

Compósitos de matriz metálica reforçados pela dispersão de partículas cerâmicas produzidos por mecanossíntese: uma revisão

Metal matrix composites reinforced by dispersed ceramic particles produced by mechanical alloying: a review

Luiz Eloi Vieira Jr.

Mestrando em Engenharia;
Laboratório Interdisciplinar de Materiais – LABMAT;
Departamento de Engenharia Mecânica – EMC;
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.
Florianópolis – SC [Brasil]
eloi_junior@hotmail.com

João Batista Rodrigues Neto

Doutor em Engenharia;
Núcleo de Materiais Cerâmicos – Cermat;
Departamento de Engenharia Mecânica – EMC;
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.
Florianópolis – SC [Brasil]
jbrn.ufsc@gmail.com

Dachamir Hotza

Doutor em Engenharia;
Núcleo de Materiais Cerâmicos – Cermat;
Departamento de Engenharia Mecânica – EMC;
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.
Florianópolis – SC [Brasil]
hotza@pq.cnpq.br

Aloisio Nelmo Klein

Doutor em Engenharia;
Laboratório Interdisciplinar de Materiais – Labmat;
Departamento de Engenharia Mecânica – EMC;
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.
Florianópolis – SC [Brasil]
klein@emc.ufsc.br

A mecanossíntese é uma técnica de processamento de pós no estado sólido envolvendo de modo repetido a solda a frio e a fratura de partículas de pó em um moinho de alta energia. A técnica foi originalmente desenvolvida para produzir superligas reforçadas por óxidos dispersos para aplicações na indústria aeroespacial. Atualmente pode-se sintetizar uma grande variedade de ligas. Variáveis de processo e materiais de partida envolvidos na mecanossíntese são revisadas e discutidas neste artigo.

Palavras-chave: Ligas. Mecanossíntese. Moinho de alta energia.

Mechanical alloying is a solid-state powder processing technique involving repeated cold welding, fracturing, and rewelding of powder particles in a high-energy mill. Originally developed to produce oxide-dispersion strengthened (ODS) superalloys for applications in the aerospace industry, it is currently capable of synthesizing a variety of alloys. Process variables and starting materials involved in mechanical alloying are reviewed and discussed.

Key words: Alloys. High-energy mill. Mechanical alloying.



1 Introdução

O processo denominado mecanossíntese (*mechanical alloying*) consiste em processar conjuntamente dois ou mais componentes misturados por moagem em moinhos de alta energia. Por efeito da moagem conjunta prolongada dos componentes da mistura, três efeitos distintos podem resultar, dependendo dos parâmetros de processamento utilizados e das substâncias (componentes) presentes na mistura: a) dispersão fina, discreta e homogênea da fase reforço na matriz, podendo alcançar dimensões nanométricas; b) formação de uma nova fase (fase de reforço), finamente dispersa na matriz, pela reação entre os componentes da mistura; c) amorfização do material ou liga em processamento.

O processamento se dá em temperaturas próximas ao ambiente, por reações de estado sólido, caracterizando esta técnica como bem-controlada e o material resultante apresenta pouca contaminação e melhores propriedades mecânicas se comparado com os materiais obtidos de processos convencionais de fundição (SURYANARAYANA, 2001).

O mecanismo de formação de ligas por moagem é produzido por meio de repetidas etapas de deformação plástica até a fratura das partículas de pó por fadiga. Os impactos causados pela colisão das esferas com os pós aumentam a quantidade de defeitos como vacâncias, discordâncias e falhas de empilhamento, aumentando a quantidade de defeitos cristalinos e favorecendo a difusão de átomos de soluto para dentro da matriz metálica. A presença do metal dúctil age como um hospedeiro sofrendo deformação plástica e promovendo uma mistura homogênea com as partículas frágeis, que por sua vez não se deformam, porém se fragmentam.

Compósitos de matriz metálica (*metal matrix composites*, MMCs) são materiais que possuem

excelente combinação de propriedades mecânicas, térmicas, químicas, magnéticas e elétricas, aplicados nas indústrias automobilística, nuclear e aeroespacial, produzindo componentes com elevada resistência mecânica, dureza, tenacidade e, ainda assim, mais leves. Isso é explicado pelo fato de que esses compósitos têm seu reforço na forma de partículas submicrométricas muito bem-distribuídas. As matrizes metálicas mais usadas em engenharia são de alumínio, ferro, níquel, tungstênio, cobre, e os reforços podem ser óxidos, nitretos, boretos e compostos intermetálicos (SURYANARAYANA, 2001; ARAMI, SEYED REIHANI, 2007).

