

INVESTIGAÇÃO DA REFUSÃO POR LASER NO RECOBRIMENTO COMO FORMA DE BARREIRA TÉRMICA*

*Filipe Estevão de Freitas¹
Adriano Gonçalves dos Reis²
Aline Capella de Oliveira³
Danieli Aparecida Pereira Reis⁴*

Resumo

Recobrimentos como forma de barreira térmica (TBC) oferecem uma proteção contra oxidação para componentes usados em partes de seção quente dos motores de turbina a gás. Uma técnica que tem sido investigada para aumentar a vida útil e a temperatura de trabalho desses componentes é refusão do TBC utilizando tratamento por laser. O objetivo deste trabalho foi avaliar diferentes parâmetros de laser de CO₂ para refusão da camada cerâmica de zircônia estabilizada com ítria do TBC num substrato de Ti-6Al-4V. As amostras foram analisadas por microscopia óptica e, após uma triagem comparativa, os parâmetros escolhidos foram avaliados através de análise termogravimétrica e oxidação em forno e, por fim, a amostra que obteve melhor resultado foi caracterizada por perfilometria óptica e difração de raios X rasante. A refusão por laser com densidade de energia de 1,05 J/mm² e 2,47 J/mm² apresentaram camadas mais uniformes e menores quantidades de defeitos superficiais, com espessura da camada tratada de ~35 µm e ~56 µm, respectivamente. O tratamento por laser com 1,05 J/mm² apresentou melhor resistência à oxidação, com redução considerável da rugosidade superficial, além de um aumento da fase t', que é fase que proporciona uma maior tenacidade à camada cerâmica; indicando um tratamento promissor para melhorar o comportamento mecânico da liga com TBC em altas temperaturas.

Palavras-chave: TBC; Refusão por laser; Oxidação; Ti-6Al-4V.

INVESTIGATION OF LASER REMELTED THERMAL BARRIER COATING

Abstract

Thermal barrier coatings (TBCs) have been used for oxidation protection in hot sections of gas turbine engines components. One technique that has been investigated to increase the live time and working temperature of these components is the laser remelted on TBC. The aim of this work was the investigation of different CO₂ laser parameters for remelting of the TBC yttria-stabilized zirconia on Ti-6Al-4V substrate. The samples were analyzed by optical microscopy and, after comparative examination, the chosen parameters were evaluated by thermogravimetric analysis and discontinuous oxidation and, finally, the sample that obtained the best result was characterized by optical profilometry and X-ray diffraction. Laser treatments with energy density of 1.05 J/mm² and 2.47 J/mm² showed more uniform layers and smaller amounts of surface defects, with a treated layer thickness of ~35 µm and ~56 µm, respectively. The sample remelted with 1.05 J/mm² presented better oxidation resistance, with a considerable reduction of the surface roughness and an increase of t'-phase, which is phase that provides a higher tenacity to the ceramic layer; indicating a promising treatment to improve the mechanical behavior of the alloy with TBC at high temperatures.

Keywords: TBC; Laser remelted; Oxidation; Ti-6Al-4V.

- ¹ *Engenheiro de materiais, mestre, aluno de doutorado, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.*
- ² *Engenheiro químico, doutor, Professor Assistente, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.*
- ³ *Licenciatura e Bacharelado em Matemática, doutora, Professor Adjunto, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.*
- ⁴ *Engenheira química, doutora, Professor Adjunto, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O titânio e suas ligas possuem características muito atrativas, como resistência à corrosão, à erosão e baixa massa específica [1]. A liga Ti-6Al-4V destaca-se por possuir propriedades como a alta relação resistência-peso e baixo módulo de elasticidade, que têm resultado em larga utilização nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, particularmente para aplicações que requerem resistência em altas temperaturas [2-4].

Durante a operação em altas temperaturas, a oxidação é um fator de limitação das ligas de titânio [5]. A penetração intergranular do óxido geralmente implica numa diminuição do tempo de ruptura por fluência e, conseqüentemente, a vida em serviço do material é reduzida [6]. Uma das técnicas utilizadas para aumentar a vida útil e/ou a temperatura de trabalho das ligas de titânio são os recobrimentos, na qual sua eficiência depende dos materiais e processos utilizados para obtê-los [7].

Recobrimentos como forma de barreira térmica (TBC - *Thermal Barrier Coating*) oferecem uma proteção contra oxidação para os substratos sob condições de fluxo de calor [8]. Sistemas TBCs têm sido aplicados em componentes usados em partes de seções quentes dos motores de turbina a gás [9]. Esse tipo de recobrimento oferece também um potencial para minimizar emissões de dióxido de carbono de motores de turbinas de aeronaves e de turbinas estacionárias a gás [10]. Estudos têm mostrado que a liga Ti-6Al-4V com recobrimento TBC promove uma melhora no comportamento mecânico e na proteção contra oxidação [11-13].

