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

Avaliação da dureza Vickers em Liga de Alta Entropia fundida em Cadinho de h-BN e submetida a Tratamento Termoquímico

Thomaz Augusto Guisard Restivo, Mauricio Fernando Vieira,
Adriana Aparecida Ambrosio; Claudio Padovani
UNISO – Universidade de Sorocaba

Introdução

As Ligas de Alta Entropia (HEAs) combinam pelo menos cinco elementos em teores elevados, apresentando elevada resistência mecânica, térmica e ao desgaste.
Para aplicações de alto desempenho em componentes industriais, são utilizados tratamentos termoquímicos de cementação sólida (*pack carburizing*) visando o endurecimento superficial.
O uso de cadinhos revestidos com nitreto de boro hexagonal (h-BN) serve como barreira de pureza na fusão de ligas com metais refratários, influenciando diretamente a dureza final do material.

Objetivos

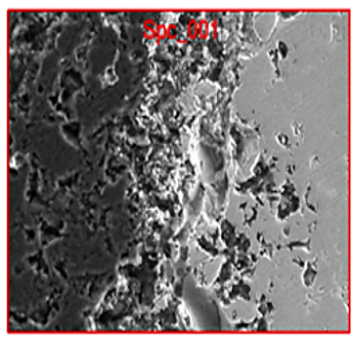
Desenvolver a liga de alta entropia $L\,5.7$ composta por sete elementos com estrutura CCC (cúbica de corpo centrado).
Avaliar a influência do revestimento de nitreto de boro (h-BN) no cadinho de fusão e do posterior tratamento de cementação sólida na dureza Vickers (HV) da liga.

Metodologia

I. *Composição e Fusão*: Liga de sete elementos refratários e de transição ($CrFe_3Mo_2Nb_{0,5}Ta_{0,5}TiV$) fundida em forno de indução em duas condições: cadinho de grafite não revestido (referência) e cadinho revestido com h-BN.
II. *Tratamento Termoquímico*: Cementação sólida em forno mufla a $900\ °C$ por 4 horas, com mistura cementante de 60% coque e 40% $CaCO_3$, seguida de resfriamento lento por 24 horas.
III. *Caracterização*: Preparação metalográfica das amostras (embutimento e polimento até lixa 1200), medição de Microdureza Vickers (HV), e análises microestruturais por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS).

Resultados e Discussão

Dureza Vickers Média:
Cadinho sem BN (bruto de fusão): 1175 HV.
Cadinho sem BN (após cementação): 1191 HV(aumento marginal de apenas $1{,}36\%$).
Cadinho com h-BN (bruto de fusão): 1405 HV($19{,}57\%$ superior à referência sem BN).
Cadinho com h-BN (após cementação): 1783 HV($49{,}71\%$ superior à amostra cementada sem BN, atingindo picos de até 1869 HV).
Mecanismos e Reações:
No cadinho sem BN, a lentidão na difusão de carbono (*sluggish diffusion*) e a complexidade de fases limitaram a formação de carbonetos superficiais.
Durante a fusão no cadinho com h-BN, ocorre a decomposição do revestimento e a dissolução de B e N na matriz líquida.
Elementos como Ti e Nb reagem formando nitretos (TiN, NbN) e boretos (TiB_2, NbB_2), promovendo endurecimento por dispersão, solução sólida intersticial e refino de grão.



Display name	Standard data	Quantification method	Result Type
Spc_001	Standardless	ZAF	Metal

Element	Line	Mass%	Atom%
N	K	2.31±0.06	5.97±0.07
O	K	19.47±0.06	44.32±0.06
Al	K	0.38±0.01	0.52±0.00
Si	K	0.51±0.01	0.63±0.00
V	K	3.66±0.02	2.65±0.01
Cr	K	14.08±0.03	9.85±0.01
Fe	K	49.61±0.06	32.54±0.02
Mo	L	9.98±0.03	3.52±0.00
Total		100.00	100.00
Spc_001			Fiting ratio 0.0138

Figura 1. Análise quantitativa por EDS (Espectro e Tabela) confirmando a presença de Nitrogênio na matriz da liga $L\,5.7$.

Conclusões

I. O revestimento do cadinho com nitreto de boro (h-BN) desempenhou papel decisivo no ganho de dureza Vickers da liga $L\,5.7$, atuando de forma sinérgica com a cementação sólida.
II. O aumento expressivo na dureza (1783 HV) decorre do enriquecimento em boro e nitrogênio e da subsequente precipitação de boretos e nitretos metálicos de alta dureza.
III. Contudo, essa forte reação pode causar certa fragilidade no material, conferindo-lhe um comportamento mecânico de perfil cerâmico.

Referências

RESTIVO, T. G. A.; RESTIVO, G. M.G.. Development of ultra hard multicomponent alloys. Journal of Materials Research 36, 1316–1327 (2021). Available at: https://doi.org/10.1557/s43578-021-00195-5
Oliveira, V. A. Strategies aimed at the formation and incorporation of hexagonal boron nitride in stainless steels. Dissertation (Master's). Federal University of São Carlos – UFSCAR. São Carlos/SP, 2021.
CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G.. Materials Science and Engineering – An Introduction. LTC, Rio de Janeiro/RJ, 2016.