


# Caracterização microestrutural da camada de NiCrAlY sobre Ti-6Al-4V processado por laser de Yb:fibra

Renata Jesuina Takahashi <sup>1</sup> João Marcos Kruszynski de Assis <sup>2</sup> Rudimar Riva <sup>3</sup> Aline Capella de Oliveira <sup>3</sup> Danieli Aparecida Pereira Reis <sup>1\*</sup> 

## Resumo

O processamento de materiais com laser é uma alternativa para formação de camadas densas e livres de porosidades, como exige a aplicação da camada metálica em TBC (*Thermal Barrier Coating*). O TBC é um sistema de camadas de materiais que promove proteção térmica e contra oxidação e corrosão em ligas metálicas, como a liga de titânio (grau 5). Este trabalho tem por objetivo o estudo da microestrutura formada entre a camada metálica de NiCrAlY e a liga Ti-6Al-4V por processamento com laser de Yb:fibra. A camada metálica foi pré depositada na forma de pó e submetida ao laser, cujos parâmetros de velocidade de varredura do feixe variou em 25, 50 e 100 mm/s com potência de 200 W e feixe do laser focalizado com diâmetro de 0,50 mm com sobreposição de 50%, a cada trilha. A avaliação dos parâmetros de laser foi composta pela análise de microscopia eletrônica de varredura, análise de difração de raios X, análise de EDS do perfil transversal da amostra. Os resultados mostraram que houve aderência entre a camada de NiCrAlY e o substrato com baixa diluição química na interface. Com o aumento da velocidade de varredura do feixe de laser, camadas metálicas mais finas foram formadas.

**Palavras-chave:** Ti-6Al-4V; NiCrAlY; Laser de Yb:fibra.

## Microstructural characterization of NiCrAlY layer on Ti-6Al-4V processed by Yb-fiber laser

## Abstract

The processing of materials with laser is an alternative to form dense and porosity-free layers, as required by the metallic layer in the TBC application (*Thermal Barrier Coating*). TBC is a system of layers that promote protection against oxidation, corrosion and thermal protection of metal alloys, such as titanium alloy (grade 5). The aim of this work was to study the micrograph formed between the NiCrAlY metallic layer and the Ti-6Al-4V alloy by Yb-fiber laser processing. The metallic layer was pre-deposited in the powder form and submitted to the laser, whose beam scanning speed parameters were varied in 25, 50 and 100 mm/s with laser beam power of 200W with 50% of superposition for each track. The evaluation of the laser parameters was composed by scanning electron microscopy (SEM), x-ray diffraction (XRD) and energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS) in cross-sectioned of the sample. The results showed that there was adhesion between the NiCrAlY layer and the substrate with low chemical dilution at the interface. As the scanning speed of the laser beam increased, thinner metallic layers were formed.

**Keywords:** Ti-6Al-4V; NiCrAlY; Yb-Fiber Laser.

<sup>1</sup>Laboratório de Comportamento Mecânico de Metais, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo, UNIFESP, São José dos Campos, SP, Brasil.

<sup>2</sup>Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial, Instituto de Aeronáutica e Espaço, São José dos Campos, SP, Brasil.

<sup>3</sup>Laboratório de Processamento de Materiais com Laser, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo, UNIFESP, São José dos Campos, SP, Brasil.

\*Autor correspondente: [danieli.reis@unifesp.br](mailto:danieli.reis@unifesp.br)



## 1 Introdução

A liga Ti-6Al-4V é amplamente utilizada na indústria aeroespacial devido às suas excelentes propriedades como baixa densidade, resistências mecânica, à corrosão e à fluência elevadas [1]. No entanto, um dos principais fatores que limitam a vida em serviço das ligas de titânio é a sua degradação em ambientes que contêm oxigênio em temperaturas elevadas, o que provoca sua oxidação. Para suprir essa limitação, a liga Ti-6Al-4V é revestida com TBC (*Thermal Barrier Coating*), que promovem proteção térmica e química do material [2,3], como são fabricadas as palhetas de turbinas que são expostas a atmosferas agressivas em meios corrosivos, com combustão de gases quentes e elevadas temperaturas [4].

O revestimento TBC é constituído por quatro camadas: substrato metálico, uma camada metálica, uma camada de óxido termicamente crescido (TGO) e uma camada cerâmica. Cada camada tem uma função predominante ao sistema TBC, na qual a camada metálica promove a proteção contra a oxidação do substrato. Utiliza-se o MCrAlY, onde M pode ser Ni, Co, Fe ou uma combinação destes elementos [2].

A partir da camada metálica forma-se a camada termicamente crescida, TGO, após a exposição em ambientes com temperatura elevadas durante os ciclos térmicos em serviço [5], ou também podem ser crescidas por meio de tratamentos térmicos em processo de fabricação do TBC [6]. Esta camada é composta, principalmente, por óxidos de alumínio e ítrio, além de fases predominantes de Al(Ni,Cr) e Ni<sub>3</sub>(Al<sub>3</sub>Ti) [2,4,7], cuja função no sistema TBC é formar um filme fino de óxido capaz de promover a proteção contra oxidação da liga e melhorar a aderência com a camada cerâmica [4].

