

P1

DISEÑO, PROCESAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE LAMINADOS DE TIPO CERMET/WC-CO Y WC-CO/WC-CO PARA APLICACIONES DE HERRAMIENTAS

Rodríguez, E.²; González, L.M.²; Ordóñez, D.²; Gotor, F.J.¹; Bermejo, R.³; Torres, Y.²(ytorres@us.es)

¹ Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla. CSIC-US.

²TEP123: Metalurgia e Ingeniería de los Materiales. U. de Sevilla.

³Montanuniversität Leoben, Institut für Struktur und Funktionskeramik – Leoben, Austria

RESUMEN

Las herramientas para mecanizado de alta velocidad están sometidas a condiciones de servicio extremas y variables, requiriéndose el desarrollo de materiales con composiciones y microestructuras que varíen localmente (función gradiente) según la aplicación. En este trabajo, se presenta un novedoso diseño multicapa con forma de prisma basado en la disposición alternada de capas de cermet y metal duro. Las capas externas de cermet confieren resistencia a la oxidación y al desgaste, mientras que las de WC-Co aportan una mejora de la tenacidad de fractura y de la resistencia a la propagación de grietas. El material laminado debe combinar las capas a distinto estado tensional (tracción o compresión). Se han estimado dos distribuciones de tensiones posibles en el laminado (σ_R (WC-Co) = -742 MPa y σ_R (Cermet) = 82,5 MPa) y (σ_R (WC-Co) = -666 MPa y σ_R (Cermet) = 166 MPa). Las tensiones de compresión de las capas tenaces y la fuerte intercara actúan como barrera contra la propagación de los defectos presentes o generados en la capa externa.

Palabras clave: *Laminados, Función gradiente, tensiones residuales, tenacidad de fractura, apantallamiento elástico.*

ABSTRACT

Cutting tools used for high-speed machining are subjected to extreme and variable operating conditions, which requires the development of materials with compositions and microstructures that change locally depending on the application (gradient function). In this work, we propose a novel multilayer design in the shape of prism, based on the alternate arrangement of cermets and hard metals layers. The cermet outer layers provide oxidation and wear resistance, while WC-Co layers improve fracture toughness and crack propagation resistance. The laminate must combine the layers at different stress state (tensile or compressive stress). We calculated two possible stress distributions (σ_R (WC-Co) = -742 MPa y σ_R (Cermet) = 82,5 MPa) and (σ_R (WC-Co) = -666 MPa y σ_R (Cermet) = 166 MPa). The compression stress acts as a barrier to the propagation of the existing or created defects on the external cermet layers.

Keywords: Laminates, functionally graded materials, residual stresses, fracture toughness, crack shielding.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En la actualidad, el mecanizado de alta velocidad está adquiriendo una creciente importancia, ya que además de permitir obtener mejores acabados superficiales, también supone un aumento de la productividad y disminución del coste asociado. Este tipo de proceso impone condiciones de servicio cada vez más extremas en términos de temperatura y tensiones inducidas, por lo que se requieren herramientas de corte con un excelente comportamiento termo-mecánico y tribológico lo que hace que el principal parámetro a tener en cuenta sea el desgaste producido por las elevadas temperaturas que se alcanzan en la zona de corte. En definitiva, los materiales utilizados para el diseño de herramientas de corte deben combinar diferentes propiedades, entre las cuales, resistencia al desgaste, tenacidad de fractura, dureza, fiabilidad mecánica a alta temperatura, buen comportamiento frente a impactos, estabilidad química y coeficiente de fricción son fundamentales.

Los materiales más usados en el mecanizado de alta velocidad son los carburos cementados, tales como el cermet (Ti(C,N)-Co) y el metal duro (WC-Co) (Figura 1). Los cermets, como principal ventaja, ofrecen una gran resistencia al desgaste y a la oxidación, sin embargo, tienen una tenacidad de fractura relativamente baja, convirtiéndolo en un material cuya utilización se restringe a acabados superficiales, no siendo recomendable en trabajos cíclicos o con cargas concentradas. Por otro lado, los metales duros poseen una buena tenacidad de fractura además de ser químicamente inestables a elevadas temperaturas, ya que, debido a los procesos de difusión, se debilita la unión de los carburos y provocan un desgaste significativo.

