



Guia prática para a caracteri microestrutural resultante de um aco inoxidável duplex depois do processo de solda

Orlando Gámez Córdoba

Yanelis K Avila Pavón

Recebido: 28-10-2020 Aprovado: 12-01-2021

Guia prática para a caracterização microestrutural resultante de um aço inoxidável duplex depois do processo de solda

Practical guide to the microstructural characterization resulting from a duplex stainless steel after the welding process

Orlando Gámez Córdoba¹.

Email: (orlandgomez.20041@gmail.com) (<https://orcid.org/0000-0002-4066-2506>)

Yanelis K Avila Pavón².

Email:(avilapavon37@gmail.com) (<https://orcid.org/0000-0002-1218-1078>)

Resumo

O objetivo do trabalho é propor uma guia para a caracterização microestrutural resultante de um Aço Inoxidável Duplex (DSS) depois de submeter-se ao processo de Solda ao Arco com Gás Protetor e Eletrodo de Tungstênio (GTAW) na disciplina Processos Tecnológicos de Fundição e Soldagem, ditada a estudantes de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Politécnico de Huambo (ISPHbo) de acordo com suas necessidades acadêmicas que permita sistematizar os conhecimentos. Os análises macro e microscópicas realizadas se podem aplicar em outras disciplinas do currículo. Consegue-se caracterizar a microestrutura resultante do aço inoxidável duplex SAF 2205, obtendo microestruturas livres de fissuras e com boas propriedades mecânicas, (dureza, resistência ao desgaste). As equações desenvolvidas permitem estabelecer o procedimento metodológico dos regimes do processo GTAW.

Palavras chave: guia, processo de soldagem, Aço Inoxidável Duplex, GTAW, análise microestrutural.

Abstract

The objective of this work is to propose a guide for the microstructural characterization resulting of a Duplex Stainless Steel (DSS) after of submitting to the process of welding to the Arch with Protector Gas and Tungsten's Electrodes (GTAW) in the Technological process of Foundry and Welding discipline, dictated to students of Mechanical Engineering of the Superior Polytechnic Huambo's Institute (ISPHbo) according to its academic needs that permit systematizing knowledge. The macro and microscopic analyses can be applied to other disciplines of the curriculum. It is being able to characterize the resulting microstructure of the duplex stainless steel SAF 2205, obtaining free of fissures microstructures and with good mechanical properties,

¹ Professor do Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad “José Eduardo Dos Santos” Instituto Superior Politécnico de Huambo, Huambo, Angola.

² Professora do Departamento Ciências de Base. Universidad “José Eduardo Dos Santos” Instituto Superior Politécnico do Huambo, Huambo, Angola.

(hardness, resistance to the wear). The equations developed permit to establish the methodological procedure of the process GTAW regimes.

Words key: Guide, process of welding, Duplex Stainless Steel, GTAW, analysis microstructural

Introdução

A formação dos engenheiros e particularmente, a formação dos engenheiros mecânicos, deve responder às necessidades do desenvolvimento social, técnico e econômico do país no âmbito histórico social da época contemporânea.

Em Angola a formação dos engenheiros mecânicos, segundo o Plano Nacional de Desenvolvimento 2013-2017, tem-se declarado políticas para o desenvolvimento de sectores económicos que precisam da formação de profissionais em diferentes linhas das ciências técnicas. O curso de Engenharia Mecânica tem sido apresentado como uma resposta adequada aos novos desafios do desenvolvimento industrial de Angola, procurando satisfazer com qualidade a demanda de técnicos de nível superior que esse desenvolvimento precisa.

O curso de Engenharia em Mecânica do ISPHbo, atualmente se encontra no quinto ano. A matéria Soldagem que pertence ao programa do grupo de disciplinas Processos Tecnológicos, tem muitos pontos a analisar-se e por conseguinte a estudar-se. Atualmente se faz um estudo teórico ditado em um período de 2 horas e esporadicamente se realizam visitas guiadas para familiarização em diversas empresas a nível local, sem ter a oportunidade de pôr em prática o aprendido durante as aulas teóricas. A falta de laboratório experimental na instituição nos obriga a procurar soluções para que o aluno adquira esses conhecimentos práticos.

Ao contar com classes práticas se necessita de uma guia que sirva ao estudante poder desenvolver habilidades para a caracterização microestructural de um Aço Inoxidável depois de submeter-se ao processo Solda ao Arco com Gás Protetor e Eletrodo de Tungstênio (GTAW) e estudá-lo de maneira adequada. O desenvolvimento da guia poderá levar a estudante por um caminho ordenado onde se estudarão as equipes utilizadas neste tipo de solda e se familiarizará ao estudante para que possam fazer algum cordão e determinar mediante análise metalográficos a microestructura resultante.

