

MICROABRASÃO DO INCONEL 625 DEPOSITADO POR PTA

Regina Paula Garcia, Laboratório de Tribologia e Materiais, regisrpg@yahoo.com.br
Henara Lillian Costa, Laboratório de Tribologia e Materiais, ltm-henara@ufu.br

Resumo. O Inconel 625 é muito utilizado nos diversos segmentos da indústria petrolífera devido a sua elevada resistência a corrosão, porém nos sistemas de bombeamento pode ocorrer o movimento relativo sob a presença de partículas de areia abrasivas ocasionando à microabrasão. Este trabalho utilizou Plasma por arco transferido (PTA) para depositar pó de Inconel 625 sobre substratos de aço carbono, tal processo permite altas taxas de deposição, microestrutura fina e baixa diluição com excelente qualidade de depósito. Como parâmetros principais de deposição foram utilizados corrente, velocidade de soldagem e taxa de alimentação de pó, combinados a fim de obter diferentes níveis de energia. Análise macroscópica dos depósitos permitiu a avaliação da diluição e das características geométricas do cordão (largura, penetração e reforço). A microestrutura dos depósitos foi avaliada por microscopia ótica, e análise de SEM, observando-se que todos os revestimentos apresentaram microestruturas dendríticas, típicas de materiais de soldados. A sua morfologia era complexa e variada, a partir da interface substrato-depósito. Os parâmetros de soldagem resultaram em depósitos com características macro e microscópicas muito diferentes. A resistência à abrasão dos depósitos por PTA foi avaliada através de ensaios de desgaste microabrasão, utilizando soluções de sílica de concentrações diferentes e duas esferas diferentes (aço martensítico duro e zircônia). Condições que resultaram em deslizamento de abrasivos, rolamento de abrasivos e regimes mistos também foram identificadas. A energia de soldagem afetou a resistência de micro abrasão dos depósitos, que podem ser correlacionados com a sua dureza.

Palavras chave: PTA, Inconel 625, micro abrasão, mecanismos de desgaste.

1. INTRODUÇÃO

Inconel é uma série de superligas à base de níquel com a seguinte composição química nominal: 20 a 23% de Cr, 8-10% de Mo e 3,15-4,15% de Nb, é uma das mais comuns dessas ligas. A microestrutura de Inconel 625 é muito complexa e fortemente dependente de tratamentos térmicos envolvidos durante o processamento. Em geral, apresenta-se uma fase rica em Ni (CFC) estrutura cúbica de face centrada, a qual é endurecida por solução sólida. Quando a liga é aquecida dentro do intervalo de temperatura de 550 e 980 ° C, carbonetos, fases intermetálicas e fases metaestáveis ($M_{23}C_6$, M_6C , MC, γ' , γ , δ) podem precipitar (Mathew, Parameswaran et al., 1998).

Devido aos elevados custos de ligas à base de níquel, é comum a utilização de revestimentos dessa liga sobre substratos mais baratos, por meio de diferentes técnicas de deposição. Revestimentos depositados por soldagem têm sido preteridos a outros processos por proporcionarem uma ligação metalúrgica com o substrato, estes tendem a produzir sistemas revestidos com um desempenho superior quando comparado com os métodos por spray (Liu, Xia et al., 2006).

A necessidade econômica por processos com maior produtividade (maiores taxas de deposição) promoveu uma maior utilização pela indústria dos processos MAG (Metal Active Gas), Plasma Arc Welding (PAW) e Plasma Transfer Arc (PTA) (Badisch e Kirchgassner 2008). O equipamento para o processo de deposição de plasma PTA é muito semelhante ao utilizado no Plasma Arc Welding (PAW), a diferença é que o equipamento é alimentado por pó em vez de arame, o que requer um equipamento de alimentação específico para transportá-lo para o arco voltaico a fim de produzir o revestimento (Diaz, Dutra et al. 2011). Isso assegura que as propriedades do depósito podem ser adaptadas para diversas aplicações, porque diferentes tipos de pós podem ser misturados para produzir uma grande variedade de revestimentos Keranen (2010). Os pós são obtidos por meio de atomização numa atmosfera protegida, assegurando uma distribuição homogênea do tamanho de grão e possibilitando ausência de oxidação, o que poderia causar porosidade na camada depositada (Gatto, Bassoli et al., 2004). Devido às suas altas taxas de deposição, tal processo pode produzir depósitos espessos de alta qualidade em uma única camada (Fernandes, Cavaleiro et al. 2012), que apresentam baixa diluição (5-10%), muito menor do que os obtidos com outros processos de soldagem a arco que são em torno de 20 a 25%, microestrutura fina, devido a altas taxas de resfriamento, e de alta aderência entre o revestimento e o substrato (Gatto, Bassoli et al., 2004).

