

SÍNTESE DE DIAMANTES NO SISTEMA AL-NI-C E SUAS PROPRIEDADES¹

Anatoly Grigorievitch Garan²
Galina Ddmitrievna . Il'nitskaia³
Guerold Sergueevitch Bobrovnitchii⁴
Ana Lucia Diegues Skury⁵

Resumo

Neste trabalho são apresentados resultados relativos ao o processo de síntese na presença de uma nova composição de liga solvente a base de Al. Os parâmetros de pressão 5,5 GPa e temperatura 1.400°C de síntese fo ram gerados no dispositivo de alta pressão tipo bigorna com concavidade de 30 mm. O grau de transformação do grafite em diamante foi 21%. A granulometria de 80/63 µm do pó de diamante obtido foi dominante. Somente encontrou-se a quantidade de 3,5% de grãos de 250/200 µm. Os diamantes exibem cor preta com brilho metálico. A maior resistência à compressão de 14,2 N foi medida para tamanhos 63/50 µm. O coeficiente de ativação superficial é bastante alto. Por este motivo, os diamantes obtidos podem ser recomendados para a sinterização de compósitos termorresistentes.

Palavras-chave: Alta pressão; Síntese; Diamante; Calibrador; Granulometria.

DIAMOND SYNTHESIS IN THE Al-Ni-C SYSTEM AND THEIRS PROPERTIES

Abstract

This work presents results concerning the diamond synthesis process in the presence of a new alloy composition of solvent-based in Al-Ni-C system. The parameters of pressure 5.5 GPa and temperature 1400 °C, were generated in the high-pressure type device with anvil concavity of 30 mm. The graphite transformation degree into diamond was 21%. The size of the 80/63µm diamond powder obtained was dominant. Only found the amount of 3.5% of grain 250/200µm. The diamonds show a black color with metallic luster. The greatest compression resistance was 14.2 N for sizes 63/50µm. The coefficient of surface activation is quite high. Therefore, the diamonds obtained can be recommended for the sintering of composites with high thermal resistance.

Key words: High pressure; Synthesis; Diamond; Properties.

¹ Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Pesquisador Junior do Instituto de Materiais Superduros da Academia das Ciências da Ucrânia, rua Autozavodskaia, 2, Kiev, Ucrânia, CEP 04074 – Ucrânia. garana@ukr.net

³ Pesquisador Superior do Instituto de Materiais Superduros. Ucrânia

⁴ Professor Emérito do SMSD/LAMAV/CCT – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, av. Alberto Lamego, 2000,pq. Califórnia, Campos dos Goytacazes,RJ, CEP 28013-602. e-mail: guerold@uenf.br

⁵ Professora associado do SMSD/LAMAV/CCT – UENF.e-mail: lucia@uenf.br

1 INTRODUÇÃO

A cristalização espontânea dos pós de diamante a partir da solução do carbono em fusões metálicas de metais de transição do grupo 3-d da tabela periódica (Mn, Ni, Fe, Co) e suas ligas em condições de altas pressões estáticas é um dos métodos mais aplicados para a produção dos diamantes sintéticos.⁽¹⁾ Já é bem estabelecido que para cada solvente existe uma região específica no diagrama de fases do carbono para a formação dos diamantes. Shulzhenko⁽²⁾ mostrou a existência da relação direta entre os parâmetros mínimos de síntese e a temperatura da fusão das soluções eutéticas do carbono para diversos metais e suas ligas. Embora já tenham se passado mais de 50 anos após a primeira síntese de diamantes, o mecanismo de formação dos diamantes ainda é tema de muitas pesquisas. Já se sabe que os diamantes podem nuclear e crescer em condições de solução supersaturada do carbono no metal líquido e que, em determinado momento, pode ser supersaturado em relação ao diamante e não em relação ao grafite.

