



EFEITO DA SOLDAGEM GTAW NA MICROESTRUTURA DA ZONA FUNDIDA DO AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX UNS S32750 APÓS SOLDAGEM COM LASER Nd:YAG

Suter, L. C.¹; Ventrella, V. A.¹; Videira, A. M.¹; Da Cruz Junior, E. J.²

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Av. Brasil,
56, CEP 15385-007, Centro, Ilha Solteira, SP, Brasil

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Av. João
Olimpio de Oliveira, 1561, CEP 18202-000, Vila Asem, Itapetininga, SP, Brasil

Correspondência: leonardo.c.suter@unesp.br

RESUMO

Os aços inoxidáveis duplex e superduplex possuem uma microestrutura bifásica composta por frações volumétricas de aproximadamente metade de ferrita e metade de austenita, conferindo-lhes alta resistência à corrosão aliada com uma boa resistência mecânica. Entretanto, quando soldados esses aços tendem a perder o balanceamento das fases, restando mais ferrita do que austenita na sua microestrutura após o processo. Para a manutenção da sua microestrutura, e conseqüentemente das suas propriedades, a forma estudada foi de realizar uma soldagem GTAW após processo de soldagem com laser Nd:YAG pulsado. Foram soldadas chapas laminadas de aço superduplex UNS S32750 mantendo os parâmetros da soldagem a laser, mas variando a corrente de soldagem GTAW. Realizando análises micrográficas em amostras retiradas das chapas soldadas, foi obtido um aumento no teor de austenita na zona fundida das amostras submetidas à soldagem GTAW, em comparação a amostra soldada apenas com laser Nd:YAG pulsado.

Palavras-chave: soldagem, laser Nd:YAG, GTAW, aço inoxidável, superduplex UNS S32750.

INTRODUÇÃO

A soldagem a laser é um processo que vem sendo utilizado devido à sua facilidade de automação, aumentando assim a produtividade com alta precisão, repetibilidade e qualidade, com baixa distorção do material soldado. É utilizada principalmente na indústria eletrônica, onde as pequenas dimensões dos componentes exigem maior precisão que outros processos, mas também é um processo presente na fabricação de equipamentos hospitalares, máquinas-ferramenta, e também nas indústrias aeronáutica e automobilística^(1, 2).

Estudos vêm sendo realizados para otimizar seu emprego na indústria petrolífera, onde há uma necessidade de se utilizar materiais que possuem alta resistência à corrosão, como os aços inoxidáveis duplex e superduplex^(3, 4). Estes materiais possuem uma microestrutura balanceada composta por aproximadamente 50 % de ferrita e 50 % de austenita, mas esse balanceamento pode ser perdido após a soldagem com laser, restando mais ferrita do que austenita^(4, 5).

Este desbalanceamento acarreta em uma menor resistência à corrosão, o que inviabiliza o uso desses materiais quando o que se deseja é justamente essa propriedade^(6, 7). Então para que o emprego da soldagem seja viável nos aços inoxidáveis duplex, deve-se reduzir esse desbalanceamento ao máximo possível, podendo ser adicionados elementos gamagênicos, isto é, estabilizadores de austenita, através de soldagem dissimilar⁽⁸⁾ ou como metal de adição⁽⁹⁾, além também de alterar o próprio procedimento de soldagem, como por exemplo realizando soldagem híbrida laser-GTAW⁽¹⁰⁾ e com pós-aquecimento⁽⁷⁾.

No presente trabalho, foi analisada a influência do processo GTAW após a soldagem com laser pulsado Nd:YAG na microestrutura do aço superduplex UNS S32750 em diferentes condições, obtendo amostras com refusão e também sem refusão, como forma de realizar um pós-aquecimento localizado no cordão de solda.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, foram utilizadas chapas laminadas de aço inoxidável superduplex UNS S32750 com 3 mm de espessura, cuja composição química nominal está disposta na Tabela 1, conforme fornecido pela Outokumpu, fabricante das chapas de aço.

