





دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و مکاترونیک
پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی ساخت و تولید

طراحی، ساخت و به‌کارگیری دستگاه آزمون سایش جت میکرو دوغاب برای ارزیابی خواص پوشش‌های نازک سخت

نگارنده: حسن حسین آبادی

اساتید راهنما:
دکتر سید هادی قادری
دکتر مجتبی قطعی

شهریور ۱۳۹۶

صور تجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

شماره: ۳۸۲/۱۳۸
تاریخ: ۹۶/۸/۷

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صور تجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای حسن حسین آبادی با شماره دانشجویی ۹۲۳۵۳۷۴ رشته مهندسی مکانیک - ساخت و تولید تحت عنوان طراحی، ساخت و بکارگیری دستگاه آزمون سایش جت میکرو دوغاب برای ارزیابی خواص پوشش های نازک سخت که در تاریخ ۹۶/۶/۲۱ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☐ مردود	☒ قبول (با امتیاز ۱۷/۱۹ درجه ۱۰۰٪)
☒ نظری	☒ عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر سید هادی قادری	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر مجتبی قطعی	استادیار	
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر هادی پروز	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر مجید محمدی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر سید وحید حسینی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبدیه: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



تقدیم نامہ

تقدیم بہ پدر و مادر عزیزم

سپاس‌گزاری

با سپاس از اساتید فرهیخته، دکتر سید هادی قادری و دکتر مجتبی قطعی که بدون راهنمایی‌های ایشان، این پایان نامه به سرانجام نمی‌رسید.

تعهد نامه

اینجانب **حسن حسین آبادی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی مکانیک** دانشکده‌ی **مکانیک** دانشگاه صنعتی **شاهرود** نویسنده پایان‌نامه **طراحی، ساخت و به‌کارگیری دستگاه آزمون سایش جت میکرو دوغاب برای ارزیابی خواص پوشش‌های نازک سخت تحت راهنمایی دکتر سید هادی قادری و دکتر مجتبی قطعی**

متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ ۹۶/۰۸/۱۵

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

متن این صفحه باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده پایان‌نامه وجود داشته باشد

چکیده

پدیده سایش یکی از مهمترین عوامل تخریب قطعات صنعتی می‌باشد. پوشش‌های سخت روی ابزارها و تجهیزات صنعتی باعث بهبود عملکرد و افزایش عمر آنها می‌شود. برای ارزیابی پوشش‌های لایه نازک سخت، به روش‌های قابل اطمینان و معتبری نیاز است. برای انجام این آزمون نیاز به دستگاهی است که دقیق بوده و کارایی و قیمت مناسبی داشته باشد. برای تحقق این هدف، در این پایان‌نامه، دستگاه آزمون سایش جت میکرو دوغاب (MSE) طراحی و ساخته شد. این دستگاه برای انجام آزمون سایش از ذرات بسیار سخت آلومینا استفاده می‌کند. در دستگاه آزمون MSE دوغاب داخل مخزن تحت فشار مشخصی از واحد نازل عبور کرده و به سطح نمونه برخورد می‌کند و در نهایت برای استفاده مجدد وارد سینی دریافت کننده می‌شود. در این پژوهش بعد از ساخت دستگاه MSE، جهت اطمینان از عملکرد آن، آزمون‌هایی با آب در فشارهای مختلف و سپس آزمون‌هایی با دوغاب تحت فشارها و غلظت‌های مختلف انجام گرفت و تکرارپذیری بسیار خوبی از دستگاه ساخته شده دیده شد. دوغاب شامل ذرات آلومینا با قطر متوسط حدود $1\text{ }\mu\text{m}$ است که اندازه ذرات توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی اندازه‌گیری شد. ۳ نمونه با زیر لایه WC، با پوشش‌های چند لایه نازک TiN، TiCN، Al_2O_3 و TiAlN به روش CVD لایه‌نشانی شدند. ضخامت لایه پوشش‌ها بین ۲ تا $7\text{ }\mu\text{m}$ است. سپس نمونه‌های پوشش داده شده با دستگاه آزمون MSE تحت فشار و غلظت مشخصی مورد آزمون قرار گرفتند و میزان سایش نمونه‌ها توسط دستگاه پروفایل‌متر اندازه‌گیری شد. نتایج نشان دادند که دستگاه آزمون MSE می‌تواند برای مقایسه مقاومت سایشی پوشش‌های نازک سخت استفاده شود.

واژگان کلیدی: لایه نازک، سایش، سایش میکرو دوغاب، پوشش سخت، پروفایل‌متر

فهرست عنوان‌ها

فصل ۱ مقدمه..... ۱

۱-۱- تریبولوژی ۲

۱-۱-۱ تریبو سیستم ۲

۱-۱-۲ اصطکاک ۳

۲-۱- سایش ۳

۱-۲-۱ عوامل مؤثر بر سایش سطوح ۳

۲-۲-۱ انواع مکانیزم های سایش ۴

۳-۱- نحوه آزمون و اندازه گیری سایش ۷

۱-۳-۱ آزمون پین روی دیسک ۸

۲-۳-۱ آزمون سایش رفت و برگشتی ۹

۴-۱- پوشش دهی نمونه های تنگستن کارباید ۱۰

۱-۴-۱ انواع پوشش های متداول و خواص آنها ۱۱

۲-۴-۱ پوشش دهی به روش CVD ۱۴

۵-۱- پیشینه تحقیق ۱۵

۶-۱- ساختار، باار، نامه ۱۷

فصل ۲ طراحی و اجرای آزمون‌های تجربی..... ۱۹

۲-۱- طراحی دستگاه ۲۱

۲-۱-۱- مخزن ۲۴

۲-۱-۲- رگلاتورهای تنظیم فشار ۲۴

۲-۱-۳- نازل ۲۴

۲-۱-۴- نگهدارنده نمونه ۲۵

۲-۱-۵- سینی جمع آوری دوغاب ۲۵

۲-۱-۶- طراحی و ساخت پایه ۲۵

۲-۲- پودر آلومینا ۲۵

۲-۳- عملکرد دستگاه MSE ۲۶

۲-۴- پوشش نمونه‌های استفاده شده در آزمون ۲۷

۲-۴-۱- پوشش سه لایه $TiN/TiCN/Al_2O_3$ ۲۷

۲-۴-۲- پوشش چهار لایه $TiN/TiCN/TiAlN/TiN$ ۲۸

۲-۴-۳- پوشش سه لایه $TiN/TiCN/TiN$ ۲۹

- ۲-۵- روش اجرایی پوشش دهی نمونه‌ها..... ۲۹
- ۲-۶- آزمون سایش نمونه‌ها..... ۳۳
- ۲-۷- بررسی سطح ساییده شده نمونه‌ها..... ۳۳

فصل ۳ نتایج و بحث..... ۳۵

- ۳-۱- پودر آلومینا..... ۳۶
- ۳-۲- مشخصه‌یابی دستگاه MSE با آب خالص..... ۳۷
- ۳-۲-۱ آزمون دستگاه MSE با دوغاب..... ۴۰
- ۳-۲-۲ آزمون سایش نمونه‌ها با دستگاه MSE..... ۴۸

فصل ۴ نتیجه‌گیری و پیشنهادها..... ۵۳

- ۴-۱- نتیجه‌گیری..... ۵۴
- ۴-۲- پیشنهادها..... ۵۵

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- ورودی و خروجی‌های یک تریبو سیستم [۱]..... ۲
- شکل ۲-۱- معادله ضریب اصطکاک [۱]..... ۳
- شکل ۳-۱- سایش دو جسمی [۱]..... ۴
- شکل ۴-۱- سایش سه جسمی [۱]..... ۴
- شکل ۵-۱- مکانیزم سایش اصطکاکی [۱]..... ۵
- شکل ۶-۱- سایش ناشی از خستگی سطح [۱]..... ۵
- شکل ۷-۱- ایجاد ترک در سطوح سخت و ترد [۱]..... ۶
- شکل ۸-۱- ایجاد ترک در نواحی زیر لایه [۱]..... ۶
- شکل ۹-۱- فرایند سایش رفتگی [۱]..... ۷
- شکل ۱۰-۱- دستگاه پین روی دیسک [۸]..... ۸
- شکل ۱۱-۱- نمایی از روش سایش رفت و برگشتی [۸]..... ۹
- شکل ۱۲-۱- مقایسه اندازه گودال رفتگی در WC بدون پوشش و با پوشش TiC [۱۱]..... ۱۲
- شکل ۱۳-۱- مقایسه برخی ویژگی‌های چند پوشش متداول [۱۰]..... ۱۴
- شکل ۱۴-۱- شماتیک فرایند پوشش‌دهی به روش CVD [۱۰]..... ۱۵
- شکل ۱-۲- دستگاه MSE..... ۲۲
- شکل ۲-۲- شماتیکی از دستگاه MSE..... ۲۲
- شکل ۳-۲- شکل سه بعدی دستگاه MSE..... ۲۶
- شکل ۴-۲- نمایی از دستگاه MSE جهت تعیین مشخصات پودر مورد استفاده..... ۲۶
- شکل ۵-۲- نمایی از تجهیزات پوشش دهی به روش CVD شرکت الماسه ساز [۹]..... ۲۹
- شکل ۶-۲- نمایی از تجهیزات پوشش دهی به روش PVD شرکت الماسه ساز [۹]..... ۲۹
- شکل ۷-۲- نمونه‌ها..... ۳۲

شکل ۷-۲- پروفایلمتر شرکت راگا ۳۴

شکل ۱-۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودر آلومینای به کار رفته در بزرگنمایی ، (الف)
..... $\times 1000$ و (ب) $\times 20000$ ۳۷

شکل ۲-۳- حجم تخلیه آب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای Pair = ۳ bar ۳۸

شکل ۳-۳- نرخ تخلیه آب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای Pair = ۳ bar ۳۹

شکل ۴-۳- تغییرات نرخ تخلیه از نازل و سرعت جت آب بر حسب زمان در فشار هوای Pair = ۳ bar =
Pair ۳۹

شکل ۵-۳- مقایسه حجم تخلیه آب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای bar ۱، ۲، ۳، ۴،
Pair ۴۰

شکل ۶-۳- حجم تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای Pair = ۴ bar و غلظت ۳٪ = ۴۲C

شکل ۷-۳- نرخ تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای Pair = ۴ bar و غلظت ۳٪ = ۴۲.C

شکل ۸-۳- تغییرات نرخ تخلیه از نازل و سرعت جت دوغاب بر حسب زمان در فشار هوای ۴ bar
Pair = ۴۲

شکل ۹-۳- حجم تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای Pair = ۴ bar و غلظت ۲٪ =
C ۴۳

شکل ۱۰-۳- تغییرات نرخ تخلیه از نازل و سرعت جت دوغاب بر حسب زمان در فشار هوای ۴ bar
Pair = ۴۳

شکل ۱۱-۳- حجم تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای Pair = ۴ bar و غلظت ۱٪ =
C ۴۴

شکل ۱۲-۳- تغییرات نرخ تخلیه از نازل و سرعت جت دوغاب بر حسب زمان در فشار هوای ۴ bar
Pair = ۴۴

شکل ۱۳-۳- مقایسه حجم تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای bar ۱، ۲، ۳، ۴،
Pair ۴۵

- شکل ۳-۱۴- مقایسه حجم تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای ۱، ۲، ۳، ۴، bar =
 Pair..... ۴۵
- شکل ۳-۱۵- مقایسه حجم تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای ۱، ۲، ۳، ۴، bar =
 Pair..... ۴۶
- شکل ۳-۱۶- مقایسه حجم تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در غلظت‌های ۱، ۲، ۳، % C = ۴۶
- شکل ۳-۱۷- تغییرات نرخ تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای ۱، ۲، ۳، ۴، bar =
 Pair..... ۴۷
- شکل ۳-۱۸- تغییرات سرعت خروج دوغاب از نازل بر حسب فشار در غلظت‌های مختلف ۴۹
- شکل ۳-۱۹- پروفایل سایش سطح نمونه P ۴۹
- شکل ۳-۲۰- پروفایل سایش سطح نمونه D ۵۰
- شکل ۳-۲۱- پروفایل سایش سطح نمونه M ۵۰

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۲- فرآیند اعمال پوشش‌های مختلف روی سه نوع نمونه [۹]..... ۳۲

جدول ۲-۲- نامگذاری پوشش‌ها با علامت مشخص [۹]..... ۳۲

جدول ۱-۳- نتایج آزمون دستگاه با آب خالص در فشار هوای $\text{Pair} = 3 \text{ bar}$ (آزمون ۱)..... ۳۸

جدول ۲-۳- نتایج آزمون دستگاه با مخلوط دوغاب در فشار هوای $\text{Pair} = 4 \text{ bar}$ و غلظت $C = 3\%$

(آزمون ۴)..... ۴۱

فصل اول: مقدمه

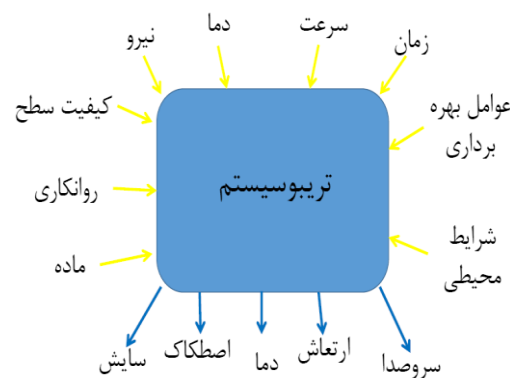
این فصل، به پدیده‌ی سایش در قطعات فلزی می‌پردازد. سپس، نحوه‌ی آزمون و اندازه‌گیری آن بیان می‌شود. در ادامه، پیشینه‌ی پژوهش و مرور مقالات گزارش شده در موضوع پایان‌نامه ارائه شده است. در انتها، اهداف، ویژگی‌ها و نوآوری‌های پایان‌نامه و مروری گذرا بر مطالب هر فصل، ارائه می‌شود.

تریبولوژی^۱

تریبولوژی عبارت است از علم سطوح در حال تماس با یکدیگر که دارای حرکت نسبی باشند [۱]. بدین ترتیب، تریبولوژی به ارزیابی پدیده‌های مرتبط با اصطکاک و سایش سطوح مهندسی می‌پردازد تا درک صحیحی از اندرکنش‌های سطحی و پیشنهاداتی برای بهبود کارایی سطوح در شرایط عملی ارائه نماید [۱-۲]. مهمترین اهداف تریبولوژی کنترل مقدار اصطکاک و سایش به منظور افزایش عمرکاری قطعات، افزایش بازدهی موتورها و دستگاه‌ها، صرفه‌جویی در مصرف انرژی و بهبود ایمنی است.

تریبو سیستم

به زبان ساده یک سیستم مهندسی است که در آن سایش رخ می‌دهد. هر تریبو سیستم دارای ورودی و خروجی‌هایی می‌باشد که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱- ورودی و خروجی‌های یک تریبو سیستم [۱]

^۱ Tribology

اصطکاک^۱

نیروی مقاومی است که در برابر حرکت نسبی اجسام در تماس باهم به وجود می آید که در شکل ۱-۲ معادله آن دیده می شود.

$$\mu = \frac{F}{W}$$

شکل ۱-۲ - معادله ضریب اصطکاک [۱]

سایش^۲

سایش عبارت است از تخریب سطحی، به صورت اتلاف ماده در اثر حرکت نسبی بین سطوح. به طور کلی سایش قطعات عامل اصلی تخریب صنعتی و یکی از سه مشکل اساسی در صنعت است که منجر به تعویض قطعات می شود. موارد دیگر شامل خستگی و خوردگی است. سایش به ندرت باعث فاجعه می شود اما باعث کاهش بازده و کارایی می شود [۱]. برای کاهش این پدیده، انتخاب جنس قطعات و نیز پوشش سطحی مناسب بسیار حائز اهمیت است. برای دستیابی به اهداف فوق انجام آزمایش های سایش ضروری می نماید.

عوامل مؤثر بر سایش سطوح

- هندسه سطح
- میزان بار اعمالی
- سرعت های غلتش و لغزش
- شرایط محیطی
- خواص مکانیکی، حرارتی، شیمیایی و متالورژیکی

^۱ Friction

^۲ Wear

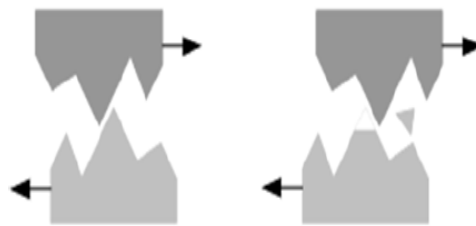
- خواص فیزیکی، حرارتی و شیمیایی روانکار

انواع مکانیزم های سایش

سایش خراشنده^۱

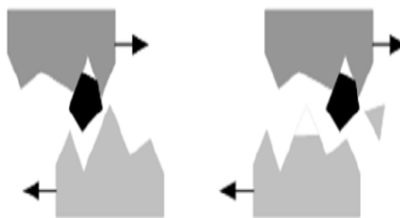
زمانی اتفاق می افتد که یک ماده سخت تر بر روی سطح یک ماده نرم تر کشیده می شود. سایش خراشان به وسیله ذرات سخت یا برجستگی هایی که به سطح مقابل نیرو وارد کرده و در طول آن حرکت می کند اتفاق افتاده و منجر به تشکیل خراش و شیارهایی در سطح جسم می شود. مکانیزم های اصلی سایش خراشنده تغییر شکل مومسان و شکست ترد هستند. این نوع سایش به دو صورت سایش دو جسمی و سایش سه جسمی انجام می شود [۱].

سایش دو جسمی^۲: همان طور که در شکل ۱-۳ دیده می شود، هنگام لغزش یک ساینده، در طول یک سطح رخ می دهد، به طوری که ماده ساینده قابلیت چرخش آزادانه نداشته باشد.



شکل ۱-۳- سایش دو جسمی [۱]

سایش سه جسمی^۳: همان طور که در شکل ۱-۴ نشان داده شده است، هنگامی که یک ذره ساینده بین دو سطح گیر افتاده به طوری که قابلیت چرخش آزادانه بین سطوح را داشته باشد اتفاق می افتد.



