

ESTUDO DA VIABILIDADE DA NITRETAÇÃO DE LIGA DE TITÂNIO ATRAVÉS DO PROCESSO DE USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS

Bruno Costa Camargo - b.c.camargo@gmail.com

Luciano José Arantes - ljarantes@mecanica.ufu.br

Alberto Arnaldo Raslan - ltm-raslan@ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Mecânica - Av. João Naves de Ávila, 2160 - Campus Santa Mônica - Bloco 1M - Uberlândia - MG - 38400-902.

Resumo: As ligas de Titânio são utilizadas nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, biomédica e outros ambientes agressivos. Suas principais características são altas resistências específica, à corrosão e à fadiga, biocompatibilidade e boas propriedades criogênicas. Entretanto, possuem uma baixa resistência ao desgaste adesivo e abrasivo, além de um alto coeficiente de atrito. Neste trabalho será abordada a nitretação de uma liga de Ti6Al4V. Os ensaios consistiram em mergulhar uma amostra de titânio aeronáutico em um fluido composto por 10% de uréia e 90% de água deionizada, e então submetê-las a descargas elétricas através de EDM. Os parâmetros operacionais da máquina foram selecionados com base em informações da literatura técnica existente. As técnicas de caracterização utilizadas foram: análise micrográfica, microdureza Vickers e EDS. Os resultados obtidos mostraram a formação de uma camada nitretada, que permitiu um ganho de cerca de 60% de dureza em relação à matriz. Pode-se concluir que o processo de nitretação empregado foi eficaz no endurecimento superficial de uma liga de Ti6Al4V.

Palavras-chave: Nitretação, Titânio, Microdureza, EDM.

1. INTRODUÇÃO

A técnica de nitretar superfícies através de descargas elétricas torna-se, portanto, uma alternativa atraente, tanto sob o ponto de vista técnico quanto econômico. Neste contexto é que se propõe esta investigação, ou seja, a viabilidade de nitretar superfícies através de descargas elétricas geradas por máquinas de usinagem por eletroerosão.

O princípio fundamental do processo EDM (Usinagem por Descargas Elétricas) é a remoção do material pelo efeito térmico de descargas elétricas. Ao aplicar-se, através de uma fonte de potência, uma diferença de potencial entre duas placas condutoras de eletricidade, chamadas de eletrodo e peça, respectivamente, separadas por uma pequena distância ocorre descargas elétricas entre elas. Estas descargas precisam ser pulsadas, pois se fossem contínuas gerariam altas temperaturas na superfície da peça e esta se fundiria e evaporaria de forma desordenada. As descargas duram apenas alguns milionésimos de segundo, e este período é chamado de T_{on} . Cessada as descargas elétricas, inicia-se, por alguns milionésimos de segundo, o período T_{off} . As faíscas geradas podem gerar temperaturas de até 20.000°C, e a potência por unidade de área pode chegar até 1000 W/m². A ferramenta e a peça precisam ser distanciadas por uma pequena distância, chamada de GAP, pois se

estas se encostarem, provocam um curto-circuito, e conseqüentemente não haverá a liberação das descargas elétricas.

No momento das descargas elétricas, o fluido que se encontra entre a peça e a ferramenta vai superaquecer-se, tornando-se um vapor eletrolítico. No meio gasoso a pressão poderá alcançar as marcas de até 200 atm (McGeough, 1988). Após uma descarga, ocorre a formação de uma cratera e uma certa quantidade de material fundido deposita-se na superfície da cratera, devido à tensão superficial e efeitos de resfriamento. Esse material vai resfriar-se devido às paredes frias da cratera e ao poder de refrigeração do fluido dielétrico. Essa camada tende a ser bem carbonetada e é chamada de material refundido ou ainda “camada branca”. Abaixo dela, fica a chamada “zona afetada pelo calor” (ZAC), que é apenas parcialmente afetada pelas altas temperaturas. As durezas da camada refundida e da ZAC, imediatamente abaixo, dependem da corrente e da frequência usadas durante a usinagem, além da capacidade de condução de calor do próprio material. A camada refundida pode afetar a estrutura e/ou a integridade da superfície usinada por EDM (Miller e Guha, 1999). Após a formação do gás, o fluido a uma temperatura baixa se encontrará com a parte gasosa e ocorrerá um choque térmico, que proporcionará micro-explosões e a desagregação das partículas fundidas da peça. Este é o ponto de início do processo de usinagem propriamente dito (Kaminski e Capuano, 1999).

