



Associação Brasileira de Soldagem

XXIX CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem
De 10 a 12 de novembro de 2003 São Paulo - SP

CORTE DE TITÂNIO POR LASER PULSADO DE NEODÍMIO:YAG

⁽¹⁾ Ivan Alves de Almeida

⁽¹⁾ Wagner de Rossi

⁽²⁾ Milton S. F. Lima

⁽¹⁾ José Roberto Berretta

⁽³⁾ Spero Penha Morato

RESUMO

No presente trabalho estudou-se a influência dos parâmetros de usinagem laser sobre as características microestruturais do titânio. As principais variáveis do processo foram a largura temporal do pulso laser, a energia, a velocidade do corte e a utilização do nitrogênio. Os materiais empregados no processo foram chapas de titânio comercialmente puro (grau 2) e a liga $TiAl_6V_4$ (grau 5) com espessuras de um milímetro. Através de microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV) foram analisadas as características metalúrgicas, enfatizando-se a região próxima à aresta de corte, ou seja, a zona afetada pelo calor (ZAC). As mudanças microestruturais observadas na zona de re-solidificação mostraram a formação de precipitados de nitretos. Estes resultados são confirmados por difração de raios-X. Verificou-se também um aumento da dureza superficial na aresta de corte, quando comparado com o material base, segundo os ensaios de microdureza Vickers.

Palavras-chaves: usinagem laser; laser Nd:YAG; titânio

ABSTRACT

In the present work it was studied the influence of the laser machining parameters on the microstructural characteristics of titanium. The main process variables were: the pulse width, the energy, the cutting speed and the nitrogen flux. One millimeter thick commercially pure titanium (degree 2) and $TiAl_6V_4$ alloys (degree 5) were employed in this study. The metallurgical characteristics were analyzed by optical and scanning electronic microscopy (SEM). In particular, it was analysed the region next to the cutting edge, i.e. the heating affected zone (HAZ). Surface modifications of titanium alloys were also observed in the resolidified zone by X-ray diffraction, showing the formation of nitrated layers. An increase in the surface hardness of the cut edge was also verified, when compared to the substrate, as can be seen in Vickers microhardness testing.

Key words: laser machining, laser Nd:YAG; titanium

(1) Pesquisadores do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Centro de Lasers e Aplicações, (IPEN/CLA) - Travessa R, 400 – Butantã - 05508 900 São Paulo/SP.

(2) Pesquisador do Instituto de Estudos Avançados, Centro Técnico Aeroespacial (CTA), C.P. 6044 - 12231-970 São José dos Campos/SP.

(3) Pesquisador e diretor da Lasertools Tecnologia Ltda, Rua Yosoji Yamaguti, 46- 05379-130 São Paulo/SP.

IPEN/DOC

09955



Associação Brasileira de Soldagem
1-INTRODUÇÃO

As tendências atuais da manufatura têm apontado para uma melhoria contínua de processos e produtos. Alta qualidade e baixo custo operacional são objetivos de qualquer empresa que procure sobreviver no atual cenário globalizado. Estes fatores têm levado a mais e mais empresas se interessarem pelo processamento laser¹.

Atualmente o laser, após quatro décadas de seu descobrimento, é causa de uma profunda revolução no setor de manufatura. Sua versatilidade, o torna uma alternativa atraente para diversos problemas de difícil solução, apresentando ainda qualidade, custos e produtividade bastante compensadores².

Nos diversos setores sua aplicação abrange praticamente a usinagem de quaisquer tipos de material (metais, cerâmicos, plásticos, entre outros) e em várias geometrias. Assim, o problema se resume na escolha adequada do tipo de laser, que determina o comprimento de onda, e o regime de operação, seja contínuo ou pulsado. A partir desta escolha, um refinamento deve ser feito para a otimização de um processo específico, envolvendo o nível de potência (ou energia), a largura temporal do pulso, a taxa de repetição, a forma espacial do feixe, o tipo e pressão do gás de assistência, e muitos outros parâmetros, que dependem do material, qualidade do resultado final, custo, velocidade de processo, entre outros^{3,4}.