O sistema TBC é constituído por uma camada de ligação metálica (BC - *Bond Coat*) aderida ao substrato, geralmente do tipo MCrAlY (M = Ni, Co, Fe ou suas combinações); uma camada intermediária, usualmente alumina, causada por um processo de oxidação do BC durante a exposição em altas temperaturas, chamada de camada de óxido termicamente crescido (TGO - *Thermally-Grown Oxide*); e, por fim, uma camada cerâmica superficial (TC - *Top Coat*) de zircônia estabilizada com ítria, de baixa condutividade térmica [10,14,15].

Uma das técnicas mais usadas para a deposição de recobrimentos TBC é a aspersão térmica por plasma (APS - *Air Plasma Spray*) [16], onde os materiais a serem depositados, geralmente na forma de pó são alimentados em uma tocha ou pistola, aquecidos próximo do seu ponto de fusão e as gotículas são projetadas por um fluxo de gás contra a superfície do alvo a ser revestido. As gotículas tornam-se finas partículas lamelares com o impacto, aderindo à superfície ao se solidificarem [17].

A modificação do TBC por laser é uma técnica que tem sido investigada para aumentar a vida útil e a temperatura de trabalho de substratos metálicos [18]. Pesquisadores demonstram que o tratamento superficial por laser no TBC aumenta a resistência à oxidação isotérmica e cíclica, aumenta a dureza pela densificação da superfície, ocorre uma redução dos fenômenos de oxidação e corrosão e, também, promove um aumento da resistência ao choque térmico [19-22]. A liga de Ti-6Al-4V com TBC modificada por laser teve sua vida em fluência melhorada em comparação à liga sem tratamento, sendo que os parâmetros escolhidos para o tratamento por laser influenciam diretamente no desempenho mecânico [23].

O objetivo deste trabalho foi avaliar diferentes parâmetros (potência e velocidade) de tratamento por laser para refusão da camada cerâmica do TBC num substrato de Ti-6Al-4V. O trabalho se mostra necessário para averiguação de um parâmetro de tratamento por laser que seja eficaz, visto que a resistência à oxidação

e o comportamento mecânico em altas temperaturas são fortemente influenciados pelas condições do tratamento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Adquiriu-se a liga Ti-6Al-4V na forma de chapas com 3 mm de espessura. A composição dos principais elementos são $Ti_{89,16}Al_{6,61}V_{4,23}$ (% peso) com estrutura equiaxial ($\alpha+\beta$), atendendo aos requisitos da norma ASTM B265-15 [24].

O recobrimento TBC foi aplicado utilizando a técnica de aspersão térmica a plasma (APS). Primeiramente, foi realizado a aplicação da camada metálica de NiCrAlY (Bond Coat Amdry 962) sobre o substrato. Em seguida, foi realizada a aplicação da camada cerâmica de zircônia estabilizada com 8% peso de ítria (Top Coat Metco 204NS-G) sobre a camada metálica. Esse processo de aspersão térmica foi efetuado no equipamento: pistola Sulzer Metco 9M, alimentador de pós Sulzer Metco 9MP e controlador dos gases Praxair PC-100.

Foi utilizado um laser de CO_2 de potência máxima de 100 W, marca Synrad modelo ti100 series, com comprimento de onda característico de 10,6 μm e diâmetro de feixe de 162 μm quando focalizado a uma distância de 100 mm. Com um cabeçote comandado por software, foram realizadas varreduras do feixe de laser de acordo com o desenho estabelecido pelo operador.

Para avaliar os efeitos da refusão por laser no TBC, selecionou-se diferentes parâmetros (potência e velocidade de varredura) de acordo com a Tabela 1, onde P é a potência do laser, V é a velocidade de varredura, E, definido como $E = 4P/(\pi D^2)$, é a intensidade do feixe, J, definido como $J = P/(V.D)$, é a densidade de energia do laser e D é o diâmetro do feixe (0,162 mm). Nenhuma das amostras houve sobreposição do feixe de laser. Foi utilizado argônio durante o tratamento como gás de proteção.

Tabela 1. Parâmetros de tratamento por laser

Amostra	P (W)	V (mm/s)	E (W/cm^2)	J (J/mm^2)
1	50	500	$2,4 \times 10^5$	0,62
2	17	150	$0,8 \times 10^5$	0,70
3	34	200	$1,6 \times 10^5$	1,05
4	40	100	$1,9 \times 10^5$	2,47
5	100	200	$4,9 \times 10^5$	3,09
6	80	100	$3,9 \times 10^5$	4,94
7	50	300	$2,4 \times 10^5$	1,03
8	50	700	$2,4 \times 10^5$	0,44

Numa amostra de 4 por 4 cm foram realizados os tratamentos por laser, como mostra a Figura 1, onde os números indicam os parâmetros da Tabela 1.

