

چشم‌انداز فناوری نانو در مهندسی مکانیک

انوشیروان فرشیدیان‌فر، دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

farshid@ferdowsi.um.ac.ir

علی اصغر قصابی، دانشجوی کارشناسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

al_qa757@stu-mail.um.ac.ir

محمدحسین فرشیدیان‌فر، دانشجوی کارشناسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

mo_fa160@stu-mail.um.ac.ir

چکیده

"در پایین، فضای فراوانی وجود دارد"^۱. همانگونه که ریچارد فاینمن^۲ در سال ۱۹۵۹ به طور غیرمستقیم بیان کرد، باید منتظر انقلابی عظیم در عرصه علم و فناوری باشیم. او اعلام کرد دوست دارد همه دایرة المعارف را در نوک سوزنی جای دهد. این همان چیزی است که اکنون با جرأت می‌توان گفت امکان‌پذیر است و فناوری نانو چنین جسارتی را به دانشمندان می‌دهد تا اینچنین ادعاهایی را بیان کنند. در دهه‌های اخیر بی‌شک این فناوری نانو بوده است که توجه همه دانشمندان علوم و مهندسی را به خود جلب کرده است. در این میان طرح این سوال دور از انصاف نخواهد بود که نقش مهندسی مکانیک در کمک به این انقلاب علمی و صنعتی چیست؟! با توجه به اهمیت موضوع سعی بر آن شد تا در کلماتی هر چند کوتاه به بیان پیشرفتهای ایجاد شده در این زمینه بپردازیم و نانو مکانیک و بعضی از شاخه‌های آن مانند: نانوسیالات^۳، نانوتریبولوژی^۴ و سیستم‌های میکرو-نانو الکترومکانیکی^۵ را معرفی کنیم.

واژه‌های کلیدی: نانو مکانیک، نانوسیالات، نانوتریبولوژی، سیستم‌های میکرو-نانو الکترومکانیکی

مقدمه

مهندسی تمرکز می‌کند. این سیستمها شامل نانو ذرات^۶، نانو پودرها^۷، نانو میله‌ها^۸، نانو نوارها^۹، نانو لوله‌های کربنی^{۱۰} و نانو لوله‌های نیتريد بور^{۱۱}، نانو پوسته‌ها^{۱۲}، سیال با نانو ذرات پراکنده در آن و نانو موتورها^{۱۳} و غیره هستند [۱].

بعضی از زمینه‌های شناخته شده نانو مکانیک شامل نانو سیالات، نانوتریبولوژی (اصطکاک، خوردگی و مکانیک

نانو مکانیک شاخه‌ای از علم نانو است که به مطالعه خواص مکانیکی (حرارت، سینتیک، الاستیسیته و غیره) سیستم‌های فیزیکی در مقیاس نانو می‌پردازد.

اغلب نانو مکانیک به عنوان شاخه‌ای از نانوفناوری مطرح می‌شود که عرصه‌ای کاربردی دارد و بر روی ویژگیهای مکانیکی نانو سیستمها و نانو ساختارهای



تماسی در مقیاس نانو) و سیستمهای میکرو- نانو الکترومکانیکی است.

می‌باشد. این سیالات عموماً آب، روغن و اتیلن گلیکول هستند که در مقایسه با جامدات ضریب هدایت ناچیزی دارند (جدول ۱).

(الف) نانوسیالات

مقدمه

پیشرفتهای اخیر در نانو فناوری اجازه ایجاد نوع جدیدی از سیالها بنام نانوسیالات را داده که برای اولین بار بوسیله گروهی در آزمایشگاه ملی آرگون^{۱۴} آمریکا بکار رفته است.

اما سوال اینجاست که دلیل روی آوردن دانشمندان به چنین سیالهایی چیست؟

با توجه به رشد روزافزون صنایع مختلف، طراحی و بهبود سیستمهای انرژی با کارایی بالاتر و مصرف انرژی پایین تر ضروری می‌باشد. این امر کشورهای مختلف را بر آن داشته که با استفاده از روشهای نوین بهینه‌سازی سیستمهای انرژی جهت صرفه‌جویی انرژی و مصرف سوخت و در نتیجه کاهش هزینه‌ها و کاهش آلودگی هوا روی آورند. در کشور ما نیز با توجه به نیاز مبرم به صرفه‌جویی انرژی و طرح مباحثی مثل اصلاح الگوی مصرف، بکارگیری روشهای نوین و پیشرفته بهینه‌سازی انرژی الزامی به نظر می‌رسد. افزایش رسانش گرمایی می‌تواند پایه‌ای برای نوآوریهای بسیار زیادی در افزایش انتقال حرارت فراهم کند که به بخشهای صنعتی مانند انتقال انرژی، تولید قدرت، صنایع شیمیایی و متالورژیکی و همچنین گرمایش، خنک‌سازی و صنایع تهویه مطبوع مربوط می‌شود [۲].

یکی از محدودیت‌های اساسی بر سر راه توسعه و پیشرفت مبدل‌های حرارتی، ضریب هدایت حرارتی بسیار پایین سیالات عامل بکار رفته در این تجهیزات

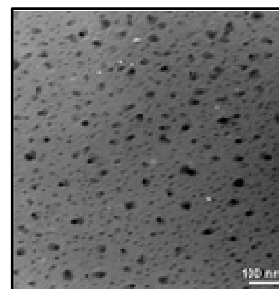
جدول (۱)- ضریب هدایت گرمایی مواد مختلف

ضریب هدایت گرمایی (W/mK)	نوع ماده	حالت مواد
۴۲۹	نقره	جامد فلزی
۴۰۱	مس	
۲۳۷	آلومینیوم	
۳۳۰۰	الماس	جامد غیر فلزی
۳۰۰۰	نانو لوله کربنی	
۱۴۸	سیلیکون	
۴۰	اکسید آلومینیوم	مایع فلزی
۷۲.۳	سدیم	
۰.۶۱۳	آب	
۰.۲۵۳	روغن موتور	مایع غیر فلزی
۰.۱۴۵	اتیلن گلیکول	

