

ANÁLISES TRIBOLÓGICAS DE NANOCOMPÓSITOS DE ALUMINA REFORÇADOS COM CARBETO DE NIÓBIO E SINTERIZADOS POR SPS

L. R. R. Alecrim^{1,2*}, J. A. Ferreira¹, A. Borrell², M. D. S. Moya² e E. M. J. A. Pallone¹

¹ Universidade de São Paulo/Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos; Av. Duque de Caxias Norte, 225, 13635-900 Pirassununga-SP, Brasil

² Instituto de Tecnología de Materiales (ITM), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Espanha

*Autor correspondente: Universidade de São Paulo, Av. Duque de Caxias Norte, 225, CEP 13635-900, Pirassununga-SP, Brasil. E-mail: laisribeiro@usp.br

RESUMO

As propriedades do NbC, como altos ponto de fusão e dureza e baixa reatividade química, torna-o desejável para funções de reforço em materiais cerâmicos de alto desempenho. Assim, o objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento de desgaste dos nanocompósitos de Al₂O₃-5%vol.NbC preparados por moagem reativa de alta energia e sinterizados por Spark Plasma Sintering em diferentes temperaturas (1450-1600 °C). Nos ensaios de tribologia pino no disco foram utilizadas esferas de WC-6%Co e de Al₂O₃, carga de 30 N, distância percorrida de 2000 m e velocidade de deslizamento de 0,1 m/s. Nestes ensaios foram obtidos os coeficientes de fricção, as taxas de desgaste e os padrões de desgastes. Os nanocompósitos desgastados com esferas de WC-6%Co apresentaram menores coeficientes de fricção e taxas de desgaste que os testados com esferas de Al₂O₃. Os resultados indicam um potencial para a aplicação destes nanocompósitos na fabricação de novos produtos.

Palavras-chaves: Nanocompósitos, Alumina-Carbeto de Nióbio, Moagem Reativa de Alta Energia, Spark Plasma Sintering, Desgaste Pino no Disco.

INTRODUÇÃO

As cerâmicas de matriz de alumina (Al₂O₃) apresentam melhores propriedades (como dureza, tenacidade e resistência à fratura) quando reforçadas com uma segunda fase devido às interações estabilizadas entre as partículas ⁽¹⁾. Diboreto de titânio ⁽²⁾, carbeto de silício ⁽³⁾, carbeto de titânio ⁽⁴⁾, carbeto de tungstênio ⁽⁵⁾, molibdênio ⁽⁶⁾ e carbeto de nióbio ⁽⁷⁾ são exemplos de nanopartículas de reforço, sendo este último o utilizado neste trabalho.

O carbeto de nióbio (NbC) apresenta alto ponto de fusão, altas dureza e tenacidade e baixa reatividade química ^(1,8). Além disso, ele apresenta coeficiente de

expansão térmica similar à Al_2O_3 , reduzindo o estresse residual produzido durante os ciclos de aquecimento e resfriamento, responsáveis por trincas que diminuem a resistência do material ⁽⁸⁾. Essas propriedades o tornam um material de reforço ideal em cerâmicas de matriz Al_2O_3 ⁽⁹⁻¹¹⁾. As maiores reservas de nióbio do mundo estão localizadas no Brasil e o estudo em torno da utilização deste elemento é de suma importância para o país. No entanto, para aumentar a sua utilização, precisa-se superar a dificuldade de sinterização, devido a sua oxidação ⁽¹⁰⁻¹¹⁾.

Além da inclusão desta segunda fase de reforço, as propriedades microestruturais, mecânicas e tribológicas finais dos materiais cerâmicos são influenciadas por diversos fatores, incluindo as condições de sinterização ⁽¹²⁾. O método de sinterização *Spark Plasma Sintering* (SPS), também conhecido como sinterização assistida por campo, é baseado na aplicação de pulsos de voltagem de alta corrente diretamente em um molde de grafite sob pressão uniaxial ⁽¹³⁾. Isso possibilita uma rápida taxa de aquecimento e o alcance de altas temperaturas em tempo muito curto. Conseqüentemente, após ciclos de aquecimento/arrefecimento de apenas alguns minutos, materiais densos podem ser obtidos, com microestrutura refinada e melhores propriedades mecânicas e de desgaste, ⁽¹²⁻¹⁴⁾.

