



جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran

سازمان ملی استاندارد ایران

Iranian National Standardization Organization



استاندارد ملی ایران

۱۸۰۸۶

چاپ اول

۱۳۹۳

INSO

18086

1st.Edition

2014

فناوری نانو - راهنمای روش‌هایی برای
اندازه‌گیری نانو و میکروتربیولوژی

**Nanotechnologies - Guidance on methods
for nano – and microtribology
measurements**

ICS: 07.030

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

نام موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب یکصد و پنجاه و دومین جلسه شورای عالی اداری مورخ ۹۰/۶/۲۹ به سازمان ملی استاندارد ایران تغییر و طی نامه شماره ۲۰۶/۳۵۸۳۸ مورخ ۹۰/۷/۲۴ جهت اجرا ابلاغ شده است.

تدوین استاندارد در حوزه های مختلف در کمیسیون های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می شود و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانه صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف کنندگان، صادرکنندگان و وارد کنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان های دولتی و غیر دولتی حاصل می شود. پیش نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی نفع و اعضای کمیسیون های فنی مربوط ارسال می شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادهای در کمیته ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می شود.

پیش نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان های علاقه مند و ذی صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می کنند در کمیته ملی طرح و بررسی و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می شوند که بر اساس مفاد نوشته شده در استاندارد ملی ایران شماره ۵ تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می دهد به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین المللی استاندارد (ISO)^۱، کمیسیون بین المللی الکتروتکنیک (IEC)^۲ و سازمان بین المللی اندازه شناسی قانونی (OIML)^۳ است و به عنوان تنها رابط^۴ کمیسیون کدکس غذایی (CAC)^۵ در کشور فعالیت می کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی های خاص کشور، از آخرین پیشرفت های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین المللی بهره گیری می شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می تواند با رعایت موازین پیش بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری نماید. سازمان می تواند به منظور حفظ بازارهای بین المللی برای محصولات کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه بندی آن را اجباری نماید. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده کنندگان از خدمات سازمان ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سیستم های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست محیطی، آزمایشگاه ها و مراکز کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد ایران این گونه سازمان ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامه تأیید صلاحیت به آن ها اعطا و بر عملکرد آن ها نظارت می کند. ترویج دستگاه بین المللی یکاها، کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International Organization for Standardization

2 - International Electrotechnical Commission

3- International Organization of Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legale)

4 - Contact point

5 - Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

« فناوری نانو - راهنمای روش هایی برای اندازه گیری نانو و میکروتربیولوژی »

رئیس :

میر کاظمی، سید محمد
(دکترای مهندسی مواد و متالوژی)

سمت و / یا نمایندگی

عضو هیئت علمی دانشگاه علم و صنعت

دبیر :

جهانگیری، نظام
(کارشناس صنایع غذایی)

کارشناس اداره کل استاندارد استان کردستان

اعضاء : (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

اسلامی پور، الهه
(کارشناس ارشد زیست شناسی)

کارشناس ستاد ویژه فناوری نانو

پوی پوی، حسن
(کارشناس ارشد شیمی)

کارشناس ستاد ویژه فناوری نانو و دبیر کمیته فنی
متناظر فناوری نانو

جواهری، هومن
(کارشناس ارشد مهندسی شیمی)

کارشناس اداره کل استاندارد استان کردستان

جهان نمای، آرمین
(کارشناس شیمی)

کارشناس اداره کل استاندارد استان کردستان

چوخاچی زاده مقدم، امین
(کارشناس ارشد نانومواد)

کارشناس ستاد ویژه فناوری نانو

چولائی، محمد مهدی
(کارشناس ارشد مهندسی شیمی)

کارشناس پژوهشگاه صنعت نفت

حسینی، حمید
(کارشناس ارشد شیمی)

کارشناس اداره کل استاندارد استان کردستان

خاتونی، یعقوب
(کارشناس صنایع غذایی)

کارشناس اداره کل استاندارد استان کردستان

نایب رئیس کمیته فنی متناظر فناوری نانو	سیفی ، مهوش (کارشناس ارشد مدیریت دولتی)
کارشناس اداره کل استاندارد استان کردستان	شاهویسی، آماج (کارشناس صنایع غذایی)
کارشناس پژوهشگاه صنعت نفت	شیرخانی، مژگان (کارشناس ارشد مهندسی شیمی)
کارشناس پژوهشگاه صنعت نفت	صادق حسنی، صدیقه (کارشناس ارشد شیمی)
کارشناس اداره کل استاندارد استان کردستان	عبدی، کمال (کارشناس ارشد شیمی)
عضو هیئت علمی دانشگاه کردستان	قطبی، مسعود (دکترای فیزیک)
کارشناس اداره کل استاندارد استان کردستان	لطفی، فرشید (کارشناس شیمی)
کارشناس اداره کل استاندارد استان کردستان	محمدی، حمید (کارشناس ارشد صنایع غذایی)
عضو هیئت علمی پژوهشگاه استاندارد	مسروری، حسن (دکترای شیمی)
کارشناس اداره کل استاندارد استان کردستان	یزدانی، ژیلا (کارشناس ارشد شیمی فیزیک)

فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
ب	آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران
ج	کمیسیون فنی تدوین استاندارد
و	پیش گفتار
ز	مقدمه
۱	۱ هدف و دامنه کاربرد
۱	۲ مراجع الزامی
۲	۳ اصطلاحات و تعاریف
۳	۴ اصول
۳	۵ مواد و وسایل
۱۳	۶ مراحل انجام آزمون
۱۸	۷ قابلیت تجدیدپذیری و تکرارپذیری آزمون و محدودیت‌ها
۱۹	۸ گزارش آزمون
۲۰	کتابنامه

پیش گفتار

استاندارد " فناوری نانو - راهنمای روش هایی برای اندازه گیری نانو و میکروتربیولوژی " که پیش نویس آن در کمیسیون های مربوط توسط ستاد توسعه فناوری نانو تهیه و تدوین شده است و در دوازدهمین اجلاس کمیته ملی استاندارد فناوری نانو مورخ ۱۳۹۳/۳/۲۸ مورد تصویب قرار گرفته است، اینک به استناد بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می شود.

برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در مواقع لزوم تجدید نظر خواهد شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح و تکمیل این استانداردها ارائه شود، هنگام تجدید نظر در کمیسیون فنی مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی استفاده کرد.

منبع و ماخذی که برای تهیه این استاندارد مورد استفاده قرار گرفته به شرح زیر است:

ISO/TR 11811:2012, Nanotechnologies - Guidance on methods for nano - and microtribology measurements

مقدمه

ارزیابی سایش و اصطکاک در سامانه‌هایی که در آن‌ها برهمکنش‌ها در مقیاس نانو اتفاق می‌افتد اخیراً مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. این موضوع در دو حوزه کاربرد دارد. اولین حوزه کاربرد در وسایل سامانه‌های میکرو الکترو مکانیکی MEMS^۱ و سامانه‌های نانو الکترو مکانیکی NEMS^۲ است که در آن‌ها موضوعات تریبولوژیکی می‌توانند تعیین‌کننده عملکرد کلی وسایل باشند. همچنین باید توجه داشت که در بسیاری از موارد عملکرد تریبولوژیکی تماس در مقیاس ماکرو بستگی به این دارد که در عمل چه چیزی در تماس‌های زیر در مقیاس میکرو و نانو رخ می‌دهد و این زمانی اتفاق می‌افتد که عملاً دو سطح باهم تماس پیدا کنند. توسعه روش‌های آزمون نانوتریبولوژی راهی را برای فراهم کردن اطلاعات و درک بهتر این‌گونه تماس‌های با مقیاس کوچک فراهم می‌کند. درک این موضوع می‌تواند برای مدل‌سازی عملکرد وسایل در مقیاس میکرو به کار گرفته شود و در آینده زمینه لازم را برای ایجاد مدل‌های سایش لغزشی^۳ فراهم کند.

