

Tras analizar los resultados obtenidos, se observa que una primitiva de tipo consecutivo (cuadrada) proporciona un mayor desplazamiento del robot respecto a una de tipo simultáneo (circular), aunque la diferencia entre ambas no es significativa.

REFERENCIAS

- Cox, R. G. (1970). The motion of long slender bodies in a viscous fluid. Part 1. General theory. *Journal of Fluid Mechanics*, 44(4), 791-810.
- Gray, J. (1955). The movement of sea-urchin spermatozoa. *Journal of Experimental Biology*, 32(4), 775-801.
- Happel, J. (1983). Low Reynolds number hydrodynamics. Boston, USA: Martinus Nijhoff Publishers.
- Metzger, S. N. y Adler, Y. C. (2011). PillCam COLON capsule endoscopy: recent advances and new insights. *Therapeutic Advances in Gastroenterology*, 4(4), 265-268.
- Nelson, B. J., Kaliakatsos, I. K. y Abbott, J. J. (2010). Microrobots for minimally invasive medicine. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 12, 55-85.
- Nuevo-Gallardo, C., Traver, J. E., López, M. Á., Tejado, I. y Vinagre, B. M. (2020). Comparative study of gaits for optimal displacement of Purcell's microswimmers. 14th International Conference on Automatic Control and Soft Computing. Braganza, Portugal (En revisión).
- Purcell, E. M. (1977). Life at low Reynolds number. *American Journal of Physics*, 45(1), 3-11.
- Wiesel, O. y Or, Y. (2016). Using optimal control to obtain maximum displacement gait for Purcell's three-link swimmer. 2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC), (pp. 4463-4468). Las Vegas, USA.
- Wiesel, O. y Yizhar, O. (2016). Optimization and small-amplitude analysis of Purcell's three-link microswimmer model. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, (pp. 4-25).

APUNTES BIOGRÁFICOS

Cristina Nuevo-Gallardo (Badajoz, 5 de noviembre de 1993) es Graduada en Ingeniería Mecánica (Rama Industrial) y Máster Universitario en Ingeniería Biomédica por la Universidad de Extremadura. Actualmente reside en Badajoz, donde desarrolla su Tesis Doctoral dentro de la línea de investigación "Modelado y Control de Microrrobots Nadadores Biomiméticos para Navegación en Lúmenes", financiada por una beca del Plan Propio de Investigación (Acción II) de la Universidad de Extremadura.

Contacto: cnuevog@unex.es

PROCESADO DE NUEVOS MATERIALES ULTRADUROS BASADOS EN B₄C

Ojalvo Guiberteau, Cristina

Los materiales utilizados para las diferentes aplicaciones estructurales en ingeniería actualmente se clasifican en tres grupos: polímeros, metales y cerámicos (Callister y Rethwisch, 2016). Los polímeros son materiales aislantes de baja densidad y muy conformables a bajas temperaturas. Su principal inconveniente es su deterioro a temperaturas relativamente bajas (200-300°C). Los metales son rígidos, deformables plásticamente, tenaces y poseen un punto de fusión elevado. Sin embargo, son pesados (densidad elevada) y muy reactivos en presencia de agentes químicos. Esto puede provocar su oxidación, corrosión, etc y, en consecuencia, su degradación. Los cerámicos destacan por su ligereza (baja densidad), estabilidad en medios químicamente agresivos, gran dureza y refractariedad ya que su temperatura de fusión es mucho mayor que la de los metales. Desafortunadamente son frágiles, lo que limita seriamente su selección para aplicaciones estructurales.

Pues bien, el presente estudio se enmarca dentro de una línea de investigación que desarrolla nuevos materiales cerámicos capaces de soportar elevadas temperaturas, fuertes tensiones de contacto y ambientes químicos agresivos.

1. Carburo de Boro (B_4C)

Dentro de los cerámicos existe un grupo reducido de materiales que posee una dureza excepcionalmente elevada (25-35 GPa). En concreto, el carburo de boro (B_4C) es uno de esos pocos materiales siendo, de hecho, el tercero más duro conocido. Además, es ultraligero ya que su densidad es tan sólo 2.52 g/cm³. Por eso, resulta un candidato excelente para blindajes y armaduras contra impacto balístico, componentes de máquinas industriales, herramientas de corte y mecanizado, etc. El desarrollo de blindajes y/o armaduras con materiales cerámicos pretende paliar los inconvenientes presentes en los convencionales fabricados con metales y fibras sintéticas (peso excesivo, respuesta anisotrópica de las fibras, degradación por humedad, etc). Por otra parte, el desarrollo de nuevos materiales cerámicos resistentes al desgaste adquiere un gran interés para poder minimizar la degradación de numerosos equipos y productos en ingeniería. Sin embargo, el B_4C es difícil de fabricar ya que su temperatura de fusión supera los 2000°C, y además es tremendamente frágil.