Tabela 1 – Composição química nominal do aço superduplex UNS S32750, em porcentagem de massa

| Elemento | C | Cr | Ni | Mo | N |
|----------|------|------|-----|-----|------|
| Teor % | 0,02 | 25,0 | 7,0 | 4,0 | 0,27 |

Primeiro as chapas foram soldadas por laser pulsado Nd:YAG através de uma fonte UW-150A, da United Winners, cujo arranjo se encontra na Figura 1. A soldagem se deu de forma autógena, ou seja, sem adição de material, com atmosfera protetora de argônio em vazão de 15 L/min. Os demais parâmetros de soldagem estão dispostos na Tabela 2.

Figura 1 – Foto do arranjo do equipamento de soldagem por laser pulsado Nd:YAG

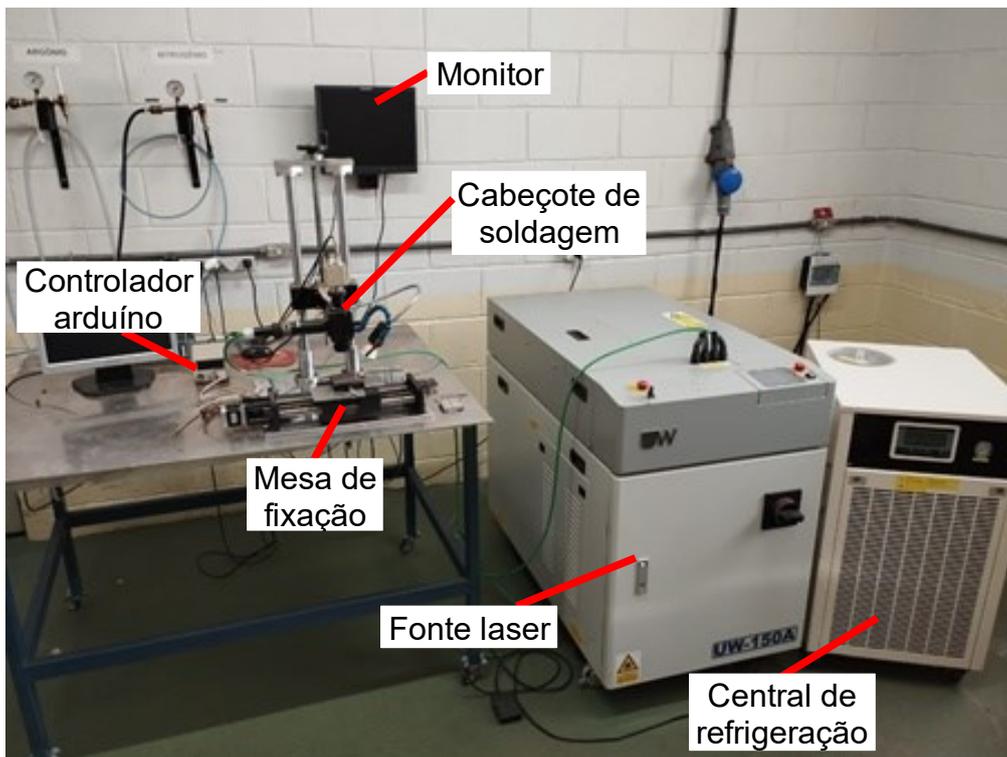


Tabela 2 – Parâmetros de soldagem por laser pulsado Nd:YAG

| Potência de pico [kW] | Largura temporal [ms] | Energia do pulso [J] | Velocidade de soldagem [mm/s] | Frequência [Hz] | Aporte térmico [J/mm] |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------------|
| 2,5 | 10 | 25,0 | 2,00 | 6,0 | 75 |

Após o processo por laser pulsado, foi feita uma soldagem GTAW sobre o cordão originado do procedimento anterior, também de forma autógena, utilizando uma fonte multiprocessos Invertec 300I, cujo arranjo está mostrado na Figura 2. O eletrodo utilizado foi o de tungstênio ligado com 2 % de tório, com 1/16" de espessura, a atmosfera protetora foi de argônio em vazão de 20 L/min, e a corrente elétrica foi contínua com polaridade direta. As chapas foram soldadas com diferentes correntes elétricas, resultando em um total de 7 condições distintas. Os parâmetros utilizados se encontram na Tabela 3. O processo foi automatizado com o auxílio de uma "tartaruga", que fez o deslocamento das chapas por baixo da tocha GTAW.