Um processo EDM é tão melhor quanto maiores forem a TRM (Taxa de Remoção de Material) e a RD (Relação de Desgaste) e quanto menores forem os valores da rugosidade. Entretanto, estes parâmetros de avaliação são influenciados por algumas variáveis do processo, apresentados a seguir:

- Material da ferramenta: há uma extensa lista de materiais empregados para ferramentas de EDM, porém os mais usados são cobre e o grafite. As principais características de cada um desses materiais são:
- Regime de operação: o que caracteriza o regime de corte é a potência elétrica $P = VI$ (voltagem×corrente) e a duração do pulso elétrico, como ilustra a Figura 5. No caso, ilustram-se três situações com dois níveis de potência (P_1 e P_2) e dois níveis de duração do pulso (Δt_1 e Δt_2). Para P_1 e Δt_1 tem-se pequena TRM. Para P_1 e Δt_2 tem-se maior TRM que na situação anterior. Se a energia do pulso (dada pela integral $E = \int P dt$) for a mesma (o que ocorreria, por exemplo, se $E_2 = P_1 \cdot \Delta t_2$ fosse igual a $E_3 = P_2 \cdot \Delta t_1$), a TRM também se mantém. Ou seja, a energia é a área abaixo da curva VI .

Este trabalho tem como objetivo verificar a viabilidade do enriquecimento superficial de titânio aeronáutico (Ti6Al4V), com a utilização de uma combinação de uréia e água deionizada como fluido dielétrico. Ao sofrer o superaquecimento devido à fagulha liberada pela ferramenta, a uréia torna-se gasosa, e com isto libera nitrogênio no meio. Este nitrogênio irá combinar-se com o titânio existente na peça, e com isto ocorrerá a formação de nitretos na superfície da peça. Esta camada nitretada formada será responsável pelo aumento da dureza e do aumento à resistência ao desgaste do material.

2. METODOLOGIA

Primeiramente foram confeccionadas as amostras de titânio aeronáutico (Ti6Al4V), na Oficina Mecânica da FEMEC/UFU. E como ferramenta de usinagem via EDM foi utilizado um eletrodo cilíndrico de cobre com diâmetro de 8 mm.

Após a obtenção das amostras, estas foram usinadas em uma máquina Engemac 440 NC de usinagem por eletroerosão (EDM) por penetração do LTM (Laboratório de Tribologia e Materiais). A representação esquemática do processo utilizado por esta máquina está representada na Figura 1. Nota-se que o eletrodo é colocado próximo à peça a ser usinada, sendo separada por uma distância muito pequena, cujos valores típicos encontram-se na faixa de 0,01–0,05 mm (Benedict, 1987). A distância entre a ferramenta e peça é preenchida pelo fluido dielétrico, bombeado e filtrado de um

reservatório até a região de usinagem. O fluido dielétrico tem um papel importante no processo EDM: refrigerar a região de usinagem, conduzir as partículas removidas e controlar a potência de abertura da descarga (Fuller, 1989).