-
- 1- Micro-Electro-Mechanical-Systems
 - 2- Nano-Electro-Mechanical-Systems
 - 3- Sliding wear

فناوری نانو- راهنمای روش‌هایی برای اندازه‌گیری نانو و میکروتربیولوژی

۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد تعیین راهکارهایی برای ارزیابی عملکرد تریبولوژیکی تماس‌های لغزشی در ابعادی از حدود چند نانومتر تا $10 \mu m$ است که در آن اندازه بار^۱ اعمال شده بین $50 \mu N$ و $100 mN$ است. همچنین این استاندارد ضمن تشریح روش‌های انجام این اندازه‌گیری‌ها، راهنمایی‌هایی را در مورد تأثیر عوامل مختلف بر نتایج آزمون مطرح می‌کند. این استاندارد در مورد روش‌های میکروسکوپی پروبی روبشی^۲ موجود از قبیل میکروسکوپی نیروی اصطکاک و میکروسکوپی نیروی اتمی^۳ و همچنین در مورد مجموعه‌ای از شرایط خاص که در یک آزمون مورد استفاده قرار می‌گیرد کاربرد ندارد. شرایط مناسب آزمون باید پس از در نظر گرفتن کاربرد نهایی مواد مورد آزمون، انتخاب شوند.

یادآوری- این استاندارد راهنمایی‌هایی را در زمینه نحوه انجام آزمون‌های میکروتربیولوژی و نانوتربیولوژی مطرح می‌کند و به تأثیر احتمالی شرایط و عوامل آزمون بر روی نتایج به دست آمده توجه خاص دارد.

۲ مراجع الزامی

مدارک الزامی زیر حاوی مقرراتی است که در متن این استاندارد ملی ایران به آن‌ها ارجاع داده شده است. بدین ترتیب آن مقررات جزئی از این استاندارد ملی ایران محسوب می‌شود.

در صورتی که به مدرکی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدیدنظرهای بعدی آن مورد نظر این استاندارد ملی ایران نیست. در مورد مدارکی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن‌ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدید نظر و اصلاحیه‌های بعدی آن‌ها مورد نظر است.

استفاده از مرجع زیر برای این استاندارد الزامی است:

2-1 ASTM G40, Standard Terminology Relating to Wear and Erosion

1-Load

2-Scanning probe microscope(SPM)

3- Atomic force microscope(AFM)

۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد اصطلاحات و تعاریف زیر به کار می‌رود:

۱-۳

سایش^۱

آسیب وارد شده به سطح جامد که عموماً شامل از بین رفتن مواد به صورت مستمر و ناشی از حرکت نسبی میان آن سطح و ماده یا مواد در حال تماس است.

۲-۳

نیروی اصطکاک^۲

نیروی مقاوم تماس با سطح میان دو بدنه که در آن تحت اثر یک نیروی خارجی، یکی از اجسام حرکت می‌کند و یا تمایل به حرکت دارد.

۳-۳

ضریب اصطکاک^۳

μ

f

نسبت نیروی اصطکاک (F) بین دو بدنه به نیروی عمود بر سطح (N) که این دو بدنه را به هم فشار می‌دهد. (این نسبت بدون واحد و بعد می‌باشد)

یادآوری ۱- $\mu = F/N$

یادآوری ۲- $\mu \geq 0$

۴-۳

تریبولوژی^۴

علمی است که در خصوص سطوح در حال حرکت، کنش‌ها و واکنش‌های آن بحث می‌کند.

-
- 1-Wear
 - 2-Frictional force
 - 3-Coefficient of friction
 - 4-Tribology

۴ اصول

آزمون‌های تریبولوژی در سامانه‌هایی انجام می‌شوند که به گونه‌ای خاص طراحی شده‌اند و در آن‌ها می‌توان به‌طور هم‌زمان نیروی نسبی فشارنده سطوح یک نمونه بر نمونه دیگر و نیز حرکت نسبی دو جسم را کنترل کرد. به‌طور قراردادی، آزمون‌های لغزشی/ غلتشی به‌وسیله نمونه‌هایی انجام می‌شوند که در آن‌ها حوزه‌های تماس، خود دارای ابعاد چند میلیمتری یا بیشتر هستند و همچنین در این آزمون‌ها اندازه بار اعمال شده ۱N یا بیشتر است. این استاندارد برای آزمون‌های تریبولوژیکی است که در آن‌ها حوزه‌های تماس ابعادی بین چند nm تا $10\ \mu\text{m}$ دارند و اندازه بارهای اعمال شده بین $50\ \mu\text{N}$ و $100\ \text{mN}$ است. اصطکاک و سایش را می‌توان با استفاده از این آزمون‌ها اندازه‌گیری کرد. هدف اصلی در این گونه آزمون‌ها بدست آوردن اطلاعاتی در زمینه عملکرد تریبولوژیکی مواد در مقیاس میکرو و نانو است. این اطلاعات را می‌توان به منظور درک بهتر سازوکارها^۱ در مقیاس نانو به‌کار برد که عملکرد اصطکاک و سایش مواد و همچنین وابستگی این سازوکارها با ساختار مواد را تعیین می‌کند.

حوزه‌های کاربرد اندازه‌گیری‌ها به شرح زیر است :

- وسایل میکرو و نانو مقیاس که در آن‌ها تماس‌های لغزشی/ غلتشی وجود دارد.

- شبیه‌سازی تماس‌های میکرو و نانو مقیاس که زیر مجموعه تمامی تماس‌های تریبولوژیکی ماکرو مقیاس است.

۵ مواد و وسایل

۱-۵ سامانه‌های آزمون

۱-۱-۵ انواع متداول پروب^۲ (کاوند) و اشکال هندسی آن‌ها

معمولاً یک پروب با شکل هندسی کاملاً تعریف شده برای تماس با نمونه مورد استفاده قرار می‌گیرد (به بند ۵-۲-۱۱ مراجعه شود). شبیه‌سازی تماس‌های واقعی در این گونه آزمون‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است که در آن‌ها خصوصیتی از قبیل شکل تماس و پارامترهای هندسی مانند شعاع انحنای سوزنی^۳ که در تماس واقعی قرار دارد باید باز تولید شود. شکل هندسی فرض شده در مقیاس‌های تماس مورد آزمون تعریف شده در این استاندارد، مانند یک مخروط تیز، همیشه نمی‌تواند صحیح باشد. شکل هندسی واقعی تماس تقریباً همیشه در انتهای پروب انحنا دار و گرد است. اگر مجموعه‌ای از آزمون‌ها انجام شوند، در نظر گرفتن تکرار پذیری شکل هندسی پروب مهم است به‌گونه‌ای که بتوان شرایط تماس را از یک آزمون به آزمون دیگر تکرار کرد. جزئیات دیگر نمونه‌ها در این استاندارد ارائه شده است.

اگرچه واژه‌های «پروب» و «نمونه» در استاندارد به کار رفته است، باید این نکته را مورد تاکید قرار داد که سایش و آسیب می‌تواند در پروب و نمونه هم رخ دهد.

۲-۱-۵ نگهداری پروب‌ها

نمونه و پروب هر دو باید به صورت محکم و به یک روش مشخص نگه داشته شوند به گونه‌ای که نمونه‌ها فقط بتوانند حرکت از پیش تعیین شده را انجام دهند. غالباً محکم نگه داشتن نمونه‌ها به صورت مکانیکی ترجیح داده می‌شود اما در بسیاری از موارد یک چسب ممکن است برای محکم نگه داشتن نمونه در محل استفاده شود. برای مثال در جایی که گوی‌ها به‌عنوان پروب مورد استفاده قرار می‌گیرند و در جایی که نیاز است پروب با نگهدارنده تماس پیدا کند. اگر چسب مورد استفاده قرار بگیرد، این نکته حائز اهمیت است که ضخامت چسب به حداقل رسانده شود تا تأثیر هرگونه جریان وابسته به زمان را در چسب کاهش دهد و همچنین تأثیر سختی کاهش یافته از طریق چسب را کم کند. علاوه بر این اگر از چسب استفاده شود، برای اثربخشی کامل چسب و به‌وجود آمدن بیشینه قدرت چسبندگی و هم چنین از بین بردن هرگونه اثرات حرارتی از قبل از انجام آزمون گذشت زمان کافی ضروری است.

۳-۱-۵ ایجاد حرکت

حرکت نسبی ایجاد شده میان پروب و نمونه می‌تواند از طریق حرکت نمونه یا پروب حاصل شود. در هر دو مورد حرکتی که ایجاد می‌شود باید مشخص و قابل باز تولید باشد به نحوی که بتوان آزمون‌های تکراری را انجام داد. در تغییر مکان‌های عمودی کوچک و نیروهای به کار برده شده در آزمون‌ها دقتی ویژه مورد نیاز است تا بی‌نظمی موجود در خود حرکت باعث ایجاد خطاهای تصادفی در نیروهای به کار برده شده نشود. مراقبت‌های زیادی باید در نظر گرفته شوند تا نوسان‌های حرکت و سایر اثرات ایجاد شده به علت لرزش زمین، تغییرات دمای محیطی و جریان هوا (برای مثال از طریق دستگاه‌های خنک کننده، آزمونگر و یا دستگاه‌های آزمایشگاهی) را به حداقل برسانند. حرکت می‌تواند به چند طریق ایجاد شود. فعال کننده‌های پیزوالکتریک می‌توانند به کار گرفته شوند اما دامنه‌ای محدود دارند (معمولاً در حدود $100 \mu\text{m}$).