As principais aplicações industriais⁵ com laser são corte, furação, solda, tratamento térmico, marcação e "alloying" (processo de obtenção de liga por fundição).

As vantagens do uso de um feixe de luz para o processamento de materiais são inúmeras: possibilidade de uso de atmosfera controlada, processo sem contato e sem desgaste de ferramenta, alta densidade e controle de energia, flexibilidade no caminho do feixe, inexistência da influência de campo eletromagnético, simplicidade de fixação, aterramento da peça não necessário, possibilidade de micro-usinagem, zona afetada pelo calor muito pequena, alta velocidade de processo, excelente qualidade da borda, baixa distorção, baixo ruído e fácil automação.

A principal desvantagem é o alto custo do investimento inicial, mas que pode ser compensada pela qualidade do produto, pela automação e pela baixa intervenção do operador.

Uma importante aplicação do processo de usinagem a laser é a fabricação de componentes a partir de ligas de titânio^{6,7,8} e de titânio comercialmente puro. As características metalúrgicas e mecânicas destes materiais, ao mesmo tempo em que os tornam muito importantes em diversas aplicações, também oferece dificuldades para a sua usinagem. Um material relativamente recente de aplicação na engenharia, o titânio apresenta densidade razoavelmente baixa ($4,5 \text{ g.cm}^{-3}$), médio módulo de elasticidade (105 GPa) e suas ligas atingem valores de limite de resistência à tração de 1350 MPa.

O sistema da ASTM (American Society of Testing and Materials) e da SAE/AMS (Society of Automotive Engineers / Aerospace Material Specifications) classifica metalurgicamente o titânio^{9,10} da seguinte maneira: titânio puro¹¹ comercial de diferentes graus (também denominado como "não-ligados"); ligas alfa; ligas alfa-beta e ligas beta, esta designação é referente à predominância das fases presentes na microestrutura. O metal apresenta estrutura cristalina hexagonal, chamada de alfa, à condição de temperatura ambiente, mas sua estrutura se modifica para CCC (cúbica de corpo centrado), ou seja beta, à temperatura de 890 °C. As propriedades metalúrgicas e mecânicas estão relacionadas diretamente à formação da microestrutura. Ao comparar as ligas de titânio nota-se que as ligas de fase única têm boa soldabilidade e as de duas fases (alfa-beta) são mais resistentes à tração (devido a microestrutura duplex). A maior desvantagem é sua reatividade química com outros elementos, além de possuir uma afinidade elevada com gases, tais como: hidrogênio, oxigênio e nitrogênio. Essa limitação implica no enfraquecimento e

perda de resistência, mas atualmente existem técnicas específicas para reduzir a absorção desses gases como também a adição de elementos, a exemplo do alumínio na correção das propriedades de diferentes ligas de titânio.

Uma das principais características do titânio é sua elevada resistência à corrosão em temperatura ambiente, o que o torna praticamente inerte ao ar, a ambientes salinos e a diversos ambientes agressivos, como sulfetos e cloretos. A sua dureza e resistência ao desgaste são outras características úteis para certos tipos de componentes, entretanto estas também oferecem grandes dificuldades aos métodos convencionais, como alto desgaste de ferramenta, tempo de usinagem e custos operacionais. Por esse motivo há um grande interesse no desenvolvimento da usinagem a laser do titânio e suas ligas como processo alternativo, principalmente para a confecção de componentes da área aeroespacial e biomédica. Na área médica e ortodôntica a sua principal aplicação é na confecção de implantes internos ao organismo humano, onde além das propriedades anteriormente citadas, este material apresenta excelente biocompatibilidade¹².