2. Objetivos y metodología

Los principales objetivos de esta investigación son: facilitar la densificación del B₄C y mejorar su tenacidad. Para ello, se añaden pequeñas cantidades de aditivos y se utiliza un horno de sinterización por descarga eléctrica pulsada (SPS). Los aditivos seleccionados poseen temperaturas de fusión muy inferiores a la del B₄C facilitando la densificación a menor temperatura y, además, favorecen el aumento de la tenacidad. No obstante, es importante limitar la cantidad de estos componentes para evitar comprometer la dureza final material. La fabricación de cerámicos con temperaturas de fusión tan elevadas requiere de unos hornos especializados y, por ello, la densificación de estos materiales se está llevando a cabo con un horno de SPS. Éste es capaz de aplicar elevadas presiones y, simultáneamente, calentar el material de manera ultrarrápida aplicando rampas de calentamiento y enfriamiento fuera de las posibilidades de los hornos convencionales de alta temperatura.

3. Fabricación de materiales compuestos de B₄C ultraduros y tenaces a menores temperaturas con aditivos de MoSi₂ mediante descarga eléctrica pulsada

Se han fabricado varios lotes de materiales compuestos y monolíticos y se han evaluado y comparado las propiedades microestructurales y mecánicas. En este capítulo se exponen los resultados y conclusiones obtenidas de esta investigación partiendo de polvos de B₄C y aditivos de MoSi₂ (Ojalvo, Guiberteau y Ortiz, 2019).

3.1. Resultados

Se han sinterizado un total de 12 materiales, tal y como se detalla en la Tabla 1:

Tabla 1. Condiciones de fabricación de los cerámicos monolíticos y compuestos, y su grado de densificación. A todos ellos se les aplicó simultáneamente 50 MPa durante 5 minutos en el horno de SPS.

Tipo	Temperatura SPS °C			
	1700	1750	1800	1850
B ₄ C	extremadamente poroso	muy poroso	poroso	casi denso
B ₄ C-5vol% MoSi ₂			casi denso	completamente denso
B ₄ C-10vol% MoSi ₂	poroso	casi denso	completamente denso	
B ₄ C-15vol% MoSi ₂	casi denso	completamente denso	completamente denso	

Fuente: Elaboración propia.

La información sobre el grado de densificación de los materiales se ha obtenido observando la superficie de fractura mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). En la Imagen 1 se presentan algunas micrografías representativas:

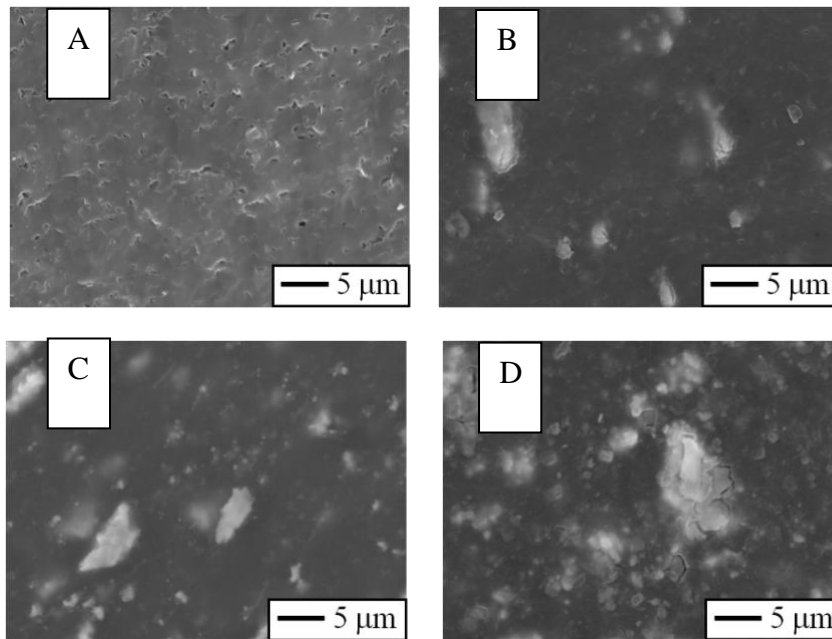


Imagen 1. Micrografías de MEB representativas de los cuatro tipos de materiales fabricados. (A) B4C a 1800°C, (B) B4C-5vol%MoSi2 a 1800°C, (C) B4C-10vol%MoSi2 a 1800°C y (D) B4C-10vol%MoSi2 a 1750°C. Fuente: Elaboración propia.

