COMPORTAMENTO EM FLUÊNCIA DA LIGA Ti6Al4V COM RECOBRIMENTO COMO FORMA DE BARREIRA TÉRMICA DEPOSITADO POR ASPERSÃO TÉRMICA A PLASMA*

Filipe Estevão de Freitas[1]
Adriano Gonçalves dos Reis[2]
Danieli Aparecida Pereira Reis[3]

Resumo
A liga Ti-6Al-4V tem sido aplicada em componentes aeronáuticos submetidos a altas temperaturas e, nessas condições, ocorre o fenômeno da fluência, que está associado com a falha do material. O revestimento de barreira térmica (TBC) de zircônia estabilizada com ítria (YSZ) depositado por aspersão térmica a plasma (APS) tem se tornado uma alternativa para aumentar a vida operacional das palhetas de turbina. O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento em fluência da liga Ti-6Al-4V com recobrimento TBC preparado por APS, determinando os parâmetros experimentais relacionados à fluência secundária. Os ensaios foram conduzidos em carga constante e ao ar em amostras de Ti-6Al-4V com estrutura equiaxial com e sem recobrimento TBC. Todas as amostras revestidas mostraram uma redução dos valores da taxa de fluência secundária e, consequentemente, maior resistência à fluência, que pode ser associada à proteção contra oxidação e à barreira térmica fornecidapelo revestimento. A análise da taxa de fluência sugere que o mecanismo de fluência dominante em todos os casos é a escalagem de discordâncias.
Palavras-chave:Fluência; Ti-6Al-4V;TBC; APS.

CREEP BEHAVIOR OF Ti6Al4V ALLOY WITH THERMAL BARRIER COATING TREATED BY AIR PLASMA SPRAYING

Abstract
Ti-6Al-4V alloy has been applied in aeronautical components submitted to high temperature and, in these conditions, the creep phenomenon occurs, which isassociated with material failure. Air plasma spray (APS) yttria-stabilized zirconia (YSZ) of thermal barrier coating systems (TBC) have become an alternative to increase the operational lifetime of turbine blades. The aim of this work was to evaluate the creep behavior of Ti-6Al-4V with TBC prepared by APS, determining the experimental parameters related to secondary creep. Constant load creep tests were conducted in air on equiaxed Ti-6Al-4V TBC and uncoated samples. All the coated samples showeda reduction of secondary creep rate values and, thereafter, higher creep resistance, which could be associated with oxidation protection and thermal insulation provided by the coating. Creep rate analysis suggests that the dominant creep mechanisms in all cases is the dislocation climb.
Keywords: Creep; Ti-6Al-4V;TBC;APS.

[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] *Engenheira química, doutora, Professor Adjunto, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.*

** Contribuição técnica ao 73º Congresso Anual da ABM – Internacional,parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 04 de outubro de 2018, São Paulo, SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Muitas aplicações em altas temperaturas, tais como turbinas as aeronáuticas, têm sido beneficiadas por décadas pelo desenvolvimento de novos materiais, o que tem permitido um aumento de temperatura de operação dos materiais. Atualmente, porém, as temperaturas de operação estão atingindo as temperaturas de fusão desses materiais. Com isso, novos materiais, incluindo ligas baseadas em metais de alto ponto de fusão e técnicas de tratamento superficial, têm sido profundamente examinadas como alternativas pelos grupos acadêmicos e industriais [1].

Aplicações em altas temperaturas demandam materiais que possuam uma variedade de propriedades, tais como alta resistência mecânica, dureza, resistência à fluência, à fadiga, bem como à degradação pela interação com o ambiente, e os materiais metálicos são instáveis em muitos ambientes de alta temperatura [2]. A fluência é caracterizada por um escoamento lento do material. Quando um material está submetido a carga e temperatura constantes, a diminuição da área da seção transversal gera um aumento na tensão e ocorre sua ruptura quando é atingido um limite onde o material não pode mais resistir à carga aplicada [3]. Esse fenômeno é reconhecido como um importante problema da área industrial, devido ao crescente nível de exigência das condições de operação dos equipamentos utilizados junto a indústrias, como usinas de geração de energia, instalações químicas e indústrias aeroespaciais [4].