Em cada região da amostra, foi realizado o corte transversal e subsequente preparação metalográfica. As amostras foram analisadas por microscopia óptica (MO – Zeiss AxioScope A1) e efetuou-se uma triagem comparativa utilizando como base a espessura da camada tratada e correlacionando com trabalhos científicos semelhantes. Os parâmetros escolhidos foram avaliados através de ensaio de oxidação isotérmica (análise termogravimétrica – TGA) e descontínua (oxidação em forno). O parâmetro que obteve melhor resultados nos testes foi caracterizado por perfilometria óptica e difração de raios X rasante.

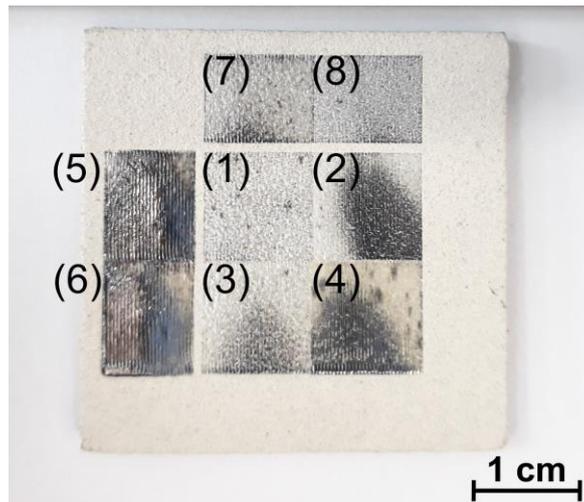


Figura 1. Amostra de Ti-6Al-4V com TBC com diferentes tratamentos por laser, onde os números correspondem aos parâmetros da Tabela 1.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta uma imagem de MO do corte transversal da amostra com TBC após deposição por aspensão térmica a plasma, sem o tratamento por laser. Verifica-se a presença das camadas BC e TC de tamanho médio de aproximadamente $70 \pm 20 \mu\text{m}$ e $305 \pm 20 \mu\text{m}$, respectivamente.

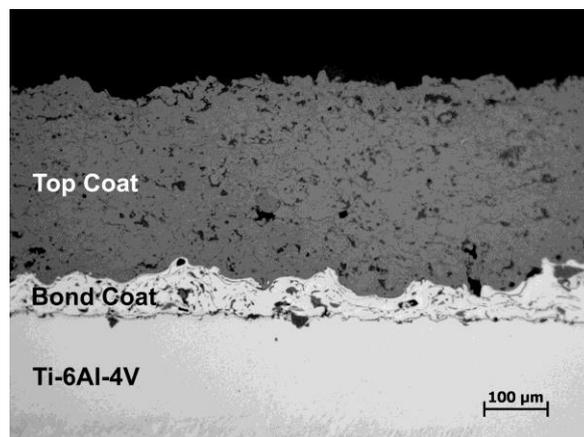


Figura 2. Amostra com TBC sem tratamento por laser.

A Figura 3 apresenta as imagens do corte transversal das amostras tratadas por laser. Em todas as imagens da Figura 3 observa-se que houve a refusão por laser da camada cerâmica (*Top Coat*) com a formação de uma densa camada superficial com presença de trincas transversais. A espessura média das camadas é apresentada na Tabela 2.