به عنوان مثال ضریب هدایت حرارتی اکسید آلومینیوم در دمای محیط حدود ۶۷ برابر آب و ۲۷۵ برابر روغن موتور است. به همین دلیل، پیش‌بینی می‌شود که اضافه کردن ذرات جامد معلق فلزی یا اکسید فلزی به سیالات باعث افزایش هدایت حرارتی آنها گردد. این ایده سابقه طولانی دارد به طوری که برای اولین بار در سال ۱۸۸۱ میلادی، ماکسول [۳] به مدل‌سازی ضریب هدایت حرارتی در اثر افزودن ذرات جامد به سیالات پرداخت. ذرات جامد مورد مطالعه تا سالهای اخیر در اندازه‌های میلیمتری یا نهایتاً میکرومتری بوده‌اند که به دلیل سنگینی، ته‌نشینی سریع و بروز مشکلاتی مانند انسداد مجاری، ایجاد سایش و خوردگی جداره‌ها و افزایش افت فشار را به دنبال داشته‌اند. خصوصاً این



ذرات به دلیل اندازه بزرگ در کانال‌هایی با ابعاد میکرومتری قابل استفاده نبوده‌اند. در نتیجه استفاده از ذرات جامد جهت بهبود راندمان حرارتی مبدل‌ها با مشکل جدی مواجه شد. تا اینکه فن‌آوری جدید نانو امکان تولید ذرات در ابعاد نانو را فراهم آورد. Choi از آزمایشگاه ملی آرگون آمریکا، در سال ۱۹۹۵ اولین بار اصطلاح جدید نانوسیال را ارائه کرد و موضوع نانوسیال را به‌عنوان محیط جدید انتقال حرارت مطرح نمود [۴]. نانوسیالات از طریق اضافه کردن نانوذرات (با میانگین اندازه ذرات زیر ۱۰۰ nm) در سیالات عامل مرسوم انتقال حرارت چون آب، اتیلن گلیکول و روغن تهیه می‌شوند. مقدار بسیار کمی از ذرات نانوی مهمان بعد از پخش یکنواخت و تعلیق پایدار داخل سیال میزبان، توانایی بهبود چشم‌گیر خواص انتقال حرارتی سیال میزبان را دارند. شکل (۱) تصویری از نانو ذرات معلق در اتیلن گلیکول را نشان می‌دهد.

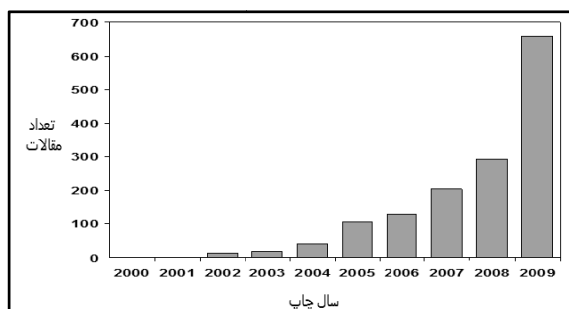


شکل (۱) - ذرات معلق $Al_{70}Cu_{30}$ در اتیلن گلیکول

مطالعات انجام شده در حوزه نانو سیالات

با معرفی مفهوم جدید نانوسیالات، مهندسی و دانشمندان حرارتی شروع به کشف خصوصیات حرارتی دور از انتظار نانوسیالات کردند. به عنوان مثال ایستمان و همکاران [۵] به مطالعه نانو سیال‌هایی پرداختند که دارای نانو ذرات مس پوشیده شده با اسید تیوگلیکولیک با غلظت خیلی کم (۰/۳ درصد حجمی)

هستند و باعث افزایش ۴۰ درصدی هدایت حرارتی اتیلن گلیکول شدند. جوی و همکاران [۶]، هانگ و همکاران [۷]، مرشد و همکاران [۸] طی آزمایشاتی به نانوسیالاتی شامل نانو لوله‌های کربنی بسیار باریک دست یافتند که دارای رابطه‌ای غیر خطی بین هدایت حرارتی و غلظت هستند. داس و همکاران [۹] به وابستگی دمایی بسیار زیاد هدایت حرارتی نانو سیال‌ها پی بردند، به این معنی که هدایت حرارتی نانو سیال‌های اکسید آلومینیوم و اکسید مس، در دماهای پائین بین $(20^{\circ}C)$ تا $(50^{\circ}C)$ ، دو تا چهار برابر سیال پایه است. چان و همکاران [۱۰]، چاپکار و همکاران [۱۱] طی مطالعاتی به این نتیجه رسیدند که هدایت حرارتی نانو سیال وابستگی زیادی به اندازه مواد معلق در آن دارد. رشد نمایی و سریع مطالعات در زمینه نانوسیالات بیانگر اهمیت این موضوع است. شکل (۲) افزایش تحقیقات در این زمینه را نشان می‌دهد.



شکل (۲) - نرخ مقالات علمی فناوری نانو سیالات

کاربردهای نانوسیال‌ها

نانوسیالات در حوزه وسیعی از کاربردهای صنعتی و پزشکی می‌تواند قابل استفاده باشد:

۱) مبدل‌های حرارتی

مبدل‌های حرارتی کاربردهای فراوانی در صنایع

مختلف مانند نفت، گاز و نیروگاه‌ها دارند و افزایش بازده حرارتی این تجهیزات، میلیاردها دلار صرفه‌جویی اقتصادی را در پی دارد. در مبدل‌های حرارتی که با سیالات مرسوم کار می‌کنند، با افزایش سرعت سیال، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد که نتیجه آن، افزایش قابل‌ملاحظه در توان مصرفی پمپ است. نانوسیالات با بهبود چشمگیر خواص انتقال حرارتی سیال، بدون نیاز به افزایش سرعت سیال، افزایش انتقال حرارت و بازده مبدل و صرفه‌جویی در توان مصرفی پمپ را باعث می‌شوند. در نتیجه استفاده از نانوسیالات، کاهش اندازه، وزن مبدل و صرفه‌جویی انرژی و هزینه را به دنبال دارد.

۲) کاربرد در حمل و نقل

صنایع حمل و نقل نیازمند افزایش کارایی سیالات خنک‌کننده و تکنولوژی‌های سرمایه‌ش هستند. در حال حاضر سیالات خنک‌کننده موتور، روغن‌های موتور، سیالات انتقال قدرت و سایر سیالاتی که در دمای بالا کار می‌کنند، خواص انتقال حرارتی پایینی دارند. نانوسیالات با بهبود خواص انتقال حرارتی باعث کوچک‌تر و سبک‌تر شدن موتورها، پمپ‌ها، رادیاتورها و سایر اجزا و کاهش مصرف سوخت می‌شوند که این باعث کاهش هزینه‌ها و کاهش آلودگی محیط زیست می‌گردد.

