



ANÁLISE DE TÉCNICAS DE SOLDA PARA LIGAS DE FeCrAl

Henrique V. Abade, Isabella R. Magalhães, Carlos E. Velasquez, Claúbia Pereira

Universidade Federal de Minas Gerais - Departamento de Engenharia Nuclear
Av. Antônio Carlos, 6627 Campus UFMG Pampulha
31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil
henriqueabade@ufmg.br

Palavras-chave: Técnicas de soldagem, FeCrAl, LWR.

RESUMO

Por meio de levantamentos bibliográficos das áreas de engenharia nuclear e de engenharia de materiais, foram analisados dados e informações sobre engenharia da soldagem e erros processuais de solda. O objetivo é realizar a soldagem com o mínimo de perdas nas propriedades físicas da liga FeCrAl. Tal liga vem sendo utilizada como proposta de revestimento de combustível tolerante a acidentes em reatores nucleares. O objetivo deste trabalho é fazer um levantamento das diferentes técnicas de soldagem e do ambiente propício para que ela seja executada. Após análises de padrões de segurança e de testes já realizados dentro de reatores, foi possível concluir que o processo de soldagem TIG é o que melhor se adequa aos parâmetros necessários, pois proporcionou soldas com penetração, menos zonas afetadas pelo calor além de níveis de defeitos de soldagem e resistências mecânicas adequados. A utilização do gás hélio nesse processo incorreu em melhora da resistência a oxidação e menores zonas afetadas pelo calor, se comparado a outros gases, já que ele possui maior efetividade da extração de calor e dificuldades na abertura do arco.

1. INTRODUÇÃO

Em março de 2011 ocorreu um acidente na central nuclear de Fukushima, iniciado por um grande abalo sísmico de 9,0 pontos na escala Richter que atingiu a costa de Honshu, no território japonês. O terremoto histórico provocou uma enorme destruição no país não só pelo tremor de terra, mas por ter contribuído para a formação de um grande tsunami que varreu boa parte da costa japonesa. Os eventos foram responsáveis por um superaquecimento nos reatores da central nuclear de Fukushima, acarretando a oxidação do revestimento do combustível, o Zircaloy-4. A reação de oxidação teve o gás hidrogênio, um gás inflamável, como um de seus produtos [1].

A oxidação do revestimento levantou questionamentos quanto à utilização dele, possíveis substitutos passaram a serem alvos de pesquisa. Antes mesmo do acidente, as ligas de FeCrAl já eram avaliadas enquanto alternativa para uso em reatores nucleares. A liga é utilizada em fornos de alta temperatura devido à sua resistência à oxidação [2]. Quanto ao uso como revestimento de combustíveis nucleares, após os estudos que comprovaram a eficiência do Zircaloy-4, os trabalhos sobre a ligas foram reduzidos.



O objetivo é aprimorar a liga para utilizá-la, pois ela pode retardar o início da degradação severa do núcleo e reduzir a taxa da produção de gás hidrogênio (H_2), além de não gerar tanto calor pela rápida oxidação quanto o zircônio (Zr). Assim, caso ocorra um acidente, haverá mais tempo para que se possa tomar as medidas necessárias para contê-lo [3]. O FeCrAl foi considerado como possível substituto para o revestimento usual, pois as propriedades físico-químicas da liga em comparação ao Zircaloy-4 são positivamente superiores. Pode-se citar exemplos como: o coeficiente de expansão térmica da liga é maior, quando comparado ao do Zircaloy-4. Tal resultado é positivo, pois a expansão é necessária para que haja uma acomodação dos materiais advindos da queima do combustível, principalmente os gasosos, na pastilha [4]; A liga FeCrAl tem calor específico maior do que a liga Zircaloy-4, ou seja, é necessário mais calor para alterar a temperatura da liga [9, 5]. Portanto, em caso de acidentes as pastilhas de combustível recebem menos calor, o que poderia contribuir para o controle do evento.

