



CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS DA LIGA Ti6Al4V

Ernane Rodrigues da Silva, ernanerodrigues@gmail.com¹

Sinval Pedroso da Silva, sinvalpedroso@yahoo.com.br¹

Aderci de Freitas Filho, aderciff@gmail.com¹

Isa Carla Nicesio, isanics@yahoo.com.br¹

Herbert Eustáquio da Silva Junior, herbert-junior@hotmail.com

Carlos Eduardo, carloseduardo@deii.cefetmg.br¹

Rogério Felício dos Santos, rogeriodemaria@yahoo.com.br¹

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Av. Amazonas, 5253, Nova Suíça, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 30480-000

Resumo: *Propriedades como: baixa densidade, boa resistência à tração (comparável à de muitos aços ligados) e excelente resistência à corrosão, possibilitam a aplicação do titânio e suas ligas nas indústrias aeroespacial, naval, química e automotiva, e ainda no campo da medicina. Porém, raramente são usados como peças sujeitas ao deslizamento, devido à sua baixa resistência ao desgaste. O tratamento termoquímico de nitretação pode solucionar esta restrição. Além de aumentar a resistência ao desgaste, o nitreto de titânio melhora a biocompatibilidade de suas ligas. O objetivo deste trabalho foi nitretar por implantação iônica a liga Ti6Al4V pelo processo de nitretação por Descargas Elétricas (NDE). Uma máquina de Usinagem por Descargas Elétricas (EDM) por penetração foi utilizada no processo. O fluido dielétrico utilizado foi uma solução aquosa de água deionizada e uréia, como fonte de nitrogênio. Cobre e grafita foram utilizados como materiais dos eletrodos ferramenta. O formação de nitretos na superfície foi avaliada por meio de difração de raio-x. Para caracterizar a camada nitretada foram realizadas microscopia óptica e medição de microdureza Vickers. Os resultados de difração de raio-x mostraram a formação de nitretos de titânio na superfície da peça usinada. Imagens metalográficas da seção transversal da superfície mostraram a formação da camada nitretada, com valor de microdureza Vickers de aproximadamente o dobro da dureza do metal base.*

Palavras-chave: EDM, Nitretação por Descargas Elétricas, implantação iônica, nitretos de titânio, liga Ti6Al4V.

1. INTRODUÇÃO

Titânio e suas ligas são amplamente utilizados em muitas áreas, tais como aeroespacial, biomédica, indústria automobilística e militar, devido as suas excelentes propriedades, que incluem excelente relação resistência peso, boa biocompatibilidade, baixa densidade e alta resistência à corrosão (Gul *et al.*, 2014). No entanto, têm fraca resistência aos mecanismos de desgaste abrasivo e adesivo, além de alto coeficiente de atrito (Budinski, 1991). Portanto, as propriedades da superfície de titânio são inadequadas para cargas pesadas que induzem desgaste, especialmente quando usado como peças de máquinas em contato deslizante. Por isso, é importante desenvolver maneiras de modificar e reforçar a superfície do titânio e suas ligas, para melhorar as propriedades mecânicas e ampliar suas aplicações (Yan *et al.*, 2005).

Uma série de processos de modificação de superfície, incluindo a nitretação a plasma e implantação iônica foram pesquisadas, para melhorar as propriedades tribológicas de ligas de titânio, como dureza superficial e resistência ao desgaste por deslizamento (Gul *et al.*, 2014)

Yan *et al.* (2005) investigaram o uso de EDM com solução de ureia para avaliar as modificações ocorridas durante usinagem de peças metálicas de titânio puro. Seus resultados evidenciaram a formação de nitreto de titânio, com modificações superficiais nos corpos de prova, principalmente, na melhoria das características de desgaste e atrito.

Camargo *et al.* (2006) realizaram a nitretação de uma liga de titânio, Ti6Al4V, utilizando o processo EDM com solução de ureia como fluido dielétrico e os resultados obtidos mostraram a formação de uma camada nitretada, que permitiu um ganho de cerca de 60% na dureza em relação à matriz.

Santos (2013) desenvolveu o processo de nitretação por descargas elétricas (NDE) e seus resultados destacaram o caráter tecnológico do mesmo.