Figura 2 – Foto do arranjo do equipamento de soldagem GTAW

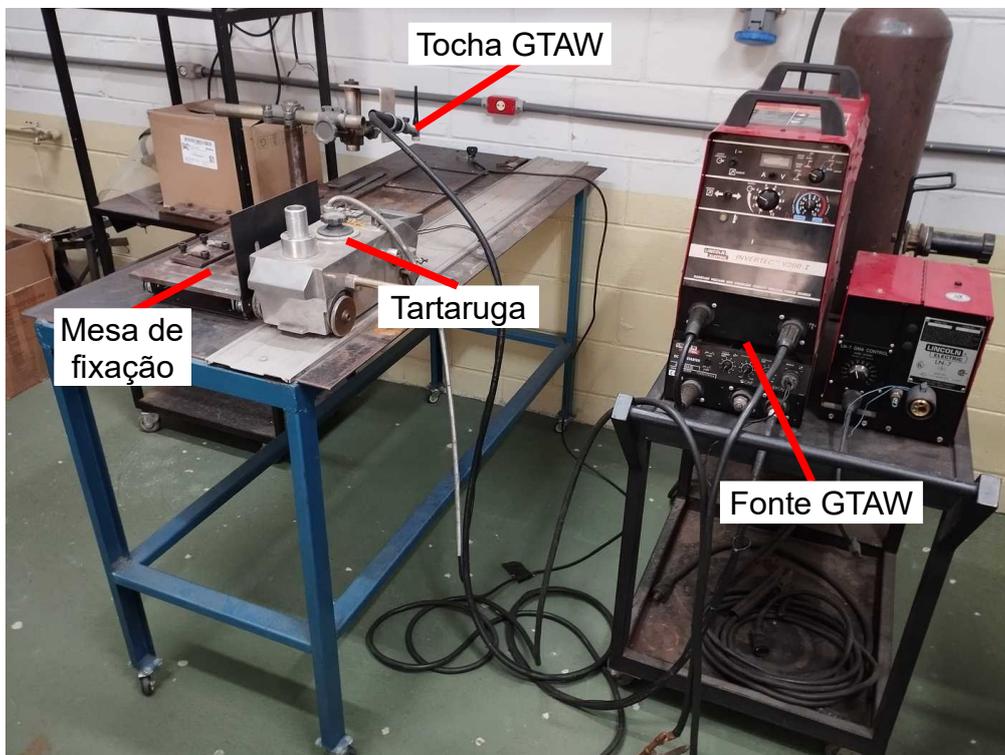


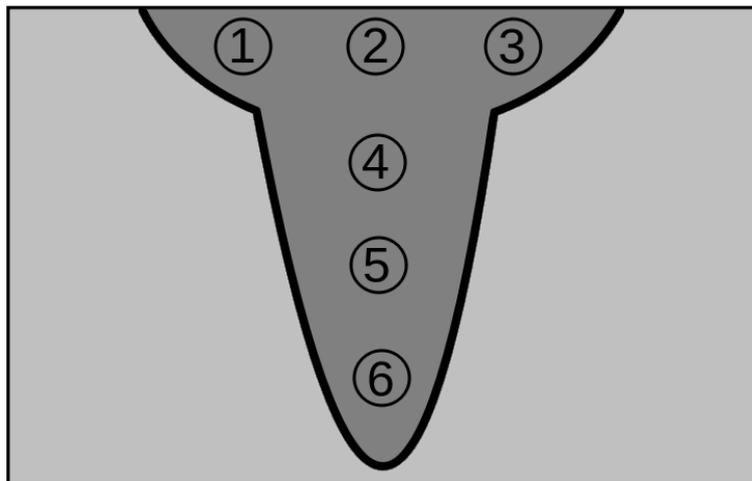
Tabela 3 – Parâmetros de soldagem GTAW

| Amostra | Corrente de soldagem [A] | Velocidade de soldagem [mm/s] | Aporte térmico [J/mm] |
|---------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| LP | - | - | - |
| LT20 | 20 | 5,0 | 28 |
| LT30 | 30 | 5,0 | 42 |
| LT40 | 40 | 5,0 | 56 |
| LT50 | 50 | 5,0 | 70 |
| LT60 | 60 | 5,0 | 84 |
| LT70 | 70 | 5,0 | 98 |