همچنین می‌توان فعال کننده‌های الکتریکی فرمان‌پذیر، موتورهای سیم‌پیچ صوتی یا موتورهای پله‌ای (موتورهای که چرخشی هستند و در گام‌های کوچک مجزا حرکت می‌کنند) را مورد استفاده قرار داد تا حرکت با دقت مورد نظر را ایجاد کنند. در تمامی موارد، داشتن یک مقیاس مستقل از جابجائی حائز اهمیت است.

علاوه بر این، طراحی صفحه نمونه و سامانه‌های هدایت کننده حائز اهمیت است، به نحوی که اثرات ناخواسته^۱ حرکت در راستای Z و یا حرکت در راستاهای x-y مانند پسماند^۲ یا پس زنی^۳ به حداقل برسند.

1- Artefacts
2- Hysteresis
3- Backlash

سه محور حرکتی برای حرکت X-Y و هم چنین حرکت نسبتاً بزرگ در راستای Z نیاز است تا به پروب این امکان را بدهد که نزدیک نمونه قرار گیرد. حرکت در راستای محور Z باید عمود بر حرکت در صفحه X-Y باشد.

انواع مختلفی از حرکتها را می‌توان در این آزمون‌ها مورد استفاده قرار داد. متداول‌ترین آن، حرکت به جلو و عقب در یک مسیر خطی است. یک نوع از حرکت مذکور زمانی است که حرکت یک طرفه موردنیاز باشد به نحوی که حرکت در یک مسیر واحد همراه با بالا آمدن (قطع تماس) قبل از حرکت برگشت و به دنبال آن تماس‌های مکرر بعدی برای ایجاد تماس‌های چندگانه در همان راستا رخ دهد. حرکت چرخشی نیز کاملاً متداول است و در این جا نمونه مسطح به سادگی به وسیله یک موتور محرک چرخانده می‌شود.

۵-۱-۴ کاربرد نیروی عمودی

نیروی عمود بر سطح به کار رفته را می‌توان از طریق چندین سازوکار مختلف اعمال نمود. ساده‌ترین روش استفاده از بار وزنی مرده است. این یک روش غیرفعال است اما نیازمند دقت کافی است تا اثرات ناخواسته بارهای غیرواقعی مانند اصطکاک پارازیتی در سازوکار اعمال نیرو ایجاد نشود. اصطکاک پارازیتی نوعی از سایش است که در ساختار سازوکار اعمال نیرو ایجاد می‌شود به نحوی که نیروی بکاررفته واقعی متفاوت از نیروی مورد نیاز است. روش متداول دیگر برای تولید نیروی عمودی به کار رفته، استفاده از فشردگی یک جسم انعطاف پذیر برای تولید نیرو است، اندازه نیروی عمودی از طریق سنجش فشردگی ابعادی جسم انعطاف پذیر تعیین می‌شود. فشردگی ابعادی جسم انعطاف پذیر را می‌توان از طریق اندازه‌گیری مبدل‌های جابجایی از قبیل حسگرهای فیبر نوری، حسگرهای انحراف نوری یا قطعات خازنی مورد سنجش قرار داد. این نکته نیز حائز اهمیت است که دامنه و دقت مبدل‌های جابجایی با انحراف جسم انعطاف پذیر در سامانه اعمال نیرو مطابقت داشته باشد به نحوی که قدرت تفکیک و دامنه نیروی موردنیاز بدست آید. سامانه‌ها را می‌توان به گونه‌ای طراحی کرد که اجسام انعطاف پذیر و تعویض پذیر را بتوان به منظور ارائه تفکیک پذیری بارها و دامنه‌های مختلف مورد استفاده قرار داد.

در هر دونوع کنترل حلقه باز و بسته، بزرگی نیرو مستقیماً کنترل می‌شود و داده‌های کنترل شده باید برای نوفه^۱ و نوسان جریان ولتاژ^۲ در مقادیر آنها به طور صحیح پالایش (فیلتر) شوند.

سامانه‌های اعمال بار که از یک جسم انعطاف پذیر برای ایجاد بار اعمالی استفاده می‌کنند را می‌توان بدون کنترل بار فعال مورد استفاده قرار داد، اما اگر یک نمونه با سطح نا هموار یا نمونه زبر^۳ مورد استفاده قرار گیرد، یا زمانی که سایش پروب یا نمونه رخ می‌دهد، تغییرات ناخواسته دربار به کاربرده شده به وجود خواهد آمد. به همین دلیل، غالباً کنترل بار فعال مورد استفاده قرار می‌گیرد به نحوی که بار به دست آمده با بار مورد نیاز مقایسه می‌شود و موقعیت سازوکار اعمال بار، غالباً به وسیله یک فعال کننده پیرو با سازوکار بازخورد تنظیم می‌شود، به نحوی که بار واقعی مطابق با بار موردنیاز شود.

برای عملی کردن این روش، از کنترل حلقه باز و یا کنترل حلقه بسته استفاده می‌شود. در کنترل حلقه بسته، مقایسه مستقیم میان بار واقعی و بار موردنیاز، به وسیله سیگنال تولید شده متفاوت به وجود می‌آید که به منظور تحریک فعال کننده پیرو مورد استفاده قرار می‌گیرد تا بار مورد نیاز ایجاد شود. از مزایای این روش سریع بودن آن است اما تنظیم پارامترهای کنترل حلقه بسته به طوری که بازخورد و اثرات ناخواسته در کنترل مشاهده نشوند، مشکل است.

کنترل حلقه باز هنگامی است که در آن یک رایانه خارجی مقایسه را انجام می‌دهد و فرمانی را به سامانه اعمال بار ارسال می‌کند تا بار اعمال شده صحیح به دست آید. نقص این رویکرد این است که زمان عکس‌العمل محرک می‌تواند طولانی باشد.

یک نوع روش مناسب که می‌تواند آزمون‌های روی نمونه‌های دارای سطحی با شکل پیچیده را تسهیل کند، انجام یک روبش اولیه در سطح نمونه با اعمال بارسبک و ثبت موقعیت عمودی پروب است. این فرم اندازه‌گیری شده را می‌توان به منظور تعیین مسیر سنجش مورد استفاده قرار داد و با کاهش اندازه حرکت بازخورد کنترل به کنترل بار بهتری دست یافت.

۵-۱-۵ اندازه‌گیری اصطکاک

اندازه‌گیری اصطکاک معمولاً از طریق اندازه‌گیری انحراف جسم انعطاف‌پذیر با استفاده از مبدل‌های جابجایی یا با کارگیری سنجه‌های تعیین کرنش به طور مستقیم روی جسم انعطاف‌پذیر انجام می‌شود. اگر اندازه‌گیری جابجایی انجام شود، حسگرهای فیبرنوری، حسگرهای انحراف نوری و یا قطعات خازنی را می‌توان به این منظور مورد استفاده قرار داد. در بررسی مقادیر کوچک اصطکاک که در برخی از مواد دیده می‌شود مسئله مهم‌تر از کنترل بار به کار رفته این است که دامنه و دقت مبدل‌های جابجایی با انحراف جسم انعطاف‌پذیر در سامانه اعمال بار مطابقت داشته باشد تا توان تفکیک و محدوده بار موردنیاز به دست آید.

در این زمینه، این مسئله حائز اهمیت است که اطمینان حاصل شود که محورهای دو نیروی اندازه‌گیری شده (F و N) در طول فرآیند اندازه‌گیری بر یکدیگر عمود بمانند.

