

Avance y Perspectiva

Revista de divulgación del CINVESTAV

¡Que buen desorden!... Recubrimientos avanzados para la protección y aumento de la vida útil de las herramientas

Karina Galache · Sunday, May 30th, 2021

Categorías: [Ciencias Exactas](#), [Zona Abierta](#)

Desde los orígenes de la Edad de Piedra, el ser humano comenzó a utilizar objetos que lo rodeaban para conseguir y hacer trabajos que no podía realizar solo con sus manos, es decir, siempre ha buscado apoyarse en utensilios o herramientas para convertir acciones muy complicadas en actividades cotidianas (Galvele, 2011). Hoy en día, si consideramos la ruta del “hágalo usted mismo”, pensando en el mantenimiento y mejoramiento de nuestro hogar, con frecuencia nos enfrentamos con problemas muy variados relacionados con las herramientas que tenemos disponibles para hacer dichos trabajos. Además de que siempre surge la necesidad de utilizar la herramienta que “casualmente no tenemos”; uno de los obstáculos más comunes es el grado de especialización que ha alcanzado el desarrollo de las herramientas en nuestros tiempos, por ejemplo, existe una cantidad impresionante de tipos de pinzas que hace muy baja la probabilidad de que en un hogar se cuente con todas ellas.

Una de las principales motivaciones de esta alta especialización en las herramientas ha sido la gran variedad de materiales de construcción que se usan en la actualidad, entre los que destacan el concreto, el hormigón, el acero, la madera, el aluminio y los cerámicos, sólo por mencionar algunos; por ello, una operación tan básica como la perforación con taladro ya no es tan simple como en el pasado. Una de las claves de esta situación se encuentra en una propiedad de los materiales que, aunque es muy conocida, es poco comprendida: la dureza. Con esta propiedad, un material define su resistencia a ser perforado y con base en una de las clasificaciones más conocidas, tenemos una escala que va del material más blando que es el talco hasta el más duro que es el diamante (Bushby, 2005). Resulta natural pensar que no se podrá usar la misma broca para perforar todo tipo de material, pues siempre habrá que recurrir a una herramienta hecha de un material más duro que el que se quiere perforar.

Si lo anterior representa una gran molestia en casa, hagamos el ejercicio de imaginarlo en la industria, donde la perforación, el corte y una lista interminable de acciones requieren el uso de herramientas especializadas. Además, se deben considerar otros detalles como el cumplimiento en tiempo y forma de las órdenes de producción, mantener los estándares de calidad, usar con eficiencia las materias primas, cuidar el ambiente y, por supuesto, generar ganancias. Todo esto

hace que otras propiedades de las herramientas como la resistencia al desgaste y a la corrosión, y la estabilidad a altas temperaturas, jueguen un papel determinante junto con la dureza, pues las altas velocidades de producción generan ambientes muy agresivos a la hora de llevar a cabo las operaciones de maquinado (corte, perforación, entre otras), siendo la temperatura uno de los aspectos más importantes a considerar.

Para cumplir con todas estas exigencias, constantemente surge una gran cantidad de materiales a través de combinaciones entre metales, cerámicos o polímeros, conocidas como aleaciones. En general, una aleación está formada por varios elementos, entre los que se puede reconocer a uno como principal (llamado solvente) y el resto se encuentra en menor proporción (se les llama solutos). El acero es quizá la aleación más famosa y utilizada, es una mezcla de hierro (solvente) y carbono (solute, hasta un 2% en peso), aunque con el paso del tiempo se han agregado otros elementos para mejorar sus propiedades y el ejemplo más representativo es la adición de cromo para obtener lo que conocemos como acero “inoxidable” que, como bien lo dice su nombre, la adición de este elemento evita la formación de la capa de herrumbre color rojizo que conocemos como óxido.

En el caso de los materiales usados para fabricar herramientas para maquinado, la tendencia es muy clara: se requiere de aleaciones más avanzadas que el acero con las características necesarias que permitan cumplir con las exigencias de la aplicación, lo que obliga al uso de una variedad más amplia de elementos químicos que muchas veces son más caros o escasos, provocando un aumento significativo del precio de las herramientas. Un ejemplo de esto, fue agregar tungsteno al acero para mejorar el rendimiento de algunas herramientas de corte, permitiendo su uso a velocidades más altas dando lugar a los aceros de maquinado rápido. Sin embargo, estos aceros limitan su aplicación por sus temperaturas de trabajo promedio de 500 °C, además de su elevado costo.