As ligas formadas nos sistemas Ni-Mn, Ni-Co, Fe-Ni e Fe-Co são as mais estudadas e aplicadas na prática da síntese de diamantes, sendo as mesmas que possibilitam a obtenção dos diamantes em pressão e temperatura relativamente baixos, ou seja, pressão entre 4,5 GPa e 5,5 GPa e temperatura variando entre 1.150°C a 1.400°C.⁽³⁻⁴⁾ Entretanto, considerando-se a obtenção de novos tipos de diamantes existe atualmente a busca por novos tipos de solventes. Já foram estudados os processos utilizando Mg, Zn, Cu, Si, alguns óxidos, carbetos e hidróxidos dos metais alcalinos, alcalinos-terrosos e outros.⁽⁵⁻¹⁴⁾ Foi mostrado que, em comparação com a velocidade de crescimento de diamantes que foram formados no sistema de crescimento que contém os metais de transição, a aplicação de alguns destes solventes promove o aumento da velocidade de crescimento dos cristais. Algumas vezes a aplicação de solventes não tradicionais permite também aumentar a resistência e a termorresistência dos diamantes sintéticos executando o processo em condições de pressão e temperaturas iguais ou um pouco abaixo daquelas praticadas para os sistemas que contém os metais de transição. Por exemplo, o Mg consegue dissolver o carbono sob pressões de 6,0 GPa e temperatura acima de 1.680°C.⁽⁵⁾

Nas pesquisas realizadas por Shulzhenko⁽⁶⁾ e colaboradores foram analisados os sistemas Mg-C e Co-C. Do ponto de vista prático o primeiro sistema produz diamantes que exibem a semicondutividade elétrica. Já o sistema de Co-C exige a aplicação de 8,5 GPa e 2.300°C, os quais não são recomendados para o sistema industrial devido ao seu elevado custo de produção, porém os diamantes obtidos possuem elevada resistência mecânica.

Para a obtenção de diamantes no sistema Zn-C⁽⁷⁾ é necessária a aplicação de pressões acima de 7,0 GPa e temperaturas acima de 1.850°C o que não é economicamente viável. Algumas pesquisas⁽⁷⁾ mostram que somente com a aplicação de pressão e temperatura acima de 6,0 GPa e 1.600°C é que se obtém diamantes neste sistema. Sob a pressão de 8,0 GPa e temperatura de 1800 °C são obtidos diamantes com morfologia octaédrica. Aplicação de Mg e da liga Mg-Zn permite a obtenção de diamantes com particularidades de semicondutores com morfologia cúbica⁽⁹⁾. A síntese destes diamantes foi realizada em pressão acima de 6,0 GPa e temperatura acima de 1.700°C durante dois minutos. Foram obtidos diamantes de cor azul-claro, com hábito cúbico e dimensões de até 0,4 mm.

Diamantes obtidos no sistema Mg-Zn-C têm morfologia octaédrica quando o teor de Mg é maior e quando o teor de Zn é maior a morfologia passa a ser cúbica.

A resistência mecânica e a termorresistência são características físico-mecânicas básicas do diamante.⁽¹⁰⁻¹²⁾ A resistência dos diamantes obtidos no sistema Mg-Zn-C para granulometria de 315 µm é 34 N e para a 400 µm é 66 N. Estes valores são menores de que aqueles observados para diamantes obtidos no sistema Ni-Mn-C. Entretanto, a sua termoresistência é maior⁽¹¹⁾. Para a liga Fe-Al (4%) o equilíbrio da fusão-diamante começa a partir de 6,0 GPa e 1.600°C. Porém, os diamantes obtidos neste sistema são defeituosos.⁽¹³⁻¹⁵⁾ Assim, pode-se dizer que a aplicação de solventes não tradicionais para obtenção de diamantes possibilita aumentar a velocidade de crescimento dos cristais, diminuir os parâmetros de síntese e obter diamantes com propriedades de semicondutores e termoresistentes.