A alta densificação, juntamente com a melhoria das propriedades mecânicas causada pela sinterização por SPS, resulta no aumento da resistência ao desgaste do material cerâmico. Isso porque as propriedades tribológicas podem ser otimizadas por diversos fatores. O refinamento microestrutural e o aumento da tenacidade atrasam a transição para o desgaste severo e reduz a taxa de desgaste do material. Além disso, a dureza influencia na velocidade de introdução de deslocamentos e, portanto, no acúmulo de estresse nos contornos de grão. Essa tensão residual pode ser minimizada com o processo de sinterização, resultando em melhores comportamentos de desgaste ⁽¹⁵⁾.

Assim, o objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento tribológico de nanocompósitos de Al_2O_3 -5%vol.NbC, sinterizados por *Spark Plasma Sintering* em diferentes temperaturas, e testados com esferas de WC-6%Co e de Al_2O_3 . Coeficientes de fricção, taxas e padrões de desgaste foram analisados, assim como a densidade aparente e a dureza de cada amostra obtida.

MATERIAIS E MÉTODOS

Obtenção do pó de Al_2O_3 -5%vol.NbC e conformação dos corpos de prova

Os pós nanométricos de Al_2O_3 e NbC foram obtidos por moagem reativa de alta energia em moinho tipo SPEX 8000, conforme trabalhos publicados anteriormente (16-18). A composição final dos nanocompósitos, Al_2O_3 -5%vol.NbC foi alcançada em moinho de bolas convencional com a adição de Al_2O_3 em suspensão alcoólica com 0,2 % em peso de ácido 4-aminobenzóico, 100 ppm de cloreto de magnésio hexahidratado e 0,5 % em peso de ácido oleico (17).

O pó resultante foi seco em fluxo de ar e peneirado em malha de 80 mesh. Os corpos de prova foram conformados por prensagem uniaxial (50 MPa) seguido de prensagem isostática (200 MPa).

Sinterização dos corpos de prova

Os corpos de prova foram sinterizados por SPS em molde cilíndrico de 20 mm de diâmetro. Para isso, as amostras foram aquecidas até a temperatura final de sinterização a uma taxa de aquecimento de 100 °C/min e 80 MPa de pressão. As temperaturas finais de 1450, 1500, 1550 e 1600 °C foram mantidas por 5 minutos sob condições de vácuo.

Caracterização física e mecânica dos corpos de prova

A densidade aparente dos corpos de prova foi medida pelo princípio de Arquimedes segundo a norma ASTM C373-88 (19). A densidade real do pó foi determinada por picnômetro de Hélio (4,10 g/cm³).

As medidas de dureza foram realizadas pela técnica da nanoindentação (Model G200, MTS Company, USA). Os testes foram realizados em controle de profundidade máxima de 1200 nm, usando uma ponta de diamante Berkovich previamente calibrada em função de sílica fundida. A rigidez de contato foi determinada pela técnica de Medida de Rigidez Contínua (20). Foram realizadas 25 indentações em cada amostra, com uma amplitude de 2 nm e uma frequência de 45 Hz. Considerando-se a densidade obtida das amostras, foi utilizado o coeficiente de Poisson de 0,18 para todos os cálculos.

Caracterização tribológica

Os testes de desgaste foram realizados em tribômetro (Microtest MT2/60/SCM/T) com configuração pino no disco, de acordo com a norma ASTM G99-03 (21). Como contra material foram utilizadas esferas de WC-6%Co e de Al_2O_3 (FRITSCH - Alemanha) com 5 mm de diâmetro. Foram realizados três testes para

cada amostra, em condições controladas de temperatura de 23 ± 2 °C, e umidade relativa de $60 \pm 2\%$, com velocidade de deslocamento de 0,1 m/s, distância percorrida de 2000 m e trilha de desgaste com 3 mm de raio.

