

Herramientas para Mecanizado de Alta Velocidad

Juan Martín/ Castellano Almoril

Las herramientas han sido un factor determinante en el desarrollo de la tecnología del Mecanizado de Alta Velocidad. Tienen geometrías cada vez más específicas y una composición físico- química cada vez más orientada al material a mecanizar y a la operación a realizar.

De las herramientas de acero rápido utilizadas hasta los años setenta se pasó a carburo de tungsteno. A éste se le han ido aplicando diferentes composiciones de recubrimientos, hasta llegar a los nitratos actuales. Y se han introducido también materiales nuevos, tales como el nitrato de boro cúbico, seguramente el más novedoso en estos momentos.

CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS

Forma de la herramienta

Se puede establecer la siguiente clasificación:

- Herramientas integrales o macizas
 - Herramientas esféricas
 - Herramientas planas
 - Herramientas toroidales
 - Brocas
 - Herramientas de mandrinado

- Herramientas de plaquitas
 - Herramientas esféricas
 - Herramientas planas
 - Herramientas toroidales
 - Brocas

Las herramientas integrales presentan generalmente una mejor tolerancia dimensional que las herramientas de plaquitas. Aparte del error inherente a la plaquita, hay que añadir en la mayoría de los casos un error asociado al ensamblaje de la plaquita en su adaptador. Por lo general, las herramientas integrales son preferibles para las operaciones de acabado, si bien se están comercializando plaquitas que tienen mucho mejor resuelto este problema que las generaciones anteriores.

La gran ventaja de la plaquita es indudablemente su rendimiento económico. Cuando se considera que la herramienta integral ha dejado de ser funcional, hay que sustituir toda la herramienta mientras que, en el caso de la plaquita, basta con cambiarla o, en muchos casos, con aplicarle una rotación en el caso de que tenga diferentes zonas de corte disponibles. Esta ventaja la convierte en la herramienta más adecuada en el mecanizado de piezas de mediano o gran tamaño, e incluso en operaciones de tamaño mediano para operaciones tales como el desbaste. De todas maneras, esta elección depende del usuario y de la estrategia de corte elegida.

En el caso del mecanizado de materiales templados con un elevado grado de dureza es muy usual, cuando el volumen de la pieza no es muy grande, realizar los desbastes con herramientas integrales, pues presentan una mayor duración de vida y un mejor comportamiento. En cualquier caso, es importante destacar que las herramientas para este tipo de mecanizado son considerablemente más caras que las herramientas tradicionales.

Las herramientas esféricas (figuras 1 y 5) son especialmente necesarias en el mecanizado de piezas con superficies en 3 dimensiones, aunque también pueden ser utilizadas en 2 dimensiones. Las herramientas esféricas integrales son herramientas muy estables que pueden ser utilizadas tanto en operaciones de desbaste como en semiacabado o acabado, mientras que las esféricas de plaquitas no son tan utilizadas en operaciones de desbaste en materiales de gran dureza (si lo son para el resto de materiales) como lo son en operaciones de desbaste y acabado.



Fig. 1.- Herramienta integral esférica de 2 labios



Fig. 2.- Herramienta integral plana de 4 labios. Observar los ángulos vivos, característica definitoria de las herramientas planas contra las toroidales



Fig. 3.- Herramienta toroidal de 6 labios. Observar que la herramienta no tiene ángulos vivos, sino que los tiene suavizados por radios

Las herramientas planas (figura 2) no son muy aconsejables para este tipo de mecanizado, ya sean integrales o de plaquitas, especialmente si el material a mecanizar es de mala maquinabilidad o muy duro. Se entiende como una herramienta plana una herramienta con radio 0, o sea con arista totalmente viva. Esta arista padece mucho y acostumbra a romperse enseguida, aunque el resto de corte de la herramienta se conserve casi perfectamente. Es preferible entonces la utilización de herramientas toroidales con cierto radio inferior. Pero en muchas aplicaciones esta sustitución no es posible, ya que interesa conseguir precisamente eso: una arista viva en una cavidad.

