

INFLUENCIA DE LOS NANOTUBOS DE CARBONO DE PARED MÚLTIPLE (MWNT) EN LA RESISTENCIA AL DESGASTE DEL CERMET WC-Co

INFLUENCE OF MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES (MWNTS) ON THE WEAR RESISTANCE OF WC-Co CERMETS

SAN MIGUEL IZA, Isabela ¹

FALCÓN FRANCO, Lázaro Abdiel ¹

GARCÍA VILLARREAL, Sergio ¹

RODRÍGUEZ PULIDO, Alicia ²

RESUMEN

Los cermetes de WC-Co son materiales críticos en aplicaciones de herramientas de corte y minería, pero su susceptibilidad al desgaste limita su vida útil en condiciones extremas. La incorporación de nanotubos de carbono de pared múltiple (MWNT) como refuerzo ha emergido como una estrategia prometedora para mejorar su desempeño tribológico. Este artículo sintetiza hallazgos recientes (2019-2024) sobre los mecanismos de refuerzo, métodos de procesamiento y mejoras en propiedades tribológicas de composites WC-Co- MWNT. El análisis revela que una dispersión efectiva y una interfaz fuerte son cruciales para lograr mejoras significativas en la resistencia al desgaste, mediante mecanismos de puenteo de grietas y lubricación sólida.

Palabras clave: tribología; dispersión; refuerzo; interfaz; microestructura; tenacidad.

ABSTRACT

WC-Co cermets are critical materials in cutting tool and mining applications, but their susceptibility to wear limits their service life under extreme conditions. The incorporation of multi-walled carbon nanotubes (MWNTS) as reinforcement has emerged as a promising strategy to enhance their tribological performance. This article synthesizes recent findings (2019–2024) on reinforcement mechanisms, processing methods, and improvements in the tribological properties of WC-Co- MWNTS composites. The analysis reveals that effective dispersion and strong interfacial bonding are crucial for achieving significant enhancements in wear resistance, through mechanisms such as crack bridging and solid lubrication.

1. Facultad de Metalurgia,
Universidad Autónoma de
Coahuila. Monclova, Coahuila,
México.

2. Facultad de Contaduría y
Administración, Universidad
Autónoma de Coahuila. Torreón,
Coahuila, México.

Correspondencia
isabelaiza@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0006-5178-8848>
Fecha de recepción
18 de noviembre de 2025.
Fecha de aceptación
12 de marzo de 2026.

Keywords: *tribology; dispersion; reinforcement; interface; microstructure; toughness.*

I. INTRODUCCIÓN

Los cermets de carburo de wolframio-cobalto (WC-Co) constituyen materiales esenciales en la industria manufacturera y minera debido a su excepcional combinación de dureza y tenacidad (Wang y col., 2024). Sin embargo, en condiciones de servicio severas, estos materiales presentan limitaciones como la propagación de grietas y el desgaste acelerado, lo que reduce significativamente su vida útil (Yan y col., 2019; Staia y col., 2023).

La morfología inicial de los polvos comerciales WC-12Co, mostrada en la Figura 1, permite apreciar la distribución y el tamaño de las partículas antes de su procesamiento. Esta característica microestructural influye directamente en la compactación y homogeneidad del material resultante y el comportamiento mecánico final del cermet.

La incorporación de nanomateriales carbonáceos, en particular nanotubos de carbono de pared múltiple (MWNT), ha surgido como una solución innovadora para superar estas limitaciones (Nie y col., 2023).

Los MWNT poseen propiedades mecánicas excepcionales y capacidad de lubricación sólida, lo que los convierte en refuerzos ideales para composites de matriz cerámica-metálica. Estudios recientes han demostrado que la adición controlada de MWNT puede mejorar simultáneamente la tenacidad a la fractura y la resistencia al desgaste de los cermets WC-Co (Staia y col., 2023). Esta revisión analiza críticamente el estado del arte en el desarrollo de composites WC-Co- MWNT, con énfasis en los avances recientes, los mecanismos de refuerzo y las perspectivas futuras.