O titânio e suas ligas possuem algumas propriedades muito atrativas, fazendocom que sejam utilizadas em muitas aplicações. Algumas das suas vantagens são: resistência à corrosão e à erosão e baixa massa específica. Esses materiais são largamente utilizados nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, química e petroquímica, de implantes médicos, de materiais esportivos, entre outras, e seu uso vem aumentando [5,6]. Dentre as ligas de titânio, a liga Ti-6Al-4V é a mais importante. As propriedades benéficas da liga Ti-6Al-4V, tais como baixa massa específica e baixo módulo de elasticidade, têm resultado em alta utilização nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, particularmente para aplicações que requerem resistência em altas temperaturas. Por isso, é importante entender seu comportamento em deformação sob elevadas temperaturas [7-9]

Um fator de limitação das ligas de titânio é que, em geral, absorvem oxigênio, resultando na formação de uma camada de óxido quando expostas a temperaturas acima de 500 ºC, limitando a resistência em temperaturas elevadas. Portanto, para que as ligas de titânio possam ser utilizadas sob essas condições, a penetração de oxigênio deve ser reduzida [10].

A oxidação pode ter uma importante influência sobre as propriedades em temperaturas elevadas. A penetração intergranular do óxido geralmente implica em uma diminuição do tempo de ruptura por fluência e a vida em serviço do material é reduzida quando operando em atmosfera de combustão de gases quentes ou em meios corrosivos [7-9].

Portanto, recobrimentos podem ser utilizados como técnica para aumentar a vida útil ou a temperatura de trabalho das ligas de titânio em motores de turbinas a gás. A eficiência desses recobrimentos depende dos materiais utilizados e do processo utilizado para obtê-los [11].

Recobrimentos como forma de barreira térmica (TBC – *ThermalBarrierCoating*) servem como barreiras à ação de oxigênio, oferecendo uma proteção contra oxidação para as ligas dos substratos sob condições de fluxo de calor e são, em princípio, passíveis de serem usados em ligas de titânio por longos tempos em altas

temperaturas. Esse tipo de recobrimento oferece também um potencial para aumentar significativamente a eficiência e minimizar emissões de dióxido de carbono de motores de turbinas de aeronaves e de turbinas estacionárias a gás para geração de energia [12].

O sistema TBC consiste em uma camada de ligação metálica (BC – *Bond Coating*) aderida ao substrato, geralmente do tipo MCrAlY (M = Ni, Co, Fe ou suas combinações); uma camada intermediária, usualmente alumina, causada por um processo de difusão do BC com o oxigênio 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 Coating*) de zircônia estabilizada com ítria, de baixa condutividade térmica [12-14].

Aspersão térmica por plasma (*Air Plasma Spray* – APS) é uma técnica para a deposição de recobrimentos onde os materiais a serem depositados nas formas de pó, arame ou vareta, são alimentados em uma tocha ou pistola e aquecidos próximo do seu ponto de fusão. As gotículas são projetadas contra a superfície do substrato a ser revestido por um fluxo de gás. Com o impacto, as gotículas tornam-se finas partículas lamelares que se aderem à superfície, sobrepõem-se e então se solidificam [15].

O tempo de vida de discos e palhetas de turbinas a gás estacionárias e aeronaves tem sido aumentado significativamente com o uso de recobrimentos como forma de proteção para as ligas utilizadas na fabricação desses componentes [16]. Além disso, estudos têm sido realizados na liga Ti-6Al-4V com diversos tipos de recobrimentos e tratamentos superficiais com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas em altas temperaturas e a resistência à oxidação [17-20].

