



ANÁLISE DA ADERÊNCIA DE CAMADAS DE BORETOS EM MONEL 400

Categoria do Trabalho – Pôster

Anael P. Krelling^{1,*}, Jefferson L. Jeronimo¹, Ivandro Bonetti¹, Gustavo A. de Souza¹, Bruna Z. Camillo², Christian Pacheco³, Julio C. G. Milan³, César E. da Costa³.

¹ Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Joinville

² Centro Universitário SENAI/SC, UniSENAI – Campus Joinville

³ Universidade do Estado de Santa Catarina – Centro de Ciências Tecnológicas

* anael.krelling@ifsc.edu.br

RESUMO

Tratamento termoquímico de boretação sólida foi realizado em substratos de Monel 400 a 900 °C durante 1, 2 e 4 horas. A morfologia e estequiometria das camadas foram analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raios-X (DRX, respectivamente, comprovando a formação de camadas multifásicas de boretos de níquel com estequiometria Ni₃B, Ni₂B e Ni₄B₃. Quanto maiores os tempos de tratamento utilizados, maiores são as espessuras das camadas formadas. A maior espessura atingiu $43,71 \pm 1,10 \mu\text{m}$ para um tempo de tratamento de 4 horas. A aderência entre a camada de boretos e o substrato foi avaliada através qualitativamente através de testes de indentação Rockwell C de acordo com a norma VDI 3198 e mostrou-se adequada para todas as condições estudadas neste trabalho. Apenas trincas radiais e circunferenciais foram observadas, sem a presença de áreas de delaminação da camada de boretos.

Palavras-chave: Monel 400; Boretação; Aderência; Engenharia de Superfície.

INTRODUÇÃO

As ligas a base de níquel são muito utilizadas industrialmente devido a sua boa resistência à corrosão e oxidação (GUNES; KAYALI, 2014; GÜNEN et al., 2017). As ligas Monel (Cu-Ni), por exemplo, podem ser utilizadas como mancais e eixos em ambientes magnetizantes devido à suas características não magnéticas. Essas ligas são resistentes à corrosão em especial na água salgada sendo por isso utilizadas na indústria naval e petrolífera.



No entanto, essas ligas não apresentam bons resultados em termos de resistência mecânica e desgaste (MADAPURA et al., 1989).

Em ligas a base de níquel, pouca atenção tem sido dada à modificação da superfície através de tratamentos termoquímicos, em comparação com ligas ferrosas (DENG et al., 2015). Os tratamentos de superfície são alternativas importantes para possibilitar a otimização da resistência mecânica através da obtenção de propriedades específicas onde elas são mais necessárias. Dessa forma, o uso de revestimentos adequados pode aumentar a vida útil e melhorar o desempenho de componentes mecânicos.

Apesar das ligas a base de níquel serem amplamente utilizadas atualmente nos setores aeroespacial, nuclear, marítimo e automobilístico devido, principalmente, à sua elevada resistência à corrosão (PARIDA; MAITY, 2018), a baixa dureza e resistência mecânica dessas ligas restringem os campos nos quais elas podem ser aplicadas (GUNES et al., 2015).

Tratamentos difusionais como cementação, nitretação e boretação normalmente são utilizados para aumentar a dureza da superfície e melhorar a resistência ao desgaste dos materiais de engenharia. A cementação e a nitretação em ligas de níquel, no entanto, não são tão efetivas quanto a boretação devido a baixa solubilidade do C e do N no estado sólido (UEDA et al., 2000).

Boretção é um tratamento termoquímico no qual átomos de boro se difundem para o interior da matriz metálica. Por ser de pequeno tamanho, os átomos de boro difundem-se em uma variedade de materiais como metais ferrosos, ligas de níquel e cobalto, ligas refratárias, ligas de titânio e materiais sinterizados (BÉJAR; MORENO, 2006; MU et al., 2010). Dentre os meios para realização da boretação, os agentes boretantes sólidos têm suas vantagens sobre outros processos em termos toxicológicos e econômicos (KEDDAM, 2011) além de poderem ter sua composição alterada para otimização do processo.

A boretação de níquel comercialmente puro tem sido estudada por alguns pesquisadores empregando técnicas de boretação por pó sem adição de SiC a fim de se evitar a formação de silicetos (UEDA et al., 2000; GUNES et al., 2015). A boretação pode ocorrer por leito fluidizado (ANTHYMIDIS et al., 2002), por pasta (LOU et al., 2009) e por pó contendo SiC (GUNES; KAYALI, 2014). O SiC presente no pó de boretação toma parte nas reações químicas e induz a formação de silicetos de níquel (MUHAMMAD et al., 1999). Independente da técnica utilizada observou-se que o tratamento termoquímico de boretação promoveu aumento da dureza da superfície pela formação de uma camada de boretos ou boretos-silicetos. A formação desta camada é diretamente dependente do tempo e da temperatura utilizados nos tratamentos.