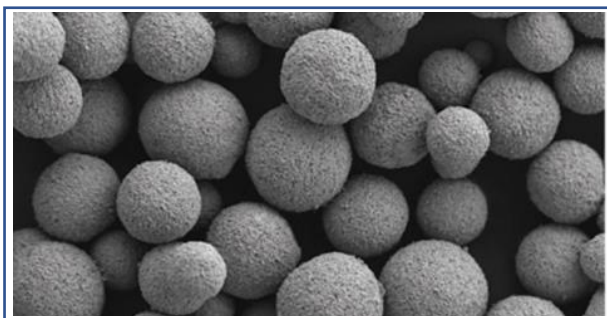


Figura 1. Morfología de polvos de WC – 12Co.
(Sun, 2021)

La presente revisión bibliográfica se desarrolló mediante una búsqueda de literatura científica en bases de datos especializadas, principalmente en Scopus, Web of Science y MDPI. Se consideraron artículos publicados entre los años 2019 y 2025, que están enfocados en la fabricación de cermets WC-Co y materiales compuestos reforzados con nanotubos de carbono, considerando principalmente los mecanismos de dispersión, métodos de fabricación, los cambios en su microestructura, comportamiento tribológico y las propiedades mecánicas.

Se seleccionaron estudios originales y revisiones arbitradas que analizan la incorporación de nanotubos de carbono de pared múltiple y otros nanomateriales carbonosos en matrices cerámicas o metálicas, así como investigaciones relacionadas con diferentes métodos de procesamiento, como la sinterización convencional y SPS, y la molienda mecánica, y su efecto en las propiedades del material.

La información recopilada fue analizada de manera crítica y comparativa, lo que permitió identificar tendencias actuales, avances relevantes, limitaciones asociadas a la dispersión de los nanotubos y cambios microestructurales que afectan la resistencia al desgaste de los compuestos WC-Co reforzados con nanomateriales.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

MECANISMOS DE REFUERZO, LA MATRIZ WC-CO Y SUS DESAFÍOS TRIBOLÓGICOS

El cermet WC-Co consiste en una fase cerámica dura (WC) embebida en una matriz metálica dúctil (Co), lo que confiere una combinación única de dureza y tenacidad. No obstante, bajo condiciones de carga cíclica y a altas temperaturas, estos materiales son susceptibles a fallos por fractura frágil de los granos de WC y por deformación plástica de la fase Co (Jiang y col., 2022). Los mecanismos de desgaste predominantes incluyen abrasión, adhesión y fatiga superficial, que se ven exacerbados por la liberación de partículas de WC que actúan como abrasivos en un proceso de desgaste de

tres cuerpos. La mejora de la tenacidad frente a la fractura se ha identificado como un factor crucial para prolongar la vida útil de estos materiales en aplicaciones tribológicas exigentes.

La microestructura característica de estos cermets se observa en la Figura 2, donde las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido (MEB) muestran la distribución de los granos duros de WC dentro de la matriz metálica de Co. Esta distribución microestructural está relacionada con el comportamiento mecánico del material, ya que la fractura frágil tiende a originarse en los granos de WC, mientras que la fase Co actúa como ligante dúctil capaz de deformarse plásticamente y absorber energía antes de la propagación de la grieta.

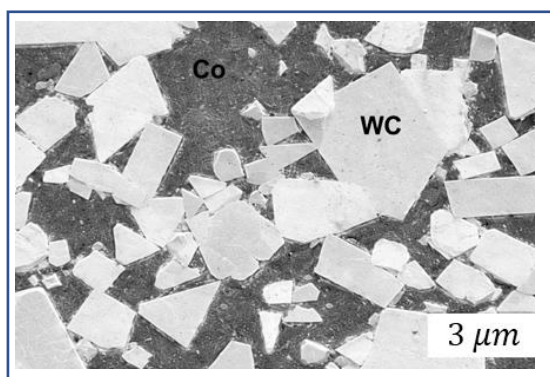


Figura 2. Micrografías MEB de matriz de WC – Co. (Coureaux, 2015)