۳) کاربرد در سرمایه‌های الکترونیکی

سیستم‌های الکترونیکی نظیر کامپیوترها، در حین کار مقدار زیادی حرارت تولید می‌کنند. این تولید حرارت با افزایش سرعت ریزپردازنده‌ها به شدت رو به افزایش است. نانوسیالات با جریان در کانال‌های میکرو، بدون مشکلاتی نظیر ته‌نشینی و انسداد مجاری، باعث سرمایه‌ش هر چه بیشتر این تجهیزات می‌گردند.

۴) افزایش خصوصیات روان‌کاری

افزودن ذرات نانو به روغن‌ها باعث افزایش ظرفیت حمل بار، کاهش ساییدگی اجزایی مثل یاتاقان‌ها و چرخ‌دنده‌ها و در نتیجه افزایش طول عمر این تجهیزات می‌شود.

۵) کاربرد در سیستم‌های گرمایشی و تهویه مطبوع

نانوسیالات با افزایش انتقال حرارت، بازده انرژی در سیستم‌های تهویه مطبوع و سردخانه‌ها را افزایش می‌دهند، که این امر باعث کاهش حجم این سیستم‌ها و افزایش فضای مفید ساختمان می‌گردد.

۶) کاربردهای پزشکی

نانوذرات مغناطیسی توانایی حمل دارو در بدن، تخریب سلول‌های سرطانی و ممانعت از تخریب بافت‌های سالم حین عمل جراحی را دارند. برخی از نانوسیالات نیز دارای خواص ضد باکتری هستند.

۷) دیگر کاربردها

از دیگر موارد کاربرد نانو سیالات می‌توان به استفاده در تجهیزات سنگین نظامی و فضایی جهت سرمایه‌ش مناسب این تجهیزات و نیز افزایش بازده ایمنی و اقتصادی سیستم‌های هسته‌ای اشاره کرد. همچنین نانوسیالات با افزایش انتقال حرارت در کلکتورهای خورشیدی، بازده این سیستم‌ها را نیز افزایش می‌دهند.

جمع‌بندی

با توجه به مطالب مذکور، مبحث نانوسیالات یکی از زمینه‌های تحقیقاتی - کاربردی بسیار جدید و مهم در مباحث مربوط به انرژی است که قادر است

محدودیت‌های روش‌های موجود جهت بهبود راندمان انرژی سیستم‌ها را برطرف کند.

جهت کاربرد مطلوب نانوسیالات، دستیابی به یک درک اساسی از مکانیزم‌های انتقال حرارت در نانوسیالات ضروری است. مدل‌های کلاسیک انتقال حرارت قادر به پیش‌گویی رفتار نانوسیالات نیستند. همچنین صحت مدل‌ها و مکانیزم‌های جدید ارائه شده در زمینه نانوسیالات هنوز مورد بحث است و توافقی در جامعه دانشمندان نانوسیالات در استفاده از آنها وجود ندارد و تاکنون تئوری جامعی برای انتقال حرارت در نانوسیالات ارائه نشده است.

علاوه بر این، داده‌های آزمایشگاهی کمی جهت بررسی مدل‌های مختلف وجود دارند. سهم واقعی مکانیزم‌های مختلف و پتانسیل آنها، تنها با آزمایشات منظم و قاعده‌مند زیاد قابل ارزیابی است. در کنار بررسی آزمایشگاهی مکانیزم‌های جدید، جمع‌آوری داده‌ها، مدل‌سازی، شبیه‌سازی و مطالعات تئوری نیز لازم است. در نتیجه مبحث نانوسیالات یکی از زمینه‌های تحقیقاتی و پژوهشی مهم پیش روی دانشمندان است.

(ب) نانوتریبولوژی و ساخت نانو روانکارها^{۱۵}

مقدمه

اگر اتومبیلی خریداری کرده‌اید که در طول مدت ۱۰ سال نیاز به تعویض روغن و یا گریس‌کاری نداشته، در این اتومبیل از روغن و گریسی استفاده شده که از مواد نانو ساخته شده است. اصلی‌ترین وظیفه نانو روانکاران کاهش اصطکاک و خوردگی قطعات همراه با دوام و کارایی بیشتر است. ورود این مواد به بازار مصرفی تغییرات بسیار زیادی را در این صنعت بوجود خواهد آورد.

مطالعه در مورد نیروی اصطکاک، چسبندگی^{۱۶}، سایش^{۱۷} و بدست آوردن روانکارهای جدید برای

کاهش این اثرات، در علم تریبولوژی بررسی می‌شود. واژه تریبولوژی دارای ریشه کلمه یونانی "تریبو" به معنی سایش و "لوژی" به معنی دانش است. کاربرد اولیه این علم در یونان باستان، شناخت عوامل حمل سنگ‌های بزرگ بر روی سطح زمین و بهبود آنها بوده است. در قرن گذشته تحقیقات گسترده‌ای برای بدست آوردن روانکارهای بادوام انجام شده که در نهایت منجر به استفاده از مواد افزودنی به روغن‌ها به منظور ارتقای کیفیت آنها شده است.

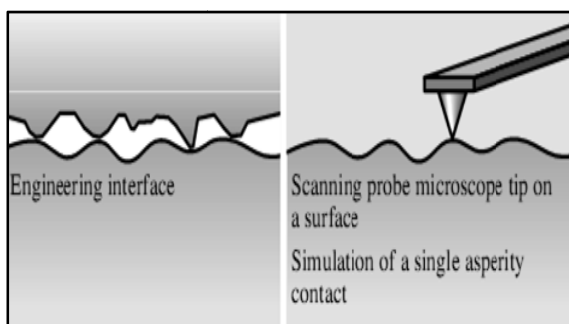
نانوتریبولوژی

نانوتریبولوژی شاخه‌ای از تریبولوژی است که به مطالعه پدیده‌های اصطکاک در مقیاس نانو می‌پردازد. تمایز نانوتریبولوژی با تریبولوژی اصولاً به علت درگیری نیروهای اتمی در تشخیص رفتار نهایی سیستم است [۱].