O processo NDE consiste na utilização de uma solução de água deionizada e ureia como fluido dielétrico. Ao se passar a corrente elétrica entre os eletrodos ferramenta e peça, forma-se um canal de plasma enriquecido com nitrogênio proveniente da ureia. Ao ocorrer a descarga o nitrogênio é incorporado à superfície da peça, formando nitretos e, consequentemente, o endurecimento da mesma (Raslan *et al.*, 2012).

O objetivo desse trabalho foi avaliar a técnica de enriquecimento superficial da liga de titânio Ti6Al4V com nitretos, por meio do processo de nitretação por descargas elétricas.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados em uma máquina de eletroerosão por penetração, modelo Servspark Eletroplus EDM-540. Algumas adaptações foram necessárias para possibilitar o emprego do processo NDE. A Figura (1) apresenta a cuba auxiliar, fabricada em aço inox AISI 304, posicionada dentro do tanque de trabalho da máquina de EDM. Essa adaptação evita a contaminação do fluido dielétrico usado na máquina em testes com outros tipos de fluidos dielétricos. Como fluido dielétrico foi utilizada uma solução de água deionizada e uréia, na concentração de 30 g/l. Uma bomba centrífuga foi instalada na cuba auxiliar, com o objetivo de circular o fluido dielétrico. Esse procedimento propicia a limpeza da fenda de trabalho por jato.

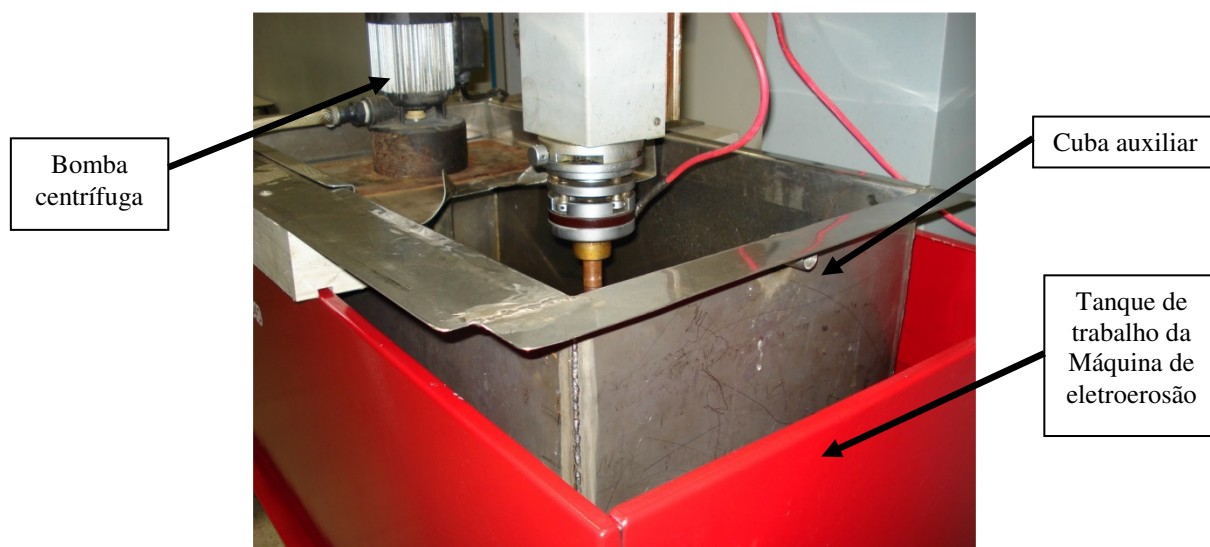


Figura 1. Máquina de eletroerosão utilizada no processo de Nitretação por Descargas Elétricas.

Os eletrodos peça foram fabricados da liga de titânio Ti6Al4V, com diâmetro de 19 mm por 13 mm de comprimento. Os eletrodos ferramenta usados no processo NDE foram confeccionados em cobre eletrolítico e grafita no formato cilíndrico, com diâmetro de 22 mm e comprimento de 30 mm. A figura (2) ilustra a montagem dos eletrodos no interior da cuba auxiliar.



Figura 2. Eletrodos ferramenta e peça posicionados no interior da cuba auxiliar.

A tabela (1) apresenta os parâmetros operacionais selecionados, que possibilitaram a aplicação do processo NDE na máquina EDM Servspark.

Tabela 1 – Parâmetros operacionais ajustados na máquina EDM para aplicação do processo NDE.

