

Rozamiento a escala atómica

La nanotribología, el estudio del origen atómico del rozamiento, que los físicos habían venido ignorando, indica que esa fuerza nace de fuentes inesperadas, la energía del sonido entre ellas

Jacqueline Krim

JACQUELINE KRIM, profesora de física de la Universidad del Nordeste y miembro de su centro de investigaciones interdisciplinarias sobre sistemas complejos, se licenció en la Universidad de Montana y doctoró en la de Washington. Ha presidido la Sociedad Norteamericana del Vacío y hoy pertenece a la junta ejecutiva de su división de ciencia de las superficies.

Comencé a angustiarme conforme se acercaba la primera semana de diciembre. No se trataba, por supuesto, de la oscuridad ni de la llovizna de Boston que precede a la nieve. Esos días terminaba el plazo para remitir los resúmenes de las contribuciones al congreso anual de marzo de la Sociedad Norteamericana de Física, el congreso de la física de la materia condensada. Mi compañero Allan Widom y yo habíamos creado en 1986 una técnica experimental que medía la fuerza de rozamiento que una película de un átomo de espesor sufre al deslizarse sobre una superficie sólida plana. Pero no encontraba yo dónde clasificar mi resumen sobre la fricción a escala atómica en la miríada de categorías temáticas de la reunión de marzo.

No es que no se investigase el rozamiento. Siempre se me había recibido bien en las sesiones dedicadas a la fricción macroscópica o la ciencia nanométrica de la multidisciplinaria Sociedad Norteamericana del Vacío. Si embargo, a la corriente principal de la física no parecía entusiasmar el tema. Casi unánimemente, se atribuía el origen del rozamiento a algo que tuviera que ver con la rugosidad de las superficies. Siendo un fenómeno tan universal, y considerada su importancia económica, cabría esperar un mayor interés. (De acuerdo con las estimaciones, si se le prestase mayor atención al rozamiento y el desgaste los países desarrollados se ahorrarían hasta el 1.6 por ciento de sus productos nacionales brutos, nada menos que 116.000 millones de dólares en los Estados Unidos, sólo en 1995.)



Fig. 1.
La abrasión desgasta las superficies de deslizamiento. Esta forma de fricción se ha llegado siempre a un daño permanente en las superficies. Pero nuevos estudios han mostrado que puede haber un intenso rozamiento sin que se produzca desgaste ni daño.

La verdad es que no estaba sola en mi empeño. A finales de los años ochenta aparecieron, como la mía, muchas técnicas nuevas para estudiar la fuerza de fricción experimentalmente, deslizando átomos sobre sustratos cristalinos, o teóricamente mediante nuevos modelos computarizados. La primera vez que llamé a esta especialidad "nanotribología" -la fricción, o la tribología, estudiada en geometrías nanométricas bien definidas- fue en una publicación de enero de 1991. El término hizo pronta fortuna. La que fuera actividad de una comunidad de investigadores aislados dejada de la mano de Dios acabó convertida en disciplina científica por propio derecho.

Desde entonces, los nanotribólogos han venido descubriendo con regularidad diferencias notables entre la fricción a escala atómica y la observada microscópicamente. El rozamiento tiene muy poco que ver con la rugosidad microscópica de la superficie, y hay veces que el deslizamiento es mejor en una superficie seca que en otra humedecida. La fuerza es tan compleja, que aunque caractericemos a la perfección la interfaz de deslizamiento, no sabremos con exactitud qué pasará en ella. Si pudiésemos determinar de forma precisa el estado de cosas que media entre los contactos microscópicos y los materiales macroscópicos, lograríamos quizá, y gracias a ese mejor conocimiento del rozamiento, lubricantes superiores o piezas mecánicas más resistentes al desgaste.

Por esas mismas razones técnicas se ha querido conocer bien la fricción desde tiempos prehistóricos. Los homínidos, nuestros antepasados, de Argelia, China y Java ya la usaban hace cuatrocientos mil años cuando tallaban sus útiles de piedra. Doscientos mil años antes de Cristo, los neandertales tenían un buen dominio de la fricción y hacían fuego frotando maderas o golpeando pedernales. En Egipto se produjo un progreso importante hace 5000 años; el transporte de grandes bloques y estatuas de piedra para la construcción de las pirámides requirió un avance tribológico, las cuñas de madera lubricadas.

Los clásicos

Puede que la tribología moderna empezase hace 500 años, cuando Leonardo dedujo las leyes que gobiernan el movimiento de un bloque rectangular que se desliza sobre una superficie plana. (La obra de Da Vinci no dejó huella histórica, sin embargo, porque sus cuadernos de notas no se publicaron hasta cientos de años después.) Guillaume Amontons, físico francés, redescubrió en el siglo XVII las leyes del rozamiento estudiando el deslizamiento en seco de dos superficies planas.