Desenvolvimento

O processo de solda GTAW, é muito utilizado na atualidade para uniões de pranchas magras. Este processo pode realizar-se de duas formas, a primeira utilizando material de contribuição e a outra sem utilizar material de contribuição. Na atualidade o processo GTAW mais utilizado é o que emprega material de contribuição, mas o processo de solda GTAW sem material de contribuição, que cumpra com as propriedades mecânicas requeridas, seria ideal pela vantagem econômica que representa. O processo pode ser usado para soldar aços ao carbono e inoxidáveis, alumínio, magnésio, cobre, etc, (ASM Handbook, 1990); Manual de Solda, 1999). No processo de solda GTAW, a zona de solda é resguardada da atmosfera por um gás inerte que é alimentado através da tocha, Argônio e Hélio podem ser usados com êxito neste processo. A mescla destes dois gases é possível e se usa para aproveitar os benefícios

Guia prática para a caracteri microestrutural resultante de um aço inoxidável duplex depois do processo de solda

Orlando Gámez Córdoba

Yanelis K Avila Pavón

Recebido: 28-10-2020 Aprovado: 12-01-2021

de ambos, mas a seleção do gás ou mescla de gases dependerá dos materiais a soldar.

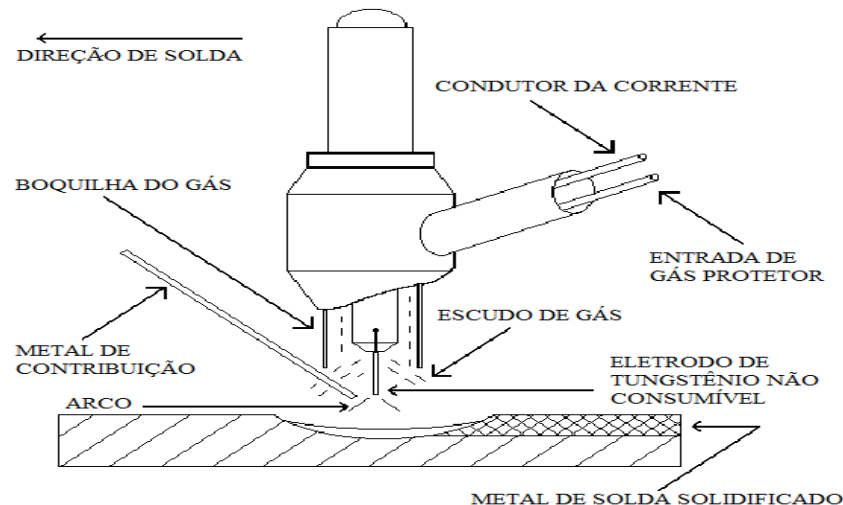


Figura 1. Esquema de solda com eletrodo de tungstênio e gás (GTAW). Fonte: Manual de Solda, (1999).

Os aços inoxidáveis se diferenciam de outros aços durante o processo de solda pelas mudanças morfológicas que sofrem quando lhe aplica o ciclo térmico de solda. Estas mudanças são notáveis pela predição da microestrutura, pelas características da zona afetada pelo calor e pela evolução da microestrutura na zona de fusão (Alpizar 2003; Ricaurte, Aguirre & Parra 2007).

O Aço Inoxidável Duplex SAF 2205 possui uma microestrutura constituída basicamente pelas fases majoritárias ferrita e austenita em proporções aproximadamente iguais. Esta microestrutura proporciona aos aços inoxidáveis duplex propriedades mecânicas e de resistência à corrosão superior a outros tipos de aços inoxidáveis, o que há incremento a utilização dos mesmos para a fabricação de componentes industriais (Nilsson J-O,1992); sendo utilizado com mais freqüência na indústria química, petroleira, petroquímica e nos meios agressivos que contêm sulfuretos, por sua alta resistência ao fenômeno da corrosão.

Desenvolveram-se investigações sobre a influência dos parâmetros de solda sobre a penetração (Ekroth *et al*; 2000), não entanto, estes parâmetros tais como a voltagem do arco, a intensidade de corrente e a velocidade de solda são variáveis primárias ou operacionais que podem trocar a geometria, as propriedades mecânicas, localização da zona de falha e a microestrutura das soldas do aço inoxidável duplex SAF 2205.

As mudanças microestructurales no metal de solda acontecem durante o esfriamento; ao alcançá-la temperatura ambiente terão ficado tensões térmicas permanentes de tração cujo valor é da ordem do limite de fluência do material. Não entanto, as microestructuras resultantes diferem das transformações antes mencionadas devido ao

comportamento não isotérmico dos processos de solda (Fernández-Columbié *et al*; 2014).

A evolução microestructural da Zona Afetada Térmicamente (ZAT) nos aços inoxidáveis depende de fatores como a microestructura do metal base, a temperatura pico que se alcança e as velocidades de aquecimento e esfriamento. A Figura 2 esquematiza as diferentes regiões na ZAT; na zona supercrítica é onde ocorre o crescimento de grão, por isso é considerada como a região mais frágil da ZAT.

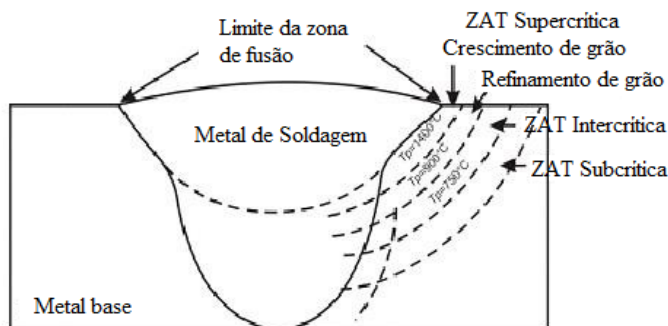


Figura 2. Regiones de la ZAT en los aceros. Fonte: Manual de Solda, (1999).

