدن آن ها به یکدیگر یا اختلال در کارایی آن ها به هنگام سرویس شود، در سبدهای مخصوص گالوانیزه می شوند و بلافاصله بعد از خروج از مذاب به داخل دستگاه سانتریفیوژ منتقل و چرخانده می شوند. به این روش گالوانیزه چرخشی نیز گفته می شود. بر طرف شدن روی موجود در سطح قطعه، موجب نازک شدن پوشش باقی مانده روی سطح، نسبت به حالت عادی می شود که این نازک شدن می تواند روی بسیاری از مشخصات پوشش تاثیر بگذارد.

## عملیات نهایی گالوانیزه کردن

می توان قطعات را در هوا تا دمای اتاق سرد کرد، اما معمولاً قطعات را پس از **گالوانیزه** شدن درون آب سرد می کنند، تا از لک شدن سطح پوشش بر اثر روانساز اضافه ای که به آن چسبیده است جلوگیری شود. این روانساز اضافی به هنگام خروج قطعه از میان لایه روانساز موجود در روی سطح مذاب، به آن می چسبد. این عمل سرد کردن در آب هم موجب سرد شدن سریع پوشش و جلوگیری از ادامه رشد لایه های آلیاژی بر روی فولاد می شود و هم حمل سریعتر قطعات را ممکن می سازد. برای جلوگیری از ادامه رشد لایه های آلیاژی بر روی فولاد می شود و هم حمل سریعتر قطعات را ممکن می سازد. برای جلوگیری از ایجاد زنگ سفید یا همان لک ناشی از جمع شدن رطوبت، که پس از عمل سرد کردن در آب ممکن است ایجاد شود، می توان به آب مورد استفاده، اسید کرومیک یا نمک های کرومات افزود. برای کاهش واکنش های اولیه ای که به هنگام قرار گرفتن میلگرد در بتن انجام می گیرد، توصیه می شود میلگردها کروماته شوند. بر روی قطعات گالوانیزه ای که قرار است بعداً رنگ شوند، معمولاً عملیات فسفاته صورت می گیرد.

### گردآوری شده توسط دپارتمان پژوهشی شرکت پاکمن

محمد قربانی، پوشش دادن فلزات جلد ۲، موسسه انتشارات علمی، ۱۳۸۵.

ماهنامه الکترونیکی مهندسی مواد و متالورژی

## گالوانیزه از دید [galvanizing.blogfa.com](http://galvanizing.blogfa.com)

گالوانیزه یا اعمال پوشش فلز روی بر سطح فولاد به روشهای مختلفی صورت می گیرد که بستگی به شکل قطعه و کاربرد آن روش اعمال آن متفاوت خواهد بود. در دسته بندی کلی گالوانیزاسیون یا گالوانیزه نمودن فولاد به دو روش سرد و گرم صورت می گیرد.

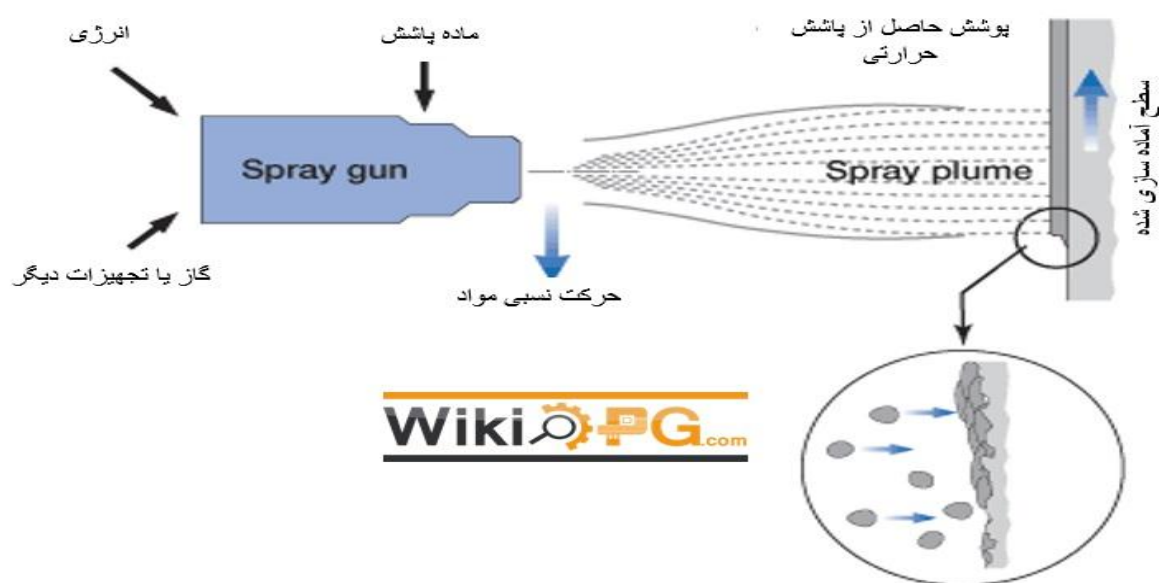
اعمال پوشش فلز روی بر سطح فولاد در حالت سرد به روشهای زیر قابل انجام می باشد:

**Electro Galvanizing Zinc Plating** or اعمال پوشش به روش الکتریکی یا گالوانیزه الکتریکی در این روش با اعمال جریان مستقیم الکتریکی با فرآیند الکترولیز پوشش روی بر سطح قطعه کار که کاتد می باشد اعمال می گردد

### مواد پاشش حرارتی

**مواد پاشش حرارتی (Thermal Spray Materials)** به دو صورت قابل دسترس می باشند. در فرآیندهای فلزپاشی سیم جامد کشیده شده و سیم مغزدار که در آن مواد پوشش در یک چسب آلی پخش شده است، کاربرد دارد. همچنین در فرآیندهای پراثرژی، پودر استفاده می شود. این روش برای مواد غیر

فلزی مزایایی دارد و می تواند به راحتی به محل مورد نظر برای پاشش حمل شود، همچنین می توان در مشعل هایی که برای استفاده در سوراخهای کوچک طراحی شده اند نیز مورد استفاده قرار گیرد. در تمامی فرآیندهای حرارتی، مواد مصرفی پوشش به تفنگ پاششی (spray gun) تغذیه شده و در دمای بالا با پرتاب شدن به سطح قطعه کار برخورد کرده و این ذرات داغ ترشحاتی تشکیل داده و در یکدیگر قفل می شوند و بتدریج پوشش با ضخامت مورد نظر ساخته می شود. چگالی پوشش به مواد، دمای مواد به هنگام برخورد با قطعه کار و انرژی ضربه آن بستگی دارد.



### انواع مواد پاشش حرارتی

انواع موادی که در فرآیندهای پاشش حرارتی استفاده می شوند عبارتند از:

۱. آلیاژهای آهنی
۲. آلیاژهای پایه نیکل
۳. آلیاژهای پایه کبالت
۴. کاربید تنگستن و کاربید کرم
۵. سرامیکها
۶. سایر فلزات و آلیاژها
۷. سرمتهها و پوششهای درجه بندی شده

### خواص مواد کاربردی در پاشش حرارتی

آلیاژهای آهنی:

جایی که مقاومت خوردگی لازم نباشد، فولادهای نرم، کم آلیاژ و کربنی بیشترین استفاده را در ترمیم مناطق ساییده شده قطعات دارند. فولادهای زنگ نزن را نیز می‌توان در ترمیم مناطقی که مقاومت خوردگی لازم است به شیوه پاششی مورد استفاده قرار داد. چند مثال از پوشش آلیاژهای آهنی در جدول ۱ آورده شده است.

نوع فولاد	مشخصه و کاربرد	مناسب برای فرآیندهای						
		سیم اکسیژن سوخت	پودر اکسیژن سوخت	پوششهای گداخته	پاشش قوس الکتریکی	پاشش پلاسما	پاشش انفجاری Jet kote	جت الماس
نرم	- پوشش قبل از کاربرد مواد سخت‌تر ایجاد می‌شود. - به سهولت قابل ماشینکاری است.	✓			✓			
کربنی و کم آلیاژی	- ترمیم قطعات ساییده شده که عملاً در معرض خوردگی نیستند. - پرداخت‌کاری با سنگ‌زنی	✓			✓			
مارتنزیتی	- مقاومت خوردگی متوسط و مقاومت سایشی بالا - بهترین پرداخت کاری با سنگ‌زنی	✓	✓		✓	✓		
زنگ‌نزن آستیتی	- پوششهای مقاوم به خوردگی شدید - مقاوم به ضربه - قابلیت ماشینکاری خوب	✓	✓		✓	✓	✓	✓

### آلیاژهای پایه نیکل:

تمامی آلیاژهای پایه نیکل در برابر خوردگی مقاوم بوده و همچنین مقاومت خوبی در برابر اکسایش در دمای بالا دارند. آلیاژهای Ni-Cr-B-Si را می‌توان بعد از پاشش گداخت تا پوششی بدون تخلخل و دارای پیوند متالورژیکی با زیر لایه بدست آید. به عنوان مثال چند نمونه از این مواد پوشش در جدول ۲ آورده شده است.