O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento em fluência da liga de Ti-6Al-4V com recobrimento como forma de barreira térmica (TBC) depositado por aspersão térmica. Esse estudo integra-se numa área inovadora por avaliar o comportamento em fluência do TBC, mostrando-se importante no cenário tecnológico devido à necessidade de aprimoramento das propriedades da liga Ti-6Al-4V em temperaturas elevadas e na aplicação dessa liga em ambientes oxidantes e agressivos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Adquiriu-se a liga Ti-6Al-4V na forma de barras cilíndricas com 1 m de comprimento e 12,7 mm de diâmetro na condição forjada e recozida a 190 ºC durante 6 horas e resfriada ao ar. A composição dos principais elementos são $Ti_{89,16}Al_{6,61}V_{4,23}$ (% peso), atendendo aos requisitos da norma ASTM B265-15 [21].

Os corpos de prova (CDPs) para o teste de fluência foram confeccionados de acordo com as especificações, sistemas de garras e extensômetros disponíveis, atendendo à norma ASTM E139-11 [22].

Os corpos de prova confeccionados para o ensaio de fluência foram preparados por aspersão térmica a plasma (APS). Primeiramente, foi realizado a aplicação da camada metálica de NiCrAlY (*Bond CoatAmdry 962*) com tamanho de partícula de aproximadamente 106 ± 53 µm [23] e camada média de 140 ± 40 µm sobre o substrato. Em seguida, foi realizada a aplicação da camada cerâmica de zircônia estabilizada com 8% peso de ítria (*Top CoatMetco 204NS-G*) com faixa de tamanho de partícula de aproximadamente 125 ± 11 µm [24] e camada média de 290 ± 40 µm sobre a camada metálica. Esse processo de aspersão térmica foi efetuado no equipamento: pistola *SulzerMetco 9M*, alimentador de pós *SulzerMetco 9MP* e

controlador dos gases *Praxair PC-100*. A Figura 1 apresenta o corpo de prova com recobrimento.

Figura 1. Corpo de prova com recobrimento TBC.

Para o ensaio de fluência, utilizou-se fornos da marca Mayes, nos quais foram adaptados os sistemas elétricos e controladores, e desenvolvido software específico, seguindo as exigências da norma ASTM E139-11 [18]. Os ensaios de fluência foram realizados na modalidade carga constante nas condições especificadas na Tabela 1 para as amostras de Ti-6Al-4V com estrutura equiaxial (sem recobrimento) e aquelas com recobrimento TBC.

Tabela 1. Condições dos ensaios de fluência das amostras Ti-6Al-4Vequiaxial com e sem recobrimento TBC

Temperatura (ºC)	Tensão (MPa)
500	125
600	125
	250
	319
700	125

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaio de fluência

A Figura 2 apresenta as curvas de fluência correspondentes à deformação verdadeira (ε) como função do tempo, onde σ é a tensão aplicada e T é a temperatura do ensaio. Todos os ensaios foram conduzidos até a ruptura dos corpos de prova. Observam-se curvas típicas de fluência em todas as condições, com a maior vida em fluência dominada pela região estacionária, onde a taxa permanece praticamente constante com o tempo devido aos mecanismos de encruamento e recuperação.

A Tabela 2 apresenta a relação dos principais parâmetros experimentais obtidos a partir das curvas, onde t_p corresponde ao tempo relativo ao estágio primário, $\dot{\varepsilon}_s$é a taxa de fluência estacionária, obtida a partir da inclinação da região linear na curva de fluência (estágio secundário), t_f é o tempo final de fratura e ε_f corresponde à deformação na fratura.