Pero se comprende que una arista completamente viva en el interior de una cavidad sea imposible de conseguir por mecanizado por arranque de viruta, pues siempre se producirá una ruptura de la herramienta por pequeña que ésta sea. Las herramientas planas permitirán conseguir una arista de radio más pequeño que una herramienta toroidal, pero hay que tener cuidado con las condiciones de corte seleccionadas para esta herramienta, con el fin de minimizar las roturas.



Fig. 4.- Herramienta integral de geometría y corte especiales para el mecanizado de ranuras profundas



Fig. 5.- Herramientas esféricas de una sola plaquita



Las herramientas toroidales (figuras 3 y 6) son más adecuadas que las herramientas planas, como ya se ha comentado. Las herramientas toroidales de plaquitas son los tan profusamente llamados platos de plaquitas (ver figuras 7, 8, 9). Efectivamente, estas herramientas son las más empleadas para la realización de grandes desbastes siempre que el diámetro de la herramienta sea adecuado para el tamaño de la pieza a mecanizar. Para operaciones de planeado son casi indispensables.

Hay que destacar que, aunque se puedan utilizar platos de plaquitas de diámetro bastante grande, éste no suele serlo tanto como el de grandes platos de plaquitas (diámetros > 150mm) que se utilizan en el mecanizado tradicional. Recordar que la propia concepción de estos tipos de mecanizado no lo contempla. Así pues, es habitual trabajar con platos de diámetros 30 hasta 80, pero con menos carga de herramienta que en el mecanizado tradicional y con más velocidad.



Fig 6.- Herramienta toroidal de una sola plaquita



Fig. 7.- Plato de plaquitas de gran longitud para el mecanizado de zonas profundas en piezas de gran tamaño



Fig. 8.- Plato de plaquitas esféricas para desbaste



Fig. 9.- La misma idea que el anterior pero diferente fabricante y composición de las plaquitas

Las herramientas toroidales integrales son también muy empleadas, pero se prefieren las de diámetro bastante menor, principalmente por razones económicas. Se utilizan más en operaciones finales, como en el caso de las integrales de bola, cada vez son más usuales en operaciones de desbaste en aceros endurecidos donde es difícil utilizar una herramienta de plaquitas debido a las dimensiones de la pieza.

Huelga decir que hay que hacer las mismas consideraciones para las plaquitas que las que ya se han hecho para las herramientas planas. La forma de las plaquitas puede ser circular, hexagonal, romboidal o rectangular. Las más adecuadas acostumbran a ser las circulares, pues no tienen ángulos vivos que padezcan más que otras partes del perfil las fuerzas de corte y, por tanto, sean más propensas a la ruptura. En caso de utilizar los demás tipos es preferible hacerlo con plaquitas que tengan cierto radio en estos ángulos, con vistas a suavizar el corte. De todas maneras, como también ya se ha comentado, esta exigencia depende del material a mecanizar y es usual trabajar con plaquitas de formas no circulares en materiales como el aluminio, el cobre o el grafito.

Las brocas siguen la misma tónica de las herramientas anteriormente descritas respecto a la división entre integrales y plaquitas. Se están fabricando brocas de última generación, especialmente de constitución integral, que soportan avances de taladrado y velocidades de corte especialmente elevadas en todo tipo de materiales. De esta forma se consigue un ahorro de tiempo muy considerable en actividades de producción de piezas de aluminio y hasta en taladrado de aceros de alta dureza. También se están diseñando geometrías autocentrantes que no requieren de un punteado previo ni siquiera cuando la superficie a taladrar no es perpendicular a la broca.

Las herramientas de mandrinado no aportan soluciones especialmente novedosas. La novedad la aportan los nuevos materiales de que están hechos los perfiles de corte, pero en la forma no hay variaciones importantes respecto a las herramientas tradicionales.

