

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO EM FLUÊNCIA DA LIGA TI-6AL-4V COM ESTRUTURA MARTENSÍTICA E EQUIAXIAL A 600°C

Luciana Aparecida Narciso da Silva Brigunte ¹

Flávio Perpétuo Brigunte ²

Danieli Aparecida Pereira Reis ³

Carlos de Moura Neto ^{4†}

Fabília Assis Resende ⁵

Resumo

A liga Ti-6Al-4V apresenta propriedades importantes como alta resistência específica, boa resistência à corrosão e à fluência e estabilidade metalúrgica e tem sido bastante utilizada nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, em algumas aplicações que requerem resistência em altas temperaturas. Assim, é importante entender seu comportamento em deformação, sob temperaturas elevadas. Um método de se aumentar a resistência de um material é a realização de tratamentos térmicos que alterem sua microestrutura. Visando melhorar a resistência à fluência da liga Ti-6Al-4V foi realizado um tratamento térmico específico para obter uma microestrutura martensítica onde o material foi aquecido a 1.050°C por 30 minutos e resfriado em água até a temperatura ambiente. O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento em fluência da liga Ti-6Al-4V com estrutura equiaxial, e após tratamento térmico, estrutura martensítica na temperatura de 600°C e nas tensões de 125 MPa, 250 MPa e 319 MPa. Os ensaios de fluência foram realizados à carga constante e a liga com estrutura martensítica apresenta maior resistência à fluência com maior tempo de vida em fluência e redução da taxa de fluência estacionária.

Palavras-chave: Ti-6Al-4V; Tratamento térmico; Fluência.

CREEP BEHAVIOR OF TI-6AL-4V WITH MARTENSITIC AND EQUIAXED STRUCTURES AT 600°C

Abstract

Ti-6Al-4V presents important properties as high specific strength, corrosion and creep resistance and metallurgical stability and it has been used in aerospace and aeronautical industries in some applications that requires high temperatures resistance. For these reasons is important understand Ti-6Al-4V deformation at high temperatures. A method of increasing the resistance of a material is heat treatments which can modify its microstructure. Aiming the improvement of Ti-6Al-4V creep resistance it was performed a specific heat treatment in this alloy to obtain a martensitic microstructure. The material was heat-treated at 1,050°C for 30 minutes and cooled in water until room temperature. The aim of this work is to evaluate Ti-6Al-4V creep behavior with equiaxed and martensitic microstructure at 600°C and stress conditions of 125 MPa, 250 MPa e 319 MPa at constant load. The alloy with martensitic structure showed higher creep resistance with a longer time in creep and lower steady-state creep rate.

Keywords: Ti-6Al-4V; Heat treatment; Creep.

¹Mestre e doutoranda em Engenharia Mecânica e Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil. E-mail: lunarsi@bol.com.br

²Mestre em Engenharia Mecânica, Doutorando em Engenharia Mecânica e Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil. E-mail: f.brigunte@hotmail.com

³Doutora em Engenharia Aeroespacial, Professora, Universidade Federal de São Paulo – Unifesp, Sócia Titular da ABM, São José dos Campos, SP, Brasil. E-mail: danielireis@hotmail.com

⁴Professor Associado II, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Sócio Titular da ABM, São José dos Campos, SP, Brasil. (in memoriam)

⁵Engenheira de Materiais, Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo – USP, Lorena, SP, Brasil. E-mail: fabricia.aresende@gmail.com

I INTRODUÇÃO

Materiais para aplicações em temperaturas elevadas consistem em sua maioria de combinações possíveis com ferro, níquel, cobalto, titânio, molibdênio, tungstênio, alumínio, nióbio e elementos residuais [1].

As ligas de titânio são utilizadas nas indústrias aeronáuticas, aeroespacial entre outras e o uso vem aumentando devido à combinação de suas propriedades mecânicas, baixa massa específica, alta resistência específica e resistência à corrosão [2].

A liga Ti-6Al-4V é a mais importante das indústrias de titânio e tem sido bastante utilizada nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, particularmente para aplicações que requerem resistência em altas temperaturas, razão da importância no entendimento de seu comportamento em deformação, sob temperaturas elevadas [3,4].