شکل ۱-۴- سایش سه جسمی [۱]

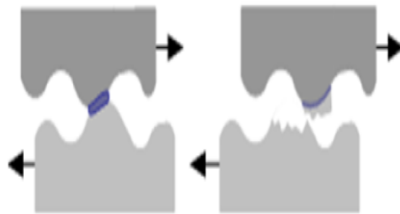
^۱ Abrasive wear

^۲ Two-body abrasion

^۳ Three-body abrasion

سایش اصطکاکی/چسبان^۱

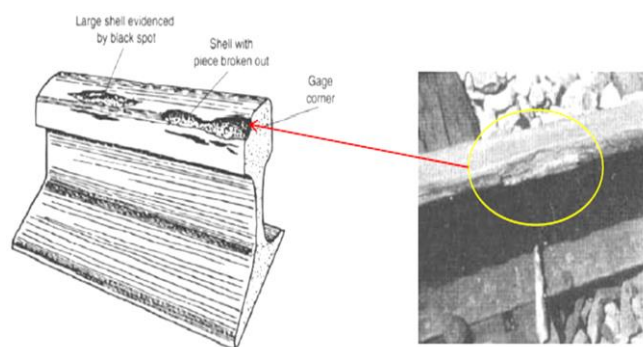
سایش چسبان هنگام لغزش یک سطح جامد روی سطح دیگر تحت اعمال بار رخ می‌دهد. برآمدگی یا زبری‌های سطح تغییر شکل مومسان یافته و حتی در اثر تنش‌های موضعی بالا به یکدیگر جوش می‌خورد. یکی از مشخصه‌های بارز سایش چسبان انتقال جرم از یک ماده به ماده دیگر است [۱]. در شکل ۵-۱ این نوع سایش به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۱-۵- مکانیزم سایش اصطکاکی [۱]

خستگی سطح^۲

سایش ناشی از خستگی سطح در اثر ترک خوردگی اتفاق می‌افتد و به دلیل سیکل‌های تنش‌ی تریبولوژیکی تکرارشونده فعال می‌شود. معمولاً در خستگی سطح، سطوح در تماس با یکدیگر تحت غلتش خالص^۳ و یا غلتش همراه با مقدار کوچکی لغزش^۴ قرار دارند [۱]. در شکل ۶-۱ این نوع سایش دیده می‌شود.



شکل ۱-۶- سایش ناشی از خستگی سطح [۱]

^۱ Frictional wear / adhesive wear

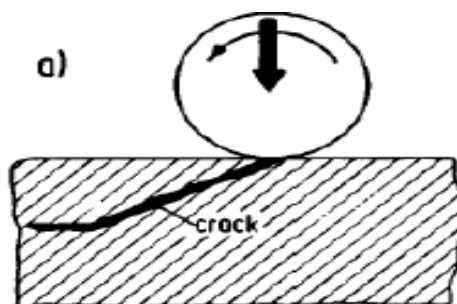
^۲ Surface fatigue

^۳ Pure rolling

^۴ Sliding

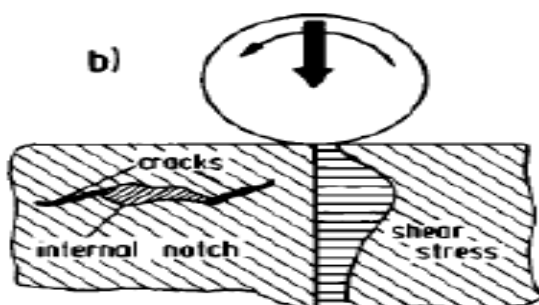
مکانیزم‌های تشکیل ترک‌های ناشی از خستگی سطح عبارتند از:

- ۱- همان‌طور که در شکل ۷-۱ دیده می‌شود برای سطوح سخت و ترد، ترک‌هایی ممکن است در سطح تشکیل شوند و به سمت عمق اشاعه یابند.



شکل ۷-۱-۷ ایجاد ترک در سطوح سخت و ترد [۱]

- ۲- ترک‌ها ممکن است در نواحی زیرسطحی^۱ جایی که تنش برشی بیشینه است، جوانه‌زنی کنند مانند شکل ۸-۱.



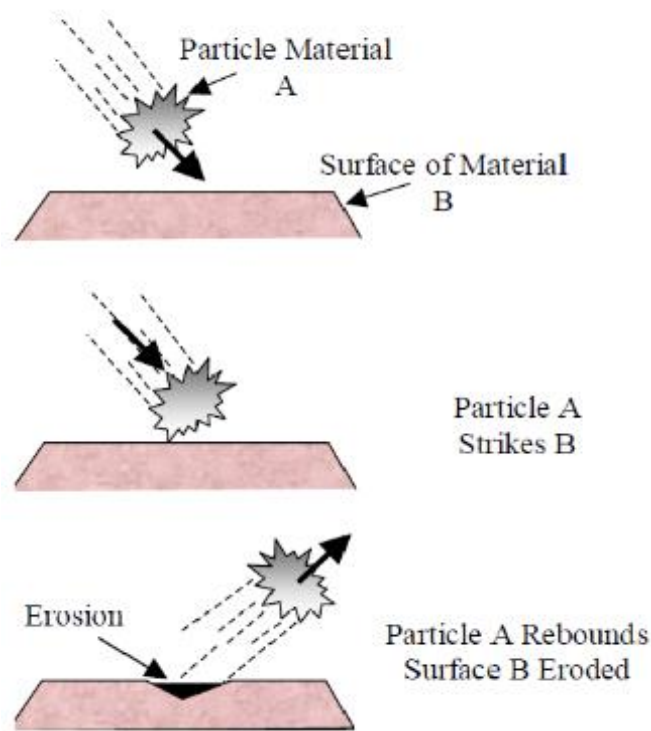
شکل ۸-۱-۸ ایجاد ترک در نواحی زیر لایه [۱]

سایش رفتگی^۲

نوعی از سایش که در اینجا با آن سرو کار داریم سایش رفتگی می‌باشد. برخورد ذرات جامد یا قطرات ریز مایع و یا گاز مانند شکل ۹-۱ بر روی سطح جامد منجر به نوعی از سایش مواد و اجزا می‌گردد که تحت عنوان رفتگی شناخته می‌شود [۲].

^۱ Sub-surface

^۲ Erosion wear



شکل ۱- ۹- فرایند سایش رفتگی [۱]

انواع رفتگی عبارتند از:

الف) رفتگی ذره جامد^۱: سایش سطح در اثر برخورد ذرات جامد حمل شونده توسط سیال یا گاز مانند سایش پره‌های چرخ‌بال در محیط گرد و غبار.

ب) رفتگی قطره مذاب^۲: سایش سطح در اثر برخورد قطرات مایع، مانند سایش پره‌های کمپرسور گازی گریز از مرکز توسط قطرات غلیظ.

ج) رفتگی حفره ای^۳: سایش سطح در یک سیال در حال حرکت در اثر تولید و ترکیدن حباب‌های گاز مانند پروانه‌های زیردریایی، سیت و گیت‌ها در صنعت نفت و گاز، توربین‌های هیدرولیکی.

نحوه آزمون و اندازه‌گیری سایش

^۱ Solid particle erosion

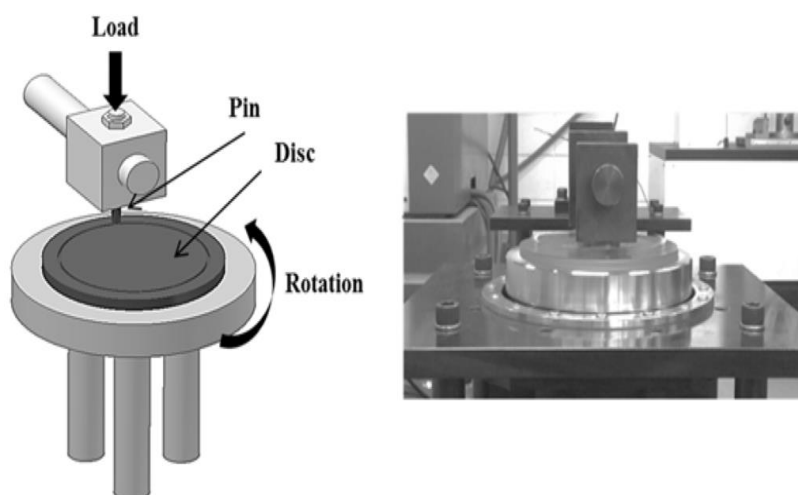
^۲ Liquid drop erosion

^۳ Cavitation erosion

دسترسی به یک دستگاه آزمون سایش برای مواد، اولین مرحله برای کنترل کیفیت تأثیرگذار و تکرارپذیر خوب است [۳]. مطالعات زیادی برای ارزیابی خواص تریبولوژیکی پوشش‌های لایه‌نازک سخت انجام شده است [۴-۵]. آزمون‌های متعددی نظیر آزمون خراش، آزمون سایش لغزشی، آزمون پین روی دیسک^۱ و آزمون سایش رفت و برگشتی به منظور پیش‌بینی رفتار تریبولوژیکی و ارزیابی و توسعه پوشش‌های لایه‌نازک سخت و جدید توسعه یافته است [۶-۱۱].

آزمون پین روی دیسک

پین روی دیسک روش متداولی برای ارزیابی رفتار سایشی و تریبولوژیکی انواع مواد فلزی، سرامیکی، کامپوزیت‌ها و پوشش‌های فلزی مواد است. در روش پین روی دیسک طبق استاندارد ASTM G۹۹ از حرکت لغزشی پین روی دیسک برای ایجاد سایش استفاده می‌شود. دیسک از جنس فلز (معمولاً فولاد ابزار با سختی بالا) ساخته می‌شود و عضو سایا است. همچنین پین عضو ساییده شونده و ماده مورد آزمایش است که روی دیسک قرار می‌گیرد که در شکل ۱-۱۰ نشان داده شده است. در این روش مقدار سایش از روی کاهش وزن یا کاهش حجم نمونه به دست می‌آید و مقدار سایش به نیروی عمود بر پین، مسافت طی شده، محیط و سرعت خطی دیسک بستگی دارد [۳، ۱۲-۱۳]. این روش معمولاً برای بررسی مقدار سایش لایه‌های ضخیم فلزات کاربرد دارد ولی برای پوشش‌های با ضخامت کم و خیلی نازک نیاز به روش جدیدی داریم [۱۴].

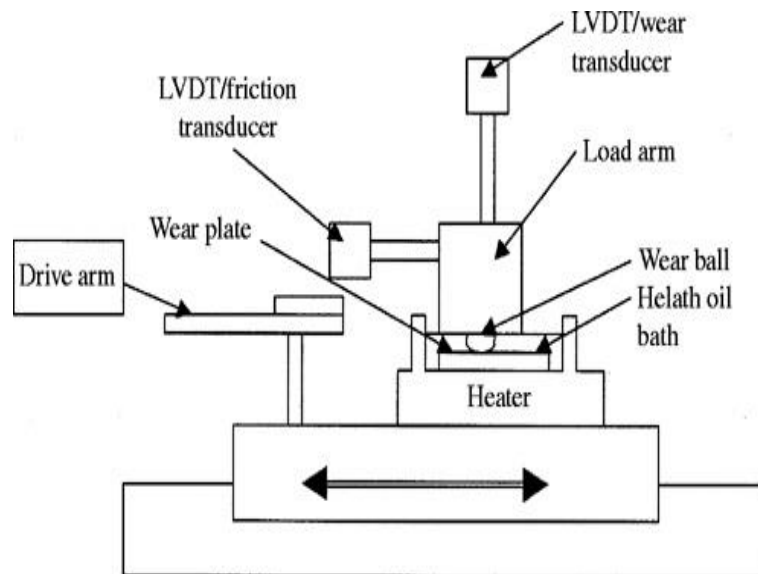


شکل ۱-۱۰- دستگاه پین روی دیسک [۸]

^۱ pin on disk

آزمون سایش رفت و برگشتی^۱

این دستگاه برای انجام آزمون سایش در حرکت رفت و برگشتی و مطابق با الزامات استاندارد ASTM G ۱۳۳-۹۵ طراحی و ساخته شده است که شماتیک آن در شکل ۱-۱۱ دیده می‌شود. با استفاده از این دستگاه مطالعه رفتار سایشی مواد فلزی، سرامیکی و سایر مواد مقاوم در برابر سایش در دو حالت اصطکاکی با روان کار و یا بدون آن میسر می‌شود [۱۵].



شکل ۱-۱۱- نمایی از روش سایش رفت و برگشتی [۱۵]

این روش آزمون برای شبیه‌سازی هندسه و حرکات دو جسم مختلف در تماس کشویی با هم طراحی شده است. سایش ناشی از این حالت ممکن است با سایش در یک جهت (غیر برگشتی) متفاوت باشد و نتایج متفاوتی بدهد. بار مورد استفاده در آزمون و سرعت اعمال آن از برنامه پیشنهادی یا هدف از انجام آزمایش تعیین می‌شود. جهت حرکت و سطح تماس بین نمونه‌ها به شکل متناوب روی یک خط راست به صورت رفت و برگشت است [۱۵].

آزمون‌های موجود می‌توانند مقاومت خراش^۲، مقاومت سایشی و اصطکاک را ارزیابی کنند؛ با این وجود اکثر این آزمون‌ها نمی‌توانند خواص سایشی پوشش، زیرلایه و فصل مشترک این دو را به طور

^۱ Back and forth wear test

^۲ Scratch resistance

مستقل مورد ارزیابی قرار دهند [۵]. همچنین توسط این آزمون‌ها، خرابی (سایش) به طور غیر یکنواخت اتفاق می‌افتد [۴]. ضمن اینکه با این روش‌ها تمرکز بر روی برخورد تکه‌های سخت ریز در یک ناحیه خیلی کوچک بسیار مشکل است؛ بنابراین نیاز به روشی است که شامل ذره‌های خیلی ریز برای ضربه زدن باشد [۷].

آزمون سایش ثابت کرده است که نمونه مناسبی برای مطالعه شکست اولیه و انتشار آن در پوشش‌های نازک سخت است [۱۶۴]. اما توسط آزمون‌های سایش مرسوم نظیر آزمون سایش دوغاب و گریز از مرکز، بخاطر قطر زیاد ذرات نسبت به ضخامت پوشش، خرابی (رفتگی) در پوشش‌های نازک سخت به صورت غیر یکنواخت اتفاق می‌افتد [۱۷-۱۹]. بنابر این نیاز به روشی است که شامل ذره‌های خیلی کوچک برای ضربه زدن باشد [۵-۶]. به همین دلیل آزمون سایش جت میکرو دوغاب^۱ (MSE) یعنی آزمون رفتگی توسط برخورد ذرات بسیار ریز و صلب [۵-۷] برای این‌گونه موارد می‌تواند موثرتر باشد. در انتخاب آزمون سایش باید نکته‌های مختلفی را در نظر گرفت [۱۴]:

- اطمینان از اینکه آزمون انتخاب شده تمام خصوصیات دلخواه را اندازه‌گیری می‌کند.
- مواد به شکل حجمی یا پوشش ضخیم یا نازک می‌توانند باشند.
- اندازه مواد ساینده.
- شکل و سرعت آنها.
- نوع تماس بین اجزا به صورت غلتشی^۲، لغزشی^۳، ضربه‌ای^۴، یا سایشی تنها یا ترکیبی از آنها.
- فاکتورهای حرارت و رطوبت.
- مدت زمان آزمون.

پوشش دهی نمونه‌های تنگستن کارباید^۵

^۱ Micro slurry-jet erosion

^۲ Rolling

^۳ Sliding

^۴ Impact

^۵ Tungsten carbide

پوشش‌های سخت روی ابزارها و تجهیزات، باعث افزایش چند برابری عمر آنها می‌شود [۱۴]. برای بهبود خواص ابزارهای تنگستن کارباید در ماشینکاری قطعات چدنی و فولادی، پوشش‌دهی روی آنها انجام می‌شود. این پوشش‌ها به صورت تک‌لایه یا چند لایه روی ابزارهای مختلف اعمال شده و باعث افزایش چشمگیر خواص ابزار از جمله: سختی، محافظت در برابر واکنش‌های شیمیایی، محافظت در برابر انتقال گرما به ابزار و جلوگیری از شوک حرارتی، کاهش ضریب اصطکاک بین ابزار و براده، مقاومت در برابر سایش سطح جانبی^۱ و مقاومت در برابر سایش حفره ای^۲ می‌شوند. ضخامت این لایه‌ها بین ۲ تا ۱۲ میکرون متغیر است تا از اثرات منفی ناشی از ضخامت لایه‌ها جلوگیری شود. مقاومت سایشی ابزار با افزایش ضخامت پوشش افزایش می‌یابد اما شکنندگی ظاهر می‌شود و امکان کنده شدن پوشش به صورت ورقه‌ای وجود خواهد داشت. پوشش نازک‌تر چقرمگی بیشتری خواهد داشت و هنر استفاده از پوشش مناسب امکان دسترسی به موازنه‌ای از خواص مورد نیاز ماشینکاری را فراهم می‌کند. در فرآیند پوشش‌دهی ابزارهای تنگستن کارباید باید به این نکته مهم توجه داشت که زیر لایه باید چقرمگی مناسبی داشته باشد و توسط پوشش‌های مختلف از نظر سختی، کاهش اصطکاک و سد حرارتی و شیمیایی و جلوگیری از تشکیل لبه انباشته، محافظت گردد. در غیر این صورت پوشش‌دهی تأثیر لازم را نخواهد داشت [۲۰].

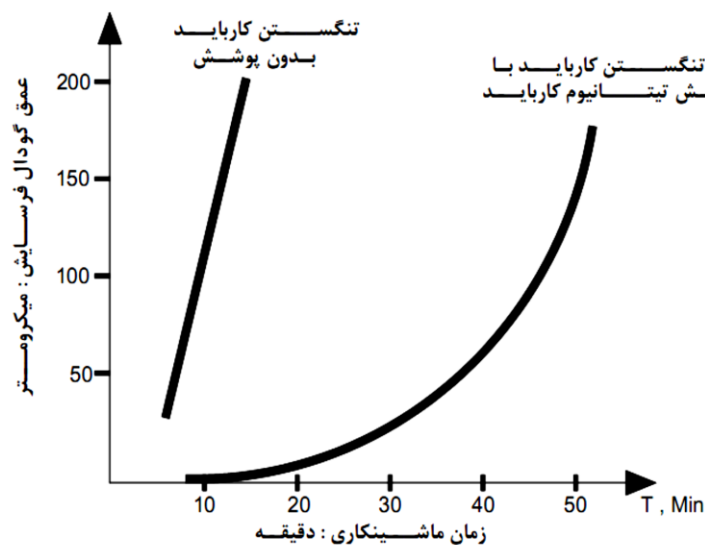
انواع پوشش‌های متداول و خواص آنها

پوشش‌های متداول که امروزه روی انواع ابزارهای برشی انجام می‌شود، کاربید تیتانیوم TiC، نیتريد تیتانیوم TiN، اکسید آلومینیم Al_2O_3 ، کربو نیتريد تیتانیوم TiCN و تیتانیوم آلومینیوم نیتريد TiAlN می‌باشند. این پوشش‌ها به روش رسوب بخار شیمیایی (CVD) و یا رسوب بخار فیزیکی (PVD) انجام می‌شود و به صورت تک‌لایه و یا چندلایه با ترتیب مشخصی روی ابزار پوشش داده می‌شود. در بسیاری از موارد، انتخاب پوشش چندلایه به دلیل استفاده از خصوصیات لایه‌های مختلف نتایج بسیار بهتری در ماشینکاری به همراه دارد [۲۰-۲۱].

^۱ Flank wear

^۲ Crater wear

پوشش TiC خاکستری رنگ است. بخار هیدروژن و تتراکلرید تیتانیوم $TiCl_4$ از روی ابزار داغ عبور کرده که در این سطح، کربنی که در پایه پخش شده است با تیتانیوم در اتمسفر کوره فعل و انفعال انجام داده و تیتانیوم کارباید راشکل می‌دهد. پوشش TiC دارای دامنه وسیعی از کاربردها می‌باشد. این پوشش به دلیل امکان استفاده از نرخ پیشروی بالا و در نتیجه نرخ باربرداری بیشتر، استفاده از آن را مقرون به صرفه تر می‌کند. میزان پیشرفت گودال فرسایش بر روی یک ابزار بدون پوشش در مقایسه با یک ابزار پوشش داده شده با تیتانیوم کارباید در شکل شماره ۱-۱۲ قابل مشاهده است [۲۱].



