

Índice.....II
Lista de Tablas.....IV
Lista de Figuras.....V

I – Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	7
3. MARCO TEÓRICO	11
3.1. MECANIZADO DE ALTA VELOCIDAD (MAV)	13
3.1.1. VENTAJAS E INCONVENIENTES.....	14
3.1.2. MATERIALES DE HERRAMIENTA PARA MAV.....	17
3.2. MATERIALES DE HERRAMIENTA	20
3.2.1. CARBUROS CEMENTADOS, WC-Co.....	20
<i>Origen</i>	20
<i>Estructura y fases</i>	21
<i>Parámetros estructurales</i>	27
<i>Proceso de fabricación</i>	31
<i>Propiedades</i>	33
<i>Aplicaciones</i>	36
3.2.2. CERMETS.....	40
<i>Origen y desarrollo</i>	40
<i>Molienda reactiva</i>	42
<i>Parámetros de molienda</i>	43
<i>Cermets basados en Ti(C,N)-Co. Estructura “Core-Rim”</i>	45
<i>Reacción de auto-propagación inducida mediante energía mecánica (MSR)</i>	48
<i>Cermets basados en (Ti,Ta)(C,N)-Co</i>	51
<i>Propiedades</i>	53
<i>Aplicaciones</i>	55
3.3. RESISTENCIA MECÁNICA DE MATERIALES FRÁGILES	57
3.3.1. ENSAYOS DE FLEXIÓN CONVENCIONALES.....	57
3.3.2. ENSAYO DE FLEXIÓN BIAxIAL (<i>Ball-on-three-balls</i>).....	59
3.4. DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL	63

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	67
4.1. MATERIALES	69
4.1.1. WC-Co.....	69
4.1.2. CERMETS.....	74
4.2. RESISTENCIA MECÁNICA DE MATERIALES FRÁGILES	80
4.2.1. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	80
4.2.2. ENSAYO DE FLEXIÓN UNIAXIAL.....	82
4.2.3. ENSAYO DE FLEXIÓN BIAxIAL.....	84
4.2.4. ANÁLISIS DE LA SUPERFICIE DE FRACTURA.....	85
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN SOBRE LA RESISTENCIA MECÁNICA	87
5.1. INFLUENCIA DE LA MICROESTRUCTURA EN LA RESISTENCIA MECÁNICA	89
5.1.1. WC-Co.....	89
5.1.2. CERMETS.....	90
5.2. INFLUENCIA DE LA CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO EN LA RESISTENCIA MECÁNICA	92
5.3. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN EL MARCO DE LA FRACTURA ELÁSTICO LINEAL	95
5.3.1. ESTIMACIÓN DE LA K_{Ic} A PARTIR DEL TAMAÑO DE LOS DEFECTOS.....	97
5.3.2. MECANISMOS RESPONSABLES DE LA FRACTURA.....	98
WC-Co.....	98
Cermets.....	98
6. CONCLUSIONES	101
WC-Co.....	103
Cermets.....	103
Futuros Trabajos.....	104
7. REFERENCIAS	105

