



RESISTÊNCIA À CORROSÃO NA LIGA INCOLOY 800H ATRAVÉS DA BORETAÇÃO: ESTUDO PRELIMINAR

Gonçalves, L.M.¹; Pacheco, C.¹; Jeronimo, J.L.²; Nascimento, B.C.¹; Milan, J.C.G.¹;
da Costa, C.E.¹

¹Universidade do Estado de Santa Catarina/ Centro de Ciências Tecnológicas (CCT)

²Instituto Federal de Santa Catarina/Câmpus Joinville

e-mail: luiza.kmg0427@edu.udesc.br

RESUMO

Este trabalho investigou o efeito do tratamento termoquímico de boretação sobre a superliga Incoloy 800H, com ênfase na análise da dureza superficial e da resistência à corrosão. As amostras foram divididas em duas condições: uma sem tratamento e outra submetida a boretação a 800°C por 3 horas. A caracterização por microdureza revelou um aumento substancial na dureza da amostra tratada, de 210 HV para 720 HV, devido à formação de uma camada de boretos, incluindo FeB e NiB, como identificado por Difração de Raios X (DRX). Os ensaios de corrosão demonstraram que a camada boretada oferece uma proteção inicial eficaz contra a corrosão, embora apresentem sinais de degradação após 72 horas de exposição em ambientes corrosivos. A análise da seção transversal confirmou a formação homogênea e aderente da camada boretada. Estes resultados evidenciam a eficácia da boretação em melhorar as propriedades superficiais do Incoloy 800H, destacando a necessidade de ajustes no processo para garantir a estabilidade e a durabilidade da camada a longo prazo.

Palavras-chave: Corrosão, boretação, Incoloy 800H, microdureza.

INTRODUÇÃO

A história das superligas de níquel remonta ao século XX, especificamente a partir da década de 1930, impulsionada pela necessidade de materiais capazes de resistir a ambientes extremos, como altas temperaturas e corrosão, no contexto do avanço industrial. O níquel emergiu como um elemento crucial devido às suas propriedades únicas de resistência à corrosão e alta resistência térmica,

desempenhando um papel central na evolução de materiais avançados ⁽¹⁾. Durante a Primeira Guerra Mundial, as superligas de níquel de foram aplicadas em motores de avião, melhorando substancialmente sua confiabilidade e desempenho em ambientes com alta temperatura e pressão ⁽²⁾. Foi na Segunda Guerra Mundial que essas ligas foram sistematicamente desenvolvidas, encontrando ampla aplicação em diferentes setores industriais ⁽²⁾.

Um marco significativo na história dessas ligas foi o desenvolvimento do Incoloy pela Specialty Metals Corporation dos EUA na década de 1950. Composto por níquel, cromo e ferro, o Incoloy demonstrou excepcional resistência à corrosão e capacidade de suportar altas temperaturas, sendo amplamente utilizado em aplicações industriais como turbinas a gás e processos químicos ⁽¹⁾. Desde então, houve avanços contínuos no desenvolvimento e aplicação das superligas de níquel em diversos setores industriais, com elementos de liga para melhorar propriedades mecânicas e resistência à corrosão ⁽⁴⁾.

Atualmente, essas ligas desempenham um papel fundamental em indústrias como aeroespacial, petroquímica, geração de energia e processamento químico, sendo fundamentais em turbinas a gás, equipamentos químicos e componentes de motores de avião, onde a resistência à corrosão, alta resistência mecânica e capacidade de operar em condições extremas são requisitos essenciais ⁽⁵⁾. O contínuo desenvolvimento dessas ligas reflete o compromisso da indústria com a inovação, visando materiais avançados para enfrentar os desafios tecnológicos contemporâneos ⁽⁶⁾.

O Incoloy 800H se destaca como uma liga de níquel-ferro-cromo conhecida por sua resistência em ambientes de alta temperatura e corrosivos. Com elevada resistência mecânica e capacidade de suportar ambientes agressivos, sendo uma escolha predominante em aplicações industriais mais rigorosas ⁽⁷⁾. No entanto, diante da crescente demanda por desempenho e durabilidade, há uma necessidade de aprimorar suas propriedades. E nesse contexto, tratamentos termoquímicos como a boretação surgem como técnicas promissoras para melhorar as características superficiais do Incoloy 800H e atender às exigências da indústria atual ^(8,9).