En algunos casos, es difícil para las empresas cubrir estos costos extras y en el hogar la situación a menudo se vuelve completamente prohibitiva. Por lo anterior, la comunidad científica y tecnológica dedicada a la ingeniería de materiales, invierte gran parte de sus esfuerzos en el desarrollo de soluciones que ayuden a amortiguar el golpe económico sin perder las ventajas de las aleaciones avanzadas, siendo los “recubrimientos” uno de los caminos más viables a seguir por su relación costo-beneficio. Este campo del conocimiento es uno de los más interdisciplinarios que existen y una de las maneras más directas de clasificarlos es a través de su dimensión más característica: el espesor. Por ejemplo, cuando aplicamos pintura a nuestras rejillas o puertas, con un fin no solo decorativo sino también para protegerlas de la intemperie, lo que estamos haciendo es aplicar un “recubrimiento” de unos milímetros de espesor de pintura. En el caso de las herramientas para maquinado, los recubrimientos que se utilizan para proteger y aumentar su vida útil se conocen también como “películas delgadas” porque su espesor está entre 1 y 10 micrómetros (un micrómetro es una millonésima parte de un metro).

Avanzando hacia el desorden

Al igual que en el descubrimiento de muchos aceros especializados (tanto de uso industrial como de uso en la vida cotidiana), la investigación en recubrimientos avanzados no se ha detenido en las últimas décadas. Por ejemplo, materiales como los carburos, boruros y nitruros –debido a los enlaces químicos que mantienen unidos a sus átomos (muchos de ellos tan fuertes como el enlace covalente que existe en el diamante)–, brindan elevada dureza y resistencia mecánica. Estos

materiales cerámicos que se han usado en rodamientos u otros componentes de motores en la industria automotriz y muchas otras aplicaciones de maquinado (Mijangos & Moya, 2007), también son importantes para su uso como recubrimientos protectores al depositarse sobre otros materiales. Otro ejemplo es el color dorado que se observa en algunas brocas comerciales debido a un recubrimiento de nitruro de titanio (TiN) depositado sobre la broca de acero, lo que permite que la herramienta pueda usarse en materiales más duros y que al taladrar no se rompa o doble. Sin embargo, muchos recubrimientos comerciales basados en aleaciones avanzadas de nitruros presentan algunos problemas cuando están perforando o cortando, ya que comienzan a calentarse por fricción y se oxidan a temperaturas entre 550 y 850 °C y debido a esto, la herramienta falla rápidamente. Con el avance de la tecnología y la implementación del control numérico computarizado en máquinas como tornos, fresadoras, mecanizados, etcétera, las velocidades de corte se incrementaron obedeciendo el ritmo de la producción industrial, por lo que se requieren nuevos materiales que se puedan adaptar a estas exigencias, para no degradarse a estas temperaturas y que mecánicamente puedan ser funcionales bajo esas condiciones de trabajo.

Para diseñar un recubrimiento que sea capaz de aumentar la vida útil de las herramientas de corte, los científicos deben considerar los aspectos y propiedades más fundamentales de los materiales disponibles, incluso llegando hasta el nivel atómico. Las características de un recubrimiento usado en herramientas de corte y perforación incluyen: resistencia a la oxidación, a la corrosión, al desgaste a altas temperaturas y alta dureza. Los recubrimientos de aleaciones ternarias y cuaternarias surgieron en las décadas recientes con la intención de que, al agregar más elementos metálicos, estos cumplan con funciones especiales y brinden propiedades que los recubrimientos comerciales como el TiN no tienen. La incorporación multielemental llevó a la aparición de aleaciones de nitruros de alta entropía (HEANs, por sus siglas en inglés) que derivan de las aleaciones de alta entropía (*High Entropy Alloys*, HEAs) las cuales surgieron en 2004 y han mostrado excelentes propiedades (Yeh et al., 2004), incluso mejores que el acero inoxidable, el acero rápido, los nitruros binarios, ternarios y cuaternarios.