Realizados os procedimentos de soldagem, foram então retiradas duas amostras de cada condição através de corte realizado na seção transversal das chapas. Em seguida, foi feita preparação metalográfica com embutimento, lixamento, polimento e ataque químico com reagente Behara modificado, composto pelas proporções: 80 ml de água destilada, 20 ml de ácido clorídrico, 1,0 g de metabissulfato de potássio e 2,0 g de bifluoreto de amônio.

As análises macrográficas foram realizadas com estereomicroscópio ZEISS, modelo Discovery V.8, sendo utilizado tanto para fotos da vista superior dos cordões de solda quanto das amostras. As análises micrográficas foram realizadas com auxílio de microscópio FORTEL, modelo IM100, sendo tiradas 3 fotos na superfície e 3 ao longo da profundidade do cordão de cada amostra, como mostrado pela Figura 3.

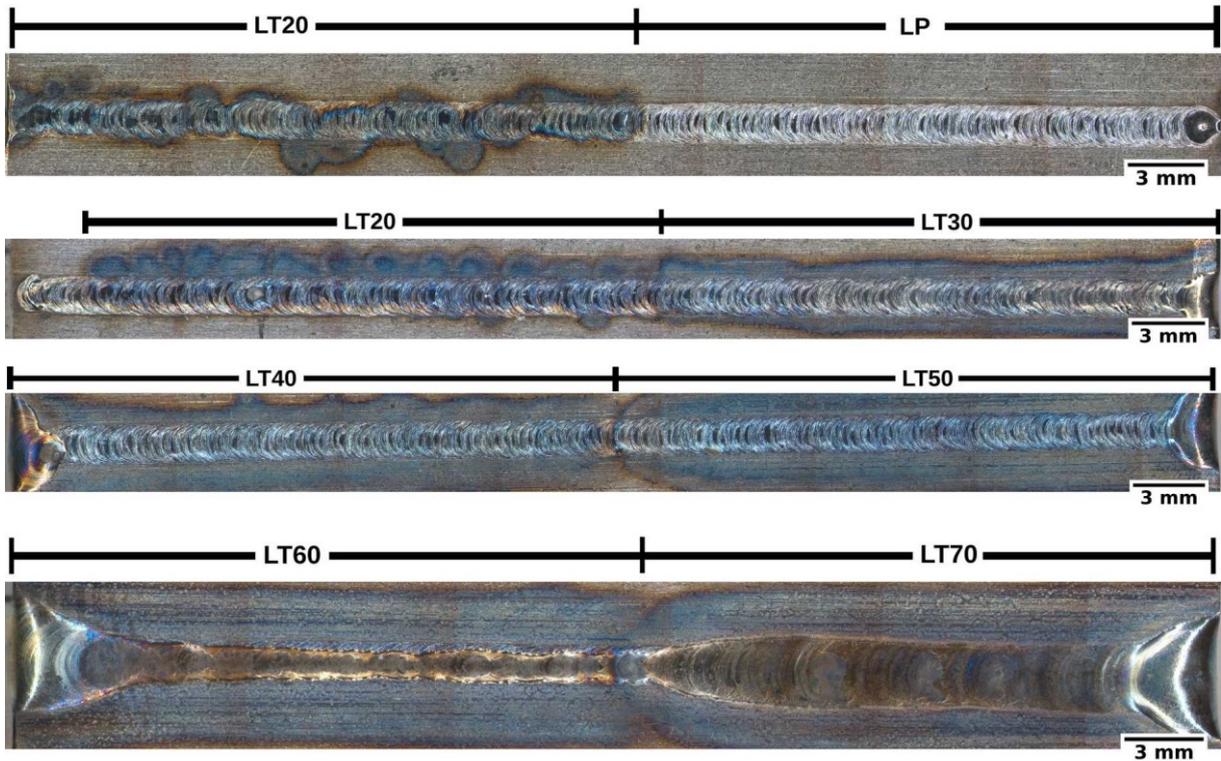
Figura 3 – Representação das regiões das fotos para análises micrográficas