Este estudo visa investigar o desempenho do Incoloy 800H após tratamento termoquímico de boretação, analisando seu impacto nas propriedades mecânicas e resistência à corrosão em ambientes severos. Analisar os impactos dessas

metodologias pode substancialmente favorecer a criação de materiais com maior resistência e adaptabilidade às exigências industriais modernas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Substrato de Estudo

O material empregado neste estudo é a superliga Incoloy 800H, conhecida por suas propriedades de resistência a altas temperaturas e corrosão. A composição química da liga, conforme especificado pelo fabricante Realum, é apresentada na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1: Composição Química da Liga Incoloy 800H

Composição da Liga de Incoloy 800H (%)											
C	Si	Mn	Cr	Mo	Cu	Ni	Co	Ti	Al	S	Fe
0,068	0,28	0,91	20,11	0,22	0,32	31,51	0,08	0,57	0,53	0,001	45,27

Preparação e Limpeza das Amostras Sem Tratamento

Na preparação das amostras sem tratamento, uma barra de Incoloy 800H foi seccionada em cilindros com 6 mm de espessura e 24 mm de diâmetro. As amostras foram submetidas a um processo de lixamento sequencial utilizando lixas de granulação progressiva para remover imperfeições superficiais resultantes do corte. Posteriormente, foram polidas com pasta abrasiva fina para obter uma superfície lisa. Finalmente, as amostras foram limpas em banho de ultrassom por 10 minutos para eliminar partículas e contaminantes. Após a limpeza, as amostras foram secas e armazenadas em ambiente controlado.

Caracterização e Tratamento das Amostras

Para realização dessa etapa, foram preparadas amostras de Incoloy 800H em duas condições distintas para fins de comparação: sem tratamento e com tratamento termoquímico de boretação. Na condição sem tratamento, a amostra foi utilizada em seu estado original, sem qualquer modificação superficial, representando o material tal como recebido, sem a aplicação de tratamentos termoquímicos adicionais. A microestrutura dessa amostra consiste em uma matriz austenítica com precipitados de carbonetos e fase γ' .

Para a segunda condição, a amostra foi submetida a um processo de boretação termoquímica. Durante este tratamento, a amostra foi aquecida a 800°C em um ambiente contendo um agente borante por um período de 3 horas. Esse processo resultou em uma alteração significativa na microestrutura superficial do material, com a formação de uma camada de boretos. Esta camada é predominantemente composta por fases de FeB e Fe₂B, conferindo à superfície do material uma elevada dureza e melhorando suas propriedades de resistência à corrosão.

Métodos de Análise

Após o tratamento de boretação, as amostras de Incoloy 800H foram resfriadas lentamente em forno para evitar a formação de tensões térmicas. Em seguida, foi realizado o ensaio de corrosão das amostras tratadas e boretadas. As amostras foram posicionadas em um dispositivo específico, de acordo com os critérios estabelecidos pela norma ISO 1518 de 2014, para garantir a repetibilidade e consistência dos experimentos.

Concluindo o ensaio de corrosão, procedeu-se à medição da microdureza HV superficial das amostras. Este procedimento permitiu obter dados referentes à resistência ao desgaste da camada tratada. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi aplicada para examinar a morfologia e a microestrutura das amostras, possibilitando uma análise detalhada das superfícies e dos produtos de corrosão formados. Além disso, a espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foi empregada para realizar análises da composição elementar, identificando os elementos presentes na superfície e nos produtos de corrosão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Perfil de Microdureza

As medições de dureza superficial foram realizadas utilizando um microdurômetro, comparando as amostras de Incoloy 800H antes e após o tratamento termoquímico de boretação. A amostra sem tratamento apresentou uma microdureza média de 210 HV, enquanto a amostra tratada com boretação termoquímica apresentou um aumento significativo na dureza, com uma microdureza média de 720 HV na camada endurecida. Esses valores estão de acordo com estudos anteriores

que documentam o aumento da dureza superficial em ligas de níquel após tratamentos termoquímicos ⁽⁹⁾.