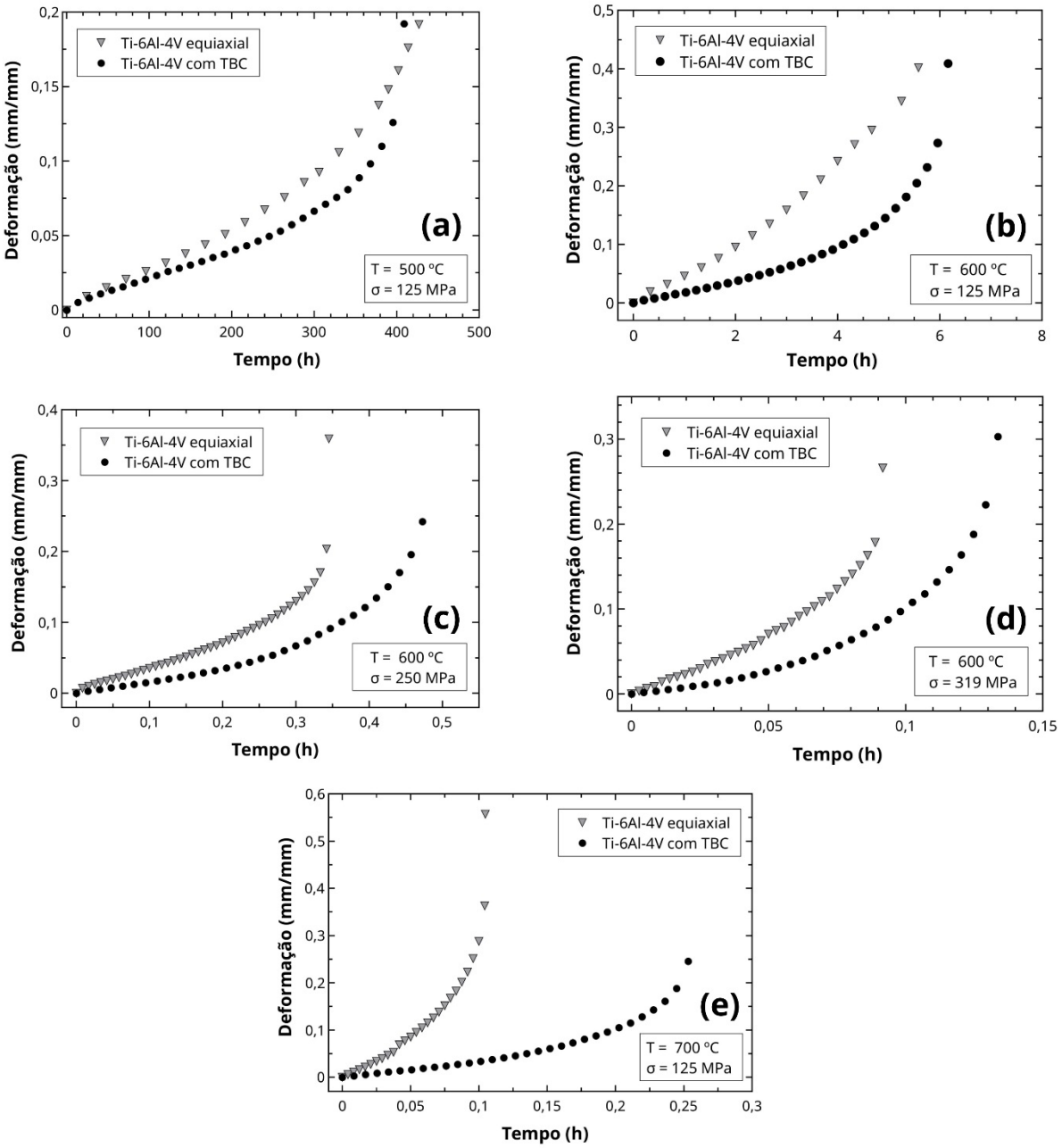

Figura 2. Curvas de fluência da liga Ti-6Al-4V a) 500 °C e 125 MPa; b) 600 °C e 125 MPa; c) 600 °C e 250 MPa; d) 600 °C e 319 MPa, e) 700 °C e 125 MPa.