نوع آلیاژها	مشخصه و کاربرد	مناسب برای فرآیندهای						
		سیم اکسیژن سوخت	پودر اکسیژن سوخت	پوششهای گداخته	پاشش قوس الکتریکی	پاشش پلاسما	پاشش انفجاری Jet kote	جت الماس
Ni-Cu	پوششهای چگال با قابلیت ماشینکاری و مقاومت خوب خوردگی مخصوصاً تحت شرایط زیر دریا	✓	✓		✓	✓		
Ni-Cr-Mo-W	- مقاوم به خوردگی و سایش - کارسخت شده در اثر ضربه					✓	✓	✓
Ni-Cr-B-Si	- آلیاژهایی با دامنه سختی 200 – 700 HV - مقاوت خوردگی و سایشی خوب - حفظ سختی در دما		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ni-Cr-B-Si-Cu-Mo	مقاومت بالای خوردگی، سایش و حرارت با محدوده وسیع گداختن باعث می‌شود در قطعات با شکل پیچیده به کار رود		✓	✓		✓		
80 – 20 Ni-Cr	- مقاوم به خوردگی و اکسایش در دمای بالا - استفاده به عنوان پیش پوشش (pecoat) برای کاربردهای سرامیک	✓	✓		✓	✓	✓	✓
Ni-Cr-Fe	پوششهای مقاوم در برابر خوردگی و دمای بالا	✓	✓		✓	✓		✓

### آلیاژهای پایه کبالت:

آلیاژهای پایه کبالت، مقاومت زیادی به نرم شدن در دمای بالا، سایشی و خوردگی دارند. آلیاژهای اصلاح شده با افزودن بر و سیلسیم را می‌توان پس از پاشش، گداخت تا لایه بدون تخلخل و با پیوند متالورژیکی بدست آید. برخی از این آلیاژها در جدول ۳ ارایه گردیده است.

مناسب برای فرآیندهای						
سیم	پودر	پاشش	پاشش	پاشش	پاشش	Jet
اکسیژن	اکسیژن	پوششهای	قوس	پلازما	انفجاری	kote
سوخت - سوخت	سوخت - سوخت	گداخته	الکتریکی			
نوع آلیاژها	مشخصه و کاربرد					
Co-Cr-W	- آلیاژهایی با دامنه سختی 300 – 600 HV - مقاومت زیاد در برابر سایش، خوردگی و حرارت			✓	✓	✓
Co-Cr-Ni-W	استفاده در پوششهای مقاوم به حرارت و در عین حال مقاوم به خراشیدگی - سختی 300 HV			✓	✓	✓
Co-Cr-Mo	- این آلیاژ مقاومت خوردگی و انعطاف‌پذیری بیشتری از مورد قبلی دارد			✓	✓	
Co-Cr-W-B-Si	بین فلزی			✓		✓
Co-Cr-W-B-Si	- آلیاژهایی با دامنه سختی 400 – 700 HV - استفاده در تولید پوششهای گداخته	✓		✓		

### کاربید تنگستن و کاربید کرم:

کاربید تنگستن به عنوان یک کامپوزیت زینتر شده با کبالت، برای پوششهای پلازما و انفجاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین می‌توان کاربید تنگستن را با آلیاژهای خودروانساناز پایه نیکل یا کبالت مخلوط کرده و برای ایجاد پوششهای گداخته استفاده کرد. کاربید کرم معمولاً برای افزایش مقاومت سایشی دمای بالا در آلیاژ Ni-Cr استفاده می‌شود.

### سرامیک‌ها:

سرامیک‌ها مقاومت خوبی در دمای بالا، سایشی و فرسایش دارند. پوشش‌های سرامیکی توسط فرآیندهای گازی اکسیژن-سوخت از طریق پاشش سیمهای مغزدار یا بدون مغزه یا از پودر، ایجاد می‌شود.

### سایر فلزات و آلیاژها:

سایر فلزات و آلیاژها مانند آلومینیم و روی در کاربردهای خاص مانند مقاومت به خوردگی محیط بکار می‌روند. در جدول ۴ تعدادی از این فلزات و آلیاژهای ذکر شده است.