Por ser relativamente nova esta combinação do laser com este material, são ainda necessários estudos mais aprofundados sobre as suas interações. O conhecimento das novas propriedades mecânicas surgidas na zona afetada pelo calor (ZAC) e dos novos compostos gerados com a re-solidificação na superfície usinada são de grande interesse do nosso grupo. Este estudo, portanto, ajudará a mostrar as condições de usinagem do material preservando suas principais características, como exemplo, podemos citar a fragilização das superfícies usinadas. Contudo, essa avaliação não será completa sem obedecer a outros critérios, tais como: a qualidade de acabamento superficial relativo à rugosidade, formação de rebarbas, largura de corte e perpendicularidade.

O objetivo do presente estudo é determinar os efeitos da usinagem laser sobre a qualidade e formação de fases na aresta de corte.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O equipamento empregado para cortar as chapas de titânio de 1 mm de espessura foi um laser de Nd:YAG, acoplado a uma fresadora CNC. Escolheu-se dois tipos diferentes de material: titânio comercialmente puro (grau 2) e a liga Ti₆Al₄V (grau 5). Os cortes seguiram uma geometria retangular de 10 x 20 mm² ou 50 x 100 mm², num total de cinco amostras de cada tipo. Obedecendo a critérios de qualidade no acabamento superficial, tais como rugosidade, formação de rebarbas, largura de corte e perpendicularidade, selecionou-se a melhor condição relativa aos parâmetros do laser na realização do processo de usinagem.

Nitrogênio industrial foi utilizado como gás de processo¹³, a uma pressão de 120 psi no bico de saída do feixe laser. Este bico¹⁴ de diâmetro igual a 0,7 mm foi posicionado a 0,6 mm acima da peça de trabalho. A lente de focalização utilizada apresentava distância focal de 100 mm e o foco foi posicionado a 0,5 mm abaixo da superfície do metal. Com estes parâmetros obteve-se uma velocidade de corte de 200 mm/min com uma largura de corte ("kerf") de 0,2 mm.

Através de ensaios de microdureza Vickers, análise por difração de raios-X, microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV), analisou-se as características metalúrgicas das superfícies de corte, enfatizando a região próxima à aresta de corte, ou seja, a zona afetada pelo calor (ZAC).

Para análise por microscopia óptica e por microscopia eletrônica de varredura as amostras foram polidas com pasta de diamante de 6, 3 e 1 μm; em seguida foi realizado um ataque químico com solução 3 ml de HF + 6 ml de HNO₃ em 100 ml de água destilada. Após 30 segundos de imersão nesta solução, as amostras foram



Associação Brasileira de Soldagem

lavadas com água e secas com jato de N_2 . A limpeza final foi efetuada em ultra-som com acetona.

A difração de raios-X foi realizada no centro da superfície de corte, por um difratômetro de raios-X Philips MPD 1880, com a utilização de um tubo de Cu ($\lambda=1.54\text{\AA}$).

Obteve-se um conjunto de medidas de microdureza Vickers na superfície de corte e no material laminado (distante das arestas de corte). Objetivou-se realizar o ensaio sobre a superfície de corte em três posições diferentes: próximo à de entrada do laser; no centro da peça (a 0,5 mm de profundidade) e próximo à saída do feixe por meio de um equipamento Wolpert / Werke, tipo M-testor com carga de 200 g.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um volume muito grande de parâmetros de processo foram considerados relevantes ao corte a laser. No entanto, alguns parâmetros parecem influenciar decisivamente a qualidade do kerf. Estes parâmetros são: largura temporal do pulso laser: 0,6 ms; taxa de repetição: 97 Hz; energia por pulso: 770 mJ; potência média: 74,7 W; modo espacial: multimodo.

Um fator relevante ao desenvolvimento inicial do estudo foi a escolha do material referente à sua espessura. O critério de seleção dos parâmetros está diretamente relacionado à espessura, de modo que materiais mais espessos necessitam de maior energia para ocorrer a interação entre feixe laser e superfície do metal.