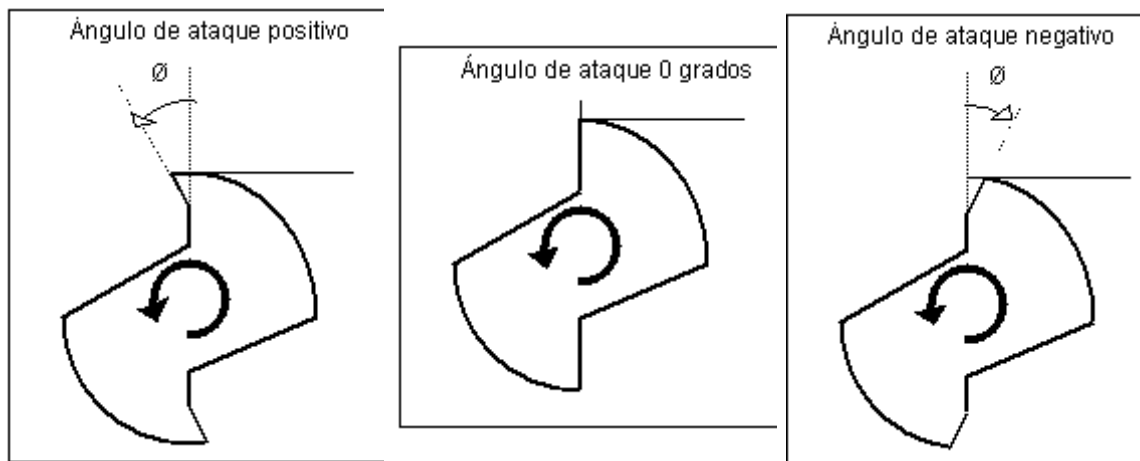
Ángulo de ataque o perfil de corte

El ángulo de ataque es el ángulo que forma el perfil de corte con la línea que une el punto de contacto herramienta-pieza con su centro. Las consideraciones serán las mismas tanto para las herramientas integrales como para las herramientas de plaquitas.

Este ángulo juega un papel muy importante en el comportamiento del corte, dependiendo del tipo de material a mecanizar. Así, este ángulo no puede ser el mismo en materiales que precisen ser arrancados que en materiales que precisen ser rotos.

Se ha dicho que los materiales blandos como el aluminio, el cobre y algunos aceros pretratados son de buena maquinabilidad, pero tienen el problema de su pastosidad: es difícil arrancar y separar la viruta de la pieza. Para estos materiales son necesarios ángulos de corte positivos que penetren realmente en el material y lo seccionen.

Para materiales duros, tipo aceros tratados, un ángulo de corte positivo provoca casi inmediatamente la ruptura del perfil de corte dada su fragilidad y poca robustez. Si el material es duro pero frágil, emplearemos ángulos de corte negativos, ya que el material no necesita ser arrancado sino simplemente roto.



Como se verá en el apartado siguiente, el perfil de corte positivo va generalmente asociado a un canal de evacuación de virutas grandes y el perfil de corte negativo a un canal de evacuación más pequeño. Estos dos factores determinarán el espacio físico disponible para la ubicación del ánima de la herramienta. Así pues, las herramientas o plaquitas que tienen ángulos de ataque positivos acostumbra a tener ánimas de herramienta más pequeñas y, por lo tanto, menos robustez que las herramientas de perfil de corte más negativo.

El problema aparece en determinados aceros inoxidable que sean duros pero a la vez resistentes y pastosos debido a su composición. Para este tipo de materiales se emplean geometrías no tan negativas, pero con unas condiciones de corte notablemente inferiores a las elegidas para aceros más frágiles o para materiales como el aluminio, con el fin de conservar el mayor tiempo posible este perfil de corte.

Canal de evacuación de la viruta y número de dientes

El canal de la evacuación de la viruta y su ángulo son también factores determinantes en el comportamiento de la herramienta. En materiales que permiten un gran desalajo de viruta por unidad de tiempo, como el aluminio, este canal ha de ser lo más grande posible con el fin de facilitar su evacuación. En estas condiciones, el ángulo del canal también ha de ser grande

El problema que presenta esta configuración es que resta robustez a la herramienta, ya que limita el espacio para el ánima, a la vez que limita el número de dientes o labios que es posible ubicar.