A caracterização do ensaio de desgaste foi realizada por determinação dos coeficientes de fricção, taxa de desgaste e análises da superfície desgastada. A perda de massa foi obtida pelo cálculo de diferença de massa antes e depois dos testes. A taxa de desgaste foi calculada usando a equação A ⁽²²⁻²³⁾:

$$W = \frac{V}{L \cdot P} \quad (A)$$

onde V é o volume perdido em mm^3 (determinado pela perda de massa da amostra dividida pela densidade de cada uma das amostras), L é a distância percorrida em m e P é a carga aplicada em N.

Também foi realizado um estudo microestrutural das trilhas de desgaste por microscopia eletrônica de varredura (FESEM, Zeiss Ultra55), o que permitiu avaliar os mecanismos envolvidos em cada condição de desgaste.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Propriedades físicas e mecânicas

A tabela 1 apresenta os valores de densidade aparente e dureza dos nanocompósitos de Al_2O_3 -5%vol.NbC sinterizados por SPS em diferentes temperaturas. Como pode-se observar, todas as amostras apresentaram densificação quase completa e altos valores de dureza. Esses resultados foram possíveis por fatores como a aplicação de pressão e os rápidos ciclos de aquecimento com curtos tempos de permanência que ocorrem na sinterização por SPS. Essas características da sinterização por SPS possibilita a obtenção de nanocompósitos cerâmicos com propriedades melhoradas, quando comparadas com as obtidas em sinterizações convencionais. Além disso, a sinterização por SPS gera significantes economias de tempo e energia, importantes para a otimização do processo.

Também pode-se notar que, considerando-se o desvio padrão, foram obtidos valores de densidade aparente e dureza similares para todas as temperaturas de sinterização. Além disso, os valores de dureza são maiores que os reportados por outros autores para Al_2O_3 -NbC ^(1,7) e para Al_2O_3 -TiC ⁽¹³⁾. A dureza é aceita como um

indicador da resistência ao desgaste, na qual materiais com alta dureza são normalmente mais resistentes, porque oferecem resistência ao arrancamento dos grãos ⁽²³⁾.

Tabela 1 - Densidade aparente e dureza dos nanocompósitos de Al₂O₃-5%vol.NbC.

Temperatura (°C)	Densidade Aparente (%)	Dureza (GPa)
1450	99,8 ± 0,1	25,4 ± 2
1500	99,8 ± 0,1	25,2 ± 1
1550	99,7 ± 0,1	25,1 ± 1
1600	99,5 ± 0,1	24,4 ± 1

Coeficiente de fricção

O coeficiente de fricção é a razão entre a força de atrito e a força normal imposta, sendo que a mudança nos coeficientes de atrito ao longo do tempo normalmente apresenta duas regiões diferentes: o estado não estacionário e o estado estacionário ⁽²⁴⁾. A força de fricção foi medida durante todo o teste usando uma célula de carga com um transdutor piezoelétrico no braço de carga. A figura 1 apresenta a média dos coeficientes de fricção para os nanocompósitos de Al₂O₃-5%vol.NbC testados com as esferas de WC-6%Co e Al₂O₃. O desvio padrão foi inferior a 5% em todos os casos.

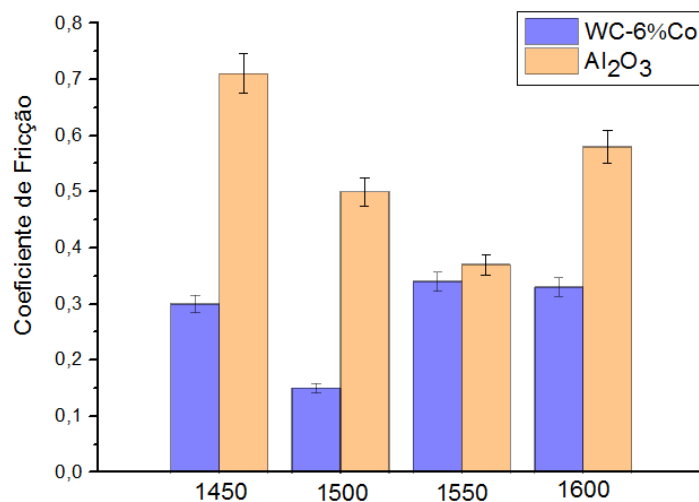


Figura 1 – Coeficiente de fricção dos nanocompósitos de Al₂O₃-5%vol.NbC.