Pero ¿por qué son tan especiales estas aleaciones?, la respuesta tiene que ver principalmente con su “arreglo atómico”. Este se refiere al acomodo que tienen los átomos que forman un material ocupando posiciones bien definidas y ordenadas que se repiten de manera periódica (ordenamiento de largo alcance), lo que los define como cristales. Se dice que los metales, las aleaciones y algunos cerámicos son materiales cristalinos; esto es así porque si tomáramos un microscopio muy potente que nos permitiera ver átomos, podríamos observar cómo estos están colocados en posiciones ordenadas. En los cristales, los átomos, iones o moléculas que los forman se apilan dando lugar a motivos que se repiten constantemente, de manera análoga a como lo haría un ladrillo (motivo) para formar una pared (todo el cristal). Cuando esa repetitividad es corta o interrumpida, los materiales no se consideran cristalinos y se les denomina amorfos (ordenamiento de muy corto alcance) como es el caso de los vidrios. Aunque coloquialmente puede que sigamos refiriéndonos como cristal cuando hablamos de algunos objetos hechos de vidrio, ahora sabemos que no lo son.

En las HEAs hay al menos 5 elementos principales en porción equivalente o casi equivalente y, a diferencia del acero, es difícil distinguir al soluto del solvente. Las posiciones atómicas en las HEAs son tomadas al azar por átomos de distintos elementos, lo que origina que exista un desorden muy particular que, muchas veces, incrementa y favorece la formación de sistemas con propiedades sobresalientes. ¡El desorden no siempre es malo! y se puede aprovechar como en el caso de las HEAs. Por lo tanto, los científicos han adoptado un nombre especial para este desorden: “alta entropía” –de ahí el nombre de estas aleaciones–. La coexistencia de diferentes elementos

químicos provoca efectos interesantes, por ejemplo, seguramente los átomos de cada elemento que formen las HEAs tendrán diferente tamaño y ello ocasionará que su estructura cristalina se distorsione o deforme (imagínense que los ladrillos de la pared fueran de diferente tamaño, ¡qué horror!); estos átomos grandes y pequeños tensan o comprimen la estructura cristalina de las HEAs originando que incremente su dureza, llegando a ser incluso más duras que los materiales y aleaciones comerciales que ya hemos mencionado. Otro ejemplo es la selección adecuada de los átomos al diseñar una HEA, ya que en conjunto simula la receta de un cóctel donde, como resultado de la mezcla de los diferentes átomos, se obtiene la suma de las propiedades aportadas por cada uno, proporcionando incluso la mejora de características como la resistencia al desgaste, oxidación y corrosión. Este desorden multielemental también evita la formación de otros compuestos que perjudican a la aleación y promueve que se forme únicamente una mezcla homogénea (solución sólida), que se debe a un efecto de difusión lenta que ocasiona que los átomos no puedan viajar fácilmente dentro de la aleación. Algo similar a lo que ocurre cuando estás dentro de un vagón del metro de la CDMX en una hora pico alejado de la puerta y debes salir en la próxima estación, además de la gran cantidad de personas que están en los pasillos impidiendo el paso, sus diferentes tamaños representan un obstáculo adicional para poder pasar entre ellos.

Con lo mencionado hasta este punto podemos darnos cuenta de que, efectivamente, no todo el desorden es malo y la aparición de las HEAs nos puede llevar al mejoramiento de las propiedades mecánicas, la resistencia a la corrosión y al desgaste de muchos materiales de uso extensivo. Como ya se comentó, utilizar al menos 5 elementos en una porción equivalente o muy similar podría aumentar el costo de las aleaciones y una forma de solucionar este detalle ha sido obtener películas delgadas o recubrimientos. Sin embargo, esto ha representado un gran reto para la comunidad científica que se dedica a este tema y en la actualidad existen pocas metodologías que han reportado éxito en la síntesis de recubrimientos de HEAs. La más representativa de ellas es conocida comúnmente por su nombre en inglés como *Sputtering* (o menos conocido en español como “pulverización o erosión catódica”).



Recubrimientos de nitruro de titanio (TiN) color dorado y nitruro titanio aluminio (TiAlN) color negro, sintetizados por *sputtering* y depositados sobre brocas para mejorar el corte y perforación de la herramienta. Se observa una broca recubierta y sin recubrir.