As propriedades e desempenho de um material dependem da sua composição química, da estrutura cristalina, do processamento e dos tratamentos térmicos a que foram submetidos. Em ligas de titânio, podem ser obtidas diferentes microestruturas por meio de tratamentos termomecânicos, isto é, uma combinação de trabalho a frio ou quente seguido de tratamentos térmicos [5,6]. Portanto, para se aumentar a resistência à fluência de um material, podem se realizar tratamentos térmicos na liga estudada para se produzir uma estrutura específica com diferentes características mecânicas e estruturais da liga.

Para a liga Ti-6Al-4V, o tratamento térmico pode ser realizado acima ou abaixo da temperatura β -*transus* e a microestrutura resultante pode ser lamelar ou equiaxial. Um resfriamento lento a partir da região da fase β resulta em uma microestrutura lamelar. Por outro lado, um resfriamento rápido leva a uma transformação martensítica, resultando em uma microestrutura acicular, como agulhas muito finas. A microestrutura equiaxial é resultado de um processo de recristalização. Em geral, maiores ductilidade e resistência à fadiga são obtidas na microestrutura equiaxial e elevadas tenacidade à fratura e resistência à fluência são obtidas nas microestruturas lamelares [5]. A decomposição da fase β pode se dar por um processo de difusão (nucleação e crescimento), ou por um processo sem difusão (transformação martensítica) [7].

Para a estrutura martensítica, o tratamento é realizado pela permanência a 1.050°C por 30 minutos, seguido por têmpera em água. A microestrutura martensítica é caracterizada como uma microestrutura acicular consistindo de colônias de grãos lamelares grossos [8].

O fenômeno da fluência consiste no acúmulo lento e progressivo de deformação ao longo do tempo, manifestando-se em todos os sólidos cristalinos em condições favoráveis de temperatura e tensão [9]. 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 [10].

O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento em fluência da liga Ti-6Al-4V como recebida, estrutura equiaxial, e após tratamento térmico, estrutura martensítica na temperatura de 600°C e nas tensões de 125 MPa, 250 MPa e 319 MPa. Os ensaios de fluência foram realizados na modalidade de carga constante e a liga com estrutura martensítica apresenta maior resistência à fluência do que a liga com estrutura equiaxial com maior tempo de vida em fluência e redução da taxa de fluência estacionária.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizada a liga Ti-6Al-4V adquirida da Empresa Multialloy Eng. Mat. Ltda. na indústria nacional, na condição forjada e recozida a 190°C durante 6 horas e resfriada ao ar (estrutura equiaxial). A caracterização quanto à composição química dos principais elementos (%p), atende aos requisitos da norma ASTM B265-10 [11].

2.1 Tratamentos Térmicos

O tratamento térmico para obtenção da estrutura martensítica consistiu no encapsulamento a vácuo dos corpos-de-prova em tubos de quartzo com diâmetro interno de 21 mm, colocados em um forno tubular Lindberg/blue-M modelo STF 54434C, sob atmosfera de argônio. As amostras permaneceram na temperatura de 1.050°C por 30 minutos, seguindo-se de resfriamento em água até temperatura ambiente.

2.2 Ensaio de Fluência

Os ensaios de fluência foram realizados em fornos da marca Mayes. Aos fornos foram adaptados sistemas elétricos e controladores, desenvolvidos pela BSW Tecnologia, Indústria e Comércio Ltda. pela indústria nacional, de acordo com as exigências da norma ASTM E139-06 [12]. Para coleta de dados relativos ao alongamento dos corpos-de-prova e medidas de temperatura, em períodos de tempo pré-determinados, foi utilizado o Software Antares. Utilizou-se um transdutor do tipo LVDT Schlumberger D 6,50 para a obtenção das medidas de alongamento e um termopar tipo Cromel-Alumel AWG24 para o controle de temperatura.

