



دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران جنوب

دانشکده تحصیلات تکمیلی

سمینار برای دریافت درجه کارشناسی ارشد "M.Sc"

مهندسی مواد - شناسایی و انتخاب مواد

عنوان :

بررسی رفتار تریبولوژیکی پوشش های دمای بالا بر روی فولاد

استاد راهنما :

نگارش :

شماره صفحه	عنوان مطلب
۱	چکیده
۲	فصل اول : مقدمه
۲	فصل دوم : مطالعات تئوری
۲	۱-۲- تأثیرات کیفیت سطح بر تریبولوژی
۳	۱-۱-۲- توپوگرافی سطحی
۳	۲-۱-۲- تاثیر سختی سطح بر اصطکاک لغزشی
۴	۴-۱-۲- تاثیر جفت های مواد مختلف بر اصطکاک لغزشی
۴	۵-۱-۲- تاثیر دما برروی اصطکاک لغزشی
۵	۲-۲- عملیات سطحی و تاثیر آن بر رفتار تریبولوژیکی
۶	۱-۲-۲- نیتريدینگ گازی
۷	۲-۲-۲- نیتريدینگ پلاسما
۸	۳-۲-۲- کربونیتريدینگ
۸	۴-۲-۲- فرآیندهای CVD و PVD
۹	۵-۲-۲- فرآیند پوشش الکترولس
۱۱	فصل سوم : پوشش های مقاوم به سایش و رفتار تریبولوژیکی آنها در دمای بالا
۱۱	۱-۳- رفتار تریبولوژیکی پوشش های کامپوزیتی فلز-سرامیک در دمای بالا
۱۱	۱-۱-۳- ضرایب اصطکاک و نرخ های سایش
۱۲	۲-۱-۳- تحلیل ریزساختار و بحث زوج سایشی 9988-CrN
۱۲	۳-۱-۳- تحلیل ریزساختار و بحث زوج سایشی 9989-CrN

- ۱۶-۲-۳- رفتار تریبولوژیکی پوشش های پایه Ni-Cr در دماهای بالا
- ۱۶-۱-۲-۳- خواص مکانیکی و تریبولوژیکی آلیاژها
- ۱۷-۲-۲-۳- مکانیزم سایش
- ۲۰-۳-۳- رفتار تریبولوژیکی پوشش های پایه نیتریدی در دمای بالا
- ۲۲-۱-۳-۳- پوشش های نانوکامپوزیت سازگار
- ۲۶-۲-۳-۳- پوشش های بافته شده نانو و میکرو
- ۳۰-۳-۳-۳- سازگاری با چرخه گرمایی
- ۳۱-۴-۳-۳- سازگاری با استفاده از مواد بر پایه نانوتیوب
- ۳۲-۵-۳-۳- مشاهده پدیده روانکار جامد با روش های درجا
- ۳۳-۴-۳- پوشش TiN فولادهای ابزار
- ۳۴-۱-۴-۳- فرآیندهای پوشش TiN
- ۳۷-۲-۴-۳- ریزساختار و خواص مکانیکی پوشش های TiN
- ۴۰-۳-۴-۳- پیشرفت های جدید در پوشش TiN
- ۴۳-۵-۳- رفتار تریبولوژیکی پوشش های TiN در دمای حدود  $500^{\circ}\text{C}$
- ۴۴-۱-۵-۳- اصطکاک و سایش در برابر گلوله های فولادی 100Cr6 در دمای اتاق
- ۴۸-۲-۵-۳- اصطکاک و سایش در برابر گلوله های  $\text{Al}_2\text{O}_3$  در حدود دمای  $500^{\circ}\text{C}$
- ۵۲-۶-۳- رفتار تریبولوژیکی TiCN، TiN و CrN در دمای بالا
- ۵۳-۱-۶-۳- رفتار سایشی و اصطکاکی پوشش ها در برابر گلوله 100Cr6
- ۵۵-۲-۶-۳- توصیف سایش و اصطکاک در برابر گلوله از جنس  $\text{Si}_3\text{N}_4$
- ۵۸-۷-۳- اثر مس روی رفتار سایشی پوشش های CrN در دماهای مختلف