En este sentido, para mejorar la resistencia al desgaste a alta temperatura, se puede recurrir a metales duros recubiertos, como solución al problema del desgaste por inestabilidad química. No obstante, también se presentan otras soluciones como la utilización de materiales con función gradiente, estos son aquellos materiales caracterizados por un gradiente de composición y/o de microestructura desde la

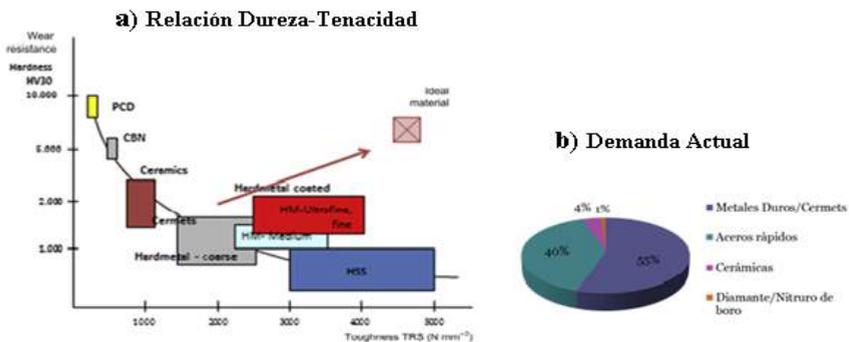


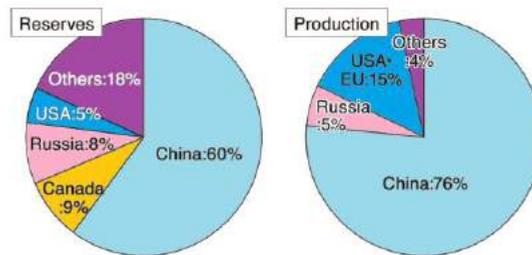
Figura 13: Relación dureza-Tenacidad y demanda actual de herramientas de corte.

superficie hasta el interior del material, este efecto puede producirse, por ejemplo, mediante un tratamiento térmico superficial [1] o bien usando materiales compuestos con diferentes propiedades intrínsecas. Es en este último campo, donde se centra la investigación desarrollada en este trabajo.

Reducción del consumo de Wolframio

Los carburos cementados representan, dadas sus propiedades, el 75% del mercado internacional de herramientas de corte lo que hace que el consumo de wolframio no deje de aumentar a medida que se incrementa la producción de herramientas de corte de carburo cementado.

Figura 14: Distribución de las reservas y de la producción de W



El principal problema radica en la distribución del wolframio a nivel mundial ya que el 60% de las reservas mundiales están localizadas en China y centralizan el 76% de la producción del mismo (Figura 2). Debido al posible riesgo de desabastecimiento, al ser un material usado en una amplia variedad de industrias y a ciertas políticas promovidas para aumentar su precio, es razonable plantear la opción de reducir su consumo.

En el trabajo firmado por T. Ishida y otros [2], se investiga la posibilidad de un material compuesto por Carburo de Wolframio y Cermet con un diseño tal que permita una reducción del consumo de Wolframio manteniendo sus propiedades como material para herramienta de corte. El filo del material está hecho de Carburo cementado de modo que se mantengan la tenacidad y la resistencia propias del mismo y el seno del material está compuesto por Cermet, un material con propiedades parecidas como el coeficiente de dilatación térmica o la temperatura de sinterizado de modo que se pueda crear un material compuesto con buena integridad estructural.

Cabe destacar que se consiguió una reducción de un 20% del consumo de Wolframio sin pérdida de propiedades lo que supone un gran avance ya que el Titanio, base del Cermet, presenta un riesgo mucho menor en términos de reservas y distribución (Figura 3).

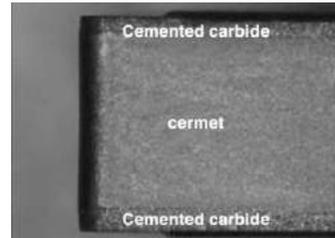


Figura 15: Estructura del material.