مواد	مشخصه و کاربرد	مناسب برای فرآیندهای			
		سیم اکسیژن سوخت	پودر اکسیژن سوخت	پاشش قوس پوششهای گداخته	پاشش پلازما الکتریکی
آلومینیم	اساساً به عنوان یک پوشش مقاوم به خوردگی روی فولاد به کار می‌رود. وقتی عملیات حرارتی صورت می‌گیرد یک پوشش آلیاژی مقاوم در برابر اکسایش دمای بالا روی فولاد فراهم می‌شود.	✓	✓	✓	✓
روی	منحصرأ برای پوششهای مقاوم به خوردگی روی فولاد استفاده می‌شود.	✓	✓	✓	
برنز	برای سطوح یاتاقان	✓	✓		
آلومینیم برنز	- پوششهای مقاوم به خوردگی با خواص یاتاقانی خوب - همچنین با استفاده از فرآیند پاشش قوسی به عنوان لایه اتصال به کار می‌رود	✓	✓		✓
مس	اغلب به خاطر خواص هدایت الکتریکی استفاده می‌شود	✓		✓	

### سرمتها و پوششهای درجه بندی شده:

بدلیل اختلاف گسترده در مشخصه های انبساط سرامیک ها و فولادها، گاه ضروری است برای کاهش تمایل به ترک و ورقه شدن تحت سیکل حرارتی، از یک سیستم سرمت یا پوشش های درجه بندی استفاده کرد. در این شرایط امکان استفاده از اولین پوشش با ۷۰-۸۰ درصد فلز، لایه دوم با ۲۰-۳۰ درصد فلز و لایه نهایی تمام سرامیک وجود دارد. سرمتها در شرایط دیگرمانند مقاومت سایشی یک ماده سرامیکی همراه با هدایت حرارتی یک فلز مفید هستند.

### گردآوری شده توسط دپارتمان پژوهشی شرکت پاکمن

استن گرینچر، مسعود بینش، تکنیکهای پوشش دادن طراحی و کاربرد، چاپ اول، ۱۳۸۴

Thermal Spray Materials Guide, SulzerMetco, May 2012 issue

### ماهنامه الکترونیکی مهندسی مواد و متالورژی

### آشنایی با رسوب دهی فیزیکی از فاز بخار

#### (۱) مقدمه:

پوشش دهی یکی از مهمترین بخش های مهندسی سطح است که رقابت صنایع مختلف به پشتیبانی این رشته از آنها بستگی دارد و از نظر اقتصادی نیز بسیار مهم و حیاتی می باشد. مهندسی سطح عبارت است از طراحی و ساخت همزمان سطح و زیرلایه به صورت سیستمی با ارتقای عملکرد آنها که از لحاظ اقتصادی به صرفه باشد. هدف مهندسی سطح این است که به ویژگی های مورد نظر سطح در طراحی برای یک کاربرد خاص برسد، بطوری که از لحاظ کیفیت و قیمت بسیار مفید و موثر باشد. مهندسی سطح می تواند به صورتی عمل کند که فناوری و تخصص را بین بخش مصرف کنندگان نهایی انتقال دهد.



تاکنون پوشش‌ها به‌طور عمومی به‌منظور ایجاد لایه‌ای از مواد با خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی مناسب بر روی سطح فلزات و آلیاژها استفاده می‌شدند. هدف از ایجاد این‌گونه پوشش‌ها ایجاد و یا ارتقای خصوصیات مهندسی سطح با کارایی و کیفیت مناسب می‌باشد. امروزه دامنه جدیدی از پوشش‌ها با ساختار نانومتری توسعه یافته است که می‌توان خواص مهندسی ویژه‌ای را در لایه‌های سطحی بوجود آورد که در روش‌های معمولی مقدور نیست.

طیف وسیعی از کاربردهای مهندسی براساس خواص سطح بوده و تنوع ساختارهای نانومتری سبب شده که هر روز کاربردهای وسیع‌تری مطرح شود. نانومواد سبب شده که وسایل و ابزار مهندسی به مرور ظریف‌تر و دقیق‌تر شده و با خواص و کیفیت بهتری تولید شوند. از جمله مزایای مواد نانومتری به‌خصوص نانوساختار عبارت از افزایش کیفیت خواص پوشش، افزایش طول عمر سرویس پوشش و سازگاری بیشتر با محیط- زیست است [۱].

## ۲) آشنایی با کلیات روش‌های رسوب‌گذاری فیزیکی از فاز بخار

در رسوب‌گذاری به‌روش تبخیر فیزیکی یا PVD، پوشش‌ها روی سطوح جامد از طریق چگالش عنصرها و ترکیب‌ها از فاز گازی تولید می‌شوند. تبخیر در خلاء، عمومی‌ترین روش تهیه لایه‌های بسیار خالص و تحت شرایط نسبتاً کنترل شده است. اصول این روش عموماً بر اساس اثرهای کاملاً فیزیکی پایه‌ریزی می‌شود، اما PVD ممکن است در بعضی موارد با واکنش‌های شیمیایی نیز همراه باشد. بعضی از این واکنش‌های شیمیایی عمدتاً در فناوری انباشت لایه‌های خاص به‌کار می‌روند [۲]. رسوب‌گذاری به روش تبخیر فیزیکی شامل مراحل ذیل است:

(الف) تبدیل ماده تبخیری به حالت گازی از طریق تبخیر یا تصعید و یا کندوپاش کاتدی

(ب) انتقال اتم‌ها (مولکول‌ها) از چشمه تبخیر به زیرلایه، در فشار کاهش‌یافته

(ج) رسوب این ذره‌ها روی زیرلایه

(د) بازآرایی پیوند اتم‌ها روی سطح زیرلایه [۲].