MECANISMOS DE REFUERZO CON MWNT

Los MWNT actúan como refuerzos eficaces en matrices de WC-Co mediante múltiples mecanismos sinérgicos. El mecanismo principal identificado es el puenteo de grietas, en el que los MWNT que atraviesan los planos de fisura transfieren carga lejos de la punta de la grieta, lo que aumenta la energía requerida para su propagación (Tan y col., 2022). Adicionalmente, se ha observado que los MWNT promueven la desviación de las grietas a través de su interfaz con la matriz, aumentando la rugosidad de la fractura y disipando energía mediante mecanismos de extracción y deslizamiento interfaciales. Estudios de microscopía electrónica han confirmado que los MWNT permanecen intactos después de la consolidación, actuando como barreras efectivas contra la propagación de grietas (Yan y col., 2019).

La morfología característica de los nanotubos de carbono de pared múltiple (MWNT), mostrada en la Figura 3, evidencia su estructura tubular concéntrica



y su elevada relación de aspecto, propiedades geométricas que benefician los mecanismos de puenteo y desviación de grietas previamente descritos.

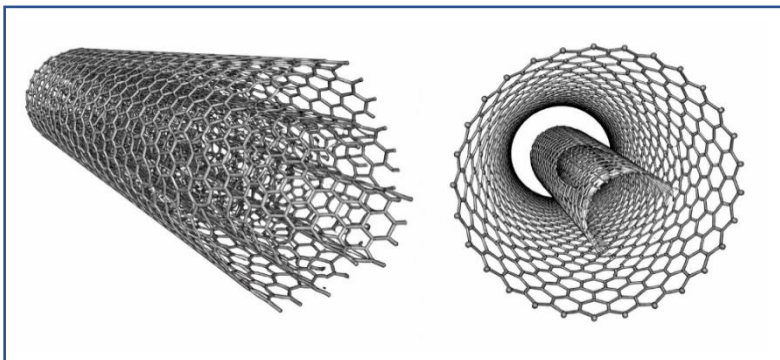


Figura 3. Nanotubos de pared múltiple MWNT.
(Adaptado de Lamnini, 2023).

PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS

La incorporación de MWNT ha demostrado mejoras significativas en el comportamiento tribológico de los composites WC-Co. En un estudio sobre recubrimientos de WC con adición de 0,35 % de nanotubos de carbono, aplicados mediante rocío por llama (flame spray) sobre acero, se observó que la resistencia al desgaste del material recubierto aumentó en torno al 50 % en comparación con el recubrimiento sin CNT. Asimismo, la tasa de desgaste se redujo en el recubrimiento WC- CNT (Sunoto y col., 2020). El mecanismo de lubricación sólida juega un papel crucial, donde los MWNT exfoliados durante el desgaste forman una capa tribológica protectora que reduce el coeficiente de fricción. Análisis de superficies desgastadas mediante espectroscopía Raman han confirmado la presencia de grafeno derivado de MWNT en la interfaz de contacto, actuando como lubricante sólido (Zhang y col., 2022).

PROCESAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN DE COMPOSITOS

WC-Co-MWNT

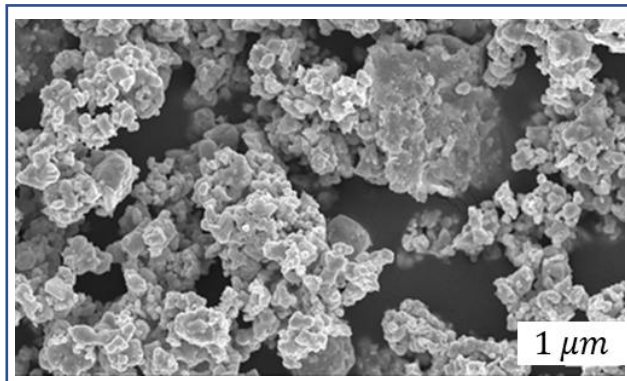
La incorporación de los MWNT en los cermets WC-Co no puede realizarse sin superar los desafíos significativos asociados a su procesamiento. El problema principal es la fuerte tendencia de los MWNT a aglomerarse debido a sus fuerzas de van der Waals, lo que conduce a defectos de fabricación que



actúan como concentradores de tensiones y degradan las propiedades mecánicas (Zhang y col., 2022).