۵-۱-۶ اندازه‌گیری سایش در زمان واقعی

اصولاً اندازه‌گیری سایش در زمان واقعی را می‌توان از طریق اندازه‌گیری جابجایی نسبی نمونه و پروب به دست آورد. این امر را می‌توان مانند حالت اندازه‌گیری اصطکاک با استفاده از حسگرهای فیبرنوری، حسگرهای انحراف نوری و یا قطعات خازنی انجام داد. با این وجود جابجایی‌های بسیار کوچکی که احتمالاً در این آزمون‌ها رخ می‌دهند به این معنی هستند که اثرات ناخواسته ایجاد شده، برای مثال انبساط حرارتی مسیر مکانیکی میان دو نمونه یا بی‌نظمی‌های موجود در نمونه مورد آزمون، اندازه‌گیری‌ها را در زمان واقعی دشوار می‌سازد.

می‌توان اندازه‌گیری‌های جابجایی نسبی (جابجایی یک نمونه نسبت به نمونه دیگر به علت سایش) را انجام داد اما زمانی که یکی از نمونه‌ها نسبت به نمونه دیگر حرکت می‌کند، اندازه‌گیری مشکل است.

۵-۱-۷ کنترل دما

بسیاری از سامانه‌های آزمون توانایی آزمایش در دمای کنترل شده را دارند. در مورد طراحی سامانه‌های آزمون برای انجام آزمون‌ها در دمای کنترل شده باید دقت لازم اعمال شود. نکته مهم گرم کردن و خنک کردن نمونه و پروب با هم است به گونه‌ای که نتایج آزمون تحت تأثیر اختلاف دمایی غیرمنتظره قرار نگیرند. این نکته نیز مهم است که ابزارهای اندازه‌گیری تحت تأثیر گرم یا خنک کردن نمونه واقع نشوند. در این جا می‌توان از روش انبساط سنجی^۱ استفاده کرد که البته انجام آن در مورد بارهای کوچک و تماس‌های با اندازه کوچک مشکل است. در این مورد باید اندازه‌گیری دما انجام شود تا اطمینان حاصل شود که دمای واقعی نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود، این کار معمولاً از طریق قرار دادن دقیق ترموکوپل‌ها در مجاورت نمونه‌های مورد آزمون انجام می‌شود. این یک نکته ویژه در مورد حرکت نمونه متحرک است که در آن سختی نوک ترموکوپل می‌تواند اندازه‌گیری اصطکاک را تحت تأثیر قرار دهد.

۵-۲ پارامترهای آزمون

۵-۲-۱ کلیات

رفتار مواد در تماس‌های تریبولوژیکی به طیف وسیعی از پارامترهای مختلف آزمون بستگی دارد. زمانی که اندازه تماس به کمتر از مقیاس ماکرو کاهش پیدا کند، در تأثیر عوامل مختلف تغییر ایجاد می‌شود (به عنوان مثال عواملی از قبیل نیروهای موئینگی مربوط به حضور مایعات در تماس تریبولوژیکی) اهمیت زیادی پیدا می‌کنند. پارامترهایی که باید به‌طور متداول در یک آزمون در نظر گرفته شوند شامل موارد زیر می‌باشند:

- شکل هندسی تماس
- بار اعمال شده
- نوع حرکت
- سرعت نسبی
- صلبیت^۲ سامانه آزمون
- مواد فصل مشترک^۳
- ماده بدنه پروب
- ماده مورد آزمون^۴ (نمونه)
- تمیزی سطح

1-Extensometry
2-Stiffness
3-Interface materials
4- Counterbody material

- ناهمواری و زبری سطح

- محیط

این پارامترهای مختلف آزمون در ادامه این بحث، توضیح داده می‌شوند.

۵-۲-۲ شکل هندسی تماس

یک عامل بسیار مهم شکل هندسی تماس است. غالباً تماس میان یک پروب شکل‌دار و یک نمونه مسطح وجود دارد. این روش معمولاً به استفاده از دو نمونه مسطح ترجیح داده می‌شود زیرا دستیابی به یک تراز مناسب نمونه‌های مسطح مشکل است. تنش‌های تماس ایجاد شده در نمونه‌ها شدیداً وابسته به شکل آن‌هاست، بنابراین مهم است که شکل سوزن پروب قبل از شروع آزمون‌ها به درستی مشخصه‌یابی شود. در برخی از موارد هر دو نمونه ممکن است شکل‌دار باشند، همانند شکل هندسی که قبلاً به‌طور متداول در دستگاه‌های اندازه‌گیری نیروی سطحی مورد استفاده قرار گرفته است و در آن دو نمونه استوانه‌ای شکل با هم در تماس قرار می‌گیرند.

مشخصه‌یابی شکل سوزن معمولاً از طریق روش‌های میکروسکوپی مختلف از قبیل میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)^۱ و AFM انجام می‌شود. میکروسکوپی نوری برای ارزیابی شکل کلی سوزن و کیفیت آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. برخی از میکروسکوپ‌های نوری براساس روش‌های هم‌کانونی یا تغییرپذیری کانون کار می‌کنند، توانایی سنجش ارتفاعی با توان تفکیک ۱۰ nm یا بیشتر را دارند اما دقت تفکیک‌پذیری جانبی محدود به حدود ۱۵۰ nm است میکروسکوپ الکترونی روبشی را می‌توان به نحوی بسیار مؤثر مورد استفاده قرار داد اما باید اطمینان حاصل کرد که راستای پروب به صورت بهینه برای اندازه‌گیری شکل قرار دارد. این نکته نیز مهم است که پروب را از چندین زاویه متفاوت مورد بررسی قرار داد زیرا تصویر ایجاد شده با SEM دوبعدی می‌باشد.

برای پروب‌های بسیار ریز می‌توان میکروسکوپی الکترونی عبوری (TEM)^۲ را مورد استفاده قرار داد.

شاید بهترین روش برای ارزیابی شکل پروب استفاده از AFM به منظور اندازه‌گیری شکل سوزن باشد. این روش هم در ارتفاع و هم در راستای جانبی توان تفکیک مناسبی دارد و اطلاعات به‌دست آمده را می‌توان به سادگی پردازش نمود تا اینکه تجزیه و تحلیل مناسبی از انحراف شکل نوک سوزن از شکل مورد نظر به‌دست آید. با این وجود احتیاط در مورد کالیبراسیون و کنترل خود AFM به منظور حذف یا کاهش خصوصیات غیرخطی و حلقه پسماند روبش در حرکت روبش AFM لازم است و هم چنین کالیبراسیون شکل سوزن AFM می‌تواند خود یک مسئله مهم باشد.

1-Scanning electron microscopy

2-Transmission electron microscopy

همچنین شکل سوزن را می‌توان از طریق تورفتن آن درون مواد مرجعی که شکل تورفتگی آن‌ها مشخص است ارزیابی کرد. شکل تورفتن^۱ را می‌توان اندازه‌گیری کرد یا شکل سوزن را می‌توان از طریق رفتار تورفتگی مشخص ماده مرجع محاسبه کرد.

معمولاً سوزن به شکل‌های کروی، مخروطی و هرمی شکل مانند وسیله ایجاد تورفتگی برکوویچ^۲ می‌باشد. وسیله تورفتگی ویکرز^۳ به دلیل پتانسیل در رأس گوه^۴ و به‌علت شکل چهار سویه، توصیه نمی‌شود. گوه‌ها را می‌توان برای آزمون‌های با تماس غلتشی مورد استفاده قرارداد اما باید در مورد حرکت آزادانه گوه‌های کوچک مورد استفاده در این آزمون‌ها دقت نمود.

غالباً پروب‌های الماس به‌علت در دسترس بودن و عدم ایجاد تغییر شکل در آن‌ها در تماس با مواد آزمون، مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آن جایی که بهتر است از موادی استفاده نمود که در کاربرد نهایی مناسب تر باشند استفاده از پروب‌های الماس باید به‌طور دقیق در نظر گرفته شود. تغییر شکل قابل ملاحظه می‌تواند در پروب‌های الماس نیز رخ دهد (به بند ۵-۲-۸ رجوع کنید).

۳-۲-۵ بار اعمال شده

میزان بار اعمالی میان پروب و سطح آزمون تأثیر زیادی بر بزرگی اصطکاک و سایش مشاهده شده دارد. معمولاً با افزایش بار اعمال شده سایش نیز بیشتر خواهد شد، اما اگر تغییری در سازوکار رخ دهد، این نتیجه‌گیری همیشه هم درست نیست. به‌ویژه در مورد بارهای کوچک، رابطه معمولی که در آن نیروی اصطکاک باید متناسب با بار اعمال شده باشد (قانون آمونتون) لزوماً قابل اجرا نیست و این به دلیل تأثیر پدیده‌هایی نظیر کشش سطحی هر نوع آب جذبی است که می‌تواند در مقیاس‌های کوچک بر رفتار مواد تأثیر بگذارد.