هدف نهایی تحقیقات در نانو تریبولوژی بدست آوردن روانکارهایی است که هیچگاه نیاز به تعویض و یا ترمیم نداشته باشند.

چرخ دنده‌ها، یاتاقان‌ها و روانکارهای مایع می‌توانند اصطکاک را در جهان ماکروسکوپیک کاهش دهند، اما مسئله اصطکاک در دستگاه‌های کوچکی مانند سیستم‌های میکرو و نانو الکترو مکانیکی نیاز به راه‌حل‌های دیگری دارد. علیرغم دقت بی‌نظیر چنین سیستم‌هایی که امروزه طراحی و ساخته شده‌اند، نسبت سطح به حجم بالای این سیستم‌ها منجر به اصطکاک و سایش شدید می‌شود که قابلیت کاربرد و طول عمر آنها را کاهش می‌دهد. بنابراین یکی از مهم‌ترین کارها در راه رسیدن به موادی برای کاهش اصطکاک، چسبندگی و غیره در مقیاس نانو، مطالعه این اصول است.

وسیع‌تری از انرژی‌ها، ساختارها، دینامیک، ترمودینامیک و جابه‌جایی در مقیاس اتمی را به دست می‌دهد و براساس آن، شناخت اولیه از نیروهای عمودی بین سطوح به دست می‌آید. مکمل این مطالعات، بررسی‌های انجام شده با این دو میکروسکوپ است، تا یک مدل از سختی و ناهمسانی در تماس با سطح جامد یا روغن کاری شده، ارائه شود (شکل ۳).



شکل (۳) - تصویری از یک سطح مهندسی و نوک میکروسکوپ در تماس با یک سطح مهندسی

این مطالعات مشخص کردند که رابطه بین اصطکاک و سختی سطوح همواره ساده و آشکار نیست [۱۲].

مطالعات نانوتریبولوژیکی

در این قسمت، به بررسی جنبه‌های مهم مطالعات نانو تریبولوژیکی و نانو مکانیکی برای کاربرد در نانو روانکارها می‌پردازیم.

اصطکاک در مقیاس اتمی

برای مطالعه چگونگی عملکرد اصطکاک در مقیاس اتمی، یک سطح شکافته شده از گرافیت^{۲۰} ابتدا بوسیله میت و همکاران [۱۳] و سپس توسط روان و بوشان [۱۴] مورد مطالعه قرار گرفت. شکل (۴.الف) طرح نیروی اصطکاک و توپوگرافی در مقیاس اتمی را نشان می‌دهد. میت و همکاران، همچنین در مقاله‌ای دیگر روان و بوشان گزارش کردند که

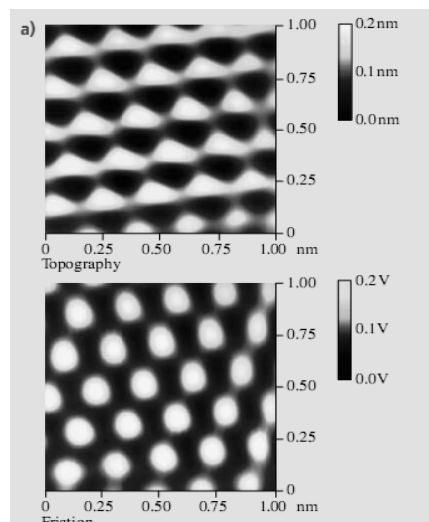
برای مطالعه اصول اولیه چسبندگی، اصطکاک، سایش و مراحل روغن کاری، باید سازوکارها و دینامیک کنش‌های بین دو جامد با حرکت نسبی، در مقیاس اتمی و میکرو، مورد بررسی قرار گیرند. اهمیت این موضوع باعث انجام پژوهش‌های فراوانی با دقت و کیفیت بالا پیرامون سطوح مشترک و پیدا کردن روش‌ها و ابزارهایی برای اصلاح و دستکاری ساختارها در مقیاس نانو شده است. این پیشرفت‌ها منجر به ظهور زمینه‌ای جدید در نانوتریبولوژی شده است که به تحقیقات نظری و تجربی فرایندهای موجود در سطوح مشترک در مقیاس‌های اتمی، مولکولی و میکرو می‌پردازد.

مطالعات نانوتریبولوژیکی، برای درک پدیده سطح مشترک در یک مقیاس کوچک، به منظور مطالعه کنش‌های بین صفحه‌ای در میکرو-نانوساختارها در سیستم‌هایی مانند: سیستم‌های ذخیره مغناطیسی^{۱۸}، سیستم‌های میکرو-نانوالکترومکانیک و خصوصیات مواد و نانومکانیک بسیار ضروری است.

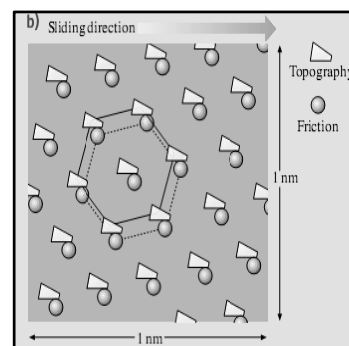
اصطکاک و سایش در اجزایی به ابعاد میکرو و نانو که در معرض بار کمی قرار گرفته‌اند، بستگی بسیار زیادی به کنش‌های سطحی دارد. بررسی‌های نانوتریبولوژیکی در فهم پدیده سطح مشترک در ساختارهای بزرگ نیز مفید است و باعث شده تا پلی میان علوم و مهندسی ایجاد شود.

بسیاری از مشاهدات محققان بوسیله میکروسکوپ نیروی اتمی صورت گرفته است. اصلاح و توسعه این میکروسکوپ منجر به ابداع میکروسکوپ نیروی اصطکاک^{۱۹} شده است که برای مطالعه در مقیاس‌های اتمی و میکرو کاربرد دارد. ضمناً مسئله مهم، یافتن اصول اولیه طبیعت پیوند و کنش فی مابین در مواد است که با توسعه روش‌های مدل‌سازی رایانه‌ای، موجب شده که مطالعات تئوریک پدیده پیچیده سطح مشترک، با دقت بالا در زمان و فضا صورت گیرد. چنین شبیه‌سازی‌هایی دید

نیروی اصطکاک میانگین بصورت خطی با بار عمودی افزایش می‌یابد. براساس (شکل ۴.الف) نیروی اصطکاکی سطح شکافته شده گرافیتی یک حالت نوسانی مانند توپوگرافی متناظر از خود نشان داد، اما جابه‌جایی قله‌ها در اصطکاک و توپوگرافی به صورت نسبی بوده است (شکل ۴.ب). از بسط فوریه پتانسیل بین اتمی، در محاسبه نیروهای بین اتم‌های نوک میکروسکوپ نیروی اصطکاکی و سطح گرافیتی استفاده شده است [۱۴] و معلوم شد که ماکزیمم نیروی بین اتمی در جهت‌های عمودی و جانبی، در یک محل روی نمی‌دهد، که این خود، جابه‌جایی قله‌ها در نیروی جانبی و نیرو در توپوگرافی متناظر را توجیه می‌کند.