Em geral, a observação inicial mostra que o comportamento de coeficiente de fricção é influenciado pelo contra material utilizado, pois estes possuem valores de dureza distintos, sendo a esfera de Al₂O₃ (1970 HV₃₀) mais dura do que a esfera de

WC-6%Co (1680 HV₃₀). Assim, as amostras testadas com esferas de WC-6%Co apresentaram menores coeficientes de fricção que os corpos de prova testados com esferas de Al₂O₃.

Também é possível notar que os coeficientes de fricção obtidos com a esfera de WC-6%Co foram similares para todas as temperaturas, exceto para a sinterização a 1500 °C, que apresentou o menor valor de coeficiente de fricção (0,15). A obtenção deste valor pode estar relacionada à característica microestrutural da amostra, uma vez que não há significativas diferenças na densificação e dureza desta amostra para as sinterizadas em outras temperaturas. Este fato ainda está sendo investigado.

Além disso, a maior diferença entre os coeficientes de fricção foi obtida para as amostras sinterizadas a 1450°C, na qual o teste realizado com esfera de Al₂O₃ mostrou o maior valor de coeficiente de fricção para todas as condições estudadas (0,71). Isso pode ser explicado pela geração de fragmentos de NbC, que atuam como um terceiro corpo sobre a superfície de contato, aumentando a abrasão e contribuindo para os coeficientes de atrito mais elevados.

Taxa de desgaste

As taxas de desgaste apresentadas na tabela 2 foram obtidas a partir da perda volumétrica das amostras, calculadas pela equação (A) e não envolvem o desgaste do contra material. O desvio padrão foi inferior a 5% em todos os casos.

Tabela 2 – Taxa de desgaste dos nanocompósitos de Al₂O₃-5%vol.NbC.

Temperatura (°C)	Taxa de desgaste (10 ⁻⁶ mm ³ /N.m)	
	WC-6%Co	Al ₂ O ₃
1450	0,041	1,4
1500	0,011	5,4
1550	0,082	4,7
1600	0,020	5,3

Em geral, pode-se notar que, assim como o coeficiente de fricção, a taxa de desgaste é influenciada pela dureza do contra material utilizado nos ensaios. Assim, as amostras testadas com esferas de WC-6%Co apresentam menores taxas de desgaste do que as amostras testadas com esferas de Al₂O₃. Além disso, o regime de desgaste de materiais cerâmicos pode ser classificado em tipo severo e

moderado. No regime moderado, as taxas de desgaste assumem valores inferiores a 10^{-6} mm³/N·m, enquanto no regime severo as taxas de desgaste são maiores do que este valor, embora a condição de fronteira entre os dois sistemas não é precisamente definida ⁽²⁵⁻²⁶⁾. Portanto, todos os nanocompósitos analisados com esferas de WC-6%Co apresentaram excelente resistência ao desgaste, com regime moderado. Já as amostras testadas com esferas de Al₂O₃ apresentaram regime de desgaste de transição ou severo.

Análise da superfície de desgaste

A figura 2 mostra as micrografias de FESEM das trilhas de desgaste dos nanocompósitos testados com esfera de Wc-6%Co. Os danos observados são consistentes com as taxas de desgaste obtidas, apresentando um comportamento de desgaste com deformação plástica e superfície relativamente lisa com formação de tribofilme.