En materiales que no permiten tanto arranque de viruta este canal podrá ser más pequeño, posibilitando así un mayor número de dientes en la herramienta y unos ángulos más pequeños. Esto conferirá mucha más robustez que la configuración anterior.

Así pues, para materiales como el aluminio se suelen utilizar herramientas con pocos labios (2 labios por lo general) con ángulos de evacuación superiores a los 60 grados, mientras que para herramientas destinadas al trabajo de materiales duros se prefiere un mayor número de labios (4,6,8... dependiendo del diámetro de la herramienta) con ángulos de evacuación de hasta 45 grados.

Es necesario considerar que, en el caso de materiales duros en operaciones de acabado, es más conveniente utilizar herramientas con un número de labios no muy elevado y hasta con un ángulo de ataque no tan negativo como el elegido en las operaciones de desbaste o semiacabado.

En las operaciones de acabado el sobrante de material que ha de cortar la herramienta en estos tipos de materiales no es muy grande (ya se vera que esto también depende del tamaño de la pieza en si y de la herramienta en juego) por lo tanto las fuerzas de corte no serán muy elevadas. No es tan prioritario en este caso la robustez de la herramienta como lo es el echo de conseguir un corte limpio y de disponer de una buena tolerancia dimensional de la herramienta.

Las herramientas de muchos labios presentan más problemas de rectificado en su manufactura y la diferencia de diámetros entre los labios es más grande. Se pueden cifrar estas diferencias en el orden de 0.02 mm o más (las herramientas esféricas integrales de dos labios soportan tolerancias inferiores a 0.01 mm). Si el número de dientes se multiplica el número de diferencias en una misma fresa, y se esta trabajando con sobranes de material del orden de media décima, se puede comprobar muy bien que, proporcionalmente, el grado de no repetibilidad en las condiciones de corte de los diferentes dientes es muy malo, lo cual comportara inestabilidad en el corte de la herramienta y vibraciones que se reflejarán en la calidad de la superficie final.



Fig.11.- Ángulo de evacuación grande y dos labios para una gran evacuación de viruta

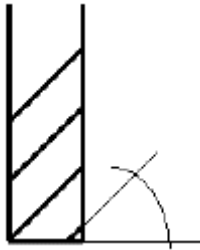


Fig.12.- Ángulo de evacuación de 45 grados aproximadamente y cuatro labios



Fig.13.- Ángulo de evacuación pequeño y seis labios. Herramienta empleada para trabajo en aceros duros

La longitud de la herramienta

Un hecho determinante que provoca inestabilidad y problemas de vibraciones durante el mecanizado es la longitud de la herramienta empleada. Es lógico pensar que no se comportará de igual manera una herramienta de diámetro D y en longitud L que otra de un mismo diámetro pero con una longitud LL mucho más grande.

Esta claro que la herramienta más larga tiene más posibilidades de sufrir flexiones en las mismas condiciones de corte que la corta, flexiones que son orígenes de vibraciones que a su vez son causa de desgastes prematuros, roturas progresivas y mala calidad en la superficie mecanizada.

Se calcula que las herramientas con relaciones longitud-diámetro $L/D > 5$ se empiezan a encontrar problemas especialmente si el material a cortar es exigente. A partir de estos valores se ha de empezar a tener más cuidado con la herramienta y es preciso suavizar las condiciones de corte si se desea una respuesta correcta.