Predominantemente o mercado industrial é abastecido por lasers contínuos de CO_2 , caracterizados pela formação de ondulações nas arestas de corte, evidenciando uma superfície rugosa, com cantos arredondados e indefinidos. No caso do laser pulsado de Nd:YAG a intensidade chega a dezenas de $MW.cm^{-2}$, consideravelmente superior aos lasers contínuos de CO_2 . Desta maneira no laser pulsado o material líquido formado na região de corte é mais facilmente expelido, proporcionando uma melhor definição no contorno e melhor acabamento.

A qualidade do corte é função de um conjunto de parâmetros, inclusive do gás de assistência. Conforme mencionado, o titânio apresenta alta reatividade química com alguns gases, inclusive restringindo o emprego do oxigênio no processamento devido ao seu efeito pirofórico.

A aresta da peça cortada com auxílio de nitrogênio foi observada no microscópio eletrônico de varredura, conforme mostrado na figura 1. Verifica-se a presença de líquido colado às paredes. Analisando-se a aresta de corte com maior detalhe, figura 2, verifica-se a presença de precipitados.

Segundo os resultados de difração de raios-X, a utilização de nitrogênio na usinagem propiciou a formação de precipitados de nitretos sob uma fina camada da zona de resolidificação. Estes nitretos foram formados devido à interação do metal líquido superaquecido com o fluxo de gás que impele a peça para liberar o canal de corte.

Verificou-se um aumento da dureza na superfície de corte, quando comparado com o material base, segundo os ensaios de microdureza Vickers. Aplicando uma carga de 200 g na região laminada do titânio comercialmente puro (Grau 2) obteve-se o valor de 164 HV e na superfície resolidificada um valor médio de 290 HV. Para a liga $TiAl_6V_4$ (Grau5) os valores obtidos foram: 900 HV para superfície resolidificada e 300 HV para área laminada.

Ainda não é possível determinar qual o efeito do endurecimento local sobre as propriedades de desgaste das peças. Estão previstos ensaios em serviço e de desgaste abrasivo objetivando-se analisar a melhoria ou degradação das propriedades induzidas por corte a laser sob atmosfera de nitrogênio.



Associação Brasileira de Soldagem

4. CONCLUSÕES

Verificou-se a presença de um filme de nitreto de titânio na superfície de corte das placas de titânio, grau 2 e grau 5, após o processamento laser. As propriedades da zona de corte estão sendo analisadas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento da pesquisa pela Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e o apoio recebido da empresa LaserTools.

