IV SEMMat
Simpósio de Engenharia Metalúrgica e de Materiais Sul Fluminense
07, 08 e 09 de dezembro de 2022
Volta Redonda/RJ

Caracterização do óxido formado na junta M5/zircaloy-4 soldada por resistência e pressão após testes de corrosão em autoclave a 360 °C

Alexandre Roberto Soares[1,2,3]; Roberto Zenhei Nakazato [2]; Carlos Alberto Della Revere[1]; Rodrigo da Silva[1].

[1]Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, Departamento de Engenharia Mecânica. [2]Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Faculdade de Engenharia e Ciências, Campus de Guaratinguetá - SP
[3]Indústrias Nucleares do Brasil – INB, Gerência de Engenharia de Processos e de Produto.

Palavras-chave: *Corrosão em autoclave; Ligas de zircônio; Soldagem RPW.*

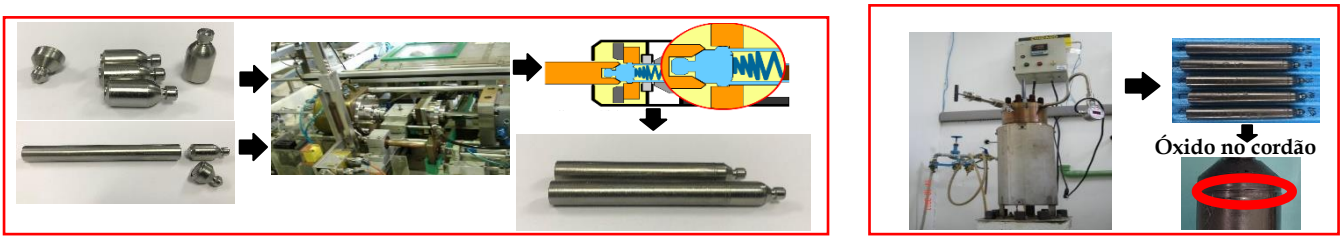
INTRODUÇÃO

A energia nuclear é uma das fontes de geração de energia elétrica através da operação de um reator nuclear instalado em uma central térmica nuclear ou termonuclear. São usinas onde a fonte de calor surge da reação nuclear de fissão, usualmente do urânio-238 (^{238}U) enriquecido com o urânio-235 (^{235}U). O ciclo do combustível nuclear envolve a mineração do urânio, a química do urânio, a fabricação do combustível (pastilhas de UO_2 e estrutura mecânicas, incluídas as varetas combustíveis), a operação do elemento combustível nos reatores e o tratamento dos elementos combustíveis pós-irradiação. Para os autores Soares, Lamas e Camargo[1] a produção do elemento combustível envolve um conjunto de materiais, operações e processos de fabricação, de componentes estruturais que darão a sustentação e resistência mecânica para a operação dos elementos combustíveis no reator. Os tubos de revestimento para as varetas combustíveis são produzidos com ligas de zircônio especiais da área nuclear, pois o zircônio possui baixa seção transversal de captura de nêutrons (σ), da ordem de 0,18 barn. Segundo o autor Slobodyan[2] os processos de soldagem usuais em aplicações nucleares com as ligas de zircônio envolvem soldagem por feixe de elétrons, feixe de laser, bem como resistência, projeção e soldagem a ponto. Um detalhe importante da produção dessas soldas, é que elas passam por ensaios destrutivos e não-destrutivos/visuais necessários para a correta caracterização da junta, onde os ensaios comuns envolvem o arrebentamento do tubo, a metalografia e a corrosão. Para a produção das varetas combustíveis e a montagem do elemento combustível no Brasil, é realizado o processo de soldagem por resistência e pressão ou *Resistance Pressure Welding* - RPW dos tampões às extremidades dos tubos de revestimento, sendo amostras ensaiadas para a caracterização dessas juntas. Os tampões são soldados em uma das extremidades, depois os tubos são preenchidos com pastilhas combustíveis de UO_2, este é o processo de enchimento das varetas combustíveis. Este estudo teve como objetivo caracterizar a camada de óxido formada na superfície de uma junta composta por ligas de zircônio M5 e zircaloy-4 soldadas pelo processo RPW durante o início da produção de varetas combustíveis, sendo que a caracterização ocorreu após os testes de corrosão usuais e padronizados em autoclave à temperatura de 360 °C e pressão de 18,7 MPa por 24 horas.