در حالت کلی‌تر مکانیزیم‌های اصلی در فرایند رسوب‌گذاری فیزیکی بخار، عبارتند از جداکردن اتم از سطح به طریقی (اشعه، باریکه الکترونی، حرارت و غیره) و یا اینکه یونی به سطح برخورد کرده و سبب پرتاب اتم از ماده هدف می‌شود.

در نگاه کلی روش رسوب‌گذاری فیزیکی بخار شامل چندین روش متفاوت است که دارای مکانیزیم‌های نسبتاً مشابهی هستند.

### 1-2) فرایندهای تبخیر

#### ۱-۱-۲) تبخیز با فیلامان حرارتی

فرایند رسوب‌گذاری فیزیکی بخار با بهره‌گیری از فیلامان حرارتی، امری ساده به نظر می‌رسد. به این صورت که با بخار نمودن ماده هدف و نشانیدن آن بر روی زیرلایه، سبب ایجاد لایه‌نازک خواهد شد. از عواملی که سبب کنترل سرعت رسوب‌گذاری در این روش خواهند شد، دمای ذوب ماده هدف و فشار محفظه است. خوشبختانه این روش جزء روش‌هایی است که با آن قادر خواهیم بود مواد زیادی را پوشش‌دهی نماییم. شمایی از رسوب‌گذاری فیزیکی بخار با استفاده از فیلامان حرارتی در شکل ۱-۲ آمده است [۳].

### شکل ۱-۲) شمایی از روش رسوب-گذاری فیزیکی بخار با استفاده از فیلامان حرارتی [۴].

#### ۲-۱-۲) تبخیر با اشعه الکترونی

تبخیر با اشعه الکترونی از جمله روش‌هایی است که جهت پوشش‌دهی مواد با نقطه ذوب بالا بکار می‌رود. بنابراین جهت پوشش‌دهی موادی چون TiN استفاده از اشعه الکترونی و لیزر نیز امکان‌پذیر خواهد است. با این روش امکان رسوب‌گذاری فلزات، نیمه‌هادی‌ها و مواد عایق امکان‌پذیر می‌باشد. از جمله محدودیت‌های روش فیزیکی، نیاز به خلاء است که فرایند تبخیر را امکان‌پذیر می‌سازد. شمایی از رسوب‌گذاری فیزیکی بخار با استفاده از اشعه الکترونی در شکل ۲-۲ آمده است.

شکل ۲-۲) شمایی از روش رسوب‌گذاری فیزیکی بخار با استفاده از اشعه الکترونی [۴].

#### ۲-۱-۳) تبخیر با استفاده از انرژی لیزر (PLD) [3]

رسوب‌گذاری فیزیکی بخار با بهره‌گیری از لیزر، جزء روش‌های موثر در لایه‌نشانی به‌شمار می‌رود. زیرا در این روش، انرژی لیزرهای مورد استفاده به‌قدری بالا است که قادر خواهیم بود، مواد سختی چون سرامیک‌ها و مواد غیرفلزی از جمله TiN را بر روی زیرلایه پوشش دهیم. همچنین به جهت دقت بالای این فرایند، از این روش برای پوشش‌دهی سرامیک‌هایی که ترکیبات استوکیومتری آنها مهم است، از جمله پیزوالکتریک‌ها و ابررسانا، استفاده شایانی می‌شود. بر اثر برخورد لیزر به ماده هدف، در حد واسطه زیرلایه و ماده هدف،

پلاسمای باریکی به نام **Plumbe** تشکیل می‌گردد که اندازه آن می‌تواند در سرعت پوشش‌دهی و ضخامت آن موثر باشد [۳].

به هر حال روش **PLD** هم به تناسب خود دارای اشکالات و معایبی است که در ذیل بیان می‌شود:

(الف) وجود پدیده **Splashing** داخل لایه‌نازک ایجاد شده وجود دارد که به مثابه ریختن آب بر روی روغن داغ است و موجب پراکنده شدن مواد مذاب می‌شود.

(ب) فضای تبخیر شده از ماده هدف، یعنی **Plumbe**، خیلی نازک است و این ضخامت کم، عدم یکنواختی در ضخامت لایه نازک حاصله را موجب می‌شود [۳].