Contudo, a aderência e as delaminações dos recobrimentos no substrato durante os ciclos térmicos em longos períodos de tempo são uma das dificuldades encontradas na pesquisa deste sistema de proteção. Uma técnica estudada para melhor aderência de camadas é o *grit blasting*, principalmente entre as camadas BC e TC [8], onde a ocorrência de falhas e delaminações são mais frequentes [2,4]. Os processos mais usuais de fabricação TBC que visam a melhoria de aderência são a deposição física de vapores por feixe de elétrons (EB-PVD, *electron beam – physical vapour deposition*) [9,10], ou por aspersão térmica por plasma (APS, *air plasma spray*) [11].

Na tentativa de melhorar a aderência e eficácia da formação da camada, o processamento com laser tem sido uma posição de destaque na indústria da aviação, por englobar o conceito de indústria 4.0, relacionado à manufatura aditiva para fabricação de peças, como processamento ágil, dinâmico, assertivo e automatizado [12]. No caso de processamento a laser de revestimentos a partir de pó, o processo modifica apenas a área delimitada com o mínimo de zona termicamente afetada entre as camadas. Esta técnica pode ser uma alternativa de processamento para obter camadas totalmente densas com ligações metalúrgicas entre as camadas [13]. Esta ligação não

só contribui para melhorar a adesão entre as camadas de um sistema TBC, como também podem promover a formação de uma microestrutura livres de poros, que melhoram a resistência a oxidação [14-16].

O presente trabalho teve como objetivo o estudo da microestrutura da camada metálica de NiCrAlY formada com o processamento com laser de Yb:fibra. Primeiro, foram avaliados a evolução da superfície desde a liga de titânio, o pó de NiCrAlY sedimentado sobre o substrato e a camada formada após o processamento com laser. Segundo, foi investigado a relação entre os diferentes parâmetros de velocidade de varredura do feixe de laser com a formação da espessura e as fases formadas na camada de NiCrAlY e a interface formada com o substrato.

## 2 Materiais e métodos

A liga Ti-6Al-4V foi adquirida junto à empresa Realum na forma de chapas com espessura de 0,3 mm e o pó metálico, NiCrAlY, é da marca Praxair Surface Technologies com 57,35% Ni, 31,00% Cr, 11,00% Al, 0,65% Y em % peso.

A deposição por sedimentação do pó metálico foi realizada diretamente sobre a superfície da amostra da liga de titânio. A deposição foi feita a partir de uma suspensão do pó de NiCrAlY (massa de 25 gramas) em um volume de 500 mL de álcool etílico em agitação mecânica contínua. A suspensão foi vertida em um funil de Buchner com a amostra sob papel filtro. Após filtragem, a camada de NiCrAlY foi sedimentada na superfície da amostra e permaneceu em estufa analógica (Sterilifer, modelo SX1.2) para evaporação do álcool etílico contido na camada.

A consolidação da camada de NiCrAlY sobre a liga Ti-6Al-4V foi realizada com laser de Yb:fibra (IPG, YLR-2000), com potência de 200 W e sobreposição do feixe de laser em 50%, a cada trilha, com diâmetro de feixe na superfície da amostra de 0,50 mm. O parâmetro do laser estudado foi a velocidade de varredura do feixe em 25, 50 e 100 mm/s. Houve a utilização de argônio como gás de proteção durante o processo a fim de minimizar a oxidação do metal.

A caracterização do pó de NiCrAlY ocorreu pela análise de tamanho de partículas por difração de laser (Cilas, 1190) que permite análises com elevada precisão na faixa de 0,04 e 2500 µm. A distribuição granulométrica apresentada foi a média de cinco análises via úmida com água destilada com 10 gotas de dispersante de polimetacrilato de amônio.

A caracterização microestrutural ocorreu via microscopia óptica (Opton, TNM-07T-PL), microscopia eletrônica de varredura, MEV, (LEO, 435VPI e Tescan, VEGA 3 XMU) acoplada com espectroscopia por energia dispersiva, EDS, (Oxford Instrument, x-act) e o *software* AZTec. Para a análise por difratometria de raios X (DRX) foi utilizado o difratômetro de raios X (Rigaku, Ultima IV) com radiação Cu-K  $\alpha$  ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ), tensão de 40 kV, corrente de 30 mA e o ângulo ( $2\theta$ ) de varredura ao passo angular de  $0,02^\circ$  com tempo por passo de 10 segundos.

### 3 Resultados

A micrografia da morfologia do pó NiCrAlY é apresentado na Figura 1.

Na Figura 2 tem-se a curva de distribuição granulométrica do pó de NiCrAlY, composta por uma curva de valor acumulativo e uma de valor incremental (histograma) em função da faixa de distribuição de tamanho de partícula, assim como os valores de  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{90}$  que correspondem, respectivamente, aos valores que 10, 50 e 90% da distribuição das partículas que apresentam diâmetros menores que o percentual indicado, sendo  $D_m$ , o diâmetro médio do sistema particulado.