Las conclusiones de Amontons forman parte ahora de las leyes clásicas del rozamiento. En primer lugar, la fuerza de fricción que se opone al deslizamiento en una interfaz es proporcional a la "carga normal", o fuerza total que apriete las superficies. En segundo, quizás en contra de lo que la intuición esperaría, la magnitud de la fuerza de fricción no depende del área aparente de contacto. Un bloque pequeño que se desliza por una superficie experimentará tanta fricción como uno mayor que pese lo mismo. A estas reglas suele añadirse una tercera, que se atribuye al físico francés del siglo XVIII Charles-Augustin de Coulomb, más conocido por sus trabajos sobre la electrostática: una vez ha empezado el movimiento, la fuerza de rozamiento es independiente de la velocidad. No importa a qué velocidad se impulse un bloque, la resistencia que sufrirá será casi la misma.

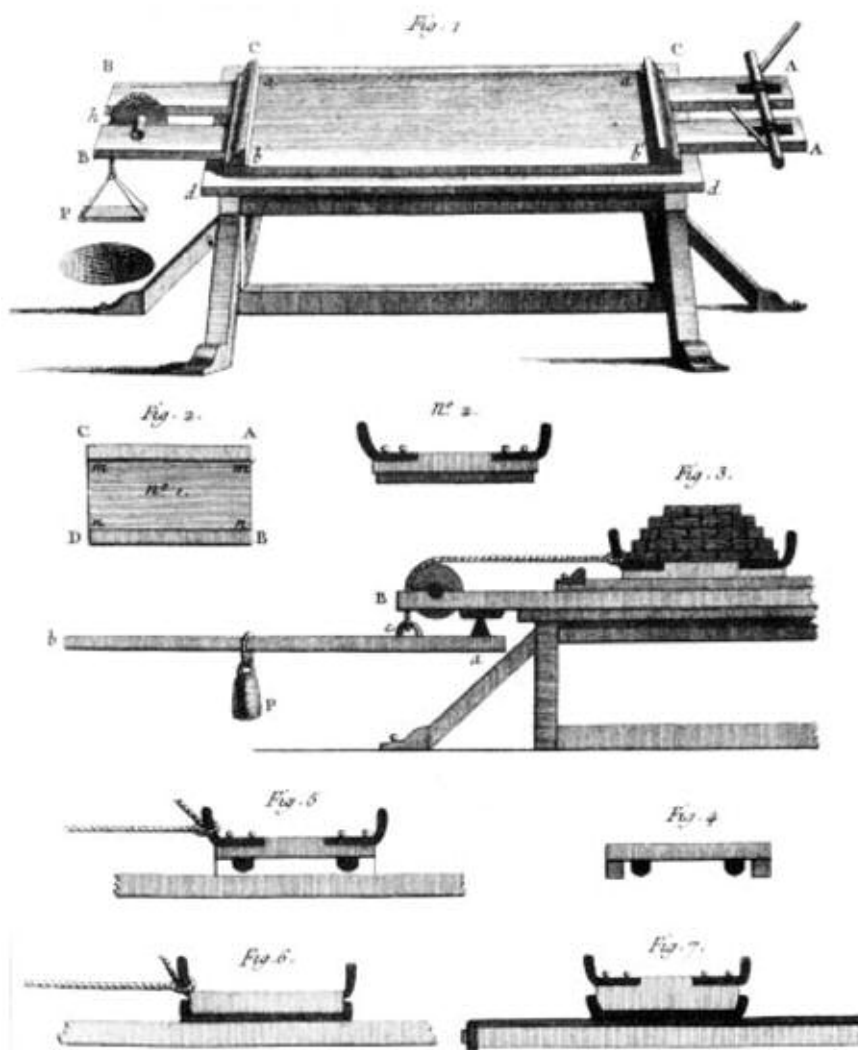


Fig. 2.
Los primeros estudios de la fricción, como los que en el siglo XVIII hizo el físico francés Charles-Augustin de Coulomb, sirvieron para que se definieran las leyes clásicas de la fricción; se intentó explicar esta fuerza basándose en la rugosidad de las superficies, pero ahora se ha descartado que ésta sea una fuente importante.

Las leyes clásicas de la fricción de Amontons y Coulomb han perdurado mucho más que los diversos intentos de explicarlas a partir de un principio fundamental, la rugosidad superficial, por ejemplo, o la adhesión molecular (la atracción entre las partículas de las superficies enfrentadas). A mediados de los años cincuenta ya se había descartado la rugosidad superficial de entre los mecanismos viables del rozamiento. Los fabricantes de automóviles, y no sólo ellos, habían descubierto, para su sorpresa, que la fricción entre dos superficies es a veces menor si una de ellas es más rugosa. Más aún, puede aumentar si se alisan las dos superficies. En la soldadura por presión en frío, por ejemplo, los metales muy pulidos se pegan firmemente.

Se creía, en cambio, que la adhesión molecular era una opción mucho más prometedora, gracias sobre todo al ingenioso trabajo de F. P. Borden, David Tabor y sus colaboradores de la Universidad de Cambridge. Vieron que el rozamiento, aunque independiente, como dijo Amontons, del área de contacto aparente macroscópica, era proporcional al área real de contacto. Es decir, las irregularidades microscópicas de las superficies se tocan y unas se introducen en las otras. La suma de todos estos puntos de contacto constituye el área real de contacto. Habiendo establecido que había algún tipo de vínculo íntimo entre la adhesión y la fricción, el grupo de Cambridge supuso que ésta se debía básicamente a ligaduras adhesivas en los puntos reales de contacto, tan fuertes que sin cesar se arrancaban fragmentos minúsculos.