Neste trabalho serão revisados, respectivamente, os parâmetros envolvidos no processo de mecanossíntese, bem como apresentados exemplos usuais de matrizes metálicas e reforços óxidos.

2 Parâmetros de processo

A mecanossíntese é um processo versátil na fabricação de materiais nobres com propriedades específicas que depende de vários fatores, tais como: a) tipo de moinho, b) velocidade de moagem, c) tempo de moagem, d) relação esferas abrasivas e pós, e) atmosfera de moagem, f) aditivos.

A Tabela 1, discutida nas subseções a seguir, apresenta uma seleção de compósitos com matrizes metálicas obtidos de mecanossíntese, com detalhes dos parâmetros de seu processamento.

2.1 Tipo de moinho

No processamento de pós há diferentes tipos de moinhos tanto para atividades laboratoriais quanto para produção em escala industrial, variando quantidades de carga e velocidades de rotação (energia de impacto), tamanho final de partícula e quantidade de contaminação. A Figura 1 mostra um esquema construtivo de um moinho atritor convencional e o princípio de redução no

Tabela 1: Materiais compósitos metálicos com dispersões de óxidos produzidos por mecanossíntese

Matriz Metálica	Fase dispersa			Parâmetros da mecanossíntese						Ref.
	Óxido	Quantidade (%)	Tamanho de partícula (µm)	Tipo de moinho	Velocidade (rpm)	Tempo (h)	Razão Bolas: Pó	Atmosfera	Aditivo	
Aço inoxidável	Y ₂ O ₃	0,34% massa	-	Atritor	220	48	-	Argônio	-	[4]
Cu	Al ₂ O ₃	20,0% volume	0,20	Spex	-	8	3,4:1	Argônio	-	[7]
Al-Zn	Al ₂ O ₃	5,0% volume	0,25	Planetário	600	60	15:1	Argônio	-	[8]
W	Y ₂ O ₃	0,1 - 5,0% massa	2,0	Bolas	75	72	20:1	Hidrogênio	-	[9]
Fe	Al ₂ O ₃	Produção <i>in situ</i>	1,0- 5,0	Planetário	360	4	4:1	Argônio	Acido esteárico	[11]
Cu	Al ₂ O ₃	Produção <i>in situ</i>	0,04	Turbilhão	250	60	10:1	Argônio	Acido esteárico	[14]

Fonte: Os autores.

tamanho de partícula por atrição. As partículas são cisalhadas pela ação dos elementos moedores e pelo conjunto de agitação do moinho (eixo, pinos e paredes do jarro). Este tipo de moinho pode ser usado tanto como misturador de pós quanto como processador de materiais, variando-se a velocidade de rotação do eixo (SURYANARAYANA, 2001).

A Figura 2 mostra o esquema de funcionamento de um moinho de bolas, usado para mistura de pós, que trabalha em baixa velocidade, homogeneizando a matéria-prima com alguma

redução no tamanho da partícula por efeito do cisalhamento e impacto.

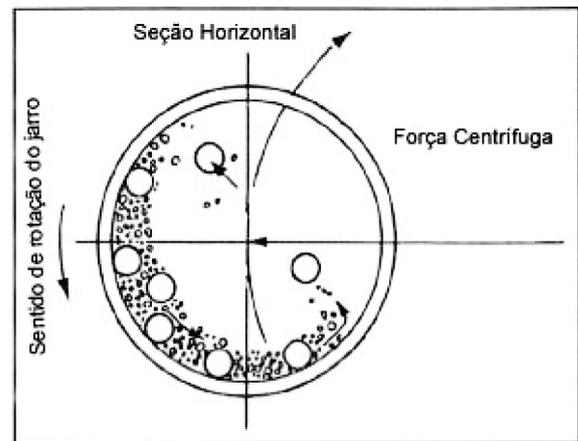


Figura 2: Princípio de funcionamento de um moinho de bolas

Fonte: SURYANARAYANA, 2001.