En este contexto, el proceso de molienda de bolas resulta determinante para lograr una distribución adecuada de las fases en el sistema WC-Co-MWNT. La Figura 4 muestra la morfología de los polvos WC-Co después de la molienda de bolas y evidencia la importancia del proceso de dispersión, lo que se observa en la distribución de las fases y en la homogeneidad elemental, demostrada mediante análisis EDS.

Figura 4. Morfología de polvos de WC – Co después de la molienda de bolas, espectroscopía de rayos X por dispersión de energía (EDS) (Zhang, 2022).



ESTRATEGIAS DE DISPERSIÓN DE MWNT

La molienda de bolas se consolida como la técnica más efectiva para la dispersión de MWNT en matrices de WC-Co, demostrando superioridad en la desagregación de aglomerados y distribución homogénea dentro de la matriz. En estudios realizados, se ha observado que un tiempo de molienda de seis a ocho horas y una relación bolas-polvo de aproximadamente 10:1 favorecen la dispersión homogénea y el refinamiento de partículas, utilizando medios líquidos, como el etanol, para mejorar la homogeneidad y evitar daños estructurales en los nanotubos (Wang y col., 2022). Esta ventana temporal optimizada equilibra la eficacia de la desagregación con la preservación de la integridad estructural de los nanotubos, evitando el acortamiento excesivo que ocurre con tiempos de molienda prolongados.

La energía de impacto controlada durante este período de 6-8 horas no solo separa eficientemente los aglomerados de MWNT, sino que, adicionalmente, activa superficialmente los nanotubos, favoreciendo su adhesión a las partículas de WC-Co. Investigaciones han mostrado que tiempos de molienda insuficientes pueden resultar en una dispersión incompleta de los nanotubos de carbono, mientras que tiempos prolongados pueden inducir defectos

estructurales y reducir la relación de aspecto de los MWNT, lo que disminuye sus propiedades reforzantes (Li y col., 2023).

Como alternativa complementaria, la funcionalización química de MWNT con grupos carboxílicos ha mostrado resultados prometedores en aplicaciones específicas en las que se requiere una compatibilidad interfacial mejorada (Yang y col., 2024). Sin embargo, este método presenta limitaciones significativas en escalado industrial debido a la generación de efluentes químicos y posibles daños estructurales en los nanotubos durante los procesos de funcionalización ácida.

La combinación sinérgica de molienda de bolas, seguida de recubrimiento autocatalítico con níquel, ha emergido como la estrategia más eficiente, logrando simultáneamente una dispersión óptima y una interfaz reforzada (Gao y col., 2023). Esta aproximación híbrida permite preservar la integridad estructural de los MWNT y asegurar una transferencia de carga eficaz entre la matriz y el refuerzo, maximizando las propiedades tribológicas del composite final.

TÉCNICAS DE CONSOLIDACIÓN Y ESTABILIDAD

TÉRMICA

El sinterizado por descarga de plasma (SPS) se ha establecido como la técnica de consolidación preferida para composites WC-Co- MWNT debido a su capacidad para preservar la integridad estructural de los nanotubos. Estudios comparativos han demostrado que el SPS a 1000-1200 °C permite una densificación completa mientras mantiene la estructura gráfica de los MWNT (Buravleva y col., 2022).

En contraste, la sinterización convencional en horno a temperaturas controladas (600 a 1300 °C) permite mantener la integridad estructural de los nanotubos de carbono, gracias al control preciso de la actividad de carbono, lo que previene la degradación oxidativa (Zhang y col., 2013). El grafito actúa como sacrificio térmico, oxidándose, protegiendo así los MWNT durante la etapa crítica de sinterizado a temperaturas elevadas (Huang y col., 2025).



