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

Influência do silício nas propriedades de oxidação da liga refratária multicomponente $Nb_{45}Ta_{25}Ti_{15}Hf_{15}$

Diogo Pedrino Braga[1], Danusa de Araújo Moura[1], Thiago Carvalho da Silva[1], Guilherme dos Santos Vacchi[1], Carlos Alberto Della Rovere[1]

[1]Laboratório de Corrosão Munir Rachid, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP

Introdução

As ligas multicomponentes refratárias (RMAs) são candidatas a aplicações estruturais em temperaturas de até 1600 °C, acima do limite de cerca de 1100 °C das superligas à base de níquel [1]. No sistema NbTaTiHf (ligas de Senkov), a composição $Nb_{45}Ta_{25}Ti_{15}Hf_{15}$ combina alta resistência mecânica e tenacidade à temperatura ambiente, mas sua baixa resistência à oxidação limita o uso em serviço [2].

Objetivos

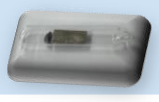
Avaliar revestimentos à base de Si, aplicados por *pack cementation*, como forma de reduzir a oxidação da liga $Nb_{45}Ta_{25}Ti_{15}Hf_{15}$. A meta é formar uma camada de óxido termodinamicamente estável (SiO_2) que proteja o material em ambientes oxidantes de alta temperatura [3].

Metodologia

Tabela 1 – Composição química nominal (% at.)

Liga	Nb	Ta	Ti	Hf
$Nb_{45}Ta_{25}Ti_{15}Hf_{15}$	45,00	25,00	15,00	15,00

Etapa 1
Síntese e homogeneização



Fusão a arco (pureza > 99,8%)
Encapsulamento a vácuo em quartzo
Tratamento térmico: 1100 °C por 48 h, resfriamento em água

Etapa 2
Pack cementation

Mistura (% massa): 10% Si, 80% Al_2O_3 (inerte) e 10% NaF (ativador)
Difusão: 900 °C por 4 h, atmosfera inerte
Meta: superfície rica em Si

Etapa 3
Oxidação cíclica

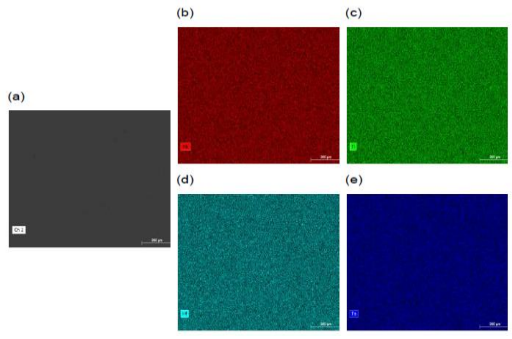


Temperatura: 1000 °C
Duração: até 100 h
Pesagens: 1, 2, 4, 8, 12, 24, 48 e 100 h

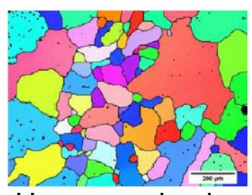
Etapa 4
Caracterização

DRX: identificação de fases
MEV-EDS/EBSD: composição química e microestrutura

Resultados e Discussão




Sintetizada


Homogeneizada

Liga	Nb	Ta	Ti	Hf
$Nb_{45}Ta_{25}Ti_{15}Hf_{15}$	43,88	25,69	15,45	14,99

Figura 1 – Mapeamento elementar e composição química (% at.) por MEV/EDS e mapas de orientação por MEV/EBSD da liga antes e após a homogeneização.

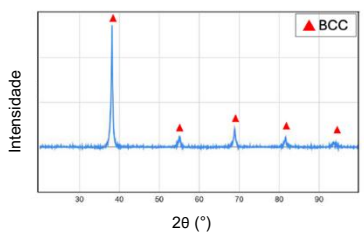


Figura 2 – Padrão de DRX da liga homogeneizada.

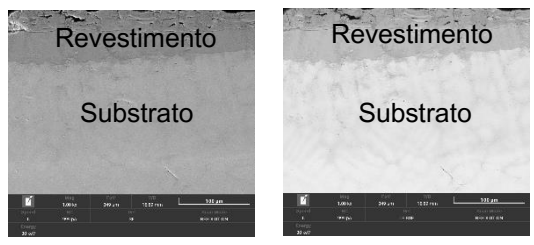


Figura 3 – MEV (SE/BSE) da liga revestida com Si por *pack cementation*. O mapeamento por EDS fica comprometido pela sobreposição dos picos Si Kα (1,74 keV) e Ta Mα (1,71 keV).

Tabela 2 – Aspecto das amostras sem e com revestimento após oxidação a 1000 °C.

Exposição (h)	Condição	
	Não revestida	Revestida
0h		
24h		
100h		

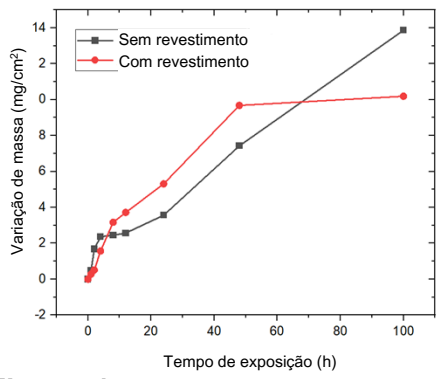


Figura 4 – Variação de massa em função do tempo a 1000 °C: sem revestimento (preto) e com revestimento de Si (vermelho).

Conclusões

Apesar de atuar como barreira inicial, o revestimento de Si perdeu a capacidade protetora a longo prazo devido à fraca adesão interfacial e à fragilidade da camada depositada. Esses resultados mostram a necessidade de investigar outras soluções de engenharia de superfície, ou combinações de elementos protetores, para melhorar a resistência à oxidação dessas ligas em altas temperaturas.

Referências e Agradecimentos

[1] MIRACLE, D. B.; SENKOV, O. N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. **Acta Materialia**, v. 122, p. 448-511, 2017.

[2] GORR, B. *et al.* Current status of research on the oxidation behavior of refractory high entropy alloys. **Advanced Engineering Materials**, v. 23, p. 2001047, 2021.

[3] SUN, J. *et al.* Silicide coating fabricated by HAPC/SAPS combination to protect niobium alloy from oxidation. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 8, n. 24, p. 15838-15847, 2016.

ppgcem Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais
LC Laboratório de Corrosão Munir Rachid – DEMa/UFSCar
CNPq Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
FAPESP Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
CAPES