شکل ۱- ۱۲- مقایسه اندازه گودال رفتگی در WC بدون پوشش و با پوشش TiC [۱۱]

به طور کلی ابزارهای پوشش دار تیتانیوم کارباید در برش های سبک و نیمه پرداخت بر روی موادی که تمایل به آلیاژشدن یا جوش خوردن به تنگستن کارباید WC را دارند خوب عمل می‌کنند. به خاطر حساسیت این پوشش به ترک خوردن، برای ماشین کاری آلیاژهای سبک آلومینیوم و منیزیم که لبه خیلی تیز لازم دارند پیشنهاد نمی‌شود.

TiN در مقایسه با پوشش TiC به خاطر ضریب اصطکاک پایین مقاومت بیشتری در برابر تشکیل گودال فرسایش از خود نشان می‌دهد. با به کارگیری چقرمگی پایه کارباید و مقاومت به تشکیل گودال رفتگی در پوشش TiN، این ماده طلایی رنگ متمایز، عمر ابزاری بسیار طولانی تری از TiN ارائه می‌دهد. پوشش TiN برای کاربردهای عمومی براده برداری و ماشینکاری فولادها مناسب است [۱۱].

TiN یک ماده سخت نیست ولی ضریب اصطکاک پایینی دارد و باعث افزایش مقاومت در برابر سایش حفره ای روی سطح براده ابزار می شود [۲۰].

Al_2O_3 ماده بی بسیار سخت است که مقاومتی سایشی بسیار بالایی دارد به علاوه این ماده از نظر شیمیایی خنثی بوده و به صورت یک سپر حرارتی و شیمیایی بین ابزار و براده عمل می کند. این پوشش دارای استفاده وسیع در ماشینکاری چدن و دیگر مواد آهنی است. استفاده از این پوشش، دامنه کاربرد کاربردهای پوشش دار را وسعت زیادی می دهد تا حدی که در بعضی موارد ابزارهای سرامیکی هم به خاطر استحکام کم می شکنند این پوشش می تواند جایگزین بسیار مناسبی باشد. این پوشش همچنین در دامنه سرعت های بالاتر جایی که ابزارهای TiC پوشش دار به خاطر اکسیداسیون می شکنند به طور موثری کار می کند. به طور کلی مواد پوشش دار Al_2O_3 می توانند در سرعتی در حدود دو برابر سرعت پیشنهادی برای سایر کاربردهای پوشش دار کار کنند.

TiCN دارای خواص چسبندگی عالی است به علاوه مقاومت سایشی خوبی نیز دارد. به همین دلیل می تواند به عنوان لایه نزدیک به زیر لایه استفاده شود و روی آن یک و یا دو لایه دیگر به منظور ایجاد سپر حرارتی و افزایش مقاومت سایشی نیز قرار بگیرد. اگرچه **TiCN** یک لایه با چسبندگی خوب است ولی دارای کربن نیز می باشد و به یک سد حرارتی نیاز دارد. به همین دلیل این ماده با سپرهای حرارتی پایدار مانند اکسید آلومینیوم روی سطح خارجی ترکیب خوبی ایجاد می کند. در واقع در پوشش TiCN، کربن به لایه TiN اضافه شده است که باعث افزایش چشمگیر سختی لایه شده و طول عمر بالاتری را نتیجه می دهد. لایه TiCN مقاومت سایشی بیشتری به سطح آزاد لبه برنده خواهد داد و به این ترتیب مقاومت سایشی سطح جانبی ابزار بیشتر خواهد شد.

پوشش **TiAlN** بارنگ بنفش تیره که از TiN مشتق شده است، مقاومت به سایش بالاتری از TiN ارائه می دهد. همینطور این پوشش سختی و گرماسختی بهتری را نیز از خود نشان می دهد. این پوشش در دماهای برشی بالاتر که پوشش TiN کارایی لازم را ندارد مورد استفاده قرار می گیرد. بدلیل وجود عنصر آلومینیوم در این پوشش، در دماهای کاری بالا، لایه نازکی از Al_2O_3 تشکیل می شود. این لایه به صورت متوالی بهسازی می شود سد حرارتی در مقابل نفوذ حرارت به ابزار شده و طول عمر ابزار را

افزایش می‌دهد. از خواص مهم لایه TiAlN میتوان به سختی بالا، گرماسختی عالی، قابلیت چسبندگی خوب به انواع زیر لایه‌ها، پوشش‌دهی یکنواخت بدون لبه انباشته اشاره نمود [۲۲-۲۳].

در شکل ۱-۱۳ خواص مهم چند نوع پوشش متداول ابزار با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این شکل HV بیانگر سختی، Br اثر سد کنندگی در مقابل واکنش‌های شیمیایی و انتقال گرما در حین عملیات ماشینکاری، Bo خاصیت چسبندگی به زیرلایه، CoF ضریب اصطکاک، VB مقاومت در برابر سایش سطح جانبی، KT مقاومت در برابر سایش حفره‌ای و چقرمگی می‌باشد.

	Hv	Br	Bo	CoF	VB	KT	T
TiC	3000						
Al2O3	2300						
TiN	2200						
TiCN	3000						

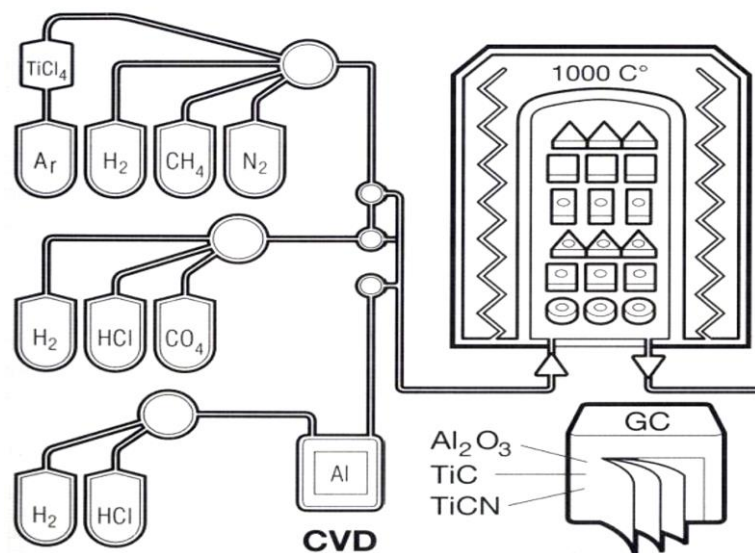
شکل ۱-۱۳- مقایسه برخی ویژگی‌های چند پوشش متداول

پوشش‌دهی به روش CVD

تولید سمند کاربیدهای^۱ پوشش‌دار از طریق گذاشتن لایه‌های مختلف پوشش با روش مدرن و توسعه‌یافته CVD امکان پذیر شده است. پوشش دادن با روش CVD توسط واکنش شیمیایی بین گازهای مختلف انجام می‌شود. در این فرایند نمونه داخل کوره و در حمام بخار مورد نظر قرار گرفته و تا دمای حدود ۱۰۰۰ °C گرم می‌شود. در این دما و با گذشت زمان مشخص لایه بسیار نازکی از بخار پوشش مورد نظر روی ابزار قرار می‌گیرد. این فرایند شبیه زینترکردن باید به دقت تحت کنترل باشد. فرایند CVD در حال حاضر یک فرایند جا افتاده و معمول است که کاربرد وسیعی دارد و تقریباً برای پوشش‌دهی تمام ابزارها با پوشش‌های متنوع کاربرد دارد. این روش برای پوشش دادن چند لایه

^۱ Cemented carbides

ابزارها بسیار مناسب است. پوشش ایجاد شده با روش CVD یکنواخت و همگن است و چقرمگی لبه همراه با مقاومت سایشی و چسبندگی بین پوشش و زیر لایه عالی است. شکل ۱-۱۴ شماتیک فرایند پوشش‌دهی به روش CVD را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۴- شماتیک فرایند پوشش‌دهی به روش CVD [۲۰]

ضخامت معمول لایه پوشش‌دهی به روش CVD از ۲ تا ۱۲ μm است. از مزایای پوشش‌دهی به روش CVD می‌توان به قابلیت پوشش‌دهی با ضخامت‌های متفاوت، چسبندگی بسیار خوب به زیرلایه کارباید، مقاومت به سایش بسیار خوب و قابلیت انجام پوشش‌های اکسیدی اشاره نمود [۲۰].

پیشینه تحقیق

سامیت و آجای شرما در سال ۲۰۱۵ برای تحقیق و بررسی ویژگی‌های سایشی دیسک آلومینیومی از روش پین روی دیسک استفاده کردند. پین از جنس HSS یک تماس نقطه‌ای پیوسته را با دیسک دارد. آنها با این دستگاه، خصوصیات تریبولوژیکی مانند حجم سایش بین دو سطح در تماس با هم و همچنین نرخ سایش را توسط معادله آرچارد^۱ و حجم و وزن از دست رفته بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش بار اعمالی، نرخ سایش افزایش می‌یابد و با افزایش شعاع پین، نرخ سایش کاهش می‌یابد [۱۲]. همچنین ایمان ناصر و امال ناصر در سال ۲۰۱۱ برای آزمون سایش دیسک فولادی از این روش

^۱ Archards equation

استفاده کردند. دیسک از جنس فولاد سخت ۱۰۴۵ ASE سخت و پین از جنس A۳۵۶ انتخاب شد. هدف آنها مطالعه ارزیابی تغییرات بار اعمالی بر روی نرخ سایش بود و همچنین یکی از اهداف آنها بررسی دقت دستگاه خود با دستگاه‌های موجود دیگر با توجه به نتایج بدست آمده، بود و نشان دادند که با افزایش بار اعمالی، نرخ سایش افزایش می‌یابد [۳].

تحقیقاتی که گفته شد برای ارزیابی پوشش‌های با قطر زیاد مناسب است. و اما برای توسعه و ارزیابی پوشش‌های لایه‌نازک سخت، تاکنون تحقیق‌های بسیار زیادی انجام شده است. تورن و فایست در سال ۱۹۸۹ آزمون ساییدگی دوغاب برای ارزیابی تأثیر غلظت ذرات بر روی نرخ سایش انجام دادند. جنس نمونه از آلومینیوم خالص، غلظت دوغاب ۱، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی، قطر جت دوغاب mm ۴,۷۶ و اندازه ذرات ساینده بین $200\text{ }\mu\text{m}$ تا $300\text{ }\mu\text{m}$ انتخاب شد. جرم از دست رفته از نمونه توسط یک ترازوی دقیق و پروفایل سایش توسط یک میکروسکوپ نوری اندازه گیری شد. در این آزمون نشان داده شد که سرعت ذرات پارامتر مهمی است که روی پروفایل سایش تأثیر می‌گذارد و سایش با افزایش غلظت، افزایش می‌یابد ولی نرخ سایش با افزایش غلظت کاهش می‌یابد [۲۵].

هوتچینگ در سال ۱۹۹۸ کاربرد آزمون سایش ذرات صلب را بر روی نمونه‌های پوشش داده شده بررسی کرد و نشان داد که می‌توانند خصوصیات سایشی پوشش‌ها را مستقل از زیر لایه بررسی کنند [۲۲].

هشمی در سال ۱۹۹۸ برخی روش‌های آزمون سایش را مورد ارزیابی قرار داد و نشان داد که روش پین روی دیسک برای پوشش‌های ضخیم مناسب است و برای پوشش‌های نازک مناسب نیست [۱۴]. آیوا و میاجیما در سال ۲۰۰۵ مقاومت سایشی پوشش TiN پوشیده شده بر روی فولاد توسط آزمون ضربه جت دوغاب را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که آزمون جت دوغاب سریع، ساده و تجدیدپذیر می‌باشد و به تغییرات بسیار حساس است و پوشاندن TiN بر روی زیر لایه در دمای خیلی بالا، مقاومت سایشی بالایی را ایجاد می‌کند [۴].

آیوا و ماتسوبارا در سال ۲۰۰۹ از روش MSE برای آزمون پوشش‌های لایه نازک سخت استفاده کردند [۵]. آنها از ذرات زاویه‌دار آلومینا به عنوان ساینده، از آب خالص به عنوان حلال، از TiN به عنوان پوشش و از فولاد به عنوان زیرلایه استفاده نمودند و نشان دادند که آزمون MSE خصوصیات سایشی

پوشش‌های نازک سخت را به طور مستقل از خصوصیات زیر لایه ارزیابی می‌کند و حساسیت زیاد دستگاه، آن را برای ارزیابی پوشش‌های چند لایه، زیر لایه و مرز مشترک آنها مناسب می‌سازد. آیوا و میاجیما در سال ۲۰۰۹ از روش MSE برای آزمون سایش پوشش‌های TiC/TiN و TiC که به روش CVD بر روی WC پوشش دهی شده بودند، استفاده کرده و نشان دادند که مقاومت سایشی TiC حدود دو برابر مقاومت TiN و MSE کوچکترین اختلافات در خصوصیات پوشش و زیر لایه را بررسی می‌کند [۶].

ساختار پایان‌نامه

در این پایان‌نامه، به طراحی، ساخت و به‌کارگیری دستگاه MSE برای بررسی خصوصیات سایشی پوشش‌های لایه نازک سخت با زیر لایه WC پرداخته می‌شود. بعد از ساخت، اولین آزمون‌ها با آب خالص جهت اطمینان از تکرارپذیری رفتار دستگاه و سپس با دوغاب آلومینا انجام می‌شود. بعد از اطمینان از تکرارپذیری رفتار دستگاه، آزمون سایش سه نمونه مورد نظر با دوغاب آلومینا انجام شد و میزان سایش نمونه‌ها توسط دستگاه پروفایل‌متر اندازه‌گیری و نمودار آنها ترسیم شد.

پایان نامه حاضر شامل چهار فصل است. فصل اول مقدمه‌ای راجع به سایش و انواع آن، معرفی چند نمونه از دستگاه‌های موجود جهت آزمون سایش، نمونه‌های مورد آزمون و نحوه پوشش‌دهی آنها و مروری بر منابع را بیان می‌کند. فصل دوم به روش تجربی شامل ساخت دستگاه و عملکرد آن و آزمون‌های سایش نمونه‌ها می‌پردازد. فصل سوم نتایج آزمون‌های سایش را مورد بررسی قرار می‌دهد. در فصل چهارم نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای ادامه کار ارائه شده است.

فصل دوم: طراحی و اجرای آزمون‌های تجربی

هدف از انجام این آزمون مشخص کردن خواص پوشش‌ها و همچنین تعیین نرخ سایش پوشش و زیرلایه به‌طور مستقل می‌باشد. با انتخاب مناسب پارامترهایی همچون غلظت ذرات ساینده، فشار هوا، هندسه نازل، زاویه برخورد، سرعت ذرات ساینده و غیره می‌توان نرخ سایش را تغییر داد. در آزمون پین روی دیسک بعد از انجام آزمون، مقدار سایش از طریق اندازه‌گیری وزن مواد ساییده شده محاسبه می‌شود و مبتنی بر جرم می‌باشد ولی در آزمون سایش پوشش‌های لایه نازک سخت بخاطر اینکه مقدار وزن مواد ساییده شده از نمونه بعد از اتمام آزمون بسیار کم می‌باشد و به راحتی مشخص نمی‌گردد، هندسه (عمق) سطح ساییده شده توسط یک پروفایلومتر اندازه‌گیری می‌شود. در این فصل، ابتدا مبانی طراحی، دستگاه ساخته شده و اجزای آن، معرفی می‌شود. در ادامه، عملکرد و آزمون‌های انجام شده جهت اطمینان از عملکرد دستگاه، ارائه می‌گردد.

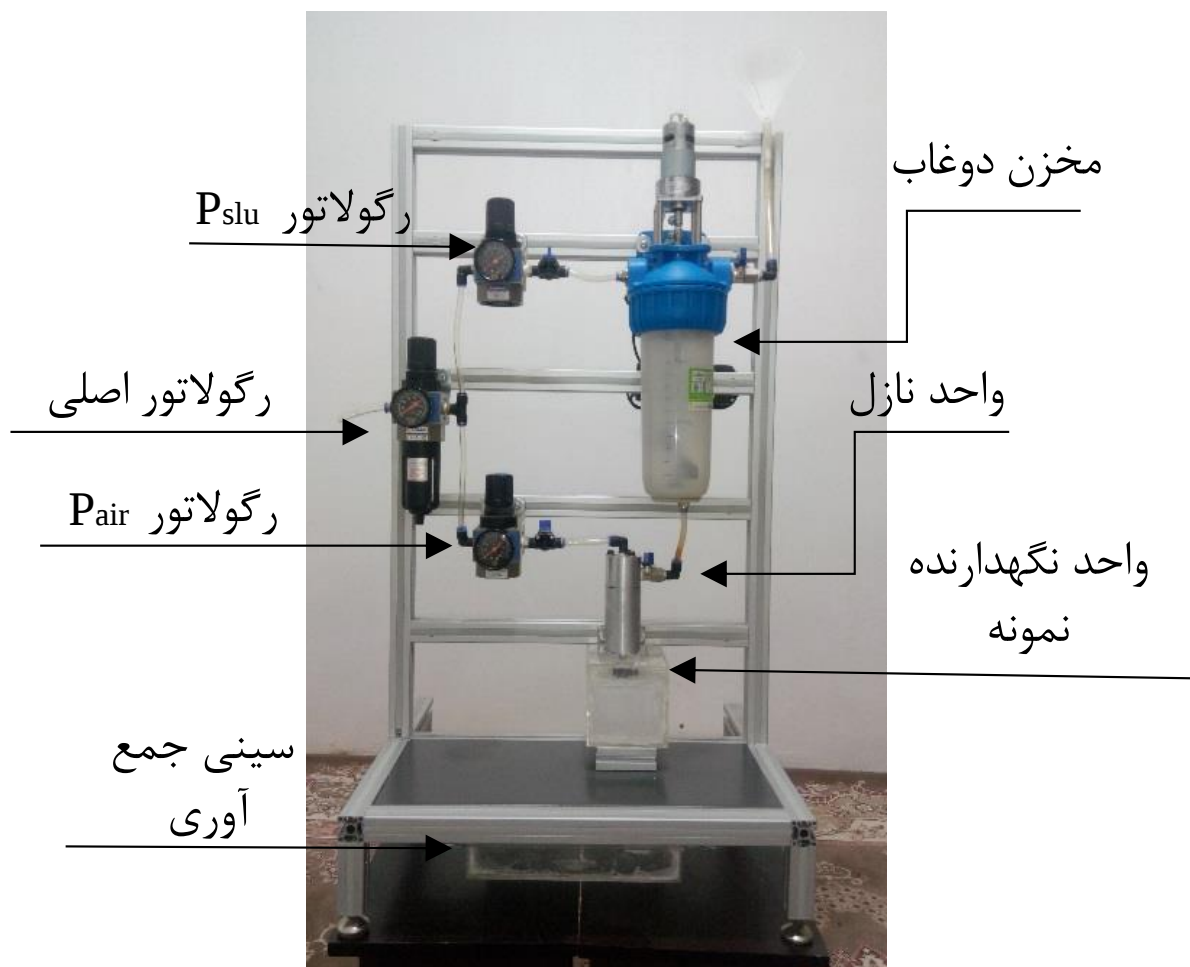
الزامات طراحی

برای انجام آزمون سایش روی پوشش‌های نازک سخت نیاز به دستگاهی است که بتواند فرایند سایش را به سادگی و با سرعت بالایی انجام دهد. برای ایجاد سایش مناسب به ذرات بسیار ریزی نیاز است که با سرعت زیاد به سطح نمونه برخورد کرده و موجب سایش پوشش شوند. در این آزمون از ذرات سخت و ریز آلومینا به عنوان ساینده استفاده می‌شود. برای حمل این ذرات نیاز به محلولی است که بتواند ذرات ریز آلومینا را در حمل نماید. در این آزمون از آب خالص به عنوان محیط استفاده شد. برای نگهداری مخلوط دوغاب نیاز به مخزنی است که این مخلوط در آن ریخته شود. دوغاب باید در تمام طول آزمون به صورت همگن باقی بماند و از ته نشین شدن آن جلوگیری شود. لذا در ساخت این دستگاه از یک همزن که به وسیله یک موتور الکتریکی می‌چرخد استفاده شد. مخزنی که در ساخت این دستگاه استفاده شد کاملاً شفاف است و سطح دوغاب در آن دیده می‌شود. دوغاب باید در داخل مخزن تحت فشار قرار گیرد و با سرعت زیاد به صورت جت به سطح نمونه برخورد نماید تا باعث افزایش سرعت آزمون و کاهش مدت زمان آن شود. پس باید دوغاب تحت فشار بالایی از یک نازل با قطر کم عبور نماید. در عین حال باید جنس نازل بسیار سخت انتخاب شود تا عبور دوغاب سبب سایش خود نازل نشود. جنس نازل از تنگستن کارباید انتخاب شد که بسیار سخت است و مقاومت خوبی در برابر سایش دارد. جهت تحت فشار قرار دادن دوغاب به یک کمپرسور نیاز است که