Laminados cerámicos

Las cerámicas laminadas son una excelente opción para aplicaciones con mucha carga estructural por sus buenas propiedades mecánicas de tenacidad de fractura, resistencia y fiabilidad mecánica [3]. La clave es el uso de tensiones residuales de compresión. Para ello se debe optimizar unas variables como el desajuste tensional, el ratio de volúmenes, los grosores de láminas y las distribuciones de las mismas.

En la naturaleza se pueden apreciar inspiradores ejemplos como la cocha de los moluscos, que posee una extraordinaria dureza y resistencia, gracias al apantallamiento elástico producido por la diferencia de las propiedades elásticas del carbonato cálcico y los biopolímeros que la forman. Esta idea da base a la tecnología de materiales combinando cerámicas con otros materiales cerámicos, metales o polímeros.

En los laminados cerámicos debemos recurrir a las tensiones residuales para obtener la distribución de tensiones deseada. Los diferentes coeficientes de dilatación térmica durante el enfriamiento son los causantes del desajuste tensional que posteriormente se traduce en las tensiones residuales deseadas (alternando compresión y tracción en las capas).

Se producen varios sistemas de endurecimiento siendo el más importante el apantallamiento elástico (crack shielding). Esto es muy beneficioso para los laminados con intercaras fuertes ya que ese apantallamiento genera un mayor endurecimiento.

Dependiendo de la disposición y de los coeficientes de dilatación térmica la capa externa puede ser bien de tracción o de compresión. Cuando las tensiones externas son de compresión se caracterizan por una alta dureza y una excelente resistencia al desgaste y las capas externas a tracción (internas a compresión) además de una alta dureza suelen tener una alta fiabilidad y umbral de resistencia, es decir, un valor mínimo por debajo del cual el material no falla.

La secuencia de láminas suelen ser de configuraciones simétricas para evitar el pandeo. La mayoría de los trabajos utilizan dos tipos de láminas en configuración sencilla (ABA...ABA) por lo que el único parámetro a optimizar será el grosor (volumen) de las láminas.

Los resultados mencionados en este trabajo muestran que las tensiones residuales en las láminas están determinadas por las relaciones de volúmenes y no por el grosor o distribución de las láminas. Además, las tensiones residuales dependen únicamente del desajuste tensional que, en principio, debería ser lo más alto posible.

Sin embargo existirá un valor máximo que evita la aparición de grietas por excesivas tensiones de tracción. Para láminas externas a compresión, existe un pico de dureza para un grosor alto de la capa externa. Para laminados con capas internas de compresión el pico de dureza se produce para capas a tracción tan gruesas como sea posible y capas a compresión tan delgadas como sea posible, manteniendo la capa externa relativamente delgada en relación con la siguiente.

Laminados Cermet-Metal duro

En este trabajo se presentan los resultados preliminares de una nueva clase de materiales con un diseño laminado dedicados a las herramientas de corte a alta velocidad. Se han fabricado y caracterizado compuestos de forma cilíndrica alternando 4 láminas de cermet y 3 de metal duro (Figura 4) [4].

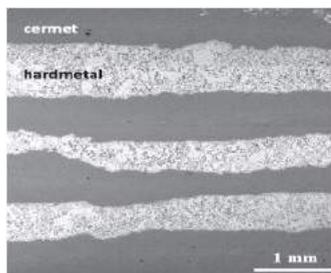


Figura 16: Estructura de las laminas.

La capa exterior de cermet induce una buena resistencia al desgaste y a la oxidación, mientras que las interiores de metal duro actúan como barrera contra la propagación de las grietas. La disposición de las láminas de metal duro se ha realizado para que se generen tensiones internas de compresión, lo que significa que se trata de un diseño tolerante a los defectos.

La muestra se conformó y se le aplicó el proceso de sinterización asistida con presión con lo que se consiguió una estructura con fuertes intercaras (Figura 5) que dieron cohesión e integridad estructural al laminado de manera que se produjeron los mecanismos de endurecimiento nombrados.