II – Lista de tablas

- Tabla 1.** Aumento del calor evacuado por la viruta frente al mecanizado convencional [4].
- Tabla 2.** Cuadro comparativo entre los materiales de mecanizado de alta velocidad más los aceros rápidos [8].
- Tabla 3.** Desarrollo de los carburos cementados WC-Co.
- Tabla 4.** Rango de valores para las propiedades de varias familias de materiales.
- Tabla 5.** Participación en el mercado de los productos de metal duro por aplicación.
- Tabla 6.** Desarrollo histórico de los cermets basados en carbonitruros de titanio.
- Tabla 7.** Solubilidad de las fases cerámicas en las fases cementantes empleadas en cermets basados en Ti(C,N) [86,87].
- Tabla 8.** Temperatura adiabática de la reacción de formación a partir de los elementos de distintos carburos y nitruros [91-94].
- Tabla 9.** Descripción de cada uno de los parámetros que interviene en el ensayo B3B [132].
- Tabla 10.** Constantes para modelo de *Borger* en función de los coeficientes de *Poisson* [132].
- Tabla 11.** Relación entre tensiones para una misma probabilidad de rotura en función de la relación entre volúmenes.
- Tabla 12.** Contenido de la fase aglomerante de los distintos grados de metal duro: **a)** 16F, **b)** 16M y **c)** 27C.
- Tabla 13.** Parámetros microestructurales para los distintos grados de metal duro 16F, 16M y 27C respectivamente
- Tabla 14.** Propiedades físicas y mecánicas para los distintos grados de metal duro 16F, 16M y 27C, respectivamente.
- Tabla 15.** Composiciones iniciales nominales de cermets en polvos sintetizados por MRS, así como el tiempo de ignición observado durante la molienda y el parámetro de red experimental de la fase de carbonitruros.
- Tabla 16.** Tiempos de sinterización para cada relación Ta/Ti.
- Tabla 17.** Parámetros microestructurales de los cermets estudiados en este trabajo.
- Tabla 18.** Resumen de las propiedades físicas y mecánicas para las distintas relaciones Ta/Ti.
- Tabla 19.** Etapas seguidas en la preparación de las muestras.
- Tabla 20.** Parámetros *Weibull* estimados bajo flexión uniaxial y biaxial para tres tipos diferentes de metal duro (es decir, 16F, 16M y 27C). Los valores entre paréntesis representan el intervalo de confianza del 90%.
- Tabla 21.** Resistencia a la flexión biaxial utilizando el protocolo convencional (probabilidad de fallo del 50%) y el análisis de *Weibull* (σ_0 y m ; con probabilidad de fallo de 63,21%).
- Tabla 22.** Valores estimados de S_{eff} y V_{eff} para las muestras a ensayar según los métodos 4PB y B3B.
- Tabla 23.** Tenacidad de fractura estimada a partir del tamaño de defecto crítico para los tres grados de metal duro según la relación de *Griffith*. Comparación con resultados experimentales (SENB).
- Tabla 24.** Tenacidad de fractura estimada a partir del tamaño de defecto crítico para las cinco calidades de cermets según la relación de *Griffith*. Comparación con resultados experimentales (*Shetty*).

III – Lista de figuras

- Fig. 1.** a) relación entre dureza y tenacidad entre los distintos materiales de herramientas de corte. b) demanda actual de dichos materiales.
- Fig. 2.** Comparación de velocidades de corte para mecanizado convencional, convencional optimizado y MAV. [2].
- Fig. 3.** Fuerza de corte en función de la velocidad de corte.
- Fig. 4.** Reducción de tiempos frente al mecanizado convencional. Estimación realizada por la Escuela Técnica Superior de Bilbao.
- Fig. 5.** Temperatura de formación de viruta (°C) vs. Velocidad de corte (m/min).
- Fig. 6.** Daños en una herramienta de corte debido al desgaste. De arriba abajo: Daño por fractura, deformación plástica del filo de la herramienta, caracterización y desprendimiento del filo [6].
- Fig. 7.** Relación resistencia y tenacidad frente a dureza en caliente en materiales para herramientas.
- Fig. 8.** Esquema de la microestructura del metal duro WC-Co.
- Fig. 9.** Clasificación de los carburos cementados en función del tamaño medio de grano de la fase carburo [15].
- Fig. 10.** Esquema del diagrama de fases en equilibrio del metal duro [19].
- Fig. 11.** Diagrama de fase de los carburos cementados WC-Co.
- Fig. 12.** a) Microestructura típica de carburos cementados, y b) principales parámetros empleados en la caracterización microestructural de estos materiales.
- Fig. 13.** Dependencia del camino libre medio de la fase ligante con el contenido en cobalto y el tamaño medio de grano de la fase carburo [26].
- Fig. 14.** Proceso de fabricación de WC-Co en la empresa *DURIT Sociedad Ibérica de Metal Duro, S.L.*
- Fig. 15.** a) Dureza, y b) tenacidad de fractura de calidades de carburos cementados de diferentes tamaños de grano de fase WC en función del contenido de cobalto (en peso) [39].
- Fig. 16.** Relación dureza-resistencia a rotura transversal en metales duros con microestructuras finas y ultrafinas, en comparación a calidades más convencionales (medias y gruesas) [15].
- Fig. 17.** Aplicaciones del metal duro en dependencia de su microestructura [39].
- Fig. 18.** Aplicaciones de metal duro: a) Cabezales de corte de metal duro intercambiables con conductos de refrigeración (*Sandvik Coromant*), b) Taladros típicos de mecanizado para placas de circuito impreso (HPTec) c) Ejemplos de herramientas dentistas con punta de carburo (HAM), d) Herramienta de minería, e) Cuchillas (plaquitas), f) Punzones.
- Fig. 19.** Estructura “*Core-Rim*” para cermets basados en Ti(C,N) [80].
- Fig. 20.** Esquema del proceso de obtención de los cermets de composición nominal $(Ti_xTa_{1-x})(C_{0,5}N_{0,5})-Co$. a) Mediante 1 única etapa de molienda, b) Mediante 2 etapas de molienda.
- Fig. 21.** Representación esquemática indicando los parámetros composicionales ajustables en cermets basados en Ti(C,N).
- Fig. 22.** Imágenes reales de herramientas de cermets para mecanizado.