بنابراین در روش تبخیر لیزری، انرژی لازم برای تبخیر ماده هدف (**Ti**) توسط انرژی لیزر تامین می‌شود. در جریان تابش اشعه لیزر اتم‌های تیتانیوم از سطح ماده هدف تبخیر شده و در محفظه **Plumbe** (حد فاصل بین زیرلایه و ماده هدف) قرار می‌گیرد. در این فرایند با حضور نیتروژن کافی در محفظه و نیز واکنش‌پذیری فوق‌العاده نیتروژن با تیتانیوم، ترکیب **TiN** تولید شده و رسوب آن بر روی زیرلایه تشکیل می‌شود. شمایی از فرایند **PLD** در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.

شکل ۲-۳) شمایی از روش رسوب‌گذاری فیزیکی بخار با استفاده از لیزر [۳].

حال سوال اینجاست که آیا در فرایند رسوب‌گذاری فیزیکی بخار، واکنش‌های تجزیه‌ای صورت می‌گیرد و یا اینکه صرفاً تبخیر ساده صورت می‌گیرد. در جواب لازم به ذکر است که امکان دارد در حین فرایند، واکنش تجزیه‌ای هم صورت گیرد. به عنوان مثال در فرایند رسوب‌گذاری **TiN** از دو ماده **Ar** و **N<sub>2</sub>** استفاده می‌شود. در حضور پلاسمای **N<sub>2</sub>** به رادیکال آزاد **N** تجزیه می‌گردد که با ماده هدف (**Ti**) برخورد نموده و **TiN** در سطح ایجاد می‌شود. پرتاب یون‌های **Ar<sup>+</sup>** سبب کندن **TiN** از سطح و رسوب آن بر روی زیرلایه خواهد شد [۵].

#### ۴-۱-۲) برآرایی باریکه مولکولی (Molecular Beam Epitaxy)

برآرایی باریکه مولکولی یا **MBE** همان روش تبخیر است که به دستگاه‌های آنالیز سطحی از جمله **XPS**، **RHEED**، **Auger** مجهز می‌باشد [۶].

#### ۵-۱-۲) رسوب‌گذاری با بهره‌گیری از پرتوی یونی (Ion Beam Assisted Deposition)

رسوب‌گذاری با بهره‌گیری از باریکه یونی (**IBAD**) جزء روش‌های فیزیکی لایه‌نشانی است. در این روش از یک تفنگ یونی که انرژی‌هایی در حد کیلو الکترون‌ولت دارند، استفاده می‌شود. مکانیزم عمل به این صورت است که حین فرایند تبخیر، این انرژی به انرژی اتم‌های تبخیرشده که انرژی کمی دارند، (در حد دهم الکترون‌ولت) منتقل می‌شود و سبب می‌گردد که اتم‌های با انرژی بیشتری روی سطح زیرلایه بنشینند و

موجب ایجاد لایه نازک با دانسیته بالای خواهد شد. به بیان ساده تر بعد از بخار شدن ماده هدف، یون های آرگون که پراثری است، با این اتم ها برخورد نموده و سبب انتقال راحت تر اتم های بخار شده به سطح زیر لایه می شود و لایه نازک را ایجاد می کند. این روش بیشتر در لایه نشانی قطعات الکترونیکی مورد استفاده می گردد [۳].

روش IBAD<sup>[4]</sup> برای ایجاد پوشش های نیتریدی فلز، امکان زیادی را فراهم می کند. با ایجاد تغییر در پارامترهای رسوب دهی از جمله شار اتمی، انرژی یون، زاویه برخورد یون و دمای زیر لایه، بهبود قابل توجهی در سایش، خوردگی، مقاومت الکتریکی و خواص نوری آن فراهم می شود [۷].

توسعه پوشش های سخت بر مبنای نیتريد فلزات واسطه با استفاده از IBAD، موضوع تحقیقات گسترده ای است. این نیتريدها شامل TiN، CrN، VN و ZrN می باشند که دارای خواص شیمیایی و فیزیکی متفاوتی هستند [۸]. به طور مثال TiN در دمای بالای ۵۰۰C به آرامی اکسیده شده و باعث ایجاد لایه اکسیدی روتیل غیرچسبنده و نامناسب TiO<sub>2</sub> بر بالای TiN می شود. به این ترتیب مقاومت به سایش TiN، افت می کند. CrN، به دلیل تشکیل لایه اکسیدی متراکم و محافظ Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> که از اکسیداسیون بیشتر ممانعت می کند، دارای مقاومت بیشتری نسبت به TiN در مقابل اکسیداسیون است [۷ و ۹].