شکل (۴.الف) - نمودار توپوگرافی سطح و نیروی اصطکاک در یک سطح 1nm*1nm تازه شکافته شده.



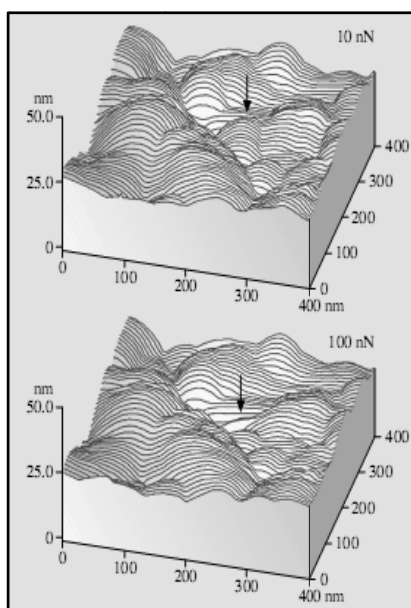
شکل (۴.ب) - طرح یک‌جای توپوگرافی و اصطکاک

سایش در مقیاس نانو

روان و بوشان [۱۵]، آزمایش‌های سایش در مقیاس نانو را با استفاده از نوک‌های نیتريد سیلیکون و تحت دو بار مختلف ۱۰ و ۱۰۰ نانو نیوتن روی نوارهای مغناطیسی پلیمری انجام داده‌اند (شکل ۵). اگر بار از ۱۰۰ نانو نیوتن تجاوز می‌کند، مواد در مسیر لغزش نوک میکروسکوپ نیرو اتمی فشرده می‌شوند. بنابراین، تغییر شکل و حرکت مواد نرم در مقیاس نانو قابل مشاهده است.

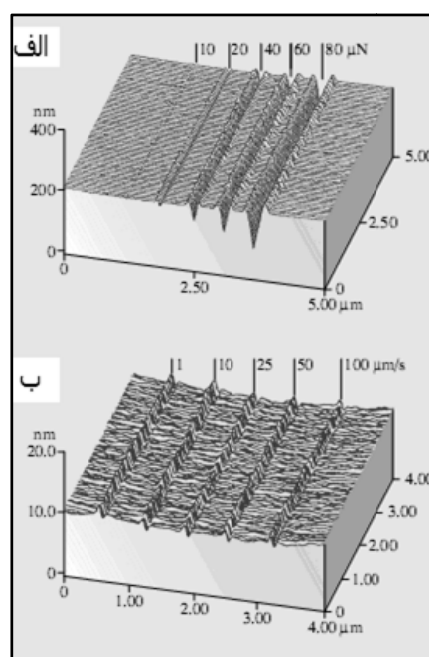
خراشیدگی در مقیاس میکرو^{۲۱}

از میکروسکوپ نیرو اتمی می‌توان در بررسی چگونگی حرکت مواد در مقیاس‌های نانو و میکرو، مانند خراش و سایش [۱۶ و ۱۷] (جایی که این حرکت نامطلوب است) و تولید و ماشین‌کاری (که حرکت مواد مطلوب است)، استفاده کرد.



شکل ۵ - نمودار سختی سطح یک نوار مغناطیسی پلیمری تحت بار عمودی 10nN, 100nN. محل تغییر در سطح توپوگرافی در نتیجه سایش، با فلش نشان داده شده است.

شکل (۶الف)، نشان‌دهنده میکروخرایش‌ها در Si(111) است که تحت بارهای مختلفی ایجاد و با سرعت $2\mu\text{m/s}$ پس از ده چرخه اسکن شده‌اند [۱۸]. همان‌طور که انتظار می‌رود، عمق خراش‌ها به صورت خطی با بار افزایش می‌یابد. چنین اندازه‌گیری‌هایی از میکروخرایش‌ها را می‌توان در مطالعه سازوکارهای شکست در مقیاس میکرو و برای محاسبه یکپارچگی مکانیکی (مقاومت در برابر خراش) در لایه‌های بسیار نازک و تحت بارهای کم، استفاده کرد.



شکل (۶) - نقشه سطح

الف) Si(111) که تحت بارهای مختلف و با سرعت اسکن $2\mu\text{m/s}$ در طی ده سیکل خراشیده شده است.

ب) Si(100) که تحت نیروی $80\mu\text{N}$ و سرعت‌های اسکن مختلف در طی یک سیکل یک سویه خراشیده شده است.

برای بررسی تأثیر سرعت اسکن، خراش‌های یک جهته و به طول $5\mu\text{m}$ ، با سرعت اسکن‌های بین یک تا $100\mu\text{m/s}$ و تحت بارهای عمودی متفاوت از $40\mu\text{N}$ تا $140\mu\text{N}$ ایجاد گردید. مطالعات نشان داد که سرعت، هیچ تأثیری

در اسکن‌های تحت بار عمودی ندارد. به عنوان مثال نمونه‌ای از پروفیل خراش تحت نیروی $80\mu\text{N}$ در شکل (۶ب) نشان داده شده است. این ممکن است به دلیل تأثیر اندک گرمایش اصطکاکی با تغییر در سرعت اسکن باشد. دیگر اینکه برای یک تغییر کوچک در دمای سطح مشترک، حجم زیادی برای پراکنده شدن گرمای تولید شده در اثر خراش وجود دارد.