Desta forma o estudo de novos tipos de catalisadores é de extrema importância. Desde 2001 a UENF vêm desenvolvendo estudos relacionados com a aplicação de solventes não tradicionais. Nesse sentido, já foram estudados os processos de síntese utilizando Zn e Mg, assim como de suas ligas.⁽¹⁶⁻¹⁸⁾ Neste estudo são apresentados resultados das pesquisas inéditas relacionadas com a aplicação da liga Al-Ni no processo de síntese de diamantes.

2 METODOLOGIA

Os experimentos foram realizados no dispositivo de alta pressão tipo bigorna toroidal com concavidade central de diâmetro de 30 mm⁽¹⁸⁾ usando a prensa de 2500 toneladas de força. A mistura reativa foi feita a partir de pós de grafite e liga solvente na proporção 1:1 em massa. A liga solvente é feita pela a mistura dos pós de alumínio e níquel em proporção de 1:18 em massa, a qual corresponde ao composto Ni₉₀Al₁₀. Paralelamente foi preparada uma outra mistura com liga Ni-Mn com mesma proporção com grafite. A mistura homogênea de pós do solvente e do grafite foi compactada sob a pressão de 800 MPa e transferida diretamente para dentro da cápsula deformável. Os topos do compacto foram fechados com discos isolantes de calcita e condutores de grafite. O dispositivo de alta pressão junto com célula reativa foram calibrados em função da pressão, $P_2 = f(P_1)$ e temperatura, $T = f(W)$. Os parâmetros de síntese foram: a pressão P_2 de 5,5 GPa, temperatura de 1.400°C ± 50°C mantidos por 60 segundos. Os parâmetros citados foram automaticamente alcançados por comando programável de prensa.

Após cada ciclo de síntese os aglomerados obtidos, compostos por diamantes, grafite não transformado e liga catalisador-solvente, foram quebrados e triturados até obtenção de partículas de 1,0 mm. O pó obtido foi submetido ao ataque químico para extração dos diamantes. Após a determinação do grau de transformação da grafite em diamante os cristais foram separados por granulometria e submetidos a testes de quebra usando o dispositivo DiaTest-S (Alemanha) sob compressão estática. Foram ainda avaliados: teor de inclusões, caracterização da morfologia, determinação de coeficiente de atividade superficial, a resistência elétrica relativa, resistência térmica; teor de nitrogênio paramagnético e nível de tensões sob aquecimento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O grau de transformação da grafite em diamante variou de uma operação à outra na faixa de 20% a 28% (em massa). Os diamantes obtidos passaram através de classificação granulométrica com ajuda de peneiras padronizadas (figura 1). Para comparação foram utilizadas as distribuições da granulometria dos diamantes obtidos a partir do sistema Ni-Mn-C. Para cada classificação foi determinada a força de quebra. Os resultados são apresentados na Tabela 1.

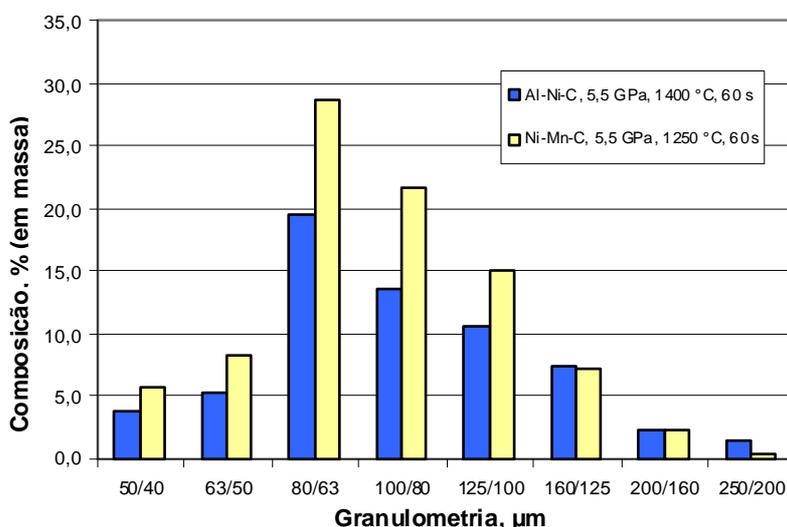


Figura 1 - A composição de pós de diamante com granulometria variável em aglomerados obtidos nos sistemas de Al-Ni-C e Mn-Ni-C;