RESULTADOS E DISCUSSÃO

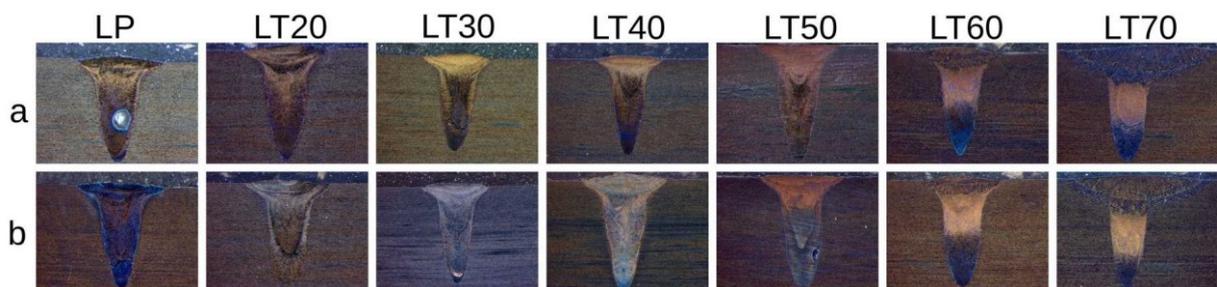
Após a realização do processo GTAW, constatou-se que a refusão do cordão de solda devido ao laser se iniciou acima de 50 A, sendo parcial a 60 A e total quando a corrente GTAW foi de 70 A. Além disso, ocorreu grande instabilidade do arco elétrico a 20 A. A Figura 4 mostra as vistas superiores dos cordões de solda em cada condição após o passe GTAW.

Figura 4 – Vistas superiores dos cordões de solda



A Figura 5 mostra as macrografias retiradas das amostras em cada condição de corrente GTAW.