A deposição do pó de NiCrAlY na superfície da liga Ti-6Al-4V ocorreu por sedimentação. E subsequentemente, a irradiação do laser de Yb:fibra ancorou a camada de NiCrAlY ao substrato. A superfície da amostra de Ti-6Al-4V, a camada de NiCrAlY em pó depositado e a camada de NiCrAlY após o processamento com laser são mostradas na Figura 3.

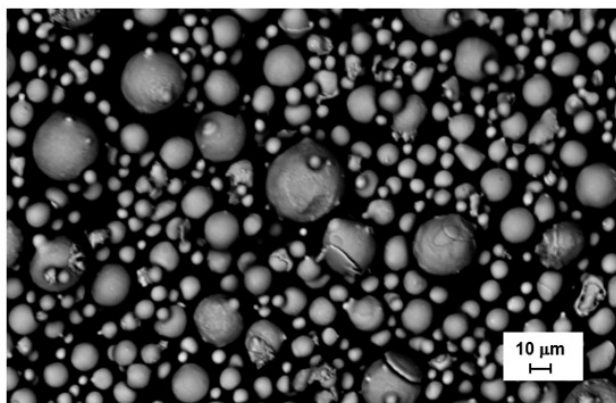


Figura 1. Micrografia da morfologia do pó de NiCrAlY obtidas por MEV. Detector: BSE.

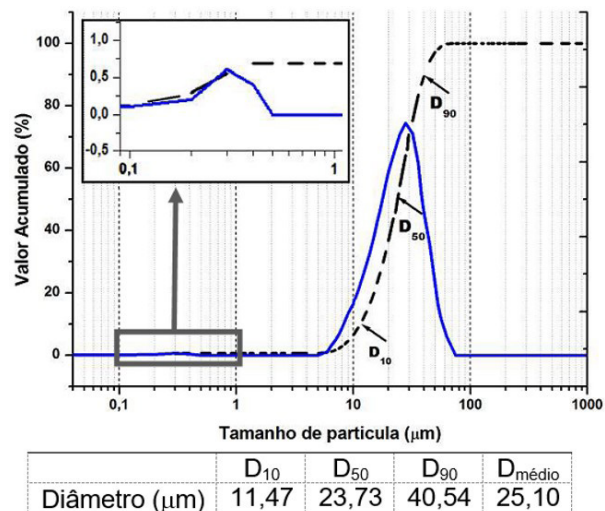


Figura 2. Curvas de distribuição de tamanho de partícula de NiCrAlY por difração a laser com os valores acumulativos e incrementais.

Na Figura 4 é apresentada a superfície das amostras observadas via microscopia eletrônica de varredura.

A microestrutura da camada de NiCrAlY sobre a liga de titânio a partir da seção transversal da amostra é mostrada na Figura 5, e a região de interface mais amplificada é mostrada na Figura 6.

Na Figura 7 relata-se a análise de EDS em linha da camada de NiCrAlY e Ti-6Al-4V para uma análise qualitativa que indica a distribuição dos elementos químicos ao longo da amostra.

As análises por DRX da superfície em cada etapa do processo: liga de Ti-6Al-4V, pó de NiCrAlY e a camada formada após o processamento com laser com velocidade de 100 mm/s são apresentadas na Figura 8.

### 4 Discussão

A camada de NiCrAlY foi formada a partir de deposição de partículas de formato esféricas (Figura 1), que apresentaram uma larga distribuição de partículas de diâmetro entre 5,0 a 71,0  $\mu\text{m}$  e uma fração menor de partículas distribuídas com diâmetro entre 0,2 a 0,4  $\mu\text{m}$  de diâmetro, como mostrado na Figura 2.

A partir deste resultado da variação da distribuição granulométrica foi possível realizar testes para a sedimentação do pó de NiCrAlY. O procedimento de sedimentação em meio líquido tem gerado resultados promissores de deposição de camadas TBC [17,18] por ser um meio simples e barato em relação ao processo de jateamento de pó juntamente ao laser, visto que o equipamento para acoplar e distribuir o pó tem um valor mais elevado de investimento e pode aumentar os períodos de manutenção pelo entupimento do canal de saída do pó pela larga distribuição de partículas.

Para a garantia da uniformidade e a reprodutibilidade com confiança na deposição, o processo de sedimentação ocorreu de forma individualizada, ou seja, uma amostra por vez, com quantidade fixa de massa do pó e volume do meio líquido de álcool etílico. A camada de NiCrAlY na superfície da liga Ti-6Al-4V ocorreu de modo homogênea, contínua, uniforme e sem defeitos superficiais conforme reportada na Figura 3(II), cuja espessura média das camadas de pó depositadas foi de  $170,0 \pm 30,0 \mu\text{m}$ , aproximadamente.