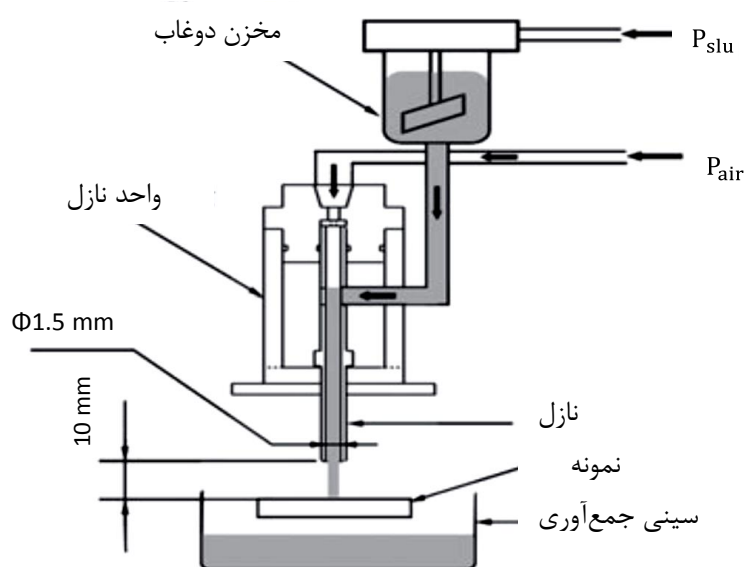
بتواند حداکثر فشار ۸ bar را ایجاد کند. برای ایجاد جت دوغاب، علاوه بر تحت فشار قرار دادن مخلوط دوغاب در داخل مخزن، باید یک فشار هوا هم بر روی نازل وارد شود. لذا باید از دو عدد رگولاتور استفاده شود که بتوان فشار داخل مخزن و فشار هوای ورودی به نازل را به طور مستقل تنظیم نمود. برای نگه داشتن نمونه در یک فاصله مشخص نیاز به یک نگهدارنده است. ضمن اینکه برای جلوگیری از پخش شدن دوغابی که به سطح نمونه برخورد می‌کند باید محیط اطراف نمونه بسته باشد و دوغاب پس از برخورد به سطح نمونه جمع‌آوری شود. پس علاوه بر نگهدارنده نمونه، به یک دریافت کننده نیاز است که دوغاب پس از برخورد به نمونه وارد آن شده و دخیره شود.

طراحی دستگاه

دستگاه MSE شامل یک مخزن L ۱/۵ به همراه همزن، یک واحد نازل، واحد نگهدارنده نمونه، سینی جمع‌آوری دوغاب و سه عدد رگولاتور جهت تنظیم فشار هوا می‌باشد. شکل‌های ۱-۲ و ۲-۲ نمایی از دستگاه MSE را نشان می‌دهند.

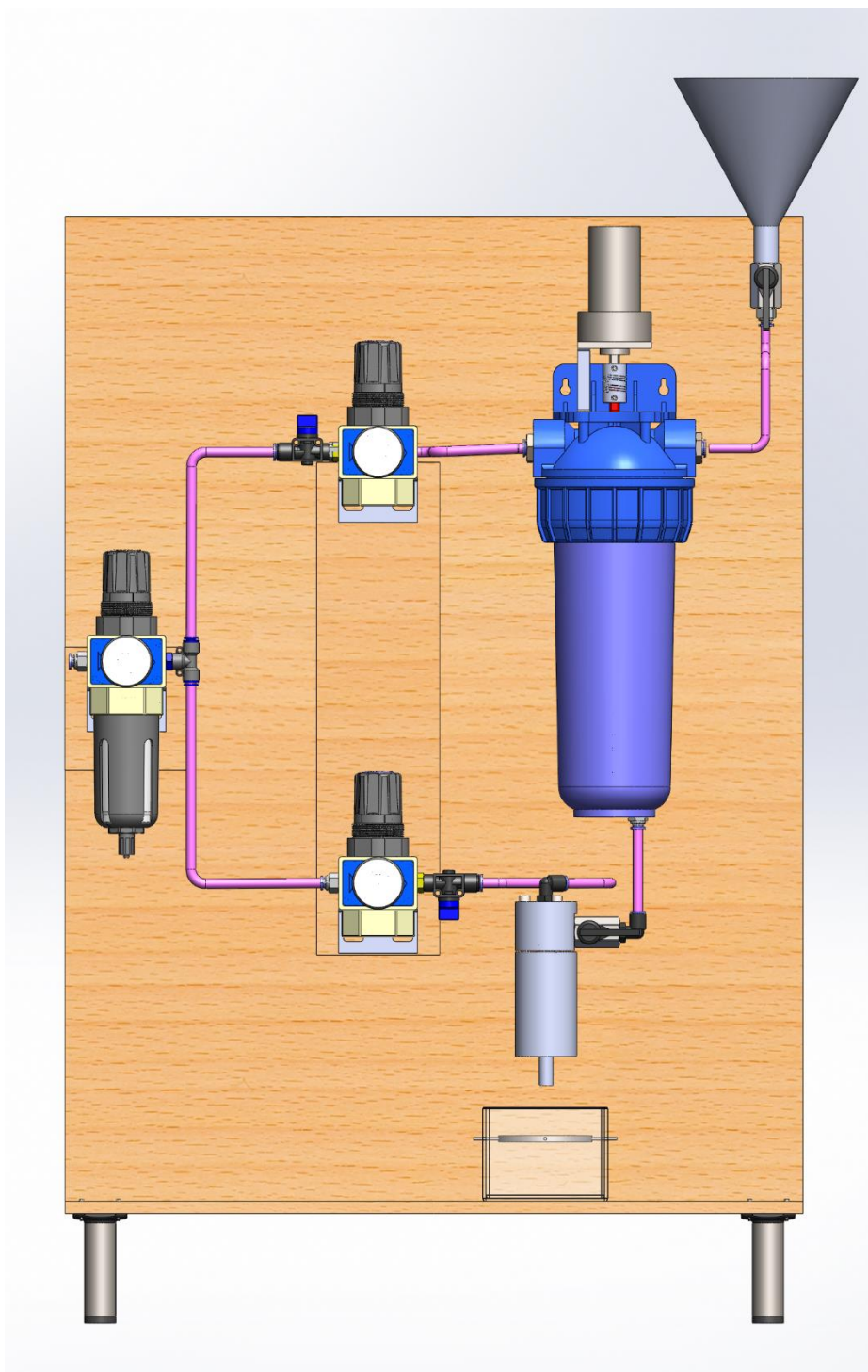


شکل ۲-۱- دستگاه MSE



شکل ۲-۲- شماتیکی از دستگاه MSE

در شکل ۳-۲ مدل سه بعدی دستگاه MSE دیده می شود.



شکل ۳-۲- مدل سه بعدی دستگاه MSE

مخزن

مخزن شامل یک ورودی برای دوغاب، یعنی آبی که حاوی ذرات سایشی می‌باشد، و یک ورودی برای فشار هوای تنظیم شده و یک خروجی برای خروج دوغاب با فشار تنظیم شده می‌باشد و قابلیت تحمل فشار ۸ bar را دارد. مخزن از جنس پلاستیک فشرده شفاف انتخاب و روی آن مدرج شد. محیط داخل مخزن بایستی به طور کامل آب‌بندی شود تا از نشت هوا و دوغاب به بیرون جلوگیری شود.

در داخل مخزن از یک همزن با پره‌های فولاد ضد زنگ برای جلوگیری از ته‌نشین شدن دوغاب و یکنواختی و همگنی آن در طی آزمون استفاده شد. این همزن با یک موتور الکتریکی ۱۲ V به حرکت درمی‌آید که توسط یک آداپتور توان مصرفی خود را از برق شهر تامین می‌کند. این موتور الکتریکی با سرعت ۱۲ دور بر دقیقه می‌چرخد.

رگلاتورهای تنظیم فشار

رگلاتورهای تنظیم فشار استفاده شده در این دستگاه ساخت شرکت شاگو و فشارکاری آنها بین ۰/۵ تا ۱۰ bar می‌باشد. در این دستگاه از سه عدد رگلاتور قابل تنظیم استفاده شد. یکی از رگلاتورها به عنوان رگلاتور اصلی دستگاه به کار می‌رود که علاوه بر تنظیم فشار کلی مدار، دارای یک فیلتر می‌باشد تا ناخالصی‌های موجود در هوای ورودی را جذب نماید. رگلاتور دیگر جهت تنظیم فشار روی دوغاب (Pslu) داخل مخزن به کار رفته و رگلاتور بعدی جهت تنظیم فشار هوای ورودی نازل (Pair) به کار گرفته شده است.

روی همه این رگلاتورها یک گیج نشان دهنده فشار نصب شده است تا بتوان فشارکاری دقیق را روی آنها مشاهده و تنظیم نمود. در ضمن جهت تامین فشار هوای مورد نیاز از یک کمپرسور باد استفاده شد.

نازل

جهت ساخت نازل از یک مته از جنس کاربیدتنگستن استفاده شد که یک سرامیک فوق سخت است. این مته دارای یک سوراخ آب‌صابون به قطر ۱,۵ mm در مرکز است. این مته در داخل یک پوسته آلومینیومی که از دو قسمت تشکیل شده قرار می‌گیرد. واحد نازل دارای دو ورودی که یکی برای ورود دوغاب و دیگری برای ورود فشار هوای تنظیم شده است.

نگهدارنده نمونه

نگهدارنده نمونه در این دستگاه از جنس پلاستیک فشرده شفاف انتخاب و مزیت آن این است که در حین آزمون می‌توان برخورد دوغاب به نمونه را مشاهده کرد. در انتهای نگهدارنده یک خروجی قرار دارد که دوغاب پس از برخورد با نمونه از طریق این خروجی به مخزن جمع‌آوری راه یافته و در آن جمع می‌شود.

سینی جمع‌آوری دوغاب

جنس این سینی هم از پلاستیک فشرده شفاف انتخاب شد و وظیفه آن دریافت و جمع‌آوری دوغاب خروجی از واحد نگهدارنده می‌باشد. بیشینه حجمی از دوغاب که این سینی در خود جای می‌دهد ۲ L است.

طراحی و ساخت پایه

برای ساخت پایه دستگاه از پروفیل‌های آلومینیومی استفاده شد که علاوه بر سبک کردن وزن دستگاه، به راحتی قابلیت تغییر در محل نصب قطعات دستگاه را هم فراهم می‌سازد.

پودر آلومینا

آلومینای مورد استفاده در آزمون سایش باید قابلیت برندگی مناسب داشته باشد. در این آزمون از ذرات آلومینا به عنوان ساینده استفاده شد. یکی از بهترین روش‌های بررسی ریزساختار مواد، تحلیل میکروسکوپ الکترونی روبشی^{۲۸} (SEM) است. در این روش تصاویر توپوگرافی با بزرگنمایی بسیار بالایی به دست می‌آید. اندازه ذرات توسط دستگاه SEM ساخت شرکت سرون^{۲۹} کره که در دانشگاه صنعتی امیرکبیر موجود است، شکل ۲-۴، اندازه‌گیری شد.

^{۲۸} Scanning electron microscopy

^{۲۹} Seron



شکل ۲-۴- نمایی از دستگاه SEM جهت تعیین مشخصات پودر مورد استفاده

عملکرد دستگاه MSE

دوغاب از مخلوط ذرات آلومینا با آب خالص حاصل می‌شود. دوغاب در دمای اتاق نگهداری می‌شود و می‌توان غلظت آن را با تغییر مقدار ذرات آلومینا کنترل کرد. در هر آزمون مقداری از دوغاب داخل مخزن دستگاه ریخته می‌شود، در ادامه دوغاب تحت فشار هوای کنترل شده در نازل شتاب می‌گیرد و به صورت یک جت با سرعت بالا به نمونه برخورد می‌کند. فضای اطراف منطقه آزمون پوشیده شده است و همه دوغاب خروجی از نازل پس از برخورد به نمونه وارد سینی جمع‌آوری دوغاب شده، در داخل آن جمع می‌شود. در این دستگاه می‌توان فاصله نمونه از خروجی نازل را با حرکت دادن نگهدارنده تنظیم نمود. همچنین می‌توان با حرکت نگهدارنده، زاویه برخورد جت دوغاب با سطح نمونه را می‌توان بین ۱۵ تا ۹۰ درجه تنظیم کرد که در این پژوهش زاویه برخورد جت دوغاب با سطح نمونه ۹۰ درجه تنظیم شد.

قبل از انجام آزمون اصلی باید از دقت بودن و تکرارپذیری عملکرد دستگاه مطمئن شد. برای دست یافتن به این مهم ابتدا چندین آزمون با آب خالص انجام شد. برای انجام این آزمون هر بار مقدار ۱ لیتر آب داخل مخزن دستگاه ریخته شده سپس از دو قسمت فشار هوا تنظیم می‌شود. یکی فشار هوای ورودی به مخزن (P_{slu}) و دیگری فشار هوای ورودی به نازل (Pair) که می‌توان با تنظیم این دو فشار، سرعت جت خروجی از نازل را تنظیم کرد. در این آزمون بخاطر ارتفاع سیال داخل مخزن P_{slu}

برابر ۹۵٪ از P_{air} در نظر گرفته شد. با انتخاب مناسب پارامترهایی همچون غلظت ذرات ساینده، فشار هوا، هندسه نازل، زاویه برخورد و سرعت ذرات ساینده می‌توان نرخ سایش را تغییر داد. آزمون با آب خالص تحت فشارهای $P_{air} = 1, 2, 3, 4 \text{ bar}$ انجام گرفت. برای هر فشار، آزمون ۴ مرتبه تکرار شده و نتایج هر آزمون به‌طور جداگانه ثبت شد.

بعد از انجام آزمون دستگاه با آب، عملکرد و تکرارپذیری آن توسط محلول دوغاب مورد بررسی قرار می‌گیرد. محلول دوغاب شامل ذرات آلومینا با اندازه متوسط ۱ میکرون به عنوان ساینده و آب خالص به عنوان حلال می‌باشد که برای بررسی عملکرد دستگاه از دوغاب با غلظت‌های، ۱٪، ۲٪، ۳٪ $C =$ درصد وزنی، تحت فشارهای $P_{air} = 1, 2, 3, 4, 5 \text{ bar}$ استفاده شد. هر آزمون تحت فشارهای اعمالی و درصد جرمی مشخص ۴ مرتبه تکرار شد. در مجموع ۶۰ مرتبه آزمون تحت فشارها و غلظت‌های مختلف تکرار شد.

پوشش نمونه‌های استفاده شده در آزمون

پوشش سه لایه $TiN/TiCN/Al_2O_3$

پوشش انتخاب شده برای نمونه شماره ۱ موضوع این تحقیق، پوشش سه لایه $TiN/TiCN/Al_2O_3$ می‌باشد.

ترتیب این پوشش از سمت زیرلایه $WC^{۳۰}$ به ترتیب زیر است :

(۱) لایه داخلی: TiN

(۲) لایه میانی: $TiCN$

(۳) لایه خارجی: Al_2O_3

با توجه به خاصیت چسپندگی عالی پوشش TiN به زیرلایه، برای لایه اول این نمونه پوشش TiN انتخاب شد. همچنین سختی لایه TiN که حدود ۲۲۰۰ ویکرز است که نسبت به سختی WC گرید

^{۳۰} Substrate

K₄₀ که حدود ۱۳۰۰ ویکرز است، تفاوت کمتری نسبت به سایر لایه‌ها دارد و باعث چقرمگی لایه اول می‌شود.

لایه دوم TiCN انتخاب شده است. TiCN دارای خواص چسپندگی عالی به لایه‌های دیگر بوده و مقاومت سایشی خوبی نیز دارد. به همین دلیل به عنوان لایه نزدیک به زیر لایه استفاده می‌شود و روی آن باید یک یا دو لایه دیگر به منظور ایجاد سپر حرارتی و افزایش مقاومت سایشی نیز قرار گیرد. این لایه با سپرهای حرارتی پایدار مانند اکسید آلومینیم روی سطح خارجی ترکیب خوبی ایجاد می‌کند.

لایه Al₂O₃ مقاومت در برابر سایش حفره ای خوبی دارد. اکسید آلومینیم مانند سدی از انتقال حرارت به ابزار جلوگیری نموده و از ایجاد واکنش بین ابزار و قطعه کار جلوگیری می‌نماید و در نتیجه طول عمر ابزار را افزایش می‌دهد [۲۰].

پوشش چهار لایه TiN /TiCN /TiAlN /TiN

پوشش انتخاب شده برای نمونه شماره ۲ موضوع این تحقیق، پوشش چهار لایه TiN/TiCN/TiAlN/TiN می‌باشد. ترتیب این پوشش از سمت زیر لایه WC به ترتیب زیر است :

(۱) لایه داخلی : TiN

(۲) لایه دوم : TiCN

(۳) لایه سوم: TiAlN

(۴) لایه خارجی: TiN

لایه سوم از TiAlN انتخاب شد. در بحث این لایه TiCN تاکید شد که روی این لایه باید یک و یا دو لایه دیگر به منظور ایجاد سپر حرارتی و افزایش مقاومت سایشی نیز قرار گیرد. برای این نمونه ابتدا پوشش تیتانیوم آلومینیم نیتراید و سپس پوشش TiN انتخاب شد.