Pero esta explicación era errónea. Simplemente, no podía justificar que hubiese una fricción considerable incluso en casos de desgaste despreciable. Bajo la supervisión del propio Tabor, un brillante alumno de doctorado, Jacob N. Israelachvili, creó en los años setenta un "aparato de fuerzas superficiales" adecuado para mensurar la fricción a escala atómica, y halló claras pruebas de un rozamiento sin desgaste. Estas mediciones dejaron a Tabor perplejo acerca de cuál podría ser la causa de la fricción.

El aparato de Israelachvili explora los contactos lubricados entre superficies uniformes de mica. Se basa en la lisura atómica de la mica; al exfoliarla se obtienen superficies que incluyen áreas atómicamente planas de hasta un centímetro cuadrado, una distancia de más de 10 millones de átomos. (Las superficies corrientes sólo son planas en distancias de 20 átomos y los metales lisos no pasan de los 300 átomos.) Cuando se tocan dos superficies de mica se forma una interfaz libre de cimas o montes atómicos (de "asperezas"). En el aparato se pegan, por lo general, los reversos de las superficies de mica a unos semicilindros cruzados que pueden moverse en las dos direcciones del plano horizontal. Para medir el área de contacto, los investigadores irradian un haz de luz coherente que cruza el hiato y estudian el efecto óptico resultante, un patrón de interferencia consistente en una serie de bandas oscuras e iluminadas. Las deformaciones de los muelles conectados a los semicilindros indican la fuerza de rozamiento.

Gracias a los aparatos de fuerzas superficiales se verificó la deducción macróscopica de que el rozamiento era proporcional a la superficie real de contacto. Pero pasarían casi veinte años antes de que Israelachvili, ya profesor titular de la Universidad de California en Santa Bárbara, determinase cuál era el escurridizo vínculo que ligaba la fricción a la adhesión. Con sus colaboradores, descubrió que el rozamiento no guardaba correlación con la intensidad del vínculo adhesivo. Por contrario, el rozamiento iba de la mano de la "irreversibilidad" adhesiva, o la cuantía en que difiere el comportamiento de las superficies cuando se pegan entre sí en comparación con su respuesta cuando proceden a su mutua separación. Pero el grupo no podía abordar cuál era el mecanismo físico explícito que daba lugar a la fricción que medían.

James A. Greenwood, de la Universidad de Cambridge, autoridad mundial del contacto tribológico de las superficies rugosas, resumió la situación en 1992 con estas palabras: "Si alguien inteligente explicase por qué existe la fricción y es proporcional al área [real] de contacto, nuestro problema estaría resuelto."

En sintonía

Pocos podrían aspirar mejor a ser ese alguien que Gary M. McClelland, del centro de investigación que la compañía IBM tiene en Almadén. En los años ochenta concibió un modelo muy sencillo de rozamiento sin desgaste basado en las vibraciones de las redes atómicas. McClelland ignoraba que G.A. Tomlinson, del Laboratorio Británico Nacional de Física, lo había publicado ya en 1929, y Jeffrey B. Sokoloff y sus colaboradores de la Universidad del Nordeste lo habían retocado en 1978. Pero estos trabajos habían merecido escasa atención.

La fricción derivada de las vibraciones de la red atómica se produce cuando los átomos cercanos a una de las superficies ponen en movimiento a los de la otra. (Las vibraciones, ondas de sonido, reciben el nombre de fonones.) De ese modo, parte de la energía mecánica necesaria para que una superficie se deslice sobre la otra se convierte en energía sonora. Esta acaba por transformarse en calor. Para que el deslizamiento nocese, hay que añadir más energía mecánica y, por tanto, empujar con más fuerza.

La cantidad de energía mecánica que se transforma en ondas de sonido depende de la naturaleza de las sustancias que se deslicen. Los sólidos se parecen mucho a los instrumentos musicales en el sentido de que sólo pueden vibrar a determinadas frecuencias; por consiguiente, la cantidad de energía consumida dependerá de qué frecuencias se exciten. Si este "punteo" de los átomos de una de las superficies enfrentadas resuena con alguna de las frecuencias propias de la otra, se produce rozamiento. Si no es así, no se generan ondas sonoras. Queda de esa forma abierta la apasionante posibilidad de que haya sólidos, lo bastante pequeños y sin demasiadas frecuencias resonantes, que exhiban un deslizamiento carente casi por completo de rozamiento.

LA MICROBALANZA DE CRISTAL DE CUARZO

Mide el rozamiento entre su electrodo y una capa de material de un espesor de sólo un átomo o dos depositada sobre el electrodo. Los cambios de las propiedades vibracionales del cuarzo indican el grado en que se desliza la capa depositada sobre la superficie que está debajo de ella. Las simulaciones por ordenador de capas deslizantes, de una capa líquida de criptón (en blanco en el cuadro), por ejemplo, sobre oro (azul), sirven para confirmar los hallazgos de la microbalanza.