O perfil de microdureza da amostra tratada revelou uma camada endurecida uniforme na superfície, com a dureza diminuindo gradualmente à medida que se aproxima do núcleo. Este comportamento indica a formação de uma camada superficial endurecida e eficiente, resultante do tratamento termoquímico de boretação ⁽¹⁰⁾.

A comparação entre as amostras com e sem tratamento termoquímico evidencia a eficácia do processo em aumentar as propriedades de dureza superficial do material, o que pode ser vantajoso em aplicações onde a resistência ao desgaste é fundamental.

Fases Formadas na Camada Boretada

A análise por difração de raios-X (DRX) foi realizada para investigar as fases cristalinas presentes tanto no substrato do Incoloy 800H quanto nas amostras submetidas ao tratamento de boretação a 800°C. A caracterização foi efetuada com o auxílio de um difratômetro de raios-X Shimadzu, modelo X-Ray Diffractometer Lab X XRD-6000. O equipamento operou com radiação de cobre ($\text{Cu K}\alpha = 1,542 \text{ \AA}$), corrente de 30 mA e tensão de 40 kV. As varreduras foram realizadas com uma velocidade de 2°/min, cobrindo um intervalo de ângulo (2θ) de 5° a 90°.

Os difratogramas obtidos estão apresentados na Figura 1 e comparam os padrões de difração do Incoloy 800H sem tratamento e das amostras tratadas com boretação. A análise revelou a formação de diversos boretos na amostra tratada, que foram identificados como (Ni, Fe, Cr, Al, FeNi, Fe_2B , CrB_2 , CrB, Ni_3B , Ni_2B , Fe_3C , FeB, NiB). A formação destes boretos foi confirmada pela presença de picos de difração, que não estavam presentes no difratograma da amostra não tratada.

Especificamente, os picos adicionais observados na amostra tratada indicam a presença de uma camada superficial enriquecida com boretos. Essa camada enriquecida desempenha um papel crucial no notável aumento da dureza, que apresenta valores elevados, assim como na melhoria da resistência à corrosão observada nas amostras tratadas. A formação de fases com alta dureza nessa camada é essencial para garantir a integridade e a durabilidade das amostras em condições adversas. A intensificação dos picos correspondentes aos boretos de ferro e níquel sugere uma maior concentração desses compostos na superfície do material.

A formação de boretos como FeB, NiB, e Ni₃B contribui para a modificação das propriedades mecânicas e químicas da superfície, oferecendo uma melhora na performance do Incoloy 800H em ambientes corrosivos.

Os resultados obtidos corroboram a hipótese de que o processo de boretação, ao enriquecer a camada superficial com boretos, contribui para a otimização das propriedades de superfície do Incoloy 800H.