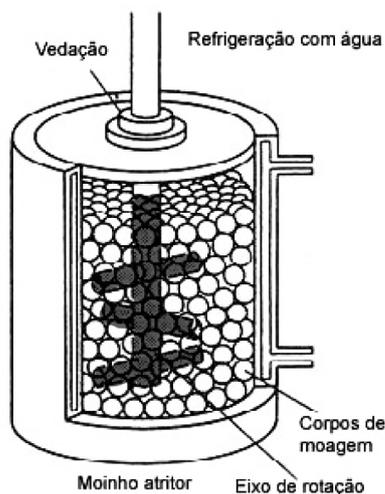


Figura 1: Esquema construtivo de um moinho por atrição (atritor)

Fonte: SURYANARAYANA, 2001.

2.2 Velocidade de moagem

A velocidade de moagem é um parâmetro dependente do tipo de moinho usado. A moagem pode funcionar tanto para etapas de homogeneização de materiais quanto para formação de ligas. Deve-se atentar para a possibilidade de contaminação e da formação de fases indesejadas com aumento da velocidade de moagem. Velocidades excessivamente altas podem acarretar num aumento na



temperatura interna do moinho, podendo formar fases indesejadas. Além disso, uma alta velocidade de moagem leva à retirada de fragmentos do jarro de moagem, que contamina o material que está sendo processado (SURYANARAYANA, 2001).

2.3 Tempo de moagem

O tempo de moagem está intimamente ligado à relação entre elementos moedores, carga de pós, velocidade, tempo e temperatura de moagem. A Figura 3 mostra a influência do tempo de moagem no tamanho médio das partículas de TiB_2 num moinho tipo atritor. A Figura 4 ilustra o quanto o tempo de moagem afeta a microestrutura de uma liga de alumínio reforçada com CuO . Pode-se notar que com o aumento no tempo de moagem, as partículas dúcteis envolvem as partículas frágeis e, pelos mecanismos já citados de fratura e solda fria, há uma crescente redução no tamanho das mesmas (SURYANARAYANA, 2001; YING, ZHANG, 2000).



Figura 3: Influência no tempo de moagem no tamanho médio de partícula do TiB_2

Fonte: SURYANARAYANA, 2001.

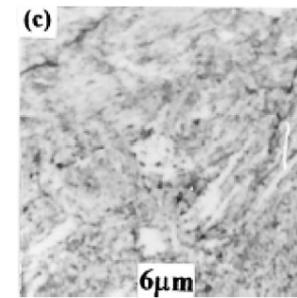
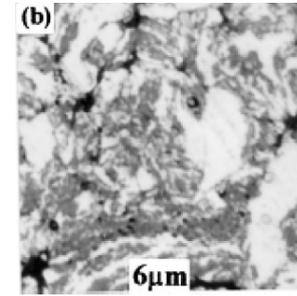
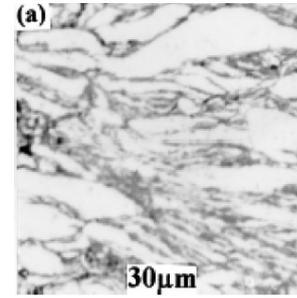


Figura 4: Microestrutura de uma liga $Al-CuO$ após moagem de (a) 1h, (b) 2h e (c) 4h

Fonte: ZHANG, 2000.

2.4 Razão entre elementos moedores e pó

Este parâmetro é conhecido também como razão de carga (*ball-to-powder ratio*, BPR) e pode ter uma grande variedade de valores, de acordo com as limitações do jarro de moagem. Moinhos do tipo atritor possuem uma grande flexibilidade de processo. A BPR influencia diretamente o tempo de moagem, porque as esferas são responsáveis pela energia mecânica aplicada às partículas. Deve-se ter cuidado com a combinação da velocidade e BPR, porque a energia transferida em excesso pode acarretar na formação de fases indesejadas. A Figura 5 mostra a influência da BPR

no tempo de moagem e no estado estacionário. Aumentando-se a BPR pode-se ter uma maior redução no tamanho das partículas.