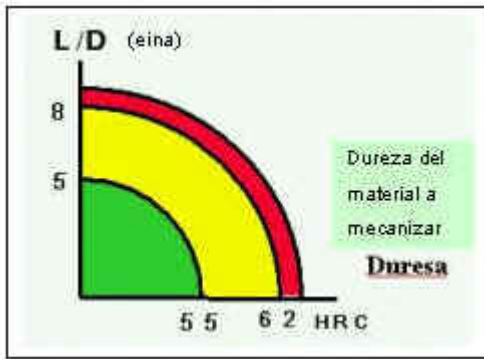


Fig.14.- Gráfico orientativo que informa sobre la condición de corte de una herramienta empleada en el mecanizado de aceros duros

Color verde : zona segura de trabajo

Color amarillo : zona peligrosa, hay que reducir las condiciones de corte de la herramienta si se desea su vida provechosa

Color rojo : zona de trabajo no recomendable aunque se reducen mucho las condiciones de corte



Fig. 15.- Ejemplo de una herramienta sobrealargada para el mecanizado de zonas con cierta profundidad

CONSIDERACIONES FÍSICO-QUÍMICAS

Hay un hecho significativo que determina el diseño y el comportamiento de las herramientas en este tipo de mecanizado: en la zona de corte se alcanzan a temperaturas muy elevadas, y la herramienta ha de estar preparada para cortar en estas condiciones.

Este incremento de la temperatura en la zona de trabajo es precisamente una consecuencia originada por la utilización de estas nuevas generaciones de herramientas, que han sido ya diseñadas para soportar mayores velocidades de corte, parámetro directamente relacionado con la temperatura en la zona de trabajo.

Pero hay que hacer todo lo posible para tener esta temperatura controlada y estable. Mediante unas buenas y adecuadas condiciones de corte de la herramienta: velocidad de corte, avance por diente, pasada axial y radial y trayectorias de corte, es preciso conseguir condiciones estables y el control de la temperatura deseada.

Se pretende además que estas condiciones de corte permitan la evacuación de la gran cantidad de calor generada a través de la viruta, dando el menor tiempo posible a que este calor se transmita de la pieza a la herramienta. Si las condiciones de corte son adecuadas, el mayor porcentaje de calor se almacena en la viruta y, si la expulsión de esta zona de corte es correcta, se pueden alcanzar regímenes estables de trabajo sin incrementos progresivos o súbitos de la temperatura, que es lo que garantiza la mayor vida de la herramienta.

Estas elevadas temperaturas en la zona de corte son las que provocan que, mientras en el mecanizado convencional predomina el mecanismo de desgaste por abrasión, en el

mecanizado de alta velocidad el factor limitador de la vida de la herramienta es el desgaste por difusión: la mayor temperatura de la zona de trabajo aumenta la reactividad química de los materiales en contacto (pieza y herramienta).

El ánima de la herramienta

Hasta la aparición y desarrollo de esta nueva tecnología los materiales de que estaban hechas las herramientas era mayoritariamente aceros rápidos (HSS) para el mecanizado de materiales férricos y no férricos blandos, y de carburo de tungsteno para el mecanizado de materiales más exigentes. Pero estos tipos de herramientas se mostraron totalmente insuficientes para conseguir altas velocidades de corte, especialmente en materiales de muy difícil maquinabilidad ya que estaban expuestos a grandes esfuerzos térmicos y mecánicos. Fallaban prematuramente por abrasión, craterización, por roturas de corte y por soldaduras en frío.

Anteriormente también había que aplicar a estos materiales ciertos recubrimientos, como el nitrato de titanio, para intentar mejorar estas prestaciones. Pero los resultados distaban mucho de los que se pueden obtener actualmente.

Las nuevas generaciones de herramientas utilizan estos materiales duros, pero optimizados en calidad. Se les han aplicado nuevas generaciones de recubrimientos. También se pueden utilizar fresas macizas como los Cermets (carburo de titanio TiC y nitrato de titanio TiN que normalmente utilizan un enlace níquel-cobre), fresas cerámicas y herramientas con ánima también de metal duro pero con inserciones de nitruro de boro policristalino (PCBN).

Los Cermets tienen vidas útiles mayores que los metales duros sin recubrimiento debido a su mayor resistencia en la arista, menor tendencia a la adherencia y mayor estabilidad química.