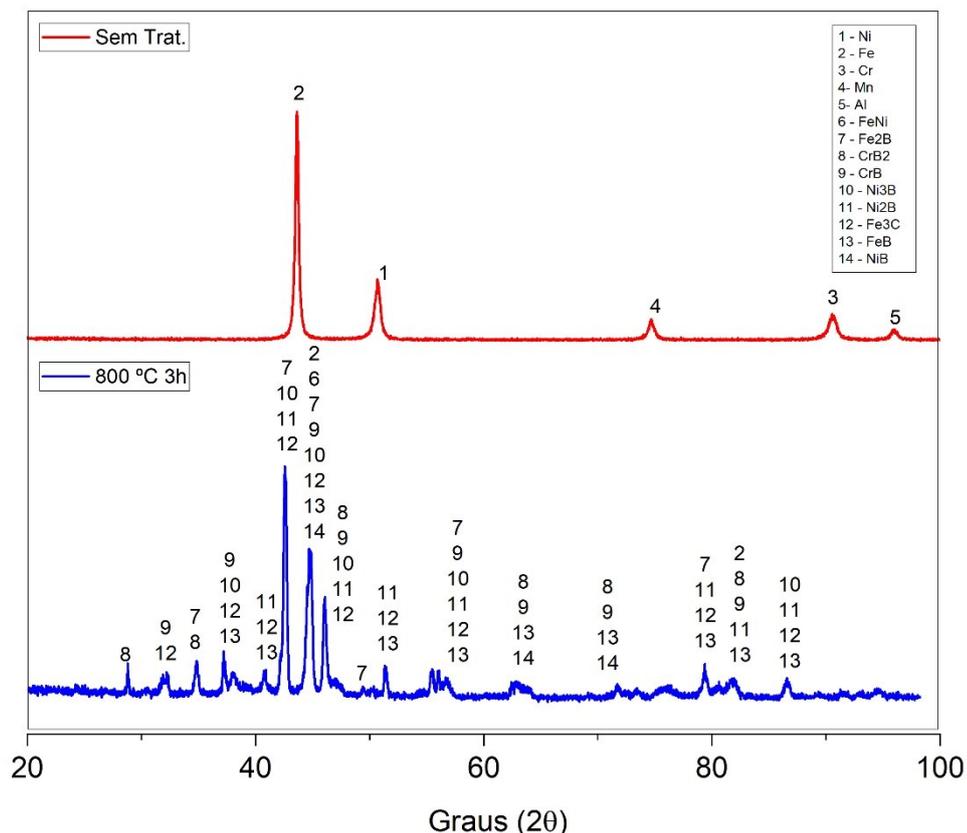


Figura 1 – Difratomogramas de Raios X do Incoloy 800H sem tratamento (vermelho) e após boretação a 800°C (azul)

Produtos de Corrosão

Para avaliar a formação de produtos de corrosão nas amostras de Incoloy 800H tratadas com boretação a 800°C, foram realizadas análises em um ambiente corrosivo controlado. As imagens de MEV das amostras tratadas (Figura 2) revelaram a eficácia da camada boretada em proteger a superfície contra a corrosão. A camada formada foi uniforme e bem aderida, apresentando uma superfície significativamente menos afetada pela corrosão (Figuras 2a e 2b).

As imagens também mostraram detalhes da superfície boretada em diferentes regiões. A análise evidenciou a presença de uma menor quantidade de produtos de

corrosão, demonstrando a integridade e a eficácia da camada protetora em impedir a degradação do material (Figuras 2c e 2d).