Parâmetros		Unidade
Polaridade do eletrodo-ferramenta	Positiva	+
Tensão	110	V
Corrente	40	A
Tempo de pulso (T_{on})	100	μs
Tempo de pausa (T_{off})	1,5*	
Fenda de trabalho (gap)	1,0*	
Velocidade do servo	2,3*	
Afastamento periódico da ferramenta	2,0*	
Tempo de erosão	4,0*	

*Esses parâmetros foram ajustados diretamente no painel de controle da EDM Servspark.

A Figura (3) ilustra o painel de controle da máquina Servspark Eletroplus EDM-540 com indicação dos parâmetros operacionais para aplicação do processo NDE na liga Ti6Al4V. O tempo de duração cada teste foi de 5 minutos.



Figura 3. Painel de controle da máquina de eletroerosão com indicação dos parâmetros ajustados.

A condutividade dielétrica da solução aquosa foi mensurada antes e após as séries de experimentos, a tabela (2) apresenta os valores. A condutividade inicial da água deionizada utilizada para formar a solução aquosa foi de 0 $\mu S/cm$. A ureia usada no processo é utilizada como fertilizante.

Tabela 2. Valores de condutividade dielétrica antes e após os experimentos.

Eletrodo ferramenta	Condutividade ($\mu S/cm$)	
	Antes da NDE	Após a NDE
Cobre eletrolítico	65	78
Grafita	65	87

Após a produção da superfície nitretada, uma amostra de cada série (eletrodo ferramenta de cobre e grafita) foi seccionada por meio de *cutoff* com o objetivo de se conseguir superfícies planas da seção transversal, para análise via microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV). As análises micrográficas das zonas refundidas (ZR) e camada nitretada foram realizadas em microscópio óptico. As imagens foram capturadas por meio de câmera digital acoplada ao equipamento. Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados em microdurômetro com cargas de 10 gf a 20 s. A presença de nitretos na superfície foi verificada via difração de raios-x convencional, Bragg-Brentano ou θ - 2θ .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura (4) ilustrada uma imagem de MEV da seção transversal de uma amostra nitretada com eletrodo ferramenta de cobre, destacando-se a zona refundida.

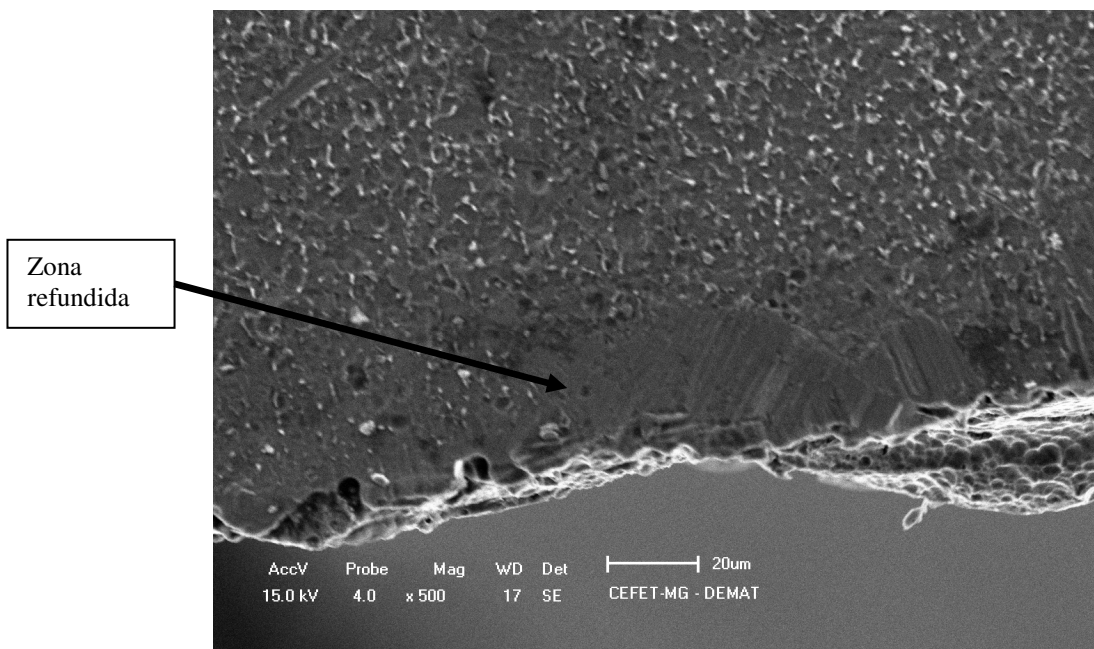


Figura 4. Imagem de MEV da seção transversal de uma amostra nitretada com eletrodo de cobre.