METODOLOGIA

Os tampões de Zircaloy-4 foram soldados aos tubos de M5 usando o processo RPW, como ilustrado na Figura 1 (a). Posteriormente, os corpos de prova foram ensaiados em autoclave. A Figura 1 (b) mostra o aspecto superficial dos corpos de prova após testes de corrosão em autoclave a 360 °C. As etapas utilizadas para a caracterização do óxido formado na superfície do cordão de solda foram: o teste de corrosão em autoclave à temperatura à 360 °C e pressão de 18,7 MPa por 24 horas, caracterização em MEV/EDS e Espectroscopia Raman.

Figura 1 – a) Corpos de prova de soldados via RPW e b) Aspecto dos corpos de prova após testes de corrosão em autoclave.



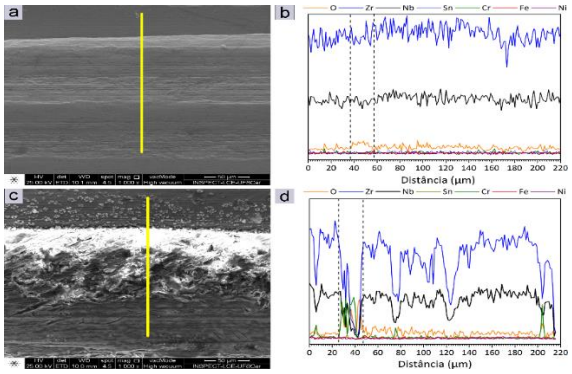
a) b)

Fonte: Próprio autor.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

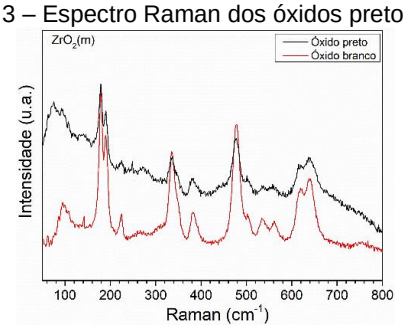
Uma inspeção visual dos cordões de solda após os testes de corrosão em autoclave revelou o crescimento de dois tipos de óxido, um preto e uniforme e um branco e nodular. A análise de MEV/EDS do topo da camada de óxido preto Figura 2 (a) mostrou o crescimento de uma fina camada de óxido aparentemente aderente ao substrato metálico e livre de trincas e poros. O perfil de composição química por EDS no cordão de solda [Figura 2 (b)] mostra que o óxido formado é composto por Zr, Nb e obviamente O. Nota-se também que esses elementos estão distribuídos uniformemente ao longo do cordão de solda. Para o óxido branco na Figura 2 (c), observou-se o crescimento de um óxido bastante volumoso, apresentando muitas trincas adjacentes ao substrato metálico. Tal comportamento é deletério para o cordão de solda, pois permite o contato direto entre o substrato metálico e o ambiente, não proporcionando proteção contra a corrosão, o que pode levar, numa situação mais agressiva, à falha da vareta combustível durante a operação. O perfil de composição química por EDS do óxido branco da Figura 2 (d) mostra que a composição química do óxido varia ao longo do cordão de solda. Existem regiões onde o óxido formado é composto por Cr e O, com ausência de Zr e Nb, e regiões onde o óxido é composto por Zr e Nb, sem a presença de Cr. Embora existam diferenças significativas de morfologia e composição química dos óxidos preto e branco, os espectros Raman (Figura 3) são similares, mostrando o crescimento de um óxido de ZrO_2 majoritariamente monoclínico.

Figura 2 – (a) e (c) Imagens SE/MEV do topo do óxido formado nos cordões; (b) e (d) perfil de composição química por EDS do óxido formado nos cordões de solda.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3 – Espectro Raman dos óxidos preto e branco.



Fonte: Próprio autor.

CONCLUSÕES

O crescimento de um óxido preto proporciona boa resistência à corrosão, enquanto a formação de um óxido branco pode ser prejudicial ao cordão de solda devido ao crescimento de uma camada de óxido defeituosa, apresentando muitas trincas que facilitam o contato entre o ambiente e o substrato metálico. Tanto o óxido preto quanto o óxido branco são compostos majoritariamente por ZrO_2 monoclínico.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, UFsCar, Unesp, Inb e UFF.

REFERÊNCIAS

[1] SOARES, A. R.; LAMAS, W. DE Q.; CAMARGO, J. R. Ensaio e Avaliação por Líquidos Penetrantes em Placas de Bocais de Elementos Combustíveis na área Nuclear. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.1, p.3101-3112, 2021.
[2] SLOBODYAN, M. Resistance, electron- and laser-beam welding of zirconium alloys for nuclear applications: A review, **Nuclear Engineering and Technology**, v. 53, p. 1049-1078, 2021.