

INFLUÊNCIA DAS FORÇAS ATUANTES NA GEOMETRIA DA POÇA DE FUSÃO EM SOLDAGEM A ARCO: UMA REVISÃO

Maksym Ziberov, Universidade Federal de Uberlândia, ziberov@hotmail.com

Anna Tokar, Universidade Federal de Uberlândia, annatokar@mecanica.ufu.br

Oksana Kovalenko, Universidade Federal de Uberlândia, pulsse@ukr.net

Iaroslav Skhabovskiy, Universidade Federal de Uberlândia, skhabovskiy@bigmir.net

Resumo. Durante a soldagem com arco elétrico, várias forças podem atuar sobre a poça de fusão e governar a geometria do cordão. O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão das forças que movimentam a poça. O presente trabalho trata de aspectos como forças externas e forças internas. Forças internas são as forças que criam movimento de fluidos, fazendo troca de calor dentro da própria poça, a saber: força de “buoyancy”; forças de Lorentz; tensão de cisalhamento induzida pelo gradiente de tensão superficial na poça e tensão de cisalhamento atuando na superfície pelo jato de plasma. Forças externas são as que agem no sentido de criar uma depressão da poça e fazendo com que o calor seja transferido para o material de forma mais eficiente (mais próximo do metal do fundo), a saber: jato de plasma; campo magnético na superfície; “momentum” das gotas e força da gravidade.

Palavras chave: soldagem, geometria da poça, forças internas, forças externas

1. FORÇAS INTERNAS

A possibilidade de que o fluxo do fluido na poça de fusão possa alterar a forma do cordão de solda tem sido reconhecida há muitos anos. Por exemplo, em 1965, Christense; Davies; Gjermundsen (1965) *apud* ASM Handbook (1993, p.56) propuseram que a convecção é parcialmente responsável por desvios nas formas da poça de fusão em relação àqueles previstos por soluções de equações de condução. Gradientes de tensão superficial foram propostos por Ishizaki; Murai; Kanbe (1966) *apud* ASM HandBook (1993, p.56) como potenciais forças motrizes para o fluxo de fluido da poça. Tensão superficial de escoamento de fluidos foi descrita pela primeira vez por Thomson (1855), em 1855, mas o fenômeno é comumente chamado convecção Marangoni, em homenagem ao trabalho de Carlo Marangoni (Marangoni, 1871 *apud* ASM Handbook, 1993, p.57). Lawson; Kerr (1976) e Lin; Eagar (1985) confirmam que pressão do arco age sobre a superfície da poça, mas o seu efeito sobre o fluxo de fluido é pequeno, especialmente numa corrente elétrica abaixo de 200 A, como nos casos gerais para GTAW.

Kou (2003, p.103) diz que a densidade do metal líquido (ρ) diminui com o aumento da temperatura (T). Como a fonte de calor está localizada acima do centro da superfície da poça (ver Fig. (1)), o metal líquido é mais quente no ponto *a* e mais frio no ponto *b*. O ponto *b* está próximo do limite da poça, onde a temperatura é mais baixa (ponto de fusão). Como mostrado (parte (a) da Fig. (1)), a gravidade faz com que o metal líquido mais denso no ponto *b* afunde. Por conseguinte, o metal líquido cai ao longo do limite da poça e se eleva ao longo do eixo central da poça, como mostra a parte (b) da Fig. (1).

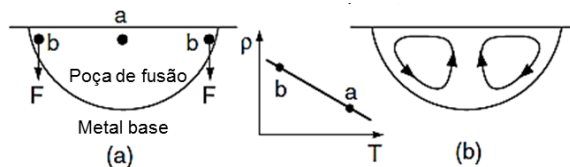


Figura 1. Influência da força de “buoyancy” no modo de convecção na poça de fusão (Kou, 2003, p.104)