Tabela 1. Características básicas dos pós sintetizados em sistema Al-Ni-C

Granulometria, (µm)	Composição, % (em massa)	Carga da quebra, H	Teor de Inclusões, %
+250	0,5	-	-
250/200	1,5	-	-
200/160	2,3	9,3	3,86
160/125	7,5	10,2	3,50
125/100	10,5	11,1	3,41
100/80	13,5	12,2	2,93
80/63	19,5	13,1	2,31
63/50	5,3	14,2	2,03
50/40	3,8	12,5	2,11
-40	35,6	-	2,26

A análise visual dos diamantes evidenciou a formação de cristais com coloração negra com forte brilho. A análise dos cristais no regime de campo escuro mostrou a presença de uma quantidade significativa de inclusões da liga Al-Ni, as quais são as responsáveis pela cor observada nos cristais. A quantidade das inclusões foi avaliada a partir dos cristais que não quebraram durante os testes de compressão (Tabela 1).

Na Figura 2 são apresentados os pós de diamantes sinterizados no sistema Al-Ni-C. A figura 3(a) mostra a morfologia para a granulometria de 80/63 µm, predominante nestes aglomerados e na Figura 3(b) é apresentada a morfologia da fração com tamanho 250/200 µm. Como pode ser observado, o pó é constituído por

monocristais com defeitos superficiais, cristais geminados e drusas. Os cristais têm hábitos octaédrico.

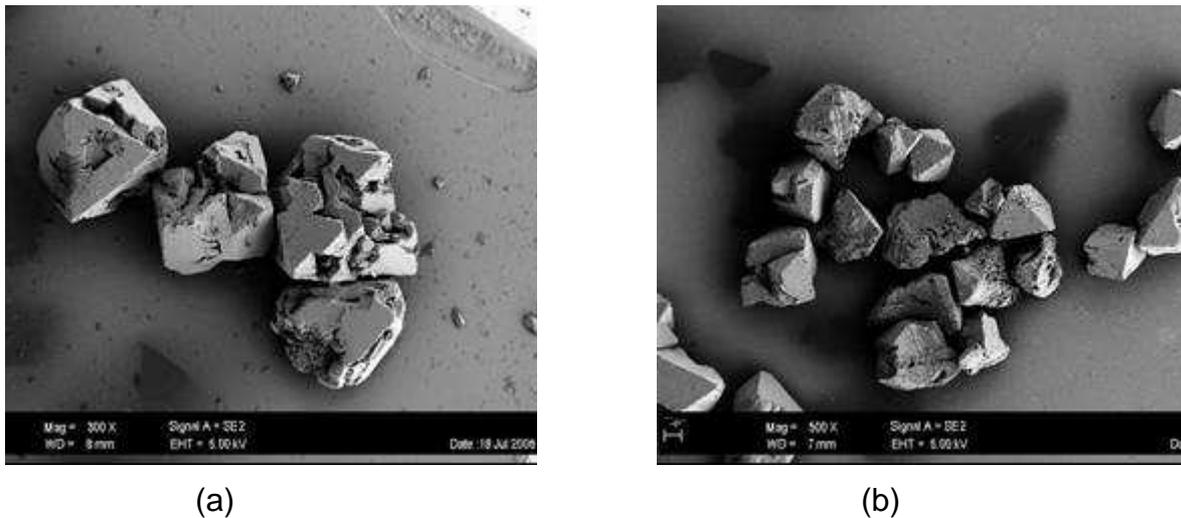


Figura 2. As formas de pó de diamante obtido com utilização de catalizador-solvente de $Ni_{90}Al_{10}$ ($T = 1400\text{ }^{\circ}C$, $P = 5,5\text{ GPa}$, $t = 60\text{ s}$ com granulometria de (a) 80/63 μm e (b) 250/200 μm .