معمولاً از بار ثابت در این گونه آزمون‌ها استفاده می‌شود، اما در سامانه‌هایی که بار در حین انجام آزمون متغیر است، از سایر روش‌های اعمال بارهای فزاینده تدریجی یا بارهای پلکانی می‌توان استفاده کرد.

۴-۲-۵ نوع حرکت

نوع حرکتی که به‌کاربرده می‌شود نیز تأثیر زیادی بر سایش و اصطکاک ایجاد شده دارد. انواع متداول حرکت عبارتند از: حرکت متناوب، که در آن پروب در همان مسیر نمونه به عقب و جلو حرکت می‌کند، حرکت دایره‌ای هم‌محور، که در آن نمونه مسطح در تماس با پروب چرخانده می‌شود و آزمون تهیه تصویر^۵ که در آن پروب در تصویری روی سطح نمونه حرکت داده می‌شود. یک مورد از تفاوت‌های بین این نوع حرکت‌های متفاوت این است که آن‌ها میزان خارج شدن باقی‌مانده‌های^۶ تولید شده در فرایندهای سایش در حوزه تماس را تحت تأثیر قرار

-
- 1- Indentation
 - 2- Berkovitch indenter
 - 3- Vickers indenter
 - 4 -Wedge
 - 5- Raster
 - 6- Debris

می‌دهند. در لغزش تک محوری، باقی‌مانده‌ها غالباً از حوزه تماس زدوده می‌شوند. اگر باقی‌مانده‌ها در محل تماس باقی بماند می‌تواند جسم سومی ایجاد کند که باعث جدا کردن پروب از نمونه شده و اصطکاک و سایش‌هایی را که ممکن است رخ دهد، بیشتر تحت تأثیر قرار دهد.

یک اثر مهم دیگر به خود اندازه حرکت بستگی دارد، اگر یک حرکت کوچک رخ دهد به نحوی که قسمت زیادی از سطح در حوزه تماس، در حین حرکت در تماس باقی بماند، باقی‌مانده‌ها در قسمت تماس به دام انداخته می‌شود و در مقایسه با موردی که در آن سطوح از تماس با هم خارج می‌شوند سازوکارهای مختلفی را ایجاد می‌کند.

توجه به اندازه حرکت نیز مهم است. این مسئله باید همیشه با در نظر گرفتن اندازه حرکت مورد تجربه در کاربرد مشخص شود. با کاهش اندازه حرکت، به حداقل رساندن عکس‌العمل شدید در حرکت اهمیت بسیاری پیدا می‌کند. برای حرکت‌های بسیار کوچک با اندازه قابل مقایسه با مقیاس اندازه تماس، حالت تماسی تغییر پیدا می‌کند و از تماس سایشی لغزشی به حالت تماس خوردگی^۱ تبدیل می‌شود و سازوکارهای آسیب و تغییر شکل نیز به گونه‌ای دیگر خواهد بود.

۵-۲-۵ سرعت نسبی تماس

سرعت نسبی میان پروب و نمونه نیز می‌تواند اندازه سایش و اصطکاک را که ایجاد می‌شود، تحت تأثیر قرار دهد.

در حرکت متناوب، نیمرخ‌های متفاوتی وجود دارد، مانند موج سینوسی، موج مثلثی و موج مربعی، که برای سرعت می‌توان در نظر گرفت.

هم زمان با افزایش سرعت، گرمای ایجاد شده در سطح تماس نیز به احتمال زیاد افزایش پیدا می‌کند زیرا توان تلف شده در سطح تماس با رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$P = \mu N v$$

که در آن:

μ ضریب اصطکاک جنبشی

N بار عمودی بکار برده شده

v سرعت نسبی

اگر تغییر شکل ایجاد شده در سایش وابسته به سرعت باشد (برای مثال مانند رفتار ویسکوالاستیک مایعات)، تغییر سرعت می‌تواند فرآیندهای سایش را که به وقوع می‌پیوندد، تحت تأثیر قرار دهد.

۵-۲-۶ صلبیت و لختی سامانه آزمون

صلبیت و لختی اجسام سامانه آزمون می‌تواند تأثیر مهمی بر اندازه بزرگی اصطکاک و سایش در آزمون داشته باشد. صلبیت می‌تواند نتایج را به دو صورت تحت تأثیر قرار دهد. اگر نیرویی که بر نمونه وارد شده از طریق جسم انعطاف‌پذیر سامانه ایجاد شده باشد، هر نوع عدم دقت در صفحه حرکت به نحوی که پروب موازی با سطح حرکت نکند، در بار اعمال شده گرایشی را ایجاد می‌کند که به دلیل بار متغیر ایجاد شده در جسم انعطاف‌پذیر در ساز و کار اعمال بار، متغیر است. در محلی که سطح نمونه مسطح نیست، اجسام فنی (جهشی) در ساز و کار سامانه اعمال بار می‌توانند بارهای متغیری را ایجاد کنند که سایش را تحت تأثیر قرار دهند. در بدترین حالت، سطوحی که زبر هستند می‌توانند در اجسام مکانیکی سامانه اعمال بار را تشدید کنند و بارهای زیادی را به وجود آورند که می‌تواند آسیب زیادی را به سطح وارد کند.

اجسام لخت مانند جرم‌های موجود در سامانه می‌توانند اثرات مشابهی را ایجاد کنند. اندازه‌گیری تشدید سامانه آزمون با وجود نمونه‌ها و بدون وجود آن‌ها را می‌توان انجام داد تا پاسخ ارتعاشی سامانه آزمون را اندازه‌گیری کرد. ارتعاش سامانه آزمون در حین یک آزمون از طریق حرکت پروب بر روی نمونه القا می‌شود. ارتعاش غالباً همزمان با سرعت نسبی آزمون افزایش می‌یابد. این نکته حائز اهمیت است که فرکانس ارتعاش القا شده دور از فرکانس تشدید سامانه آزمون نگه داشته شود تا اثرات ناخواسته به وسیله ارتعاش به وجود آمده را به حداقل برساند.

۵-۲-۷ مواد فصل مشترک

حضور هر نوع مواد فصل مشترک در محل تماس میان پروب و نمونه، سایش و اصطکاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با کوچکتر شدن ابعاد محل تماس، اهمیت این اثر نیز افزایش پیدا می‌کند و این زمانی است که تأثیر آب یا سایر آلوده‌کننده‌های تماسی بیشتر شود و مقیاس محل تماس کوچکتر شود.

۵-۲-۸ مواد

مواد تشکیل دهنده دو سطح، نه تنها به دلیل برهم کنش‌هایی که می‌تواند میان مواد پروب و نمونه رخ دهد، بلکه به دلیل برهم کنش‌های احتمالی میان مواد نمونه با محیط احاطه کننده و یا هر نوع ماده اضافی موجود در محل تماس حائز اهمیت است.

مواد به علت خصوصیات فیزیکی از قبیل هدایت حرارتی اهمیت دارند، که این موضوع می‌تواند تأثیر مهمی بر پراکندگی انرژی اصطکاک ایجاد شده در محل تماس داشته باشد. وضعیت متالورژیکی مواد از قبیل عملیات حرارتی، جهت گیری ساختار بلوری و یا چگونگی کار سختی آن‌ها باید در نظر گرفته شود.

این نکته را باید مورد تأکید قرار داد که هم ماده پروب و هم ماده خود نمونه باید در نظر گرفته شوند. غالباً مجموعه‌ای از آزمون‌ها با یک پروب یکسان انجام می‌شود اما باید توجه داشت ماده پروب به‌عنوان بخشی از سامانه تریبولوژیکی در نظر گرفته شود.

دمای نمونه‌های آزمون باید ثابت نگه‌داشته شده و یا اینکه حداقل در طول آزمون پایش شود. در مورد آزمون‌هایی که تحت شرایط محیطی انجام می‌شوند معمولاً دانستن دمای محیط آزمون کفایت می‌کند زیرا گرمای تولید شده در این گونه آزمون‌ها معمولاً بسیار کم است و تأثیر زیادی بر دمای کلی نمونه ندارد. با این وجود، دمای موضعی در خود محل تماس ممکن است زیاد باشد، این مسئله به‌ویژه در مورد نقاط تماس با مقیاس نانو درست است. روش‌های کمی برای پایش دماهای ایجاد شده در این تماس‌ها وجود دارد.