Las cerámicas tienen una elevada resistencia al desgaste a altas temperaturas, pero una baja tenacidad, que da lugar a roturas de la arista de corte.

Las herramientas de metal duro recubiertas permiten trabajar a mayores velocidades que con los Cermets y, además, tienen un mejor comportamiento respecto al desgaste y por lo tanto respecto a la vida de la herramienta (aproximadamente el doble, aunque esto depende del material y de las condiciones de corte).

En el caso de las herramientas recubiertas es esencial la correcta elección del sustrato base, ya que solo los carburos con un gran revestimiento, y muy fino, pueden permitir la obtención de herramientas con unas propiedades mecánicas que satisfagan las exigencias. Así se utiliza preferentemente carburo de tungsteno micrograno con tamaños de grano del orden de 0.8 0.3 μm .

Del nitrato de boro policristalino se hablara con mayor detalle más adelante.



Fig. 16.- Tres ejemplos de herramientas integrales de carburo de tungsteno sin

recubrimiento

El recubrimiento

Las nuevas generaciones de recubrimientos se distinguen por un número de cualidades esenciales: su dureza les protege contra el desgaste abrasivo, su naturaleza cerámica les protege contra la soldadura en frío, su bajo coeficiente de fricción permite mejorar el flujo de la viruta y por lo tanto la eliminación del calor, y su gran estabilidad química les protege del desgaste por difusión.

Estos recubrimientos acostumbran a tener un grano fino de menos de una micra de diámetro. Los más utilizados son: el nitrato de titanio (TiN), nitrato de carbono-titanio (TiCN) y el nitrato de aluminio-titanio (TiAlN). El espesor típico suele ser de 2 a 12 μm , y a menudo se utilizan recubrimientos del tipo multicapa.

El recubrimiento se aplica por deposición física gaseosa PVD o por deposición química CVD. La ventaja del PVD radica en la baja temperatura del proceso: 500 ° C como máximo. El CVD exige temperaturas mayores de 800 ° C, y el metal duro de la zona de corte se vuelve frágil. El método PVD es el más adecuado para mantener las aristas de corte en condiciones de agudez y estabilidad de los cortes.

De entre todos los recubrimientos disponibles, sin ninguna duda, el que ofrece más posibilidades en su utilización es el TiAlN. Es capaz de soportar temperaturas de trabajo mayores sin perder sus propiedades ni sufrir un desgaste prematuro en comparación con los demás recubrimientos. El inconveniente es que es más caro, aunque en ciertas aplicaciones es el más rentable.

Las propiedades del TiAlN son las siguientes:

- Su alta resistencia a la oxidación permite trabajar a mayores temperaturas.
- Su menor conductividad térmica protege los cortes y aumenta la eliminación del calor vía viruta.
- Su mayor dureza en caliente ofrece mejor protección contra el desgaste.
- Su mejorada resistencia química reduce el desgaste por cráter.

Las temperaturas que puede alcanzar la herramienta son del orden de 600-800° C. El patrón de oxidación de este recubrimiento asegura una protección del sustrato más allá de la temperatura de oxidación. Aunque este punto de oxidación sea elevado, es siempre superado por la temperatura de trabajo. Así pues, es importante disponer de una temperatura de oxidación elevada, pero también lo es disponer de un buen patrón de oxidación. Algunos recubrimientos de TiAlN tienen patrones de oxidación capaces de proteger el sustrato.

La mayor proporción de Al que de Ti en el recubrimiento provoca que, durante la oxidación, se creen óxidos de aluminio que se adhieren a la capa exterior del recubrimiento protegiéndolo durante más tiempo. Si la concentración dominante es la de Ti, los óxidos de titanio no se adhieren al recubrimiento sino que se disipan, provocando una continua pérdida de Ti que conduce a un desgaste prematuro de la herramienta.