Além dessas propriedades, a liga de FeCrAl tem melhor resistência a oxidação que o Zircaloy-4, porque possui em sua constituição o alumínio (Al), que ao entrar em contato com o oxigênio (O) forma um material cerâmico, o óxido de alumínio ou alumina [5]. Esse material tem importantes propriedades, como alta resistência à corrosão mesmo em ambientes extremos e o fato de manter suas propriedades mecânicas mesmo a altas temperaturas [6]. Tais fatos tornam a liga FeCrAl elegível como proposta de substituto às ligas a base de zircônio [7].

No entanto, para ser utilizada em ambiente LWR o material deve ser submetido à soldagem. Porém já foram descritos entraves na soldagem da liga, dentre eles o craqueamento devido à contaminação por hidrogênio. Diante de soldagens realizadas em condições laboratoriais foi possível observar que os materiais na liga FeCrAl, principalmente o Cr e Al têm um importante papel no desempenho da solda no material [2]. A adição significativa dos elementos anteriormente citados, apesar de melhorarem as propriedades físicas da liga, leva a rachaduras nas áreas soldadas [8]. Sendo assim, a análise de técnicas e do ambiente de soldagem é válida.

O objetivo do estudo é estabelecer as características de diferentes técnicas de soldagem e do ambiente na qual é executada a fim de sugerir a ideal para a liga de FeCrAl. Para que isso fosse possível foi feita uma vasta pesquisa, a qual visava obter diferentes bibliografias providas de diferentes países que tratassem de métodos de soldagem rústicos e sofisticados. Logo, todo o conteúdo do artigo foi embasado no material obtido.

2. SOLDAS E TÉCNICAS DE SOLDAGENS PARA A LIGA DE FeCrAl

Existem vários métodos de soldagem, aplicados de acordo com a necessidade do material soldado, do ambiente ao qual a solda será submetida, das propriedades e capacidades físicas de cada solda e dos custos necessários para fazê-la. Alguns deles merecem destaque: a soldagem com eletrodo revestido, processo no qual a união se dá pelo calor do arco entre o eletrodo e a peça; o processo TIG (*Tungsten Inert Gas*), que utiliza como fonte um arco elétrico mantido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça a soldar; o processo MIG/MAG (*Metal Inert Gas/ Metal Active Gas*), que utilizam como fonte de calor um arco elétrico mantido entre um eletrodo não consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar; e a soldagem com arco submerso, na qual um arco



elétrico é estabelecido entre o arame-eletrodo e o material a ser soldado, com a diferença que o arco permanece totalmente submerso em uma camada de fluxo. Ademais, a soldagem com plasma, com gás, por resistência e por feixe de elétrons os quais em sua maioria utilizam arco elétrico.

2.1 Soldagem com Eletrodo Revestido

Apesar de ser a mais simples e amplamente empregada, existem algumas restrições para executá-la. Dentre elas está o controle da distância entre o eletrodo e a peça, realizado manualmente, que incorre num prejuízo da precisão. Ademais, a transferência dos glóbulos no arco está associada a variações consideráveis no comprimento efetivo do arco (e conseqüentemente na tensão), outra limitação. Além disso, maiores tensões são requeridas para operação normal, à medida que a corrente de soldagem é aumentada e ela pode, também, variar significativamente em função do revestimento, restringindo, mais uma vez, o processo [9].

2.2 Processo TIG

O processo TIG utiliza como fonte de calor um arco elétrico mantido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça a soldar. A proteção da região de soldagem é feita por um fluxo de gás inerte. A soldagem pode ser feita com ou sem metal de adição [10], a operação pode ser tanto manual quanto automatizada; pode-se com ele soldar espessuras de 0,1 a 50 milímetros em todas as posições e tipos de junta [11].