Figura 5 – Macrografias das amostras

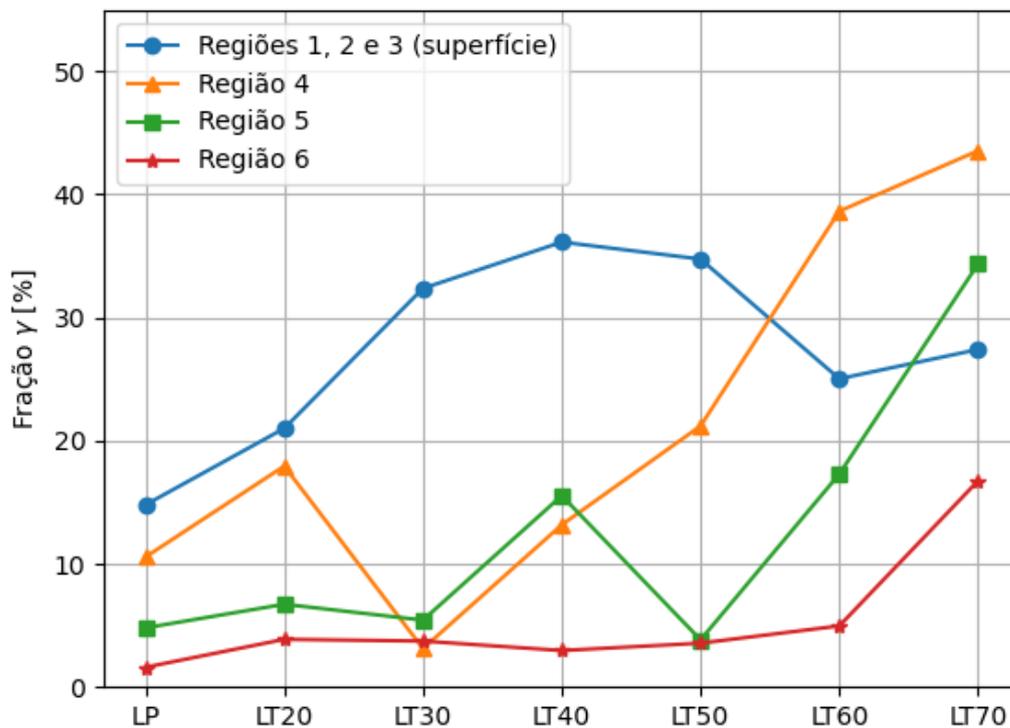


As imagens mostraram a presença de poros nas amostras LPa, LT30b e LT50b, mas não é possível identificar a presença de trincas. Nas amostras LT70, é possível observar a refusão após o passe GTAW, mais raso e largo do que o cordão gerado pelo processo laser, que é mais estreito e profundo.

Quanto às análises micrográficas, foi utilizado o software ImageJ para a obtenção do balanço de fases das fotos tiradas através de microscopia óptica. Foi detectado que houve aumento na fração volumétrica de austenita na superfície com

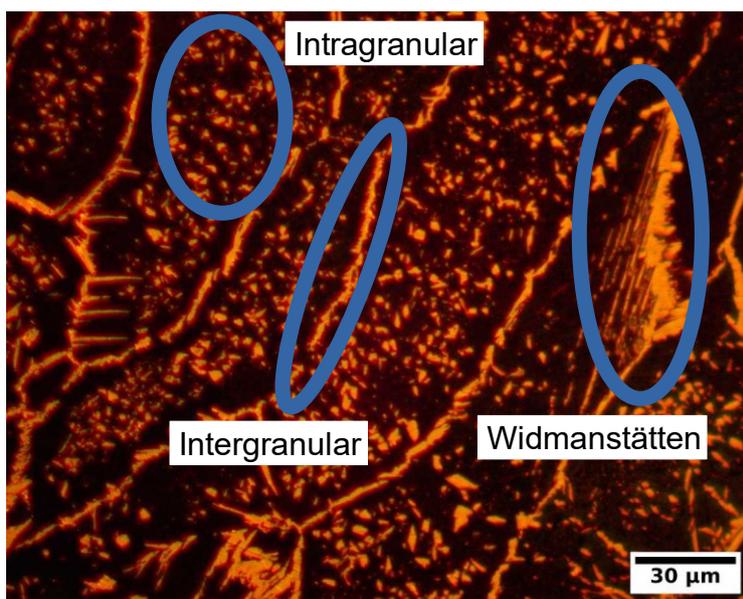
pico entre 40 A e 50 A com aproximadamente 36 %. Acima dessas correntes (quando inicia a refusão do cordão de solda devido ao laser), o teor da fase γ decresceu. Também houve um comportamento crescente nas regiões mais abaixo da superfície, chegando a mais de 40 % nas amostras da condição LT70. Já na raiz do cordão (região 6), não houve mudança significativa até a corrente de 60 A, havendo diferença apenas nas amostras soldadas com corrente de 70 A. A Figura 6 mostra um gráfico com as frações volumétricas de austenita por região e em cada condição de corrente GTAW.

Figura 6 – Frações volumétricas de austenita em cada condição



Nas regiões mais profundas do cordão de solda, a austenita está presente principalmente nos contornos de grão (intergranular), e quanto mais próximo da superfície, maior a quantidade de austenita intragranular, surgindo também de Widmanstätten, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Tipos de austenita encontrados. Na foto, superfície da amostra LT60a



CONCLUSÃO

Com os parâmetros da soldagem GTAW utilizados, a corrente de 20 A gerou um arco elétrico instável, resultando em um recobrimento irregular sobre o cordão de solda devido ao laser; as correntes de 30 A, 40 A e 50 A resultaram em um recobrimento mais estável; o processo com corrente de 60 A resultou em uma refusão parcial do cordão de solda laser; e com corrente de 70 A gerou um novo cordão de solda.

Houve aparição de poros nas amostras LPa, LT30b e LT50b, mas sem presença perceptível de trincas ou outras descontinuidades. Também não foi observada nenhuma fase frágil no metal de solda.