Tabela 2. Dados de fluência obtidos

Tratamento	Temperatura (ºC)	Tensão (MPa)	t_p (h)	$\dot{\varepsilon}_s$ (h^{-1})	t_f (h)	ε_f (mm/mm)
Ti-6Al-4V equiaxial	500	125	16,0	0,0003	427	0,1918
	600	125	0,67	0,0410	5,58	0,4017
		250	0,05	0,4030	0,35	0,3590
		319	0,02	1,2703	0,09	0,2658
	700	125	0,01	1,5084	0,11	0,5569
Ti-6Al-4V com TBC	500	125	27,3	0,0002	409	0,1922
	600	125	0,21	0,0187	6,16	0,4092
		250	0,03	0,1580	0,47	0,2423
		319	0,01	0,4290	0,13	0,3032
	700	125	0,01	0,3050	0,25	0,2458

Os resultados da Tabela 2 mostram que ocorre um aumento da taxa de fluência estacionária, uma diminuição do tempo correspondente ao estágio primário e a redução do tempo de fratura com o aumento da tensão para uma mesma temperatura de 600 ºC e o mesmo se repetiu com o aumento da temperatura numa mesma tensão de 125 MPa, considerando as condições avaliadas nesse trabalho.
A resistência à fluência é determinada, principalmente, pela taxa de fluência estacionária. Em relação às amostras sem recobrimento, a taxa de fluência secundária daquelas que possuíam TBC tiveram uma redução de 33% na condição de 500 ºC, de aproximadamente 60% nas condições de 600 ºC e 80% na condição de 700 ºC, conforme pode ser verificado na Figura 3. Observa-se que, quanto maior a temperatura de trabalho, maior é a eficiência do recobrimento cerâmico sob estas condições de ensaio. Além disso, uma maior resistência à fluência da liga Ti-6Al-4V com TBC pode ser associada com a melhora da barreira térmica e redução da oxidação provida pelo recobrimento.

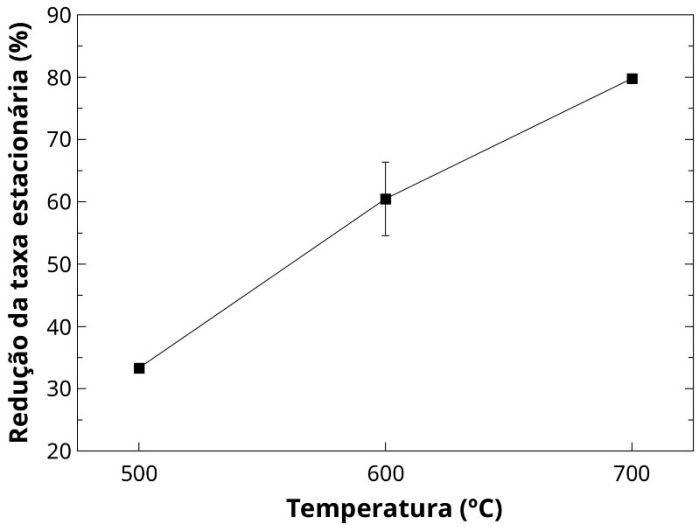

Figura 3. Redução da taxa estacionária da liga Ti-6Al-4V com TBC em relação àquela sem recobrimento.

3.2 Determinação do expoente de tensão

A Lei de Potência ou Lei de Norton (Equação 1) é uma relação muito utilizada para descrever o comportamento em fluência, que apresenta a dependência da taxa de fluência estacionária com a tensão [25]:

$$\dot{\varepsilon}_s = B\,\sigma^n \qquad (1)$$

onde $\dot{\varepsilon}_s$ é a taxa de fluência estacionária, B é uma constante característica do material, σ é a tensão aplicada durante o ensaio e n é o expoente de tensão.
A Figura 4 mostra a dependência da taxa de fluência estacionária com a tensão (na temperatura de 600 ºC) para obtenção do expoente de tensão (n), da liga com e sem recobrimento TBC.
Os mecanismos de fluência podem ser estimados pelos valores do expoente de tensão e da energia de ativação para fluência [25]. O expoente de tensão encontrado para os ensaios da estrutura equiaxial para a liga Ti-6Al-4V sem recobrimento foi de 3,59 e para a liga com TBC foi de 3,29. Esse parâmetro não infere o aumento da resistência do material em fluência, que é aferido somente pela

taxa de fluência estacionária, mas pode ser um indicativo do mecanismo dominante de fluência [25]. Como os valores estão próximos, sugere-se que o mecanismo possa ser o mesmo.