Se analizó el grado de porosidad de estos materiales a partir de estas micrografías, y los datos así obtenidos se han presentado también en la Tabla 1. Como puede observarse, la densificación mejora cuanto mayor es la proporción de aditivo, obteniendo incluso materiales completamente densos a menor temperatura.

También se analizaron y compararon las curvas de velocidad de densificación de los materiales compuestos y monolíticos. La curva representativa del material compuesto de la Imagen 2 presenta un pico de densificación acelerada entre las temperaturas aproximadas de 1300°C y 1450°C. Este pico no aparece en la curva del material monolítico, indicativo de que el mecanismo de sinterización es diferente.

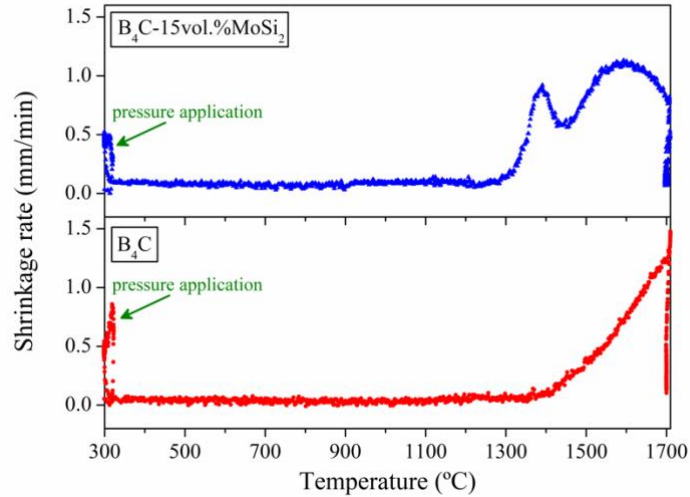
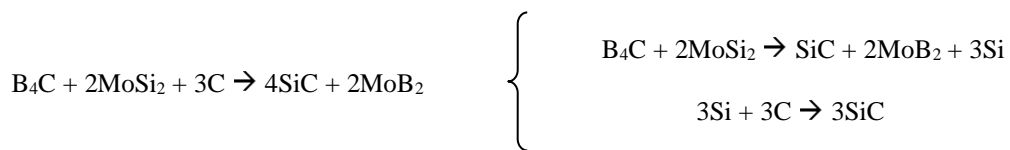


Imagen 2. Velocidad de densificación en función de la temperatura para B₄C monolítico y B₄C-15vol% MoSi₂ fabricados a 1700°C. Fuente: Elaboración propia.

Para poder estudiar con más detalle el mecanismo de densificación se fabricó un nuevo lote de B₄C- 15vol%MoSi₂ a menores temperaturas y sin tiempo de mantenimiento. Se realizaron un total de 8 ciclos de SPS interrumpidos, entre 1150°C y 1500°C en pasos de 50°C. La microestructura de los materiales resultantes de estos ciclos de SPS interrumpidos fue analizada mediante difracción de rayos X (DRX) y MEB. De este análisis se pudo obtener información sobre el desarrollo microestructural durante la rampa de calentamiento y se dedujo que la reacción global entre ambos compuestos se está produciendo en dos etapas. En un primer momento el aditivo de MoSi₂ reacciona con el B₄C, dando SiC, MoB₂ y Si como productos de reacción. Este Si libre funde alrededor de 1400°C, y luego reacciona con el C libre presente como impurezas en los polvos de partida de B₄C formando así más SiC:



Las micrografías de MEB del material compuesto con ciclo de SPS interrumpido a 1400°C de la Imagen 3 confirman la formación de una fase líquida durante la sinterización porque es evidente que existen regiones con granos de B₄C embebidos en una fase fundida. Mediante espectroscopía de energías dispersivas de rayos X se identificó esta fase fundida como Si.