شکل ۴-۲، شماتیکی از سیستم IBAD که برای ایجاد لایه نازک نانوکریستال TiN به کار می رود را نشان می دهد. این سیستم شامل یک منبع تبخیر اشعه الکترونی برای تبخیر فلز Ti و یک منبع یونی برای ایجاد اشعه یون نیتروژن به منظور تشکیل TiN بر روی Si است [۷].

شکل ۴-۲) شماتیک از سیستم IBAD [۷].

## ۲-۲) فرایند کندوپاش (Sputtering)

فرایند کندوپاش، شامل کندن اتم به وسیله گاز کندوپاش کننده (مانند گاز آرگون) از سطح ماده هدف و نشان دادن آن بر روی زیر لایه است. به دلیل اینکه این روش جزء روش های رسوب گذاری فیزیکی بخار است، در این فرایند ایجاد لایه های نازک به صورت مستقیم الخط صورت می گیرد. همچنین در فرایند کندوپاش، پلاسما نقش به سزایی در کندن اتم از سطح دارد.

مراحل مختلفی که در فرایند کندوپاش صورت می گیرد، به شرح ذیل است:

۱. یونیزه شدن اتم های گاز آرگون، به دلیل وجود اختلاف پتانسیل بالا بین کاتد و آند خواهد شد.
۲. یون های آرگون مثبت، به شدت به سمت پتانسیل منفی که محل قرارگیری ماده هدف است، برخورد می کند.

۳. یون‌های آرگون، ماده هدف را بمباران کرده که سبب کنده شدن مواد و پرتاب بر روی زیرلایه خواهد شد.

۴. با ادامه این فرایند شاهد تشکیل لایه نازک بر روی زیرلایه خواهیم بود.

۵. همچنین الکترون‌های آزاد موجود در محفظه با اتم‌های آرگون برخورد نموده و یون‌های بیشتری تولید می‌کند که موجب تولید بیشتر پلاسما برای فرایند کندوپاش خواهد شد [۴].

### ۱-۲-۲) انواع فرایند کندوپاش

با توجه به نوع پتانسیل اعمالی و گازهای اضافی، انواع مختلفی از فرایند کندوپاش وجود خواهد داشت. انواع روش‌های فرایند کندوپاش عبارتند از:

- DC Sputtering
- RF یا AC Sputtering
- Reactive Sputtering
- Magnetron Sputtering

در روش آخر، یعنی روش کندوپاش مگنترون، به دلیل سرعت بالای رسوبگذاری و یکنواختی مطلوب از روش‌های پرکاربرد فرایند کندوپاش به‌شمار می‌رود [۳].

### ۲-۲-۲) ویژگی گاز تزریق شده در فرایند کندوپاش

۱. انرژی گازهای پرتاب شده

اگر انرژی گاز تزریق شده کم باشد، هیچ انرژی موثری برای کندن اتم‌های ماده هدف نخواهد داشت و کار بدون نتیجه خواهد بود. ولی اگر انرژی یون‌های گازی پرتاب شده از حدی (بیشتر از انرژی پیوندی اتم‌های ماده هدف) بیشتر باشد، موجب کندن اتم‌های ماده هدف می‌گردد و نتیجه عملیات کندوپاش را در پی خواهد داشت.

۲. انتخاب نوع گاز برای عملیات کندن اتم‌ها

اندازه یون‌های گاز پرتاب شده هم عامل تعیین‌کننده در انتخاب نوع گاز می‌باشد. اگر اندازه اتم‌ها از حدی کوچکتر باشد، اتم‌های گازی وارد جسم ماده هدف شده و کارایی فرایند کندوپاش را کاهش می‌دهد. اگر اتم‌های گازی از حدی بزرگتر باشد، موجب تغییر شکل در ماده هدف خواهد شد و عمل کندن اتم‌ها صورت نخواهد گرفت. بنابراین در انتخاب نوع گازی، باید اندازه آن متناسب با اندازه اتم‌های ماده هدف باشد [۴].

بنابراین در فرایند کندوپاش به‌طور وسیعی از گاز آرگون استفاده می‌شود، زیرا هم اندازه آن مناسب است و هم اینکه با هیچ ماده یا گاز دیگر واکنش‌پذیری شیمیایی نخواهد داشت. همچنین از دیگر دلایل استفاده از گاز آرگون در فرایند کندوپاش سادگی تخلیه آن از محفظه و نیز عدم سمیت و خطرناک بودن آن است.