Fig. 17.- Dos ejemplos de fresa con ánima de carburo de tungsteno y recubrimiento de TiAlN

El patrón de desgaste en las herramientas de metal duro recubiertas de TiAlN revela 4 zonas bien diferenciadas (ver figura18). En la zona 1, el sustrato ha quedado al descubierto. En la zona 2 todavía se puede encontrar recubrimiento, pero ha sufrido un pequeño desgaste. En la zona 3 se observan incrustaciones soldadas del material mecanizado. En la zona 4 se puede encontrar el recubrimiento intacto.

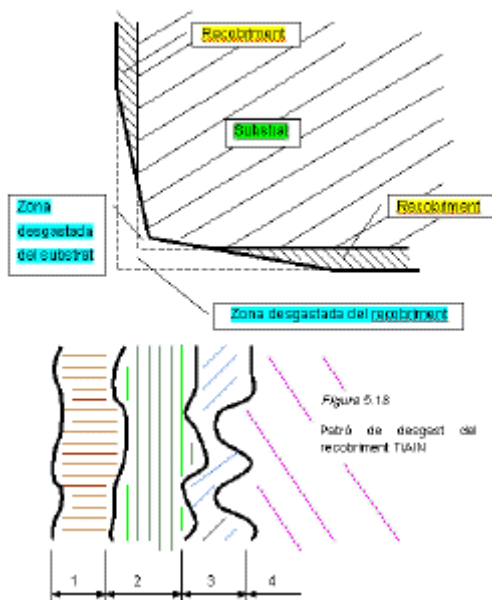


Fig.18.- Patrón de desgaste del recubrimiento TiAlN



Fig. 19.- Plaquitas rotas por una mala selección de los parámetros de corte

Se puede advertir cómo la concentración de Al en la zona desgastada tiene tendencia a aumentar a medida que nos desplazamos hacia la zona donde el sustrato queda al descubierto, mientras que la de Ti se mantiene constante. Esto se debe a la formación de los óxidos de aluminio anteriormente descritos, que no se disipan con el aire sino que se fijan en la superficie del recubrimiento protegiéndolo así contra el desgaste.

El PCBN

El nitrato de boro policristalino (PCBN) es posiblemente el material más novedoso en el campo de la fabricación de las herramientas de corte. Las fresas de espiga con cabezales PCBN soldados a ejes HSS o de carburo de tungsteno están cada vez más disponibles en el mercado.

Se trata de un material extremadamente duro capaz de mantener sus propiedades físico-químicas a muy elevadas temperaturas, hasta más de 1000° C.

El éxito de trabajar con CBN está en el mecanismo de *mecanizado en caliente*, por medio del cual el pegado de la pieza en la zona de corte es el resultado de la temperatura generada por las altas velocidades de corte. A velocidades lentas el PCBN no es efectivo, ya que el material de la pieza continua estando duro y hay problemas de desgaste o roturas de los cortes.

Las herramientas de CBN no son realmente aconsejables debido a su fragilidad, y sólo es conveniente su utilización cuando se trabajan aceros extra-duros imposibles de ser trabajados con otros tipos de herramientas, incluyendo el recubrimiento TiAlN.

Su uso requiere mucha rigidez en la máquina para evitar la rotura de la herramienta debido a la fragilidad del material. Además, con herramientas de diámetro muy pequeño obliga a trabajar a muy altas revoluciones si se desea mantener una velocidad de corte elevada y adecuada (800-1200 m/m). Estas altísimas revoluciones exigen altísimos avances de trabajo difícilmente alcanzables por las máquinas actuales.

Existen distintos tipos de microestructuras policristalinas que determinan diferentes comportamientos. De entre todas ellas hay que seleccionar la que ofrezca el comportamiento más adecuado para la aplicación a realizar.

El diamante

Las herramientas del diamante policristalino PCD se utilizan a menudo en el mecanizado de alta velocidad en materiales no metálicos, sobre todo para grafito, pero no sirven para el mecanizado de acero, no sólo porque el diamante reacciona con el hierro, sino también porque se convierte en grafito a más de 750°C