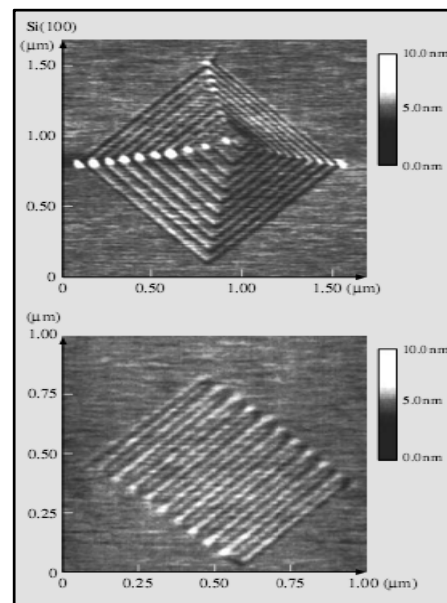
خراش را می‌توان تحت بار صعودی برای تعیین مقاومت مواد و پوشش‌ها در برابر خراش، آزمایش کرد. ضربه اصطکاک در طول خراشیدگی اندازه‌گیری می‌شود، باری که تحت آن ضربه اصطکاک سریعاً افزایش می‌یابد، بار بحرانی نامیده می‌شود؛ این بار معیاری از مقاومت در برابر خراشیدگی است. به علاوه، پس از خراش، می‌توان تصویرنگاری از سطح را به وسیله میکروسکوپ نیرو اتمی به منظور مطالعه مکانیزم‌های شکست، انجام داد.

تولید و ماشین‌کاری در ابعاد نانو^{۲۲}

میکروسکوپ نیرو اتمی می‌تواند برای تولید و ماشین‌کاری در مقیاس نانو بوسیله گسترش خراشیدن در مقیاس میکرو به کار رود [۱۶، ۱۸، ۱۹، ۲۰]. شکل (۷) دو مثال از تولید در مقیاس نانو را نشان می‌دهد.

نمونه‌ها روی یک سیلیکون تک کریستال Si(100)، به وسیله خراشیدن سطح نمونه با یک نوک الماسی در مکان‌ها و زوایای خاص ایجاد شده است. هر خط به صورت دستی با اعمال نیروی عمودی $15\mu\text{N}$ و سرعت حرکت $5\mu\text{m/s}$ ، حکاکی شده است. فاصله بین خطوط حدود 50nm و اختلاف در عرض خطوط ناشی از نامتقارن بودن نوک است. عوامل ساخت از جمله نیروی عمودی، سرعت اسکن و خصوصیات هندسی نوک را می‌توان به دقت تنظیم کرد تا عمق و طول وسایل کنترل شود.

نانوساخت با استفاده از خراشیدن مکانیکی نسبت به دیگر روش‌ها فواید بسیار زیادی دارد. کنترل بهتر در اعمال بار عمودی، اندازه اسکن و سرعت اسکن برای ساخت وسایل در مقیاس نانو قابل انجام است. در این روش، نیازی به استفاده از واکنش‌ها و حکاکی‌های شیمیایی نیست و از نانوساخت خشک^{۲۳} می‌توان در جایی که استفاده از ابزار شیمیایی و الکتریکی ممنوع باشد، استفاده کرد. یک اشکال این روش، تشکیل خرده‌ریزه‌ها هنگام خراشیدگی است. در بارهای کم، تشکیل خرده‌ها در مقایسه با بارهای بزرگ، مسئله مهمی نیست. ضمن آنکه می‌توان آنها را به آسانی برداشت.



شکل (۷) - تولید در مقیاس نانو

کاربرد نانوتریبولوژی در روانکاری

از جمله اهداف کارهای تحقیقاتی در نانو تریبولوژی، بدست آوردن روانکارهایی است که هیچگاه نیاز به تعویض و یا ترمیم نداشته باشند. از جمله محصولات بدست آمده نانو لوب^{۲۴} است. ذرات کروی یا نانوتیوب‌ها که ساختار اصلی این

نانولوب‌ها را تشکیل می‌دهند، در زمان فعالیت، مانند میلیون‌ها ساچمه مینیاتوری بین سطوح متحرک لغزیده و منجر به کاهش نیروی اصطکاک، دما و ارتقای کارایی ماشین‌آلات می‌شوند. این ذرات می‌توانند به کوچکترین منافذ قطعات نفوذ کرده و عمل روانکاری را بهبود بخشند. کاربرد این نوع از روانکارها در سطوح ناصاف به مراتب بهتر از روانکارهای فعلی است. به همین دلیل تولیدکنندگان با استفاده از آن‌ها نیاز کمتری به ماشین‌کاری، صرف وقت و هزینه برای ساخت قطعات ماشین‌آلات خواهند داشت که این عامل منجر به صرفه‌جویی در مواد و هزینه می‌شود. نانو روانکارها که در دو گروه جامد و مایع به بازار عرضه خواهند شد باعث کاهش نیروی اصطکاک و در نتیجه نیروی مصرفی و سوخت ماشین‌آلات می‌شوند. همچنین این مواد به عنوان مواد افزودنی برای روانکارها یا بصورت ترکیب با مواد دیگر و یا به تنهایی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. تطابق بهتر با محیط زیست در مقایسه با روانکارهای متداول امروزی یکی دیگر از مزایای بسیار خوب نانو روانکارهاست. آزمایش‌های متعددی که توسط آزمایشگاه‌های مختلف فارماکولوژی در آمریکا و اروپا انجام شده سازگار بودن این گروه از روانکار را با محیط زیست تایید کرده است. این مواد به هیچ عنوان سمی نیستند و موجب آلودگی آب، خاک و هوا نخواهند شد.

نانوتریبولوژی در فناوری‌های پیشرفته جدید مانند هموار ساختن سطوح دیسک‌های حافظه کامپیوتر برای افزایش کیفیت ذخیره اطلاعات و کاهش نیروی اصطکاک و انرژی مصرفی و جلوگیری از خوردگی قطعات نقش مهمی ایفا می‌کند. در صنایع سنتی مانند اتومبیل و هواپیما، هدف از جایگزین کردن نانو روانکارها بجای انواع مختلف روانکارهای در حال مصرف مانند روغن و