در مورد سامانه‌های آزمون با سامانه‌های گرم‌کننده یا خنک‌کننده، دمای کلی در هر دو نمونه باید تحت کنترل قرار گیرد به نحوی که دمای نمونه همواره تحت کنترل قرار داشته و به مقادیر مطلوب برسد.

۱۰-۲-۵ شرایط سطح

در مورد تماس‌های با مقیاس کوچک این نکته مهم است که وضعیت سطح به خوبی مورد کنترل قرار گیرد تا این اطمینان حاصل شود که احتمال حضور آلوده‌کننده‌های سطحی از قبیل آب و چربی کاهش یابد. روش‌های مناسب جابجایی نمونه از قبیل استفاده از دست‌کش‌های تمییز و شستشوی نمونه با حلال‌های با درجه خلوص بالا به منظور حذف آلاینده‌ها باید مورد استفاده قرار گیرد.

باید توجه داشت که بسیاری از مواد از قبیل پلیمرها نسبت به حلال‌ها حساس هستند و یا این که می‌توانند در آن‌ها حل شوند. در این صورت باید از روش پاک‌کنندگی مناسب دیگری استفاده کرد.

۱۱-۲-۵ ناهمواری و زبری سطحی

زبری سطحی، نتایج بدست آمده از طریق صلیبیت و اثرات لختی را آن‌گونه که قبلاً عنوان شد، تحت تأثیر قرار می‌دهد. بسیار مشکل است که با وجود ناهمواری سطحی بیشتر از مقیاس آسیب ایجاد شده به‌وسیله آزمون بتوان به نتایج قابل اعتمادی دست یافت. بنابراین این مهم است که سطح نمونه به گونه‌ای آماده شود که صاف باشد.

۱۲-۲-۵ محیط

باید شرایط محیط آزمون، کنترل شود و یا حداقل به‌گونه‌ای اندازه‌گیری شود که این شرایط مجدداً قابل باز تولید باشد. آزمون‌ها ممکن است در هوا، در سایر گازها یا در خلأ و یا در مایعات انجام شوند.

خالص بودن گازها یا مایعات مورد استفاده باید مورد بررسی قرار گیرد، زیرا آلاینده‌ها، حتی در غلظت‌های پایین، می‌توانند تأثیر مهمی داشته باشند.

رطوبت تأثیر مهمی بر نتایج آزمون‌ها دارد و تأثیر آن هم‌زمان با کاهش مقیاس آزمون، افزایش می‌یابد. این مسئله ناشی از احتمال جذب سطحی آب یا حتی میعان در رطوبت‌های بالا در سطح تماس است. بنابراین

سنجش رطوبت هوا یا گاز در محیط احاطه کننده آزمون مهم است و کنترل رطوبت به همراه توانایی ایجاد تغییر در رطوبت برای بررسی تأثیر آن بر نتایج بسیار حائز اهمیت است.

۶ مراحل انجام آزمون

۱-۶ انواع مختلف آزمون

۱-۱-۶ کلیات

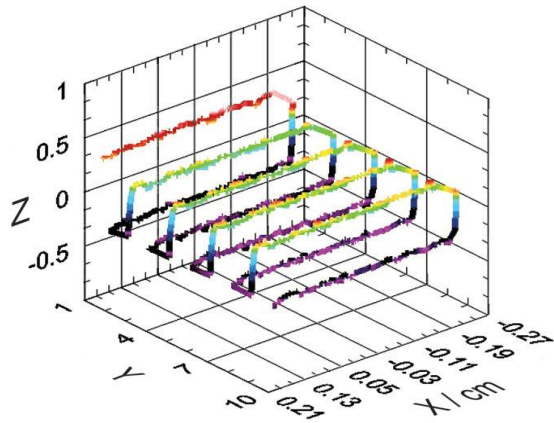
دو نوع آزمون اصلی وجود دارد که می‌توان انجام داد. نوع اول اندازه‌گیری اصطکاک است که در آن هدف اصلی اندازه‌گیری دقیق اصطکاک میان پروب و نمونه است. نوع دوم آزمون اندازه‌گیری مقدار از دست رفتن مواد از سطح نمونه به وسیله فرآیندهای سایش است.

البته آزمون‌های ترکیبی را می‌توان برای انجام هر دو اندازه‌گیری اصطکاک و از دست رفتن مواد به صورت هم‌زمان انجام داد.

۲-۱-۶ آزمون‌های اندازه‌گیری اصطکاک

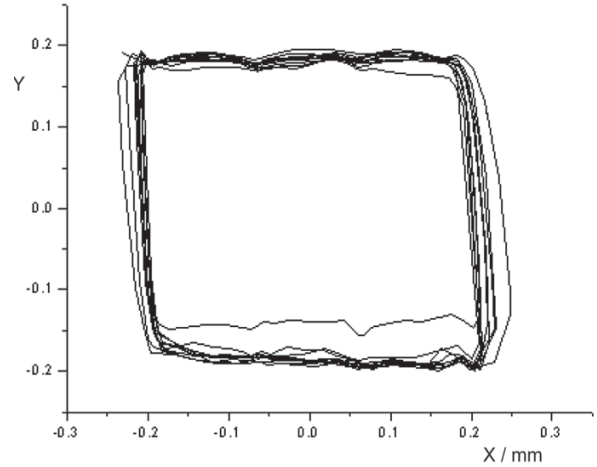
در این گونه آزمون‌ها هدف اولیه اندازه‌گیری اصطکاک است. سامانه‌های آزمونی که به صورت متداول توانایی اندازه‌گیری اصطکاک را دارا هستند، سنجش‌های اصطکاک را به صورت دیجیتالی ثبت می‌کنند. در این گونه آزمون‌ها ضروری است که خود نیروی اصطکاک ثبت شود زیرا لزوماً از قانون آمونتون تبعیت نمی‌کند، به‌ویژه زمانی که اندازه مقیاس محل تماس کاهش می‌یابد.

اگر در طول آزمون، نوساناتی در بار اعمال شده رخ دهد، ضروری است که اندازه بار اعمال شده نیز ثبت شود. اگر ضریب اصطکاک موردنیاز باشد، محاسبه ضریب اصطکاک از طریق تقسیم کردن اندازه‌های آنی نیروی اصطکاک و بار اعمال شده مفید است. با این وجود اگر این روش انجام شود، باید اطمینان حاصل کرد که داده‌های اندازه هر دو متغیر به‌طور هم‌زمان اندازه‌گیری می‌شوند، در غیر اینصورت، خطاهای بزرگی می‌تواند در محاسبه ضریب اصطکاک رخ دهد. نتایج اصطکاک می‌تواند به چندین روش ارائه شود. در مورد آزمون‌های رفت و برگشتی، رسم نمودار اصطکاک بر حسب جابجایی در مسیر تماس، با رسم یک نمودار حلقه‌ای اصطکاک، می‌تواند بسیار سودمند باشد (به شکل الف مراجعه شود). اگر اندازه‌گیری تغییرات زمانی حلقه اصطکاک نیز مورد نیاز باشد، در این صورت نمودار آبخاری روش مناسبی برای ارائه این اطلاعات است (به شکل ب مراجعه شود). نمودار نشانگر رفتار تغییرات میانگین اصطکاک بر حسب زمان یا بر حسب تعداد حلقه‌ها نیز مفید است. باید در مورد محاسبه اصطکاک میانگین دقت کرد. چندین روش متفاوت را در این مورد می‌توان به کار برد. یک روش متداول این است که حوزه‌ای از چرخه اصطکاک مشخص کرد، یا یک مجموعه معین از مکان‌های جابجایی یا بطور مثال حوزه ۵۰٪ مرکزی چرخه و سپس مقدار میانگین اصطکاک را در این حوزه برای هر حلقه محاسبه نمود. روش دیگر این است که مقدار میانگین اصطکاک برای یک حلقه را از محاسبه انتگرال مساحت حلقه به دست آورد (به شکل پ مراجعه شود).