6. REFERÊNCIAS

- 1 V. A. Katulin, "Laser Technology In Industry"; Hyperfine Interactions vol. 37, 423-432 (1987).
- 2 J. Unlauenbusch, U. Bielesch, S. Klein, M. Napp, J. H. Schafer, "Recent developments in metal processing with pulsed technology". Applied Surface Science, vol 106, pg 228 - 234 (oct. 1996).
- 3 B. L. M. Miyamoto, "Laser Materials Processing. Proceedings of ICALEO 1993", vol. 2306, Ed. P. Denney, L.
- 4 H. Rohde, "Sharp cutting and drilling with pulsed solid state lasers". VDI-Tantung'96, Stuttgart, Deutschland, pg. 1-10 (1996).
- 5 N. U. Wetter, W. Rossi, "ICS Lectures on Industrial Applications of Lasers", Viena, Unido Publication – S. P. Morato – Editor, 2000, v 1.
- 6 Ra Bayles, Da Meyn, Fg Moore, "Laser Processing of Titanium - 6Al-4v", Jom-J Min Met Mat S 32: (12) 32-32 1980.
- 7 A. Kar, D. L. Carroll, W. P. Latham, et al. "Cutting performance of a chemical oxygen-iodine laser on aerospace and industrial materials", J. Laser Appl. 11: (3) 119-127 JUN 1999.
- 8 S. Djanarthany, J C Viala, J Bouix , "An overview of monolithic titanium aluminides based on Ti3Al and TiAl", Mater Chem Phys 72: (3) 301-319 DEC 1 2001.
- 9 M. Weller, A. Chatterjee, G. Hanezczok, et al. "Mechanical properties of intermetallic y-TiAl based alloys at elevated temperatures", Defect Diffus Forum 194-1: 589-594 2001.
- 10 F Prima, P Vermaut, I Thibon, et al. "A low cost metastable beta titanium alloy: Thermal treatments, microstructures and mechanical properties", J PHYS IV 11: (PR4) 241-248 SEP 2001.
- 11 AV Sergueeva, VV Stolyarov, RZ Valiev, et al., "Advanced mechanical properties of pure titanium with ultrafine grained structure", Scripta Mater 45: (7) 747-752 OCT 10 2001.
- 12 M Es-Souni , M Es-Souni, HF Brandies, "On the transformation behaviour, mechanical properties and biocompatibility of two NiTi-based shape memory alloys: NiTi42 and NiTi42Cu7", Biomaterials 22: (15) 2153-2161 AUG 2001.
- 13 MS Selamat, TN Baker, LM Watson , "Study of the surface layer formed by the laser processing of Ti-6Al-4V alloy in a dilute nitrogen environment", J Mater Process Tech 113: (1-3) 509-515 JUN 15 2001.
- 14 HC Man, J Duan, TM Yue, "Dynamic characteristics of gas jets from subsonic and supersonic nozzles for high pressure gas laser cutting", Opt Laser Technol 30: (8) 497-509 NOV 1998 .



Associação Brasileira de Soldagem

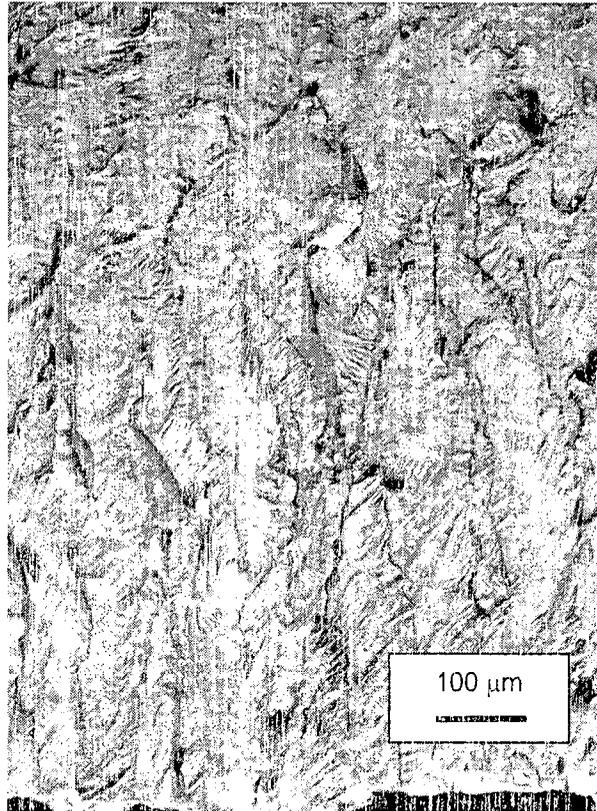


Figura 1 – Micrografia eletrônica de varredura da aresta de corte.



Figura 2 – Micrografia óptica da aresta de corte após ligeiro polimento e ataque, mostrando material base (Ti) e precipitados (claros).