EL APARATO DE FUERZAS SUPERFICIALES

Se vale de dos superficies de mica exfoliada, las más lisas que se conocen. Se aplican películas lubricantes, cuyo espesor puede no ser de más de unas moléculas, entre las superficies de mica, y se hace que éstas deslicen para observar la forma en que las películas condicionan el deslizamiento (cuadros).

EL MICROSCOPIO DE FUERZA LATERAL

Es una variación del microscopio de fuerza atómica. Se sirve de una fina aguja montada en un brazo. La punta va desviándose mientras se arrastra sobre la superficie de la muestra. La luz que se refleja en la punta indica el grado de desviación, y mide así el rozamiento entre la punta y la superficie. Los investigadores han utilizado el microscopio para empujar "islas" de carbono 60 (cristales verdes en el cuadro) a lo largo de una superficie de sal.

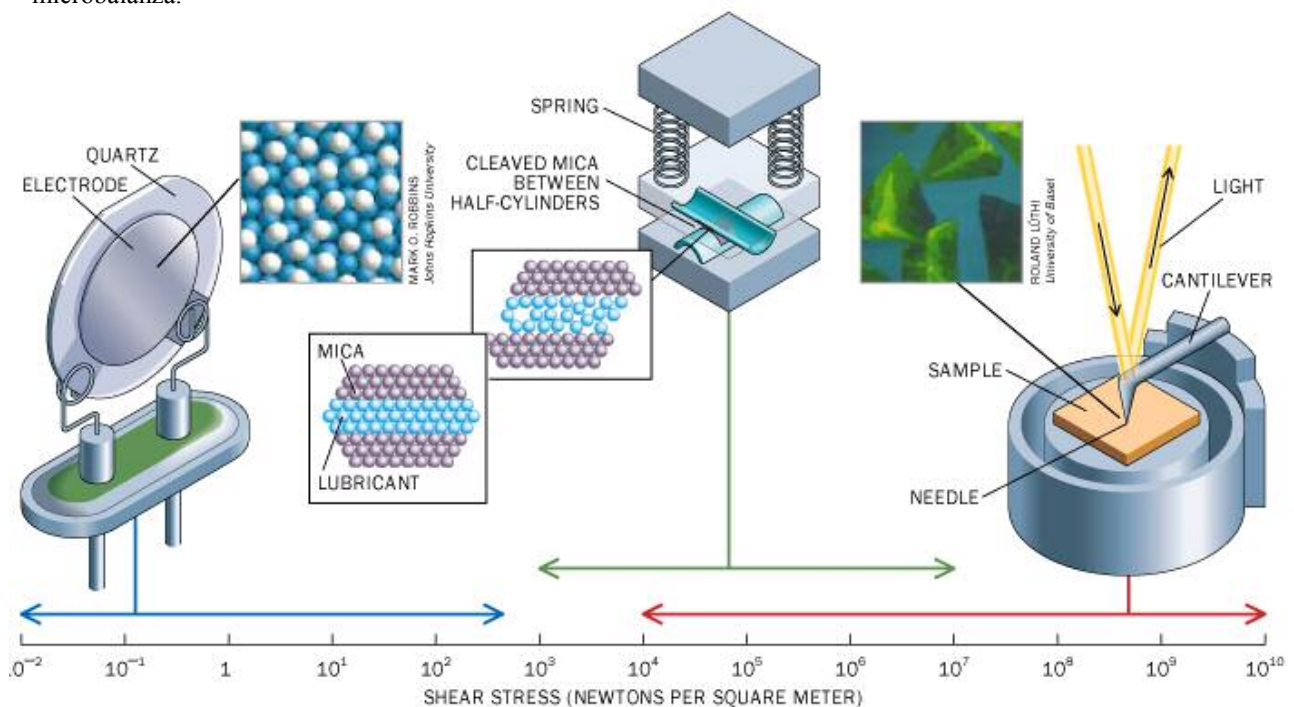


Fig.3. EL ESFUERZO DE CIZALLA, la fuerza por unidad de área real de contacto necesaria para mantener el deslizamiento de un objeto sobre otro, es una medida de la fricción que se ha investigado con varios instrumentos. Entre todos ellos se ha registrado un intervalo de esfuerzos que abarca 12 órdenes de magnitud, siempre en geometrías experimentales sin rozamiento, deterioro de las superficies y rugosidad.