Esse processo é conhecido por produzir soldas de alta qualidade, soldar a maioria dos metais e ligas, ter uma fonte de calor concentrada o que minimiza distorções, além de ser de fácil aprendizado. Porém, existem algumas limitações, dentre elas a impossibilidade de utilizá-lo em locais com corrente de ar, a possibilidade de inclusão de tungstênio na solda, a baixa taxa de deposição o que torna o processo menos produtivo e a emissão intensa de radiação ultravioleta [11]. O processo TIG possui baixo teor de contaminação por nitrogênio e hidrogênio na solda, pois são empregados gases de proteção. Os gases podem ser o argônio (Ar), hélio (He) ou uma mistura dos dois, dependendo da liga a ser soldada [9].

Cada gás possui características diferentes dentro do processo de soldagem. O argônio, por exemplo, tem baixa tensão e penetração, alta estabilidade e facilidade na abertura de arco, é adequada para a soldagem de chapas finas e tem baixo custo. Porém, a soldagem é manual devido ao pequeno gradiente na coluna do arco, o que causa imperfeições indesejadas nas soldas. Já o hélio tem elevada tensão e baixa estabilidade de arco, tem maior penetração, custo elevado, dificuldade na abertura do arco, todavia, a soldagem é automática [9], o que aumenta a qualidade da solda.

2.3 Processo MIG/MAG

Os processos MIG (*Metal Inert Gas*) e MAG (*Metal Active Gas*) utilizam como fonte de calor um arco elétrico mantido entre um eletrodo não consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar. A proteção da região de soldagem é feita por um fluxo de gás inerte (MIG) ou gás ativo (MAG) [9]. O processo MIG é adequado à soldagem de



aços-carbono; aços de baixa, média e alta liga; aços inoxidáveis; alumínio, magnésio e cobre, além de suas respectivas ligas. O processo MAG é utilizado na soldagem de aços de baixo carbono e aços de baixa liga [9].

São vantagens o fato de que o processo é semiautomático e versátil, podendo ser adaptado para a soldagem automática. Ademais, o eletrodo nu é alimentado continuamente, a soldagem pode ser executada em todas as posições, a velocidade de soldagem é elevada, a taxa de deposição é elevada devido à densidade da corrente alta na ponta do arame. E ainda, não há formação de escória e, conseqüentemente, não se perde tempo na sua remoção; o processo tem baixo teor de hidrogênio e problemas de distorção e tensões residuais diminuídos. Além disso, há possibilidade de controlar a penetração e a diluição durante a soldagem e é mais fácil executar a soldagem [11].

Porém, como antes citado, existem, também, limitações às quais são: a maior velocidade de resfriamento por não haver escória, o que aumenta a ocorrência de trincas e a necessidade de proteção de correntes de ar. Ademais, existe probabilidade de haver projeções de gotas de metal líquido durante a soldagem e grande emissão de raios ultravioleta [11].

2.4 Soldagem com Arco Submerso

Neste processo de soldagem, um arco elétrico é estabelecido entre o arame-eletrodo e o material a ser soldado, com a diferença que o arco permanece totalmente submerso em uma camada de fluxo, não sendo, pois, visível. Dessa forma, a solda se desenvolve sem faíscas, luminosidades e respingos, características dos demais processos de soldagem com arco aberto. O fluxo, na forma de grânulos, age como fundente, protegendo de contaminações o metal de solda, ele atua ainda como isolante térmico, concentrando o calor na parte sólida [10].

A maior limitação do arco submerso é que o processo não permite a soldagem fora da posição plana ou horizontal. Tal fato se dá pois é a força gravitacional que sustenta a camada de fluxo sobre a poça de solda. Logo, para se usar esse processo, é preciso colocar a junta a ser soldada na posição plana ou horizontal, para que haja suporte para o fluxo. Essa necessidade não é suprida no caso de soldas circunferências [12], as quais são usadas nos revestimentos de pastilhas nos reatores.