Simpósio Internacional de
Ensino Pesquisa e Extensão

2024

21 a 23 de maio
Joinville - SC

Transformação
Sustentável na
Indústria 4.0

Inovação,
Educação e
Impacto Social

Gratuito
e Híbrido

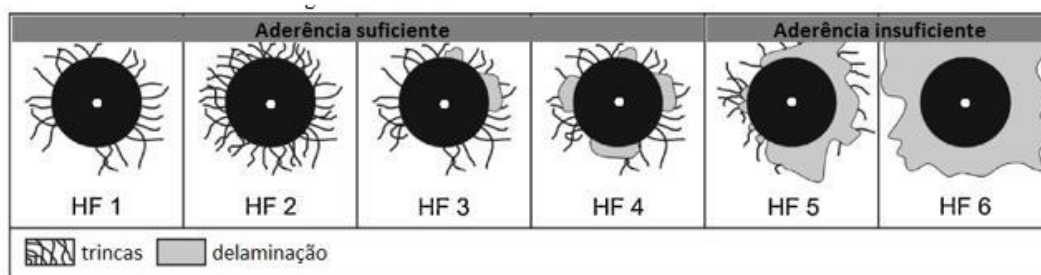
Dessa forma, o objetivo deste trabalho é compreender os efeitos do tratamento termoquímico de boretação, realizado sob diferentes condições, na microestrutura e aderência de camada da liga Monel 400.

METODOLOGIA

Tratamento de boretação será realizado em substratos de Monel 400 cuja composição química, em %peso é: 63% Ni min., 28–34% Cu, 2% Mn, 2,5% Fe max., 2% C, 5% Si, 0,5% Al, 0,015 % P. Os tratamentos foram realizados em fornos tipo mufla, sem controle atmosférico, em cadinhos de aço inoxidável contendo o pó de boretação. Este pó é composto por: 90%p B4C e 10%p KBF4. Os tratamentos foram realizados a 900 °C por 1, 2 e 4 horas. Após o término dos ciclos os cadinhos foram resfriados ao ar até a temperatura ambiente. As amostras tratadas foram limpas em ultrassom com álcool etílico durante 10 minutos.

A análise microestrutural foi realizada na seção transversal das amostras com o objetivo de se avaliar a morfologia e espessura das camadas de boretos. Para isso, análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas. A estequiometria das fases formadas nas camadas de boretos será determinada por difração de raios-X (DRX). Por fim, a aderência das camadas de boretos com o substrato foi avaliada, qualitativamente, por indentação Rockwell C, de acordo com a norma VDI 3198 conforme Figura 1. De modo geral HF1–HF4 representa aderência suficiente, enquanto HF5–HF6 corresponde a aderência insuficiente entre camada de boretos e substrato. A impressão produzida foi avaliada por MEV.

Figura 1 – Resumo da norma VDI 3198



Fonte: adaptado de VIDAKIS et al., 2003.

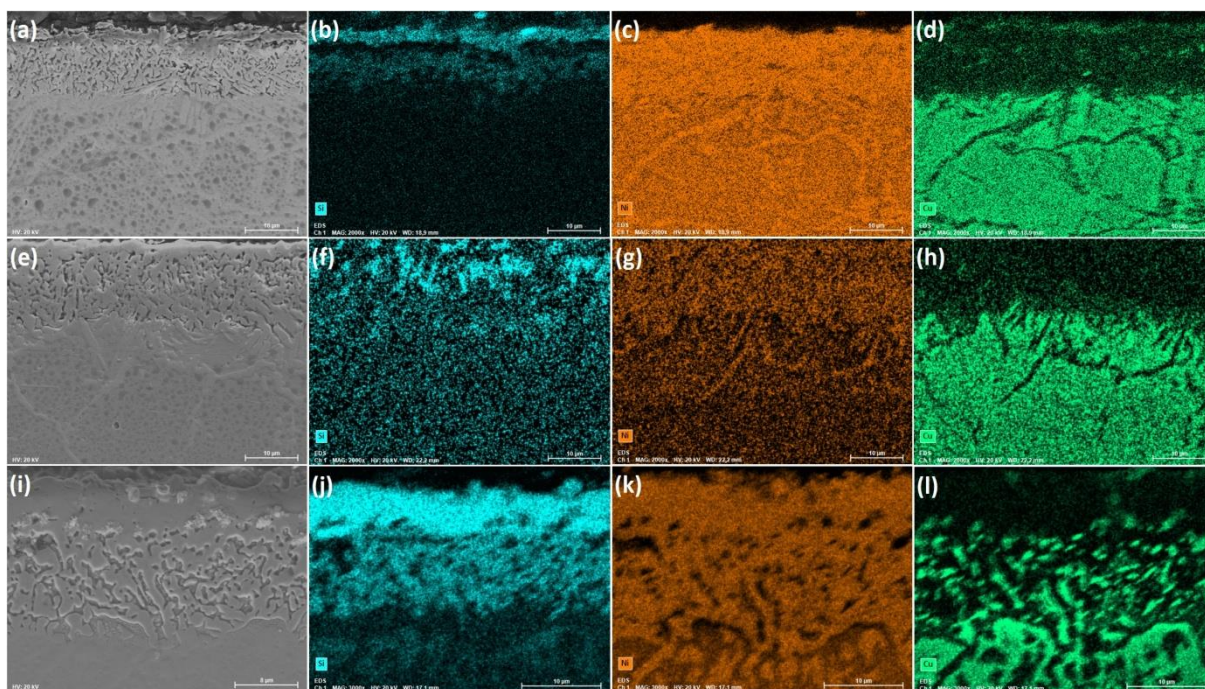
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme resultados obtidos por difração de Raios-X (DRX), a boretação em Monel 400 nas condições experimentais estabelecidas resultou na formação de camadas multifásicas