As propriedades dos diamantes sintéticos são definidas durante o processo de síntese, extração de pó de diamante.⁽¹⁹⁾ As propriedades superficiais dos cristais podem ser avaliadas pelo coeficiente de atividade superficial (K_a). Sua determinação é bem mais fácil do que a determinação da superfície relativa e consiste da correlação entre a massa do carregador (pó de ferro) aderido por magnetismo na superfície dos cristais e a massa inicial de diamantes. Na Tabela 2 são apresentados os coeficientes de atividade superficial, K_a para pó de diamantes obtido no sistema Al-Ni-C. Da tabela segue que a quantidade das partículas ferromagnéticas aderidas na superfície do diamante para os pós do sistema Al-Ni-C é cerca de 1,2 – 1,4 vezes maior do que para pós do sistema Mn-Ni-C (dependendo da granulometria). É possível afirmar que a superfície dos diamantes do sistema Al-Ni-C é mais defeituosa (maior superfície relativa) do que a superfície dos pós obtidos no sistema Ni-Mn-C. Pode-se inferir também que a forma da superfície pode ser relacionada com a com energia superficial do binômio “cristal – meio de crescimento”.

Tabela 2. Valores do coeficiente da atividade superficial, K_a para pós de diamante em estudo

Granulometria	K_a , % (Ni-Mn-C)	K_a , % (Al-Ni-C)
80/63	1,36	1,87
63/50	1,22	1,45
50/40	1,10	1,32

Uma das mais importantes características dos diamantes é o coeficiente de resistência térmica, o qual é uma correlação entre a resistência sob compressão do cristal sob carregamento estático depois do tratamento térmico e antes dele. Na Tabela 3 são apresentadas as forças de ruptura para os pós do sistema Al-Ni-C e Ni-Mn-C.

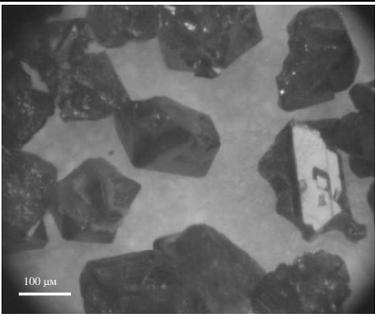
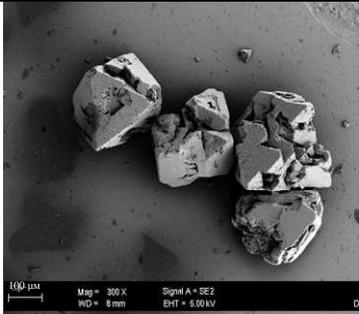
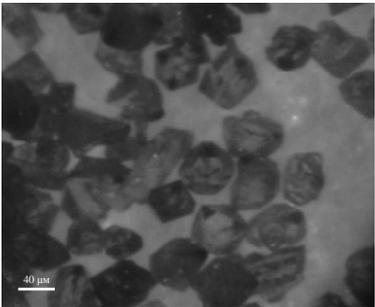
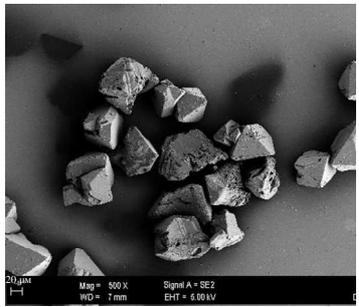
A temperatura do tratamento de $1.100\text{ }^{\circ}C$ modela a fabricação de ferramenta diamantada. Por isso os diamantes foram submetidos a esta temperatura durante 20 min em atmosfera de argônio onde foi determinado índice médio de resistência dos cristais depois deste tratamento (P_{1100}).

Para uma melhor discussão dos resultados com relação às propriedades dos cristais que foram obtidos nos sistemas Al-Ni-C e Mn-Ni-C, na Tabela 4 são apresentados os dados para algumas granulometrias.