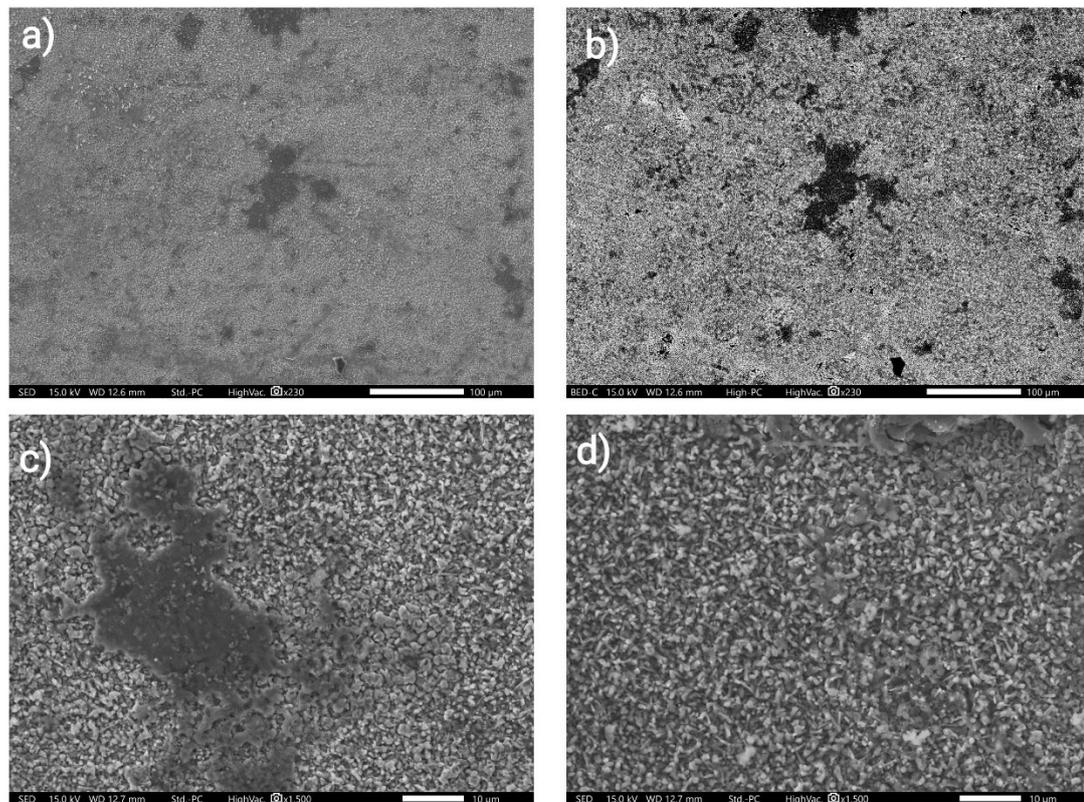


Figura 2: Imagens de MEV das amostras de Incoloy 800H tratadas com boretção a 800°C: (a) MEV da superfície da amostra mostrando a camada boretada; (a) MEV da amostra na região central, mostrando os produtos de corrosão; (b) MEV da amostra na região intermediária, evidenciando a transição entre a camada boretada e a zona afetada pela corrosão; (c) MEV da superfície da amostra, mostrando a integridade da camada boretada; (d) MEV mostrando a superfície em uma área menos afetada pela corrosão.

Análise por Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS)

A espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) foi empregada para avaliar a resistência à corrosão das amostras de Incoloy 800H, comparando as amostras não tratadas com as boretadas a 800°C.

A Figura 3 apresenta o circuito equivalente eletroquímico utilizado para o ajuste dos dados de EIS medidos em E_{OC} . Este circuito é fundamental para a análise das características eletroquímicas das amostras e para a interpretação dos dados obtidos.

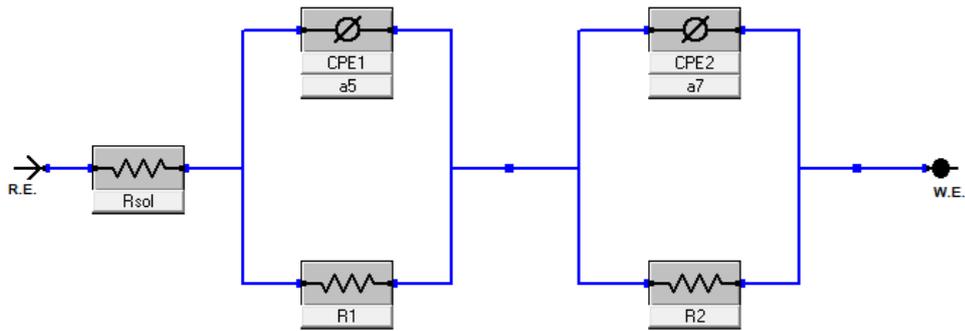


Figura 3 – Circuito equivalente eletroquímico utilizado para ajuste dos dados de EIS medidos em E_{OC} .

Após a configuração do circuito, foram obtidos os espectros EIS das amostras em diferentes períodos de exposição: 2h, 24h e 72h, conforme mostrado na Figura 4.