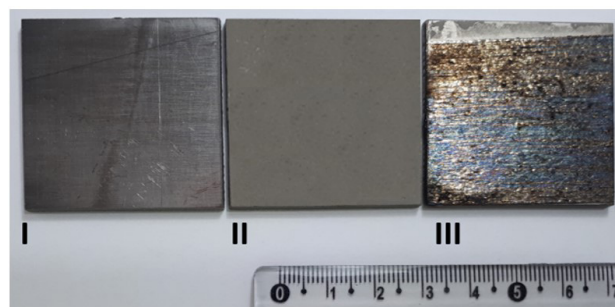
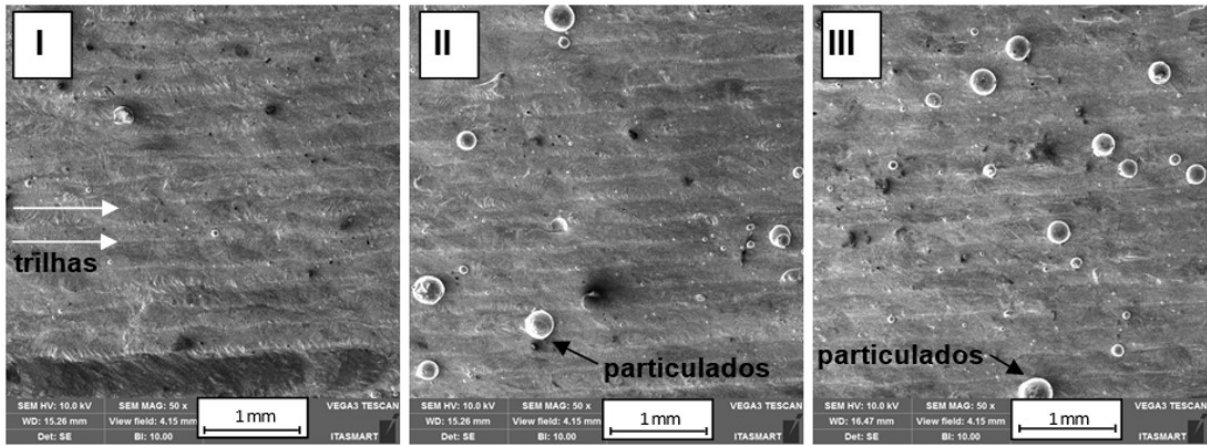
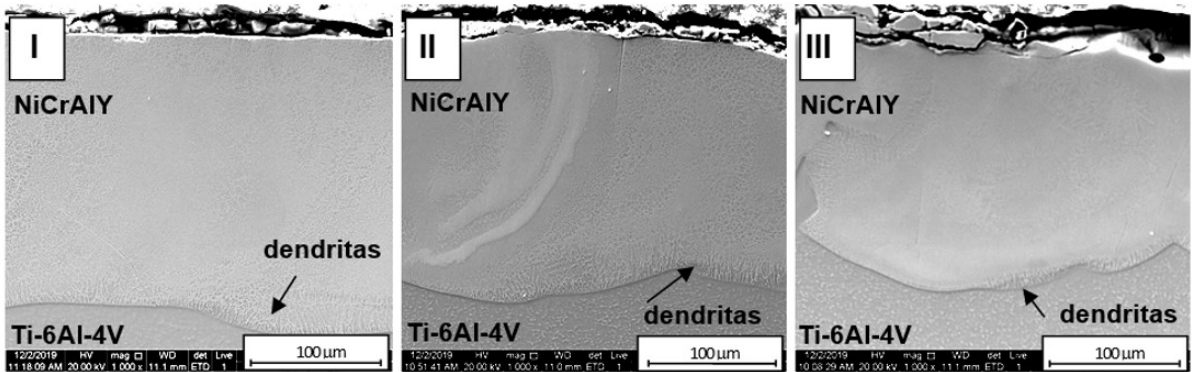


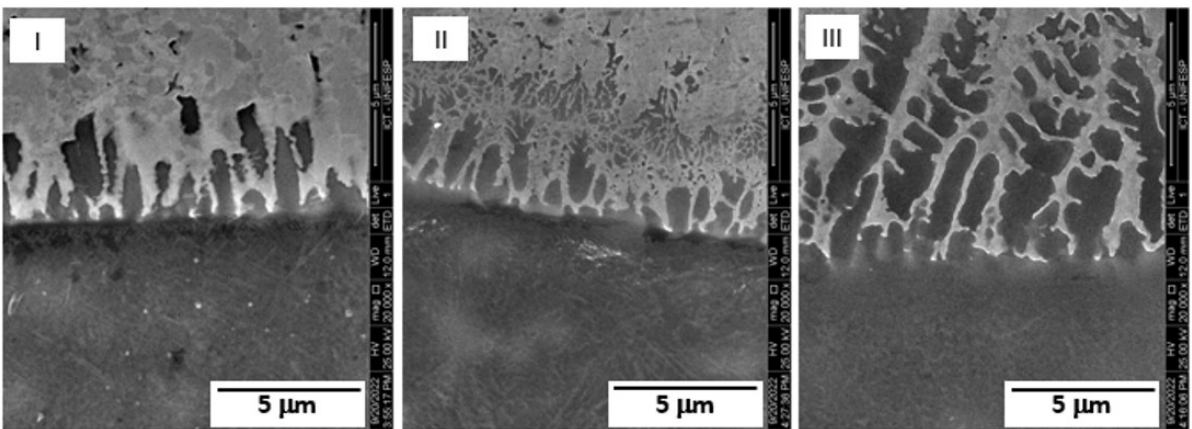
Figura 3. Superfície das amostras. (I) Ti-6Al-4V. (II) NiCrAlY em pó sedimentado. (III) NiCrAlY após processamento com laser de Yb:fibra.