یا گریس، بی نیازی به تعویض روغن، چسبندگی بهتر به قطعات به صورت فیلم‌های تک لایه‌ای، تحمل فشار مکانیکی بسیار زیاد و دمای کارکرد بیشتر است. حتی از آنها می‌توان در سطوح بیرونی کشتی و یا هواپیما برای کم کردن نیروی اصطکاک ایجاد شده توسط آب و یا هوا استفاده کرد. در حال حاضر شرکت‌های متعددی مشغول تحقیقات در مورد نسل جدید روانکارها هستند. یک گروه محقق توانسته است محصول جدیدی با ساختار چندین شبکه از لایه‌های فیلم بر روی هم که دارای حفره‌های خالی (برای انعطاف پذیری بیشتر) است را بسازد. عملکرد محصول جدید به صورت حرکت قطعات بر روی تعداد بیشماری از لایه‌های ساخته شده از نانو بلبرینگ‌های سخت است. این شرکت محصول جدید خود را بنام نانو لوب، نامیده است. مدیر این سازمان معتقد است که این روانکار میتواند جایگزین انواع روانکارهای متداول امروزی با ۶ تا ۱۰ برابر بازدهی بهتر باشد. ساختار این بلبرینگ‌ها از دی‌سولفید تنگستن^{۲۰}، است. در این ساختار لایه‌های لغزنده بر روی یکدیگر باعث کم شدن اصطکاک و منافذ خالی باعث انعطاف‌پذیری بیشتر روانکار می‌شوند. با استفاده از این مواد، روانکار میتواند فشار و ضربات مکانیکی بسیار شدیدی را تحمل کرده و به صورت ذرات کروی سخت در سطوح ناصاف دندان‌دار میان قطعات متحرک حرکت کند. علاوه بر آن، این مواد برخلاف روانکارهای معمولی می‌توانند در داخل خلل و فرج سطوح ناصاف نفوذ کرده و یک لایه نرم در حد یک مولکول را به وجود آورند. برخی از شرکت‌های تولیدی برای ساخت نانو روانکارها از ساختار نانو تیوب‌های کربنی استفاده کرده‌اند ولی مشخص شده که در طول زمان و با وجود نیروی اصطکاک، مواد بکار برد

شده متلاشی و تجزیه می‌شوند. هم اکنون تحقیق در مورد بهینه‌سازی این مواد ادامه دارد. یکی از سازمانهای تحقیقاتی بنام موسسه ملی استاندارد و فناوری^{۲۶} در حال بررسی روش اختلاط مولکول‌های مختلف به صورت یک فیلم تک لایه‌ای است. این تحقیق از روش ادغام مولکول‌ها (حداکثر ۴ عدد) که هر یک خاصیت ویژه‌ای مانند مقاومت در برابر سایش و خود ترمیمی دارند، استفاده کرده است که در مجموع، یک نانو روانکار دارای قابلیت‌های هر یک از ساختارهای ملکول‌ها خواهد شد. برای مثال در یک ترکیب ملکولی چهارتایی، گروه اول مولکول‌ها دارای خاصیت چسبندگی بسیار عالی به سطوح، گروه دوم بوجود آورنده یک فیلم روانکار بسیار مقاوم، گروه سوم محافظ در مقابل ضربات سخت و گروه چهارم حرکت در کلیه سطوح برای از بین بردن نیروی اصطکاک است. امروزه دستگاه‌های بسیاری برای اندازه‌گیری نیروی اصطکاک، کیفیت روانکارها و میزان سایش قطعات به صورت سستی وجود دارد. این دستگاه‌ها که تریبومتر نام دارند، دارای روش‌های مختلفی در عملکرد خود هستند، مانند حرکت یک میله، یک کره و یا یک صفحه بر روی صفحه دیگر و نظایر آن. اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی روانکارها در مقیاس نانو دارای پیچیدگی بسیار زیاد بوده و به سهولت انجام نمی‌گیرد. برای این منظور استفاده از وسایل جدیدی مانند میکروسکپ‌های نیروی اتمی ضروری است.

شرکت "ای.پی. نانو متریال"^{۲۷}، تولیدکننده انواع محصولات نانو و اولین سازنده نانولوب‌ها است. نانولوب‌های ساخته شده کنونی که در حال حاضر در مقیاس آزمایشگاهی تولید می‌شوند، غیرسمی و سازگار با محیط زیست هستند که کیفیت و عملکرد بسیار



خوب آنها توسط کارخانه‌های اتومبیل‌سازی جهان به تایید رسیده است. همچنین این مواد می‌توانند برای بهبود کیفیت روغن‌های موتور، دنده و هیدرولیک استفاده شوند. مهمترین مزیت این محصولات کاهش مصرف سوخت و گازهای زیان‌آور موتور است. به تازگی شرکت اتومبیل‌سازی فولکس واگن برای ساخت روانکارهایی با کیفیت بالا که در صنایع هوایی و صنایع برودتی کاربرد دارند، توانسته است با شرکت ای.پی. نانو متریال و یک شرکت دیگر آمریکایی با نام هاتکو^{۲۸} یک قرارداد مشارکتی منعقد کند. تولید انبوه تا سه سال آینده با درآمد سالیانه بیش از ۱۰۰ میلیون دلار شروع خواهد شد. با توجه به موارد اشاره شده، ساخت نانو روانکارها نیازمند هماهنگی بسیاری از صنایع تولیدکننده، سازندگان مواد افزودنی و مصرف‌کنندگان است. شرکت‌هایی که بخواهند این نوع روانکار را تولید کنند با مشکل عمده‌ای روبرو هستند و آن صرفه اقتصادی در سرمایه‌گذاری اولیه است. اگر این روانکارها در ماشین‌آلات ریخته شوند دیگر تعویض نشده و خرید آنها فقط یکبار بیشتر نیست و پس از اشباع بازار دیگر خریداری برای آن وجود نخواهد داشت. این نوع روانکارها برای مصرف‌کنندگان بسیار ایده‌آل است ولی آیا برای تولیدکنندگان روانکار نیز همین‌گونه است؟ توقع دیدن این محصولات را به این زودی در مغازه‌ها نداشته باشید زیرا برای ساخت ۷۵۰ گرم آن در یک واحد بزرگ تولیدی، یک روز کامل فرایند مورد نیاز است.