Kou (2003, p.104) usou o processo GTAW com eletrodo negativo (CC-) como um exemplo para mostrar o efeito das forças de Lorentz. Como observado na Fig. (2), a corrente elétrica na peça de trabalho converge para o eletrodo de tungstênio (não mostrado) e, por conseguinte, para o centro da superfície da poça. Este campo de corrente convergente, juntamente com o campo magnético que ele induz, provoca uma força de Lorentz para baixo e para dentro, como mostrado (parte (a) da Fig. (2)). Como tal, o metal líquido é empurrado para baixo ao longo do eixo da poça e se eleva ao longo do contorno da poça, como mostra (parte (b) da Fig. (2)). A área sobre a superfície da poça onde a corrente elétrica passa é chamada de ponto anódico (πb^2 , onde b é o raio efetivo da distribuição da densidade de corrente). Quanto menor for o ponto anódico, mais o campo de corrente converge a partir da peça de trabalho (através da poça de fusão) para o ponto anódico e, portanto, maior é a força de Lorentz para empurrar o metal líquido para baixo.

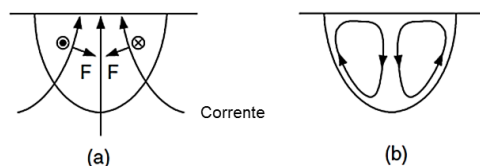


Figura 2. Influência da força de Lorentz no modo de convecção na poça de fusão (Kou, 2003, p.104)

Kou (2003, p.105) ainda descreve a tensão de cisalhamento induzida por uma gradiente de tensão superficial na ausência de agentes ativos. A tensão superficial (γ) do metal líquido diminui com o aumento da temperatura, ou seja, $\partial\gamma/\partial T < 0$. Como mostrado (parte (a) da Fig. (3)), o metal líquido mais quente com uma tensão superficial menor no ponto *a* é puxado para fora através do metal líquido mais frio com uma tensão de superfície mais elevada no ponto *b*. Em outras palavras, uma tensão de cisalhamento para fora é induzida na superfície da poça pelo gradiente de tensão de superfície ao longo da superfície da poça. Isso faz com que o metal líquido flua a partir do centro da superfície para a borda da poça e retorne abaixo da superfície da poça, como mostra (parte (b) da Fig. (3)). A convecção produzida pela tensão superficial é também chamada de convecção por termocapilaridade ou convecção Marangoni.

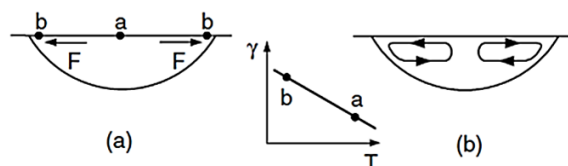


Figura 3. Influência da força tensão superficial no modo de convecção na poça de fusão (Kou, 2003, p.104)

Kou (2003, p.105) finalmente cita e explica também o efeito da tensão de cisalhamento induzido por jato de plasma. O plasma que se move para fora a velocidades elevadas ao longo da superfície da poça (Fig. (4)) pode exercer uma tensão de cisalhamento na superfície da poça para fora, como mostra (parte (a) da Fig. (4)). Esta tensão de cisalhamento faz com que o metal líquido flua a partir do centro da superfície da poça para a sua borda e retorne abaixo de sua superfície, como mostra (parte (b) da Fig. (4)).

Estas forças motrizes são incluídas nas equações governantes ou como condições de contorno nos modelos computacionais de fluxo de fluido na poça de fusão (Kou, 1996). Oreper; Eagar; Szekely (1983) desenvolveram o primeiro modelo bidimensional de fluxo de fluido para poças estacionárias em soldagem a arco. Kou e Sun (1985) desenvolveram um modelo semelhante, mas que permitiu calcular a forma da poça desconhecida. Kou e Wang (1986a; 1986b; 1986c) desenvolveram o primeiro modelo de fluxo de fluido em três dimensões para arcos em movimento e poças de fusão de soldagem a laser. Desde então, inúmeros modelos de computacionais têm sido desenvolvidos para o fluxo de fluido em poças de fusão.