پوشش سه لایه $TiN/TiCN/TiN$

پوشش انتخاب شده برای نمونه شماره ۳ موضوع این تحقیق، پوشش سه لایه $TiN/TiCN/TiN$ می‌باشد. ترتیب این پوشش از سمت WC به ترتیب زیر است:

(۱) لایه داخلی: TiN

(۲) لایه میانی: $TiCN$

(۳) لایه خارجی: TiN

روش اجرایی پوشش دهی نمونه‌ها

برای پوشش دهی نمونه‌ها از امکانات شرکت الماس ساز استفاده گردید. این شرکت در زمینه تولید و پوشش دهی انواع الماسه‌های برشی تنگستن کارباید فعالیت دارد. الماس ساز فعالیت خود را از سال ۱۳۷۰ و تحت لیسانس یکی از معتبرترین شرکت‌های الماس سازی آلمان به نام هرتل^{۳۱} وارد شده و نصب و راه اندازی شده است. این شرکت در حال حاضر تنها شرکت تولیدی الماسه‌های برشی در کشور است. شکل ۲-۵ تصاویر تجهیزات پوشش دهی CVD این شرکت را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۵- نمایش از تجهیزات پوشش دهی به روش CVD شرکت الماسه ساز [۲۴]

تجهیزات پوشش دهی به روش PVD و CVD در این شرکت وجود دارد، که قابلیت پوشش دهی ابزارها با پوشش‌های مختلف را دارد. تجهیزات پوشش دهی به روش CVD همزمان با تولید این شرکت در

^{۳۱} Hertel

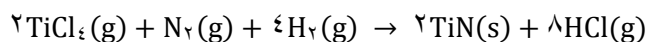
سال ۱۳۷۰ راه اندازی شد. ولی تجهیزات PVD در چند سال اخیر خرید و راه اندازی شده است. شکل ۶-۲ نمایی از راکتور PVD موجود در شرکت الماس ساز را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۲- نمایی از تجهیزات پوشش دهی به روش PVD شرکت الماسه ساز [۲۴]

در پوشش دهی ابزارها، پارامترهای مهم فرآیند شامل: اتمسفر داخل راکتور، میزان گازهای ورودی به راکتور، ترتیب ورود گازها در پوشش‌های چندلایه، دمای راکتور و زمان پوشش‌دهی نقش بسیار مهمی در کیفیت پوشش دارند. در راکتورهای PVD و CVD شرکت الماسه ساز، تمام پارامترهای اشاره شده، به صورت کاملاً دقیق در کنترلر دستگاه تحت کنترل قرار می‌گیرند تا پوشش مورد نظر به صورت دقیق و مطابق با فرآیند مورد نظر انجام شود. فرآیند تولید پوشش‌های مختلف مورد استفاده در این تحقیق شامل پوشش : $\text{TiN-TiAlN-TiCN-Al}_2\text{O}_3$ به طور خلاصه در زیر بیان شده است.

تولید پوشش TiN : برای تولید این نوع پوشش طلایی رنگ بخار تتراکلرید تیتانیوم TiCl_4 به همراه بخار نیتروژن و هیدروژن به داخل راکتور تزریق می‌شود. این گازها در اثر دما و فشار اعمال شده در راکتور طی واکنش شیمیایی زیر TiN تولید می‌گردد:



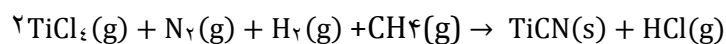
بخار کلرید هیدروژن بوسیله پمپ‌های خلاء از محفظه راکتور خارج شده و TiN جامد روی قطعات مورد نظر پوشش‌دهی می‌شود. پوشش TiN به هر دو روش CVD و PVD انجام می‌شود.

تولید پوشش تیتانیوم آلومینیم نیتراید TiAlN : برای تولید این پوشش آلیاژ Ti-Al در اثر حرارت و خلا محیط تصعید می‌شود. بخار متصاعد شده از این آلیاژ با حمام نیتروژن موجود در راکتور ترکیب شده و لایه ترکیبی TiAlN روی ابزار مورد نظر که دمای کمتری دارد لایه‌نشانی می‌شود.



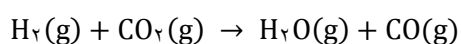
این پوشش با هر دو روش PVD و CVD روی ابزار اعمال می‌شود.

تولید پوشش تیتانیوم کربن نیتراید TiCN: برای تهیه این پوشش بخار تتراکلرید تیتانیوم (TiCl_4) به همراه بخار نیتروژن و هیدروژن و گاز متان به داخل راکتور تزریق می‌شود. در اثر حرارت و دمای راکتور واکنش شیمیایی به صورت زیر انجام شده و پوشش TiCN روی ابزار اعمال می‌شود.

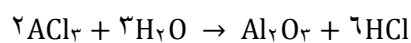


بخار کلرید هیدروژن بوسیله پمپ‌های خلاء از محفظه راکتور خارج شده و TiN جامد روی قطعات مورد نظر پوشش‌دهی می‌شود. این پوشش معمولاً به روش CVD انجام می‌شود.

تولید پوشش اکسید آلومینیم Al_2O_3 : برای تولید این پوشش کلرید آلومینیم AlCl_3 به همراه گازهای دی اکسید کربن CO_2 و هیدروژن H_2 داخل راکتور وارد می‌شود، در اثر دما و فشار راکتور، و در اثر ترکیب شیمیایی دی اکسید کربن و هیدروژن، بخار H_2O تولید می‌شود.



همزمان در اثر حرارت بالای راکتور، کلرید آلومینیم تصعید شده و با بخار H_2O حاصل شده از واکنش قبلی به صورت زیر واکنش شیمیایی داده و اکسید آلومینیم تولید می‌شود.



گازهای منوکسید کربن CO و کلرید هیدروژن توسط پمپ از محیط راکتور خارج شده و پوشش اکسید آلومینیم حاصل از واکنش‌های فوق روی ابزار مورد نظر اعمال می‌شود. این پوشش عموماً به صورت CVD انجام می‌شود [۲۴]. به‌طور خلاصه شرایط اعمال سه نوع پوشش و ضخامت در جدول ۲-۱ ذکر شده است.

جدول ۲-۱- فرآیند اعمال پوشش‌های مختلف روی سه نوع نمونه [۹]

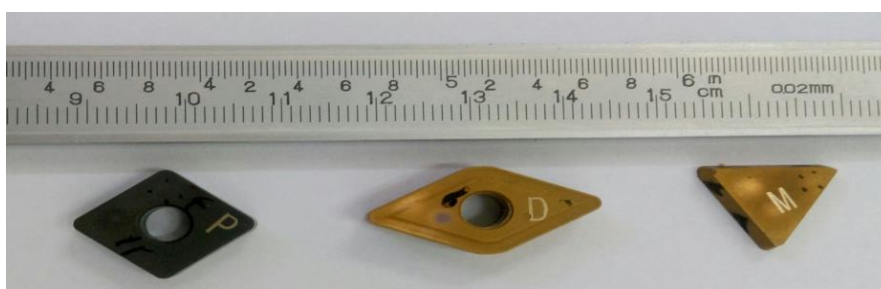
شماره نمونه	روش پوشش دهی	نوع پوشش	شاخص پوشش	رنگ پوشش	دمای پوشش دهی (°C)	زمان (h)	ضخامت پوشش (μm)
یک	CVD	TiN/TiCN/Al ₂ O ₃	P	مشکی	۱۰۰۰	۱۰	۷
دو	CVD	TiN/TiCN/TiAlN/TiN	M	طلایی تیره	۱۰۰۰	۷	۷
سه	CVD	TiN/TiCN/TiN	D	طلایی روشن	۹۰۰	۱/۵	۲

در جدول فوق متغیرهای پوشش دهی سه نوع پوشش انتخاب شده موضوع این تحقیق مقایسه شده‌اند. همچنانکه مشاهده می‌شود در پوشش دهی به روش CVD دما °C ۹۰۰ تا °C ۱۰۰۰ درجه و در پوشش PVD دما °C ۵۰۰ است. زمان پوشش دهی هر چه بیشتر باشد ضخامت لایه پوشش داده شده نیز ضخیم تر می‌شود. برای سهولت بیشتر در ترسیم نمودارها در فصل بعد، هر پوشش با یک علامت (شاخص پوشش) نامگذاری شده است که در جدول ۲-۲ نشان داده شده است.

جدول ۲-۲- نامگذاری پوشش‌ها با علامت مشخص [۹]

شاخص پوشش	نوع پوشش
P	TiN/TiCN/Al ₂ O ₃
M	TiN/TiCN/TiAlN/TiN
D	TiN/TiCN/TiN

شکل ۲-۷ نمونه‌های مورد آزمون را نشان می‌دهد.



آزمون سایش نمونه‌ها

بعد از اطمینان از صحت عملکرد دستگاه و تکرارپذیری خوب آن، به منظور بررسی خواص پوشش‌های سخت لایه نازک، نمونه‌ها توسط دستگاه ساخته شده MSE تحت آزمون قرار گرفتند.

همان‌طور که ذکر شد، در این آزمون از سه نمونه P, M, D که مشخصات آنها در جدول ۲-۲ آمده است، استفاده می‌شود.

در این آزمون از ذرات زاویه‌دار آلومینا با اندازه متوسط $1\ \mu\text{m}$ به عنوان ساینده و از آب خالص به عنوان حلال استفاده گردید. دوغاب در دمای اتاق نگهداری می‌شود. برای آزمون سایش نمونه‌ها، از دوغاب با غلظت ۳ wt% تحت فشار هوای $4\ \text{bar}$ Pair استفاده شده است. نمونه‌ها در فاصله ۲-۲ mm از انتهای نازل قرار داده شد. زاویه برخورد دوغاب با سطح آزمون ۹۰ درجه و سرعت جت دوغاب توسط Pair کنترل شد.

هر کدام از نمونه‌ها در سه نقطه مورد آزمون قرار گرفتند، که در نقطه اول هر نمونه، ۴ L دوغاب، در نقطه دوم ۸ L و در نقطه سوم ۱۲ L دوغاب تحت فشار هوای فشرده $4\ \text{bar}$ Pair به سطح نمونه وارد شد.

بررسی سطح ساییده شده نمونه‌ها

از آنجا که مقدار وزن ساییده شده از نمونه بعد از آزمون بسیار کم است و به راحتی مشخص نمی‌شود، هندسه (عمق) سطح ساییده شده توسط یک استایلوس پروفایلومتر اندازه گیری می‌شود. پس از انجام آزمون سایش تحت شرایط ذکر شده، به منظور بررسی میزان و عمق سایش، نمونه‌ها توسط پروفایلومتر شرکت راگا، شکل ۲-۸ در دانشکده فیزیک دانشگاه تهران بررسی شدند.



شکل ۲-۸- پروفايلمتر شرکت راگا

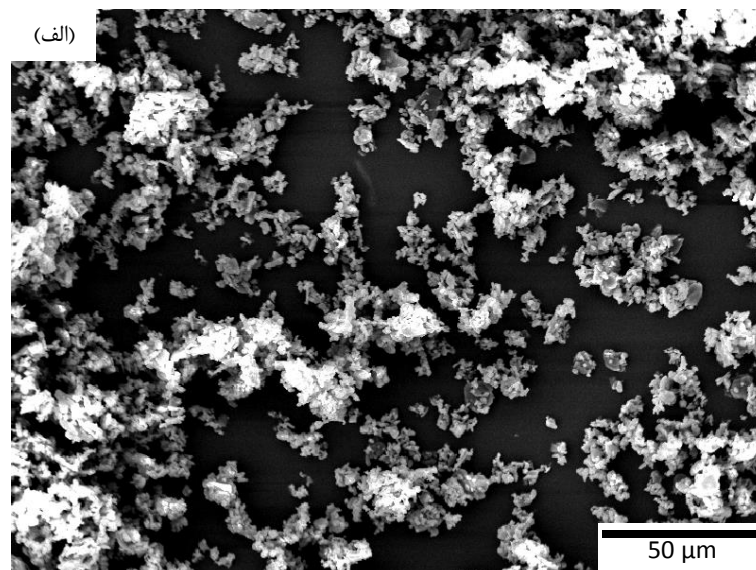
فصل سوم: نتایج و بحث

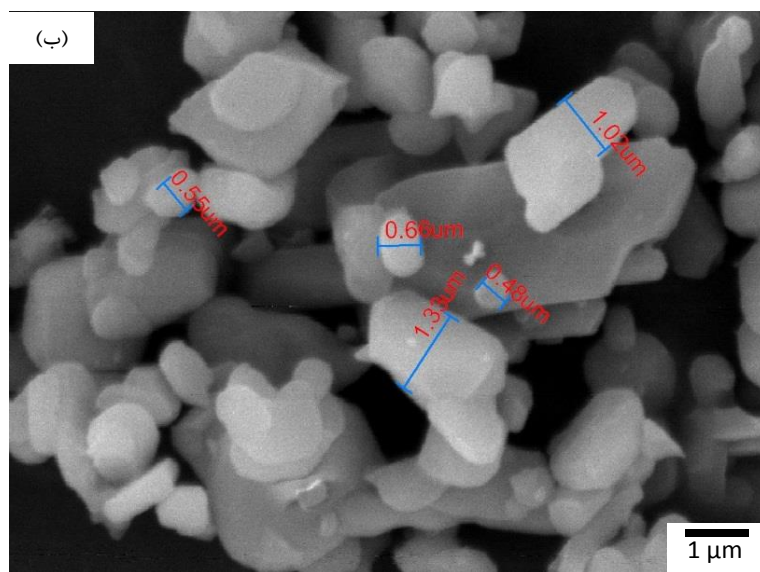
قطر نازل مورد استفاده در این آزمون $1/5 \text{ mm}$ است. قطر نازل بزرگتر باعث کاهش سرعت ذرات خروجی از نازل می‌شود. ابعادی که سایش را انجام می‌دهیم نسبت به ضخامت پوشش خیلی زیاد است و با توجه به محدودیت‌های موجود قطر انتخاب شده مناسب است. زیرا انتخاب این قطر باعث افزایش سرعت ذرات خروجی از نازل می‌شود و منجر به افزایش سرعت انجام تست و افزایش نرخ سایش می‌شود.

تغییرات قطر نازل در طی زمان اندازه گیری شد. بعد از ۲۰ ساعت خروج دوغاب از نازل قطر نازل اندازه گیری و تغییر محسوسی در قطر نازل دیده نشد.

پودر آلومینا

پودر آلومینا توسط دستگاه SEM مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل‌های ۱-۳ (الف) و ۱-۳ (ب) دیده می‌شود ذرات به صورت نوک‌تیز بوده و قابلیت سایش خوبی دارند. متوسط اندازه ذرات حدود ۱ میکرون می‌باشد.





شکل ۳-۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودر آلومینای به کار رفته در بزرگنمایی (الف) $\times 1000$ و (ب) $\times 20000$

مشخصه یابی دستگاه MSE با آب خالص

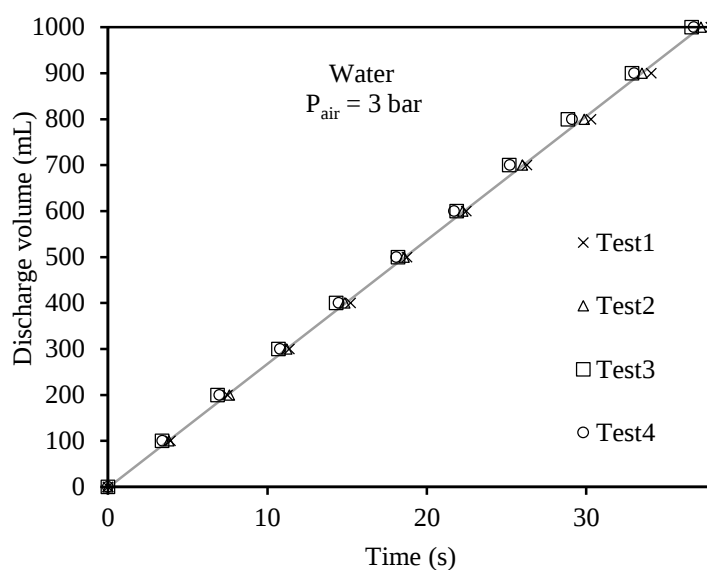
آزمون دستگاه MSE با آب خالص، در فشار هوای ۱، ۲، ۳، ۴ bar P_{air} انجام شد و در هر فشار، آزمون ۴ مرتبه تکرار شد. زمان تخلیه هر ۱۰۰ mL از آب توسط کرنومتر ثبت شد. همان طور که در جدول ۳-۱ مشاهده می شود نرخ تخلیه و سرعت جت آب محاسبه شد که در جدول ۳-۱ آمده است. میانگین سرعت خروج جت آب از نازل در فشار ۱ bar برابر ۹ m/s، در فشار ۲ bar برابر ۱۲/۹ m/s، در فشار ۳ bar برابر ۱۵ m/s و در فشار ۴ bar برابر ۱۷/۴ m/s محاسبه شد.

نحوه محاسبه سرعت جت

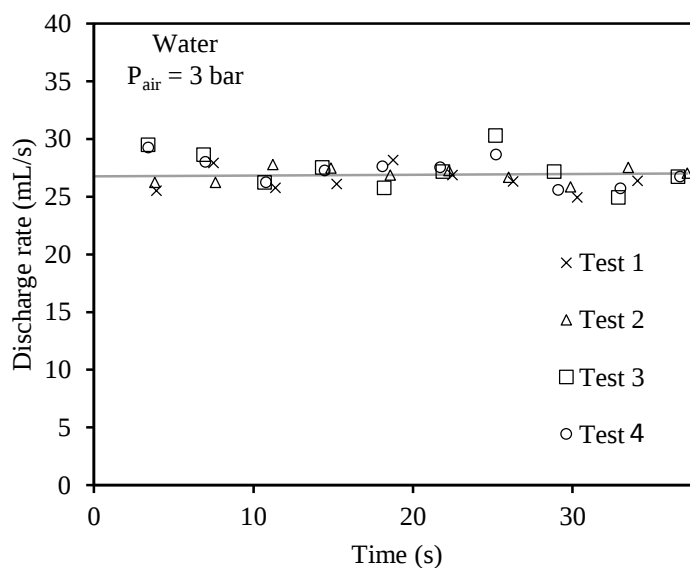
جدول ۲-۱- نتایج آزمون دستگاه با آب خالص در فشار هوای $P_{air} = 3 \text{ bar}$ (آزمون ۱)

زمان	حجم تخلیه شده	نرخ تخلیه	سرعت جت
t (s)	V (mL)	(mL/s)	v (m/s)
۰	۰		
۳,۹۲	۱۰۰	۲۵,۵	۱۴,۴
۷,۵	۲۰۰	۲۷,۹	۱۵,۸
۱۱,۳۸	۳۰۰	۲۵,۸	۱۴,۶
۱۵,۲۱	۴۰۰	۲۶,۱	۱۴,۸
۱۸,۷۶	۵۰۰	۲۸,۲	۱۵,۹
۲۲,۴۸	۶۰۰	۲۶,۹	۱۵,۲
۲۶,۲۸	۷۰۰	۲۶,۳	۱۴,۹
۳۰,۲۹	۸۰۰	۲۵,۰	۱۴,۱
۳۴,۰۸	۹۰۰	۲۶,۴	۱۴,۹
۳۷,۸۱	۱۰۰۰	۲۶,۸	۱۵,۲
سرعت متوسط جت ۱۵,۰			

همان‌طور که گفته شد آزمون در هر فشار، ۴ مرتبه تکرار و نتایج ثبت گردیده است. شکل ۲-۳ نشان‌دهنده نمودار حجم تخلیه آب و شکل ۳-۳ نشان‌دهنده نرخ تخلیه آب در فشار ۳ bar است که نشان می‌دهد حجم تخلیه آب و نرخ تخلیه آب بعد از ۴ مرتبه تکرار به صورت خطی بوده و دستگاه تکرار پذیری بالایی دارد.