Geralmente nos aços inoxidáveis, a microestructura resultante na ZAT é diferente a que apresenta o metal base, mas muito parecidas com a do metal de solda. A ZAT se apresenta em uma região estreita difícil de distinguir. A formação da ZAT pode ser explicada em função dos ciclos térmicos e sobre a base destes e as temperaturas às que estejam expostos pode dividir-se em três regiões (Kotecki e Lippold 2013).

Quintero *et al*; (2006) realizaram soldas em um aço inoxidável duplex 2205 com juntas dispostas a batente, pelo processo de arco de plasma (PAW) através da técnica de olho de fechadura. Obteve-se uma solda com bom aspecto superficial e uma Zona Afetada pelo Calor (ZAC) muito mais estreita que a produzida por outros processos de solda do mesmo aço. Finalmente se estabelece que, o maior conteúdo de ferrita favorece o aumento da dureza e a diminuição da tenacidade do aço duplex 2205 soldado.

C. J. Múnez *et al*; (2007) realizaram soldas mediante o processo GTAW utilizando como material de contribuição um fio duplex ER 2209 e dois austeníticos ER 316LSi e ER 308LSi. Onde se observou que as uniões realizadas com o fio duplex apresentam uma microestructura similar a do duplex SAF 2205, enquanto que as realizadas com os fios austeníticos apresentam uma morfologia diferente nas que a relação α/γ diminui, e possui menor resistência a corrosión devido ao desequilíbrio da relação de fases.

A partir dou expresso anteriormente neste trabalho se traça como objetivo geral: propor uma guia pratica para a caracterização microestructural resultante de um Aço Inoxidável Duplex (DSS) depois de submeter-se ao processo de solda GTAW.

Composição química do metal base e de contribuição.

Os eletrodos de tungstênio são não consumíveis e se apóiam em sua composição química e regida pela norma AWS A 5.12, se o processo se empregar como é devido, já que não se derretem nem se transferem à solda. Como material de contribuição, a

Guia prática para a caracteri microestrutural resultante de um aço inoxidável duplex depois do processo de solda

Orlando Gámez Córdoba

Yanelis K Avila Pavón

Recebido: 28-10-2020 Aprovado: 12-01-2021

especificação da AWS A 5.16, estabelece varinhas e eletrodos para a solda do aço duplex e ligas (Yamauchi *et al*; 2002).

A máquina de solda utilizada é da marca Miller, as características da fonte desta máquina nos permite saber as relações voltagem-intensidade em cada momento de utilização desta e de fato se converte na característica do arco. A vantagem fundamental deste tipo de máquina é sua grande economia no consumo energético.

Análise microestrutural

A análise microestrutural consiste na observação de uma amostra padrão do material base, que se empregará para estabelecer o comportamento do material das amostras depois de efetuado a análise de cada uma das partes afetadas.

A microestrutura da figura 3 se corresponde com a amostra padrão da liga depois do ataque, distinguem-se os grãos de ferrita, que são mais escuros, que os de austenita. Durante o ataque, a capa de óxido sobre a ferrita se remove para reformar-se logo do ataque. Assim a ferrita se vê mais escura ao microscópio e a austenita, que quase não está atacada, reflete mais a luz e se vê mais brilhante.

Para estabelecer o comportamento microestrutural nas diferentes zonas, logo depois de realizado o processo de solda se seguiu o procedimento que aparece refletido nas figuras 3.

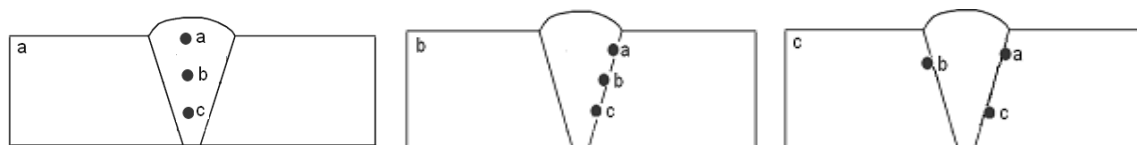


Figura 3. Comportamento macroestrutural nas diferentes zonas. (4a Microestrutura na direção horizontal do cordão, 4b Microestrutura na interfase do cordão, 4c Microestrutura da zona afetada termicamente na união de solda). Manual de Solda, (1999).

Materiais e equipes empregados na experimentação

Para ensaios microestructurales, a não alteração das propriedades dos materiais é de vital importância, já que a mudança da mesma reflete uma imagem distorcida do que queremos obter.

Polidora metalográfica montasupal

Utilizou-se para obter uma superfície lisa e polida livre de impregnação de impurezas ou raladas.

Microscópio óptico

Para a observação da microestructura da proveta padrão, a qual se empregará para a comparação das micrografias obtidas, empregou-se um microscópio óptico binocular dotado de uma câmara que reflete a fotografia no computador. Para colocar as provetas

no microscópio se montam em um dispositivo com plastilina que permite um nivelamento adequado destas.