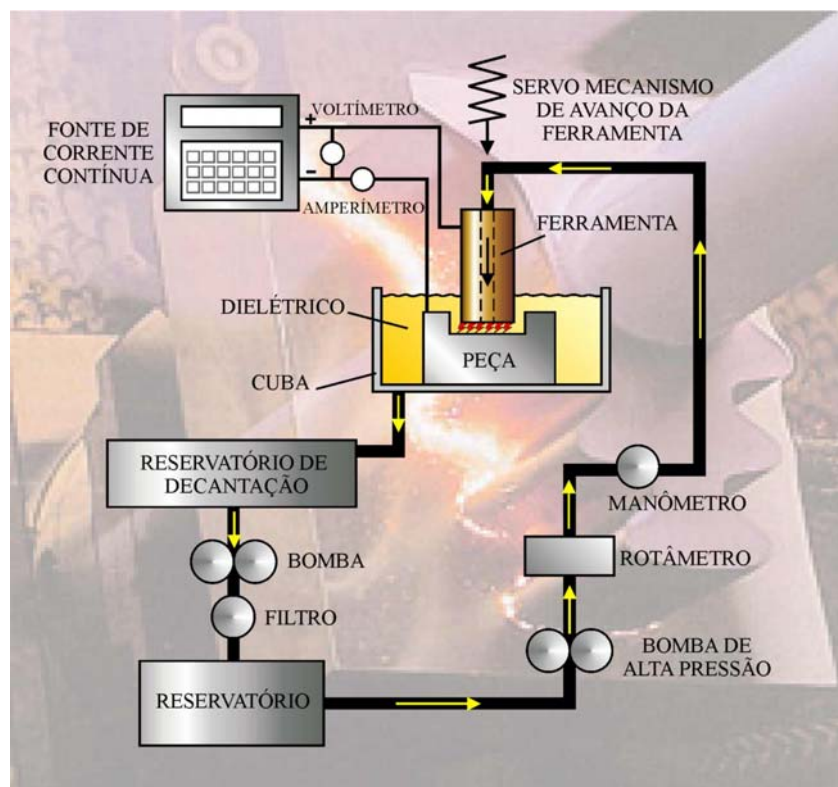


Figura 1: Representação esquemática do equipamento EDM.

Foram utilizados dois fluidos diferentes na usinagem para se obter uma comparação. O primeiro fluido consistiu de cristais de uréia diluída em água, foram diluídos 50g de uréia em 5l de água. E o segundo fluido foi composto de 5l de água deionizada pura.

A definição dos parâmetros de usinagem mais adequados à produção de superfícies nitretadas foi feita a partir de indicações da literatura (Yan et al., 2005) e estão especificados na Tabela 1, onde: i = corrente elétrica; V = diferença de potencial; $Z_{máx}$ = máxima profundidade de penetração; T_s = potência da descarga. Os parâmetros operacionais da máquina foram selecionados com base em informações da literatura (Yan et al., 2005).

Tabela 1: Parâmetros de usinagem utilizados nos ensaios.

T_{on}	20
DT	55%
T_s	3
Tempo de erosão	10
Afastamento	1
Intervalo	0
$Z_{máx}$	0,05 (500 μm)
GAP	2
I_i	6 ± 1 A
V	22 ± 2 V

Após submissão das amostras de titânio a descargas elétricas, elas sofreram preparação metalográfica convencional que permitiu a observação da superfície afetada pela descarga.

Para avaliar o endurecimento decorrente da nitretação, mediu-se a microdureza Vickers da camada branca, da camada nitretada, e da matriz utilizando-se uma carga de 10 g em um microdurômetro Shimadzu. As medidas foram feitas tanto na amostra usinada com uréia, quanto na amostra usinada com água. A espessura da camada branca também foi medida através do Microdurômetro Shimadzu.

Para se analisar a formação de nitretos sobre a camada endurecida foi-se feita uma análise de EDS (Espectroscopia por Difração de Energia) usando-se o MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) Através deste procedimento foi possível detectar os principais elementos químicos que se encontravam na amostra.

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após a confecção das amostras de titânio aeronáutico (Ti6Al4V) na oficina da UFU, estas foram usinadas por EDM utilizando-se dois fluídos diferentes, água deionizada pura e água deionizada com adição de uréia.

A Tabela 2 apresenta os resultados de microdureza e espessura da camada branca para as amostras usinadas com água deionizada. A Tabela 3 apresenta os resultados de microdureza da camada branca, camada nitretada e matriz, além de apresentar também os resultados de espessura de camada, para as amostras usinadas com uréia. Observa-se que houve aumento significativo do valor de microdureza na camada nitretada, com diminuição do valor de microdureza na camada branca, em relação ao material da matriz. A camada nitretada foi da ordem de 7 μm , consideravelmente menor que a espessura da camada branca (54 μm). Observou-se que a camada branca gerada com a uréia tem dureza inferior àquela gerada pela água deionizada pura. Porém, a espessura da camada branca das amostras usinadas com água foi bem inferior àquelas usinadas pela uréia.