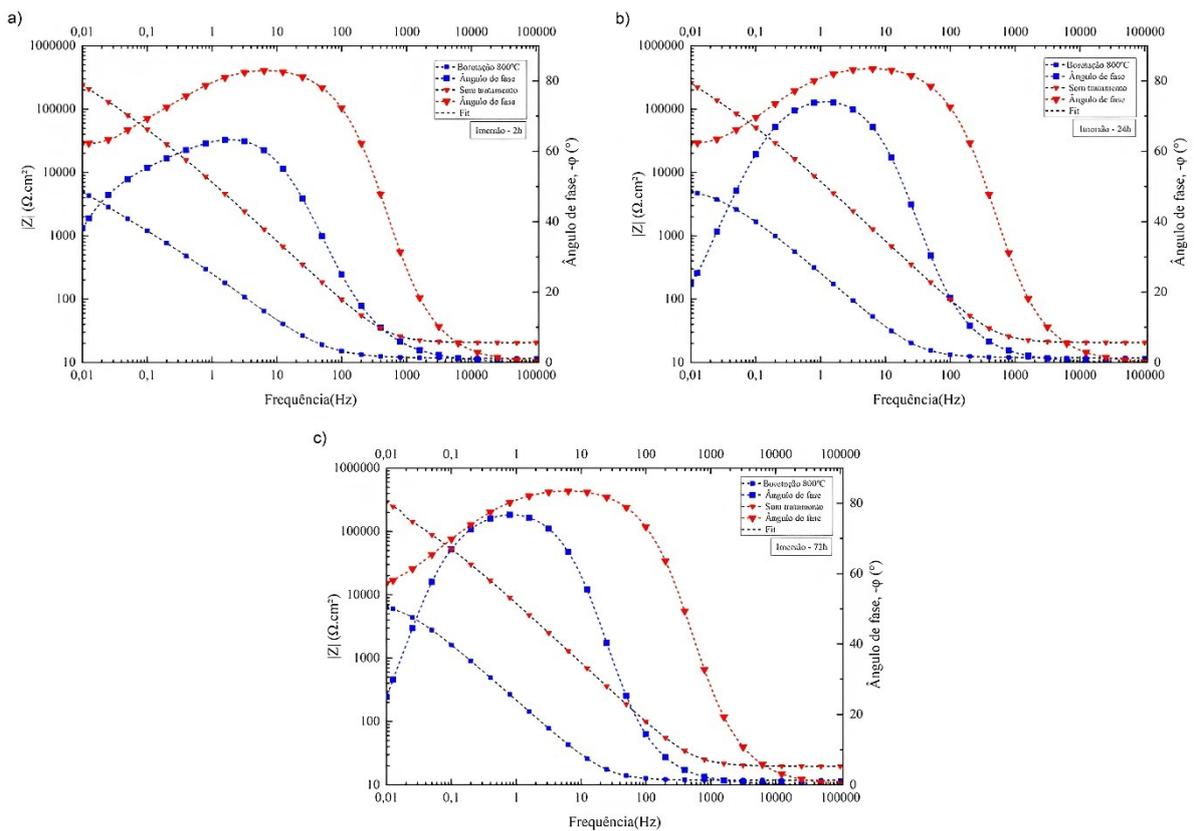


Figura 4 – Gráficos dos espectros EIS do Incoloy sem tratamento e após tratamento de boretação a 800°C : (a) 2h, (b) 24h e (c) 72h

Nos primeiros 2 horas de exposição, as análises iniciais indicam que a amostra não tratada exibe um espectro EIS com baixa resistência de polarização e uma capacitância elevada, sugerindo uma reação corrosiva inicial significativa. O ângulo de fase para a amostra não tratada é de 84° , demonstrando uma resposta eletroquímica mais complexa em comparação com a amostra boretada, cuja curva de ângulo de fase é de 65° . Esses resultados sugerem que a camada boretada proporciona uma proteção inicial mais resistente e eficiente contra a corrosão, possivelmente devido à formação de uma camada de borocarbeto que atua como uma barreira à penetração de agentes corrosivos.

Após 24 horas, a amostra não tratada mantém um ângulo de fase elevado de 83° , refletindo a continuidade da corrosão sem uma proteção efetiva. Em contraste, a amostra boretada apresenta um ângulo de fase reduzido para 78° , indicando uma leve diminuição na eficácia da proteção, mas ainda mantendo uma resistência ao eletrodo superior à da amostra não tratada. A diminuição do ângulo de fase pode estar associada ao início da degradação da camada boretada, sugerindo que a camada protetora pode estar começando a sofrer efeitos adversos.

Após 72 horas de exposição, a amostra não tratada mostra um ângulo de fase de 83° , com sinais evidentes de corrosão severa e uma resistência ao eletrodo muito reduzida. O aumento da capacitância e a formação de produtos corrosivos na superfície confirmam a deterioração progressiva. A amostra boretada a 800°C , com um ângulo de fase de $78,8^\circ$, apresenta uma redução acentuada na resistência ao eletrodo e uma diminuição na estabilidade eletroquímica. A redução do ângulo de fase pode indicar falhas na camada boretada, como microfissuras ou degradação, comprometendo a proteção oferecida.