Tabela 3. Resistência térmica dos diamantes obtidos nos sistemas Al-Ni-C e Mn-Ni-C

Granulometria, μm	Carga de ruptura, N		$\frac{F_{in} - F_{1100}}{F_{in}} \times 100, \%$	$k_{Rt} = \frac{F_{1100}}{F_{in}}$
	F_{in}	F_{1100}		
Pós de diamante do sistema Al-Ni-C				
125/100	11,1	8,2	26	0,24
80/63	13,1	9,3	29	0,71
Pós de diamante do sistema Mn-Ni-C				
125/100	12,8	7,8	39	0,61
80/63	14,6	7,7	47	0,53

Tabela 4. Comparação das propriedades dos pós diamantados para algumas granulometrias obtidas nos sistemas Ni-Mn-C e Al-Ni-C

Características de pós de diamantes	Granulometria, μm	Sistema	
		Ni-Mn-C	Al-Ni-C
Micrografia dos cristais	250/200		
	80/63		
Resistência, (N)	125/100 80/63	12,8 14,6	11,1 13,1
Coefficiente de resistência térmica	125/100 80/63	0,61 0,53	0,74 0,71
Coefficiente de atividade superficial, k_a , %	80/63 63/50 50/40	1,36 1,22 1,10	1,87 1,45 1,32
Resto não quebrado, %	125/100 80/63	1,67 1,35	3,41 2,31
Teor de nitrogênio paramagnético, cm^{-3}	80/63	$2,7 \cdot 10^{19}$	$0,69 \cdot 10^{19}$

Da análise da Tabela 4 verifica-se que, apesar da superfície defeituosa dos cristais do sistema Al-Ni-C e do alto teor de inclusões, os diamantes têm o coeficiente de termorresistência mais alto. Isto pode estar relacionado com as propriedades das inclusões, as quais são compostas por cerca de 97% – 99% da liga solvente, ou seja, com o coeficiente da expansão térmica da liga solvente mais baixo que pode significar menor nível das tensões nos grãos de diamantes ou alta temperatura da fusão da liga.

Isto pode ser explicado da seguinte maneira. Segundo Gargin⁽²¹⁾ as causas da diminuição da resistência térmica das partículas de diamantes são ligadas com a expansão térmica das inclusões, com o aumento brusco das tensões internas durante a fusão das inclusões, com interação química entre as inclusões e a matriz diamantada. Assim é interessante a análise destes fatores.

Avaliação do nível de tensões que aparecem nos cristais dos diamantes dos sistemas citados sob o aquecimento até 1000 K, provando que inclusões são compostas 100% de liga-solvente (Ni₄₈Mn₅₂ e Ni₉₀Al₁₀) pode ser feita pela equação:⁽²²⁾

$$q = K_2 (\alpha_2 - \alpha_1) (T_{\max} - T_{\min}), \quad (1)$$

onde: K_2 – módulo específico da compressão volumétrica da inclusão;
 α_2 – coeficiente específico da expansão térmica da inclusão;
 $\alpha_1 = \alpha_a$ – coeficiente específico da expansão térmica do diamante;
 T_{\max} – temperatura de aquecimento;
 T_{\min} – temperatura inicial.

Considera-se que os valores para $T_{\max} - T_{\min} = 1000 \text{ K} - 293 \text{ K}$; $\alpha_a = 4,32 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ na faixa de 1000 K⁽²³⁾; $K_2 = 150 \text{ GPa}$ para Ni₄₈Mn₅₂ e $K_2 = 160 \text{ GPa}$ para Ni₉₀Al₁₀ foram calculados em conformidade com lei das misturas⁽²⁴⁾ obtendo-se o valor $\alpha_2 = 9,72 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. A partir destes dados pode ser obter a pressão interna dos cristais obtidos a partir da liga Ni₉₀Al₁₀, achando-se $q = 1440 \text{ MPa}$ e $q = 670 \text{ MPa}$ (2,2 vezes menor) para ligas citadas. Este valor de pressão causar a ruptura do grão de diamante.