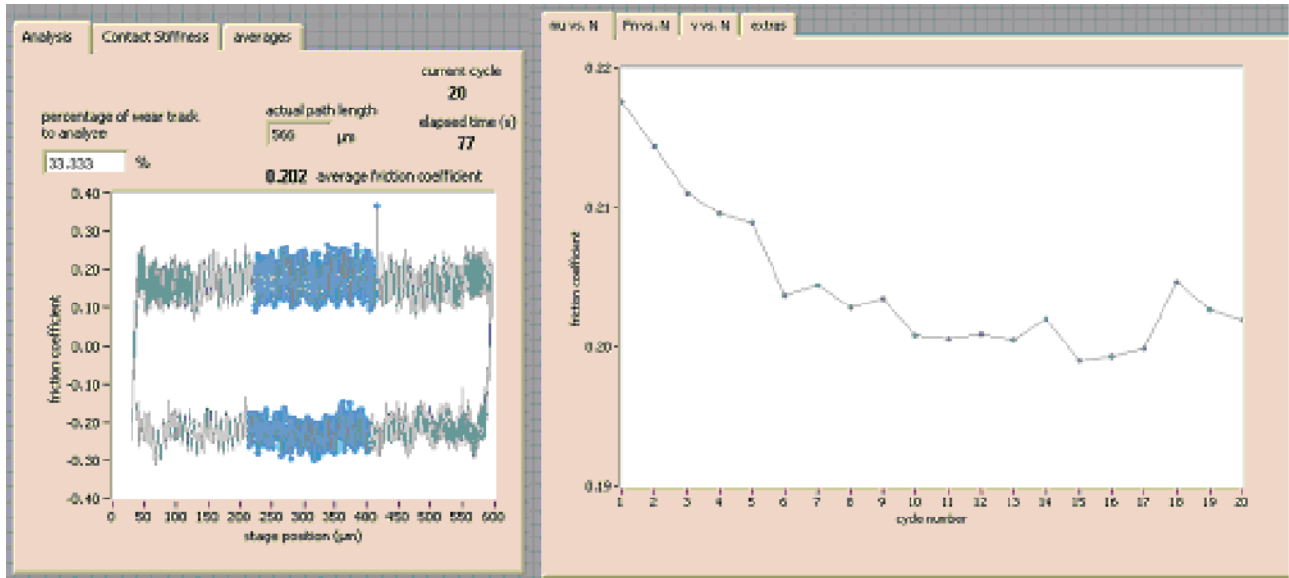
ب- نمودار آبخاری

راهنما:
 -X جایجایی
 -Y تعداد عبورها
 -Z ضریب اصطکاک



الف- حلقه اصطکاک

راهنما:
 -X جایجایی
 -Y ضریب اصطکاک



ب- محاسبه مقدار میانگین اصطکاک حاصل از ۵۰٪ مرکزی منحنی اصطکاک و نمودار روند نتایج

شکل ۱- نتایج اندازه گیری اصطکاک از آزمون های میکروتربولوژی انجام شده بر روی یک ویفر سیلیکونی الگودار

در آزمون های سایش، از دست رفتن مواد از سطح در زمان حرکت مکرر پروب بر روی سطح اندازه گیری می شود. این کار را می توان یا از طریق آزمون های زمان واقعی انجام داد که در آن حرکت نقطه ای ثابت از پروب به سمت نمونه در طول آزمون پایش می شود، یا از طریق اندازه گیری آسیب ایجاد شده پس از اتمام آزمون آن را انجام داد. باید توجه داشت که پروب هم ممکن است به علت وجود لایه های فصل مشترک در طول آزمون سایش از نمونه جدا شود.

پایش موقعیت نسبی پروب نسبت به سطح می تواند انجام شود که در عین حال اطلاعات مفید را ارائه می دهد، اما باید این نکته مشخص شود که این روش فقط معیاری برای آسیب به هر دو مواد در سطح تماس را ارائه می کند، که همان نمونه و پروب می باشند. در برخی از موارد، استفاده از پروب به منظور اندازه گیری نیمرخ سطح اولیه نمونه امکان پذیر است و این کار از طریق انجام یک روبش اولیه از سطح و تحت نیروی کم می باشد که به منظور ایجاد خسارت کمتر و یا عدم خسارت به سطح، قبل از شروع آزمون انجام می شود. این نیمرخ عرضی آغازین را می توان به عنوان مرجع اولیه مورد استفاده قرار داد که می تواند در اندازه گیری های بعدی از مکان پروب کاسته شود.

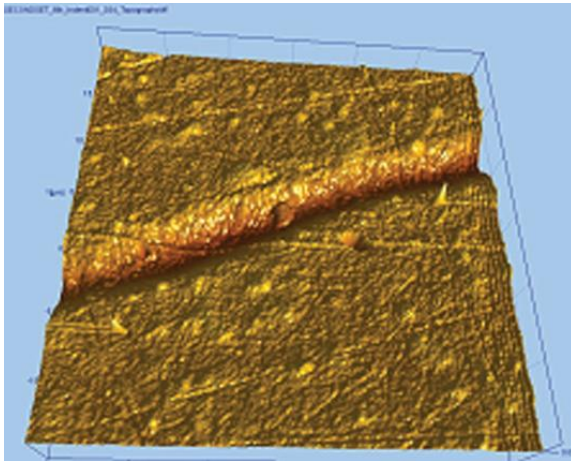
اندازه گیری های آسیب به نمونه را می توان به چند روش انجام داد. تعیین نیمرخ عرضی با استفاده از AFM روش مناسبی برای اندازه گیری آسیب است. این روش غالباً از طریق اندازه گیری نیمرخ عرضی سایش در راستای عمود بر مسیر حرکت انجام می شود. این روش می تواند از طریق اندازه گیری تعدادی از نقاط در طول مسیر انجام شود (حداقل ۳ نقطه توصیه می شود). پارامترهایی از قبیل عمق آسیب، پهنای مسیر سایش و مساحت سطح مقطع هر آسیب مهم است. بهتر است ناحیه ای از سطح روبش شود و سپس مساحت سطح مقطع میانگین ناحیه را از طریق داده های مساحت محاسبه کرد (به شکل ۲ مراجعه شود). این روش به ویژه برای خراشیدگی هایی مفید است که در آن ها ریخت شناسی^۱ خراشیدگی در طول خراش متغیر است.

میکروسکوپی نوری هم کانون نیز می تواند مورد استفاده قرار بگیرد. این روش تفکیک پذیری عمق مناسبی دارد (۱۰ نانومتر)، اما باید اطمینان حاصل کرد که این روش، توان تفکیک پذیری جانبی کافی برای ارزیابی آسیب سایش را به طور مؤثر دارد. تفکیک پذیری جانبی به وسیله طول موج نور محدود می شود.

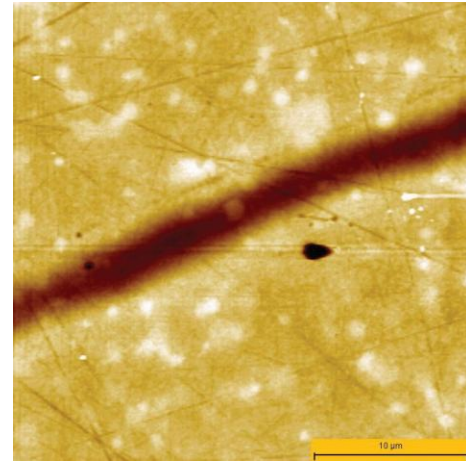
روش دیگر برای سنجش آسیب استفاده از عکس برداری به روش استریو SEM است. در این روش دو عکس یا بیشتر با زاویه های متفاوت گرفته می شود و یک نرم افزار برای محاسبه تصویر سه بعدی آسیب، مورد استفاده قرار می گیرد. باید به این نکته توجه داشت که غالباً در کناره های مسیرهای سایش برجستگی وجود دارد و ارائه تعریف معین از این لبه ها نیازمند دقت است.

از آن جایی که عمقها و حجمهای سایش با توجه به یک صفحه مرجع مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرند، این نکته مهم است که مجموعه داده‌های اندازه‌گیری شده به اندازه کافی بزرگ باشند و به خوبی تا اطراف ناحیه آسیب دیده توسعه یابند تا بتوان صفحه مرجع را به صورت دقیق مشخص نمود.

اگر ماده مورد آزمون یک پلیمر یا یک ماده با رفتار معنی دار وابسته به زمان^۱ باشد، زمان میان آزمون و اندازه‌گیری سایش باید به صورت دقیق انتخاب و ثبت شود. پس از به‌وجود آمدن آسیب، بعضی از پلیمرها با دمای انتقال شیشه‌ای^۲ (Tg) پایین در محدوده زمانی طولانی پس از آسیب جریان می‌یابند و شکل می‌گیرند.