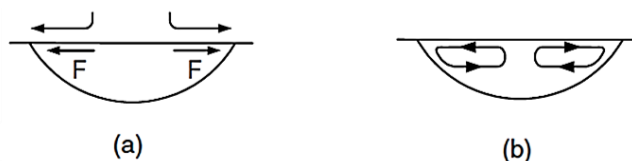


Figura 4. Influência da tensão de cisalhamento no modo de convecção na poça de fusão (Kou, 2003, p.104)

2. FORÇAS EXTERNAS

Scotti e Ponomarev (2008, p.31) apontaram que devido à corrente passando através do plasma e ao seu próprio campo magnético, surgem as forças radiais no sentido do centro da coluna de plasma (Força de Lorentz), por pressão em cada elemento de área. Scotti e Ponomarev (2008, p.31) dizem que quanto maior a corrente ou quanto menor o diâmetro da seção da coluna do arco, para uma mesma intensidade de corrente, maior a pressão. De acordo com Vinogradov (1997, p.34), a força do campo magnético é proporcional ao quadrado da corrente de soldagem. Scotti e Ponomarev (2008, p.31) explicam que como as colunas típicas de arcos de soldagem tomam a forma tronco-cônica (Fig. (5)), surge uma maior pressão eletromagnética na região restrita e menor na região mais larga da coluna de plasma. Esta diferença da pressão eletromagnética provoca o deslocamento do gás ionizado na direção da menor pressão (Fig. (5)). Citam ainda que o jato de plasma age no sentido de arrastar as gotas em transferência, jogando mais calor para chapa. Mas age também, principalmente, empurrando para os lados o metal líquido da poça fundida, facilitando a ação térmica da região catódica (ou anódica) no material de base, com influência sobre a distribuição da transferência de calor e sobre a geometria do cordão de solda (profundidade de penetração e largura).

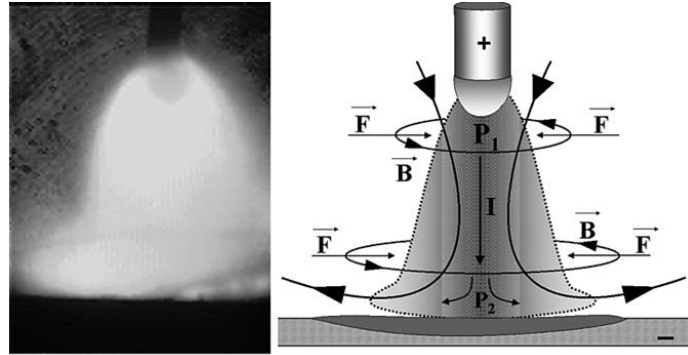


Figura 5. À esquerda, ilustração de um arco de soldagem com eletrodo consumível, caracterizando seu formato tronco-cônico; à direita, representação esquemática da geração do jato de plasma em função das diferenças de pressão ($P_1 > P_2$) exercidas pela resultante das forças eletromagnéticas geradas pela intercessão da corrente de soldagem (I) com o campo magnético (B) (Scotti e Ponomarev, 2008, p.31)

Mas a pressão junto da chapa (P_2 , na Fig. (5)), que é responsável juntamente com a pressão junto ao eletrodo (P_1 , na Fig. (5)) pelo jato de plasma, também age isoladamente sobre a superfície da poça (lembrando que pressão é uma grandeza escalar), completando o efeito de descolamento da poça e facilitando a ação térmica da região catódica (ou anódica) no material de base. Scotti e Ponomarev (2008, p.80) dizem que, para essa pressão dos campos magnéticos na superfície da poça, quanto maior e mais concentrada a corrente, maior a pressão. E que por ser a pressão uma grandeza escalar a pressão magnética que age sobre a superfície da poça é também significativa para empurrá-la. Acredita-se que, para valores baixos de corrente (menos de 100 A), o efeito da pressão devido aos campos magnéticos supere até o efeito do jato de plasma (que também é devido aos campos magnéticos, mas de uma forma diferenciada).