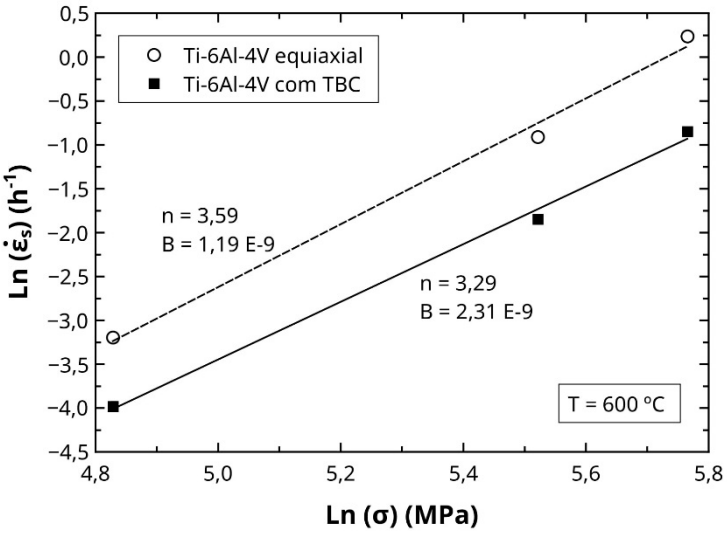

Figura 4. Dependência da taxa de fluência estacionária com a tensão (600 °C) para obtenção do expoente de tensão.

3.3 Determinação da energia de ativação para fluência

Como a deformação por fluência é um processo termicamente ativado, a Lei de Norton pode ser modificada para uma dependência com a temperatura, representada por uma equação do tipo Arrhenius [25]:

$$\dot{\varepsilon}_s = B_0 \sigma^n \exp\left(-\frac{Qc}{RT}\right) \quad (2)$$

onde B_0 é um fator dependente da tensão e da estrutura do material, Q_c é a energia de ativação para fluência, R é a constante universal dos gases e T é a temperatura absoluta. Valores de n e Q_c podem indicar qual é o mecanismo dominante de fluência (Figura 5).

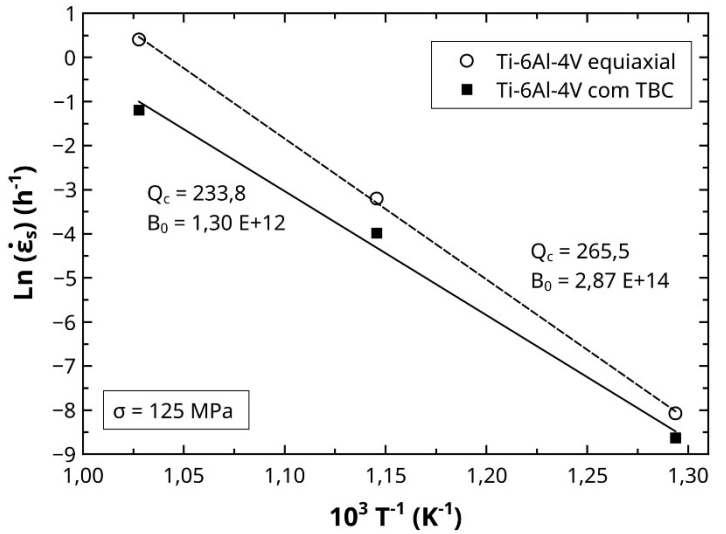

Figura 5. Dependência da taxa de fluência estacionária com o inverso da temperatura (K)para obtenção da energia de ativação.