Preparação metalográfica da proveta

A análise mediante microscópio metalográfico permite resolver aspectos relacionados a microestrutura de um metal como, forma e tamanho dos grãos, as fases presente, sua distribuição, defeitos e inclusões e alguns constituintes não metálicos como sulfuretos, óxidos e silicatos.

As superfícies das amostras a investigar devem ser previamente polidas para poder realizar a observação microscópica, por isso se propõe a realização de um conjunto de operações que permitam obter a qualidade superficial desejada. As operações se resumem na seguinte ordem:

- **Corte desbastamento, polido, desengordurado, lavado e ataque químico.**

- **Corte das amostras**

As dimensões da superfície a examinar se cortaram em seções de 15 x 15. Refrigeraram-se constantemente durante o processo de corte, já que a temperatura produzida pelo roce pode alterar radicalmente a estrutura original, pelo menos na superfície obtida.

- **Desbastamento e polido**

Para obter primeiro uma superfície plana e semipolida, mediante o emprego de máquinas ferramenta e papéis abrasivos. O polido com os papéis abrasivos se realizou com a variação da granulometria, da mais grossa a mais fina. Concluído o processo de lixado fino, realizou-se a operação conhecida como polido fino, no que se empregou a massa abrasiva conhecida comercialmente como “Massa GOI”, acrescentada sobre discos providos de panos ou motas. No gentil se empregaram lixas do tipo No 320 e 400 conforme norma ISO 9001.

Este polido se levou a cabo com a lixa montada sobre uma placa de vidro, trocando o sentido do lixado 90° ao passar de uma dobra a outro de maneira que se elimine a capa de metal distorcido e deslizado deixado pelo anterior.

- **Panos para gentil**

Uma vez polida as provetas se lavaram com água destilada, secaram-se com papel de filtro e finalmente se voltaram a lavar com tetracloruro de carbono para evitar qualquer vestígio de graxa e massas de polir.

- **Ataque das amostras para seu exame microscópico**

Realizou-se com o objetivo de ressaltar e observar a estrutura metalográfica formada depois do processo de desgaste (ASTM E – 262 – Pratices A). Para a observação das amostras por microscopia óptica foram atacadas a temperatura ambiente com uma mescla de ácido: ácido acético, ácido clorídrico (HCl) e ácido nítrico (HNO₃), em iguais proporcione. A proveta se inundou durante 45 segundos, considerando que a mescla dos ácidos inicia uma reação na qual se perdem suas características para revelar a ferrita.



Guía práctica para a caracteri microestrutural resultante de um aco inoxidável duplex depois do processo de solda

Orlando Gámez Córdoba

Yanelis K Avila Pavón

Recebido: 28-10-2020 Aprovado: 12-01-2021

Cálculo para o processo de solda

Em qualquer tipo de processo de solda, a melhor que se pode obter, é aquela onde a união e o material base compartilham as mesmas propriedades químicas, metalúrgicas e físicas. Para obter essas condições a solda fundida deve estar protegida da atmosfera durante a operação de soldeo, de outra forma, o oxigênio e o nitrogênio da atmosfera se combinarão, literalmente, com o material fundido resultando em uma solda débil e com porosidade. O diâmetro do eletrodo determina a intensidade de soldeo. Se empregarmos uma intensidade inadequada para um diâmetro de eletrodo dado poderíamos ocasionar instabilidade do arco, originar erosão e fusão da ponta do eletrodo, assim como inclusões de tungstênio no metal soldado.

Cálculo do ciclo térmico

O regime de solda depende de diversos fatores: tipo de material base, tipo de arame, fundente, tipo de união. Este processo ocorre em tempos muito curtos e com uma variação de temperaturas extremas que vão da fusão até aquelas que não afetam a estrutura do metal base.

Em geral a velocidade do arco ao longo da peça de trabalho é muito maior que a velocidade de difusividade térmica. Em outras palavras, o fluxo de calor na direção do trabalho é pequeno comparado com o da direção perpendicular de avanço.

✓ **Intensidade de corrente**

A intensidade da corrente de solda depende do diâmetro do eletrodo, o qual se seleciona atendendo: à espessura do metal base, ao tipo de construção soldada, além disso o tipo de revestimento e da posição do cordão no espaço influem na magnitude da intensidade e segundo Sitiente *et al.* (2006), determina-se como:

$$I_s = 2,5d_e^2 + 35,5d_e - 18 \quad (1)$$

Onde:

I_s - intensidade de corrente de soldagem; A

d_e - diâmetro do eletrodo; mm

✓ **Voltagem do arco elétrico**

As funções principais da tensão (voltagem) é estabilizar o arco e proporcionar um cordão liso, sem salpicados; além disso, a tensão é dependente do gás usado para a solda. A tensão de arco não influi significativamente no largo do cordão; influi notavelmente no reforço (forma côncava ou convexa do mesmo), tendo-se soldas plainas (com tensões altas) e avultadas (com tensões baixas), mas sempre no intervalo de ter um arco estável e segundo Rodríguez (1987) determina-se como:

$$U_a = 0,05 \cdot I_s + 10 \quad (2)$$

Onde:

U_a - tensão del arco; V

✓ **Velocidade de soldagem**

É o deslocamento do eletrodo a uma velocidade adequada (velocidade de solda) fundindo constantemente uma porção do metal base e adicionando metal de contribua com produto de sua própria fusão. Na medida que o processo se desenvolve o banho metálico solidifica e forma o metal da costura, segundo Rowe e Jeffeus (2008) determina-se como:

$$V_s = \frac{\alpha_d \cdot I_s}{F \cdot \rho} \quad (3)$$

Onde:

V_s - velocidade de soldagem; mm/s

α_d - coeficiente de contribuição; g/A min ($\approx 10 \% I_s$)

F - área da seção do cordão, cm^2

ρ - densidade do metal fundido; g/cm^3

✓ **Energia linear do processo de soldagem**

Quando se deposita uma passada de solda sobre a superfície de uma placa, o fluxo de calor afeta cada ponto produzindo tensões em função da distância à fonte de calor, Talero (2000) propõe a seguinte equação:

$$E_L = 60 \cdot \eta \frac{U_a \cdot I_s}{v_s} \quad (4)$$

E_L - energia linear; J/cm

η - eficiência da fonte de calor; %

A eficiência (η) do processo de solda GTAW oscila entre 0,6 a 0,8 (Cary, 1998). Aos efeitos dos cálculos realizados, assumiu-se eficiência de 0,7.

O consumo do gás protetor na solda em atmosfera de gases protetores depende da espessura do material base e correspondentemente à intensidade de corrente de solda. Para o cálculo segundo Holzhauser *et al.* (1999), propõe a seguinte expressão:

$$Q_{gas} = 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot (I_s)^{0,75} \quad (5)$$

Onde:

Q_{gas} - consumo do gás protetor; m^3/s

Cálculos numéricos para a solda por arco de tungstênio e gás

O cálculo da longitude do atoleiro de solda (Cerjak, 1998), mostrará o rádio efetivo da distribuição do calor e de sua influência na zona afetada pelo calor.

Guia prática para a caracteri microestrutural resultante de um aco inoxidável duplex depois do processo de solda

Orlando Gámez Córdoba

Yanelis K Avila Pavón

Recebido: 28-10-2020 Aprovado: 12-01-2021

$$L_l = \frac{Q}{2\pi\lambda(T_s - T_0)} \quad (6)$$

Onde:

L_l - longitude do atoleiro de soldagem; mm

Q - energia entrante; W

λ - condutibilidade; W/mm K

T_s - temperatura de fusão; °C

T_0 - temperatura inicial; °C

Para o cálculo da energia entrante se emprega a seguinte equação:

$$Q = q \cdot l \quad (7)$$

Onde:

q - energia de calor em Joule por metro linear de solda; J/m

l - longitude a soldar; m

O calor, que se gera em um arco mutável (Howard, 1992) ou a energia entrante, pode calcular-se como:

$$q = \frac{I_s \cdot U_a \eta}{V_s} \quad (8)$$

Onde:

v_s - velocidade de deslocamento; m/s

η - rendimento do processo

✓ Velocidade de esfriamento do cordão

O método mais usual é determinar a velocidade de esfriamento sobre a linha central de solda em um instante no qual o metal passa através de uma temperatura de interesse T_c , sua expressão matemática é:

$$\tau = d \sqrt{\frac{\rho C_e (T_c - T_0)}{q}} \quad (9)$$

Onde:

τ - parâmetro adimensional de espessura relativa da placa

d - espessura da placa: mm

ρ - densidade do material; g/cm³

C_e - calor específico; J/m °C

T_c - temperatura de fusão; °C

T_0 - temperatura inicial; °C

A velocidade de esfriamento para uma placa fina está dada por:

$$R = \frac{2\pi\lambda(T_c - T_0)^2}{q} \quad (10)$$

O tempo de esfriamento do cordão determina-se pela equação 11.

$$t = \eta \frac{I_s^{(1,24+0,0005T_c-0,005v_s)} \cdot U_a^{0,59}}{108 \cdot v_s^{(0,78-0,0005T_c)}} \quad (11)$$

As seguintes tabelas das 1 á 3 são umas referências úteis ao momento de efetuar os ajustes iniciais para o sistema aplicado.

Tabela 1. Guia para determinar o tipo de corrente a usar-se em GTAW.