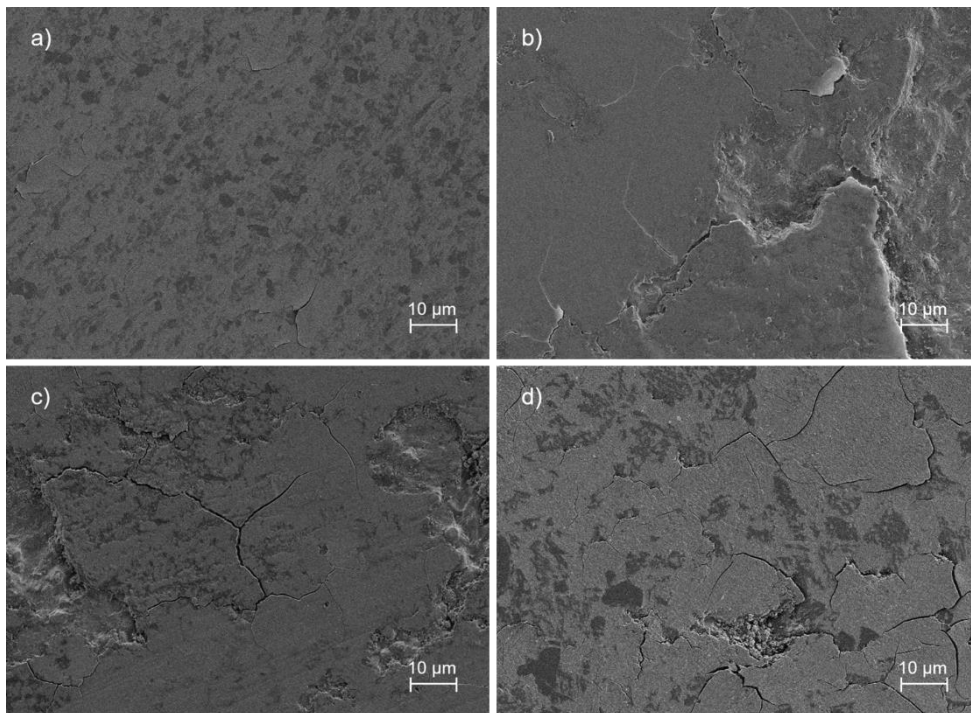


Figura 2 – Micrografia das trilhas de desgaste dos nanocompósitos de Al₂O₃-5%vol.NbC sinterizados por SPS a: a) 1450 °C, b) 1500 °C, c) 1550 °C e d) 1600 °C e testados com esfera de WC-6%Co.

As trincas observadas são provocadas pela tensão de tração na borda da área de contato, resultando em um mecanismo de desgaste controlado por delaminação e fratura. As fracas interações entre o substrato e o tribofilme fazem com que as trincas cresçam, levando ao arrancamento da parte superficial do material. Essas

cavidades se tornam pontos de tensão que criam grandes regiões trincadas, levando à fratura do material ⁽²⁷⁾.

As micrografias de FESEM das trilhas de desgaste dos nanocompósitos testados com esferas de Al₂O₃ são mostradas na figura 3. A partir das análises das amostras desgastadas é possível observar uma superfície lisa, com arranhões e escamas, com um mecanismo de desgaste controlado por cisalhamento e fratura.