ب- تصویر سه بعدی برجسته



الف- تصویر دوبعدی متعارف

شکل ۲- تصویر حاصل از میکروسکوپی الکترونی از یک خراش میکرو تریبولوژی ایجاد شده بر روی یک لایه نازک به ضخامت $3 \mu\text{m}$ از جنس TiAlN که روی زیرلایه‌ای فولادی پوشش داده شده است. خراش توسط یک وسیله ایجاد تورفتگی الماس به شعاع $10 \mu\text{m}$ و تحت نیروی 50 mN کشیده شده است. توجه شود که عمق خراش در حدود 40 nm است.

۲-۶ روش‌های آزمون سطح

بخش مهمی از هر نوع آزمون نانو تریبولوژی بررسی تغییرات سطح است که در طول آزمون رخ داده است. گستره وسیعی از تجهیزات در این زمینه موجود می‌باشد.

بررسی هر دو سطح تماس مهم است (هم پروب و هم نمونه) زیرا ممکن است در هر دو تغییراتی ایجاد شود. غالباً بررسی سطوح قبل و بعد از یک آزمون مفید است تا بتوان مشخص نمود که تغییراتی رخ داده است یا نه و اینکه آیا لایه‌های نازک انتقالی یا آلاینده‌ها وجود دارند.

1- Significant time-dependent behaviour

2- Glass Transition Temperature

استفاده از میکروسکوپ‌های نوری برای بررسی شکل کلی آسیب مفید است، اما کاربرد آن‌ها به علت حد تفکیک‌پذیری نوری محدود است.

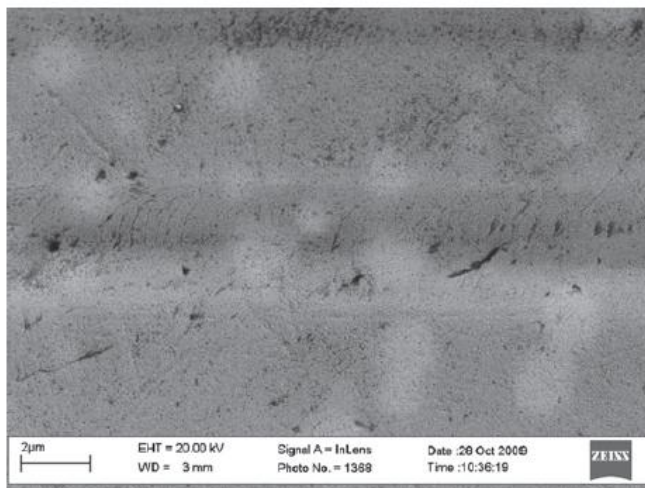
میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM مکرراً مورد استفاده قرار می‌گیرد و با تفکیک‌پذیری کمتر از ۱ nm یا تفکیک‌پذیری بهتر، از دستگاه‌های نشر میدانی برای اکثر مقاصد مرتبط با آزمون‌های نانوتریبولوژی دارای تفکیک‌پذیری کافی است (به شکل ۳ مراجعه شود). تصاویر SEM را هم چنین می‌توان با طیف‌سنجی پرتو X با پراکندگی انرژی (EDS)^۱ مشاهده کرد که می‌توانند تجزیه و تحلیل شیمیایی عنصری با تفکیک‌پذیری تا حدود ۰/۲ μm و یا با روش پراش الکترون برگشتی (EBSD)^۲ ترکیب نمود که می‌تواند تجزیه و تحلیل پراش را ارائه دهد (اطلاعاتی در مورد ساختار بلوری و تغییر شکل).

میکروسکوپی الکترون عبوری (TEM)^۳ نیازمند آماده‌سازی نمونه‌های شفاف نسبت به عبور الکترون‌هاست، با این وجود اگر این شرایط فراهم شود، TEM اطلاعات بی‌نظیری را در مورد ساختار ماده با تفکیک‌پذیری نزدیک به ابعاد اتمی ارائه می‌دهد. بررسی تغییرات ساختار نمونه‌ها در زیر سطح حوزه تماس اهمیت ویژه‌ای دارد.

هم‌چنین غالباً AFM به منظور بررسی ناهمواری آسیب ایجاد شده بوسیله آزمون‌های نانوتریبولوژی کاربرد دارد و دارای تفکیک‌پذیری تا حدود مقیاس‌های اتمی است.

هم‌چنین از سایر روش‌های تجزیه و تحلیل می‌توان استفاده کرد که شامل طیف‌سنجی جرمی یون ثانویه (SIMS)^۴ و یا اوژر^۵ و طیف‌نگاری فوتوالکترون پرتو X (XPS)^۶ است که اطلاعات جزئی در مورد ساختار شیمیایی با میزان تفکیک‌پذیری در عمق چند نانومتری را ارائه می‌دهد.

-
- 1- Energy dispersive spectrometry
 - 2- Electron back-scattered diffraction
 - 3- Transmission electron microscopy
 - 4- Secondary ion mass spectrometry
 - 5- Auger
 - 6- X-ray photoelectron spectroscopy



شکل ۳- خراش ایجاد شده به وسیله آزمون میکروتربیولوژی روی یک پوشش $3 \mu\text{m}$ که روی زیرپایه فولادی پوشش داده شده است. خراش با $50 \mu\text{m}$ عبور یک وسیله ایجاد تورفتگی الماس به شعاع $1 \mu\text{m}$ و تحت بار 50 mN خراش ایجاد شده است.

۷ قابلیت تجدید پذیری و تکرارپذیری آزمون و محدودیت‌ها

در خصوص قابلیت تجدید پذیری و تکرارپذیری انواع آزمون‌های تعریف شده در این استاندارد اطلاعات کمی در دسترس است. فعالیت‌های بین آزمایشگاهی برای پر کردن این خلاء مورد نیاز است.

منابع عدم قطعیت در این اندازه‌گیری‌ها از اثرات دستگاه‌ها، آزمونگر و تغییرپذیری ذاتی در نتایج ناشی از ماهیت تصادفی فرآیندهای سایش، می‌باشد. عدم قطعیت وابسته به اثرات دستگاه‌ها را می‌توان از طریق طراحی مناسب سامانه کاهش داد، عدم قطعیت در مورد آزمونگرهای مختلف را می‌توان با پیروی از رویکردهای آزمونی مناسب و به‌دقت طراحی شده کاهش داد.

بسیاری از این جنبه‌های عدم قطعیت را می‌توان با استفاده از مواد مرجع کاملاً شناخته شده مورد آزمایش قرارداد. با این وجود، هیچگونه مواد مرجع تجاری برای این گونه آزمون‌ها وجود ندارد، اگرچه می‌توان مواد مرجع داخلی را برای آزمون‌های داخلی تهیه کرد.

۸ گزارش آزمون

یک گزارش جامع و منسجم از آزمون باید نوشته شود تا هر کار انجام شده را تعریف نماید. این گزارش باید تمامی عناصر اصلی را در برداشته باشد از قبیل:

- جزئیات مواد و تجهیزات آزمون

- مراحل انجام آزمون

- نتایج آزمون

- تجزیه و تحلیل

- نتیجه گیری

گزارش باید به گونه‌ای نوشته شود که فرد واجد شرایط بتواند آزمون‌های تعریف شده را مجدداً انجام دهد. توصیه می‌شود که تمامی پارامترهای فهرست شده در بند ۵-۲-۱ گزارش شوند.

پیوست الف

(اطلاعاتی)

کتابنامه

- [1] Dugger, M.T., Tribology in Microsystems, Proceedings of the Symposium TRIMIS 2003: Microtribology - Tribology of Microsystems, 1–3 June 2003, Neuchâtel, Switzerland
- [2] Mollenhauer, O., Ahmed, S.I.-U., Spiller, F. and Haefke, H., High Precision Positioning and Measurement Systems for Microtribotesting, Proceedings of the Symposium TRIMIS 2003: Microtribology - Tribology of Microsystems, 1–3 June 2003, Neuchâtel, Switzerland
- [3] Opitz, A., Ahmed, S.I.-U., Schaefer, J.A., and Scherge, M., Friction of Thin Water Films: a Nanotribological Study, Surface Science, 504 (2002), pp. 199–207
- [4] Ahmed, S.I.-U., Bregliozzi, G., Haefke, H. and Steinmann, P.-A., Microfrictional Properties of Selfassembled monolayers as a function of their chemical composition, Proceedings of the First Vienna International Conference on Micro and NanoTribology, 9–11 March 2005, Vienna, Austria
- [5] Drees, D., Celis, J. P. and Achant, S., Friction of thin coatings on three length scales under reciprocating sliding, Surface and Coatings Technology, 188–189 (2004), pp. 511–518