**Figura 4.** Microestrutura da superfície da camada de NiCrAlY sobre o Ti-6Al-4V após irradiação com laser de Yb:fibra com potência de 200 W e diferentes velocidades de varredura de feixe por MEV. Detector: SE. (I) 25 mm/s (II) 50 mm/s. (III) 100 mm/s.



**Figura 5.** Microestrutura da camada de NiCrAlY sobre o Ti-6Al-4V na seção transversal após irradiação com laser de Yb:fibra com potência de 200 W e diferentes velocidades de varredura de feixe por MEV. Detector: SE. (I) 25 mm/s (II) 50 mm/s. (III) 100 mm/s.



**Figura 6.** Microestrutura da interface da camada de NiCrAlY sobre o Ti-6Al-4V na seção transversal após irradiação com laser de Yb:fibra com potência de 200 W e diferentes velocidades de varredura de feixe por MEV. Detector: SE. (I) 25 mm/s (II) 50 mm/s. (III) 100 mm/s.

Na Figura 4 observam-se as trilhas de varredura do feixe de laser formadas na superfície da camada metálica após processamento com o laser. Com o aumento da velocidade de varredura do feixe do laser observa-se uma maior número de particulados dispostos pela superfície.

A combinação da velocidade de varredura e potência promove um tempo de interação entre o laser e o material, que fornecem uma energia ao material particulado, aquecendo-o, objetivando a sinterização do pó da superfície para formar uma camada homogênea e contínua. O tempo de interação