As maiores frações volumétricas de austenita próximo à superfície foram encontradas nas amostras submetidas ao processo GTAW se situaram entre as correntes de 40 A e 50 A (quando ainda não há refusão do cordão de solda). Nas regiões mais profundas do cordão de solda, não há mudança significativa no teor da fase γ quando não há refusão após a soldagem com eletrodo de tungstênio.

Análises adicionais, como ensaios de corrosão, devem ser feitas para verificar se as condições LT40 e LT50 são de fato as mais resistentes dentre todas as condições analisadas.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

1. DAWES, C. Industrial applications. In: DAWES, C. (Eds.) Laser Welding. Woodhead Publishing, p.31-50, 1992. <https://doi.org/10.1533/9781845698843.31>.
2. DEEPAK, J. R.; ANIRUDH, R. P.; SARAN SUNDAR, S. Applications of lasers in industries and laser welding: A review. MATERIALS TODAY: proceedings, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.102>.
3. LUO, J.; YAN, P; FAN, Y.; LUO, S.; LONG, Y. Investigation of corrosion behavior of 2205 duplex stainless steel coiled tubing in complex operation environments of oil and gas wells. ENGINEERING FAILURE ANALYSYS, v. 151, p. 107355, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107355>.
4. FRANZINI, O. D. Aplicação de laser pulsado Nd:YAG na soldagem do aço super duplex UNS S32750. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Materiais e Processos de Fabricação) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2016.
5. MODENESI, P. J. Soldabilidade dos aços inoxidáveis. São Paulo: SENAI-SP, 2001. 100 p. (Coleção Tecnologia da Soldagem Vol. 1)
6. HOU, Y.; NAKAMORI, Y.; KADOI, K.; INOUE, H.; BABA, H. Initiation mechanism of pitting corrosion in weld heat affected zone of duplex stainless steel. CORROSION SCIENCE, v. 201, p. 110278, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110278>.
7. SARAVANAN, S.; RAGHUKANDAN, K.; SIVAGURUMANIKANDAN, N. Pulsed Nd: YAG laser welding and subsequent post-weld heat treatment on super duplex stainless steel. JOURNAL OF MANUFACTURING PROCESSES, v. 25, p. 284-289, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.12.015>.
8. LEITE, C. G. S.; JUNIOR, E. J. C.; LAGO, M.; ZAMBON, A.; CALLIARI, I.; VENTRELLA, V. A. Nd: YAG Pulsed Laser Dissimilar Welding of UNS S32750 Duplex with 316L Austenitic Stainless Steel. MATERIALS, v. 12, 2906. 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12182906>.

9. SELOTO, B. B. Adição de elementos gamagênicos na soldagem de chapas de aço superduplex UNS S32750 por laser pulsado Nd:YAG. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Materiais e Processos de Fabricação) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2021.
10. VIDEIRA, A. M. Soldagem híbrida GTAW-Laser Nd-YAG pulsado: efeitos no aço inoxidável superduplex UNS S32750. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica - Materiais e Processos de Fabricação) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2021.

EFFECT OF GTAW WELDING ON THE FUSION ZONE MICROSTRUCTURE OF SUPLEXDUPLEX STAINLESS STEEL UNS S32750 AFTER Nd:YAG LASER WELDING

ABSTRACT

Duplex and superduplex stainless steels have a biphasic microstructure composed of volumetric fractions of ferrite and austenite approximately equal, providing them high corrosion resistance combined with good mechanical strength. However, when welded, these steels tend to lose the phase balance, resulting in more ferrite than austenite in their microstructure after the process. To maintain their microstructure, and consequently their properties, the studied approach was to perform GTAW welding after pulsed Nd:YAG laser welding. Laminated plates of superduplex steel UNS S32750 were welded, keeping the laser welding parameters constant but varying the GTAW welding current. Micrographic analyses of samples taken from the welded plates showed an increase in the austenite content in the fusion zone of the samples subjected to GTAW welding, compared to the sample welded only with pulsed Nd:YAG laser.

Keywords: welding, Nd:YAG laser, GTAW, stainless steel, superduplex UNS S32750