### ۳-۲-۲) ایجاد پوشش نانوساختار TiN با استفاده از فرایند کندوپاش واکنشی

در اکثر فرایندهای کندوپاش از گاز آرگون به تنهایی استفاده می‌شود ولی در برخی مواقع گازهای دیگری از جمله گاز نیتروژن نیز وارد محفظه می‌شود که می‌تواند با ایجاد ترکیب جدید، وارد لایه نازک شود. شمایی از فرایند ایجاد پوشش نانوساختار با روش کندوپاش واکنشی در شکل ۵-۲ آورده شده است.

### شکل ۵-۲) شمایی از فرایند کندوپاش واکنشی برای ایجاد پوشش نانوساختار TiN [۴].

به‌عنوان مثال لایه نازک نیتريد تیتانیم (TiN) که بر روی زیرلایه رسوب داده می‌شود، می‌تواند به‌واسطه فرایند کندوپاش واکنشی باشد. در این روش علاوه بر گاز آرگون، گاز دیگری مانند نیتروژن وارد محفظه می‌شود تا با اتم‌های تیتانیم واکنش دهد و ماده نیتريد تیتانیم (TiN) ایجاد نماید. در ابتدای فرایند که گاز آرگون وارد محفظه می‌شود، ماده هدف تیتانیم غیرفعال است. سپس با ورود نیتروژن کافی فرایند کندوپاش واکنشی رخ می‌دهد. در این حالت گاز آگون سبب افزایش سرعت رسوب‌گذاری نیتريد تیتانیم خواهد شد [۴].

به بیان ساده‌تر در فرایند کلی کندوپاش، ابتدا گاز آرگون به محفظه دستگاه تزریق می‌شود و سپس یک ولتاژ بالا به دستگاه اعمال می‌گردد که به‌موجب آن از گاز آرگون الکترون آزاد شده و به یون‌های آرگون مثبت تبدیل می‌شود. در ادامه یون آرگون (با بار الکتریکی مثبت) با شتاب به سمت کاتد (با بار الکتریکی منفی) پرتاب شده و سبب کندن اتم‌ها از ماده هدف و نشاندن آن بر روی زیرلایه می‌گردد و عمل پوشش صورت می‌گیرد [۴].

### ۳) نتیجه‌گیری:

روش رسوب‌گذاری فیزیکی از فاز بخار به عنوان یکی از روش‌های مهم و مرسوم در مهندسی سطح برای ایجاد پوشش‌های متداول و پوشش‌های نانوساختار به‌شمار می‌رود. دمای نسبتاً پایین این روش و سهل-الوصول بودن روش از مزایای اصلی آن است. ولی با وجود مزایای فوق‌العاده‌ای از جمله رسوب‌دهی مستقیم-الخط بر روی قطعه (عدم ایجاد پوشش یکنواخت بر روی قطعات پیچیده و غیر مسطح) و استحکام چسبندگی نسبتاً کم نسبت به روش‌های شیمیایی دارد. لذا مهندسان سطح بایستی در انتخاب نوع روش، درخواست مشتری را مدنظر داشته باشند تا بر اساس خواسته‌های آنان روش مناسب، ارزان‌تر و با کیفیت بهتر انتخاب شود.

(۴) منابع:

- [۱]. علم‌خواه حسن، سمینار کارشناسی نانومواد دانشگاه تربیت مدرس.
- [۲]. سوالونی هادی، مبانی علم سطح در نانوفناوری (جلد اول)، انتشارات دانشگاه تهران.
- [۳]. Milton Ohring, Material Science Of Thin Films, Second Edition.
- [۴]. [www.abc.ie/intel/CVD\\_PVD\\_Thin\\_Films](http://www.abc.ie/intel/CVD_PVD_Thin_Films)
- [۵]. [www2.austin.cc.tx.us/HongXiao/Book.htm](http://www2.austin.cc.tx.us/HongXiao/Book.htm).
- [۶]. مرعشی پیروز و همکاران، اصول و کاربرد میکروسکوپ‌های الکترونی و روش‌های نوین آنالیز، ابزار شناسایی دنیای نانو، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.
- [۷]. S.C. Tjong, Haydn Chen, Nanocrystalline materials and coatings, 1-88. 2004 (Mater. Scie. Engin. R 45
- [۸]. J. J.H. Huang, C.H. Lin, H. Chen, Mater. Chem. Phys. 59 (1999) 49.
- [۹]. H. Jensen, U.M. Jensn, G. Sorensen, Surf. Coat. Technol. 74–75 297. (1995)

Chemical Vapor Diposition (1) [۳]

Physical Vapor Diposition (2) [۴]

واحد تحقیق و توسعه

<http://thinfilm.blog.ir> /گروه مهندسی سطح و لایه نازک

Surface Engineering and Thin Film Group