Nota-se em destacando uma camada de aproximadamente 25 µm que se formou na superfície da peça usinada por NDE.

A figura (5) ilustrada uma imagem de MEV da seção transversal de uma amostra nitretada com eletrodo ferramenta de grafita.

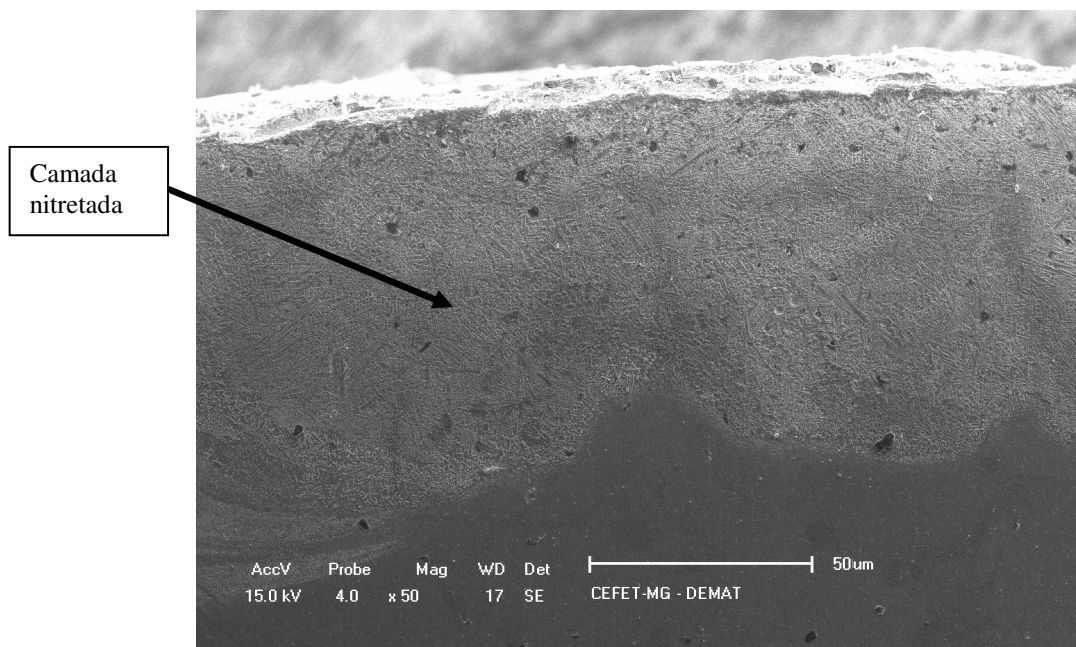


Figura 5. Imagem de MEV da seção transversal de uma amostra nitretada com eletrodo de grafita.