A Figura 5 mostra a dependência da taxa de fluência estacionária com o inverso da temperatura em Kelvin (na tensão de 125 MPa) para obtenção da energia de ativação para fluência (Q_c), da liga com e sem recobrimento TBC.A energia de ativação encontrada para os ensaios da liga Ti-6Al-4V sem tratamento foi de 265,5 kJ/mol e para a liga com recobrimento TBC foi de 233,8 kJ/mol.
A análise realizada por Reis et al. [17] afirma que as taxas de fluência para o Ti-6Al-4V equiaxial com e sem TBC sugerem que o mecanismo de fluência a 500 e 600 ºC é consistente com a difusão no retículo cristalino controlado pelo processo de escalagem de discordância no Ti-α.Warren et al. [26] reportou que o expoente de tensão é n = 3,80 e a energia de ativação é Q_c = 240,0 kJ/mol para o Ti-6Al-4V sem tratamento na temperatura entre 600 e 680 ºC.Para a mesma liga sem recobrimento, Reis et al. [27] encontrou valores de n = 4,25 na temperatura de 600 ºC e Q_c = 218,0 kJ/mol para a faixa de 500 a 700 ºC.
Segundo Evans e Wilshire [25], n > 3 e valores de energia ativação próximos à energia de autodifusão do material indicam o mecanismo de escorregamento de discordância que ocorre em alta temperatura. A energia de ativação de autodifusão para o Ti-α encontra-se na faixa de 242 a 293 kJ/mol [28]. Com base nesses dados, conclui-se que a análise conjunta dos valores de expoentes de tensão e energia de ativação das condições apresentadas neste trabalho sugerem o mecanismo de escalagem de discordâncias que ocorre em alta temperatura como o mecanismo dominante de fluência para todos os casos.

4 CONCLUSÃO

As amostras da liga Ti-6Al-4Vequiaxial com recobrimento TBC apresentaram menores taxas de fluência estacionária e, portanto, maior resistência à fluência do que as amostras sem recobrimento. Esses resultados estão relacionados à proteção contra a oxidação e à melhora da barreira térmica (menor condutividade térmica) oferecida à liga com recobrimento.
Para todas as condições de ensaio, a taxa de fluência estacionária pôde ser descrita pelas equações da lei de potência de Norton, onde os valores encontrados para o expoente de tensão foram de 3,59 e 3,29 e os valores de energia de ativação para fluência foram de 265,5 e 233,8 kJ/mol para a liga sem recobrimento e com TBC, respectivamente. A análise desses valores sugere que o mecanismo de fluência dominante é controlado por escalagem de discordâncias em todos os casos.

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 Perepezko JH. The Hotter the Engine, the Better. Science. 2009;326(5956):1068–1069.
2 Shifler D. Future research directions to understanding factors influencing advanced hightemperature materials. In: Proceedings of the first department of defense corrosion conference.Gaylord National, Washington DC: Department of Defense; 2009. p. 37–34.