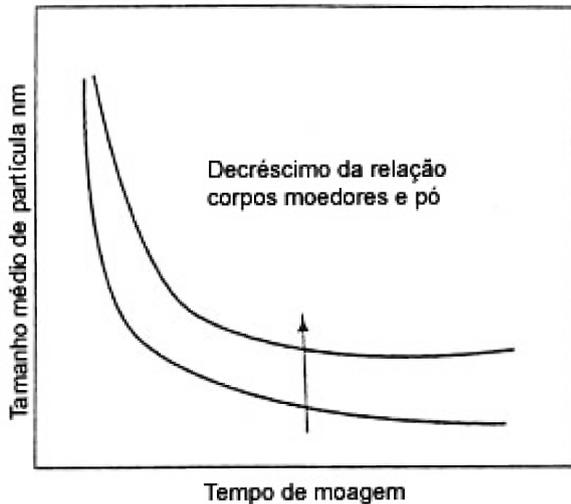


Figura 5: Redução do tamanho de partícula em um moinho atritor, variando-se tempo de moagem e BPR

Fonte: SURYANARAYANA, 2001.

2.5 Atmosfera de moagem

Geralmente a atmosfera de moagem é controlada com a presença de gases inertes como o argônio e o hélio, pois não se deseja nenhum tipo de contaminação do material. Entretanto, podem-se desenvolver determinadas fases *in situ*, com uma atmosfera controlada. Algumas ligas especiais podem ser produzidas com processos de oxirredução dentro do jarro de moagem, com cálculos termodinâmicos e uma atmosfera controlada. O oxigênio tem afeição pelos metais e com o aumento do tempo de moagem, a difusão do oxigênio é alta, formando óxidos com dimensões nanométricas muito bem distribuídas na matriz metálica (SURYANARAYANA, 2001; SKOGLUND et. al, 2003).

2.6 Aditivos

Aditivos ou agentes de controle de processo (*process control agents*, PCAs) têm a função de

prevenir o excesso de solda fria entre as partículas de pó durante a moagem. Podem ser usados no estado líquido, gasoso ou sólido. Os principais aditivos atuam como lubrificantes, e são compostos orgânicos. A escolha de um lubrificante deve obedecer às características de deformação e estabilidade químicas e térmicas das partículas, além da BPR.

Os elementos químicos constituintes desses aditivos – carbono, hidrogênio e oxigênio –, podem contaminar a liga a que nem sempre é desejável. Os elementos mais reativos são carbono e oxigênio, que formam carbetos e óxidos. O hidrogênio, por sua vez, é adsorvido pela matriz metálica durante a etapa de sinterização, podendo também produzir a formação de hidretos. A Tabela 2 mostra os principais aditivos usados, bem como suas porcentagens limites para adições.

Tabela 2: Aditivos típicos usados em mecanossíntese

Aditivo	Fórmula	Quantidade (% massa)	Função
Grafite	C	0,5	Lubrificante
Cloreto de sódio	NaCl	2	Lubrificante
Ácido esteárico	$C_{18}H_{36}O_2$	1	Lubrificante
Hexano	C_6H_{14}	0,5	Solvente
Tolueno	C_7H_8	-	Solvente
Etanol	C_2H_5OH	4	Solvente

Fonte: SURYANARAYANA, 2001.

3 Matrizes metálicas

Num material compósito a matriz metálica é responsável pelas propriedades físicas requeridas pelos componentes, sejam elas propriedades térmicas, elétricas, magnéticas ou ópticas, além de facilitar a conformação do material compósito. A seguir serão relacionados os materiais metálicos tipicamente usados como matriz no processo de mecanossíntese.



3.1 Alumínio

O alumínio é um metal dúctil muito utilizado em aplicações de engenharia por possuir uma boa resistência mecânica, condutividades térmica e elétrica combinadas com baixa densidade (ABOLI et al., 2007; TAVOOSI et al., 2007). O processamento convencional de ligas de alumínio se dá com etapas de conformação e tratamento térmico. Superligas de alumínio, reforçadas com óxidos dispersos (*oxide dispersion strengthened*, ODS) produzidas por mecanossíntese, apresentam óxidos diversos na faixa de 30 nm a 50 nm, muitas vezes oriundos do processo de decomposição do lubrificante e da reação com elementos da liga. Como consequência, há um acréscimo na resistência mecânica, tenacidade em fratura e resistência à corrosão e fadiga, permitindo a aplicação nas indústrias automotiva, marítima e aeroespacial, combinando alta relação da resistência mecânica/peso (SURYANARAYANA, 2001; WU, LI, 1999; ASM, 1992).

3.2 Níquel

O níquel é um metal com um alto ponto de fusão. A presença de partículas finas de óxidos dispersos aumenta consideravelmente as propriedades de resistência à fluência e fadiga térmica, além de apresentar resistência sob ambientes agressivos. Os principais produtos produzidos por mecanossíntese com ligas de níquel são componentes de turbinas de aviões, dispositivos de injeção de combustíveis de motores e bicos para instrumentos de solda (SURYANARAYANA, 2001). A Figura 6 mostra pás de turbinas fabricadas com superligas de níquel.