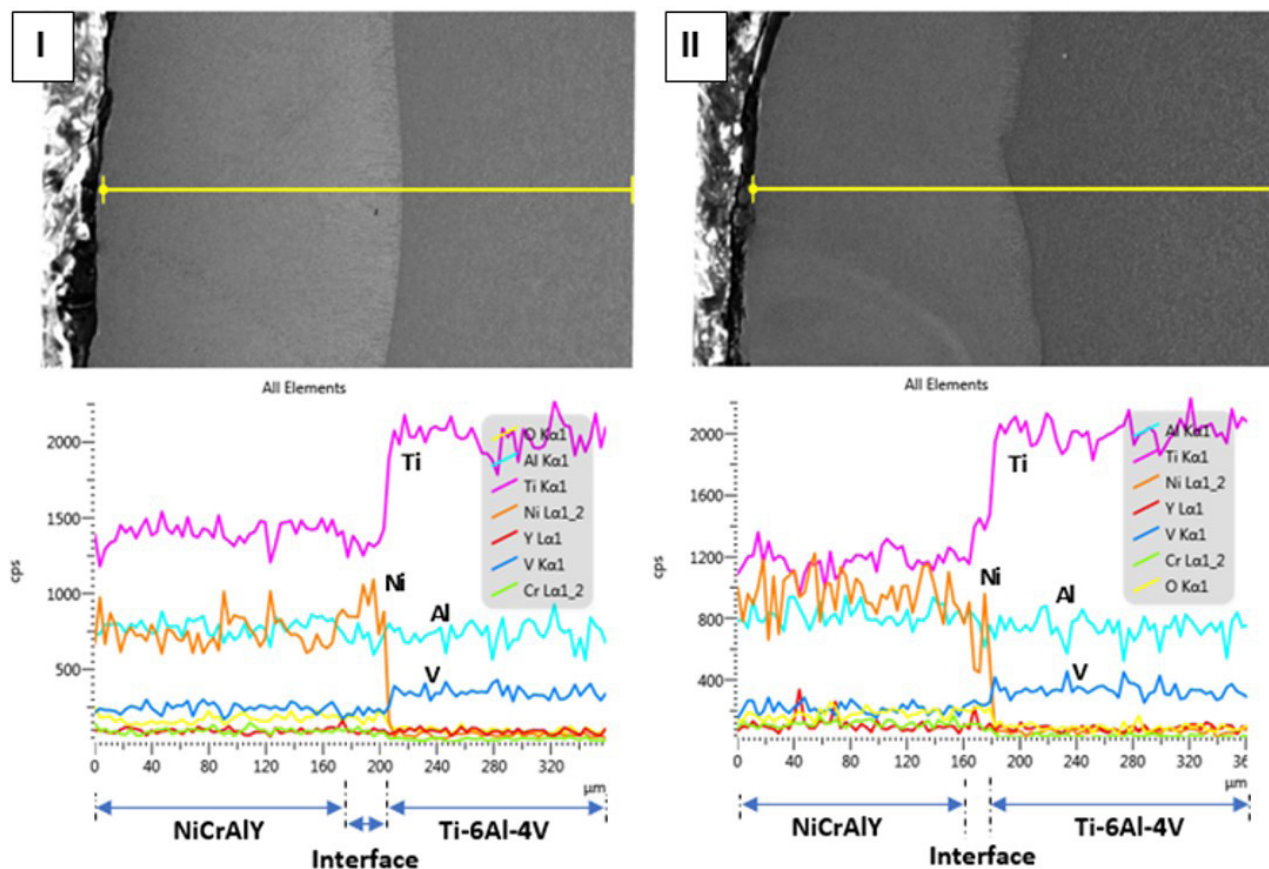


Figura 7. Análise de EDS em linha da camada de NiCrAlY sobre o Ti-6Al-4V com diferentes velocidades de irradiação de laser de Yb:fibra. (I) 25 mm/s (II) 50 mm/s. (III) 100 mm/s.

entre o feixe do laser e o material foi modificado pela velocidade de varredura. Em velocidades de varredura menores, há um maior tempo de interação com o material e assim, por meio da transferência de calor, a camada recebe energia suficiente para a sinterização ou fusão das camadas de NiCrAlY [19,20].

O aumento da velocidade se reflete no baixo tempo de interação entre laser e material, limitado a energia necessária para densificação de todo o material, onde é possível detectar materiais em formato de bolhas ao longo da camada constituído por material da camada metálica. A formação destes particulados na superfície processada a laser tem sido denominada efeito de *Balling* [16,21], dependentes dos parâmetros de processo e características dos materiais. Esses efeitos foram detectados por outros autores após o processamento com laser [22,23].

O processamento com laser de pós por meio da escolha apropriada de parâmetros de processamento, forneceu a quantidade certa de energia necessária para atuar apenas a camada superior das partículas de pó, sinterizando-o. O tempo de interação entre o laser e o material formou a camada de NiCrAlY aderente a liga metálica, com espessura regularmente homogênea, sem grandes trincas e sem porosidade, como é possível se observar nas Figura 5 e Figura 6.

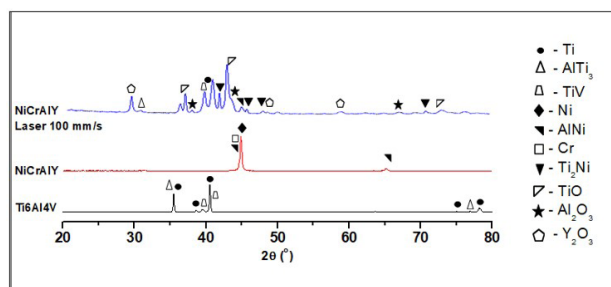


Figura 8. Resultado de difratograma de raios X das etapas do processo: liga Ti-6Al-4V, camada de NiCrAlY em pó sobre o Ti-6Al-4V e a por camada de NiCrAlY após a irradiação com laser de Yb:fibra em 100 mm/s.

As espessuras, medidas a partir da análise de EDS em linha na Figura 7, foram de aproximadamente 180, 160 e 130 μm para as amostras processadas com velocidade de 25, 50 e 100 mm/s, respectivamente. Com o aumento da velocidade de varredura, a energia fornecida ao material foi reduzida e formou camadas cada vez mais finas.

Nas regiões de interface entre as camadas de NiCrAlY e Ti-6Al-4V observa-se a formação microestrutural de dendritas (Figura 5 e Figura 6), que foram nucleadas pelo aquecimento e formadas pelo resfriamento rápido do processo.

A microestrutura final, durante o processamento com laser, depende essencialmente dos parâmetros locais de solidificação (gradiente de temperatura e da taxa de resfriamento), que por sua vez dependem da transferência de calor no material. A taxa de resfriamento depende da velocidade de varredura do feixe de laser, da forma da poça de fusão e das propriedades térmicas das camadas [19,24].

Considerando uma curva gaussiana o calor gerado no material pelo feixe de laser, a poça de fusão criada quando um feixe de laser varre a superfície de um material é semiesférico em baixas velocidades de varredura e torna-se cada vez mais alongado à medida que a velocidade de varredura aumenta. Desta forma, o gradiente térmico é mais alto no fundo do poço e diminui em direção à superfície. Como resultado, a morfologia da interface sólido-líquido e a microestrutura de solidificação, apresenta uma infinidade valor no fundo da poça de fusão e diminui à medida que a solidificação procede [19]. Na região de interface Ti-6Al-4V e NiCrAlY apresenta uma fina região de transição com uma mínima região termicamente afetada (R1). A microestrutura evolui para uma região de dendritas (R2), com crescimento alongado e perpendicular na direção normal à interface, à medida que a solidificação prossegue à superfície. Observa-se que a estrutura se torna cada vez mais alongadas à medida que a velocidade de varredura do laser foi aumentada.