2.5 Soldagem com Plasma

O processo de soldagem com plasma pode ser realizado em todas as posições, é uma extensão do processo TIG. Nele a coluna do arco elétrico sofre uma constrição, obtida fazendo o arco passar através de um orifício de diâmetro reduzido e de parede fria (cobre refrigerado a água). Esse processo também é atualmente utilizado para corte, fusão e recobrimentos de superfícies metálicas [13].

No processo com plasma, o eletrodo está confinado no bocal de constrição e é impossível seu contato com a peça a ser soldada, isso reduz a possibilidade de inclusão de tungstênio na solda. Ademais, existem vantagens metalúrgicas, pois a baixa taxa de calor transferida



às peças soldadas limita a zona termicamente afetada, onde ocorre o crescimento dos grãos. Ainda, sua alta velocidade de soldagem resulta em menor tempo para a fragilização de aços inoxidáveis e superligas [9, 14].

Todavia, o processo de soldagem com plasma tem limitações, por exemplo, não é possível soldar espessuras acima de 25 mm. Além disso, a soldagem com plasma requer do operador maior conhecimento do processo, quando comparado com o TIG. A tocha é mais complexa, o eletrodo requer configuração e posicionamento precisos, havendo também necessidade de seleção correta do diâmetro do bocal de constrição e da vazão do gás de plasma e de proteção [9].

2.6 Soldagem com Gás

A soldagem oxigás pode ser definida, superficialmente como um grupo de processos em que o coalescimento (tratamento térmico de recozimento que visa obter a máxima ductilidade do FeCrAl) é devido ao aquecimento produzido por uma chama, usando ou não metal de adição, com ou sem aplicação de pressão [15]. Esse processo de soldagem data do século XIX. Foi o cientista francês Le Châtelier que, em 1895, observou que quando o acetileno queima com o oxigênio produz uma chama que atinge a temperatura aproximada de 3000°C. O processo de soldagem oxiacetilênico foi explorado comercialmente a partir do século XX, quando foram desenvolvidos processos de produção de acetileno e do oxigênio [9].

O processo da soldagem oxigás apresenta vantagens, baixo custo, emprega equipamento portátil, não necessita de energia elétrica, e permite o fácil controle da operação, a qual pode ser realizada em qualquer posição. Porém, existem desvantagens, o processo não pode ser automatizado, tem baixa taxa de deposição, conduz a um superaquecimento, e apresenta riscos de acidente com os cilindros de gases. Dentre todas as desvantagens o fato do superaquecimento é o pior, pois pode gerar alterações nas propriedades físicas da solda e do material [9, 16].

2.7 Soldagem por Resistência

A junção de duas peças na soldagem por resistência elétrica é feita através da geração de calor, devida à passagem da corrente elétrica, e da aplicação de pressão. Durante o processo, as peças aquecem-se e ocorre a fusão localizada no ponto de contato na superfície de separação entre ambas. A geração de calor é devida à resistência do conjunto à passagem de corrente [9]. Esse tipo de soldagem não é recomendável para ligas como FeCrAl. Isso se deve ao fato de que nesse tipo de liga tem-se má soldabilidade usando esse processo, devido ao crescimento de grão e a baixa ductilidade quando resfriado rapidamente a partir de altas temperaturas [17].

2.8 Soldagem por Feixe de Elétrons

Para realizar a soldagem por fusão, a região a ser soldada deve ser aquecida acima da temperatura de fusão do material. Para isso, a fonte de calor deve ter algumas características: a energia deve ser concentrada; deve gerar uma potência específica para proporcionar a fusão do local a ser soldado; contrabalancear as perdas de calor para a



região vizinha que está fria [18]. A qualidade da solda por meio desse processo é igual ou superior a solda TIG, porém, seu custo é maior [19].