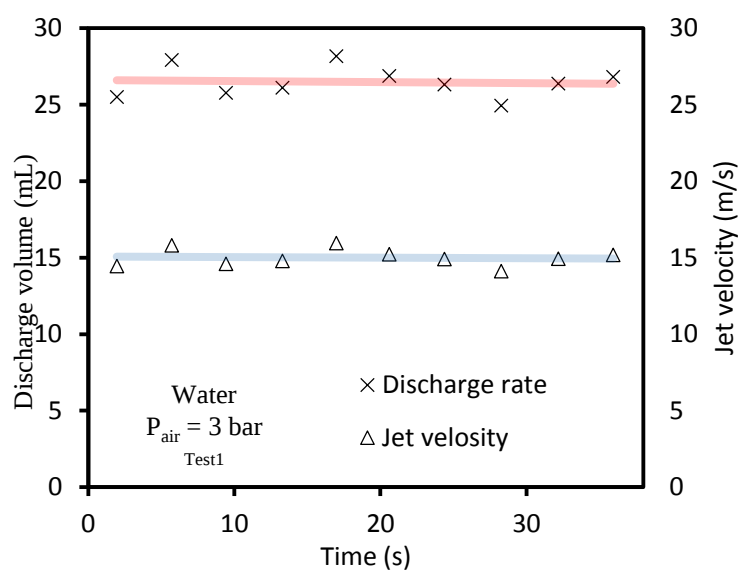


شکل ۲-۳- حجم تخلیه آب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای $P_{air} = 3 \text{ bar}$



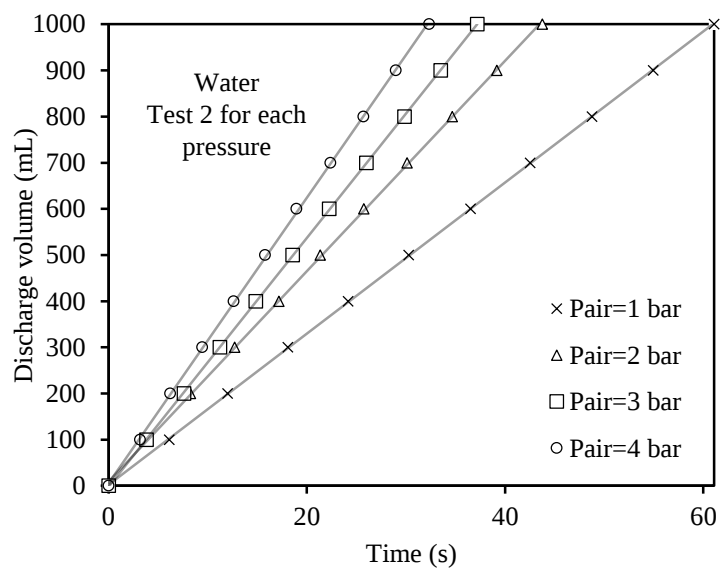
شکل ۳-۳- نرخ تخلیه آب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای $P_{air} = 3 \text{ bar}$

در شکل ۳-۴ دیده می‌شود نرخ تخلیه آب از نازل و همچنین سرعت جت خروجی آب از نازل به صورت خطی است.



شکل ۳-۴- تغییرات نرخ تخلیه آب از نازل و سرعت جت آب بر حسب زمان در فشار هوای $P_{air} = 3 \text{ bar}$

با مقایسه نمودارها در شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود که حجم تخلیه آب به صورت خطی بوده و با افزایش فشار، افزایش می‌یابد و زمان تخلیه آب با افزایش فشار، کاهش می‌یابد.



شکل ۳-۵- مقایسه حجم تخلیه آب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای Pair = ۱، ۲، ۳، ۴، bar

آزمون دستگاه MSE با دوغاب

آزمون دستگاه MSE با دوغاب، در فشار هوای Pair = ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ bar و با غلظت‌های ۰.۱٪ و ۰.۲٪ و ۰.۳٪ درصد وزنی انجام شده و در هر فشار و غلظت مشخص، آزمون ۴ مرتبه تکرار شده است. زمان تخلیه هر ۱۰۰ mL از دوغاب توسط کرنومتر ثبت و همان‌طور که در جدول ۳-۲ مشاهده می‌شود نرخ تخلیه و سرعت خروج دوغاب از نازل محاسبه شد.

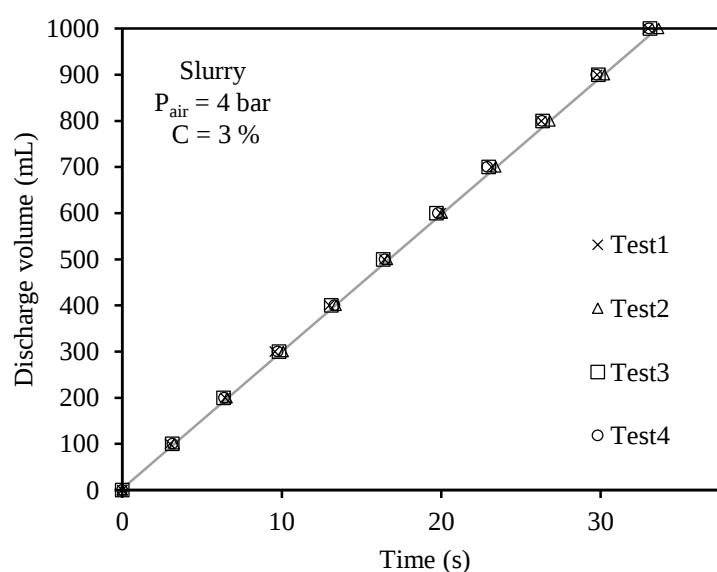
جدول Error! No text of specified style in document. ۲-۳ نتایج آزمون دستگاه با مخلوط دوغاب در فشار هوای

$P_{air} = 4 \text{ bar}$ و غلظت ۳٪ $C = 3\%$ (آزمون ۴)

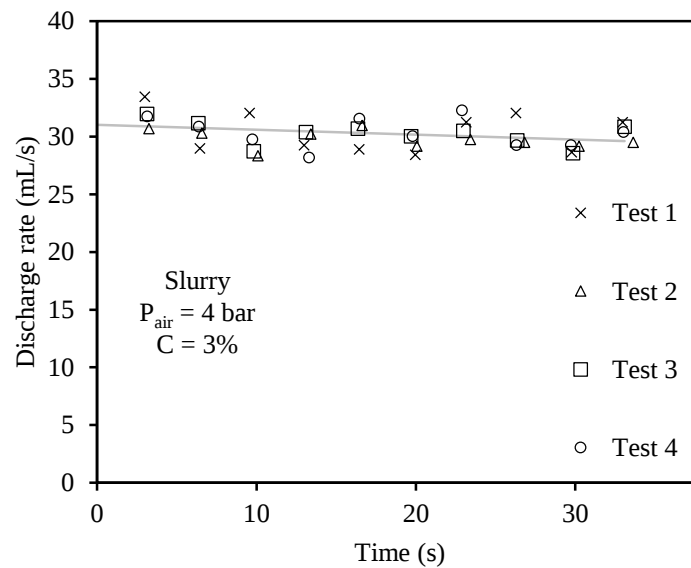
سرعت جت	نرخ تخلیه	حجم تخلیه شده	زمان
$v \text{ (m/s)}$	(mL/s)	$V \text{ (mL)}$	$t \text{ (s)}$
۱۸,۰	۳۱,۷	۱۰۰	۳,۱۵
۱۷,۵	۳۰,۹	۲۰۰	۶,۳۹
۱۶,۹	۲۹,۸	۳۰۰	۹,۷۵
۱۶,۰	۲۸,۲	۴۰۰	۱۳,۳
۱۷,۹	۳۱,۵	۵۰۰	۱۶,۴۷
۱۷,۰	۳۰,۰	۶۰۰	۱۹,۸
۱۸,۳	۳۲,۳	۷۰۰	۲۲,۹
۱۶,۶	۲۹,۲	۸۰۰	۲۶,۳۲
۱۶,۵۶	۲۹,۲	۹۰۰	۲۹,۷۴
۱۷,۲	۳۰,۴	۱۰۰۰	۳۳,۰۳

سرعت متوسط جت ۱۷,۲

همان طور که گفته شد آزمون در هر فشار و غلظت مشخص، ۴ مرتبه تکرار و نتایج ثبت گردیده است. شکل ۳-۶ نشان دهنده نمودار حجم تخلیه دوغاب و شکل ۳-۷ نشان دهنده نرخ تخلیه دوغاب در فشار $P_{air} = 4 \text{ bar}$ و غلظت ۳٪ است که نشان می دهد حجم تخلیه دوغاب و نرخ تخلیه دوغاب بعد از ۴ مرتبه تکرار به صورت خطی بوده و دستگاه تکرارپذیری بالایی دارد.

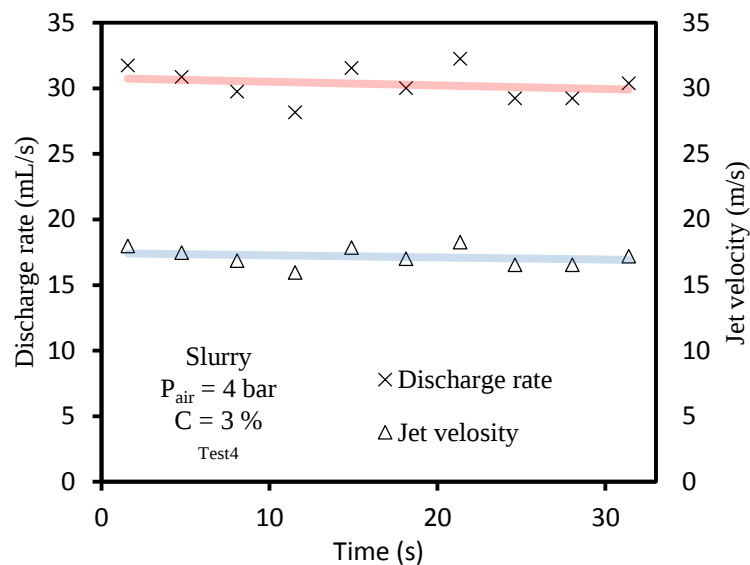


شکل ۳-۶- حجم تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای $P_{air} = 4 \text{ bar}$ و غلظت $C = 3\%$



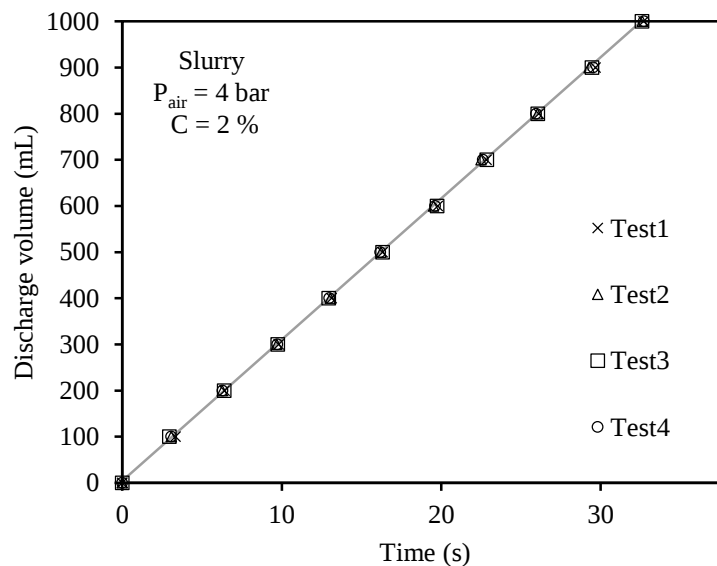
شکل ۳-۷- نرخ تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای $P_{air} = 4 \text{ bar}$ و غلظت $C = 3\%$

در شکل‌های ۳-۸ و ۳-۱۰ و ۳-۱۲ دیده می‌شود نرخ تخلیه دوغاب از نازل و همچنین سرعت جت خروجی دوغاب از نازل در فشار 4 bar و غلظت‌های متفاوت و تکرار دوم هر آزمون به صورت خطی تغییر می‌کند.

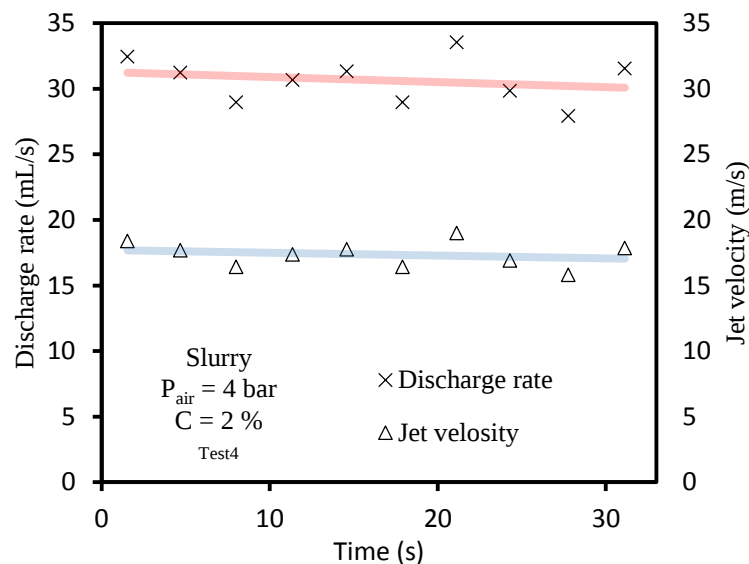


شکل ۳-۸- تغییرات نرخ تخلیه از نازل و سرعت جت دوغاب بر حسب زمان در فشار هوای $P_{air} = 4 \text{ bar}$

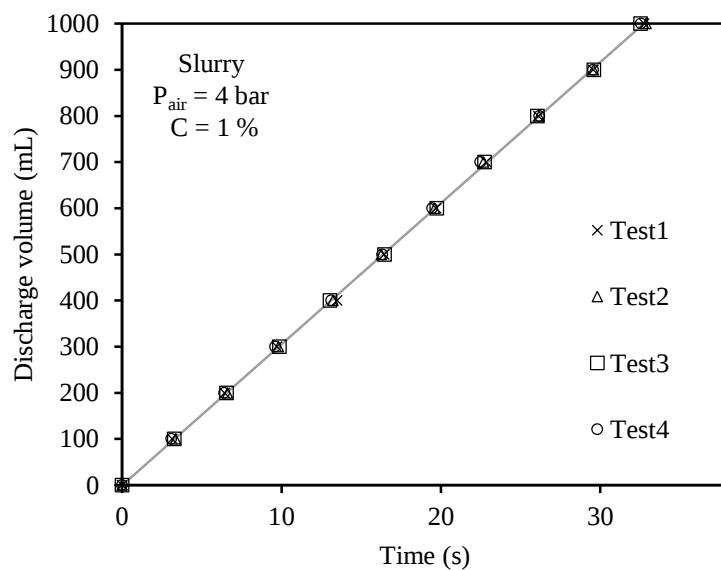
شکل‌های ۹-۳ و ۱۱-۳ نشان دهنده حجم تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در فشار ۴ bar = Pair و غلظت‌های متفاوت می‌باشد که رفتار خطی حجم تخلیه و تکرار پذیری دستگاه را نشان می‌دهد.