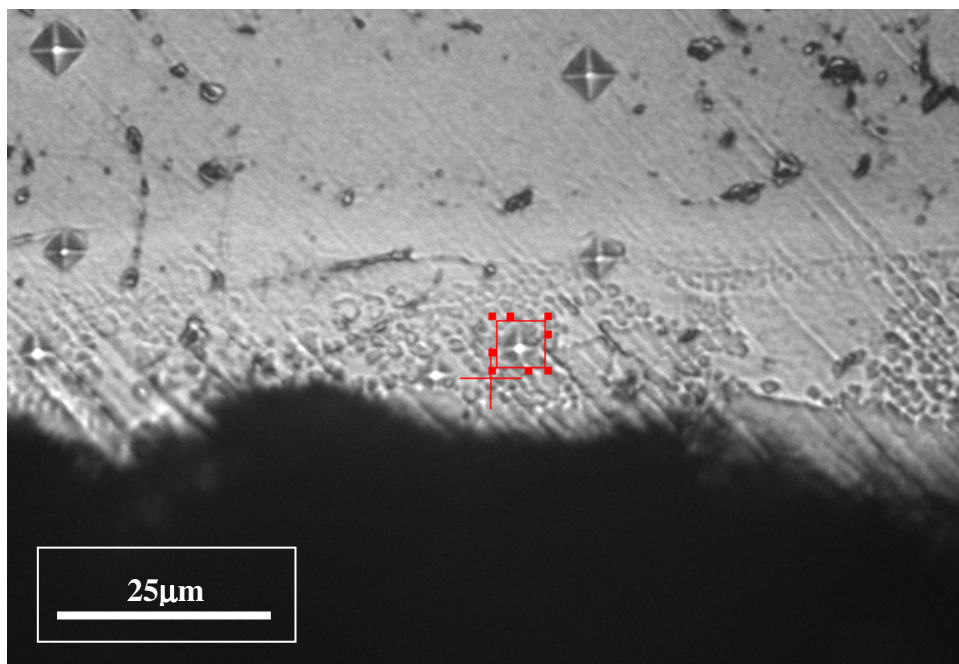
Diferentemente do que ocorre com a nitretação por NDE com eletrodo de cobre em que a camada nitretada é pouco espessa. No caso da usinagem com eletrodo de grafita a camada atingir espessura de aproximadamente 75 µm.

A Tabela (3) apresenta os resultados de microdureza Vickers da camada nitretada com eletrodo ferramenta de grafita e da matriz. Ocorreu um ganho no valor da microdureza de aproximadamente 90% em relação à matriz.

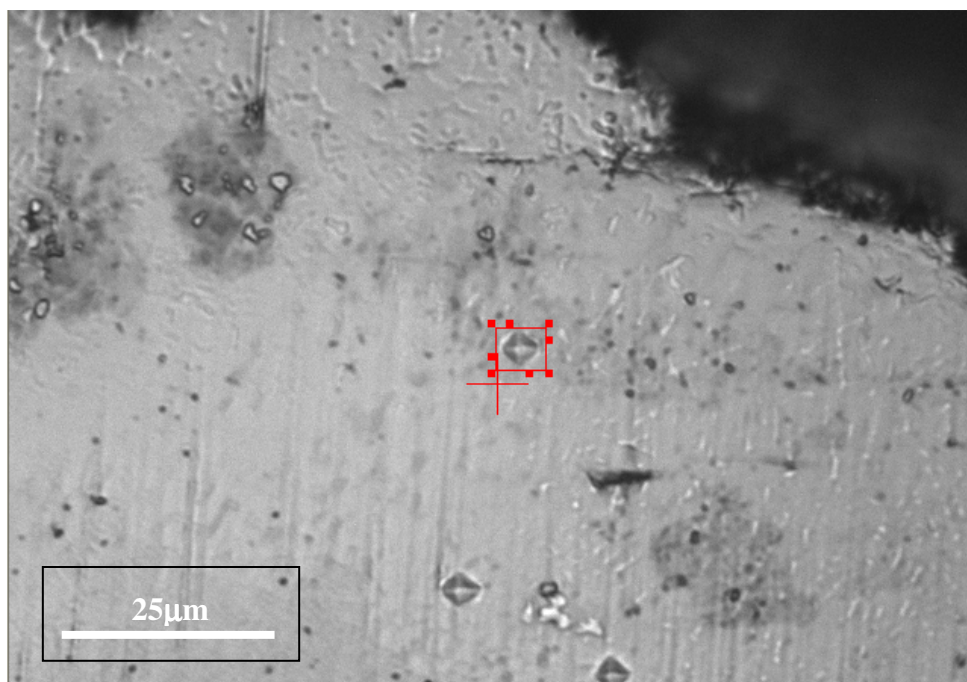
Tabela 3. Valores de microdureza Vickers (carga de 10gf) da liga Ti6Al6V e da camada nitretada obtida com eletrodos ferramenta de cobre e grafita.

Condição do material	Metal base (Ti6Al6V)	Camada nitretada (NDE)	
		Eletrodo de cobre	Eletrodo de grafita
Dureza HV	$304,8 \pm 10,56$	$588,6 \pm 33,52$	$641,45 \pm 37,16$
Ganho no valor da microdureza HV	–	93,11%	110,44%

A figura (6) ilustrada uma imagem de microscopia óptica da seção transversal de uma amostra nitretada com eletrodo ferramenta de cobre eletrolítico, capturadas via câmera digital acoplada ao microdurômetro.