جمع‌بندی این بخش

با توجه به مطالب مذکور، مبحث نانو تریبولوژی عرصه‌ای میان رشته‌ای است که ابزارآلات و مفاهیم مناسبی را در مطالعه اصول اصطکاک، سایش و چسبندگی و غیره، در مقیاس نانو برای دانشمندان شیمی، فیزیک و مهندسی

مکانیک و مواد فراهم میکند. بعلاوه ملاحظات تریبولوژیکی جنبه‌ای جدائی‌ناپذیر برای طراحی سیستم‌های نانو الکترومکانیکی است زیرا این سیستم‌ها نیازمند تدابیر جدید روانکاری اتمی برای غلبه بر ضعف‌های حاصله از اصطکاک هستند. همچنین پروسه‌های صنعتی بخصوص صنعت اتومبیل نیازمند درک دقیق این زمینه است زیرا در توسعه روانکارها، این مطالعات نانو تریبولوژیکی است که می‌تواند راهگشا باشد. ادامه دارد...

مراجع

- 1- <http://wikipedia.com>
- 2- Choi, Stephen U.S., "Nanofluids: A New Field of Scientific Research and Innovative Application", Heat Transfer Engineering, Vol. 29:5, pp. 429-431, (2008).
- 3- Maxwell, J.C., A Treatise on Electricity and Magnetism, Clarendon Press, Oxford, UK, (1881).
- 4- Choi, S.U.S., "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles, in Developments and Applications of Non-Newtonian Flows", Vol. 231, pp. 99-105, ASME, (1995).
- 5- Eastman, J. A., Choi, S.U.S., Li, S., Yu, W., and Thompson, L.J., "Anomalously Increased Effective Thermal Conductivity of Ethylene Glycol-Based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles", Applied Physics Letters, Vol. 78, pp. 718-720, (2001).
- 6- Choi, S.U.S., Zhang, Z.G., Yu, W., Lockwood, F.E., and Grulke, E.A., "Anomalously Thermal Conductivity Enhancement in Nano tube Suspensions", Applied Physics Letters, Vol. 79, pp. 2252-2254, (2001).
- 7- Hong, T.K., Yang, H.S., and Choi, C.J., "Study of the Enhanced Thermal Conductivity of Fe Nanofluids", Journal of Applied Physics, Vol. 97, Paper 064311, pp.4, (2005).
- 8- Murshed, S.M.S., Leong, K.C., and Yang, C., "Enhanced Thermal Conductivity of TiO₂-Water Based Nanofluids", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 44, pp. 367-373, (2005).
- 9- Das, S.K., Putra, N., Thiesen, P., and Roetzel, W., "Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids",

- 5- Micro-Nano Electro Mechanical System (MEMS-NEMS)
- 6- Nanoparticles
- 7- Nanopowders
- 8- Nanowires
- 9- Nanorods
- 10- Carbon Nanotubes
- 11- Boron Nitride Nanotubes
- 12- Nanoshells
- 13- Nanomotors
- 14- Argonne National Laboratory
- 15- Nanolubricant
- 16- Adhesion
- 17- Wear
- 18- Magnetic Storage System
- 19- Friction Force Microscope (FFM)
- 20- Highly Oriented Pyrolytic Graphite (HOPG)
- 21- Microscale Scratch
- 22- Nanofabrication / Nanomachining
- 23- Dry Nanofabrication
- 24- Nanolub
- 25- WS2
- 26- National Institute Standard & Technology (NIST)
- 27- ApNano Material
- 28- Hatco Corporation

* * *



موسسه (ACEEX) (Academic Editing Experts) متشکل از گروهی از دانشجویان/فارغ التحصیلان دکتری در برترین دانشگاه‌های جهان، آماده ارائه خدمات زیر می‌باشد:

✓ ویرایش و بازبینی مقالات جهت چاپ و ارائه در مجلات و کنفرانس- های معتبر بین المللی

✓ آماده‌سازی و ویرایش مستندات بسته پذیرش (رزومه، SOP و ...)

جهت کسب اطلاعات بیشتر می‌توانید از روش‌های ذیل اقدام فرمائید:

وب سایت: www.editingexperts.org

پست الکترونیک: Info@editingexperts.org

شماره تلفن: ۰۲۱- ۲۲۸۹۶۱۸۷-۸

- Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer, Vol. 125, pp. 567-574, (2003).
- 10- Chon, C.H., Kihm, K.D., Lee, S.P., and Choi, S.U.S., "Empirical Correlation Finding the Role of Temperature and Particle Size for Nanofluid (Al₂O₃) Thermal Conductivity Enhancement", Applied Physics Letters, Vol. 87, Paper 153107, (2005).
- 11- Chopkar, M., Das, P.K., and Manna, I., "Synthesis and Characterization of a Nanofluid for Advanced Heat Transfer Applications", Scripta Material, Vol. 55, pp. 549-552, (2006).
- 12- Bhushan, B., "Nano Tribology and Nanomechanics", Springer, 2nd Ed., pp. 311, (2008).
- 13- Mate, C.M., McClelland, G.M., Erlandsson, R., and Chiang, S., "Atomic-scale Friction of a Tungsten Tip on a Graphite Surface", Phys. Rev. Lett., Vol. 59, pp. 1942-1945, (1987).
- 14- Ruan, J., and Bhushan, B., "Atomic-scale and Microscale Friction of Graphite and Diamond using Friction Force Microscopy", J. Appl. Phys. Vol. 76, pp. 5022-5035, (1994).
- 15- Bhushan, B., and Ruan, J., "Atomic-scale friction Measurements using Friction Force Microscopy: Part II- Application to Magnetic Media", ASME J. Trib., Vol. 116, pp. 389-396, (1994).
- 16- Bhushan, B., Handbook of Micro/Nanotribology, Vol. 2nd CRC, Boca Raton, (1999).
- 17- Bhushan, B., "Nanotribology and Nanomechanics", An Introduction, Springer, Berlin Heidelberg, (2005).
- 18- Bhushan, B., Koinkar, V.N., and Ruan, J., "Microtribology of Magnetic Media", Proc. Inst. Mech. Eng., Part J: J. Eng. Tribol, Vol. 208, pp. 17-29, (1994).
- 19- Bhushan, B., Israelachvili, J. N., and Landman, U., "Nanotribology: Friction, Wear and Lubrication at the Atomic scale", Nature, Vol. 374, pp. 607-616, (1995).
- 20- Bhushan, B., "Micro/nanotribology and its Applications to Magnetic storage Devices and MEMS", Tribol. Int., Vol. 28, pp. 85-95, (1995).

پی‌نوشت

- 1- There is Plenty of Room at the Bottom
- 2- Richard Feynman
- 3- Nanofluidics
- 4- Nanotribology