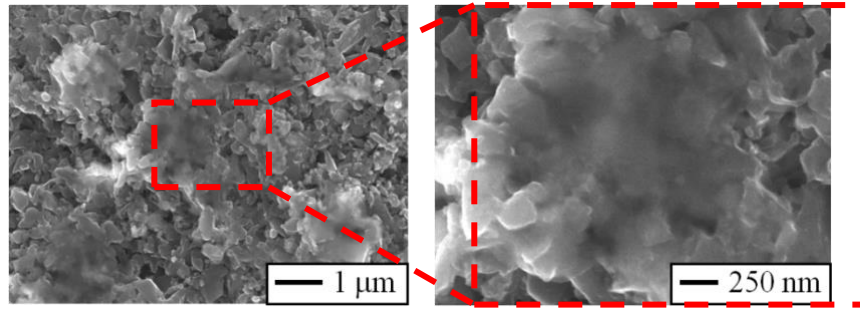


Imagen 3. Micrografías de MEB representativas de la superficie de fractura del material compuesto de B₄C con 15vol% MoSi₂ fabricado mediante SPS (ciclo interrumpido a 1400°C). Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, se puede afirmar que el MoSi₂ actuó como un aditivo de sinterización reactivo que promueve la densificación a menor temperatura mediante sinterización con fase líquida transitoria.

Por último, se han caracterizado mecánicamente los materiales fabricados mediante ensayos de indentación Vickers. Tal y como se esperaba, los valores de dureza obtenidos en los materiales densos recogidos en la Tabla 2 son muy elevados, en el rango de los materiales superduros. Además, también es muy relevante que estos materiales poseen una tenacidad a fractura que incluso puede ser el doble de la de los cerámicos monolíticos de B₄C de referencia ($\sim 2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Tabla 2. Condiciones de fabricación, grado de densificación y propiedades mecánicas de los materiales cerámicos monolíticos y compuestos.

Tipo	Temperatura SPS (°C)	Grado densificación (%)	Dureza (GPa)	Tenacidad (MPa·m ^{1/2})
B ₄ C	1700	78	13±1	—
	1750	82	14±1	—
	1800	93	19±1	—
	1850	95	25.0±0.7	—
B ₄ C-5vol%MoSi ₂	1800	96	19.8±0.8	—
	1850	100	29.5±0.9	3.1±0.2
B ₄ C-10vol%MoSi ₂	1700	93	15.0±0.5	—
	1750	96	20±1	—
	1800	100	30.1±0.9	3.7±0.3
B ₄ C-15vol%MoSi ₂	1700	97.5	23±1	—
	1750	100	30.1±0.7	4.1±0.3
	1800	100	30.1±0.6	4.1±0.3

Fuente: Elaboración propia.

4. Conclusiones

Se han fabricado materiales compuestos con microestructuras triple-particuladas formadas por B₄C-MoB₂-SiC. Se ha identificado que el MoSi₂ actúa como aditivo de sinterización reactivo, promoviendo la densificación del B₄C a menor temperatura mediante sinterización con fase líquida transitoria. Se ha comprobado que a mayor proporción de aditivo se aumenta notablemente la tenacidad a fractura de estos materiales compuestos, sin penalizar la elevada dureza que tan deseable es en los materiales basados en B₄C.

REFERENCIAS

- Callister. W. D. Jr. y Rethwisch, D. G. (2016). *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Barcelona: Editorial Reverté S.A.
- Ojalvo, C., Guiberteau F. y Ortiz A. L. (2019). Fabricating toughened super-hard B₄C composites at lower temperature by transient liquid-phase assisted spark plasma sintering with MoSi₂ additives. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(9), 2862-2873.

APUNTES BIOGRÁFICOS

Cristina Ojalvo Guiberteau (Badajoz, 28 de octubre de 1989) es Licenciada en Arquitectura por la Universidad de Sevilla. Reside en Badajoz desde junio de 2017, donde desarrolla su Tesis Doctoral dentro del Grupo Especializado de Materiales de la Escuela de Ingenierías Industriales con un contrato predoctoral financiado por la Junta de Extremadura (PD16027). En el curso 2018/19 realizó una estancia breve de investigación durante tres meses en el Instituto de Cerámica y Vidrio del CSIC en Madrid, y se prevé que complete su formación desarrollando otra estancia en el extranjero.

Contacto: crisojalvo@gmail.com