Tabela 2: Valores de Microdureza Hv (Carga de 10g) e Espessura de Camada Branca nas amostras usinadas com água deionizada.

	Microdureza Hv		Espessura de Camadas [μm]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Camada branca	186	18	9	1
Matriz	342	22	-	-

Tabela 3: Valores de Microdureza Hv (Carga de 10g) e Espessura de Camadas nas amostras usinadas com uréia.

	Microdureza Hv		Espessura de Camadas [μm]	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Camada branca	156	24	54	15
Camada Nitretada	546	20	7	1
Matriz	342	22	-	-

A Figura 2 mostra as duas regiões distintas na amostra usinada com água. A Figura 3 mostra as três regiões distintas na amostra usinada com uréia.

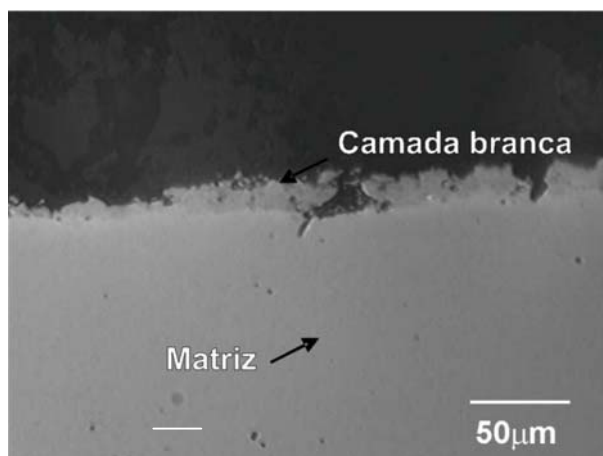


Figura 2: Regiões da amostra usinada com água deionizada.

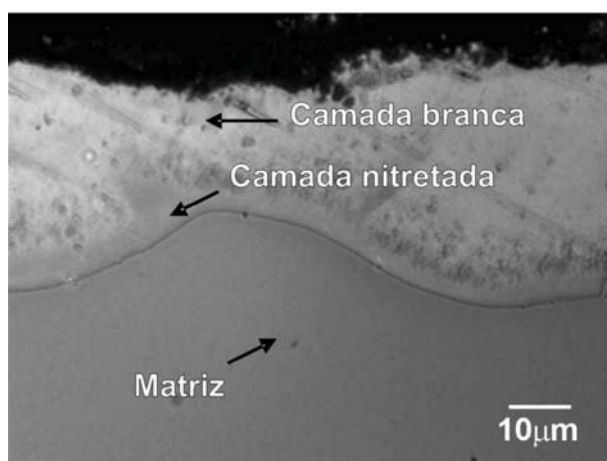


Figura 3: Regiões da amostra usinada com água deionizada e uréia.

A análise de EDS foi feita no MEV para a amostra usinada com uréia, e foi medida em 2 diferentes áreas para que se possa obter uma comparação. A área 1 corresponde à área não nitretada, e a área 2 corresponde à área nitretada, estas áreas estão mostradas na Figura 4. A mesma figura mostra o gráfico dos principais componentes químicos encontrados na área 1.