O sistema Ni-Mn-C sob a pressão atmosférica é caracterizado pela eutética com participação do carbono em forma de grafite $L \rightleftharpoons \text{Mn}-\text{C}_7 + \gamma + \text{C}$ que ocorre sob 1.041°C. ⁽²⁵⁾ A liga eutética do sistema Ni-Mn já pode fundir sob 1020 °C. A eutética metaestável $L \rightleftharpoons \text{Mn}_7\text{C}_3 + \gamma + \text{D}$ (γ – solução sólida com solubilidade sem limite da composição Ni_xMn_y, D – diamante) vai ser fundido com temperatura mais baixa.

Um destes processos vai limitar o valor do coeficiente da resistência térmica. Para o sistema Ni-Al-C esta temperatura é pouco mais alta $L \rightleftharpoons \gamma + \gamma' + \text{C}$ (γ – a solução sólida a base de Ni; γ' – solução sólida a base de Ni₃Al) e tem valor de 1.100°C, essa temperatura da eutética pode ter o papel significativo sobre o coeficiente de termorresistência.

A diminuição da resistência mecânica com o aumento da temperatura do tratamento, provavelmente, está relacionada com processo de interação da matriz diamantada com as inclusões fundidas, resultando na grafitização reativa do diamante. A grafitização inicia preferencialmente nas regiões onde ficam as inclusões. A grafitização do diamante é sempre acompanhada pelo aumento do volume e conseqüentemente originando tensões de tração no cristal das que leva a formação das trincas.⁽²⁶⁾

4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos foi determinado que a composição da liga solvente proposta, Al-Ni pode servir para síntese de diamantes com superfície específica desenvolvida e resistência térmica aumentada.

Foi observado também que diminuição da resistência mecânica com o aumento da temperatura do tratamento, provavelmente, está relacionada com processo de interação da matriz diamantada com as inclusões fundidas, resultando na grafitização reativa do diamante.

Estes diamantes podem ser utilizados para fabricação dos materiais compósitos diamantados. A superfície desenvolvida dos pós de diamante possibilita aumento da área geral de contato matriz-ligante e grão de diamante que, por sua vez, deve levar ao aumento da resistência do desgaste da ferramenta.

REFERÊNCIAS

- 1 Strong H.M., Chrenko R.M., Futher on diamond growth rates and physical properties of laboratory-made diamond. *J. Phys. Chem.* 1971, v. 75, No12, pp. 1838-1843.
- 2 A. A. Shulzhenko. Sobre o mecanismo da formação de diamantes sintéticos. In: *Materias Superduros para Indústria*, ed. ISM, Kiev, 1973, pp 3 – 6.
- 3 US Patent.
- 4 US Patent
- 5 -Patente da Alemanha 2226550 ICI C 01 B 31/06. Método de síntese de diamante. V. N. Bakul, A. A. Shulzhenko, A. F. Get'man. Pub 22.09.77.
- 6 A. A. Shulzhenko, I. Yu. Ignatieva. Estudo de P-T-C-diagramas do estado dos sistemas que contém os sistemas de carbono com magnésio e cálcio: Coletânea de obras do ISM, Kiev, Ucrânia, 1989, pp 5 – 13.
- 7 A. A. Shulzhenko, I. Yu. Ignatieva, A. S. Osipov, T. I. Smirnova. Metallographical and X-ray spectral studies of alloys of the Zn-C system at high pressure. *J. Superhard Materials*, 1999, N5, pp. 14 – 17.
- 8 Vishneuskiy A. S., Shulzhenko A. A. Estrutura dos diamantes semicondutores sinterizados sob alta pressão e alta temperatura. In: *II Escola Internacional "Diamantes sintéticos para eletrônica"*, Varsavia, Polônia. Panrtwowe Wydawnictwo Naukowe. 1974, pp 20 – 21.
- 9 A. A. Shulzhenko, I. Yu. Ignatieva, A. S. Osipov, et al. Diagramas do estado do sistema Zn-C sob altas pressões de 8,0 GPa. *J. Superhard Materials*. 2000, nº. 4, pp 10 – 13.
- 10 Kanda H., Akaishi M., Yamaoka S. New catalysts for diamond growth under high pressure and high temperature. *Hpl. Phys. Lett.* 1994, 65, N6, pp 785 – 786]
- 11 Shuzhenko A. A., Varga L., Hidasi B. Strong and thermal resistente of synthetc diamond. *Refractory Metals and Hard Materials*. 1992, 11, pp 285 – 299
- 12 Shuzhenko A. A., Novikov N. V., Tchipenko G. V. As particularidades do crescimento dos diamantes no sistema a base de magnésio. *J. Superhard Materials*. 1988, N3, pp 10-11.
- 13 Minoru Akaishi, Hisaro Kanda and Shinobu Yamaoka. Synthesis of diamond from graphite-carbonate systems under very high temperature and pressure. *J. of Crystals Growth*. 1990, 104, pp 578 – 581.
- 14 Minoru Akaishi, Hisaro Kanda and Shinobu Yamaoka. High pressure synthesis of diamond in the systems of graphite-sulfate and graphite-hydroxide. *Jap. J. of Applied Physics*. 1990, 29 N° 7, pp 1172 – 1174.
- 15 Putyatin F. F., Danidov V. E., Nesterenko S. N. High temperature interactions in the Fe-Al-C system at 6,0 GPa pressure. *J. Alloys and Compounds*. 1992, 175, N ½, pp 165 – 175.