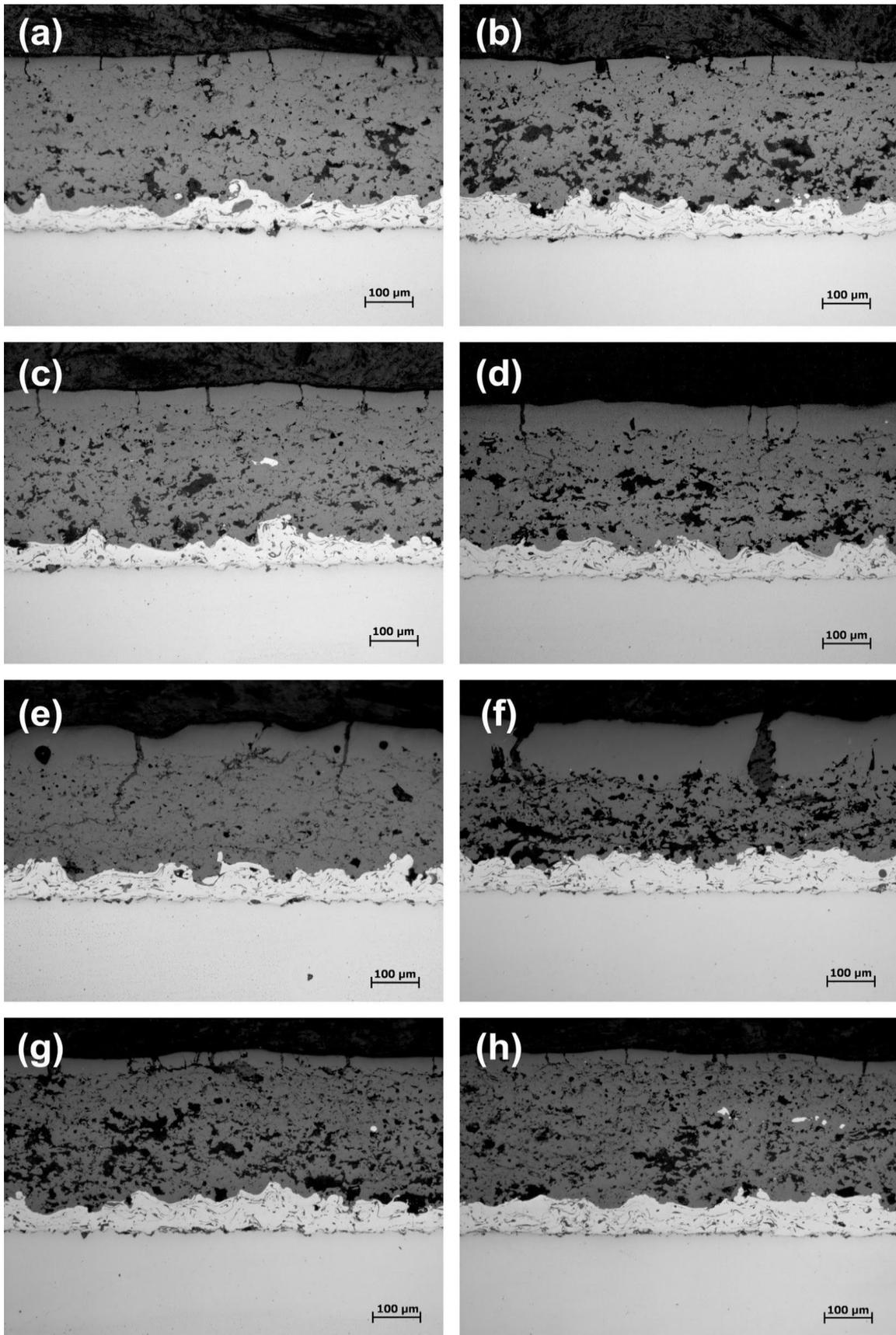
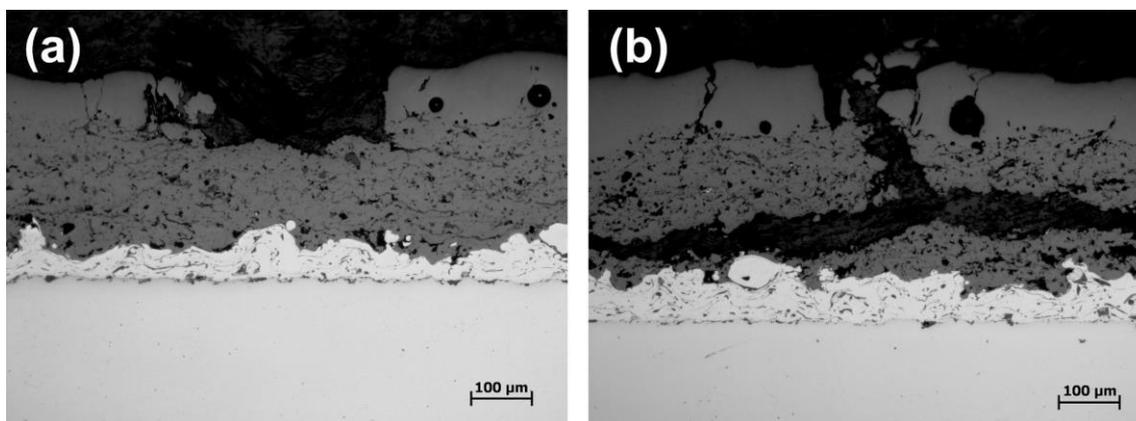


Figura 3. Tratamentos por laser de acordo com a Tabela 1: (a) amostra 1, (b) amostra 2, (c) amostra 3, (d) amostra 4, (e) amostra 5, (f) amostra 6, (g) amostra 7 e (h) amostra 8.

Tabela 2. Espessura média das camadas

Amostra	J (J/mm ²)	Espessura (µm)
1	0,62	22,6 ± 3,5
2	0,70	24,5 ± 5,1
3	1,05	34,7 ± 3,1
4	2,47	56,0 ± 4,9
5	3,09	69,9 ± 13,5
6	4,94	104,7 ± 6,0
7	1,03	29,2 ± 4,8
8	0,44	20,2 ± 3,5

As amostras 5 e 6, nos quais a densidade de energia foram relativamente mais altas, não obtiveram um bom resultado devido a ocorrência de destacamento e delaminação da camada cerâmica, como mostra a Figura 4. Portanto, constata-se que a densidade de energia acima de 3 J/mm², utilizando um equipamento de laser especificado no presente trabalho, não é adequado para a refusão da camada cerâmica do TBC.