A soldagem por feixe de elétrons tem vantagens, dentre elas o fato de poder-se soldar metais refratários, reativos e a combinação de metais dissimilares, não soldáveis com arco elétrico. Outras vantagens são: a qualidade da solda ser igual ou superior a do processo TIG e a zona afetada pelo calor ser pequena e estreita. Além desses benefícios, a distorção gerada pelo processo é baixa. Contudo, existem desvantagens, o custo do equipamento e da preparação da junta são bastante elevados e o tamanho da câmara limita o tamanho da peça, devido a necessidade de o processo ser a vácuo. Além do mais, quando o feixe incide na peça ele gera raios X, que são prejudiciais [18, 20].

3. PROBLEMAS ASSOCIADOS À SOLDAGEM

Em geral os estudos de soldagem das ligas de FeCrAl se concentram em condições laboratoriais de solda, que por si só já são diferentes do ambiente industrial de produção. As falhas de soldagem se devem a diversos fatores, como a zona térmica afetada e a contaminação durante o processo, além da recristalização da liga e formação de grãos. Dentre os fatores citados as contaminações merecem destaque, porque podem alterar a composição química da liga além de influenciarem no surgimento de trincas e de grãos.

3.1 Contaminação por nitrogênio

Na liga de FeCrAl a inexistência de nitrogênio é essencial, esse elemento pode ser uma impureza prejudicial para metais comuns e juntas soldadas. Quando presente em grandes quantidades, o nitrogênio pode causar porosidade nas soldas [21]. Além disso, a presença simultânea de alumínio e nitrogênio nas regiões de contornos de grãos facilita a precipitação de nitreto de alumínio que fragiliza estes contornos podendo levar a peça fundida à fratura intergranular, conhecida como "*rock candy fracture*" [22, 23]. Logo, a solda se torna suscetível a rachaduras, ficando quebradiça. Além do fenômeno anteriormente citado, o excesso de nitrogênio e, portanto, a precipitação de nitretos de alumínio, pode afetar significativamente as propriedades mecânicas do metal de solda, conforme demonstrado na Fig. 1 [24, 25]:

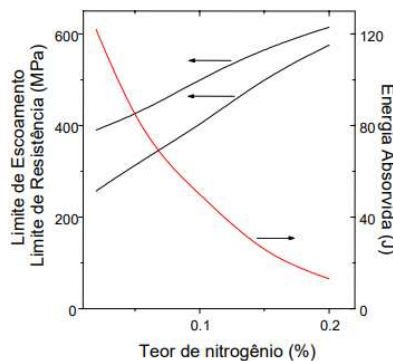


Fig. 1 Efeito do teor de nitrogênio na zona fundida [25]



À medida que o teor de nitrogênio aumenta, a resistência e o limite de escoamento aumentam, já a ductilidade e a tenacidade da solda diminuem significativamente. Tal comportamento pode ser evitado adicionando elementos formadores de nitretos que fixam o nitrogênio como um precipitado estável, os mais usados são o zircônio (Zr) e o titânio (Ti). É importante considerar que esses elementos também são desoxidantes fortes e não devem ser adicionados antes da oxidação do alumínio para evitar o consumo devido à formação de óxidos, os quais também são prejudiciais à solda [26].

3.2 Contaminação por hidrogênio

O hidrogênio é o elemento com menor diâmetro atômico e possui um alto potencial de difusão [27, 28]; pode ser encontrado em solução sólida na estrutura cristalina dos metais e suas ligas e mover-se por difusão no estado sólido com relativa facilidade. Assim como o nitrogênio, o hidrogênio, quando presente na atmosfera do arco, pode ser absorvido pelo metal fundido. Ele se origina principalmente da quebra de moléculas orgânicas e de água, causadas pelo calor. O hidrogênio pode vir de várias fontes como: graxas, gorduras e umidade na superfície das peças, fluxo ou revestimento de eletrodos úmidos, de contaminações no gás de proteção e da própria umidade do ar, e quando livre pode entrar na rede cristalina do metal.