Diâmetro do eletrodo em Polegadas	AC*		DCSP	DCRP
	Usando Tungstênio Puro (Amp.)	Usando Tungstênio Thoriado ou Electrodo "Rare Earth" ** (Amp.)	Usando Tungstênio Puro, Thoriado, ou "Rare Earth" (Amp.)	
1/16"	50 – 100	70 – 150	70 – 150	10 – 20
3/32"	100 – 160	140 – 235	150 – 250	15 – 30
1/8"	150 – 210	225 – 325	250 – 400	25 – 40
5/32"	200 – 275	300 – 425	400 – 500	40 – 55
3/16"	250 – 350	400 – 525	50 – 800	55 – 80
1/4"	325 – 475	500 – 700	800 – 1000	80 – 125

* Os valores maximos mostrados foram determinados usando um transformador de onda desbalanceada, se um transformador de onda balanceada é usado, reduza estes valores 30% ou use o proximo diametro de eletrodo mas grosso. Isto é necessário dado o alto calor que aplica ao eletrodo uma onda balanceada.
 **Os eletrodos com a ponta arredondada são os que melhor sustentam estes níveis de corrente.
 DCSP= Corrente Direta Polaridade Direta
 DCRP= Corrente Direta Polaridade Inversa

Tabela 2. Guia para determinar o tipo de corrente aplicada em GTAW.

Material	Corrente Alternada*	Corrente Direta	
	Com estabilização de alta frequência	Com Polaridade Negativa (DCSP)	Con Polaridad Positiva (DCRP)
Magnésio até 1/8" de espessura	1	NR	2
Magnésio por cima de 3/16" de espessura	1	NR	NR



Guia prática para a caracteri microestrutural resultante de um aco inoxidável duplex depois do processo de solda
 Orlando Gámez Córdoba
 Yanelis K Avila Pavón
 Recebido: 28-10-2020 Aprovado: 12-01-2021

Magnésio Coado	1	NR	2
Alumínio até 3/32" de espessura	1	NR	2
Alumínio por cima de 3/32" de espessura	1	NR	NR
Alumínio Coado	1	NR	NR
Aço Inoxidável	2	1	NR
Ligas de Latão e Bronze	2	1	NR
Prata	2	1	NR
Revestimentos de Prata	1	NR	NR
Endurecimentos	1	1	NR
Ferro Coado	2	1	NR
Aço sob Carbono, 0.015 a 0.030 in	2**	1	NR
Aço sob Carbono, 0.030 a 0.125 in.	NR	1	NR
Aço sob Carbono, 0.015 a 0.030 in.	2	1	NR
Aço sob Carbono, 0.030 in. o mas	2	1	NR
Cobre desoxidado***	NR	1	NR
Titânio	NR	1	NR

1. Excelente Operação
 2. Boa Operação
 NR Não recomendado
 * Onde AC é recomendado como segunda opção, use perto de 25% corrente mas alta do recomendado para polaridade negativa
 ** Não use corrente AC quando as peças tenham texturas muito complexas
 *** Use lhe Funda de Silicone Bronze para 1/4 polegadas ou mais grosso

Tabela 3. Seleção do Gas segundo o proceso e metal a ser aplicado.

Metal	Tipo de Solda	Gás ou Mescla de Gases	Rasgos sobressalentes / Vantagens
Aço Doçe	Ponteada	Argônio	Larga duração do eletrodo, melhor contorno do cordão, mais fácil de estabelecer o arco inicial
	Manual	Argônio	Melhor controle do cordão especialmente em soldas em posições especiais
	Mecanizada	Argônio - Hélio	Alta velocidade, menos fluxo de gás que com Hélio
		Hélio	Mais velocidade que a obtida com Argônio
Alumínio e Magnésio	Manual	Argônio	Melhor arranque do arco, melhor ação de limpeza e qualidade de solda, menos consumo de gás
		Argônio - Hélio	Mais alta velocidade de solda, maior penetração que com Argônio

	Mecanizada	Argônio - Hélio	Boa qualidade de solda, mais sob fluxo de gás requerido que com Hélio só
		Helio DCSP	Mais profunda penetração e maior velocidade de solda, pode prover ação de limpeza para as soldas em alumínio e magnésio
Aço Inoxidável	Punteada	Argônio	Excelente controle da penetração em materiais de sob calibre
		Argônio - Hélio	Mais alta entrada de calor para materiais de maior calibre
	Manual	Argônio	Excelente controle do cordão, penetração controlada
	Mecanizada	Argônio	Excelente controle de penetração em materiais de sob calibre
		Argônio - Hélio	Mais alta entrada de calor, mais velocidade de solda é possível
		Argônio - Hidrogeno (Hasta 35% H ₂)	Minimiza o corte nos borde do cordão, produz soldas de contornos desejáveis a sob nível de corrente, requer sob fluxo de gás
Cobre, Níquel e Ligações Cu-Ni	Manual solamente	Argônio	Excelente controle do cordão, penetração em materiais de sob calibre
		Argônio - Hélio	Alta entrada de calor para compensar a alta dissipação térmica dos materiais mais pesados
		Hélio	Mais alta temperatura para sustentar mais altas velocidades de solda em seções de materiais mais pesados

Análise dos resultados:

Regimes de solda

A tensão do arco necessária para realizar o processo de solda foi de 16 E V, sendo esta magnitude permissível dentro dos parâmetros da solda GTAW, que é de 5 E V a 30 V. A velocidade de solda determinada foi de 0,007 m/s. O valor obtido para a energia linear é de 18 898, 52 J/mm. A quantidade de gás que se requer para executar o processo de soldeo na união é de 0,12 m³/s.