- ۶۰ ۳-۷-۱- رفتار سایشی پوشش ها
- ۶۲ ۳-۷-۲- بررسی های رامن
- ۶۴ ۳-۸-۱- رفتار تریبولوژیکی پوشش های CrN در دماهای حدود  $500^{\circ}\text{C}$
- ۶۷ ۳-۸-۱- سایش و اصطکاک در برابر گلوله 100Cr6
- ۶۷ ۳-۸-۲- سایش و اصطکاک در برابر گلوله  $\text{Si}_3\text{N}_4$
- ۶۹ ۳-۸-۳- سایش و اصطکاک در برابر گلوله  $\text{Al}_2\text{O}_3$
- ۷۰ ۳-۹-۱- مقایسه رفتار تریبولوژیکی پوشش های VN و TiN در دماهای متفاوت
- ۷۰ ۳-۹-۱- رفتار تریبولوژیکی پوشش ها
- ۷۴ ۳-۹-۲- بررسی های سطحی
- ۷۷ ۳-۱۰-۱- رفتار تریبولوژیکی لایه های سخت در دماهای بالا
- ۷۷ ۳-۱۰-۱- مقاومت سایشی سیستم زیرلایه-لایه نازک در دمای اتاق
- ۷۹ ۳-۱۰-۲- مقاومت سایشی سیستم زیرلایه-لایه نازک در دماهای مختلف
- ۸۲ مقایسه کلی و جمع بندی
- ۸۴ مراجع

## فهرست جدول ها

شماره صفحه	عنوان جدول
۱۱	۳-۱- ارتباط بین ضریب اصطکاک و دمای آزمایش
۱۲	۳-۲- نرخ سایش زوج های سایشی
۱۶	۳-۳- تاثیر گرافیت و $\text{MoS}_2$ بر خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژهای پایه Ni-Cr
۱۷	۳-۴- ضریب اصطکاک و نرخ سایش دو نمونه در دمای اتاق، $200^\circ\text{C}$ و $600^\circ\text{C}$
۲۶	۳-۵- نامگذاری زیرلایه های $\text{MoS}_2$ و Ag، ترکیبات و ضریب اصطکاک $\text{Mo}_2\text{N}/\text{MoS}_2/\text{Ag}$
۳۹	۳-۶- افزایش چسبندگی به وسیله بمباران یونی زیرلایه در طی پوشش دهی بدست آمد
۴۴	۳-۷- ترکیب شیمیایی، ضخامت، ضریب خراشیدگی و چسبندگی تعیین شده برای پوشش های TiN
۶۰	۳-۸- پارامترهای به کار برده شده برای رسوب پوشش های CrN-Cu و CrN

## فهرست شکل ها

شماره صفحه	عنوان شکل
۱۳	۳-۱- تصویر SEM از ریزساختار زوج سایشی 9988-CrN (a) ، 9988 CrN (b).
۱۳	۳-۲- نتایج آنالیز EDS نمونه CrN در شکل (b) ۱. (a) منطقه A، (b) منطقه B.
۱۴	۳-۳- تصویر SEM از ریزساختار سطح سایش یافته نمونه 9989. (a) بزرگنمایی پایین، (b) بزرگنمایی بالا.
۱۴	۳-۴- نتایج آنالیز EDS سطح سایش یافته نمونه 9989. (a) منطقه A، (b) منطقه B.
۱۵	۳-۵- تصویر SEM از ریزساختارهای سطح سایش یافته CrN. (a) بزرگنمایی پایین، (b) بزرگنمایی بالا.
۱۵	۳-۶- نتایج آنالیز EDS سطح سایش یافته CrN در شکل ۵. (a) توده سفید، (b) ماتریس.
۱۹	۳-۷- تصاویر سطوح سایش یافته آلیاژهای. (a) Ni-Cr-W-Al-Ti-6%C, 200°C, pin ; (b) Ni-Cr-W-Al-Ti-6%C, 600°C, pin ; (c) Ni-Cr-W-Al-Ti-6%MoS <sub>2</sub> , 200°C, pin ; (d) Ni-Cr-W-Al-Ti-6% MoS <sub>2</sub> , 600°C, pin ;
۲۲	۳-۸- تصویر شماتیک سه نمونه از جدیدترین پوشش های سازگار، (a) نانوکامپوزیت، (b) بافته شده، (c) برپایه نانوتیوب.
۲۳	۳-۹- تصویر شماتیک پوشش نانوکامپوزیت سازگار Ysz / Au / MoS <sub>2</sub> /DLC.
۲۸	۳-۱۰- تغییر ضریب اصطکاک در آزمایشهای لغزش پوشش TiCN بافته شده لیزری با لایه Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / گرافیت / MoS <sub>2</sub> در برابر گلوله فولادی.
۲۹	۳-۱۱- ضریب اصطکاک پوشش های MoS <sub>2</sub> /Ag / TiAlN+Mo که طی آزمایش های لغزش در دمای بالا در برابر Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ثبت شدند.