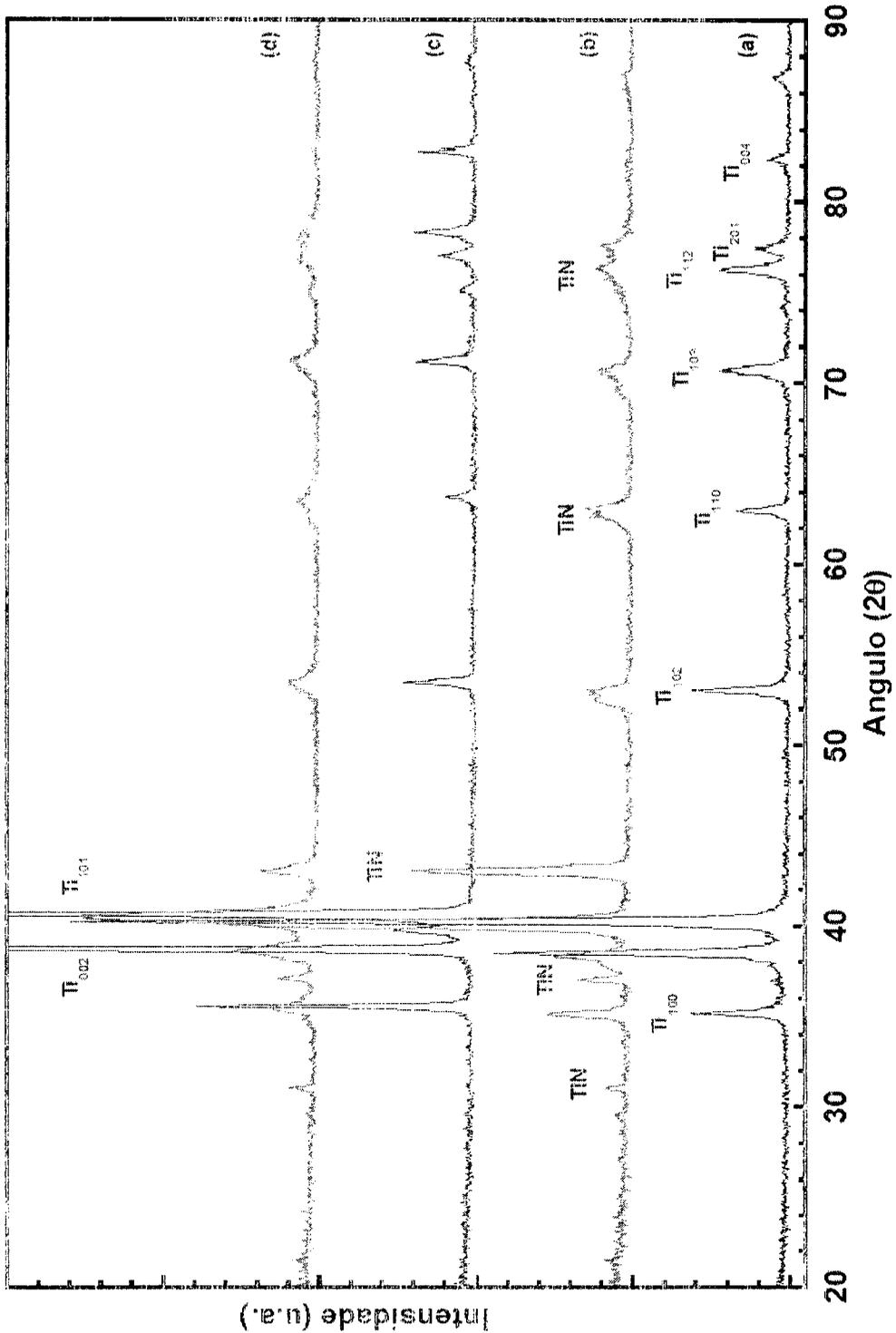


Figura 3 -- Difratomogramas de raios-X: (a) material base – titânio grau 2, (b) aresta de corte – titânio grau 2, (c) material base – titânio grau 5, (d) aresta de corte – titânio grau 5. Os picos do titânio, com seus respectivos índices de Miller, e do TiN estão marcados.