CONFIGURACIÓN SISTEMA DE ENCAPSULAMIENTO (CHAROLA-ALÚMINA-GRAFITO) PARA SINTERIZACIÓN CONVENCIONAL

El sistema de control atmosférico emplea una charola de alúmina de alta pureza (99.7 % de Al_2O_3) que actúa como contenedor primario, rodeada por una cámara de grafito que funciona como getter de oxígeno y regulador del potencial de carbono. Estudios demuestran que esta configuración mantiene una presión parcial de oxígeno entre 10^{-15} y 10^{-18} atm a 1400 °C, lo que crea condiciones reductoras óptimas (Bocanegra-Bernal y col., 2023).

Mecanismos de protección térmica

- Charola de alúmina: Provee estabilidad química y previene contaminación por sílice
- Cama de grafito granular: Absorbe oxígeno residual y regula actividad de carbono ($a_c \approx 0.8-0.9$)
- Tapa sellada con pasta cerámica: Crea microatmósfera controlada dentro del conjunto

Perfil térmico optimizado

- Rampa inicial: 10 °C/min hasta 800°C para eliminación de lubricantes
- Rampa intermedia: 3 °C/min hasta 1000 °C para transformaciones de fase
- Rampa final: 3 °C/min hasta temperatura de sinterizado (1380-1420 °C)
- Mantenimiento: 60 minutos para densificación completa
- Enfriamiento: 5 °C/min hasta temperatura ambiente

CONTROL DE INTERFAZ Y MICROESTRUCTURA

La ingeniería de la interfaz entre MWNT y matriz es crítica para optimizar las propiedades mecánicas del compuesto. Investigaciones recientes han demostrado que la adición controlada de carburo de cromo (Cr_3C_2) como inhibidor del crecimiento de grano refina simultáneamente la microestructura y promueve una interfaz más fuerte entre las MWNT y la matriz WC-Co (Yin y col., 2020). La caracterización mediante microscopio electrónico de



transmisión (TEM) ha revelado que interfaces coherentes con formación controlada de carburos favorecen una transferencia de carga efectiva, mientras que interfaces débiles resultan en deslizamiento y extracción de los nanotubos bajo carga.

EVOLUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El análisis bibliométrico revela un crecimiento exponencial en la investigación sobre composites WC-Co- MWNT durante el período 2019-2024. El número de publicaciones anuales se ha triplicado, con un pico notable a partir de 2022, lo que refleja el creciente interés en estos nanocompuestos para aplicaciones avanzadas. China lidera la producción científica con aproximadamente el 55 % de las publicaciones, seguida por India, Irán y Corea del Sur. Esta distribución geográfica coincide con regiones de intensa actividad manufacturera y programas nacionales de desarrollo de materiales avanzados.

REDES DE COLABORACIÓN Y TEMAS EMERGENTES

El mapeo de co-citación identifica tres grupos principales de investigación: (1) procesamiento y sinterización de nanocompuestos, (2) caracterización tribológica y mecánica, y (3) ingeniería de interfaces y funcionalización. La tendencia más destacada en publicaciones recientes es el enfoque en composites híbridos que combinan MWNT con otros nanomateriales, como el grafeno o el nitruro de boro. Estos sistemas híbridos buscan sinergias entre diferentes mecanismos de refuerzo para lograr mejoras multifuncionales en propiedades mecánicas y tribológicas.

Métodos de caracterización avanzada

Las técnicas de caracterización han evolucionado significativamente, con un creciente uso de métodos in situ para estudiar los mecanismos de refuerzo. La tomografía de sonda atómica (APT) combinada con el microscopio electrónico de transmisión (TEM) ha permitido caracterizar la química interfacial a escala atómica, revelando la difusión controlada de elementos de la matriz hacia los MWNT durante la sinterización (Koelling y col., 2024). Simultáneamente, el uso de ensayos tribológicos in situ con monitorización acústica ha proporcionado nuevos conocimientos sobre la formación y la estabilidad de la capa tribológica durante el desgaste.



Tabla 3. Investigaciones actuales sobre WC-Co y nanotubos de carbono con aplicaciones en recubrimientos, tribología y sinterizado.

