cbecimat26
26° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
22 a 26 de novembro de 2026
Costão do Santinho
Florianópolis-SC

Oxidation behavior of treated (66.7-x)Ti-xHf-22.2Si-11.1B (at.-%) alloys (x = 2, 4, 6 and 10 at.-%)

Leonardo Consentine[1]; Denilson Wagner Zaidan[1] Marcos Vinicius Bernardes[1], Thalles Henrique Faria de Souza[1]; Pedro Lorenz Cavalcante[1], Lucas Moreira Ferreira[2]; Nabil Chaia[3]; Allyson Helton Santos Bueno[4], Carlos Ângelo Nunes[5]; Alfeu Saraiva Ramos[1]

1.UNIFAL-MG; 2. COPPE-UFRJ; 3. CECAL GROUP; 4. UFSJ; 5. EEL-USP

Introdução

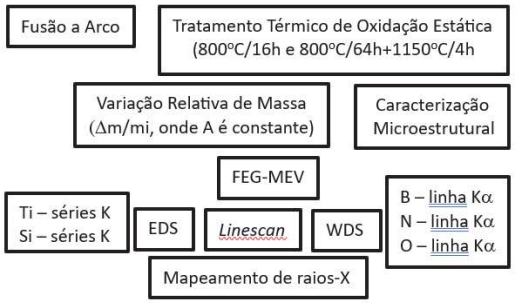
Materiais metálicos com potencial para uso em altas temperaturas e/ou em ambientes oxidantes tais como componentes automotivos (eixos, rotores, etc.) e dispositivos articulares ortopédicos devem apresentar resistência à oxidação.

Estudos anteriores de oxidação (900ºC e 1100ºC por até 48 h) de ligas Ti-Si-B contendo microestruturas de Ti+Ti_6Si_2B e Ti+Ti_6Si_2B+Ti_5Si_3 indicaram camadas externas de rutilo (TiO_2) das amostras, uma camada intermediária composta por uma mistura de TiO_2 e SiO_2 (tridimita) de granulação fina, além de outras fases (incluindo nitretos), além de uma camada interna formada pelas fases TiSi e $TiSi_2$.

Objetivo

Avaliar o efeito da adição de háfnio (2, 4, 6 e 10, em %-at.) na microestrutura e na resistência à oxidação de ligas (66,7-x)Ti-xHf-22,2Si-11,1B (%-at.) produzidas por fusão a arco e subsequente tratamento térmico a 1200°C por 16h.

Metodologia



Resultados e Discussão

Tabela 1. Ganho relativo de massa (%) das ligas (66,7-x)Ti-xHf-22,2Si-11,1B após oxidação estática a 800ºC/16h e 800ºC/64h+1150ºC/4h.

Liga / Temperatura	800ºC/16h	800ºC/64h+1150ºC/4h
66,7Ti-22,22Si-11,1B	0,27	3,13
64,7Ti-2Hf-22,22Si-11,1B	0,13	1,19
62,7Ti-4Hf-22,22Si-11,1B	0,37	2,33
60,7Ti-6Hf-22,22Si-11,1B	0,46	1,52
56,7Ti-10Hf-22,22Si-11,1B	0,98	3,07

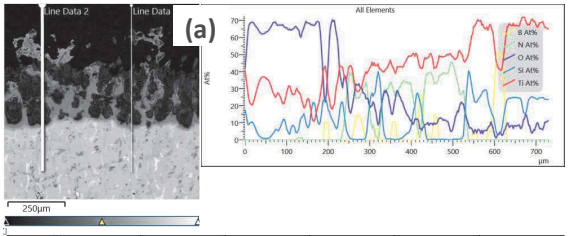
Conclusões

Difusão rápida do oxigênio a 800 °C, com mobilidade intersticial elevada, penetrando na subsuperfície da liga dissolvendo-se no Ti-a e especialmente na fase de Nowotny $(Ti,Hf)_5(Si,B)_3$), contornos de grão e interfaces eutéticas, numa zona de reação de oxidação interna em estágio intermediário (regime controlado pela difusão aniônica).