Os parâmetros de processamento com laser de Yb:fibra não só originou na interface uma mínima região termicamente afetada, como também modificaram a espessura da camada formada. Na análise de EDS em linha (Figura 7) observa-se ligação metalúrgica na interface com uma estreita região revelada pela mínima diluição elementar entre as camadas, e nas camadas foram detectados os elementos de suas composições com evidências.

É possível observar que, à medida que a velocidade de varredura aumenta de 25 para 100 mm/s, o elemento químico Ti foi menos difundido do substrato Ti-6Al-4V para a região da camada NiCrAlY, devido a menor energia transferida ao material. A difusão de um elemento do substrato ao longo da camada após processamento com laser também foi observada por outros autores [25,26].

Além disso, na análise de EDS notou-se picos mais intensos de O e Y próximos a superfície na amostra processada com velocidade de varredura do feixe de laser de 100 mm/s, evidenciando a formação de óxidos de ítrio na região próxima a superfície. A análise de DRX detectou e confirmou as fases de óxido de ítrio formadas na superfície da amostra, como mostrado na Figura 8.

O autor [27] comprovou que as zonas ricas em Y são distribuídas aleatoriamente, mas sempre em torno dos contornos dos grãos ou em torno de pequenas porosidades na camada quando estudou rotas de processamento a laser de NiCoCrAlY sobre AISI 304. E outros autores [28] também identificam óxidos de ítrio na superfície de NiCrAlY ao estudar ciclos de oxidação do Hastelloy X com revestimento de NiCrAlY via laser.

Na literatura [24] no estudo da deposição de NiCrAlY sobre superliga de níquel observou-se que no revestimento de NiCrAlY fases de óxido de ítrio e alumínio precipitados nas regiões interdendríticas, e a estrutura dendrítica colunar foi predominante no revestimento.

Na análise de DRX (Figura 8), além da detecção do óxido de ítrio, identificou picos de óxido de alumínio e de fases predominantes com titânio e níquel na superfície. Constatou-se que a formação de óxido sobre a superfície pode ser caracterizada como a formação prévia de óxido termicamente crescido, TGO.

## 5 Conclusão

Pelo estudo da caracterização microestrutural da camada de NiCrAlY sobre Ti-6Al-4V processado por laser de Yb:fibra conclui-se que:

- O pó de NiCrAlY em formato esféricos, em larga distribuição granulométrica, foi sedimentado de modo homogêneo, contínuo e sem defeitos superficiais sobre a superfície da liga Ti-6Al-4V.
- O processamento com laser de Yb:fibra com variação de velocidade de feixe do laser, identificou a formação do efeito *Balling* sobre a superfície de NiCrAlY. O efeito aumentou a formação dos respingos com o aumento da velocidade de varredura do feixe, ocasionado pela menor energia fornecida ao material, e não completa sinterização do material.
- No intervalo de parâmetros de laser estudados observou-se ligação metalúrgica entre as camadas de NiCrAlY, e a microestrutura da interface apresentou dendritas ocasionadas pela alta taxa de aquecimento e resfriamento do processo.
- A espessura da camada de NiCrAlY se reduz com o aumento da velocidade do feixe de laser.
- A análise de EDS em linha e a análise de DRX mostraram a difusão do Ti do substrato Ti-6Al-4V para a camada de NiCrAlY e a formação de óxidos de ítrio e alumínio sobre a superfície, que se pode denominar como TGO.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o Laboratório de Fotônica do Instituto de Estudos Avançados (IEAv - DCTA). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## Referências