Scotti e Ponomarev (2008, p.80) citam ainda que o mecanismo relacionado como efeito do momentum é causado pelas gotas impingindo sobre o metal fundido (poça de fusão). Estas gotas, ao se chocarem com a poça, transferem sua quantidade de movimento, conhecido também por *momentum* (massa×velocidade), para a superfície da poça. A quantidade de movimento de uma gota (M_{gota}) pode ser estimada pela Eq. (1):

$$M_{gota} = \rho \pi \frac{d_m^3}{6} V_{cheg} \quad (1)$$

Onde: ρ – é a densidade do metal da gota fundido; d_m – o diâmetro médio da gota e V_{cheg} – a velocidade média da gota chegando à poça.

Os autores dizem que como as gotas ocorrem em sequência, a transferência da quantidade de movimento se dá continuamente ao longo do tempo. Assim, para uma dada frequência média de destacamento das gotas “ f ”, pode-se calcular a força “ F ” que atua sobre a poça de fusão devido ao impacto das gotas pela Eq. (2). Se esta força “ F ” for dividida pela velocidade de soldagem, é possível chegar ao que se pode chamar de “Quantidade de Movimento Transferido por Unidade de Comprimento de Solda” ou “Quantidade de Movimento Efetiva”, aqui representada por M_{efet} , dada pela Eq. (3). Quanto maior o tamanho, a velocidade de chegada e a frequência de transferência destas gotas e menor a velocidade de soldagem, maior seria a M_{efet} .

$$F = M_{gota} \cdot f \quad (2)$$

$$M_{efet} = F / V_s \quad (3)$$

Scotti e Ponomarev (2008, p.80) encontraram que a velocidade de chegada das gotas é função direta da corrente e do comprimento de arco (parte (a) da Fig. (6)). Mas o diâmetro da gota, por sua vez, é inversamente proporcional à corrente, mas não de forma linear. Ou seja, não é tão óbvio dizer que gotas maiores ou menores vão aumentar ou reduzir a M_{efet} , afetando coerentemente a penetração. Mas, de uma forma geral, pode-se dizer que, na condição de soldagem com correntes acima da corrente de transição, a M_{efet} se torna maior (parte (b) da Fig. (6)), já que nestes casos a frequência de transferência das gotas aumenta muito (superando o efeito redutivo da formação de gotas progressivamente menores). Mas para correntes muito altas, a frequência da transferência não aumenta tanto quanto se reduz o diâmetro das gotas (efeito como evaporação das gotas, etc.) e a M_{efet} passa a reduzir. Assim, Scotti e Ponomarev apontam que o aumento da corrente até um certo ponto favorece o aumento da penetração, mas este passa a ser concorrente em soldagens com correntes bem acima da corrente de transição. Maiores informações são facilmente encontradas em outros artigos, entre eles, Scotti; Rodrigues, 2009a e Scotti; Rodrigues, 2009b.

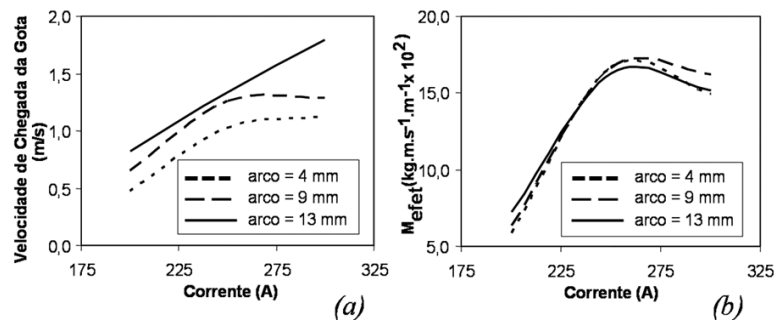


Figura 6. Efeito da corrente e comprimento de arco sobre a velocidade de chegada (a) e a quantidade de movimento efetiva (por unidade de comprimento) das gotas em transferência (b) em soldagem MIG/MAG com arame-eletrodo AWS ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro e gás de proteção Ar + 5% O₂ (Scotti e Ponomarev, 2008, p.82)

A força gravitacional é governada pela dimensão e densidade do material da poça, podendo atuar de forma favorável ou não na retenção do metal líquido, dependendo da posição de soldagem e formato de junta. Na posição plana, a força de gravidade é favorável para uma boa penetração. Nos casos em que a solda é realizada na posição horizontal ou vertical, a força da gravidade age no sentido de fazer a poça escorrer, enquanto na posição sobre cabeça a poça tende a cair. Quanto ao formato da junta, chanfros com abertura de raiz tendem a dificultar a sustentação da poça sob o ponto de vista da gravidade, já que o material fundido pode “vazar” pela abertura.