Análise dos cálculos numéricos

Para uma temperatura de fusão de 1 450 °C e uma temperatura ambiente de 34 °C se tem que a longitude de união é de 0,496 m, por isso o resultado da energia entrante é de 95 283,84 W e a longitude do atoleiro é de 60,1 mm. O parâmetro espessura relativa da placa τ é de 0,83. Considera-se como espessura de placa fina. A velocidade de esfriamento a qual solidifica o aço duplex é de 0,83 °C/s, por isso o tempo de esfriamento do cordão será de 12 min.

Análise do comportamento microestructural

Para esta análise se tem em conta as diferentes zonas do cordão de solda.

Análise do comportamento microestructural na interfase



Guia prática para a caracteri microestrutural resultante de um aco inoxidável duplex depois do processo de solda

Orlando Gámez Córdova

Yanelis K Avila Pavón

Recebido: 28-10-2020 Aprovado: 12-01-2021

No cordão de solda, proporciona-se a estrutura equilibrada de ferrita / austenita, isto é devido a que o material de contribuição sempre está batido as asas com níquel. Desta forma, apresenta a distribuição uniforme de ferrita e austenita. Dada a alta difusividade do nitrogênio, a austenita se forma com maior facilidade, mais rapidamente.

A formação de austenita com tendência ramificada de braços aciculares (morfologia widmanstätten) (fase clara), como se observa na figura 5a foi altamente marcada nesta zona da solda. Quer dizer, os braços de austenita são muito mais pronunciados e as partículas isoladas de austenita com certo alongamento sem chegar a ser aciculares.

Na figura 5b, observa-se a distribuição, forma e orientação das diferentes fases, devido a que a velocidade de esfriamento foi mais lenta. Esta disposição e morfologias de fases presentes na Zona Fundida (ZF) estão associadas ao ciclo térmico de solda, já que ao depositar um cordão sobre o outro e converter-se em solda de multipasada, esta atua como um tratamento térmico de recozido, o qual provoca um esfriamento mais lento. Obteve-se nesta zona a formação de austenita e de ferrita dendrítica.

Para esta zona da solda figura 5c, a austenita (fase clara) estão orientadas ao azar, não existe a formação de braços secundários de austenita, além disso, as partículas isoladas de austenita estão em maior quantidade nesta zona em comparação com as observadas na zona adjacente ao metal de base.

Análise do comportamento microestrutural na interfase

O comportamento do cordão na interfase pode-se observar o crescimento dos grãos de austenita para dentro do cordão de solda em forma de grãos columnares, aonde os grãos columnares são alargados. Assim também a formação de pequenos grãos de austenita secundária perto da linha de fusão.

A fase austenita (fase clara), com apreciável morfologia Widmanstätten e uma morfologia cuasi esferoidizada estão orientadas para a parte superior do cordão de solda e na raiz esta orientação foi menos pronunciada, já que a velocidade de esfriamento foi menor.

A distribuição e proporção de ferrita (fase escura) e austenita (fase clara) tanto na ZAC como na ZF figura 3a foi mais uniforme, já que a velocidade de esfriamento foi mais lenta. Observam-se braços secundários de austenita com forma acicular menos pronunciado e uma série de partículas isoladas de austenita em maior quantidade. Também se observa certa fragmentação das placas de austenita na zona adjacente ao metal base.

A figura 3c mostra a diferença de microestructura entre o cordão de solda e o metal base. Aqui se obteve uma microestructura intermédia entre laminar e Widmanstätten e por sua percentagem maior de ferrita comparado com o metal base. Isto se deve a que nesta zona o calor gerado pela solda converte todo o material em ferrita e a austenita se reforma durante o esfriamento. Devido a que nesta zona a velocidade de esfriamento é

muito grande, a austenita não precipita por completo, por isso não se consegue conseguir o balanço de fases de equilíbrio.

Análise do comportamento microestructural na ZAT

As características na soldabilidade nesta zona dependem principalmente dos parâmetros ou variáveis que têm maior influência sobre o processo, tais como: a corrente de solda, a velocidade de avanço, o fluxo de gás e o equilíbrio de forças de pressão do arco sobre o atoleiro metálico, obtendo uma relação ancho/profundidade elevada por seu caráter pontual, obtendo-se soldas de alta qualidade, quer dizer soldas com o ZAC bem reduzidas, bom aspecto superficial, bom reforço de raiz, em um só passe com ou sem material de contribuição. Na ZAT se observaram braços secundários de austenita com morfologias tipo widmanstätten e partículas isoladas menos pronunciadas. Nesta zona se experimentaram temperaturas próximas a recristalização, o qual propicia que a ferrita nesta zona se regenere e a austenita fique em forma maior dado que desta forma a ferrita origina maior dureza e maior fragilidade nesta zona.

Se observou o efeito do calor gerado pelo processo de solda, modificando-a microestructura típica do material original (ferrita (fase escura) e austenita (fase clara) orientados na direção de laminação) na possível ZAC e ZF. Além disso, foi observada a formação de braços secundários sobre as lâminas de austenita, as quais cresceram ao longo de todo seu perímetro umas mais pronunciadas que outras e pequenas partículas isoladas de austenita.