- 1 Destefani JD. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. In: ASM International, editor. ASM Handbook. 2nd ed. West Conshohocken: ASM International; 1990. p. 586-591.
- 2 Clarke DR, Levi CG. Materials Design for the Next Generation Thermal Barrier Coatings. *Annual Review of Materials Research*. 2003;33(1):383-417.
- 3 Takahashi RJ, Assis JMK, Piorino Neto F, Reis DAP. Thermal conductivity study of ZrO<sub>2</sub>-YO<sub>1.5</sub>-NbO<sub>2.5</sub> TBC. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;19:4932-4938.
- 4 Padture NP, Gell M, Jordan EH. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications. *Science*. 2002;296(5566):280-284.
- 5 Toscano J, Vaßen R, Gil A, Subanovic M, Naumenko D, Singheiser L, et al. Parameters affecting TGO growth and adherence on MCrAlY-bond coats for TBC's. *Surface and Coatings Technology*. 2006;201:3906-3910.
- 6 Takahashi RJ, Assis JMK, Neto FP, Reis DAP. Heat treatment for TGO growth on NiCrAlY for TBC application. *Materials Research Express*. 2019;6:126442.
- 7 Grant P. Thermal barrier coatings. In: Cantor B, Grand P, Assender H, editors. *Aerospace materials*. Bristol: Taylor & Francis; 2001. Chap. 22 Series in materials science and engineering.
- 8 Ito K, Shima T, Fujioka M, Arai M. Improvement of oxidation resistance and adhesion strength of thermal barrier coating by grinding and grit-blasting treatments. *J Therm Spray Tech*. 2020;29:1728-1740. <http://dx.doi.org/10.1007/s11666-020-01057-y>.
- 9 Evans AG, Hutchinson JW. The mechanics of coating delamination in thermal gradients. *Surface and Coatings Technology*. 2007;201(18):7905-7916.
- 10 Subanovic M, Song P, Wessel E, Vassen R, Naumenko D, Singheiser L, et al. Effect of exposure conditions on the oxidation of MCrAlY-bondcoats and lifetime of thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2009;204(6-7):820-823.
- 11 Lu Z, Myoung SW, Kim EH, Lee JH, Jung YG. Microstructure evolution and thermal durability with coating thickness in APS thermal barrier coatings. *Materials Today: Proceedings*. 2014;1(1):35-43.
- 12 Weng F, Chen C, Yu H. Research status of laser cladding on titanium and its alloys: A review. *Materials & Design*. 2014;58:412-425.
- 13 Tolochko NK, Khlopkov YV, Mozzharov SE, Ignatiev MB, Laoui T, Titov VI, et al. Absorptance of powder materials suitable for laser sintering. *Rapid Prototyping Journal*. 2000;6(3):155-161.
- 14 Anjos MA, Vilar R, Li R, Ferreira MG, Steen WM, Watkins K. FeCrNiMoC alloys produced by laser surface alloying. *Surface and Coatings Technology*. 1995;70(2-3):235-242.
- 15 Vert R, Chicot D, Decoopman X, Gruescu IC, Meillot E, Vardelle A, et al. Adhesive and cohesive properties of nanostructured ZrO<sub>2</sub> coatings by the original Vickers Indentation Cracking technique. *Thin Solid Films*. 2011;519(22):7789-7795.
- 16 Suárez A, Tobar MJ, Yáñez A, Pérez I, Sampedro J, Amigó V, et al. Modeling of phase transformations of Ti6Al4V during laser metal deposition. *Physics Procedia*. 2011;12(Pt A):666-673.
- 17 Teleginski V, Chagas D, Costa de Oliveira A, Santos J, Azevedo J, Riva R, et al. Yb:fiber laser surface texturing of stainless steel substrate, with MCrAlY deposition and CO<sub>2</sub> laser treatment. *Surface and Coatings Technology*. 2014;260:251.
- 18 Teleginski V, Chagas DC, de Oliveira LG, de Vasconcelos G. Interface Evaluation of MCrAlY Powder Bond Coat on 316 SS Processed with Laser Irradiation. *Materials Science Forum*. 2014;802:409-414.
- 19 Kannatey-Asibu E Jr. *Principles of laser materials processing*. Hoboken, NJ: Wiley; 2009.
- 20 DebRoy T, Wei HL, Zuback JS, Mukherjee T, Elmer JW, Milewski JO, et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2018;92:112-224.
- 21 Gu D, Shen Y. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods. *Materials & Design*. 2009;30(8):2903-2910.
- 22 Ardila-Rodríguez LA, Menezes BRC, Pereira LA, Takahashi RJ, Oliveira AC, Travessa DN. Surface modification of aluminum alloys with carbon nanotubes by laser surface melting. *Surface and Coatings Technology*. 2019;377:124930.

- 23 Zhou X, Liu X, Zhang D, Shen Z, Liu W. Balling phenomena in selective laser melted tungsten. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015;222:33-42.
- 24 Vilar R, Santos EC, Ferreira PN, Franco N, da Silva RC. Structure of NiCrAlY coatings deposited on single-crystal alloy turbine blade material by laser cladding. *Acta Materialia*. 2009;57(18):5292-5302.
- 25 Meng Q, Geng L, Ni D. Laser cladding NiCoCrAlY coating on Ti-6Al-4V. *Materials Letters*. 2005;59(22):2774-2777.
- 26 Takahashi RJ, Assis JMK, Reis DAP. Microstructural characterization of zirconia co-doped with yttria and niobia by laser deposition on Ti-6Al-4V as a thermal barrier for application in turbines. Warrendale: SAE International. SAE Technical Paper. 2018-36-0332
- 27 Pereira JC, Zambrano JC, Rayón E, Yañez A, Amigó V. Mechanical and microstructural characterization of MCrAlY coatings produced by laser cladding: the influence of the Ni, Co and Al content. *Surface and Coatings Technology*. 2018;338:22-31.
- 28 Partes K, Giolli C, Borgioli F, Bardi U, Seefeld T, Vollertsen F. High temperature behaviour of NiCrAlY coatings made by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*. 2008;202(10):2208-2213.

Recebido em: 20 Jul. 2022

Aceito em: 10 Nov. 2022