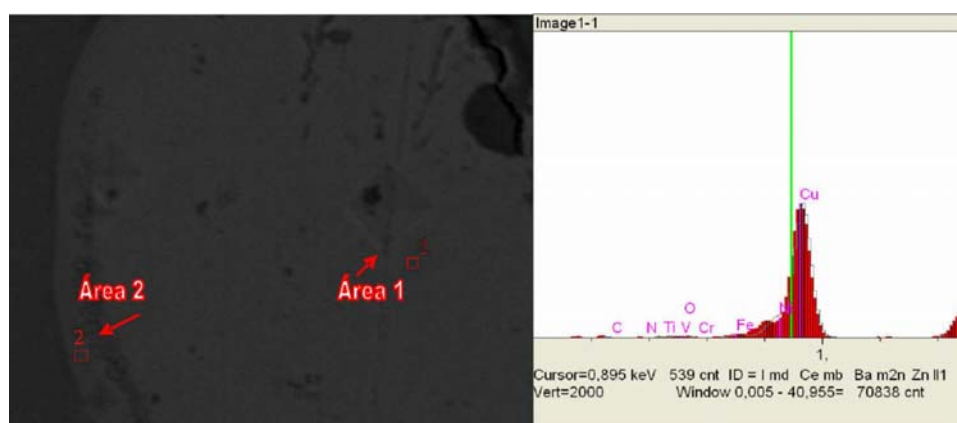


Figura 4: Áreas selecionadas para a análise por EDS.

A Figura 5 mostra uma foto da amostra usinada com uréia, com as respectivas impressões de microdureza nas 3 diferentes regiões: camada branca, camada nitretada e matriz.

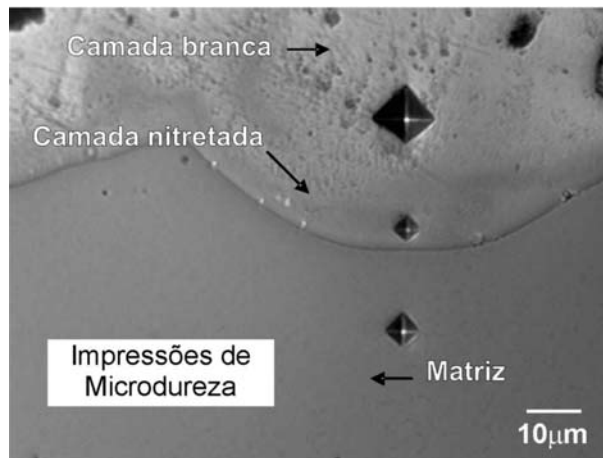


Figura 5: Amostra usinada com uréia. Impressões de dureza HV - 10g.

A liga Ti6Al4V foi selecionada na condução do trabalho pelo alto potencial formador de nitretos dos seus elementos constituintes. A água deionizada foi escolhida como eletrólito pela necessidade de se diluir uréia, utilizada como fonte fornecedora de Nitrogênio.

O material do eletrodo não foi considerado relevante no processo. Desta forma, optou-se por trabalhar com um eletrodo tradicional de Cobre eletrolítico. A geometria cilíndrica maciça foi adotada pela facilidade de fabricação do eletrodo e obtenção de uma superfície mais extensa para análise. Julgou-se desnecessário utilizar um eletrodo vazado, uma vez que as condições adotadas na implementação do processo não requerem lavagem da área submetida à descarga. A profundidade é demasiado pequena (500 µm). As dimensões foram adequadas ao tamanho das amostras da liga de Titânio.

A quantidade de 10g/l foi escolhida com base em informação da literatura (Yan et al., 2005). Foi usado um volume de 5l de água deionizada no reservatório. A utilização de um pequeno volume de eletrólito foi possível graças à adaptação de uma cuba auxiliar ao reservatório principal, que requer a utilização de um grande volume de fluido dielétrico (cerca de 450l). O risco de aquecimento pelo pequeno volume de fluido empregado e conseqüente interferência nos resultados foi considerado desprezível, já que as descargas foram típicas de acabamento fino, ou seja, de baixa energia. Além disso, o volume de material removido foi muito pequeno, correspondente a uma profundidade de apenas 500 µm.

Os processos de preparação metalográfica empregados permitiram a caracterização das amostras em termos de microdureza, identificação e medidas de espessura de camadas produzidas pelo processo. Os ensaios foram conduzidos em duas amostras, sendo uma usada como referencia, ou seja, sem a diluição de uréia na água.

Como as camadas produzidas são, em geral, muito finas, torna-se necessário o uso de microdurômetro para avaliar a dureza das camadas.

A microscopia ótica mostrou-se uma técnica adequada na determinação da espessura das camadas produzidas.