Esta modificação se deveu a uma série de processos de transformação de fases que ocorrem no aço durante a solda tanto na etapa de aquecimento como na etapa do esfriamento (recristalização de grãos livres de deformação, crescimento de grão, transformação da ferrita primária em austenita com diferentes morfologias, recocidos parciais), o qual foi reportado pelo Capello *et al.* (2003); Sieurin y Sandström (2006).

Nas três zonas microestructurales analisadas, as microestructuras das zonas representativas de solda são similares, onde no metal base não se observa modificação alguma da microestructura, mantendo-se igual ao metal originalmente em estado de entrega, mas na ZAC se evidencia que houve uma dissolução de austenita para aumentar a ferrita. A morfologia da austenita é de forma Widmanstätten, o lado superior esquerdo da fotomicrografia mostra a interfase com a zona de fusão, enquanto que, na zona inferior direita, apresentam-se grãos alargados como o do metal base. Na zona de fusão se pode evidenciar mais claramente a forma columnar da austenita, a qual possui ramificações tipo Widmanstätten em uma matriz ferrítica, resultados que coincidem com Quintero *et al.* (2006); Musauel (2003); Karlsson (1999).

CONCLUSÕES

1. A guia permite aos estudantes realizar as práticas de solda com total facilidade, de maneira ágil e com segurança.
2. A análise macro e microscópicas realizados para analisar os efeitos devido à variação de parâmetros de solda, podem-se aplicar nas disciplinas Ciências dos Materiais, Materiais de Engenharia, Fundição, Tratamentos Térmicos.



Guía práctica para a caracteri microestrutural resultante de um aco inoxidável duplex despois do processo de solda

Orlando Gámez Córdoba

Yanelis K Avila Pavón

Recebido: 28-10-2020 Aprobado: 12-01-2021

3. Consegue-se caracterizar a microestrutura resultante do aço inoxidável duplex SAF 2205 logo depois de ser submetido ao processo de solda GTAW, obtendo microestruturas livres de fissuras e com boas propriedades mecânicas, (dureza, resistência ao desgaste).
4. As equações desenvolvidas permitem estabelecer o procedimento metodológico dos regimes do processo de solda GTAW para o aço inoxidável duplex SAF 2205, em função do tipo de junta a soldar, ficando estabelecido o ciclo térmico de solda.

REFERÊNCIAS

- ASTM (2000). Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, ASTM Standard E – 837 – 99, American Society for Testing and Materials, pp. 675 – 684.
- Bermúdez, M. (2003). Erosión–corrosión de tantalio y aceros inoxidables, Memorias del IX Congreso de Ciencia y Tecnología de Materiales, Madrid, España, 2003.
- C. J. Múnez, M.V. Utrilla, A. Ureña y E. Otero (2007). “Influencia del material de aporte en la resistencia a la corrosión por picaduras en uniones soldadas de un acero dúplex 2205” Revista de Metalurgia, pp 1-6
- Cary, H.(1998). Modern Welding Technology, 4th ed. Prentice Hall. Ohio. USA, pp. 107-204.
- Cerjak, H. (1998). Mathematical Modelling of Weld Phenomena 4. Materials Modelling Series. Primera edición. 1998.
- Ekroth, M; Frykholm, R., Lindholm, M., Andrén, H., Agren, J. (2000). Gradient zones in WC-Ti (C.N) – Co. Acta Materialia, based cemented carbides: Experimental study and computer simulations. 48 (32) 2177 – 2185.
- Fernández-Columbié, T.; Rodríguez-González, I.; Correa- Suárez, R. & Alcántara-Borges, D. (2014). Junta de soldadura disímil de la aleación HK- 40 y del hierro fundido 24. Ingeniería Mecánica 17(2): 98-107.
- Holzhauser, J., Spitzer, K., Schwerdtfeger, K. (1999). Laboratory study of heat transfer through thin layers of casting steel: minimization of the slag/probe contact resistance. Steel Research. 70 (10) 430 – 436.
- Kotecki, D. J. & Lippold, J. (2013). Welding metallurgy and weldability of stainless steels. Journal of Materials Processing and Technology. Versión 1: 474-483.
- Manual de Soldadura (American Welding Society), (1999), Vol. 2, 8va Ed. México D.F. (México): Prentice Hall Hispanoamerica.
- Norma ANSI/AWS B4.0-98 (1998). Standard Methods for Mechanical Testing of Welds, Miami (EE.UU.): American Welding Society, p. 24-37 y 55-56.
- Rowe, R., Jeffeus, L. (2008). Manual de Soldadura GMAW (MIG – MAG). Paraninfo Ediciones. España.

Sieurin, H., Sandström, Rolf. (2006). Austenite reformation in heat affected zone of duplex stainless steel 2205. *Materials Science & Engineering. A* 418, Suecia. pp 250 – 256.

Talero, J., Muñoz, M. (2000). *Introducción al cálculo de estructuras metálicas según Eurocódigo 3. 1era Edición corregida.* España.

Yamauchi, A., Sorimachi, K., Sakuraya, T. (2002). Effect of solidus temperature and crystalline phase of mould flux on heat transfer in continuous casting mould. *Ironmaking and Steelmaking.* 29 (3) 203 – 207.