3.3 Ferro

Ligas de ferro apresentam uma alta resistência a temperaturas elevadas; a dispersão de óxidos acrescenta uma alta resistência à oxida-



Figura 6: Pás de turbinas a gás produzidas com superligas ODS de níquel

Fonte: SURYANARAYANA, 2001.

ção e carbonetação nessas condições. Essas ligas são úteis na produção de câmaras de combustão e apresentam alta durabilidade se comparadas, por exemplo, com ligas de molibdênio, sendo até 30% mais leves. Podem-se citar como exemplos de aplicações de superligas ODS de ferro componentes para fornos a vácuo, como mostrados na Figura 7 (SURYANARAYANA, 2001; SAKASEGAWA et al., 2007). A Figura 8 mostra curvas de comparação entre aços ODS e aços convencionais para trabalho a quente.

3.4 Cobre

O cobre é um metal dotado de excelentes propriedades elétricas, térmicas e corrosivas. Possui pouca resistência mecânica e à abrasão, e alta conformabilidade. Suas aplicações principais são componentes para as indústrias eletrônica, marítima e automotiva, como a produção de eletrodos (TOKUMITSU, 1997; FERREIRA, 2002; ASM, 1992).

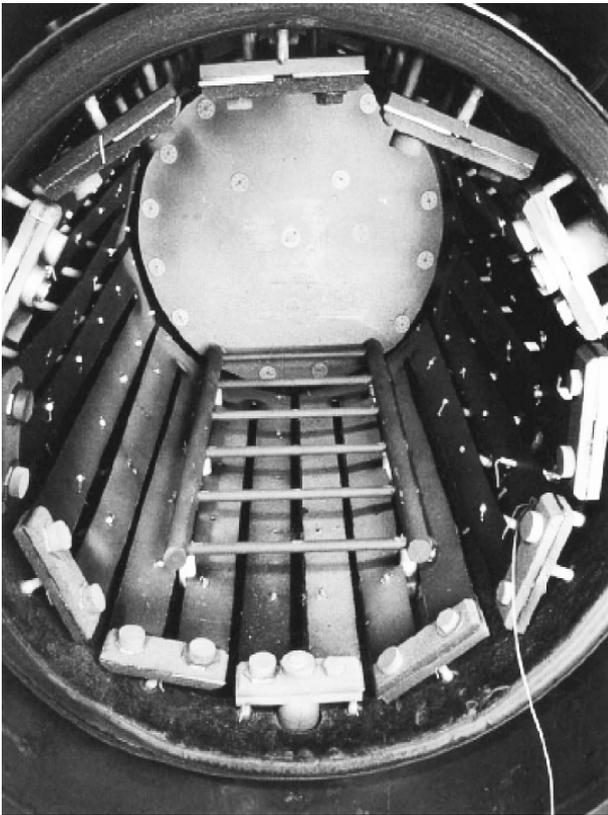


Figura 7: Cestas para fornos a vácuo fabricadas com superligas ODS de ferro

Fonte: SURYANARAYANA, 2001.

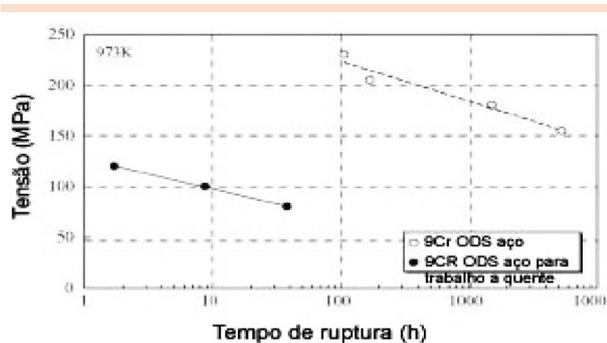


Figura 8: Comparativo entre a resistência à fluência de uma superliga ODS de ferro e um aço convencional para trabalho a quente

Fonte: SAKASEGAWA et al., 2007.