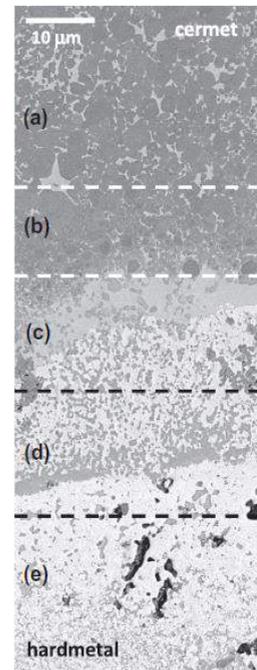


Figura 5: Imagen de la interfase ampliada por SEM.

Objetivos

El objetivo principal de este trabajo será:

- Trasladar esos resultados obtenidos para los laminados cilíndricos a un nuevo diseño de barras (forma de prisma).

Además, se han marcado los siguientes objetivos secundarios:

- Mejora del cermet para compensar la baja tenacidad de fractura.

- Mejora del metal duro, probaremos con un metal duro comercial.
- Mejora del diseño. Lo cual engloba varias opciones: la optimización del número de capas, la optimización de la distribución y los grosores de las mismas.
- Mejora del proceso de producción. Formado por la primera parte manual hasta el prensado y la parte final del ciclo de sinterizado.

METODOLOGÍA

Material de estudio

La mezcla de WC-20wt%Co (30.6 % vol) (metal duro propio) se obtuvo mediante molienda de polvos de WC comercial (99.6% pureza, <1 μm , Strem Chemicals) mezclado con Co (99.9% pureza <100 mesh, Sigma) durante una hora en un molino planetario (Pulverisette 7, Fritsch) usando jarros y bolas de acero templado. También se utilizaron diferentes Metales Duros comerciales (Durit, GD45, GD40, GD20 y GD13). La mezcla de $\text{TiC}_{0.5}\text{N}_{0.5}$ -20wt%Co (-12.7% %vol) (cermet) se obtuvieron por el proceso mecanoquímico conocido como MSR (“mechanically induced self-sustaining reaction”) a partir de polvos de Ti (99% pureza, <325 mesh, Strem Chemicals), C (grafito, <270 mesh, $\text{Fe} \leq 0.4\%$, Merck) y Co (99.8% pureza, <100 mesh, Strem Chemicals). El proceso de MSR se llevó a cabo en un molino planetario bajo una atmósfera de nitrógeno. El cermet con grafito se realizó añadiendo un 1,8% de grafito a la mezcla anterior tras el proceso de MSR. Se han fabricado muestras monolíticas a partir de estas mezclas, de ambos tipos de cermet (Cermet y Cermet + G). Las muestras se conformaron en una prensa uniaxial, empleando una matriz de acero endurecido y aplicando una presión de 10 MPa, con una velocidad de compresión de 0,5 MPa/min. A continuación, las muestras se sometieron a un proceso de sinterización utilizando una matriz de grafito. Los laminados se prepararon usando el mismo método, con la única diferencia de que durante el proceso de introducción de los polvos en la matriz, estos se comprimen ligeramente con el pistón de la prensa para crear cierta uniformidad en las láminas.

Caracterización microestructural

Las fases cristalinas se identificaron por difracción de rayos-X (XRD) empleando un difractómetro PANalytical X'Pert PRO. Se barrió un rango 2θ desde 20° hasta 100° con un paso de $0,05^\circ$ y un tiempo de adquisición en cada paso de 300 s. La microestructura de los laminados se estudió por microscopía electrónica de barrido (SEM) empleando un microscopio Hitachi S-4800 SEM-FEG, provisto de un detector Quantax (Bruker) para análisis semicuantitativo por espectroscopía de energía dispersiva de rayos-X (EDS).

Caracterización mecánica

Los ensayos de flexión en 4 puntos se realizaron con una máquina de ensayos universales INSTROM 5505 con los que se obtuvo el valor de resistencia a fractura usado en el estudio de Weibull, que informa sobre la fiabilidad y la resistencia mecánica promedio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Número de láminas.