- ۳۰-۱۲-۳- (a) تصویر نوری، (b) تصویر SEM، (c) داده میکرو رامان برای پوشش های TiAlN+Mo/ MoS<sub>2</sub>/Ag بعد از آزمایش اصطکاکی در ۵۷۰°C.
- ۳۵-۱۳-۳- اساس سیستم تبخیر چندقوسی برای پوشش TiN.
- ۳۶-۱۴-۳- اساس روش کاتدپرانی واکنشی برای پوشش TiN.
- ۳۸-۱۵-۳- نمودار نفوذ فرورونده ویکرز به عنوان تابعی از سختی زیرلایه.
- ۳۹-۱۶-۳- تغییر Lc با  $d^2/t^{1/2}$  برای پوشش های 2μm TiN رسوب کرده روی فولادابزار M2 در محدوده ای از ولتاژهای بایاس.
- ۴۵-۱۷-۳- ضرایب اصطکاک پوشش TiN 1 در برابر گلوله فولادی 100Cr6 در دمای اتاق با استفاده از بار 10 N و شعاع مسیر سایش (a) ۳ mm، (b) ۵ mm.
- ۴۶-۱۸-۳- تصویر سه بعدی نوری مسیر سایش TiN 1 بعد از آزمایش گلوله روی دیسک در برابر 100Cr6 در دمای اتاق.
- ۴۷-۱۹-۳- تصویر SEM مسیر سایش TiN 1 بعد از آزمایش گلوله روی دیسک در برابر 100Cr6 در دمای اتاق.
- ۴۸-۲۰-۳- وابستگی سایش گلوله بر مسافت مرحله آب بندی در طی آزمایش گلوله روی دیسک گلوله در 100Cr6 در برابر پوشش TiN 1 در دمای اتاق.
- ۴۹-۲۱-۳- ضرایب اصطکاک TiN 2 در برابر گلوله Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> با استفاده از بار 10 N، (a) دمای اتاق، (b) ۳۰۰°C.
- ۵۰-۲۲-۳- تصویر سه بعدی نوری مسیر سایش TiN2 بعد از آزمایش گلوله روی دیسک در برابر Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در دمای اتاق.
- ۵۱-۲۳-۳- وابستگی ضرایب اصطکاک حالت پایدار و ضرایب سایشی بر دمای آزمایش در طی آزمایش گلوله روی دیسک پوشش TiN2 در برابر گلوله Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
- ۵۱-۲۴-۳- تصویر سه بعدی نوری مسیر سایش TiN2 بعد از آزمایش گلوله روی دیسک در برابر Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در دمای اتاق.