**Figura 4.** Ocorrência de defeitos e destacamento da camada na (a) amostra 5 e (b) amostra 6.

Zhu et al. [20] investigaram as características de revestimentos depositados por plasma spray e tratados com laser. Foram utilizados dois parâmetros para refusão, um com menor energia ($J = 0,67 \text{ J/mm}^2$) e outro com maior energia ($J = 4 \text{ J/mm}^2$), formando uma densa camada cerâmica de espessura aproximadamente 50 µm no primeiro tratamento e refundido toda a camada cerâmica no de maior energia. Os pesquisadores argumentaram que o tratamento por laser com $J = 0,67 \text{ J/mm}^2$ foi efetivo para reduzir a permeabilidade do oxigênio em sua estrutura.

Yi et al. [25] analisaram a resistência à corrosão a quente do TBC após a refusão por laser. Foram comparadas amostras tratadas com menor e maior densidade de energia. Os resultados mostraram que a resistência à corrosão pode ser melhorada pela produção de uma densa e lisa camada superficial, reduzindo a permeabilidade da solução salina. As amostras com menor energia produziram uma superfície menos rugosa e menores quantidades de trincas, melhorando a eficiência na resistência à corrosão.

Apesar da diferença dos equipamentos utilizados nos trabalhos citados, existe uma concordância de que as amostras que apresentam o melhor desempenho são aquelas nas quais existe um densificação parcial da camada cerâmica, na qual a energia utilizada é suficiente para uma refusão não muito profunda. A presença de uma camada porosa logo abaixo da camada tratada a laser favoreceu a absorção das tensões térmicas durante os ciclos de aquecimento e resfriamento do material

[20]. Nesses trabalhos considera-se também a quantidade de defeitos superficiais e tamanho da camada densificada. Apesar da rede de trincas melhorar a acomodação durante a deformação [21], a camada refundida deve apresentar a menor quantidade de defeitos e trincas superficiais, pois isso resulta numa maior resistência à oxidação [20]. Além disso, uma melhor eficiência do TBC está associada à uniformidade da refusão [26]. Em alguns estudos semelhantes [20,21,26] a espessura da camada do Top Coat sem tratamento por laser é de aproximadamente 270 μm e a espessura da camada cerâmica densificada após tratamento por laser está entre 30 e 70 μm . As amostras do presente trabalho se adequam com as características citadas são as amostras 3 e 4 que, portanto, foram selecionadas para os testes de oxidação.

O substrato de Ti-6Al-4V sem recobrimento, o substrato com TBC e as amostras 3 e 4 (TBC + laser) foram avaliados pelo ensaio de oxidação isotérmica por 7 horas utilizando a análise termogravimétrica (Figura 5).

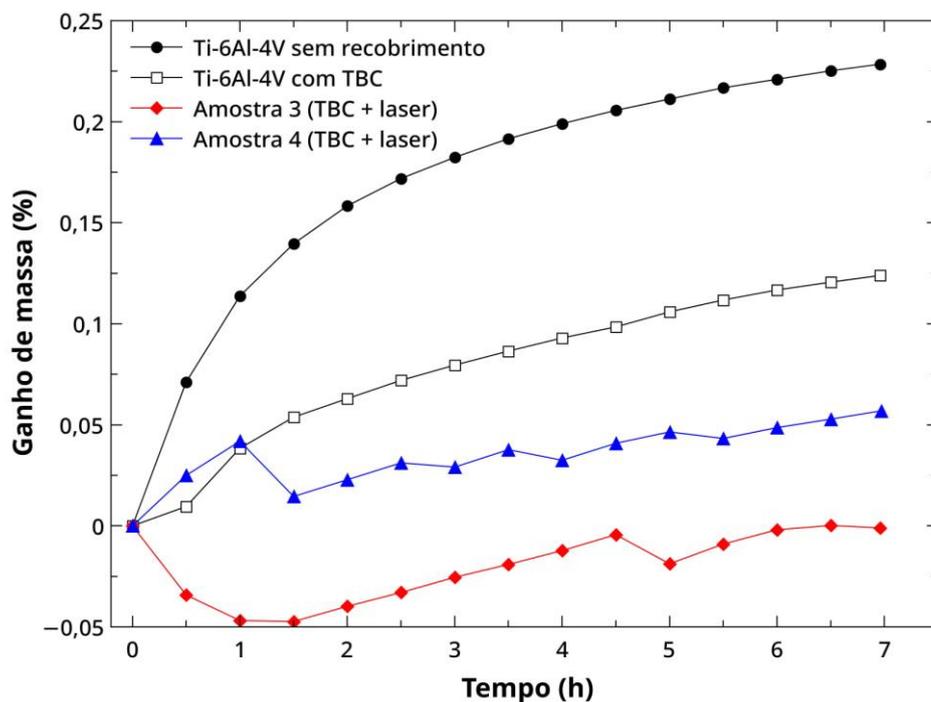


Figura 5. Análise termogravimétrica de oxidação.