Se realizó un estudio de la influencia de aumentar el número de láminas, desde una cantidad inicial de 5, para observar la influencia sobre las tensiones residuales del laminado.

Como se puede observar (Figura 6), al aumentar el número de láminas, las tensiones de compresión en el metal duro son cada vez más negativas y las tensiones residuales de tracción en el cermet son cada vez mayores, esto se debe a que al haber siempre una lámina más de cermet, la relación de volumen de cermet con el metal duro es cada vez menor.

Grosor de las láminas.

El efecto sobre las tensiones residuales de los grosores en las láminas se estudió según dos directrices de diseño diferentes: por un lado se redujo el grosor relativo de las láminas de metal duro y en segundo lugar se redujo el grosor de la capa externa (Figura 6).

Se observa una reducción de la tensión residual de tracción del cermet y un aumento de la tensión de compresión del metal duro. La reducción de la capa externa no influye en dichos valores al no modificarse la relación de volúmenes, el objetivo de este cambio es reducir el tamaño potencial de grieta.

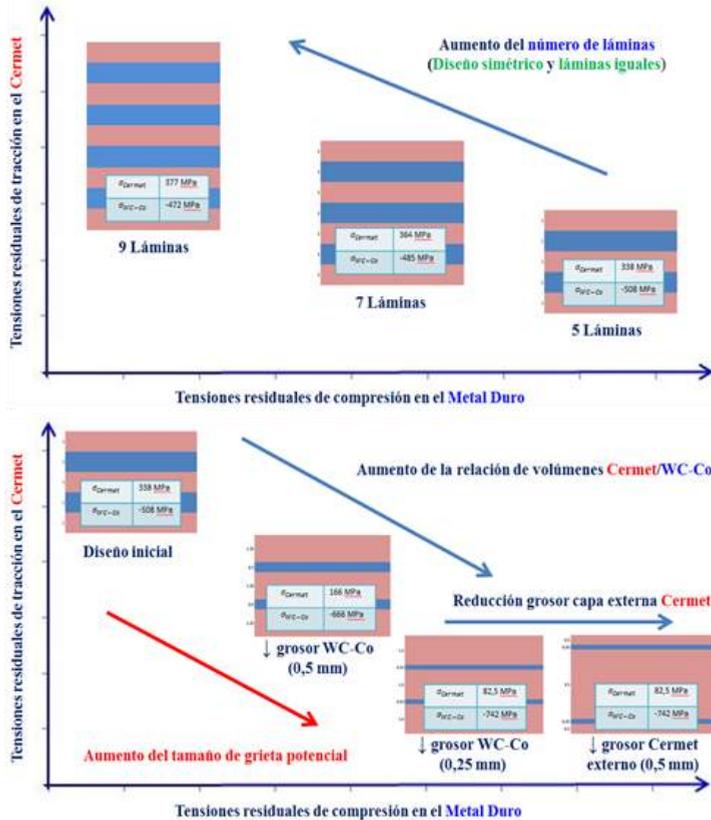


Figura 6: Esquema de la evolución de las tensiones residuales según el diseño (arriba, laminas; abajo, distribución)

Mejoras de los materiales: Cermet

Las muestras monolíticas de Cermet y de Cermet con grafito se ensayaron mediante el ensayo de flexión a 4 puntos, los resultados de resistencia a rotura se analizaron mediante un análisis estadístico de Weibull obteniéndose los siguientes resultados (Gráficos 1 y 2):

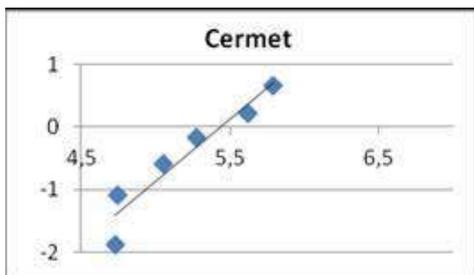


Gráfico 1: Cermet ($\sigma_0 = 230 \text{ MPa}$, $m = 2$)