4 Fases óxidas dispersas

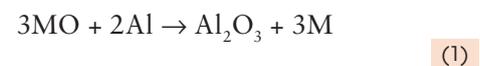
As dispersões de óxidos agem como reforço à matriz metálica, aumentando principalmente suas resistências mecânica, química, térmica, elétrica,

óptica e magnética seja sob temperaturas elevadas ou condições agressivas (YING, ZHANG, 2000; TAVOOSI et. al. 2007; JHO, et al., 2007). Esses óxidos podem ser adicionados na composição base da liga ou também com reações *in situ* com reações de oxirredução. O mais importante é que se tenham partículas pequenas e bem-distribuídas na matriz.

4.1 Óxido de alumínio

Óxido de alumínio ou alumina apresenta elevada resistência mecânica e química, além de alta dureza e um alto ponto de fusão. Aluminas com teores de $Al_2O_3 > 99,7\%$ são aplicadas em componentes com alta exigência mecânica, enquanto aluminas menos puras (80% a 99,7% Al_2O_3), por apresentarem formação de fase vítrea nos contornos de grão oriundas do processo de sinterização, são empregadas na fabricação de componentes elétricos (LEE, RAINFORTH, 1994). A Tabela 3 mostra as diferenças entre as aluminas de alta pureza em relação a propriedades mecânicas.

Esse material cerâmico é usado com sucesso no desenvolvimento de compósitos por aumentar a resistência mecânica e a tenacidade em fratura dos materiais. A alumina nanométrica pode ser produzida através de reações *in situ*, como na mecanossíntese. A reação obedece a equação (1):



onde M é um metal.

Diversos óxidos podem ser usados, como o CuO e o ZnO. O óxido é reduzido e o metal é inserido no reticulado do alumínio, aumentando suas propriedades mecânicas por solução sólida ou com a formação de intermetálicos (TAVOOSI et. al., 2007; THÜMLER, OBERACKER, 1993; RICHERSON, 1992).



Tabela 3: Características das aluminas de alta pureza

Grau de pureza	99,0 – 99,7 (%)	> 99,9 (%)
Densidade (g/cm ³)	3,89 – 3,96	3,96 – 3,98
Dureza (GPa)	15 – 16	19,3
KIc (MPa·m ^{1/2})	5,6 – 6,0	3,8 – 4,5
Módulo de elasticidade (GPa)	330 – 400	400 – 410
Resistência à compressão (MPa)	2600	> 2600
Resistência à flexão (MPa)	550	550–600
Coefficiente de expansão térmica (200 – 1200°C) (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	6,4 – 8,2	6,5 – 8,9
Condutividade térmica (W/m·K)	30,4	38,9
Faixa de sinterização (°C)	1700 – 1750	1600 – 2000

Fonte: LEE e RAINFORTH, 1994.

4.2 Óxido de ítrio

Óxido de ítrio ou ítria é o composto mais importante do ítrio sendo amplamente usado na composição de supercondutores. É usado como agente de reforço em ligas metálicas, ligas ODS, aumentando as resistências à oxidação e fluência. A Figura 9 mostra a relação entre quantidade de óxido e atuação como barreira ao crescimento de grão numa liga de tungstênio, que é explicada pela forte estabilidade termodinâmica que a ítria possui. (RYU, HONG, 2003) Sua aplicação clássica é a de pás de turbinas de jatos, economicamente mais viável que aços inoxidáveis austeníticos. A ítria também é aplicada na produção de sensores de indicação de concentração de oxigênio em exaustores de gases (SAKASEGAWA et al., 2007; THÜMMLER, OBERACKER, 1993; RICHERSON, 1992).

4.3 Óxido de titânio

O óxido de titânio ou titânia pode se apresentar sob três formas na natureza: o anatásio, com estrutura tetragonal de corpo centrado, o rutilo, com estrutura tetragonal simples e a brookita, com estrutura ortorrômbica. É um material não tóxico,

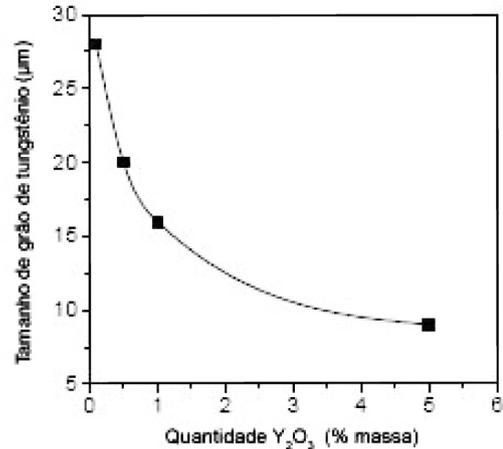


Figura 9: Variação do tamanho de grão do tungstênio produzido por mecanossíntese com a variação na quantidade de ítria de 1 a 5%, sinterizado por fase líquida por 1h