As amostras também foram avaliadas por teste de oxidação descontínua durante aproximadamente 130 horas num forno tipo mufla e os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Ganho de massa obtido pela oxidação no forno

Amostra	Ganho de massa (‰)
Ti-6Al-4V sem recobrimento	1,05
Ti-6Al-4V com TBC	0,18
Amostra 3 (TBC + laser)	0,06
Amostra 4 (TBC + laser)	0,38

Nas análises de TGA e de oxidação descontínua, observa-se que a amostra 3 apresentou o menor ganho de massa dentre as demais. A amostra 4 teve pouco ganho de massa na análise de TGA, porém seu desempenho foi inferior na oxidação no forno em relação àquela com TBC sem tratamento por laser. Como esperado, a

liga de Ti-6Al-4V sem recobrimento apresentou o maior ganho de massa dentre as amostras investigadas. Conclui-se que o tratamento por laser da amostra 3 (1,05 J/mm²) obteve melhor resistência à oxidação, mostrando-se um tratamento promissor para melhorar o comportamento mecânico da liga com TBC em altas temperaturas.

A Figura 6 apresenta imagens obtidas por perfilometria óptica do TBC antes da refusão e após tratamento por laser (amostra 3). Uma média da rugosidade aritmética (Ra) e quadrática (Rq) das amostras são apresentadas na imagem. Observa-se que após o tratamento por laser, a rugosidade diminuiu consideravelmente, cerca de 70 a 80%. A redução da rugosidade superficial no TBC pode proporcionar menor penetração de gases quentes que causam crescimento de óxidos na interface [27]. Uma menor rugosidade da camada TBC também está atrelada com maior resistência à corrosão [25].

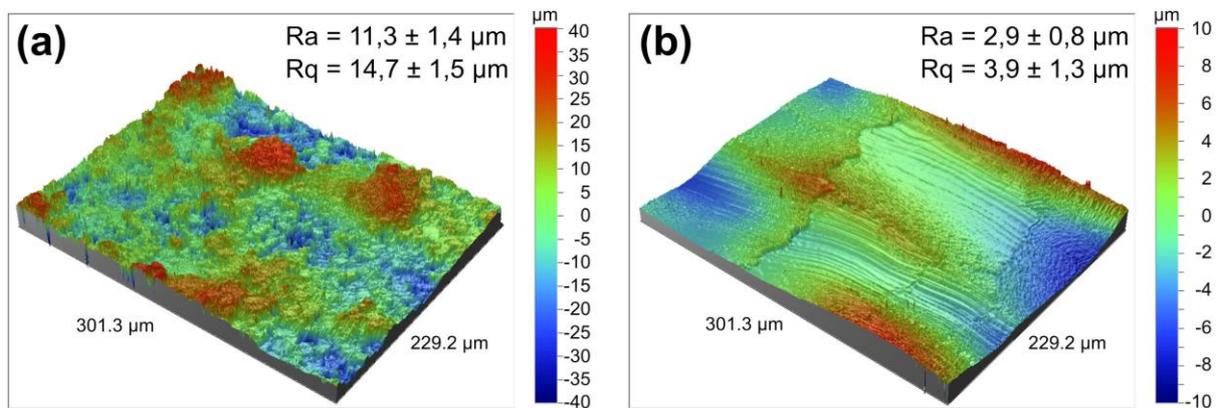


Figura 6. Imagens topográficas obtidas por perfilometria óptica da camada cerâmica: (a) como aspergido e (b) após tratamento por laser.

A Figura 7 apresenta os difratogramas de raios X rasante com ângulo fixo de 1º das pastilhas com TBC antes e após tratamento por laser (amostra 3) das regiões $27 < 2\theta < 32$ (família de planos {111}) e $72 < 2\theta < 76$ (família de planos {400}). Observa-se a presença das fases cúbica (c), monoclinica (m) e tetragonal metaestável (t') da zircônia, com predominância da fase t'. Não há mudança das fases após o tratamento com laser.