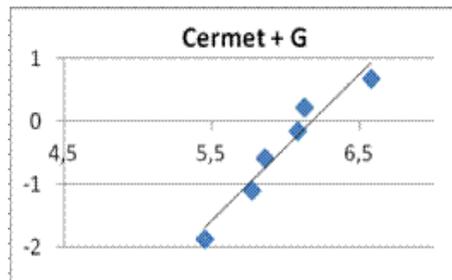


Gráfico 2: Cermet + G ($\sigma_0 = 480 \text{ MPa}$, $m = 2,3$)

Mejoras de los materiales: Metal duro

Del mismo modo que con el Cermet, se realizaron ensayos de las muestras monolíticas de Metal duro, tanto del propio como de los diferentes grados de metal duro de Durit. En los gráficos 3 a 5 se muestran los resultados del análisis de Weibull del Metal duro Propio y de los grados GD20 y GD40:

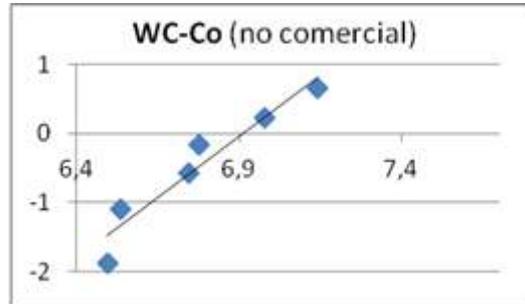


Gráfico 3: WC-Co Propio ($\sigma_0 = 230 \text{ MPa}$, $m = 2$)

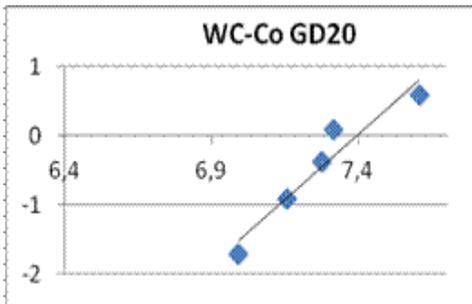


Gráfico 4: WC-Co GD20 ($\sigma_0 = 1620 \text{ MPa}$, $m = 3,8$)

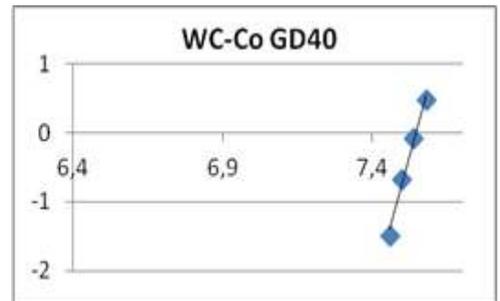


Gráfico 5: WC-Co GD40 ($\sigma_0 = 1895 \text{ MPa}$, $m = 16$)

Laminados: (0,25) WC-Co / (0,5 y 3,5) Cermet

Inicialmente se fabricaron laminados con capas de 0,25 mm de metal duro (Figuras 7 y 8). Como se puede observar, tenían graves problemas estructurales, independientemente del ciclo de sinterizado usado, además de delaminación, porosidad excesiva, ausencia de cristales de WC y difusión excesiva del Cobalto.

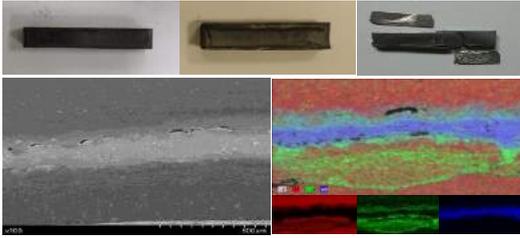


Figura 7: Imágenes por SEM del laminado (0,25 WC-Co).

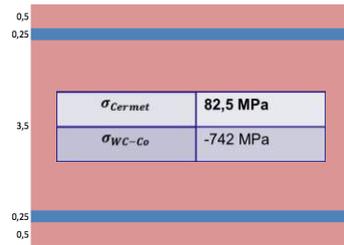


Figura 8: Diseño Laminado (0,25 WC-Co)

Laminados: (0,25) WC-Co / (0,5 y 3,5) Cermet

En un paso posterior de la investigación se produjeron laminados con el doble de grosor de la lámina de Metal duro (0,5 mm) (Figuras 9 y 10). Las imágenes de SEM demuestran resultados similares por lo que en un futuro se estudiarán diferentes opciones para resolver estos problemas.