3 Meyers MA, Chawla KK. Princípios de metalurgia mecânica. 2nd ed. São Paulo, SP: EdgardBlücher; 1982. Cap. 14, p. 406–420.
4 Eylon D, Fujishiro S, Postans PJ, Froes FH. High-Temperature Titanium Alloys – A Review.Journal of Metals. 2013;36(11):55–62.
5 Leyens C, Peters M. Titanium and titanium alloys. 3rd ed. Weinheim: Wiley; 2003. 499 p.
6 Zhecheva A, Sha W, Malinov S, Long A. Enhancing the microstructure and propertiesof titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods. Surface and Coatings Technology. 2005;200(7):2192–2207.
7 Razavi RS, Gordani GR, Man HC. A review of the corrosion of laser nitrided Ti-6Al-4V. Anti-CorrosionMethodsandMaterials. 2011;58(3):140–154.
8 Sakai T, Ohashi M, Chiba K, Jonas JJ. Recovery and recrystallization of polycrystallinenickel after hot working. ActaMetallurgica. 1988;36(7):1781–1790.
9 Lee WS, Lin CF. High-temperature deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy evaluated byhigh strain-rate compression tests. Journal of Materials Processing Technology. 1998;75(1–3):127–136.
10 Gurrappa I, Gogia AK. High performance coatings for titanium alloys to protect againstoxidation. Surface and Coatings Technology. 2001;139(2–3):216–221.
11 Almeida DS. Estudo de revestimentos cerâmicos sobre substrato metálico obtido por deposição física de vapores por feixe de elétrons para aplicação como barreira térmica [Tese(Doutorado em Ciência e Tecnologia dos Materiais e Sensores)]. São José dos Campos; 2005.
12 Evans HE. Oxidation failure of TBC systems: An assessment of mechanisms. Surface andCoatings Technology. 2011;206(7):1512–1521.
13 Schulz U, Leyens C, Fritscher K, Peters M, Saruhan-Brings B, Lavigne O, et al. Some recenttrends in research and technology of advanced thermal barrier coatings. Aerospace Scienceand Technology. 2003;7(1):73–80.
14 Seo D, Ogawa K, Nakao Y, Miura H, Shoji T. Influence of high-temperature creep stresson growth of thermally grown oxide in thermal barrier coatings. Surface andCoatings Technology. 2009;203(14):1979–1983.
15 Lima CC, Trevisan R. Aspersão térmica. 2nd ed. São Paulo, SP: Artliber; 2007. 152 p.
16 Quadakkers WJ, Shemet V, Sebold D, Anton R, Wessel E, Singheiser L. Oxidation characteristics of a platinized MCrAlY bond coat for TBC systems during cyclic oxidation at 1000°C. Surface and Coatings Technology. 2005;199(1):77–82.
17 Reis DAP, Moura Neto C, Silva CRM, Barboza MJR, PiorinoNeto F. Effect of coating on the creep behavior of the Ti–6Al–4V alloy. MaterSciEng A. 2008;486(1–2):421–6.
18 Oliveira AC, Oliveira RM, Reis DAP, Carreri FC. Effect of nitrogen high temperature plasma based ion implantation on the creep behavior of Ti-6Al-4V alloy. Appl Surf Sci. 2014;311:239–44.
19 Reis DAP, Reis AG, Yogi LM, Silva MM, Ueda M, Zepka S. Comparation between Laser Surface Nitriding and Nitrogen Plasma Immersion Ion Implantation (N-PIII) on Creep Behavior of Ti-6Al-4V Alloy. Mater Sci Forum. 2014;802:462–6.
20 Sugahara T, Martins GV, Montoro FE, Merij Neto A, Massi M, da Silva Sobrinho AS, et al. Creep behavior evaluation and characterization of SiC film with Cr interlayer deposited by HiPIMS in Ti-6Al-4V alloy. Surf Coatings Technol. 2017;309:410–6.
21 ASTM International. ASTM B265: Standard specification for titanium and titanium alloy strip, sheet, and plate. West Conshohocken, PA; 2015.
22 ASTM International. ASTM E139: Standard test methods for conducting creep, creep-rupture, and stress-rupture tests of metallic materials. West Conshohocken, PA; 2011.

23 Oerlikon. Material Product Data Sheet. Nickel chromium aluminum yttrium (NiCrAlY); 2018. OerlikonMetco. [acesso em 11 mai. 2018]. Disponível em: https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon_DSMTS-0102.6_NiCrAlY.pdf.
24 Oerlikon. Material Product Data Sheet. 8% yttria stabilized zirconia agglomerated and HOSP; 2018. OerlikonMetco. [acesso em 11 mai. 2018]. Disponível em: https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon_DSMTS-0001.10_8YO_ZrO_HOSP.pdf.
25 Evans RW, Wilshire B. Introduction to creep. London: The Institute of Materials; 1993. 115 p.
26 Warren J, Hsiung LM, Wadley HNG. High temperature deformation behavior of physical vapor deposited Ti-6Al-4V. Acta Metall Mater. 1995;43(7):2773–87.
27 Reis AG, Reis DAP, Moura Neto C, Barboza MJR, Oñoro J. Creep behavior and surface characterization of a laser surface nitridedTi–6Al–4V alloy. MaterSciEng A. 2013;577:48–53.
28 Palehan I, Rosen A. History dependent creep of Ti-6Al-4V alloy. Met Sci. 1978;12(3):163–5.