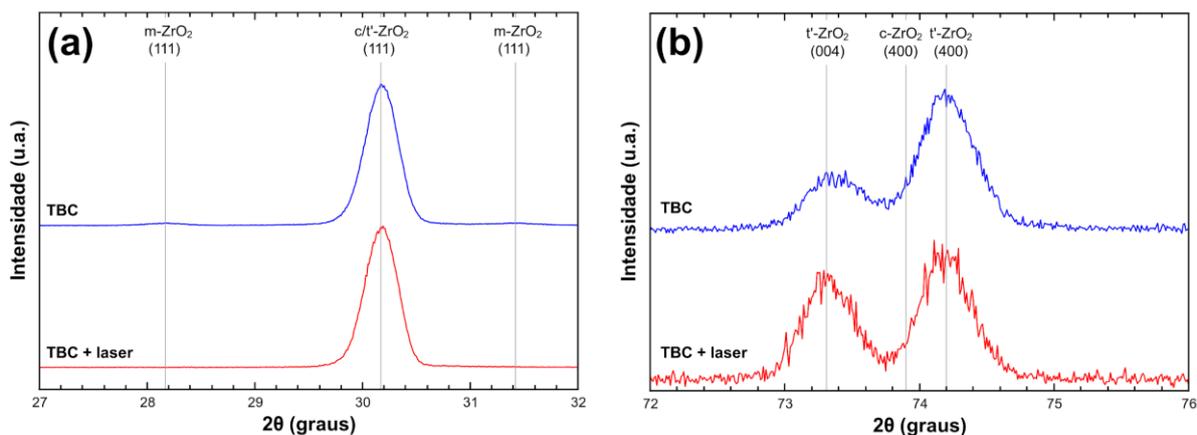


Figura 7. Difratogramas das pastilhas com TBC antes e após tratamento por laser (amostra 3) das regiões: (a) {111}; (b) {400}.

Nos Figura 7a observa-se uma redução da fase monoclinica, enquanto que na Figura 7b verifica-se um aumento da fase tetragonal metaestável, ambos constatados pela redução e aumento proporcional dos picos, respectivamente. A fase t' possui uma tenacidade intrínseca na qual resiste à propagação de trincas através de uma microestrutura complexa [28,29]. A expansão de volume da transformação da fase t' para a fase m causa tensões mecânicas no recobrimento, levando a falhas no TBC [23,28]. O aumento da fase t' é, portanto, um indicativo de o tratamento por laser da amostra 3 proporcionou uma maior tenacidade à camada.

4 CONCLUSÃO

Oito parâmetros de tratamento por laser foram investigados no TBC sobre um substrato de Ti-6Al-4V. As principais conclusões do presente trabalho podem ser resumidas a seguir:

- Através de análise microestrutural, verificou-se que a amostra 3 ($1,05 \text{ J/mm}^2$) e a amostra 4 ($2,47 \text{ J/mm}^2$) apresentaram camadas mais uniformes e menores quantidades de defeitos superficiais. A espessura da camada cerâmica densificada após tratamento por laser é de $\sim 35 \mu\text{m}$ e $\sim 56 \mu\text{m}$ para as amostras 3 e 4, respectivamente, e está de acordo com trabalhos científicos semelhantes.
- A amostra 3 apresentou menor ganho de massa e, conseqüentemente, melhor resistência à oxidação nas análises de termogravimetria e oxidação no forno.
- Após a refusão por laser, observou-se uma redução considerável (70 a 80%) na rugosidade da amostra 3.
- Verificou-se a presença das fases c , m e t' da ZrO_2 e que houve um aumento da fase t' na amostra 3, indicando que o tratamento por laser proporcionou uma maior tenacidade à camada cerâmica.
- O tratamento por laser com $1,05 \text{ J/mm}^2$ demonstra-se promissor para melhorar o comportamento mecânico da liga com TBC em altas temperaturas.

Agradecimentos

O autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), processo número 1636393 de 2016 e ao CNPQ Universal (Processo 403070/2016-3), pelo apoio financeiro, e à GE Celma (Petrópolis, Brasil) pela deposição por plasma spray.

REFERÊNCIAS

- 1 Been J, Grauman JS. Titanium and Titanium Alloys. In: Uhlig's Corrosion Handbook. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.; 2011. p. 861–78.
- 2 Boyer RR. An overview on the use of titanium in the aerospace industry. Mater Sci Eng A. 1996;213(1–2):103–14.
- 3 Long M, Rack H. Titanium alloys in total joint replacement - a materials science perspective. Biomaterials. 1998;19(18):1621–39.
- 4 Nass KCF, Radi PA, Leite DMG, Massi M, da Silva Sobrinho AS, Dutra RCL, et al. Tribomechanical and structural properties of a-SiC:H films deposited using liquid precursors on titanium alloy. Surf Coatings Technol. 2015;284:240–6.
- 5 Lee H-S, Yoon J-H, Yi Y-M. Oxidation behavior of titanium alloy under diffusion bonding. Thermochim Acta. 2007;455(1–2):105–8.