Fonte: RYU e HONG, 2003.

apresenta elevada estabilidade térmica e de custo baixo. Este material desperta muito interesse em fotocatalisadores, células a combustível, pigmentos, biomedicina e aplicações elétricas. Na aplicação de filmes finos, o TiO₂ apresenta melhora nas propriedades mecânicas e um maior controle da refratariedade dos substratos, aplicados na produção de vidros autolimpantes (RICHERSON, 1992; CHUNG, et. al. 2009).

4.4 Óxido de cobre

O óxido de cobre é um óxido que exhibe excelentes propriedades térmicas, elétricas, ópticas e magnéticas e que possui um baixo custo de produção. É usado na produção de compósitos com matriz polimérica para aplicações em células fotovoltaicas e dispositivos para o armazenamento de dados. É um material usado como agente oxidante na produção de materiais compósitos com matriz metálica (WU, LI, 2009; GUO et. al., 2007).

4.5 Óxido de cromo

O óxido de cromo está presente nos aços inoxidáveis. A formação da camada de óxido requer cuidados de processamento como a taxa

de crescimento e sua aderência ao substrato ou pó base. Altos teores de oxigênio promovem um grande aumento na taxa de formação de Cr_2O_3 , porém afeta a sua aderência e morfologia. As ligas ODS, produzidas por mecanossíntese, apresentam uma melhor aderência da camada por causa da baixa taxa de avanço da camada de óxido se comparada a materiais processados somente por técnicas de misturas de pós. Aliado a isso, adições de ítria reduzem ainda mais este avanço, melhorando a aderência da camada e a resistência térmica (FERGUS, 2005; FROITZHEIM et al., 2008).

5 Conclusão

A mecanossíntese é uma técnica de processamento de pós no estado sólido que permite a produção de uma grande variedade de ligas. Variáveis de processo, notadamente os parâmetros de moagem (tempo, velocidade, razão entre bolas e pó, atmosfera) e materiais de partida (metais e óxidos), influenciam marcadamente nas propriedades finais das ligas obtidas.

Agradecimentos

Às agências CAPES e CNPq pelo suporte financeiro.

Referências

ABDOLI, H.; SALAHI, E.; FARNOUSH, H.; POURAZRANG, K. Evolutions during synthesis of Al-N-nanostructured composite powder by mechanical alloying. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 461, p. 166–172, 2007.

ARAMI, H.; SIMCHI, A.; SEYED REIHANI, S.M. Mechanical induced reaction in Al-CuO system for in-situ fabrication of Al based nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 465, p. 151–156, 2007.

ASM, Metals Handbook. *Powder Metallurgy*, v.7., New York, ASM, 1992.

BLAZ, L.; KANEKO, J.; SUGAMATA, M. Microstructural evolution in mechanically alloyed Al-heavy-metal oxide composites. *Materials Chemistry and Physics*, v. 81, p. 387–389, 2003.

CHUNG, C.J.; HSIEH, P.Y.; HSIAO, C.H.; LIN, H.I.; LEYLAND, A.; MATTHEWS, A.; HE, J.L. Multifunctional arc ion plated TiO₂ photocatalytic coating with improved wear and corrosion protection. *Surface & Coating Technology*, v. 203, p. 1689 – 1693, 2009.

FERGUS, J.W. Metallic interconnects for solid oxide fuel cells. *Materials Science & Engineering A*, v. 397, p. 271–283, 2005.

FERREIRA, J.M.G.C. *Tecnologia da pulverometalurgia*, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.

FROITZHEIM, J.; MEIER, G.H.; NIEWOLAK, L.; ENNIS, P.J.; HATTENDORF, H.; SINGHEISER, L.; QUADAKKERS, W.J. Development of high strength steel for interconnect application in SOFC. *Journal of Powder Sources*, v. 178, p. 163–173, 2008.

GUO, Z.; LIANG, X.; PEREIRA, T.; SCAFFARO, R.; HAHN, H.T. CuO nanoparticle filled vinyl-ester resin nanocomposites: fabrication, characterization and property analysis. *Composites Science Technology*, v. 67, p. 2036–20474, 2007.