#	Título	Aplicación	Referencia
1	Optimización del polvo base WC-25Co y de los parámetros para deposición de energía dirigida por láser	Fabricación aditiva; recubrimientos para herramientas	Li y col. (2024)
2	Seguimiento de planos atómicos mediante tomografía por sonda de átomos	Caracterización avanzada de materiales	Yang y col. (2024)
3	Efecto de la potencia láser en la microestructura y propiedades de recubrimientos WC-12Co depositados por deposición de energía dirigida con láser	Ingeniería de superficies; recubrimientos duros	Li y col. (2023)
4	Avances en materiales nanoestructurados a base de grafeno: síntesis, estructura, dispersión y aplicaciones tribológicas	Tribología; materiales compuestos	Nie y Bahrami (2023)
5	Dispersión a nanoescala de nanotubos de carbono en matrices metálicas para mejorar la conductividad térmica y eléctrica mediante molienda mecánica	Nanocompuestos metálicos conductores	Gao y col. (2023)
6	Efecto de los nanotubos de carbono en las propiedades mecánicas de compuestos con matriz de aluminio: una revisión	Refuerzo de compuestos metálicos	Staia y col. (2023)
7	Mejora en la dispersión de nanotubos de carbono mediante molienda mecánica para la preparación de nanocompuestos epóxicos funcionales	Materiales poliméricos avanzados	Zhang y col. (2022)
8	Desempeño tribocorrosivo de recubrimientos HVOF de WC-12Co reforzados con nanotubos de carbono	Recubrimientos resistentes al desgaste y a la corrosión	Li y col. (2022)
9	Efecto de la adición de óxido de grafeno en las propiedades tribológicas de compuestos WC-Co	Mejora de dureza y resistencia al desgaste	Li y col. (2024)
10	Compuestos WC-Co reforzados con plaquetas de grafeno con propiedades mecánicas, tribológicas y térmicas mejoradas	Compuestos de alto rendimiento para herramientas	Yang y col. (2024)

Direcciones de investigación emergentes

Las tendencias futuras identificadas apuntan al desarrollo de composites inteligentes y multifuncionales. La funcionalización de MWNT con sensores integrados permitiría el monitoreo in situ del estado de daño durante el servicio (Chua y col., 2022). Paralelamente, la fabricación aditiva de composites WC-Co- MWNT mediante técnicas como la deposición de energía dirigida (DED) emerge como un campo prometedor para la fabricación de componentes complejos con refuerzo localizado (Li, W.y col., 2024; Nunes,



H. y col., 2024). Otra dirección importante es el desarrollo de composites sostenibles mediante la sustitución parcial de Co por aglutinantes alternativos y el uso de MWNT provenientes de fuentes renovables.

Retos tecnológicos y oportunidades

Los principales retos identificados incluyen el escalado industrial de los métodos de dispersión, el control preciso de la orientación de MWNT en componentes complejos, y la reducción de costos de producción. Sin embargo, las oportunidades son significativas, en particular en aplicaciones de alta gama, como herramientas de corte para materiales difíciles de mecanizar, componentes para la industria aeroespacial e implantes ortopédicos de alta durabilidad (Chan y col., 2021). La integración de inteligencia artificial en el diseño y optimización de microestructuras representa otra frontera emergente con potencial disruptivo.

CONCLUSIONES

La incorporación de nanotubos de carbono de pared múltiple (MWNT) en los cermetes de carburo de wolframio-cobalto (WC-Co) se ha consolidado como una estrategia eficaz en cuanto a resistencia al desgaste y tenacidad a la fractura.

Para obtener estos beneficios, resulta esencial garantizar una dispersión homogénea de los MWNT dentro de la matriz y una interfaz fuerte y estable entre las fases cerámica y metálica. La molienda de bolas controlada se ha consolidado como una de las técnicas más eficaces para lograr una distribución uniforme de los nanotubos sin comprometer su integridad estructural.

Las tendencias actuales reflejan el creciente interés de la comunidad científica e industrial en este tipo de materiales, y se centra en la optimización de los procesos de fabricación, la ingeniería de interfaces y el desarrollo de composites híbridos, en los cuales los MWNT se combinan con otros nanorefuerzos para potenciar las propiedades mecánicas, térmicas y tribológicas.