de boretos como: Ni_3B , Ni_2B e Ni_4B_3 . Foi detectada, ainda, a presença de Cu e Ni provenientes do substrato. Através da Figura 2 pode-se perceber que o tempo de tratamento tem influência na espessura da camada de boretos. A espessura média obtida após os tratamentos é de $31,98 \pm 1,19 \mu\text{m}$, $36,05 \pm 2,80 \mu\text{m}$ e $43,71 \pm 1,10 \mu\text{m}$ para as amostras boretadas a 900°C durante 1h, 2h e 4h, respectivamente.

Figura 2 – Imagens de MEV das seções transversais das amostras boretadas a 900°C por 1h (a), 2h (e) e 4h (i) e mapeamento por EDS de Si (b, f, j), Ni (c, g, k) e Cu (d, h, l).



Fonte: elaboração dos autores.

A distribuição dos átomos de Si, Ni e Cu é mostrada na Figura 2 nas cores azul, laranja e verde, respectivamente. Pode-se perceber que, com a formação da camada de boretos os átomos de cobre são “empurrados” para o interior do substrato. Os átomos de níquel e silício, por sua vez, ocupam regiões mais externas sendo que o Ni é proveniente do substrato e forma as fases de boreto de níquel da camada e os átomos de silício, provavelmente, são provenientes da areia utilizada para a “vedação” dos cadinhos de boretação. Cabe ressaltar que a quantidade de Si não é suficiente para formar silicetos de níquel, conforme relatado por Krelling e colaboradores (2019).

Os resultados de adesão, obtidos por indentação Rockwell C são apresentados na Figura 3. De acordo com o mapa mostrado na Figura 1, é possível classificar qualitativamente a aderência das camadas formadas como HF1 ou HF2 (aderência suficiente com o substrato)



SIMPEX
Simpósio Internacional de
Ensino Pesquisa e Extensão

2024

21 a 23 de maio
Joinville - SC

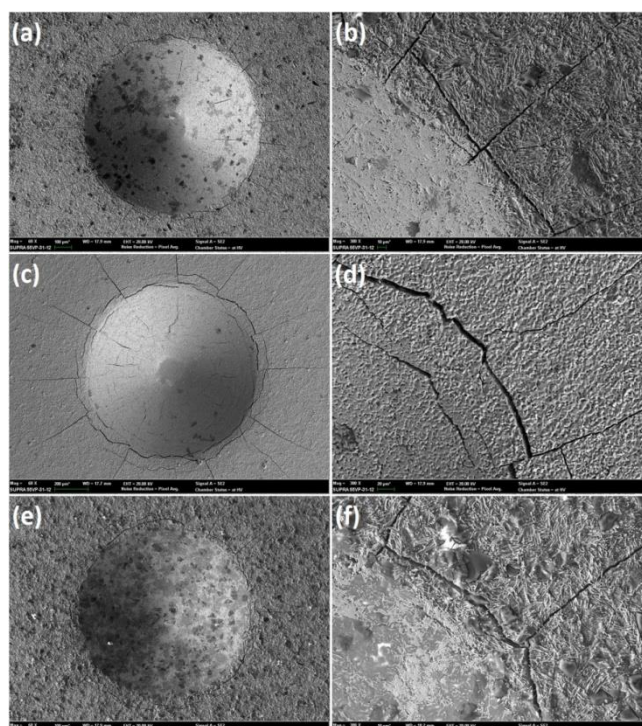
**Transformação
Sustentável na
Indústria 4.0**

Inovação,
Educação e
Impacto Social

**Gratuito
e Híbrido**

pelo fato de não serem observadas regiões de delaminação, apenas trincas radiais e circunferenciais. Apesar da aderência com o substrato ser suficiente, as trincas mostram a formação de uma camada com comportamento frágil. Este tipo de ensaio é uma boa metodologia para avaliar não somente a aderência camada-substrato, mas também a fragilidade dos revestimentos formados (VIDAKIS et al., 2003).