- Fig. 23.** Geometría de las probetas de flexión usualmente utilizadas en la medida de la resistencia de materiales frágiles: **a)** Por tres puntos, **b)** Por cuatro puntos.
- Fig. 24.** Adaptación de las brocas en la industria del gas y del petróleo contra el desgaste.
- Fig. 25.** Ensayo biaxial *ball-on-three-balls* (B3B): **a)** Esquema del ensayo [131], **b)** Parámetros influyentes [132].
- Fig. 26.** Distribución de tensiones en ensayos biaxiales *ball-on-three-balls* [132].
- Fig. 27.** Imágenes de defectos típicos de un carburo cementado.
- Fig. 28.** Relación entre la probabilidad de encontrar el defecto mayor y la distribución de esfuerzos aplicados. A la izquierda: Probabilidad de rotura en términos de la tensión según la estadística de *Weibull*. A la derecha: Gráfico de *Weibull* utilizado para obtener el valor de m .
- Fig. 28.** Micrográficas y distribución y valor medio de los granos de carburos obtenidos por SEM para los distintos grados de metal duro: 16F, 16M y 27C respectivamente.
- Fig. 29.** Esquema del procedimiento para determinar la densidad según el principio de *Arquímedes* [16].
- Fig. 30.** Esquema de la configuración y metodología seguida para evaluar la tenacidad de fractura con el método SENB.
- Fig. 31.** Método de prefisuración cíclica: **a)** configuración y metodología empleada. **b)** prefisura fina, aguda y pasante obtenida mediante SENB.
- Fig. 32.** Zona de daño generada por el proceso de prefisuración por compresión cíclica
- Fig. 33.** **a)** Patrones de difracción de rayos X de los polvos de los cermets obtenidos por MSR a partir de las composiciones nominales de la [tabla 15](#) (•) $Ti_xTa_{1-x}C_{0.73}N_{0.27}$, Fm3m; y (↓) aleaciones amorfas de Ti-Ta-Co. **b)** Aumento de los patrones de difracción de rayos X en el intervalo de 2θ $34^\circ - 38^\circ$ que muestra un cambio en el (111) la reflexión de la fase de carbonitruro al aumentar el contenido de Ta.
- Fig. 34.** Difracción de rayos X de los polvos después de la sinterización. (•) $Ti_xTa_{1-x}C_{0.73}N_{0.27}$, cúbica centrada en las caras; (◐) $(Ti_xTa_{1-x})CO_2$, cúbica centrada en las caras; y (◑) $(Ti_xTa_{1-x})Co$, cúbica primaria.
- Fig. 35.** Distribución del tamaño de partículas de cerámica y del tamaño promedio de cermet sinterizados determinados por análisis de imagen utilizando el método de interceptación lineal: **a)** sTi100; **b)** sTi99Ta01; **c)** sTi95Ta05; **d)** sTi90Ta10; y **e)** sTi80Ta20.
- Fig. 36.** Parámetros microestructurales de los cermets sinterizados representados en función del porcentaje de peso inicial de Ta: tamaño de partícula promedio de cerámica (d); fracción de volumen de la fase aglutinante (FB); contigüidad (C); y el recorrido libre medio de aglutinante (λ).
- Fig. 37.** Propiedades mecánicas de los cermets sinterizados: **a)** El módulo dinámico de *Young* (E_d) y la densidad aparente (ρ) se representaron gráficamente como una función del porcentaje en peso Ta. **b)** La dureza y la tenacidad se representan como una función del porcentaje en peso Ta. **c)** La dureza y la tenacidad se representan como una función del recorrido libre medio de aglutinante (λ).
- Fig. 38.** **a)** Panel de abeja *Struers MD Allegro*. **b)** Paño *BUEHLER 8" Microcloth* **c)** Pulidora *Struers Labpol - 6*.
- Fig. 39.** **a)** Disco de corte recubierto de diamante *Struers Diamond Cut-off Whell BOD13*. **b)** Máquina de corte *Struers Secotom-10*.
- Fig. 40.** Máquina de ensayo electro-mecánico *Instron modelo 5505*.
- Fig. 41.** Mordaza móvil para la sujeción de barras en el ensayos de flexión en 4 puntos (tramo 20-10mm) instalada sobre máquina de ensayo electro-mecánico *Instron modelo 5505*.
- Fig. 42.** **a)** Esquema del ensayo B3B en máquina electro-mecánica *Instron modelo 5505*. **b)** Imagen real.
- Fig. 43.** Equipamiento (máquina de microscopía electrónica de barrido, SEM).
- Fig. 44.** Influencia de la microestructura en la resistencia mecánica para las distintas configuraciones de ensayo, 4PB y B3B, respectivamente.