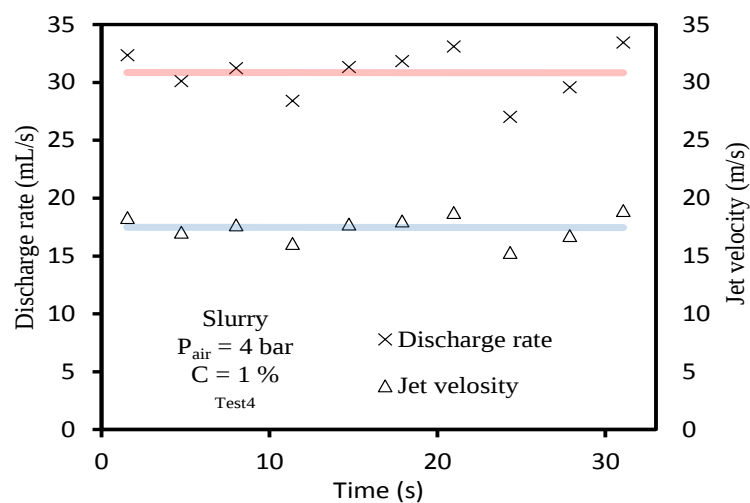
شکل ۹-۳- حجم تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای Pair = ۴ bar و غلظت C = ۲ %



شکل ۱۰-۳- تغییرات نرخ تخلیه از نازل و سرعت جت دوغاب بر حسب زمان در فشار هوای Pair = ۴ bar

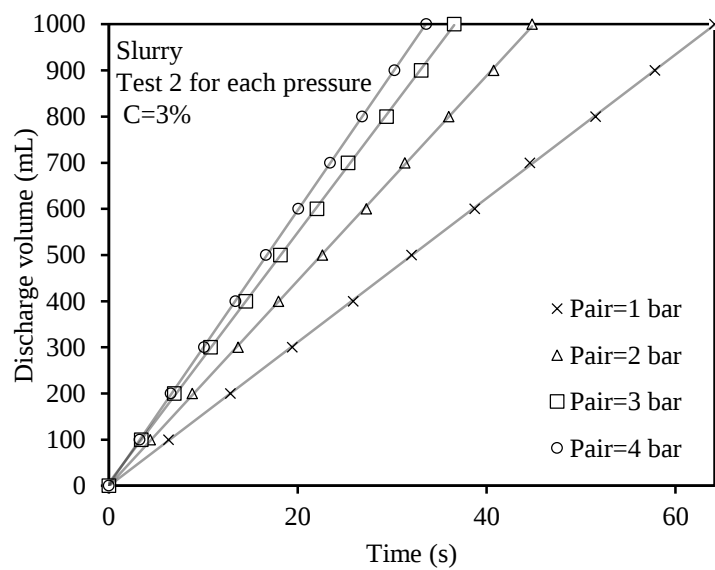


شکل ۳-۱۱- حجم تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای $P_{air} = 4 \text{ bar}$ و غلظت $C = 1 \%$

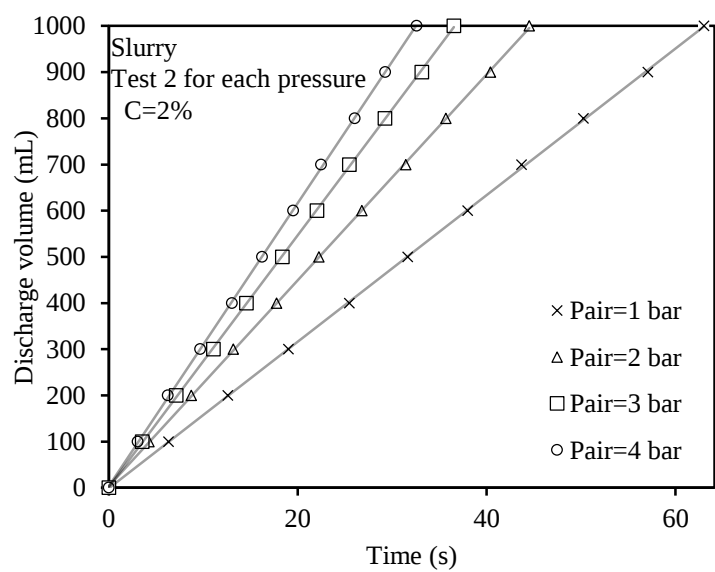


شکل ۱۵- تغییرات نرخ تخلیه از نازل و سرعت جت دوغاب بر حسب زمان در فشار هوای $P_{air} = 4 \text{ bar}$

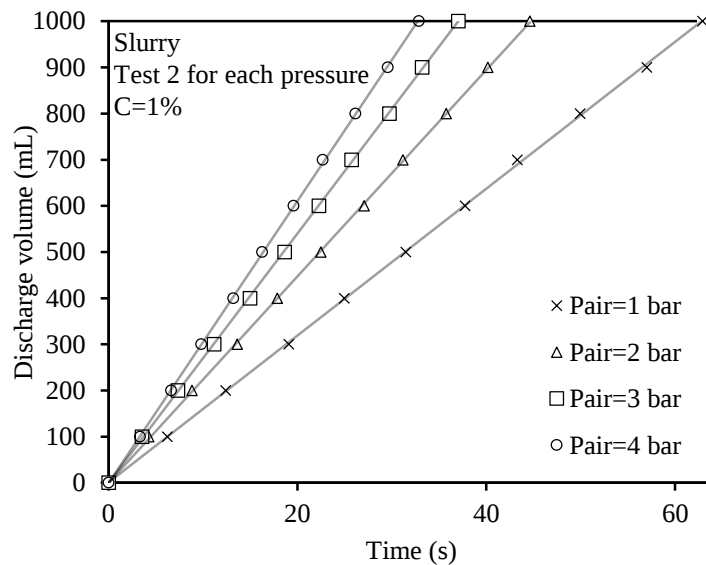
شکل‌های ۳-۱۳ و ۳-۱۴ و ۳-۱۵ نمودارهای مقایسه‌ای حجم تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در فشارهای مختلف و غلظت مشخص هستند که نشان می‌دهند حجم تخلیه دوغاب بر حسب زمان به صورت خطی بوده و با افزایش فشار، افزایش می‌یابد و زمان تخلیه دوغاب با افزایش فشار، کاهش می‌یابد.



شکل ۳-۱۳- مقایسه حجم تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای ۱، ۲، ۳، ۴، bar

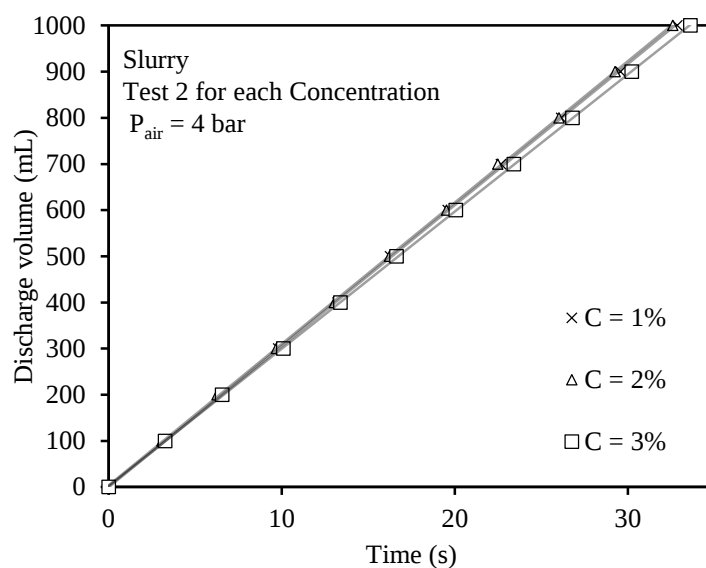


شکل ۳-۱۴- مقایسه حجم تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای ۱، ۲، ۳، ۴، bar



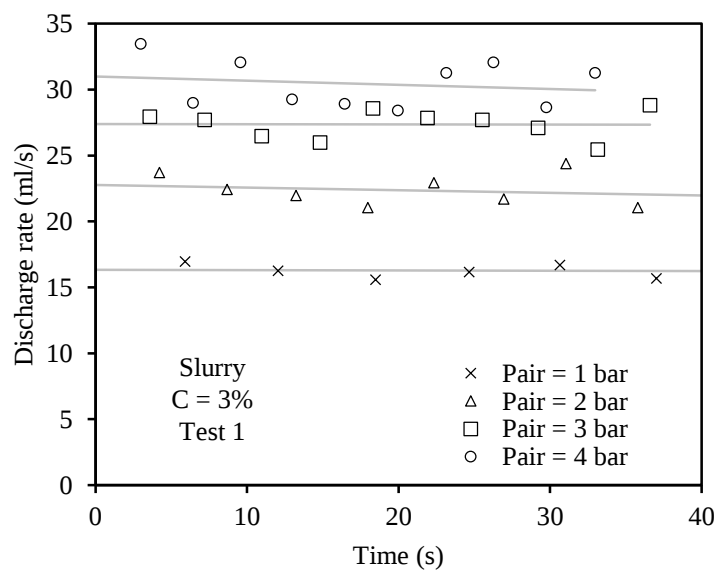
شکل ۳-۱۵- مقایسه حجم تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای $P_{air} = 1, 2, 3, 4$ bar

شکل ۳-۱۶ مقایسه‌ی حجم تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در غلظت‌های متفاوت نشان می‌دهد تغییرات غلظت C در محدوده آزمون بر زمان و سرعت تخلیه تأثیر چندانی ندارد.



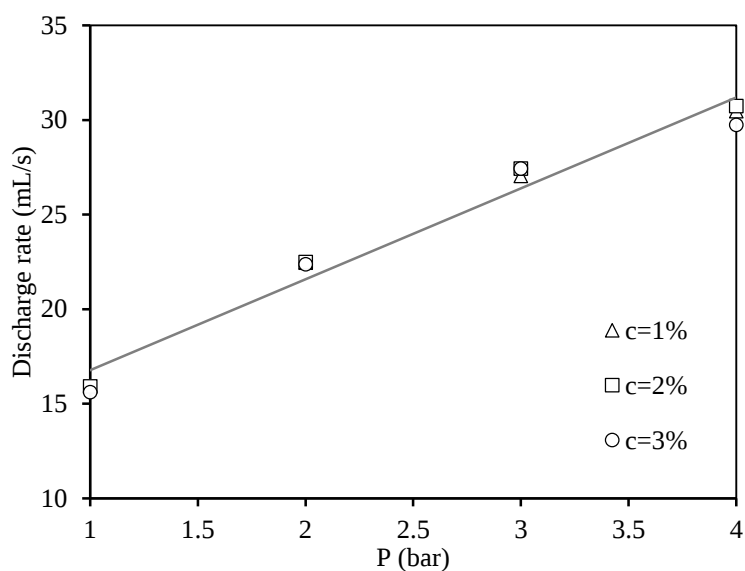
شکل ۳-۱۶- مقایسه حجم تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در غلظت‌های $C = 1, 2, 3, \%$

در شکل ۳-۱۷ نمودار تغییرات نرخ تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای $P_{air} = 1, 2, 3$ bar دیده می‌شود. با مقایسه نمودارها می‌توان دریافت که نرخ تخلیه با افزایش فشار، افزایش می‌یابد و برای هر فشار مشخص، رفتاری خطی دارد. همچنین با افزایش فشار، زمان تخلیه کاهش یافته است.



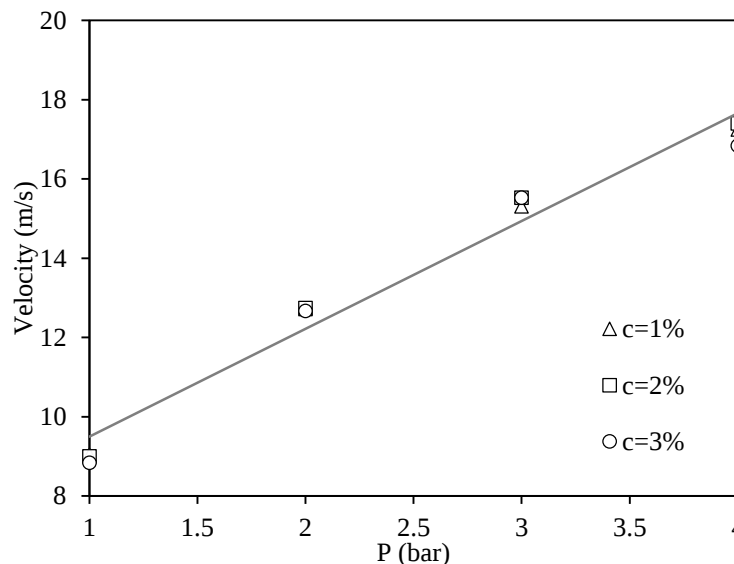
شکل ۳-۱۷- تغییرات نرخ تخلیه دوغاب از نازل بر حسب زمان در فشار هوای Pair = ۱، ۲، ۳، ۴، bar

شکل ۳-۱۸ تغییرات نرخ تخلیه دوغاب از نازل بر حسب فشار در غلظت‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش فشار، نرخ تخلیه دوغاب از نازل افزایش می‌یابد، اما غلظت‌های متفاوت دوغاب تأثیر چندانی بر روی نرخ تخلیه ندارد.



شکل ۳-۱۸- تغییرات نرخ تخلیه دوغاب از نازل بر حسب فشار در غلظت‌های مختلف

شکل ۳-۱۹ تغییرات سرعت خروج دوغاب از نازل بر حسب فشار در غلظت‌های مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش فشار، سرعت خروج دوغاب از نازل افزایش می‌یابد اما غلظت دوغاب تأثیر چندانی بر سرعت خروج دوغاب ندارد.



شکل ۳-۱۸- تغییرات سرعت خروج دوغاب از نازل بر حسب فشار در غلظت‌های مختلف

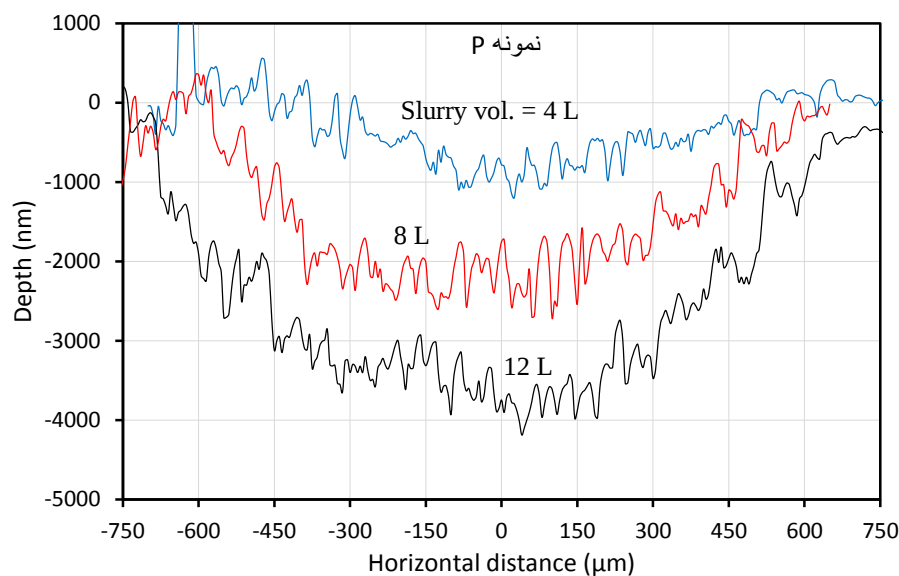
همان‌طور که در شکل‌های بالا دیده شد، نرخ خروج دوغاب از نازل با افزایش فشار هوا (Pair) افزایش می‌یابد. بعد از چهار مرتبه تکرار آزمون تحت فشارهای ۴، ۳، ۲، ۱ bar، خطاهای نسبی متناظر برابر بود با ۰/۱۵ و ۰/۶۹ و ۰/۳۱ و ۰/۷۳ درصد، دیده می‌شود این مقادیر بسیار کوچک بوده و دستگاه تکرار پذیری خوبی دارد. همچنین یکنواختی جریان دوغاب توسط زمانبندی سطح دوغاب با نشانه گذاری روی دیواره مخزن بررسی می‌شود که نتیجه آن رفتار خطی خروج دوغاب است.

آزمون سایش نمونه‌ها با دستگاه MSE

آزمون سایش نمونه‌ها با محلول دوغاب تحت فشار Pair = ۴ bar و غلظت ۳٪ درصد وزنی، در سه نقطه از هر نمونه انجام شد. که در هر آزمون مقداری از دوغاب با سطح نمونه‌ها برخورد می‌کند. در نقطه اول هر نمونه، ۴ L دوغاب، در نقطه دوم ۸ L و در نقطه سوم ۱۲ L دوغاب با سطح نمونه‌ها برخورد می‌کند.

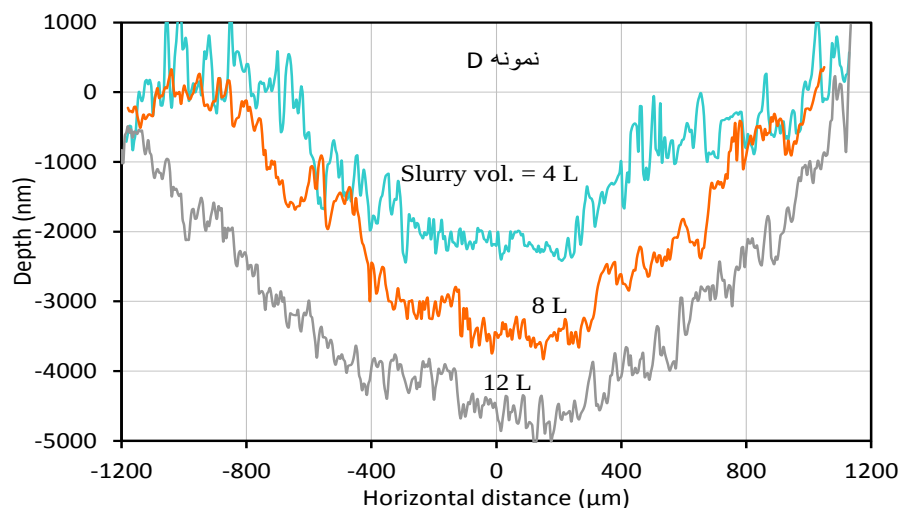
عمق سایش با میزان برخورد دوغاب متناظر است. فاصله بین سطح اصلی و سطح آسیب دیده در عمیق‌ترین قسمت به عنوان عمق سایش تعیین می‌گردد.

شکل ۳-۱۸ نشان‌دهنده پروفایل اندازه‌گیری شده سایش سطح نمونه P می‌باشد. پوشش P از سه لایه $\text{TiN/TiCN/Al}_2\text{O}_3$ تشکیل شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، با برخورد ۴ L دوغاب به سطح نمونه، عمق سایش ۱۰۰۰ nm شده است. با برخورد ۸ L دوغاب به سطح نمونه، عمق سایش به ۲۵۰۰ nm و با برخورد ۱۲ L دوغاب به سطح نمونه، عمق سایش به ۴۰۰۰ nm رسیده است. این نتایج نشان می‌دهد که پوشش مقاومت به سایش بهتری نسبت به دارد.



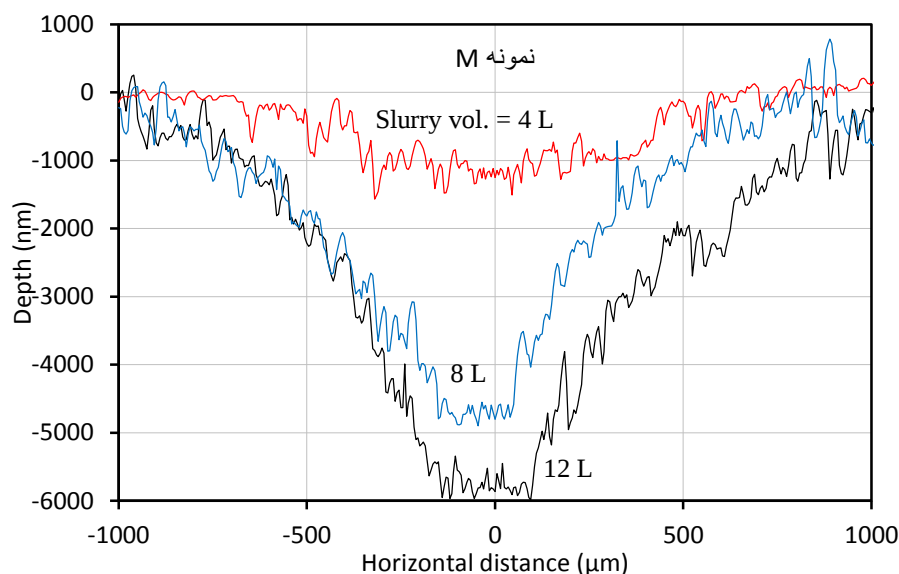
شکل ۳-۱۹ - پروفایل سایش سطح نمونه P

شکل ۳-۱۹ نشان‌دهنده پروفایل اندازه‌گیری شده سایش سطح نمونه D می‌باشد. پوشش از چهار لایه تشکیل شده است. در این نمونه با برخورد دوغاب به سطح نمونه، عمق سایش به حدود رسیده است. با برخورد دوغاب، عمق سایش به رسیده و با برخورد دوغاب، عمق سایش به رسیده است.



شکل ۳-۲۰- پروفایل سایش سطح نمونه D

شکل ۳-۲۰ نشان‌دهنده پروفایل اندازه گیری شده سایش سطح نمونه M می‌باشد. پوشش از سه لایه تشکیل شده است. در این نمونه با برخورد دوغاب به سطح نمونه، عمق سایش به رسیده است. با برخورد دوغاب، عمق سایش به و با برخورد دوغاب، عمق سایش به رسیده است. مشاهده می‌شود پس از عبور دوغاب از پوشش‌ها و رسیدن به زیر لایه، عمق سایش به میزان زیادی افزایش یافته است و نشان‌دهنده مقاومت به سایش خوب پوشش‌ها در مقابل برخورد دوغاب است.