A presença de hidrogênio durante a fabricação afeta negativamente a qualidade e as propriedades da liga, além do desempenho nas condições de trabalho. Quando dissolvido na poça de fusão pode causar respingos e porosidade na solda. Ademais, pode causar problemas de fragilização temporária e de fissuração. O acúmulo desse elemento em locais da rede cristalina pode enfraquecer as ligações metálicas e nuclear uma trinca, a qual, sob condições apropriadas, se propagará e levará a fratura dos componentes metálicos contaminados. O resultado disto é a falha catastrófica e prematura de componentes no ambiente de serviço, mesmo com suas propriedades mecânicas sendo, de forma inferior, necessárias. [29, 25].

A formação de fissuras acontece a temperaturas próximas do ambiente. O hidrogênio é introduzido, resultando em que a poça de fusão e o cordão de solda já solidificado tornam-se um reservatório de hidrogênio dissolvido, logo, fragiliza a peça e a solda [30]. A fragilização causa degradação das propriedades mecânicas dos aços, além de causar a diminuição da ductilidade em tração, que é diretamente proporcional ao teor de hidrogênio contido no metal. Tais fatos fazem com que haja a tendência de mudar a morfologia da fratura de dúctil para frágil e, deste modo, reduz a resistência à fratura.

Para que o teor de hidrogênio por contaminação, tanto na solda quanto na fundição, seja mínimo ou até mesmo inexistente é necessário o controle da atmosfera e de condições de umidade na fundição. Em processos de soldagem, além do controle da atmosfera, deve-se empregar tratamentos térmicos pré e pós soldagem para garantir a saída de hidrogênio do material, aumentando, assim, a cinética de difusão de hidrogênio. Da mesma forma, a correta seleção dos eletrodos é uma medida a se tomar para evitar a contaminação.

4. CONCLUSÃO



Tipos de Soldas	Vantagens	Desvantagens
Eletrodo revestido	Menos oneroso e mais simples [9].	Pouca precisão na soldagem necessita de alta tensão, a qual varia muito em relação ao revestimento [9].
TIG	Pode-se soldar até 50 milímetros em todas as posições e tipos de junta, não precisa de material de adição, alta qualidade da solda, fácil aprendizado, baixo teor de contaminação por nitrogênio e hidrogênio [10,11].	Possibilidade de inclusão de tungstênio na solda, menos produtivo, intensa emissão de radiação [11].
MIG/MAG	Semiautomático ou automático, versátil, pode ser executada em todas as posições, alta velocidade de soldagem, baixo teor de hidrogênio e não produz escória [11].	Grande emissão de raios ultravioleta, alta probabilidade de trincas, projeção de gotas de metal líquido e necessidade de proteção de correntes de ar [11].
Arco submerso	Não há faíscas, luminosidades, respingos e baixa contaminação do metal de solda [10].	Pode ser realizado somente na posição plana ou horizontal [12].
Plasma	Pode ser realizada em todas as posições, a zona termicamente afetada é limitada, alta velocidade de soldagem diminuindo a fragilização de aços inoxidáveis e superligas [9,13].	Não é possível soldar espessuras acima de 25 mm, de difícil e cara execução [9,14].
Gás	Baixo custo, equipamentos portáteis, não necessita de energia elétrica, fácil controle da operação, pode ser realizado em qualquer posição [9,16].	Processo manual, baixa taxa de deposição, superaquecimento que pode gerar mudanças nas propriedades físicas do material, alto risco de acidentes [9, 16].
Resistencia	Pouco oneroso, não precisa de metal de solda, é automático [9,17].	Crescimento de grãos e baixa ductilidade [9,17].
Feixe de elétrons	Pode-se soldar metais refratários, reativos e a combinação de metais dissimilares, qualidade superior o igual a TIG, zona afetada pelo calor pequena e estreita, baixa distorção	Alto custo de equipamentos, limitação no tamanho da peça, necessidade de o processo ser a vácuo, emissão de raios X [18, 20].