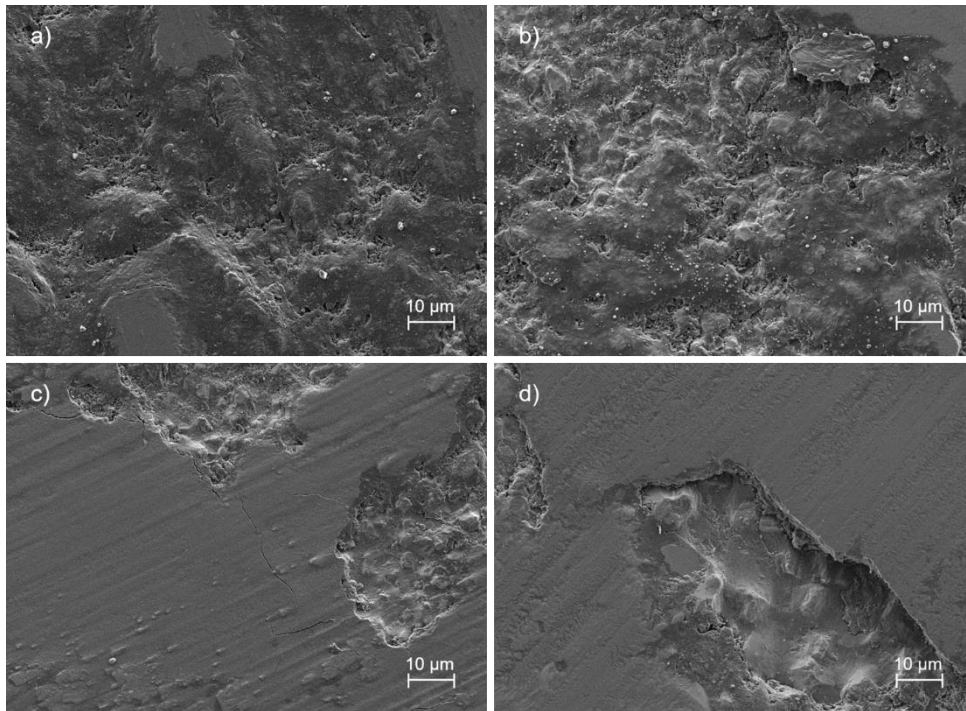


Figura 3 – Micrografia das trilhas de desgaste dos nanocompósitos de Al₂O₃-5%vol.NbC sinterizados por SPS a: a) 1450 °C, b) 1500 °C, c) 1550 °C e d) 1600 °C e testados com esfera de Al₂O₃.

O desgaste por cisalhamento é provocado pela mudança dimensional sofridas pela amostra nos ciclos de refrigeração-aquecimento contínuo que ocorrem durante os impulsos cíclicos de fadiga termomecânica do ensaio tribológico ⁽²⁸⁾. Além disso, a camada de tribofilme é menos resistente e é facilmente deformada e cisalhada quando submetidas à tensão. Assim, ocorre o sulcamento da camada superficial das amostras, que se deforma ao invés de trincar. Com a constante fadiga superficial no sentido do movimento, a camada superficial é arrancada, gerando cavidades que favorecem a fratura da amostra ⁽²⁷⁾.

CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou o comportamento de desgaste de nanocompósitos de Al_2O_3 -5%vol.NbC sinterizados por SPS usando ensaios de tribologia pino no disco, com esferas de WC-6%Co e Al_2O_3 . Os resultados obtidos revelaram que:

- A sinterização por SPS apresenta diversas vantagens, na qual a aplicação de pressão e os rápidos ciclos de aquecimento com curtos tempos de permanência possibilitam a obtenção de amostras densas e com altos valores de dureza.

- Os coeficientes de fricção foram influenciados pelo contra material utilizado e os menores valores foram obtidos nas amostras testadas com esferas de WC-6%Co, sendo o mais baixo encontrado na sinterização a 1500 °C.

- As taxas de desgaste também foram influenciados pelo contra material, sendo as maiores alcançadas nos ensaios com esferas de Al_2O_3 . Além disso, todos nanocompósitos analisados com esferas de WC-6%Co apresentaram regime de desgaste moderado, enquanto os testados com esferas de Al_2O_3 apresentaram regime de desgaste de transição ou severo.

- As análises das superfícies de desgaste mostraram que os mecanismos de desgaste foram controlados principalmente por deformação plástica, formação de tribofilme, delaminação, cisalhamento e fratura.

Nesse sentido, este estudo apresenta pela primeira vez a análise do comportamento de desgaste de nanocompósitos de Al_2O_3 -5%vol.NbC sinterizados por SPS utilizando esferas de WC-6%Co e Al_2O_3 . Os resultados obtidos mostram que estes materiais são promissores na fabricação de novos produtos cerâmicos avançados, como as ferramentas de corte.

AGRADECIMENTOS

À CAPES pelo apoio financeiro concedido através da bolsa de doutorado e do projeto CAPES-PVE A086/2013 (processo nº 23038.009604/2013-12), edital 71/2013. A. Borrell agradece ao Ministério de Economia e Competitividade Espanhol por seu contrato *Juan de la Cierva-Incorporación* (IJCI-2014-19839).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) ACCHAR, W.; SEGADÃES, A.M. Properties of sintered alumina reinforced with niobium carbide, *Inter. J. Refract. Met. Hard Mater.*, v.27, n.2, p.427-430, 2009

(2) TJONG, S.C.; MA, Z.Y.; LI, R.K.Y. The dynamic mechanical response of Al_2O_3 and TiB_2 particulate reinforced aluminum matrix composites produced by in-situ reaction. *Mater. Lett.*, v.38, n.1, p.39-44, 1999.