شکل ۳-۲۱- پروفایل سایش سطح نمونه M

همان‌طور که در اشکال دیده می‌شود، شکاف سایشی به‌طور یکنواختی عمیق شده است. بعد از انجام آزمون، نرخ‌سایش بر حسب زمان اندازه‌گیری شد. نرخ سایش به‌طور قابل ملاحظه‌ای بعد از عبور ساینده از پوشش‌های سخت و رسیدن به زیرلایه افزایش می‌یابد. برای مقایسه نرخ سایش پوشش‌ها از استاندارد ASTM G۷۶-۲ استفاده می‌شود. همان‌طور که در اشکال دیده می‌شود عمق سایش در مقابل برخورد دوغاب یک رفتار خطی صحیح برای تمام شرایط آزمون دارد و این تصدیق است بر اینکه یک رابطه خطی بین مقدار دوغاب و عمق سایش وجود دارد و دستگاه ساخته شده قابلیت تکثیر و اطمینان خوبی دارد و دیده می‌شود که دستگاه MSE قادر است مقاومت سایشی پوشش‌های مختلف را با دقت زیادی مقایسه کند.

فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتیجه گیری

در این پایان نامه، طراحی، ساخت و کاربرد دستگاه سایش پوشش‌های لایه نازک سخت انجام شد. در این راستا، بعد از ساخت دستگاه دو دسته آزمون با آب خالص و دوغاب جهت اطمینان از تکرارپذیری رفتار دستگاه انجام و نمودارهای آن ترسیم شد. دوغاب شامل تکه‌های آلومینا با اندازه متوسط $1\text{ }\mu\text{m}$ بود. سپس آزمون سایش نمونه‌ها با دوغاب آلومینا انجام شد. سه عدد نمونه در شرایط مساوی چندین مرتبه مورد آزمون قرار گرفتند و توسط دستگاه پروفایلومتر، پروفایل سایش نمونه‌ها اندازه گیری و ترسیم شد. این پایان نامه نشان می‌دهد که تکنیک‌های ساییدگی جت دوغاب می‌تواند کیفیت پوشش‌های TiN را از نظر مقاومت سایشی، مقاومت به شکست و شکل‌پذیری ارزیابی کند. دیده شد که آزمون جت دوغاب سریع و نتایج تجدیدپذیری دارد و نسبت به تغییرات بسیار حساس است. مشاهده شد که MSE می‌تواند کوچکترین اختلافات در خصوصیات پوشش و فصل مشترک را بررسی کند و حساسیت زیاد MSE، آن را برای ارزیابی پوشش‌های چندلایه، زیرلایه و فصل مشترک بین آنها مناسب می‌سازد. همچنین تکرار پذیری خوبی از آزمون MSE دیده شد. نتایج نشان داد که سایش با افزایش غلظت، افزایش می‌یابد، اما نرخ سایش با افزایش غلظت کاهش می‌یابد.

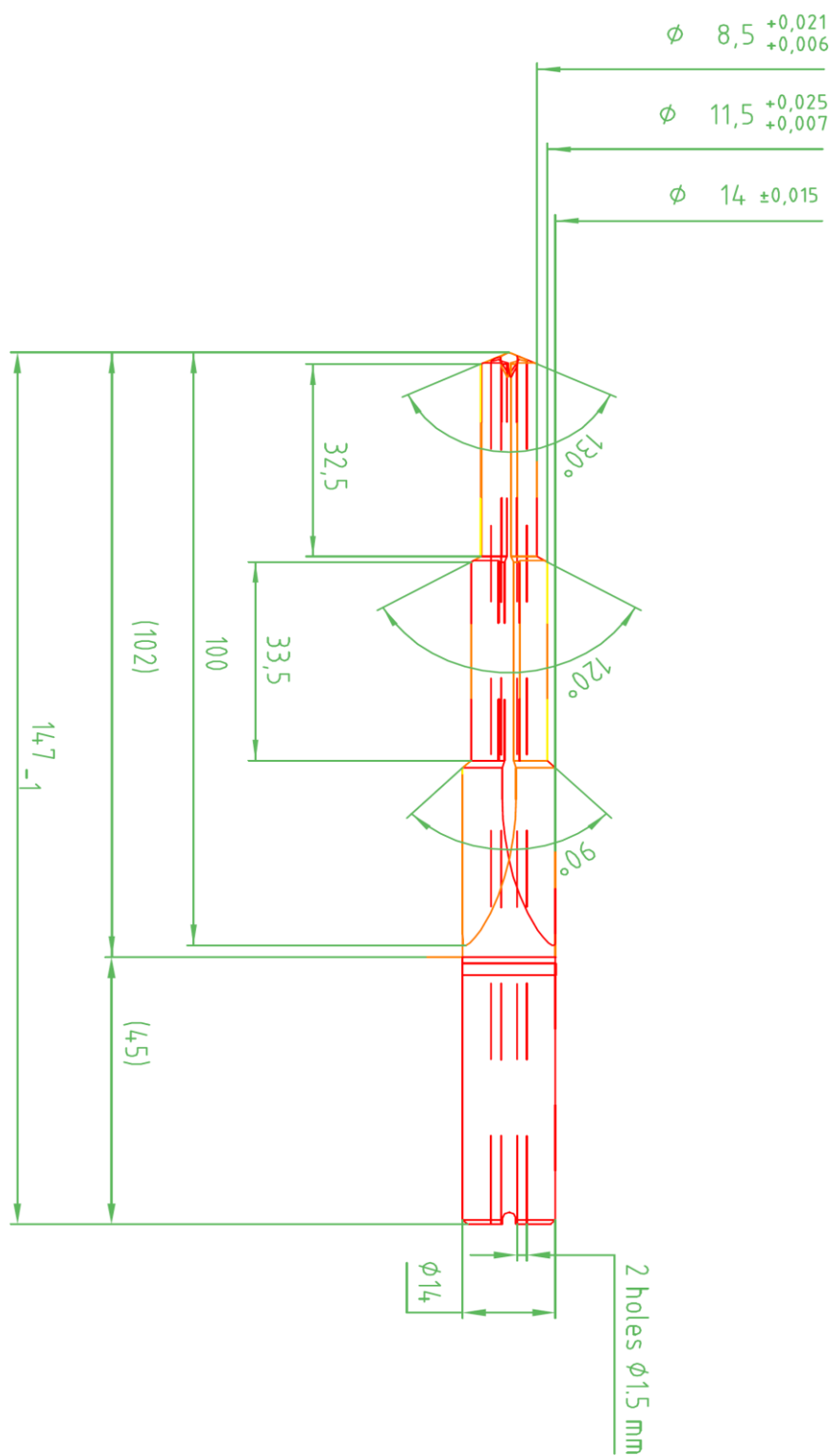
سرعت ذرات پارامتر مهمی است که روی پروفایل سایش تأثیر می‌گذارد. نرخ سایش متناسب است با سرعت ذرات و نرخ سایش برابر است با نسبتی از جرم از دست رفته از نمونه به جرمی از ساینده که استفاده شده است.

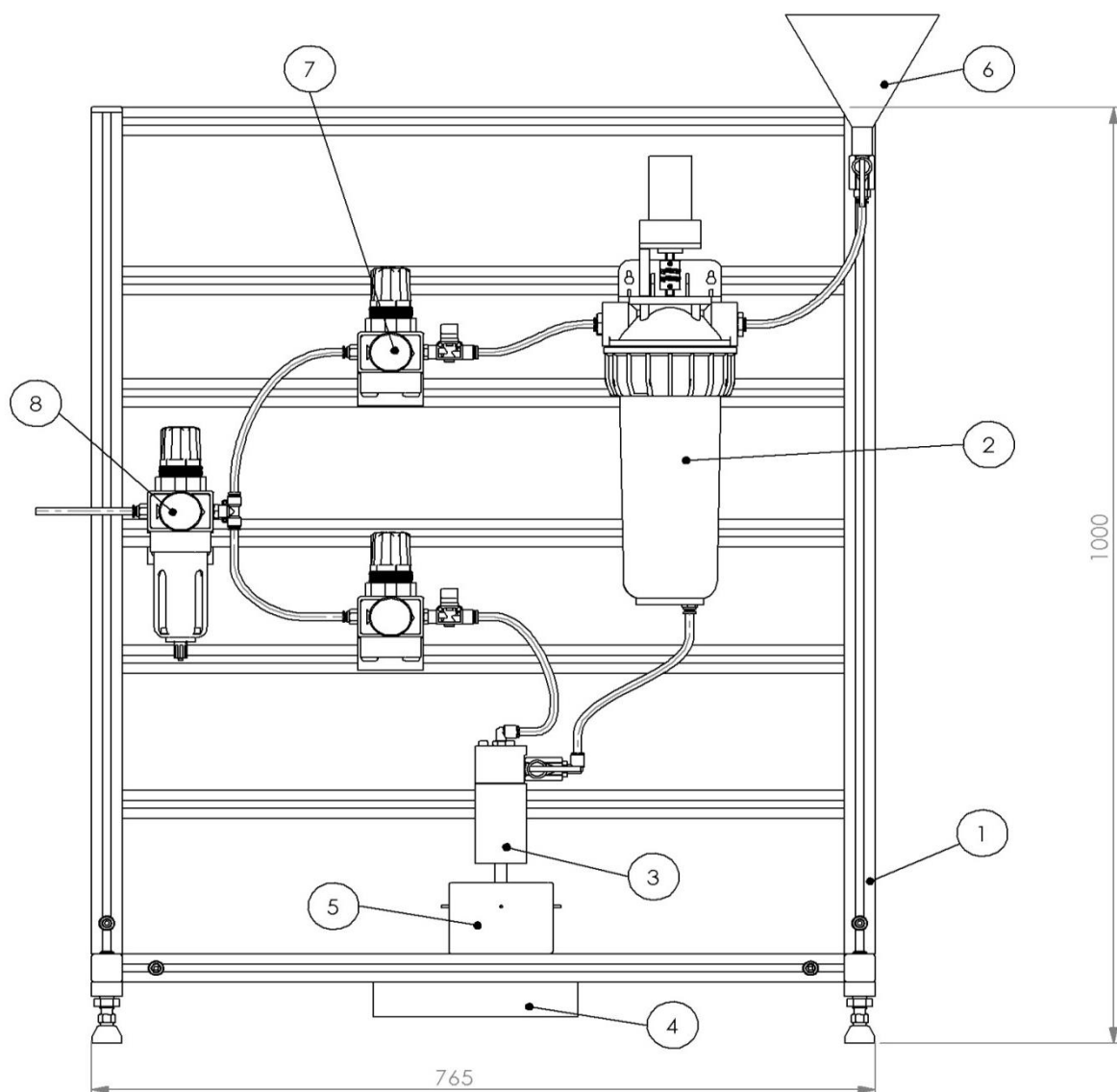
مشاهده شد که این آزمون نرخ سایش پوشش‌های لایه‌نازک سخت را مستقل از زیرلایه بررسی می‌کند، لذا مقایسه بین مقاومت سایشی پوشش‌های مختلف را به خوبی انجام می‌دهد.

پیشنهاده‌ها

به منظور ادامه‌ی پژوهش در این زمینه، پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود.

- ۱- در حین آزمون سایش نمونه‌ها، یک پروفایل‌متر هم وجود داشته باشد.
- ۲- نصب همزن داخل سینی دریافت‌کننده برای جلوگیری از ته‌نشین شدن دوغاب
- ۳- نصب پمپ برای ارسال دوغاب از سینی دریافت‌کننده به مخزن
- ۴- می‌توانیم تست‌ها را روی زیر لایه‌هایی از جنس HSS که با TiN پوشش داده شده‌اند انجام دهیم.





ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	Frame	1
2	Tank Unit	1
3	Nozzel Unit	1
4	Reciever Pan	1
5	Sample Holder	1
6	Funnel	1
7	Regulator	2
8	Air Conditioniing Unit	1

Unit: mm

منبع ها

- [۱] Matthews, A. Coatings tribology: properties, mechanisms, techniques and applications in surface engineering. Elsevier Science, (۲۰۰۹).
- [۲] Stachowiak, G. W., Wear: materials, mechanisms and practice. John Wiley & Sons, (۲۰۰۶).
- [۳] Nassar, A. E., and Eman E. N. "Design and Fabrication of a Wear Testing Machine." Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies ۱۹ (۲۰۱۱): ۳۹-۴۸.
- [۴] Iwai, Y., et al. "Evaluation of erosive wear resistance of TiN coatings by a slurry jet impact test." Wear ۲۶۱, ۱ (۲۰۰۶): ۱۱۲-۱۱۸.
- [۵] Iwai, Y., et al. "Development of a new type micro slurry-jet erosion (MSE) tester for evaluation of wear properties of hard thin coatings." Lubrication Science ۲۱, ۶ (۲۰۰۹): ۲۱۳-۲۲۶
- [۶] Iwai, Y., et al. "Micro-slurry-jet erosion (MSE) testing of CVD TiC/TiN and TiC coatings." Wear ۲۶۷, ۱ (۲۰۰۹): ۲۶۴-۲۶۹
- [۷] Iwai, Y., et al. "Evaluation of wear resistance of thin hard coatings by a new solid particle impact test." Wear ۲۵۱, ۱ (۲۰۰۱): ۸۶۱-۸۶۷.
- [۸] Holmberg, K., and A. Matthews. "Tribology series ۲۸." (۱۹۹۴).
- [۹] Hogmark, S., et al. "Mechanical and tribological requirements and evaluation of coating composites." (۲۰۰۱): ۹۳۱-۹۶۰.
- [۱۰] The Japan Society of Mechanical Engineers (ed.). Standard Method for Evaluating the Defects in the Coatings Made by Dry Processing, The Japan Society of Mechanical Engineers, Tokyo, Japan (۱۹۹۶): ۱-۵.

[۱۱] Jeevan, T.P., Modification of Abrasive Wear Testing Machine and Testing of Materials, INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENCE AND RESEARCH (IJSR) · NOVEMBER (۲۰۱۴)

[۱۲] Sharma, S., and Sharma, A., Investigation of Wear Characteristics of Aluminum Disc With Pin on Disc Tribometer. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume ۶, Issue ۱, January-(۲۰۱۵) ISSN ۲۲۲۹-۵۵۱۸

[۱۳] Sharma, Ajay, Narendra Singh, and P. K. Rohatgi. "Study of wear pattern behavior of aluminum and mild steel discs using pin on disc tribometer." European Journal of Applied Engineering and Scientific Research ۲,۴ (۲۰۱۳): ۳۷-۴۳

[۱۴] Kennedy, D. M., and M. S. J. Hashmi. "Methods of wear testing for advanced surface coatings and bulk materials." Journal of Materials Processing Technology ۷۷,۱ (۱۹۹۸): ۲۴۶-۲۵۳.

[۱۵]

www.farayandno.ir/article_۱۲۳۸۶_f۳۷aabb۷f۸۹۰ff۳۶d۵۸۰ab۹f۵۸d۵۳۸۹b.pdf

[۱۶] Bromark, M., et al. "PVD coatings for tool applications: tribological evaluation." Surface engineering ۱۰,۳ (۱۹۹۴): ۲۰۵-۲۱۴.

[۱۷] Bromark, M., et al. "Determination of coating erosion resistance using the mass-loss technique." Proceedings of the ۶th Nordic Symposium on Tribology, Nordtrib. Vol. ۹۴. (۱۹۹۴).

[۱۸] Wood, R. J. K., et al. "The performance of marine coatings and pipe materials under fluid-borne sand erosion." Wear ۲۱۹,۱ (۱۹۹۸): ۴۶-۵۹.

[۱۹] Iwai, Yoshiro, and Kazuyuki Nambu. "Slurry wear properties of pump lining materials." Wear ۲۱۰,۱-۲ (۱۹۹۷): ۲۱۱-۲۱۹.

- [۲۰] سید جلال حقی، "مرجع کامل راهنمای ابزارهای برشی مدرن"، نشر طراح، تهران، (۱۳۸۳)
- [۲۱] محمد رضا رازفر، "اصول ماشینکاری و ابزار شناسی"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، (۱۳۸۰)
- [۲۲] <http://www.brycoat.com/surface-engineering/brycoat-pvd-coating-solutions/brycoat-aluminum-titanium-nitride-altn-or-tialn-coatings/>
- [۲۳] www.guhring.com/ProductsServices/CoatingServices/TiCN
- [۲۴] جلالی، ف. طراحی، ساخت و بهینه سازی پوشش مته مارپیچ تنگستن کارباید جهت سوراخکاری کالبر ترمز سمند، پایان نامه، دانشگاه صنعتی شاهرود، (۱۳۹۴)
- [۲۵] Turenne, S, Michel F, and Jacques Masounave. "The effect of sand concentration on the erosion of materials by a slurry jet." *Wear* ۱۳۳,۱ (۱۹۸۹): ۹۵-۱۰۶.
- [۲۶] Hutchings, I. M. "Abrasive and erosive wear tests for thin coatings: a unified approach." *Tribology International* ۳۱,۱ (۱۹۹۸): ۵-۱۵.
- [۲۷] "Metal cutting technology training handbook", SANDVIK COROMANT academy, Sandviken Sweden, (۲۰۱۰)

Abstract

The wear phenomenon is one of the most important factors in the failure of industrial parts. Hard coatings on industrial tools and equipment improve performance and increase their lifespan. Versatile and reliable techniques for evaluation of hard thin coatings are necessary. To perform such tests, a device that is fast, accurate and cost-effective and has good performance is required. In order to achieve this goal, in this thesis, a micro slurry-jet erosion test (MSE) device, was designed and fabricated. This device makes use of ultra-hard alumina particles. In the MSE test device, the slurry inside the tank is forced by high pressure air to pass through a narrow nozzle at high jet velocity and hits the sample surface. The slurry eventually enters a receiver tray for re-consumption. In this research, after the construction of the MSE device, tests were carried on the performance and repeatability of the device with water at different air pressures. Thereafter, the testes were performed with slurry using different air pressures and slurry concentrations to ensure its performance. Very good repeatability of the device was observed. The slurry contains alumina particles with a mean diameter of about $1\text{ }\mu\text{m}$. The particle size was measured using scanning electron microscopy. Then, three tungsten carbide substrates, coated with thin multilayers of TiN, TiCN, Al_2O_3 and TiAlN were prepared using chemical vapor deposition technique. The thickness of the coated layers were in range of $2\text{-}7\text{ }\mu\text{m}$. The coated samples were subject to micro-slurry jet erosion test under specific pressure and concentration. The wear rate of the specimens was measured using stylus profilometer. From the results it could be observed that the MSE test device can be used for comparing of the he abrasion resistance of the thin hard coatings.

Keywords: Thin film, wear, micro slurry wear, hard coating, Profile meter.

Time-consuming



Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.S.c Thesis in Manufacturing and Production Engineering

***Design, fabrication and implementation of micro-slurry jet erosion test device
for evaluation of the erosion properties of hard thin coatings***

By: Hassan hosseinabady

***Supervisors
Dr. seyed Hadi Ghaderi
Dr. Mojtaba Ghatee***

september ۲۰۱۷