3 RESULTADOS

3.1 Tratamento Térmico

Após tratamento térmico foi obtida a estrutura martensítica. As Figuras 1a e b apresentam imagens

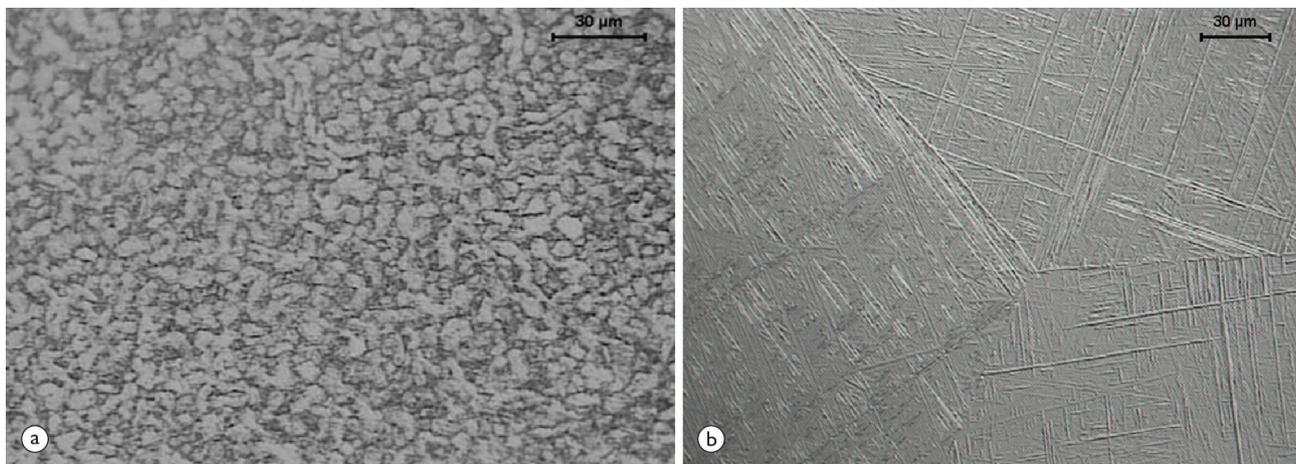


Figura 1. Micrografia da liga Ti-6Al-4V: (a) como recebida, equiaxial; (b) estrutura martensítica [9,13].

obtidas via microscópio óptico das estruturas equiaxial e martensítica.

3.2 Ensaio de Fluência

A liga Ti-6Al-4V como recebida, estrutura equiaxial, e após tratamento térmico, estrutura martensítica, foi submetida a ensaios de fluência a 600°C nas condições de 125 MPa, 250 MPa e 319 MPa, na modalidade de carga constante. As Figuras 2-4 apresentam as curvas de fluência correspondentes à deformação verdadeira, ε , como função do tempo.

A Tabela I apresenta a relação dos principais parâmetros experimentais obtidos a 600°C, a partir das curvas experimentais, em que σ é a tensão aplicada, e $\dot{\varepsilon}_s$ é a taxa de fluência estacionária, obtida a partir da inclinação da região linear na curva de fluência (estágio secundário). O valor de t_p corresponde ao tempo relativo ao estágio primário. O valor t_f é o tempo final de fratura e ε_f corresponde à deformação de fratura.

4 DISCUSSÕES

Pela análise das Figuras 1a e b pode-se observar que a estrutura martensítica apresenta uma microestrutura mais grosseira quando comparada à microestrutura equiaxial, caracterizada por grãos maiores em formato acicular (forma agulhas), onde a fase α se forma a partir dos contornos de grãos β .

A microestrutura martensítica consiste de colônias de grãos lamelares grossos com tamanho médio de 300 μm [8].

Os testes de fluência foram conduzidos até a ruptura dos corpos-de-prova e as curvas obtidas mostram curvas típicas com os três estágios de fluência. Pode ser observado um período inicial, onde ocorre uma diminuição da taxa de fluência primária, associado com o endurecimento

Tabela I. Dados de fluência obtidos a 600°C e 125 MPa, 250 MPa e 319 MPa.