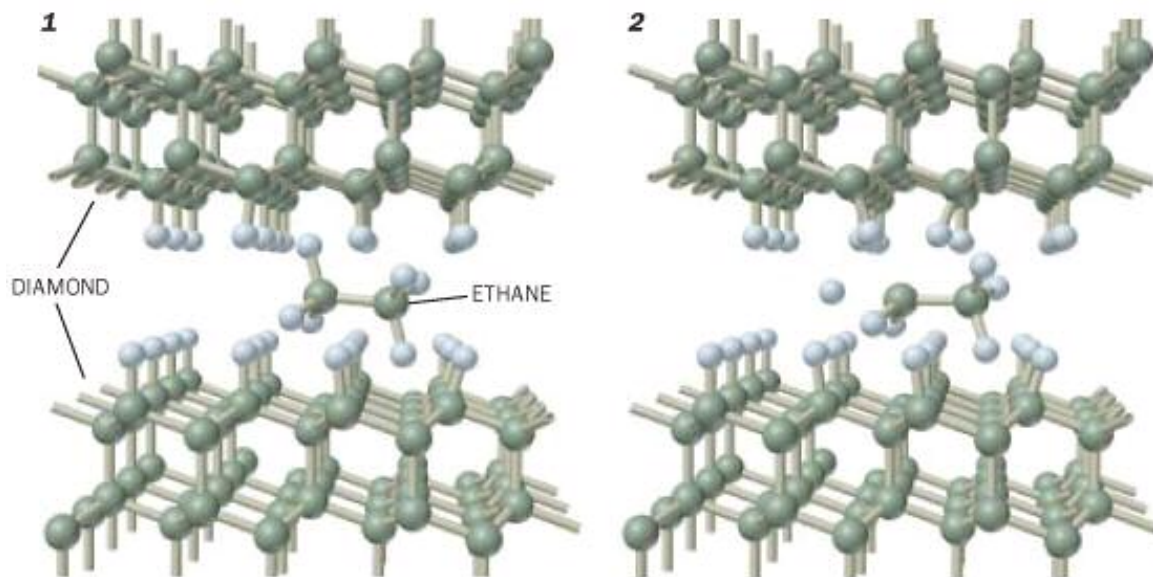


Fig.4. Puede haber reacciones químicas entre dos superficies deslizantes. En esta representación una molécula de etano, compuesta de dos átomos de carbono (verde) y seis de hidrógeno (azul), está emparedada entre dos superficies de diamante, terminadas con átomos de hidrógeno (1). Cuando las superficies se deslizan, el etano pierde un átomo de hidrógeno (2) y se convierte en un radical etilo. A continuación el hidrógeno libre retira del diamante un átomo de hidrógeno, al que se enlaza, formándose una molécula de gas hidrógeno (3). El radical etilo acaba por quedar ligado químicamente a una de las superficies de diamante (4). El diagrama se basa en las simulaciones por ordenador de Judith A. Harrison y sus colaboradores de la Academia Naval de los Estados Unidos

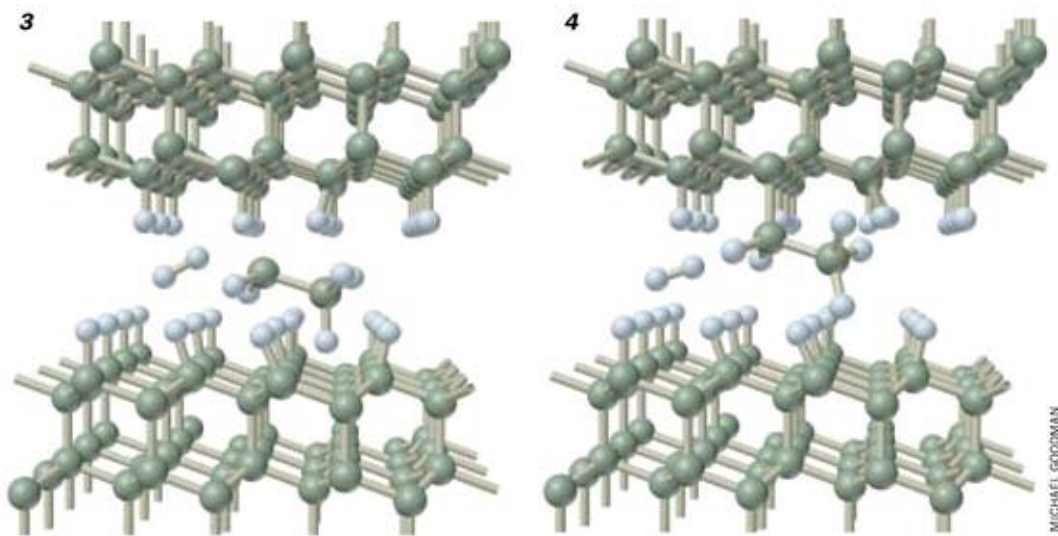


Fig.5. En los puntos de contacto se produce la fricción entre dos superficies rugosas que deslizan una sobre la otra (arriba). Si la "carga normal" -la fuerza que las aprieta- aumenta, el área total de contacto aumenta (abajo). Es este aumento lo que gobierna el grado de rozamiento, y no la rugosidad de la superficie.

En cualquier caso, McClelland, emocionado por la posibilidad teórica de un deslizamiento no sólo sin desgaste sino además casi sin fricción, se puso, con su colega C. Mathew Mate y otros, manos a la obra. Para medir el rozamiento nanométrico adaptaron un instrumento que acababa de inventarse: el microscopio de fuerza atómica. Con él, publicaron en 1987 sus primeras observaciones de la fricción medida átomo a átomo. Su artículo marcó un hito.

El microscopio de fuerza atómica consta de una punta afilada que se monta en el cabo de un brazo flexible.