- ۵۳ - ۲۵-۳- نمودارهای اصطکاک TiCN(a), TiN(b) و CrN(c) با لغزش در برابر گلوله 100Cr6.
- ۵۵ - ۲۶-۳- اثر دما بر نرخ سایش پوشش، گلوله 100Cr6.
- ۵۶ - ۲۷-۳- تغییر ضریب اصطکاک با دما برای گلوله سرامیکی TiCN(a), TiN(b) و CrN(c).
- ۵۷ - ۲۸-۳- تصاویر SEM مسیرهای سایش TiCN(a),  $400^{\circ}\text{C}$ ; TiN(b),  $400^{\circ}\text{C}$ ; CrN(c),  $400^{\circ}\text{C}$ .
- ۶۱ - ۲۹-۳- رفتار پوشش های CrN و CrN-Cu بر حسب ضریب اصطکاک، تعداد سیکل و دماهای RT (a) و  $50^{\circ}\text{C}$  (b).
- ۶۲ - ۳۰-۳- نمایشگر طیف های رامان (a) Cr-N-O رسوب کرده، (b) ذرات روی پوشش CrN-2Cu بعد از آزمایش سایش در  $100^{\circ}\text{C}$ ، (c) ذرات روی پوشش CrN-2Cu بعد از آزمایش سایش در  $50^{\circ}\text{C}$  و (d) ذرات روی پوشش CrN-2Cu بعد از آزمایش سایش در دمای اتاق.
- ۶۵ - ۳۱-۳- جزئیات الگوهای XRD پوشش CrN در دماهای مختلف. الگوی کامل ثبت شده برای  $400^{\circ}\text{C}$  (بالا سمت چپ).
- ۶۶ - ۳۲-۳- سختی و FWHM پیک پراش Cr(111) and  $\beta$ -Cr<sub>2</sub>N(111) به عنوان تابعی از دمای آنیل.
- ۶۸ - ۳۳-۳- نمودارهای اصطکاک CrN حاصل از لغزش در برابر Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> در دمای اتاق،  $200^{\circ}\text{C}$  و  $400^{\circ}\text{C}$ .
- ۶۹ - ۳۴-۳- نمودارهای اصطکاک CrN حاصل از لغزش در برابر Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در دمای اتاق،  $200^{\circ}\text{C}$  و  $400^{\circ}\text{C}$ .
- ۶۹ - ۳۵-۳- اصطکاک و نرخ سایش پوشش به عنوان تابعی از دما، در برابر گلوله Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
- ۷۱ - ۳۶-۳- ضریب اصطکاک وابسته به دما برای پوشش های VN و TiN.
- ۷۲ - ۳۷-۳- پروفیل های دوبعدی مسیرهای سایش پوشش های TiN (a) و VN (b) بعد از آزمایش های گلوله روی دیسک در برابر آلومینا دمای اتاق،  $400^{\circ}\text{C}$  و  $600^{\circ}\text{C}$ .



- ۷۳ - ۳۸-۳ - پروفیل های سه بعدی مسیرهای سایش پوشش های (a) TiN و (b) VN بعد از آزمایش های گلوله روی دیسک در برابر آلومینا در  $600^{\circ}\text{C}$ .
- ۷۵ - ۳۹-۳ - الگوهای XRD پوشش های (a) TiN و (b) VN بعد از آزمایش اصطکاکی دمای بالا در حدود  $700^{\circ}\text{C}$ .
- ۷۷ - ۴۰-۳ - طیف های رامان پوشش های (a) TiN و (b) VN بعد از آزمایش اصطکاکی دمای بالا. S: سطح و WT: مسیرسیایش.
- ۷۸ - ۴۱-۳ - مسیر ضرایب اصطکاکی  $\text{PIN}=\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $F=10\text{N}$ ,  $r=8\text{mm}$ ,  $T=20^{\circ}\text{C}$ ,  $n=12000$  cycles
- ۸۰ - ۴۲-۳ - مسیر ضرایب اصطکاکی  $\text{AlTiN}$ ,  $700^{\circ}\text{C}$ ,  $500^{\circ}\text{C}$  و  $F=2\text{N}$ .
- ۸۱ - ۴۳-۳ - تصویر SEM از مسیرهای سایش, (a):  $T=500^{\circ}\text{C}$  و (b):  $T=700^{\circ}\text{C}$ .