3. REFERÊNCIAS

- ASM Handbook, 1993, “Welding Brazing and Soldering”, Ed. American Welding Society, Vol. 6, 2873 p.
- Christensen, N., Davies, V., De L., Gjermundsen, K. 1965, “Distribution of Temperatures in arc welding”, Welding Journal, Vol. 12, p 54-75.
- Ishizaki, K., Murai, K., Kanbe, Y., 1966, “Penetration in arc welding and convection in molten metal”, International Institute of Welding. Document 77-66, study group 212.
- Kou, S., 2003, “Welding metallurgy”. 2.ed. John Wiley & Sons, Inc., USA, 455p.
- Kou, S., Wang, Y.H., 1986c, “Computer Simulation of Convection in Moving Arc Weld Pools”, Metallurgical Transactions A, Vol. 17A, p 2265-2270.
- Kou, S., Wang, Y.H., 1986b, “Three-Dimensional Convection in Laser Melted Pools”, Metallurgical Transactions A, Vol 17A, p 2265-2270.
- Kou, S., Wang, Y.H., 1986a, “Weld Pool Convection and Its Effect”, Welding Journal, Vol. 65, p 63-70.
- Kou, S., Sun, D.K., 1985, “Fluid Flow and Weld Penetration in Stationary Arc Welds”, Metallurgical Transactions A, Vol. 16A, p 203-213.
- Lawson, W.H.S., Kerr, H.W., 1976, “Fluid monitor in GTA weld pools - 1. Flow patterns and weld pool homogeneity”, Welding Research International, Vol. 6, No. 5, p 63-77.
- Lin, M.L., Eagar, T.W., 1985, “Influence of Arc Pressure on Weld Pool Geometry”, Welding Journal, Vol. 64, No. 6, p 163.
- Marangoni, C., 1871, “On the spread of a liquid drop on surface another”, Journal of Physics and Chemistry, Vol. 143, No. 7, p 337-354
- Oreper, G.M., Eagar T.W., Szekely, J., 1983, “Convection in arc weld pools”, Welding Journal, Vol. 62, p 307-312.
- Scotti, A., Ponomarev, V., 2008, “Soldagem MIG/MAG”, Artliber Ed, 284 p.
- Scotti, A., Rodrigues, C.E.A.L., 2009a, “Determination of momentum as a mean of quantifying the mechanical energy delivered by droplets during MIG/MAG welding”, The European Physical Journal Applied Physics, Vol. 45.
- Scotti, A., Rodrigues, C.E.A.L., 2009b, “Determination of the Momentum of Droplets Impinging on the Pool during Aluminium GMAW”, Soldagem & Inspeção, Vol. 14, No. 4, p 336-343.
- Thomson, J., 1855, “On certain curious motions observable at the surfaces of wine and other alcoholic liquors”, Philosophical Magazine, Vol. 10, p 330-333.
- Vinogradov, V.S., 1997, “Equipamentos e tecnologia para soldagem automática”. Ed. Moscou Academia, Rússia, 319p.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro das agências CAPES, CNPq e Fapemig e ao suporte oferecido pela Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

5. ABSTRACT

During arc welding various forces can act on the weld pool and govern the geometry of the bead. The objective of this paper is to present a review on the forces that move the weld pool. The present work deals with aspects such as external forces and internal forces. Internal forces are the forces that create fluid movement, causing heat exchange within the pool, namely: buoyancy forces, Lorentz forces, shear stress induced by surface tension gradient in the pool and shear stress acting on the surface by the plasma jet. External forces are those that act to create a pool depression and causing heat to be transferred to the material more efficiently (deeper into the molten metal), namely: plasma jet; magnetic field on the surface, momentum of droplets and gravity.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.