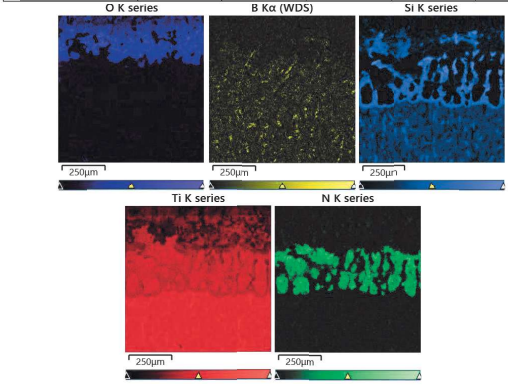
Após 800ºC/64h+1150ºC/4h, três regiões foram identificadas: (i) superfície: TiO_2 (rutilo); (ii) camada interna superior: Ti(N,O) majoritário + traços de BN ou TiB_2; (iii) camada mais interna: Ti_5Si_3(N,O)+TiN+TiB_2 (e/ou SiO_2).

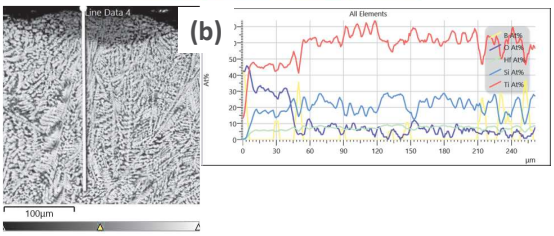
Agradecimentos: Os autores agradecem à FAPEMIG (APQ-01423-24), FINEP e FAPESP pelos recursos disponibilizados.

Resultados e Discussão

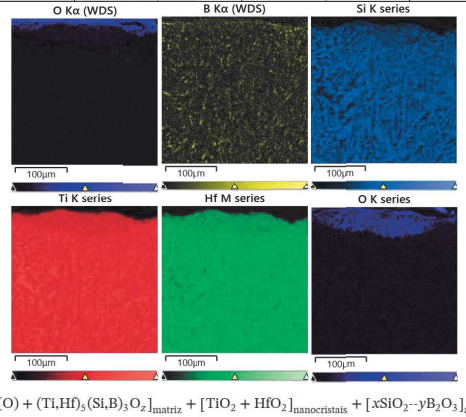


Fase / Elemento	Ti (%-at.)	N (%-at.)	Si (%-at.)	B (%-at.)	O (%-at.)
Ti	97,8-98,9	---	1,1-1,9	0,0-1,0	---
Ti_6Si_2B	65,1-66,7	---	22,7-23,3	10,6-11,7	---
Ti_5Si_3	60,5-63,5	---	34,5-36,5	0,0-5,0	---
TiB	50,4-51,1	---	0,1-0,2	48,8-50,0	---
TiB_2	36,6-36,7	---	0,0	63,3-63,4	---
TiNxOy	35,3-44,2	16,2-33,5	16,5-30,6	2,5-9,2	5,5-7,2
TiNxOy	42,6-44,2	38,6-46,2	0,3-0,5	3,2-4,8	7,0-13,9
TiO_2	32,5-33,2	---	0,1-0,3	0,0-0,6	66,6-66,7





Fase / Elemento	Ti (%-at.)	Hf (%-at.)	Si (%-at.)	B (%-at.)	O (%-at.)
Ti-α	86,9-93,7	5,3-6,0	0,7-5,7	0,0-1,4	---
Ti_6Si_2B	54,7-55,9	8,1-8,2	26,4-27,0	8,8-10,8	---
Ti_5Si_3	48,2-50,6	9,7-10,1	37,3-39,4	0,0-4,8	---
TiB	50,6-52,4	2,4-3,0	0,3	44,3-46,7	---
Ti-α	61,0-62,1	4,5-4,8	7,2-8,3	2,1-4,3	22,2-23,1
Superfície	35,5-36,1	4,4	12,3-12,5	5,5-6,0	41,5-41,8



$[\alpha\text{-}Ti(O) + (Ti,Hf)_5(Si,B)_3O_z]_{matriz} + [TiO_2 + HfO_2]_{nanocristais} + [xSiO_2\text{--}yB_2O_3]_{amorfo}$

Figura 1. Sobre as ligas oxidadas: (a) 66,7Ti-22,2Si-11,1B à 800º64h+1150oC/4h e (b) 61,7Ti-5Hf-22,2Si-11,1B à 800ºC/16h: microestrutura, *linescan*, medidas e mapeamento de raios-X por WDS.