Foto: Uriel Jirón

Un juego de billar con átomos

De manera simple, podríamos decir que el método de *Sputtering* consiste en pulverizar al sólido (objetivo) que se quiere depositar sobre alguna superficie (sustrato), por ejemplo, un vidrio, una pieza de acero o cualquier otro material. Para conseguir esto, se lleva a cabo un proceso análogo a un juego de billar, pero en lugar de que sea en una mesa, el juego toma lugar dentro de un recipiente herméticamente sellado del que se extrae todo el aire que sea posible (cámara de vacío). En el juego de billar, cuando tomamos el taco y golpeamos la bola blanca, esta adquiere energía y se acelera, lo que hace que pueda chocar con el conjunto de bolas del centro de la mesa, provocando que salgan disparadas en todas direcciones debido a que la bola blanca les transfirió la energía y el movimiento que ganó cuando la golpeamos. En el caso del *Sputtering*, un catión (átomo con carga eléctrica positiva) juega el papel de la bola blanca y es acelerado porque le

damos energía a través de un voltaje (o diferencia de potencial eléctrico) que juega el papel del taco de billar. El catión impacta sobre el objetivo (en el billar, las bolas al centro de la mesa) ocasionando que algunos átomos de éste salgan expulsados debido a la transferencia de energía y movimiento brindada por el catión. Los átomos desprendidos o arrancados forman una nube de vapor que viaja a través de la cámara hasta que condensa sobre la superficie del sustrato, similar al vapor de agua que forma gotas en la tapa de una olla cuando cocinamos. Posterior a esa condensación, los átomos solidifican formando el recubrimiento. Dado que este juego de billar ocurre a nivel atómico se puede disminuir considerablemente la cantidad de material que se usa, de tal forma que, una vez optimizado su depósito, podría abarataarse el costo de dichos materiales.

El trailer de la película

Actualmente, el grupo de Diseño y Optimización de Recubrimientos Avanzados (DORA-Lab) trabaja en el diseño y depósito de nitruros de aleaciones de alta entropía, HEANs. Con la selección de los elementos químicos involucrados, se busca que los recubrimientos soporten la oxidación a temperaturas superiores a los 850 °C, que tengan la capacidad de perforar o cortar superficies de muy alta dureza y que el filo de la herramienta no se pierda fácilmente por el desgaste sufrido durante el maquinado, además de que sean resistentes a la corrosión. La base de estos recubrimientos es el sistema ternario titanio-aluminio-nitrógeno (Ti-Al-N) el cual ha sido ampliamente estudiado y su origen fue la necesidad de mejorar la dureza y la resistencia a la oxidación y corrosión del TiN. La investigación continúa agregándole molibdeno con la finalidad de incrementar la resistencia al desgaste y también se considera incorporar circonio porque se espera que favorezca la resistencia a la corrosión y de una estabilidad térmica importante.

Uno de los retos más grandes de esta investigación referente a recubrimientos de HEANs, es el depósito mediante *Sputtering* pues al tener que utilizar objetivos de diferentes elementos químicos en el proceso de síntesis, se aumenta su complejidad considerablemente, ya que, volviendo al juego de billar, sería como jugar en varias mesas al mismo tiempo. ¿Qué te parece todo este desorden?

Referencias

- Bushby, J. (2005). Measuring the Hardness of Minerals. *Australian Primary Mathematics Classroom*, 10(2), 26–29.
- Galvele, J. (2011). Los materiales y la humanidad. *Materiales y Materias Primas*, 43.
- Mijangos, C., & Moya, J. S. (2007). Nuevos materiales en la sociedad del siglo XXI. <https://doi.org/10.16309/j.cnki.issn.1007-1776.2003.03.004>
- Yeh, J. W., Chen, S. K., Lin, S. J., Gan, J. Y., Chin, T. S., Shun, T. T., ... Chang, S. Y. (2004). Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 6(5), 299–303.

<https://doi.org/10.1002/adem.200300567>

This entry was posted on Sunday, May 30th, 2021 at 3:36 pm and is filed under [Ciencias Exactas, Zona Abierta](#)

You can follow any responses to this entry through the [Comments \(RSS\)](#) feed. Both comments and pings are currently closed.