Considerando a possibilidade de substituição das ligas à base de zircônio por ligas a base de FeCrAl estudos sobre a soldagem da mesma são importantes. O estabelecimento de uma técnica adequada passa pelos resultados oferecidos pela mesma, custo e possibilidade de implantação, principalmente em ambiente industrial.

Cada técnica de soldagem apresenta vantagens e desvantagens, nota-se pela descrição delas, portanto a sugestão de uso de determinada técnica não tem objetivo de eliminar as outras e sim destacar as vantagens dela.

Diante dos estudos apresentados, foi possível concluir que, dentre todos os processos de soldagem, o mais adequado é o processo TIG, devido à alta qualidade da solda em relação



ao processo de eletrodo revestido. Analisando outros métodos como o de arco submerso e o de soldagem com gás concluiu-se que eles também são inferiores à soldagem TIG. Tal afirmação é justificada no fato de que com o primeiro método citado não é possível soldar objetos cilíndricos e que com o segundo há grandes possibilidades de superaquecimento.

Diferentemente dos processos anteriormente citados, os métodos de soldagem com plasma, de soldagem por resistência, de soldagem por feixe de elétrons e de soldagem por atrito têm qualidade igual ou superior a TIG. Todavia, alguns fatores levaram a escolha do método TIG. Esses fatores são próprios de cada soldagem; aquela com resistência, por exemplo, não é recomendada para a liga FeCrAl devido a sua propriedade antioxidante e a presença do ferro. Isso ocorre devido à má soldabilidade causada pelo crescimento do grão e o rápido resfriamento a partir de altas temperaturas além das dificuldades de controle e inspeção de micro trincas, comuns nesse método.

Ademais, outro exemplo, é o fato de a soldagem com plasma e a soldagem com feixe de elétrons não serem significativamente superiores a TIG, mas serem muito mais onerosas e tecnologicamente de difícil realização. Ainda, a soldagem com feixe de elétrons demonstrou estiramento (deformação elástica) nas áreas de fusão, além da perda de força devido ao recozimento pela alta temperatura na soldagem. Já a soldagem por atrito, apesar de ter sido testada em um ambiente semelhante ao nuclear e obtido bons resultados, não existem estudos suficientes para que seja possível afirmar sua superioridade dentro de um reator nuclear PWR.

Logo, o processo TIG utilizando gás hélio, especificamente, é sugerido. Pois com o tal gás é possível automatizar o processo, o que aumentar a qualidade da solda. Além do mais se obtém menor zona afetada pelo calor, mantendo as propriedades da liga soldada. Esse processo apresenta, também, resistência mecânica adequada e devido a atmosfera de hélio que é criada há baixo teor de contaminação por nitrogênio e hidrogênio.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, FAPEMIG, CNEN e CNPq pelo suporte financeiro e ao Departamento de Engenharia Nuclear pelo suporte tecnológico e recursos humanos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Amano. Y, The Fukushima Daiichi Accident: Report by the Director General. International Atomic Energy Agency, 2015.

[2] Field, K.G., et al. Handbook on the Material Properties of FeCrAl Alloys for Nuclear Power Production Applications (FY18 Version: Revision 1). No. ORNL/SPR-2018/905. Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, Tn (United States), 2018.

[3] Pint B.A, Terrani. K. A *et al.* High temperature oxidation of fuel cladding candidate materials in steam-hydrogen environments, Journal Nuclear Materials, 440 (2013)420-427. doi: 10.1016/j.jnucmat.2013.05.047.