Figura 3 – Indentações HRC no Monel 400 boretado a 900°C por: 1h (a, b), 2h (c, d) e 4h (e, f). As imagens (b), (d) e (f) são ampliações das imagens (a), (c) e (e), respectivamente



Fonte: elaboração dos autores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados indicam que o tratamento termoquímico de boretação foi eficaz em formar camadas multifásicas de boretos de níquel em substratos de Monel 400 em temperatura de 900 °C e tempos de tratamento de 1, 2 e 4 horas. O tempo de tratamento, ainda, tem influência direta na espessura da camada formada, sendo que maiores tempos de boretação resultam em camadas mais espessas. Durante a formação das camadas de boretos os átomos de cobre, por não possuírem solubilidade na camada, são “empurrados” para regiões mais internas do substrato.



Por fim, as camadas formadas apresentam boa aderência com o substrato. Apenas trincas radiais e circunferenciais são observadas nas impressões Rockwell C. Dessa forma, de acordo com a norma VDI 3198, a aderência é considerada aceitável.

REFERÊNCIAS

ANTHYMIDIS, K. G.; ZINOVIADIS, P.; ROUSSOS, D.; TSIPAS, D. N. Boriding of nickel in a fluidized bed reactor. **Materials Research Bulletin**, v. 37, p. 515–522, 2002.

BÉJAR, M.; MORENO, E. Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 173, n. 3, p. 352–358, 2006.

DENG, D. W.; WANG, C. G.; LIU, Q. Q.; NIU, T. T. Effect of standard heat treatment on microstructure and properties of borided Inconel 718. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 25, n. 2, p. 437–443, 2015.

GÜNEN, A.; KANCA, E.; ÇAKIR, H.; et al. Effect of borotitanizing on microstructure and wear behavior of Inconel 625. **Surface and Coatings Technology**, v. 311, p. 374–382, 2017.

GUNES, I.; KAYALI, Y. Investigation of mechanical properties of borided Nickel 201 alloy. **Materials & Design**, v. 53, p. 577–580, 2014.

GUNES, I.; KEDDAM, M.; CHEGROUNE, R.; OZCATAL, M. Growth kinetics of boride layers formed on 99.0% purity nickel. **Bulletin of Materials Science**, v. 38, n. 4, p. 1113–1118, 2015.

KEDDAM, M. Simulation of the growth kinetics of the (FeB / Fe₂B) bilayer obtained on a borided stainless steel. **Applied Surface Science**, v. 257, n. 6, p. 2004–2010, 2011.

KRELLING, A. P.; MELO, F. S.; ALMEIDA, E. A. S.; COSTA, C. E. DA; MILAN, J. C. G. Microstructure and properties of borided Monel 400 alloy. **Materials Research Express**, v. 6, n. 10, p. 106410, 2019.

LOU, D. C.; SOLBERG, J. K.; AKSELSSEN, O. M.; DAHL, N. Microstructure and property investigation of paste boronized pure nickel and Nimonic 90 superalloy. **Materials Chemistry and Physics**, v. 115, p. 239–244, 2009.

MADAPURA, M.; CONRAD, J. R.; WORZALA, F. J.; et al. Surface modification of Monel K-500 by the plasma source ion implantation process. **Surface and Coatings Technology**, v. 39/40, p. 587–594, 1989.

MU, D.; SHEN, B.; ZHAO, X. Effects of boronizing on mechanical and dry-sliding wear properties of CoCrMo alloy. **Materials and Design**, v. 31, n. 8, p. 3933–3936, 2010.



SIMPEX

Simpósio Internacional de
Ensino Pesquisa e Extensão

2024

21 a 23 de maio
Joinville - SC

Transformação
Sustentável na
Indústria 4.0

Inovação,
Educação e
Impacto Social

Gratuito
e Híbrido

MUHAMMAD, W.; HUSSAIN, K.; TAUOIR, A.; HAO, A. U.; KHAN, A. Q. Evaluation of halide-activated pack boriding of Inconel 722. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 30A, p. 670–675, 1999.

PARIDA, A. K.; MAITY, K. Comparison the machinability of Inconel 718, Inconel 625 and Monel 400 in hot turning operation. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 21, p. 364–370, 2018.

UEDA, N.; MIZUKOSHI, T.; DEMIZU, K.; et al. Boriding of nickel by the powder-pack method. **Surface and Coatings Technology**, v. 126, n. 1, p. 25–30, 2000.

VIDAKIS, N.; ANTONIADIS, A.; BILALIS, N. The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 143-144, p. 481–485, 2003.