Condição	σ (MPa)	t_p (h)	$\dot{\varepsilon}_s$ (1/h)	t_f (h)	ε_f (mm/mm)
Equiaxial	125	0,83	0,063	6,19	0,674
Martensita		2,00	0,006	32,52	0,347
Equiaxial	250	0,04	0,374	0,34	0,203
Martensita		0,20	0,072	1,75	0,169
Equiaxial	319	0,011	1,513	0,09	0,266
Martensita		0,050	0,199	0,56	0,236

devido ao acúmulo de discordâncias. Entretanto, a maior vida em fluência é dominada pela região estacionária, onde a taxa de fluência permanece praticamente constante com o tempo, associada aos mecanismos de recuperação e encruamento.

Os resultados das curvas de fluência (Figuras 2-4) e da Tabela I mostram que a liga Ti-6Al-4V com estrutura martensítica a 600°C, sob tensões de 125 MPa, 250 MPa e 319 MPa, apresenta uma maior resistência à fluência com maiores valores de t_p , redução da taxa de fluência estacionária e maior tempo para ruptura. Esses dados demonstram que o tratamento térmico é efetivo em relação ao comportamento mecânico da liga em fluência.

O maior tamanho médio de grão da estrutura martensítica com formato acicular exerce um papel significativo no aumento da resistência à fluência da liga Ti-6Al-4V quando comparada à estrutura equiaxial. Essa maior resistência pode ser associada às “agulhas” da estrutura martensítica, que agem como obstáculos à movimentação de discordâncias e ao seu maior tamanho médio de grão, que pode diminuir a deformação por fluência devido à redução do escorregamento no contorno de grão.

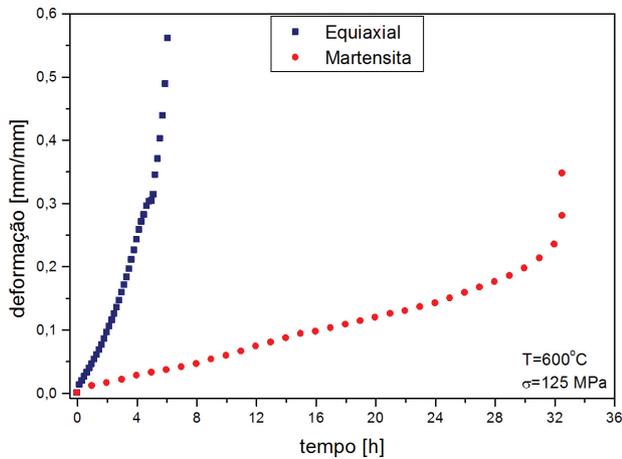


Figura 2. Curva de fluência Ti-6Al-4V com estrutura equiaxial e martensítica a 600°C e 125 MPa.

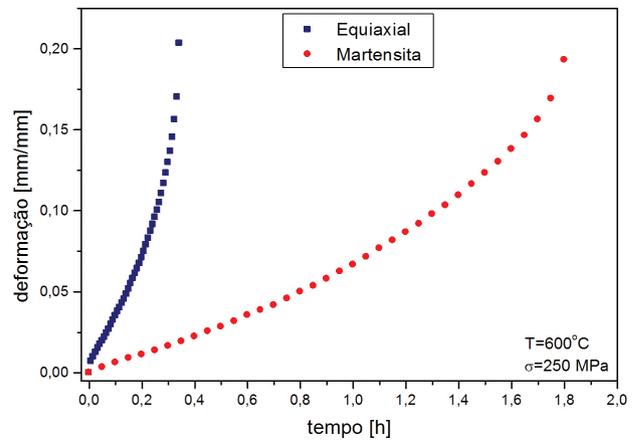


Figura 3. Curva de fluência Ti-6Al-4V com estrutura equiaxial e martensítica a 600°C e 250 MPa.

5 CONCLUSÕES

A estrutura martensítica apresenta grãos maiores com formato acicular e apresenta uma maior resistência à fluência com maiores valores de tempo de fluência primária, redução da taxa de fluência estacionária e maior tempo para ruptura.

O maior tamanho médio de grão da estrutura martensítica com seu formato acicular exerce um papel significativo no aumento da resistência à fluência da liga Ti-6Al-4V quando comparada à estrutura equiaxial.