Los composites WC–Co reforzados con MWNT constituyen una nueva generación de materiales de ingeniería con un alto potencial de aplicación en sectores estratégicos como la industria aeroespacial, automotriz, minera y biomédica. Su implementación a gran escala sigue enfrentando desafíos importantes, entre ellos el control microestructural, la orientación de los nanotubos y la reducción de los costos de procesamiento. Superar estas limitaciones exigirá aplicar inteligencia artificial y optimización de procesos para acelerar su paso del laboratorio a la industria y consolidar a los nanocompuestos WC–Co– MWNT como materiales avanzados del futuro.

REFERENCIAS

- Bocanegra-Bernal, M. H., García-Reyes, A., Domínguez-Ríos, C., Reyes-Rojas, A., Aguilar-Elguézabal, A., & Echeberria, J. (2020). Towards improving low-temperature degradation of zirconia/alumina ceramics via in-situ formation of an Al_2O_3 functional surface layer through sintering in the presence of graphite powder. *Journal of Alloys and Compounds*, 818: 152840. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152840>
- Buravleva, A. A., Fedorets, A. N., Vornovskikh, A. A., Ognev, A. V., Nepomnyushchaya, V. A., Sakhnevich, V. N., Lembikov, A. O., Kornakova, Z. E., Kapustina, O. V., Tarabanova, A. E., Reva, V. P., & Buravlev, I. Y. (2022). Spark plasma sintering of WC-based 10 wt.% Co hard alloy: A study of sintering kinetics and solid-phase processes. *Materials*, 15(3): 1091. <https://doi.org/10.3390/ma15031091>
- Chan, K. F., Zaid, M. H. M., Mamat, M. S., Liza, S., Tanemura, M., & Yaakob, Y. (2021). Recent developments in carbon nanotubes-reinforced ceramic matrix composites: A review on dispersion and densification techniques. *Crystals*, 11(5): 457. <https://doi.org/10.3390/cryst11050457>
- Chua, C. S., Ow, S. Y., & Wang, S. (2022). 3D printing of fibre-reinforced ceramic composites with hierarchical structure. *International Materials Reviews*, 67(2): 67–90. <https://doi.org/10.1080/17436753.2021.2014276>
- Coureaux M., D., Sagaró Z., R., Mestra R., Á., Calzadilla R., J., & Llanes P., L. (2015). Influence of microstructure in the tribological behavior of cemented carbides (WC–Co) boronized. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 23(2), 259–268. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052015000200010>

- Gao, Z., Han, Q., Liu, J., Zhao, K., Yu, Y., & Feng, Y. (2023). Dispersion of carbon nanotubes improved by ball milling to prepare functional epoxy nanocomposites. *Coatings*, 13(3): 649. <https://doi.org/10.3390/coatings13030649>
- Huang, Y., Wang, L., Zhang, X., & Li, J. (2025). Bioinspired carbon nanotube/graphite oxide/epoxy interlaminar region for simultaneously strengthening and toughening glass fiber fabric/epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, 303, 111982. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.112867>
- Jiang, J., Ouyang, S., Chen, H., Guo, S., Yin, L., Tan, Z., Shi, H., Zhong, Z., & Qiu, L. (2022). Effect of MWCNTs on microstructure and properties of WC–9Co gradient cemented carbides. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 48: 19295–19304. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.03.223>
- Koelling, S., Assali, S., Nadal, G., Isheim, D., Seidman, D. N., & Moutanabbir, O. (2024). Tracking of atomic planes in atom probe tomography. *Journal of Applied Physics*, 136(24): 245103. <https://doi.org/10.1063/5.0226890>
- Lamnini, S., Pugliese, D., & Baino, F. (2023). Zirconia-based ceramics reinforced by carbon nanotubes: A review with emphasis on mechanical properties. *Ceramics*, 6(3), 1705–1734. <https://doi.org/10.3390/ceramics6030105>
- Li, B., Zhou, L., Wang, B., Yin, M., Qian, Y., Shi, X., Guo, Z., Han, Z., Hu, N., & Sun, L. (2023). Nanoscale dispersion of carbon nanotubes in a metal matrix to boost thermal and electrical conductivity via facile ball milling techniques. *Nanomaterials*, 13(20): 2815. <https://doi.org/10.3390/nano13202815>
- Li, M., Song, Z., Gong, M., Mo, D., Wang, L., Dusza, J., & Zhang, C. (2022). WC–Co–graphene platelet composites with improved mechanical, tribological and thermal properties. *Ceramics International*, 47: 23371–23380. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.07.266>
- Li, W., Yang, H., Liu, Y., Li, F., Yi, J., & Eckert, J. (2024). Effect of laser power on microstructure and properties of WC–12Co composite coatings deposited by laser-based directed energy deposition. *Materials*, 17(17): 4215. <https://doi.org/10.3390/ma17174215>
- Nie, X., & Bahrami, A. (2023). Effect of carbon nanotubes on mechanical properties of aluminum matrix composites: A review. *Science and Engineering of Composite Materials*, 31: 1–15. <https://doi.org/10.1515/secm-2024-0009>
- Nunes, H., Nhang, J., Regueiras, L., Reis, A., Vieira, M. F., Guimarães, B., Figueiredo, D., Fernandes, C., & Emadinia, O. (2025). Optimising WC–25Co feedstock and parameters for laser-directed energy deposition. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(8): 279. <https://doi.org/10.3390/jmmp9080279>
- Staia, M. H., Mejías, A., Kossman, S., & Puchi-Cabrera, E. S. (2023). Tribocorrosion performance of WC–12Co HVOF-sprayed coatings reinforced with carbon nanotubes. *Crystals*, 13(3): 457. <https://doi.org/10.3390/cryst13030457>