- 16 Sideris, A.J., Bobrovnitchii, G.S., Osipov A. S. Nova liga solvente para para de diamantes no sistema Mg-Ni-C. In: 60 Congresso Anual da ABM. Belo Horizonte. 2005, V.1, pp. 2178-2185.
- 17 Medeiros, G.D.S. Influência da impregnação da mistura reativa com diluentes sobre a produtividade do processo da síntese de diamantes via altas pressões e altas temperaturas no sistema Ni-Mn-C. Dissertação do mestrado, UENF. 2005, p.71
- 18 A. V. Koltchin, V.M. Veprintsev, et all. Dispositif pour produire une haute pression. Patent No2122722, Bull. Offic. No 10, French, 1972.
- 19 G. P. Bogatyreva, G. F. Nevstruev, G. D. Il'itskaia, et al. Possibilidades do aumento da resistência da impregnação dos diamantes em matriz. J. Superhard Materials, 2001, nº. 2, pp 20 – 25.
- 20 G. P. Bogatyreva, V. L. Gviazdovskaia. A superfície relativa dos pós de diamantes sintéticos. J. Superhard Materials. 1986, nº. 2, pp 25 – 28.
- 21 Gargin V.G. Influência dos processos da fusão e interação das inclusões com matriz sobre mecanismo da diminuição da resistência dos diamantes sintéticos. In: Adgésia e interação de contato das fusões. Coletânea das obras científicas; Ed. Naukova Dumka, Kiev. 1988, pp 136-140. (em russo)
- 22 Novikov N.V., Maystrenko A.L., Kulakovskiy V.N. Resistência à destruição dos materiais compósitos superduros. Ed. Naukova Dumka, Kiev. 1993, p.220 (em russo)
- 23 A.P. Babichev, N.A. Babuchkina, et al. Grandezas físicas. Ed. by I. S. Grigoriev and E.Z. Meylikhov. Ed. Energoatomizdat, Moscou. 1991, p. 1232.
- 24 Frantsevitch I.N., Voronov F.F., Bakuta S.A. Constantes elásticas e modulos da elasticidade de metais e não- metais. Ed. Naukova Dumka, Kiev. 1982, p. 286.
- 25 Field, J.E. Properties of Diamond. Academ. Press. 1979, p 674
- 26 Gargin V. G. Destruição térmica de diamantes sintéticos. J. Superhard Materials. 1982, No 2, pp. 17-22