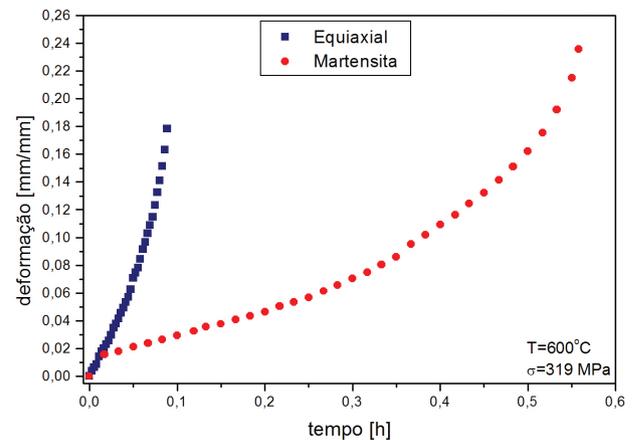


Figura 4. Curva de fluência Ti-6Al-4V com estrutura equiaxial e martensítica a 600°C e 319 MPa.

REFERÊNCIAS

- 1 Siegel M. Tendências em ligas para temperaturas elevadas. *Meturgia & Materiais ABM*. 1996;52:208-211.
- 2 Leyens C, Peters M. Titanium and titanium alloys: Fundamentals and applications. Weinheim: Wiley-VCH; 2003. <http://dx.doi.org/10.1002/3527602119>
- 3 Sakai T, Ohashi M, Chiba K, Jonas JJ. Recovery and recrystallization of Polycrystalline nickel after hot working. *Acta Metallurgica*. 1988;36:1781-90. [http://dx.doi.org/10.1016/0001-6160\(88\)90246-5](http://dx.doi.org/10.1016/0001-6160(88)90246-5)
- 4 Lee WS, Lin CF. High temperature deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy evaluated by strain-rate compression tests. *Journal of Materials Processing Technology*. 1998;75:127-36. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00302-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00302-6)
- 5 Matsumoto H, Yoneda H, Sato K, Kurosu S, Maire E, Fabregue D, *et al.* Room-temperature ductility of Ti-6Al-4V alloy with α' martensite microstructure. *Materials Science and Engineering A*. 2011,528:1512-20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2010.10.070>
- 6 American Society for Metals International. *ASM Handbook Volume 2 - Properties and Selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials*. Ohio: American Society for Metals International; 1990.
- 7 Gil FP, Ginebra MP, Manero JM, Planell JA. Formation of α' -Widmanstätten structure: effects of grain size and cooling rate on the Widmanstätten morphologies and on the mechanical properties in Ti_6Al_4V alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2001;329:142-52. [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-8388\(01\)01571-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-8388(01)01571-7)
- 8 Venkatesh TA, Conner BP, Lee CS, Giannakopoulos AE, Lindley TC, Suresh S. An experimental investigation of fretting fatigue in Ti-6Al-4V: the role of contact conditions and microstructure. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2001;32A:1131-46.

- 9 Reis DAP. Estudo de revestimento cerâmico e da atmosfera de ensaio na fluência de liga metálica refratária de titânio [tese de doutorado]. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; 2005.
- 10 Barboza MJR. Estudo e modelagem sob condições de fluência da liga Ti-6Al-4V [tese de doutorado]. São José dos Campos: Instituto Tecnológico da Aeronáutica; 2001.
- 11 American Society for Testing and Materials. ASTM B265-10: Standard Specification for Titanium and Titanium alloy strip, sheet, and plate. Philadelphia; 2010.
- 12 American Society for Testing and Materials. ASTM E139-06: Standard practice for conducting creep, creep-rupture and stress-rupture tests of metallic materials. Philadelphia; 2006.
- 13 Brigunte LANS. Estudo de tratamento térmico e revestimento como forma de barreira térmica sobre o comportamento em fluência da liga Ti-6Al-4V [dissertação de mestrado]. São José dos Campos: Instituto Tecnológico da Aeronáutica; 2011.

Recebido em: 19/10/2013

Aceito em: 17/12/2013