A técnica de caracterização por EDS foi empregada para detectar a presença de Nitrogênio no material.

Os resultados obtidos para as microestruturas evidenciam a presença de uma camada branca e matriz na amostra usinada com água sem a presença de uréia e de uma camada intermediária entre ambas para amostra usinada com água e uréia diluída. A camada branca surge em decorrência de um refusão de material na superfície pelas altas temperaturas geradas com as descargas elétricas. A

presença da camada intermediária pode ser atribuída à incorporação de Nitrogênio liberado pela uréia.

Os resultados de dureza mostram um acréscimo substancial, cerca de 60%, de dureza nesta camada intermediária, evidenciando a formação de nitretos. Observação semelhante foi feita por Yan et al. (2005), também em liga de Titânio aeronáutico. Entretanto, o ganho em dureza obtido foi bastante inferior ao obtido neste trabalho, sendo da ordem de 15%. A explicação para esta discrepância esta relacionada a diferenças nos parâmetros operacionais empregados. Yan et al. (2005) identificaram os nitretos como sendo de Titânio (TiN).

Os parâmetros operacionais empregados por Yan et al. (2005) permitiram, como vantagem, a obtenção de camadas nitretadas mais espessas dos que as obtidas no presente trabalho.

A dureza mais elevada encontrada no presente trabalho pode estar relacionada com a menor espessura da camada. Com a camada mais fina, há uma maior concentração de nitretos e, portanto, um maior endurecimento.

A análise de composição química realizada por EDS mostrou a presença de Nitrogênio na camada endurecida, evidenciando a formação de nitretos.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- ◆ Ocorreu a formação de camada nitretada na superfície da lita de titânio;
- ◆ Houve um aumento de cerca de 60% na microdureza da camada nitretada em relação à matriz.
- ◆ A camada branca gerada com a uréia tem dureza inferior àquela gerada pela água deionizada pura.
- ◆ O processo de nitretação de ligas de titânio por EDM é tecnologicamente viável.

5. REFERÊNCIAS

- Benedict, G. F.; 1987 *Nontraditional Manufacturing Processes*, New York, Marcel Dekker, pp.207-246.
- Fuller, J. E. 1989. "Electrical Discharge Machining", *Metals Handbook*, 9ª Ed. Vol. 16, machining, p. 557-564.
- Kaminski, P. C.; Capuano, M. N., 1999. *Revista OESP Metal-Mecânica*, Ano 4, n.º 25, OESP Mídia, São Paulo, pp. 42-47.
- McGeough, J. A.; 1988. "Advanced Methods of Machining", London, Chapman and Hall, pp.128-152.
- Miller, P.; Guha, A., 1999. "Guia dos Fabricantes de Ferramentas de Corte", São Paulo, *Revista Máquinas & Metais*, Aranda Editora – Ano XXXV, Junho, nº401, pp. 40-51.
- Yan, B.H., Tsai, H.C. and Huang, F.Y. 2005. "The Effect in EDM of a Dielectric of a Urea Solutions in Water on Modifying the Surface of Titanium". *International Journal of Machining Tools and Manufacture*, 45 (2005) 194-200.

STUDY OF VIABILITY OF TITANIUM ALLOYS NITRIDING USING THE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING PROCESS

Abstract: *Titanium alloys are largely used in applications involving aggressive environments, such as the aerospace and biomedical industries. They present high specific strength, corrosion resistance and fatigue resistance, biocompatibility and good cryogenic properties. However, they present a high friction and a low abrasive and sliding wear resistance. This work investigates the nitriding of a Ti6Al4V alloy. In the tests, aeronautical titanium samples were subjected to electrical discharges using EDM immersed in a fluid containing 10% of urea and 90% of deionized water. The choice of the machining parameters was based in the recommendations in the literature. Optical microscopy, Vickers micro hardness and EDS were used to characterize the sample after the tests. The results showed the presence of a nitrided layer, which led to an increase of 60% in hardness. It was concluded that the nitriding was efficient to promote surface hardening of a Ti6Al4V alloy.*

Keywords: *nitriding, titanium, micro hardness, EDM.*