A medida que barre una muestra de superficie, las fuerzas que actúan sobre la punta desvían el brazo. Varios medios eléctricos y ópticos (condensadores, interferencias) cuantifican las desviaciones horizontales y verticales. El microscopio detecta fuerzas de fricción, adhesión y carga externa de hasta sólo un piconewton, o 10-12 newton. (Un piconewton viene a ser al peso de una mosca lo que el peso de una mosca es al peso de una persona normal.) A principios de los años noventa, los investigadores de IBM habían ya instalado su microscopio de fuerza de fricción en vacíos ultraaltos: de esa forma pudieron estudiar el deslizamiento de una punta de diamante sobre una superficie de diamante cristalina con un área de contacto de menos de 20 átomos de envergadura.

Las mediciones de McClelland y sus colegas arrojaron una fuerza de rozamiento que no dependía de la carga normal. Según las leyes clásicas del rozamiento ello tendría que haber supuesto una fricción nula. Pero no sólo resultaba evidente que no lo era, sino que el esfuerzo de cizalla, o fuerza por área necesaria para mantener el deslizamiento, era enorme: mil millones de newton, unos cien millones de kilos, por metro cuadrado. Una fuerza así rompería el acero más resistente. Cada vez estaba más claro que, aun cuando se conociese la naturaleza atómica del contacto deslizante, nuestra capacidad de predecir la fuerza de fricción en él sería insignificante.

Hasta la fecha, entre todos los nanotribólogos han observado un amplio intervalo de esfuerzos de cizalla, de los 0,01 newton a los 10.000 millones de newton por metro cuadrado. Por ejemplo, Roland Lüthi, Ernst Meyer y sus colaboradores del Instituto de Física de la Universidad de Basilea han inducido "islas" de buckminsterfullereno ("buckybolas", o carbono 60) de una molécula de espesor a lo largo de una superficie cristalina de sal con la punta, cuyo tamaño se acerca al de un átomo, de un microscopio de fuerza atómica modificado. Hallaron esfuerzos de cizalla de 10.000 a 100.000 newton por metro cuadrado, varios órdenes de magnitud inferiores a los que se dan en lubricantes sólidos macroscópicos, como el polvo de grafito. (El esfuerzo de cizalla parece tan grande sólo porque se mide sobre un metro cuadrado de área real de contacto, que es en general varios órdenes de magnitud menor que el área aparente. Cuando se lubrica con grafito una cerradura, la misma área aparente de contacto es ya muy pequeña y el rozamiento real, bastante bajo.) Se ha medido, además, la fuerza que se necesita para que la punta se deslice sobre la parte superior de la isla de buckybola, y se ha hallado que es más "adhesiva" que la sal.

En mi propio laboratorio hemos observado esfuerzos de cizalla varios órdenes de magnitud menores mediante una microbalanza de cristal de cuarzo, dispositivo que ha servido durante décadas para pesar muestras de sólo unos nanogramos. Consta de un cristal de cuarzo que oscila establemente a alta frecuencia (de 5 a 10 millones de veces por segundo). Depositamos electrodos de película metálica sobre sus superficies y, a continuación, condensamos sobre los electrodos películas de un solo átomo de espesor de un material diferente. La condensación sobre la microbalanza rebaja la frecuencia, y proporciona así una cifra del grado en que las partículas de la película siguen el paso de la agitación del sustrato de cuarzo infrayacente. Cuanto menor sea la amplitud final de la vibración, mayor será la fricción resultante de la acción de "forzamiento" de la película que se desliza sobre el sustrato.

Hoy en día, la microbalanza de cuarzo es el único aparato experimental que funciona en tiempos tan cortos que pueda registrar la manera en que el rozamiento a escala atómica depende de la velocidad. La tercera ley clásica decía que la fricción es independiente de la velocidad, pero se vio que no es cierto. (El propio Coulomb lo sospechaba: no pudo probarlo.) Por ejemplo, para desacelerar uniformemente un automóvil y parado sin sacudidas, el conductor debe ir soltando el freno en los momentos finales, lo que muestra que la fricción crece cuando la velocidad es menor. Esta dependencia macroscópica de la velocidad se atribuye casi siempre a cambios en los puntos microscópicos de contacto (que llegan a fundirse a grandes velocidades de deslizamiento e

incrementan su área a velocidades bajas; a ellas son "arrancados" más despacio y disponen de más tiempo para formar ligaduras). Ahora bien, para una geometría en la que el área de contacto permanezca fija, la de una microbalanza de cuarzo, por ejemplo, la fricción se comportará al revés; crecerá en proporción directa a la velocidad de deslizamiento. Nosotros confirmamos recientemente esta observación con películas sólidas, de un átomo de espesor, que se deslizaban sobre superficies cristalinas de plata y oro.