- 6 Reis DAP, Piorino F, Barboza MJR, Nono MCA, Silva CRM. Influence of the oxidation in creep of Ti-6Al-4V Alloy. *Acta Microsc.* 2003;12:219–20.
- 7 Rajendran R. Gas turbine coatings – An overview. *Eng Fail Anal.* 2012;26:355–69.
- 8 Smialek JL, Harder BJ, Garg A. Oxidative durability of TBCs on Ti₂AlC MAX phase substrates. *Surf Coatings Technol.* 2016;285:77–86.
- 9 Gupta M, Eriksson R, Sand U, Nylén P. A diffusion-based oxide layer growth model using real interface roughness in thermal barrier coatings for lifetime assessment. *Surf Coatings Technol.* 2015;271:181–91.
- 10 Evans HE. Oxidation failure of TBC systems: An assessment of mechanisms. *Surf Coatings Technol.* 2011;206(7):1512–21.
- 11 Freitas FE de, Reis AG dos, Reis DAP. comportamento em fluência da liga Ti6Al4V com recobrimento como forma de barreira térmica depositado por aspersão térmica a plasma. In: 73º Congresso Anual da ABM, São Paulo. 2018;73(73): 397–406
- 12 Sahoo R, Jha BB, Sahoo TK. Effect of Microstructure on the Creep Properties of Ti-6Al-4V Alloys: An Analysis. *Trans Indian Inst Met.* 2018;71(7):1573–82.
- 13 Reis DAP, Moura Neto C, Silva CRM, Barboza MJR, Piorino Neto F. Effect of coating on the creep behavior of the Ti-6Al-4V alloy. *Mater Sci Eng A.* 2008;486(1–2):421–6.
- 14 Schulz U, Leyens C, Fritscher K, Peters M, Saruhan-Brings B, Lavigne O, et al. Some recent trends in research and technology of advanced thermal barrier coatings. *Aerospace Science and Technology.* 2003;7(1):73–80.
- 15 Seo D, Ogawa K, Nakao Y, Miura H, Shoji T. Influence of high-temperature creep stress on growth of thermally grown oxide in thermal barrier coatings. *Surf Coatings Technol.* 2009;203(14):1979–83.
- 16 Heimann RB. *Plasma-Spray Coating: Principles and Applications.* Wiley; 1996.
- 17 Fauchais P, Montavon G, Bertrand G. From Powders to Thermally Sprayed Coatings. *J Therm Spray Technol.* 2010 Jan 2;19(1–2):56–80.
- 18 Reis AG dos, Reis DAP, de Moura Neto C, Barboza MJR, Oñoro J. Creep behavior and surface characterization of a laser surface nitrided Ti-6Al-4V alloy. *Mater Sci Eng A.* 2013;577:48–53.
- 19 Antou G, Montavon G, Hlawka F, Cornet A, Coddet C, Machi F. Modification of thermal barrier coating architecture by in situ laser remelting. *J Eur Ceram Soc.* 2006;26(16):3583–97.
- 20 Zhu C, Li P, Javed A, Liang GY, Xiao P. An investigation on the microstructure and oxidation behavior of laser remelted air plasma sprayed thermal barrier coatings. *Surf Coatings Technol.* 2012;206(18):3739–46.
- 21 Ahmadi-Pidani R, Shoja-Razavi R, Mozafarinia R, Jamali H. Improving the thermal shock resistance of plasma sprayed CYSZ thermal barrier coatings by laser surface modification. *Opt Lasers Eng.* 2012;50(5):780–6.
- 22 Zhao C, Zhao M, Shahid M, Wang M, Pan W. Restrained TGO growth in YSZ/NiCrAlY thermal barrier coatings by modified laser remelting. *Surf Coatings Technol.* 2017;309:1119–1125.
- 23 Freitas FE de, Briguente FP, Reis AG dos, Vasconcelos G de, Reis DAP. Investigation on the microstructure and creep behavior of laser remelted thermal barrier coating. *Surf Coatings Technol.* 2019;369:257–64.
- 24 ASTM International. *ASTM B265: Standard specification for titanium and titanium alloy strip, sheet, and plate.* West Conshohocken, PA; 2015.
- 25 Yi P, Xu P, Yi H, Zhan X, Mostaghimi J, Pershin L, et al. Effects of laser surface remelting on the molten salt corrosion resistance of yttria-stabilized zirconia coatings. *Ceram Int.* 2018;44(18):22645–55.
- 26 Batista C, Portinha A, Ribeiro RM, Teixeira V, Costa MF, Oliveira CR. Surface laser-glazing of plasma-sprayed thermal barrier coatings. *Appl Surf Sci.* 2005;247(1–4):313–9.
- 27 Morks MF, Berndt CC, Durandet Y, Brandt M, Wang J. Microscopic observation of laser glazed yttria-stabilized zirconia coatings. *Appl Surf Sci.* 2010;256(21):6213–8.
- 28 Lughy V, Tolpygo VK, Clarke DR. Microstructural aspects of the sintering of thermal barrier coatings. *Mater Sci Eng A.* 2004;368(1–2):212–21.

- 29 Hannink RHJ, Kelly PM, Muddle BC. Transformation Toughening in Zirconia-Containing Ceramics. *J Am Ceram Soc.* 2000;83(3):461–87.