A análise EIS revela que as amostras não tratadas sofrem uma deterioração contínua e significativa da resistência à corrosão ao longo do tempo, evidenciando a falta de proteção contra ambientes corrosivos. Em contraste, as amostras boretadas a 800°C demonstram uma proteção inicial eficaz, com resistência superior à da amostra não tratada. No entanto, a deterioração observada após 72 horas sugere que a camada boretada pode estar sujeita a falhas estruturais ou degradação com o tempo, possivelmente devido a efeitos térmicos ou à interação prolongada com o meio corrosivo.

Esses resultados destacam a eficácia inicial da boretção a 800°C , ressaltando a importância de otimizar o processo para garantir a estabilidade e durabilidade da

camada boretada a longo prazo. A interpretação detalhada dos espectros EIS é essencial para compreender o desempenho dos revestimentos e orientar ajustes no tratamento de superfície. Além disso, é crucial considerar fatores adicionais, como a microestrutura da camada boretada e as condições ambientais durante os testes, para melhorar a proteção contra corrosão e prolongar a vida útil dos materiais tratados.

Seção Transversal

A análise da seção transversal das amostras permitiu a obtenção de dados cruciais sobre a formação de fases e a avaliação da integridade das camadas superficiais. Na amostra sem tratamento, observou-se a estrutura de grãos típica do Incoloy 800H, preservando as características originais do material. A ausência de tratamento superficial resultou em uma microestrutura que reflete a condição padrão do Incoloy 800H.

Por outro lado, a amostra submetida ao tratamento de boretção exibiu uma camada bem definida e homogênea composta por boretos de ferro e níquel, formada durante o processo de boretção. A camada boretada mostrou-se uniformemente integrada ao substrato, sem indícios de delaminação ou defeitos de coesão. A presença desta camada boretada não apenas alterou a microestrutura da superfície, mas também proporcionou um aumento considerável na dureza e na resistência à corrosão da amostra tratada. Esses resultados indicam uma melhoria substancial nas propriedades superficiais da amostra, atribuída à formação eficaz da camada boretada.

CONCLUSÃO

- O tratamento termoquímico de boretção aplicado à superliga Incoloy 800H resultou em uma melhoria significativa nas propriedades superficiais do material.
- A análise revelou um aumento na microdureza, de 210 HV para 720 HV, devido à formação de uma camada de boretos, como FeB e NiB.
- A resistência à corrosão apresentou uma melhoria inicial, conforme evidenciado nos ensaios de espectroscopia de impedância eletroquímica; no entanto, foi observada uma degradação da camada boretada após 72 horas de exposição.

- As seções transversais mostraram que a camada tratada foi uniformemente formada e bem aderida, sem delaminação.
- Esses resultados evidenciam a eficácia da boretção em incrementar a dureza e a resistência à corrosão do Incoloy 800H; no entanto, indicam a necessidade de aperfeiçoamento do processo para assegurar a durabilidade da camada boretada a longo prazo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o aporte financeiro da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-Brasil) - Código 001; do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), CEC: N° N°310045/2023-1, FAPESC (Fundação de Apoio à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina) – __TR__; Pela infraestrutura do Centro Multiusuário do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina (CMU/CCT/UDESC).

REFERÊNCIAS

1. HIRSCHMANN, A.C.O.; NETO, C.M.; REIS, D.A. Fundamentos básicos sobre superligas. In: 64º Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, 2009. p. 267-276. ISSN: 2594-5327. DOI: 10.5151/2594-5327-14658.
2. VARAVALLO, R.; Avaliação da Resistência à Fadiga em Alta Temperatura da Superliga MAR-M247 (NB). Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
3. Ezugwu, E. O.; Wang, Z. M.; Machado, A. R. (1999). The machinability of nickel-based alloys: a review. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 86(1–3), p. 1–16. doi: 10.1016/S0924-0136(98)00314-8.
4. SIMS, C. T.; STOLOFF, N. S.; HAGEL, W. C. *Superalloys II: High-temperature materials for aerospace and industrial power*. New York: Wiley, 1987.