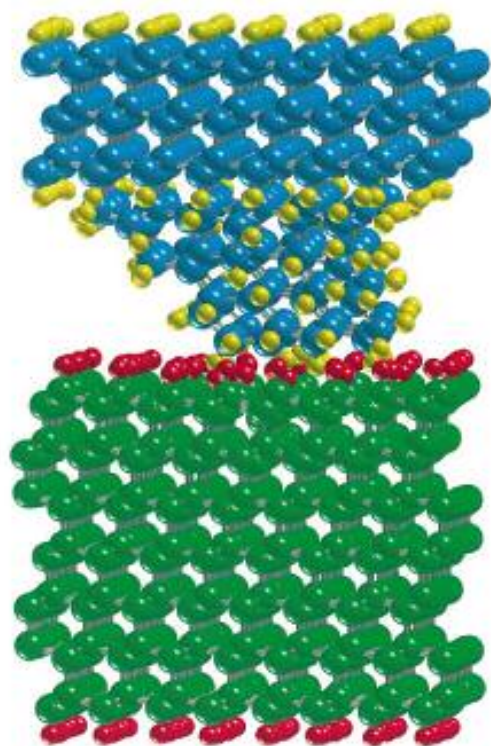


Fig. 6.

Una punta cuasidiamantina, hecha de carbono (azul) e hidrógeno (amarillo), se desliza por la cara de un material parecido, una superficie de diamante hecha de carbono (verde) y terminada con átomos de hidrógeno (rojo). Estas simulaciones por ordenador son de utilidad en la triboquímica, o estudio de las reacciones inducidas por la fricción. En esta computación en concreto, la punta y la superficie se deforman, pero no se producen reacciones químicas.

Deslizamiento en seco

Pero las teorías analíticas no predijeron nuestro sorprendente descubrimiento de 1989: las películas de criptón se deslizaban mejor secas sobre las superficies cristalinas de oro.

Observamos que las fuerzas de rozamiento para las películas líquidas quintuplicaban las involucradas en películas sólidas; los esfuerzos de cizalla eran, para éstas, minúsculos, de sólo 0,5 newton por metro cuadrado con velocidades de deslizamiento de un centímetro por segundo. Resultaba tan contrario a lo que cabía intuir, que retuve más de un año en el cajón el artículo sobre el tema.

¿Cómo era posible que una capa líquida causase más fricción a escala atómica, si casi en cada situación de la vida diaria se las usa para lubricar dos superficies? Los estudios computacionales proporcionaron el eslabón crucial al abrir una rara ventana, cerrada de cualquier otra forma, al comportamiento molecular. Varios investigadores han desbrozado camino nanotribológico con el ordenador: entre ellos, Uzi Landman, del Instituto de Tecnología de Georgia, el primero en simular los contactos puntuales; Judith A. Harrison, de la Academia Naval de los Estados Unidos, que construyó modelos de los efectos químicos interfaciales, y James Belak, del Laboratorio Nacional Lawrence de Livermore, que analizó la mecanización y el desgaste.

El problema de la fricción líquida lo resolvieron Mark O. Robbins y sus colaboradores, de la Universidad Johns Hopkins, mediante la simulación del deslizamiento de películas de espesor monoatómico de criptón sobre superficies cristalinas de oro.

Demostraron que los átomos de criptón líquido, al tener mayor movilidad que los del criptón sólido, se quedaban "pegados" con mayor facilidad en los intervalos entre átomos del oro sólido.

Obsérvese que el movimiento tangencial tiene lugar entre una superficie sólida y una líquida, situación diferente de la que se da en la lubricación líquida macroscópica, donde ese movimiento ocurre dentro de la masa del líquido, es decir, en una interfaz líquido-líquido, que suele ofrecer menor resistencia a la cizalla que una interfaz sólido-líquido.

La casi perfecta concordancia entre el modelo de Robbins y nuestros resultados experimentales era, a la vez, sorprendente y significativa, porque en sus cálculos se atribuía toda la fricción a las vibraciones reticulares (las ondas sonoras). Su modelo despreciaba el rozamiento derivado de los efectos eléctricos, el que se da, cuando las superficies son aislantes, a causa de la atracción de las cargas positivas y negativas que se separan en la interfaz. (Se obtiene una atracción similar cuando se frota un globo con pelo y se deja que se pegue a una pared.) Pero cuando una o dos de las superficies en contacto son metálicas, no cabe pensar que la acumulación de carga sea importante. Más bien se dará otro tipo de fricción electrónica -según apuntó Mats Persson, de la Universidad Chalmers de Tecnología de Goteborg, y estudió a fondo el teórico Bo N. J. Persson, del Centro Jülich de Investigación. Esa fricción está relacionada con la resistencia que sufren los electrones móviles dentro del material metálico a medida que la superficie opuesta les arrastra.

Los físicos saben que esta forma de fricción existe, pero ignoran su alcance (es la razón de que pueda que haya sólidos pequeños que se deslicen con muy poco rozamiento, pero no que se libren de él por completo). Parecía que del éxito del modelo de Robbins y sus colaboradores se seguía que los efectos electrónicos no desempeñan un papel considerable en la fricción.

Para investigar esta cuestión con mayor detenimiento hemos medido la fuerza que se necesita para que unas películas sólidas de xenón con un grosor de uno y dos átomos se deslicen por una superficie cristalina de plata. La fricción aumentaba alrededor de un 25 por ciento cuando se trataba de la película de espesor biatómico.