## چکیده

یکی از چالش‌های رایج سیستم‌های تریبولوژیکی صنعتی مدرن طراحی و تولید موادی است که دارای نرخ سایش کم و ضریب اصطکاک پایین در یک دامنه وسیع از محیط‌های کاری می‌باشد. کاربردهای صنعتی با شرایط کاری که با زمان در حال تغییر هستند در ابتدا شامل صنایع هوا و فضا بوده اما علاوه بر این شامل صنایع دیگری مانند ابزار سازی، شکل دهی مواد، صنایع اتومبیل سازی، صنایع نظامی و صنایع نیروی هسته‌ای نیز هستند. استفاده از روانکارهای جامد تنها جایگزین قابل قبول برای کاهش اصطکاک در بسیاری از محیط‌های کاری سخت است، به ویژه آنهایی که در برگیرنده دماهای بالای  $350^{\circ}\text{C}$  هستند که در آن میزان روانکارهای مایع تحت این شرایط به سرعت کاهش می‌یابند. پر کاربردترین روانکارهای جامد در صنعت گرافیت، نیتريد بور و  $\text{MoS}_2$  هستند. این مواد روانکارهای مؤثری هستند زیرا ساختار لایه لایه ای دارند که به آسانی برش می‌خورند و منجر به کاهش ضریب اصطکاک می‌شوند. اشکال استفاده از روانکارهای جامد به عنوان لایه‌های یکپارچه این است که آنها نرم هستند و در نتیجه مقاومت سایشی لازم را ندارند. علاوه بر این، هیچ روانکار جامد تک فازي وجود ندارد که یک ضریب اصطکاک پایین را در یک دامنه وسیع از شرایط محیطی از خود نشان دهد. به عنوان مثال، گرافیت یک روانکار مناسب در هوای مرطوب یا خشک است اما در خلا نتایج رضایت بخشی را ارائه نمی‌دهد. در مقابل،  $\text{MoS}_2$  روانکار مورد انتخاب برای کاربردهایی است که نیازمند محیط‌های خشک یا خلأ است اما در هوای مرطوب به شدت غیر قابل استفاده می‌شود. برای جبران نقاط ضعف روانکارهای یکپارچه، مواد جدیدی طراحی شده‌اند که فازهای با سختی و استحکام زیاد را با ترکیبی از فازهای روانکار جامد ترکیب می‌کند تا نرخ سایش و ضریب اصطکاک را در دامنه وسیعی از شرایط کاری کاهش دهند. هدف در این کار، ارائه یک بررسی از تحقیقات انجام شده بر روی رفتار تریبولوژیکی پوشش‌ها در دماهای بالا می‌باشد.

## مقدمه

امروزه با توسعه صنعت در زمینه های گوناگون، تحقیقات در علم مهندسی مواد ابعاد وسیعتری یافته است. اخیراً تولید پوشش های مختلف به منظور بدست آوردن خواص گوناگون نظیر پایداری شیمیایی، مقاومت به خوردگی، مقاومت سایشی و... شدت بیشتری به خود گرفته است. یکی از چالشهای رایج سیستم های تریبولوژیکی صنعتی مدرن طراحی و تولید موادی است که دارای نرخ سایش کم و ضریب اصطکاک پایین در یک دامنه وسیع از محیط های کاری می باشد. کاربردهای صنعتی با شرایط کاری که با زمان در حال تغییر هستند در ابتدا شامل صنایع هوا و فضا بوده اما علاوه بر این شامل صنایع دیگری مانند ابزار سازی، شکل دهی مواد، صنایع اتومبیل سازی، صنایع نظامی و صنایع نیروی هسته ای نیز هستند. استفاده از روانکارهای جامد تنها جایگزین قابل قبول برای کاهش اصطکاک در بسیاری از محیط های کاری سخت است، به ویژه آنهایی که در برگیرنده دماهای بالای  $350^{\circ}\text{C}$  هستند که در آن میزان روانکارهای مایع تحت این شرایط به سرعت کاهش می یابند. پر کاربردترین روانکارهای جامد در صنعت گرافیت، نیتريد بور و  $\text{MoS}_2$  هستند. این مواد روانکارهای مؤثری هستند زیرا ساختار لایه لایه ای دارند که به آسانی برش می خورند و منجر به کاهش ضریب اصطکاک می شوند. اشکال استفاده از روانکارهای جامد به عنوان لایه های یکپارچه این است که آنها نرم هستند و در نتیجه مقاومت سایشی لازم را ندارند [۷]. علاوه بر این، هیچ روانکار جامد تک فازی وجود ندارد که یک ضریب اصطکاک پایین را در یک دامنه وسیع از شرایط محیطی از خود نشان دهد. به عنوان مثال، گرافیت یک روانکار مناسب در هوای مربوط یا خشک است اما در خلا نتایج رضایت بخشی را ارائه نمیدهد. در مقابل،  $\text{MoS}_2$  روانکار مورد انتخاب برای کاربردهایی است که نیازمند محیط های خشک یا خلأ است اما در هوای مرطوب به شدت غیر قابل استفاده می شود. برای جبران نقاط ضعف روانکارهای یکپارچه، مواد جدیدی طراحی شده اند که فازهای با سختی و استحکام زیاد را با ترکیبی از فازهای روانکار جامد ترکیب می کند تا نرخ سایش و ضریب اصطکاک را در دامنه وسیعی از شرایط کاری کاهش دهند [۱]. هدف در این کار، ارائه یک بررسی از تحقیقات انجام شده بر روی رفتار تریبولوژیکی پوشش ها در دماهای بالا می باشد.