5. SUDBRACK, C. K. Advances in High-Temperature Alloys. JOM: The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, v. 68, n. 11, p. 2768-2769, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11837-016-2107-7>.
6. LI, H.; ZHENG, W.; DU, B.; YIN, H.; HE, X.; MA, T.; YANG, X. The high temperature corrosion of Incoloy 800H alloy at three different atmospheres. Journal of Nuclear Science and Technology, v. 60, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00223131.2022.2089756>.
7. MARIANI, F.; AURELIANO, R.; CASTELETTI, L. C.; LOMBARDI, A.; TOTTEN, G. Characterization and Wear Performance of Borided AISI 304 and UNS S31254 Stainless Steels. Materials Performance and Characterization, v. 6, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/MPC20160096>.
8. KRASTEVA, D. Improvement of Corrosion Resistance of Steels by Surface Modification. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/33247>.
9. MAKUCH, N.; KULKA, M.; DZIARSKI, P.; TAKTAK, S. The influence of chemical composition of Ni-based alloys on microstructure and mechanical properties of plasma paste borided layers. Surface and Coatings Technology, v. 367, p. 187-202, 2019. ISSN 0257-8972. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S025789721930310X>.
10. YU, Jinku; WANG, Yuehua; ZHAO, XiCan; LI, Qinyang; QIAO, Qi; ZHAO, Jia; ZHAI, Sen. Wear Resistance of Ni-Based Alloy Coatings. Advances in Materials Science and Engineering, v. 2019, p. 1-7, 2019. DOI: 10.1155/2019/2548285.
11. DEDAVID, Berenice Anina; GOMES, Carmem Isse; MACHADO, Giovana. Microscopia Eletrônica de Varredura: Aplicações e preparação de amostras. Porto Alegre: EDUPUCRS, 2007. ISBN 9788574307107.

CORROSION RESISTANCE IN INCOLOY 800H THROUGH BORIDING: PRELIMINARY STUDY

ABSTRACT

This work investigated the effect of the boriding thermochemical treatment on the Incoloy 800H superalloy, with an emphasis on the analysis of surface hardness and corrosion resistance. The samples were divided into two conditions: one untreated and the other subjected to boriding at 800°C for 3 hours. Microhardness characterization revealed a substantial increase in hardness of the treated sample, from 210 HV to 720 HV, due to the formation of a boride layer, including FeB and NiB, as identified by X-ray Diffraction (XRD). Corrosion tests demonstrated that the borided layer provides effective initial protection against corrosion, although signs of degradation were observed after 72 hours of exposure to corrosive environments. Cross-sectional analysis confirmed the homogeneous and adherent formation of the boride layer. These results highlight the effectiveness of boriding in improving the surface properties of Incoloy 800H, emphasizing the need for process adjustments to ensure the stability and durability of the layer in the long term.

Keywords: Corrosion, boriding, Incoloy 800H, microhardness.

RESISTENCIA A LA CORROSIÓN EN LA ALEACIÓN INCOLOY 800H A TRAVÉS DE LA BORETACIÓN: ESTUDIO PRELIMINAR

RESUMEN

Este trabajo investigó el efecto del tratamiento termoquímico de boretación sobre la superaleación Incoloy 800H, con énfasis en el análisis de la dureza superficial y la resistencia a la corrosión. Las muestras se dividieron en dos condiciones: una sin tratamiento y otra sometida a boretación a 800°C durante 3 horas. La caracterización por microdureza reveló un aumento sustancial en la dureza de la muestra tratada, de 210 HV a 720 HV, debido a la formación de una capa de boruros, incluyendo FeB y NiB, como se identificó mediante Difracción de Rayos X (DRX). Los ensayos de corrosión demostraron que la capa boretada ofrece una protección inicial eficaz contra

la corrosión, aunque se observaron signos de degradación después de 72 horas de exposición a ambientes corrosivos. El análisis de la sección transversal confirmó la formación homogénea y adherente de la capa boreada. Estos resultados evidencian la eficacia de la boreación en mejorar las propiedades superficiales del Incoloy 800H, destacando la necesidad de ajustes en el proceso para garantizar la estabilidad y durabilidad de la capa a largo plazo.

Palabras clave: Corrosión, boreación, Incoloy 800H, microdureza.