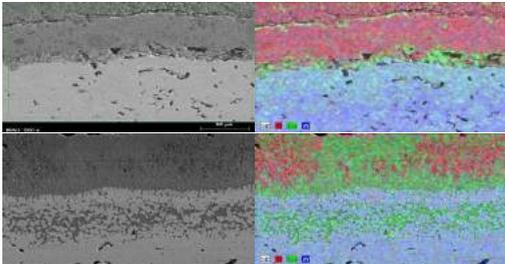


Figura 9: Imágenes por SEM del laminado (0,5 WC-Co).



Figura 10: Diseño Laminado (0,25 WC-Co)

Laminados WC-Co/WC-Co (0,5) GD40 / (0,5 y 3) GD13

De forma paralela se han comenzado estudios de laminados usando diferentes grados de Metal duro, con esto se pretendían resolver los problemas estructurales producidos por las diferencias en los CET's entre Cermet y Metal duro al usar un único material. Esta pequeña diferencia, gracias al diseño usado, puede conseguir tensiones residuales de comprensión suficientes en las capas internas como para que se produzcan los métodos de endurecimiento buscados.

Los resultados de integridad estructural y de cohesión entre las láminas son prometedores, no obstante serán necesarios más cálculos y ensayos para obtener resultados más definitivos.

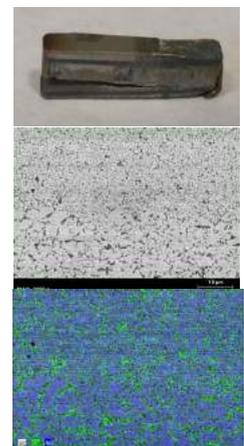


Figura 11: Laminado WC-Co (GD40-GD13)

CONCLUSIONES

En líneas generales, se han realizado grandes avances en términos de integridad estructural además de la mejora y optimización de diferentes aspectos como el diseño de las láminas o la calidad de los materiales.

Al elaborar muestras monolíticas se apreció una mejor integridad estructural y desaparición del pandeo. Aun así se observó una excesiva fragilidad en el cermet que se consiguió corregir en parte gracias a la adición de un 1,8% de grafito a los polvos de partida. En el caso de la mejora del Metal Duro al comparar los resultados de la curva de distribución de Weibull del producto de fabricación propia y distintos polvos comerciales (GD13, GD20, GD40, GD45) se apreció una mejora considerable pese a que serán necesarios más ensayos antes de elegir la combinación óptima.

El estudio del efecto del diseño sobre las tensiones residuales reveló un óptimo para 5 láminas con una relación de volúmenes alta para inducir altas tensiones de compresión en el metal duro y bajas de tracción en el cermet. También es importante mantener la capa exterior delgada en comparación con la siguiente para reducir el tamaño potencial de la grieta.

Estos laminados presentaron problemas de delaminación, falta de integridad estructural, alta porosidad, ausencia de cristales de WC y difusión excesiva del Co con independencia del ciclo de sinterización o del diseño usado.

De forma paralela también se elaboraron laminados con diferentes grados de metal duro obteniendo unos resultados de integridad estructural muy prometedores. Aún serán necesarios más ensayos para conseguir unos resultados concluyentes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer a la junta de andalucía por la financiación de este trabajo a través del proyecto motriz de excelencia p12-tep-2622, además de extender el mismo a los técnicos de laboratorio jesús pinto y mercedes sánchez. por su colaboración en la caracterización microestructural y mecánica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Fang, Z., et al., (2011) A review of liquid phase migration and methods for fabricación of functionally graded cemented tungsten carbide.
- [2] Ishida, T., et al. (2011) Development of cemented carbide Tool of reduced rare metal usage.
- [3] Bermejo, R., et al. (2011) Strategies for fracture toughness, strength and reliability optimisation of ceramic-ceramic laminates.
- [4] González, L.M., et al. (2011) Diseño y fabricación de laminados tipo ti(c,n)-co/wc-co con un potencial equilibrio de propiedades en servicio