- Sun, N., & Lei, J. (2021). *Effect of WC–12Co addition on microstructure and wear resistance of Inconel 625 matrix composites prepared by laser cladding*. *Chinese Journal of Lasers*, 48(6), 0602106.
- Sunoto Mudiantoro, M., Gerry, M., Winarto, W., Anis, M., Kemal, M., & Fadzli, M. (2020). Surface mechanical properties of tool steel with the addition of carbon nanotubes in flame-sprayed tungsten carbide coatings. *Materials Science Forum*, 1000: 238–247. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1000.238>
- Tan, W., & Martínez-Pañeda, E. (2022). Phase-field fracture predictions of microscopic bridging behaviour of composite materials. *Composite Structures*, 286: Article 115242. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.03066>
- Wang, Y., Xiang, F., Yuan, X., Yang, B., Wang, F., & Li, Y. (2022). Effects of processing parameters on the microstructure and mechanical properties of nanoscaled WC–10Co cemented carbide. *Materials*, 15(13): 4472. <https://doi.org/10.3390/ma15134472>
- Yan, X., Wang, S., Wen, D., Wang, G., & Liu, W. (2019). Effects of HfC particles on crack initiation and propagation behavior of WC/Co composites. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 37(3): 628–635. <https://doi.org/10.1051/jnwpu/20193730628>
- Yang, K., Chen, H., Li, Z., Wang, Y., Li, B., Wang, C., Qiu, S., & Chen, F. (2024). Advanced research on graphene-based nanomaterials: Synthesis, structure, dispersibility, and tribological applications. *Chemical Engineering Journal*, 11: Article e202400428. <https://doi.org/10.1002/cnma.202400428>
- Yin, C., Ruan, J., Du, Y., Long, J., Peng, Y., & Li, K. (2020). Effects of Cr₃C₂, VC, and TaC on microstructure, WC morphology, and mechanical properties of ultrafine WC–10 wt.% Co cemented carbides. *Metals*, 10(9): 1211. <https://doi.org/10.3390/met10091211>
- Zhang, D., Wang, B., & Ji, Y. (2013). The influence of sintering temperature on the mechanical properties and microstructure of carbon nanotubes/zirconia/hydroxyapatite biocomposites. *Applied Mechanics and Materials*, 423–426: 38–42. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.423-426.38>
- Zhang, X., Zhang, J., & Ding, J. (2022). Effect of graphene oxide addition on tribological properties of WC–Co cemented carbide. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 109: 105962. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2022.105962>