(3) GUSTAFSSON, S.; FALK, L. K. L.; LIDÉN, E.; CARLSTRÖM, E. Pressureless sintered Al_2O_3 -SiC nanocomposites. *Ceram. Int.*, v.34, n.7, p.1609-1615, 2008.

(4) WAHI, R.P.; LLSCHNER, B. Fracture behavior of composites based on Al_2O_3 -TiC. *J Mater Sci.*, v.15, n.4, p.15:875-885, 1980.

(5) CHEN, W.H.; LIN, H.T.; NAYAK, P.K.; CHANG, M.P.; HUANG, J.L. Sintering behavior and mechanical properties of WC- Al_2O_3 composites prepared by spark plasma sintering (SPS). *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, v.48, p.414-417, 2015.

(6) PORTU, G.D.; GUICCIARD, S.; MELANDRI, C.; MONTEVERDE, F. Wear behavior of Al_2O_3 -Mo and Al_2O_3 -Nb composites. *Wear*, v.262, n.11-12, p.1346-1352, 2007.

(7) ACCHAR, W.; GREIL, P.; MARTINELLI, A.E.; CAIRO, C.A.A.; BRESSIANI, A.H.A.; BRESSIANI, J.C. Sintering behaviour of alumina-niobium carbide composites. *J. Eur. Ceram. Soc.*, v.20, n.11, p.1765-1769, 2000.

(8) PASOTTI, R. M. R.; BRESSIANI, A. H. A.; BRESSIANI, J. C., Sintering of alumina-niobium carbide composite. *Int. J. Refract. Met. Hard Mat.*, v.16, n.4-6, p.423-427, 1998.

(9) HUANG, S.G.; LIU, R.L.; LI, L.; VAN DER BIEST, O.; VLEUGELS J. NbC as grain growth inhibitor and carbide in WC-Co hard metals. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, v.26, n.5, p.389-395, 2008.

(10) ACCHAR, W.; CAMARA, C. R. F.; CAIRO, C. A. A.; FILGUEIRA, M. Mechanical performance of alumina reinforced with NbC, TiC and WC. *Mat. Resear.*, v.15, n.6, p.821-824, 2012.

(11) DERNOVSEK, O.; BRESSIANI, J. C.; BRESSIANI, A. H. A.; ACCHAR, W.; GREIL, P. Reaction bonded niobium carbide ceramic from polymer-filler mixtures. *J. Mat. Sci.*, v.35, n.9, p.2201-2207, 2000.

(12) BORRELL, A.; ÁLVAREZ, I.; TORRECILLAS, R.; ROCHA, V.G.; FERNÁNDEZ, A. Microstructural design for mechanical and electrical properties of spark plasma sintered Al_2O_3 -SiC nanocomposites. *Mater. Sci. Eng. A*, v.534, p.693-698, 2012.

(13) KUMAR, R.; CHAUBEY, A.K.; BATHULA, S.; JHA, B.B.; DHAR, A. Synthesis and characterization of Al₂O₃-TiC nano-composite by spark plasma sintering. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, v.54, p.304-308, 2016.

(14) BONACHE, V.; SALVADOR, M.D.; FERNÁNDEZ, A.; BORRELL, A. Fabrication of full density near-nanostructured cemented carbides by combination of VC/Cr₃C₂ addition and consolidation by SPS and HIP technologies. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, v.29, n.2, p.202-208, 2011.

(15) RODRÍGUEZ-SUAREZ, T.; BARTOLOMÉ, J.F.; SMIRNOV, A.; LÓPEZ-ESTEBAN, S., TORRECILLAS, R.; MOYA, J.S. Sliding wear behavior of alumina/nickel nanocomposites processed by a conventional sintering route. *J Eur Ceram Soc.*, v.31, n.8, p.1389-1395, 2011.