**Figura 6. Microscopia óptica da seção transversal de uma amostra nitretada com eletrodo de cobre eletrolítico.**

A figura (7) ilustrada uma imagem de microscopia óptica da seção transversal de uma amostra nitretada com eletrodo ferramenta de grafita, capturadas via câmera digital acoplada ao microdurômetro.

**Figura 7. Microscopia óptica da seção transversal de uma amostra nitretada com eletrodo de grafita.**

Ocorreu aumento no valor da microdureza, em ambas as camadas, refundida e nitretada. Os resultados de microdureza mostraram um acréscimo de cerca de 90% de dureza na camada nitretada. Esse resultados são semelhantes aos obtidos por Yan *et al.* (2005) e Camargo *et al.* (2006). A camada nitretada com eletrodo ferramenta de cobre, de dureza superior à do metal base, se estende por toda sua espessura, cerca de 25 μm , e 75 μm para a usinada com eletrodo de grafita. Para ambos os tipos de eletrodo ferramenta, a camada nitretada se junta à refundida. Resultados que corroboram com as observações de Raslan (2015), a densidade do material a ser nitretado influencia na profundidade da camada enriquecida. Em materiais menos densos que os aços, como o titânio, as camadas são mais profundas.

A figura (8) apresenta o gráfico de intensidade versus ângulo de varredura (2θ) com os resultados de difração de raio-x. O gráfico ilustra os difratogramas das amostras nitretada com eletrodos ferramenta de cobre e grafita comparadas com o metal base (liga Ti6Al4V).

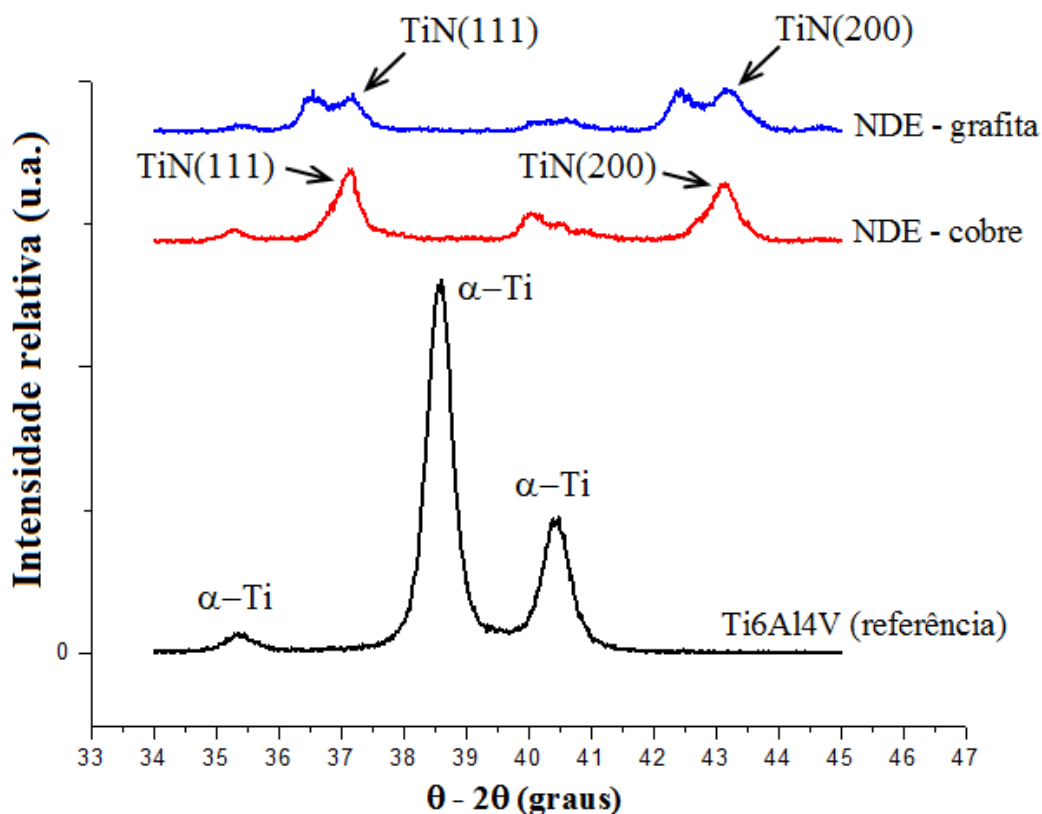


Figura 8. Difratograma da superfície das amostras nitretadas com eletrodos de cobre e grafita da liga Ti6Al4V.