JHO, J.H.; KIM, D.H.; KIM, S.J.; LEE, K.S. Synthesis and photocatalytic property of a mixture of anatase and rutile TiO₂ doped with Fe by mechanical alloying process. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 459, p. 386–389, 2007.

KIM, D.H.; CHOI, D.K.; KIM, S.J.; LEE, K.S., The effect of phase type on photocatalytic activity in transition metal doped TiO₂ nanoparticles. *Catalysis Communications*, v. 9, p. 654–657, 2007.

KRASNOWSKI, M.; KULIK, T. Nanocrystalline FeAl-TiN composites obtained by hot-pressing consolidation of reactively milled powders. *Scripta Materialia*, v. 57, p. 553–556, 2007.

LEE, W.E.; RAINFORTH, W.M. *Ceramics microstructures*, London: Chapman & Hall, 1994.

LINES, M.G., Nanomaterials for practical functional uses. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 449, p. 242–245, 2007.

REED, J.S. *Ceramics processing*, 2 ed., New York: Wiley-Interscience, 1995.

RICHERSON, D.W. *Modern ceramic engineering*, 2 ed., New York: Marcel Dekker, 1992.

RYU, H. J.; HONG, S.H. Fabrication and proprieties of mechanically alloyed oxide-dispersed tungsten heavy alloys. *Materials Science & Engineering A*, v. 363, p. 179–184, 2003.



SAKASEGAWA, H.; TAMURA, M.; OHTSUKA, S.; UKAI, S.; TANIGAWA, H.; KOHYAMA, A.; FUJIWARA, M. Precipitation behavior of oxide-dispersion-strengthened steel. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 452, p. 2–6, 2007.

SHABASHOV, V.A.; SAGARADZE, V.V.; LITVINOV, A.V.; MUKOSEEV, A.G.; VILDANOVA, N.F. Mechanical synthesis in iron oxide-metal system. *Materials Science & Engineering A*, v. 392, p. 62–72, 2004.

SHEN, Y.; XIONG, T.; LI, T.; YANG, K. Tungsten and nitrogen co-doped TiO₂ nano-powders with strong visible light response. *Applied Catalysis*, v. 83, p. 177–185, 2008.

SKOGLUND, H.; WEDEL, M.K.; KARLSSON, B. The role of oxygen in processing of FeAl. *Intermetallics*, v. 11, p. 475–482, 2003.

SUNDAR, R.S.; DEEVI, S.C. High-temperature strength and creep resistance of FeAl. *Materials Science & Engineering A*, v. 357, p. 124–133, 2003.

SURYANARAYANA, C. Mechanical alloying and milling. *Progress in Materials Science*, v. 46, p. 1–184, 2001.

TAVOOSI, M.; KARIMZADEH, F.; ENAYATI, M.H.. Fabrication of Al-Zn- Al₂O₃ nanocomposite by mechanical alloying. *Materials Letters*, v. 62, p. 282–285, 2007.

TENEIKE, M.; ABE, F.; SAWADA, K. Creep-strengthening of steel at high temperatures using nano-sized carbonitride dispersions. *Nature*, v. 424, p. 294–296, 2003.

THÜMLER, F.; OBERACKER, R. *Introduction to powder metallurgy*, London, Institute of Materials, 1993.

TOKUMITSU, K. Reduction of metal oxides by mechanical alloying method. *Solid State Ionics*, v. 101–103, p. 35–31, 1997.

WU, J.M.; LI, Z.Z., Nanostructured composite obtained by mechanically driven reduction reaction of CuO and Al powder mixture. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 299, p. 9–16, 1999.

YING, D.; ZHANG, D.L. Processing of Cu-Al₂O₃ metal matrix nanocomposite materials by using high energy ball milling. *Materials Science & Engineering A*, v. 286, p. 152–156, 2000.

ZHANG, S.; KHOR, K.A.; LÜ, L. Preparation of Ti(C,N)-WC-TaC solid solution by mechanical alloying technique. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 48, p. 779–784, 1995.

Recebido em 1 jun. 2009 / aprovado em 17 set. 2009

Para referenciar este texto

VIEIRA Jr., L. E. et al. Compósitos de matriz metálica reforçados pela dispersão de partículas cerâmicas produzidos por mecanossíntese: uma revisão. *Exacta*, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 195-204, 2009.