- [4] Magalhães, I. R., Análise Físico-Química e Térmica de Revestimentos Nucleares a Base de FeCrAl Tolerantes a Acidentes, Dissertação, Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil (2020).
- [5] Callister Jr, W. D. (2002). Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução, 5ª Edição. Rio de Janeiro: LTC.
- [6] Camargo, Antonio C. de. Comparação das características de corpos de alumina, a verde e após sinterização obtidos pelos processos de prensagem uniaxial e prensagem isostática, Dissertação, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, CNEN/SP, Brasil (1993).
- [7] Field, Kevin G., et al. Handbook on the Material Properties of FeCrAl Alloys for Nuclear Power Production Applications (FY18 Version: Revision 1). No. ORNL/SPR-2018/905. Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States), (2018).
- [8] Regina. J. R., *et al*, The effect of chromium on the weldability and microstructure of Fe-Cr-Al weld cladding, *Welding Research*. 86 (2007) 170-178.
- [9] Wainer. E, Brandi. S. D et al., Soldagem e Processos Metalúrgicos, 4ª Ed, Edgard Blücher LTDA (2004).
- [10] THE WELDING INSTITUTE — Submerged Arc Welding; (1978).
- [11] Moino, H.F. & Fiorello, V. - Tecnologia de Fabricação; FATEC, São Paulo, (1984).
- [12] Horsfield. A, “The fundamental principles of submerged arc welding”, Submerged Arc Welding, Cambridge, The Welding Institute, (1978.)
- [13] Okada, M.; Ariyasu, T. & MARUO, H. Yamada Technol. Repts; Osaka Univ, 10, p. 209, (1960).
- [14] Industries. P. W- Plasma GMA Welding: A New Way for Aluminium; Welding Design and Fabrication, (1981)
- [15] <https://awo.aws.org/glossary/oxyfuel-gas-welding-ofw/> acessado em 15/07/2020
- [16] Lensi, M. Solda Oxiacetilênica, Hemus Livraria Editora Ltda., 1ª ed. (1975).
- [17] AWS - Resistance Welding, Theory and Use; NY, (1956).
- [18] Rykaline, N.N. - Les sources d'énergie utilisées en soudage; Soud.Tec.Conn., (1974).
- [19] Susei. S *et al*, General View of Application of EB Welding in Pressure Vessel Technology; Kawaiáci Heavy Industries, (1977).
- [20] Sayegh, G. - Electron beam welding; Sciaky Co.; 2.ª ed (1977).
- [21] Lancaster, F.J. Metallurgy of Welding, 3ª ed. George Allen & Unwin, London (1980), 110-173.
- [22] Modenesi P.J., Soldabilidade dos Aços Transformáveis, Apostila, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais, (2002).



[23] Fuoco R., Fratura Intergranular em Peças Fundidas de Aço Devido À Precipitação de Nitretos de Alumínio (“Rock Candy”), Tecnologia em Metalurgia e Materiais, v.1, n.3, p.35-39, São Paulo, (2005).

[24] Shingledecker. J. P, *et al*, Proceedings from the Materials Science & Technology Conference. Materials Science & Technology 2005, RS Mishra, JC Earthman, SV Raj e R. Viswanathan, orgs., The Minerals, Metals and Materials Society, Pittsburgh, PA (2005), pp. 25–28.

[25] Modenesi P.J., Soldabilidade dos Aços Transformáveis, Apostila, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais, (2002).

[26] Fuoco R., Fratura Intergranular em Peças Fundidas de Aço Devido À Precipitação de Nitretos de Alumínio (“Rock Candy”), Tecnologia em Metalurgia e Materiais, v.1, n.3, p.35-39, São Paulo, (2005).

[27] Owczarek, E., Zakroczymski, "Hydrogen transport in a duplex stainless steel", Acta Materialia, v. 48, (2000).

[28] Miranda, P.E.V., Efeitos mecânico-metalúrgicos do hidrogênio no aço inoxidável austenítico. Tese, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, (1978).

[29] Oliveira, S.P., Miranda, P. E. V., "Concentração crítica de hidrogênio para a fragilização pelo hidrogênio em aços". COPPE/UFRJ — PEMM —Laboratório de Hidrogênio, Rio de Janeiro, (2000).

[30] Fortes. C e Araújo. W– Apostila de Metalurgia da Soldagem, Minas Gerais, Ed. ESAB BR (2005).