Nota-se as fases de nitretos de titânio (TiN) na superfície da peça usinada por NDE, com ambos os tipos de eletrodos ferramenta. Utilizou-se como referências difratogramas característicos da liga de Ti6Al4V obtidos por Sha *et al.* (2009). Na figura (8) observa-se espectros de varredura correspondentes às fases de TiN(111) à 37° e TiN(200) à 43°.

4. CONCLUSÕES

Foi observada a formação de uma camada nitretada na superfície da amostra usinada por NDE com eletrodos ferramenta de cobre e grafita. A espessura da camada nitretada com eletrodo de cobre ficou em torno de 25 μm , já com eletrodo de grafita 75 μm , aproximadamente.

Ocorreu um ganho na dureza da camada nitretada com eletrodo de grafita de 90 %, aproximadamente, em relação à matriz.

Foi evidenciada a formação de nitretos de titânio na camada nitretada, por meio de difração de raio x, para ambos os tipos de eletrodo ferramenta.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CEFET MG pelo apoio para participação e apresentação do trabalho no Congresso.

6. REFERÊNCIAS

- Budinski, K. G., 1991, "Tribological properties of titanium alloys", Wear, Vol. 151, pp. 203-217.
- Camargo, B. C.; Arantes, L. J.; Raslan, A. A., 2006, "Estudo da viabilidade da nitretação de liga de titânio através do processo de usinagem por descargas elétricas", Uberlândia-MG. In: POSMEC, 16.
- Gul, O.; Sari, N. Y.; Sinmazcelik, T., 2014, "The effect of low temperature plasma nitriding on wear resistance of Ti6Al4V alloy", 3rd international congress AP Mas, Vol. 125.
- Raslan, A. A.; Santos, R. F.; Silva, E. R.; Fapemig, Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais; Ufu, Universidade Federal de Uberlândia (MG), 2012, "Método de Nitretação através da Usinagem com Descargas – NDE", BR 10 2012 030523-2.
- Raslan, A. A., 2015, "Implantação iônica em meio aquoso por EDM: resistência ao desgaste de aço AISI 4140", Salvador-BA, In: COBEF, 8.
- Santos, R. F., 2013, "Nitretação por EDM do aço AISI 4140", Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Sha, W.; Malinov, S., 2009, "Titanium alloys: modeling of microstructure, properties and applications", Ed. Woodhead Publishing Limited, Boca Raton, USA, 569 p.
- Yan, B. H.; Tsai, H. C.; Huang, F. Y., 2005, "The effect in EDM of a dielectric of a urea solution in water on modifying the surface of titanium", International Journal of Machine Tools & Manufacture, n.45, p. 194-200.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ELECTRICAL DISCHARGE FOR NITRIDING PROCESS IN THE ALLOY Ti6Al4V

Abstract. Density low, good tensile strength (comparable to many alloy steels) and excellent corrosion resistance, enable application of titanium and its alloys in the aerospace, marine, chemical and automotive and also in the medical field. However, they are seldom used as parts subject to sliding due to its low wear resistance. The nitriding treatment thermochemical can solve this restriction. In addition to increasing the wear resistance, the titanium nitride improves the biocompatibility of alloys. The goal of this work was nitriding by ion implantation Ti6Al4V alloy by Electrical Discharge for Nitriding process (EDN). A machine for Electrical Discharge Machining (EDM) by penetration was used in the process. The dielectric fluid used was an aqueous solution of deionized water and urea as a nitrogen source. Copper and graphite were used as materials of the tool electrodes. The nitride formation on the surface was evaluated by X-ray diffraction. To characterize the nitrated layer were carried out optical microscopy and Vickers microhardness measurement. The results of x-ray diffraction showed the formation of titanium nitride on the surface of the sample. Images metallographic cross section of the surface showed the formation of the nitrated layer having Vickers hardness value of approximately twice the hardness of the matrix.

Keywords: EDM, Electrical Discharge Nitriding, ion implantation, titanium nitrides, Ti6Al4V alloy.