(16) PIERRE, J. J.; PALLONE, E. M. J. A.; MAESTRELLI, S.; TOMASI, R. Dispersão de nanopartículas de ZrO₂ em Al₂O₃ visando a produção de nanocompósitos cerâmicos. *Rev. Cerâmica*, v.51, p.8-21, 2005.

(17) PALLONE, E. M. J. A.; TROMBINI, V.; BOTTA FILHO, F. W. J.; TOMASI, R. Synthesis of Al₂O₃-NbC by reactive milling and production of nanocomposite. *J. Mat. Proc. Tech*, v.143, n.144, p.185-190, 2003.

(18) BOTTA FILHO, F. W. J.; TOMASI, R.; PALLONE, E. M. J. A.; YAVARI, A. R. Nanostructured composites obtained by reactive milling. *Scripta Mater*, v.44, p.1735-1740, 2001.

(19) ASTM C373-88. Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products. *ASTM Annual Book of Standards*. West Conshohocken, PA, 2003.

(20) OLIVER, W.C.; PHARR, G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments, *J. Mater. Res.*, v.7, n.6, p.1564-1583, 1992.

(21) ASTM G99-03. Standard Test Method for Wear Testing With a Pin-on-disc Apparatus. *ASTM Annual Book of Standards*, v.03, 02. West Conshohocken, PA, 2003.

(22) CHEN, W.H.; LIN, H.T.; CHEN, J.; NAYAK, P.K.; LEE, A.C.; LU, H.H.; HUANG, J.L. Microstructure and wear behavior of spark plasma sintering sintered Al₂O₃/WC-based composite. *Inter. J. Refract. Met. Hard Mater.*, v.54, p.279-283, 2016.

(23) ESPINOZA-FERNÁNDEZ, L.; BORRELL, A.; SALVADOR, M.D.; GUTIERREZ-GONZALEZ, C.F. Sliding wear behavior of WC-Co-Cr₃C₂-VC composites fabricated by conventional and non-conventional techniques. *Wear*, v.307, n.1-2, p.60-6, 2013.

(24) FERVEL, V.; NORMAND, B.; CODDET, C. Tribological behavior of plasma sprayed Al₂O₃-based cermet coatings. *Wear*, v.230, n.1, p.70-77, 1999.

(25) KATO, K.; ADACHI, K. Wear of advanced ceramics. *Wear*, v.253, n.11-12, p.1097-1104, 2002.

(26) PASARIBU, H.R.; SLOETJES, J.W.; SCHIPPER, D.J. The transition of mild to severe wear of ceramics. *Wear*, v.256, n.6, p.585-591, 2004.

(27) TEDESCO, N. R. Caracterização do comportamento de desgaste de cerâmicas de alumina densa: efeitos de parâmetros do ensaio do tipo pino no disco. 2010, 197p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia/Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

(28) TUCI, A.; ESPOSITO, L. Second phase and materials transfer in alumina ceramics sliding systems. *Wear*, v.245, n1-2, p.76-83, 2000.

TRIBOLOGICAL ANALYSIS OF ALUMINA NANOCOMPOSITES REINFORCED WITH NIOBIUM CARBIDE AND SINTERIZED BY SPS

ABSTRACT

The NbC properties, such as high melting point and hardness and low chemical reactivity, making it desirable for reinforcing functions in high-performance ceramic materials. Therefore, the objective of this work was to study the dry sliding wear behavior of Al₂O₃-5vol.%NbC nanocomposites prepared by reactive high-energy milling and sintered by spark plasma sintering at different temperatures (1450-1600 °C). In the ball-on-disc tribology tests were using WC-6%Co and Al₂O₃ balls, a load of 30 N, a sliding distance of 2000 m and a sliding speed of 0.1 m/s. In these tests were obtained the friction coefficient, wear rates and patterns. The nanocomposites tested with WC-6w%Co shows lower friction coefficient and wear rate than the tested with Al₂O₃. The results indicate a potential for the application of these nanocomposites in the fabrication of new products.

Key-words: Nanocomposites, Alumina-Niobium Carbide, Reactive High-Energy Milling, Spark Plasma Sintering, Sliding Wear “ball-on-disc”.