¿Se debía ese 25 por ciento a los efectos electrónicos? Probablemente no. Bo Persson, Robbins y Sokoloff han realizado, cada uno por su lado, simulaciones por ordenador del sistema xenón-plata. A tenor de sus primeros resultados, el rozamiento asociado a las ondas de sonido sería mucho mayor con dos capas que con una. La idea es que las dos capas crean un "instrumento musical" más elaborado; hay, por tanto, muchas más frecuencias resonantes excitables y, por ende, mayor rozamiento. La fricción electrónica, qué duda cabe, existe, pero puede que su magnitud esté determinada en gran medida sólo por los átomos inmediatamente adyacentes a la interfaz. Los parámetros seleccionados para representar las superficies metálicas en una simulación podrían enmascararla con facilidad. Ahora bien, conforme los trabajos teóricos y las simulaciones se depuren más y más, podremos calcular con exactitud qué proporción de la pérdida de energía está asociada a los efectos electrónicos y cuál a la vibración reticular.

Las nuevas reglas

En su avance, la nanotribología ha demostrado que las leyes de la fricción macroscópica no rigen a escala atómica. Podemos ahora reescribir las leyes del rozamiento de una manera más general. En primer lugar, la fuerza de fricción depende de la facilidad con la que se queden las dos superficies pegadas en comparación con su facilidad de despegarse: es proporcional al grado de irreversibilidad de la fuerza que aprieta una superficie contra la otra, no a su mera magnitud. En segundo lugar, la fuerza de fricción es proporcional al área de contacto real, no a la aparente. Por último, la fuerza de fricción es directamente proporcional a la velocidad de deslizamiento de la interfaz en los puntos de contacto reales, siempre y cuando no se deje que las superficies se calienten y mientras la velocidad de deslizamiento esté bastante por debajo de la velocidad del sonido. (Cerca de esta velocidad la fricción se estabiliza porque las vibraciones de la red no pueden hacer suya la energía sonora con suficiente rapidez.)

La discrepancia entre los fenómenos de la fricción macroscópica y microscópica se borra mucho si se cae en la cuenta de que es muy probable que el área real de contacto de los objetos macroscópicos sea proporcional a la fuerza que aprieta las superficies. Cuanto más se apriete,

habrá más superficie de contacto. Por eso la presión parece ser proporcional a la carga normal, como dijo Amontons.

Y ¿qué ha sido de la rugosidad de la superficie? Parece que su importancia va quedándose en nada. Se suponía que las irregularidades de la superficie influían en la fricción de pegarse y resbalar, clase de rozamiento en el que las superficies que corren una sobre otra se enganchan momentáneamente y se sueltan. Ejemplos notorios son los chirriantes frenos de los trenes y las uñas que rascan una pizarra. Se creía que la rugosidad era la causa de la aleatoriedad de ese pegarse y resbalar. Pero el grupo de Steve Granick, de la Universidad de Illinois, ha observado hace poco la fricción de pegarse y resbalar en los contactos lubricados entre dos superficies de mica nominalmente "perfectas". Aplicaron millones de ciclos repetitivos de una fuerza sinusoidal a unos líquidos encerrados, sin desgaste, y los resultados que obtuvieron sugieren que la aleatoriedad (en concreto, el llamado ruido $1/f$) podría ser intrínseca a la fricción de pegarse y resbalar misma.

Si se tiene en cuenta la actual carrera por fabricar componentes de máquinas cuyas dimensiones sean mínimas, es posible que la investigación de la escala atómica, que hoy se considera de naturaleza sólo fundamental, mañana dé lugar a la aplicación directa. Sabemos por qué las sustancias cuyas cadenas moleculares están ramificadas son mejores lubricantes que las de moléculas de cadena lineal, aun cuando en volúmenes apreciables son más viscosas. (Siguen siendo líquidas sometidas a fuerzas mayores que las sustancias de moléculas de cadena lineal y, por tanto, son mejores a la hora de evitar que dos superficies sólidas entren en contacto.) Los nanotribólogos que trabajan con geometrías de contacto conocidas quizás ayuden un día a los químicos a entender las reacciones inducidas por el rozamiento que se producen sobre la superficie o a los científicos de materiales a diseñar sustancias resistentes al desgaste. Conforme vaya apremiando la necesidad de ahorrar energía y materias primas, la fiebre de los físicos por conocer los procesos básicos de la fricción subirá.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HISTORY OF TRIBOLOGY. D. Dowson.
Longman, Londres, 1979.

FUNDAMENTALS OF FRICTION: MACROSCOPIC
AND MICROSCOPIC PROCESSES.
Dirigido por I. I. Singer y H. M.
Pollock, Kluwer, 1992.

HANDBOOK OF MICRO/NANOTRIBOLOGY.
Dirigido por B. Bhushan. CRC Press, 1995.

NANOTRIBOLOGY: FRICTION, WEAR AND
LUBRICATION AT THE ATOMIC SCALE.
B. Bhushan, J. N. Israelachvi
y U. Landman en Nature, vol. 374,
págs. 607-616; 13 de abril de 1995.
PHYSICS OF SLIDING FRICTION. Dirigi-
do por B. N. J. Persson y E