- Fig. 45.** Diagrama de *Weibull*: Probabilidad de fallo en función de la resistencia de rotura obtenida mediante el ensayo B3B.
- Fig. 46.** Tensión de rotura, σ_f , frente a la probabilidad de fallo, P_f , para las muestras **a)** 16F, **b)** 16M, y **c)** 27C ensayadas bajo flexión uniaxial sobre cuatro puntos (4PB) con separación una de 20-10mm y 40-20mm y bajo flexión biaxial (ensayo B3B). Las líneas discontinuas representan el mejor ajuste de los datos de resistencia de acuerdo a la [ecuación 21](#).
- Fig. 47.** Resistencia característica de los tres grados de carburos cementados **a)** 16F, **b)** 16M, y **c)** 27C en función de la superficie efectiva **a1)**, **b1)** y **c1)** y volumen efectivo **a2)**, **b2)** y **c2)** de acuerdo con la teoría de *Weibull*. Se toma como referencia para la extrapolación la resistencia característica de las muestras 4PB (40-20 mm). Las líneas discontinuas describen los intervalos de confianza del 90% (como margen de error en los símbolos).
- Fig. 48.** Relación entre el número de fragmentos de las piezas fracturadas bajo condiciones de flexión en 4-puntos y flexión biaxial.
- Fig. 49.** Ejemplo de muestras ensayadas según flexión uniaxial en 4 puntos (4PB) y biaxial *ball-on-three-balls* (B3B) a temperatura ambiente de algunos de los distintos materiales estudiados en este trabajo: **a)** WC-Co 27C, **b)** WC-Co 16M y **c)** WC-Co 16F, **d)** WC-Co 27C, **e)** WC-Co 16F, **f)** Cermet sTi100, **g)** Cermet sTi80Ta.
- Fig. 50.** Micrografías obtenidas por SEM de las superficies fracturadas: **a)** 16M; **b)** 16F; **c)** 27C.
- Fig. 51.** Micrografías SEM de bajo aumento de las superficies fracturadas de cermets sinterizados generadas durante las pruebas de resistencia a la flexión biaxial (B3B): **a)** sTi100; **b)** sTi99Ta01; **c)** sTi95Ta05; **d)** sTi90Ta10; y **e)** sTi80Ta20.
- Fig. 52.** Micrografías de alto aumento de las superficies fracturadas de cermets sinterizados que revelan la presencia de diferentes defectos (escisión transgranular que podrían causar fracturas caóticas, incluidos patrones de líneas de río y lenguas, marcados con flechas rectas y discontinuas, respectivamente: **a)** sTi100; **b)** sTi99Ta01; **c)** sTi95Ta05; **d)** sTi90Ta10, y **e)** sTi80Ta20.