Há um interesse crescente da indústria petroquímica na utilização do Inconel 625 em componentes de bombas e válvulas e tubulações com o intuito de resistir à corrosão em ambientes de elevada temperatura. No entanto, muitas dessas aplicações envolvem também o movimento relativo e, portanto, atrito e desgaste. Apesar disso, estudos sobre o desempenho tribológico de Inconel são escassos na literatura (Hong e Kim 2003; Kim, Choi et al 2003; Fox e Liang 2010; Houghton, Lewis et al 2011; Jeshvaghani, Jaberzadeh et al 2014; Yun, Park et al 2014; Zhang, Lu et al 2014).

Em particular, a sua resistência a ambientes contendo partículas abrasivas tem sido negligenciada (Ramesh, Devaraj et al. 2011), provavelmente devido à sua dureza relativamente baixa quando comparada com outros materiais tradicionalmente resistentes à abrasão. Este trabalho utilizou testes de microabrasão para investigar a resistência ao desgaste abrasivo dos depósitos de Inconel 625 sob condições de soldagem, que propiciaram a variação da energia de soldagem.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os parâmetros que controlam a qualidade do revestimento soldado são: a taxa de alimentação; a vazão de gás (gás de proteção, gás de plasma, gás de arraste), a corrente de soldagem, a distância bico-peça (DBP) e a velocidade de soldagem (Diaz, Dutra et al. 2011). A parametrização do processo foi realizada com base em duas premissas: (a) condições de soldagem que resultaram em diluição inferior a 10%, isso por que a alta diluição teria um impacto negativo sobre a resistência à corrosão do depósito, e (b) condições que produzissem cordões com a geometria adequada, em termos de largura e reforço, em uma única camada. Isto resultou na seleção de um conjunto de parâmetros fixos apresentados na Tab. (1).

Tabela 1. Conjunto de parâmetros fixos selecionados a partir do processo de parametrização.

Parâmetro	Valor
Gás de Plasma (l/min)	3.0
Recuo (mm)	2.4
DBP (mm)	20.0

Além deste conjunto de parâmetros fixos, a parametrização demonstrou que três parâmetros poderiam variar, corrente de soldagem (I), taxa de alimentação de pó (TAP) e velocidade de soldagem (Vs), para fornecer duas situações distintas de energia de soldagem (E), descrito conforme a Eq. (1), onde η (eficiência térmica do processo), V(tensão de soldagem), I (corrente de soldagem), v (velocidade de soldagem). Tabela 2 descreve a condição de menor e maior energia, obtidas pela combinação de tais parâmetros de soldagem.

$$E=\eta.VI/v \quad (1)$$

Tabela 2. Parâmetros de soldagem para a condição de menor e maior energia

Teste	I(A)	TAP (rpm)	Vs (cm/min)
Menor Energia	170	20	76
Maior Energia	190	16	64

As seções transversais dos cordões de solda foram cortadas para produzir amostras para análise macrográfica, micrográfica e medições do perfil de microdureza. Para análise macrográfica, as amostras foram lixadas usando lixas (# 400), atacadas com Nital 10% e fotografadas utilizando um microscópio óptico modelo Veho USB. As características das medições dos cordões estão definidas na Fig. (1), e foram realizadas pelo programa ImageJ.

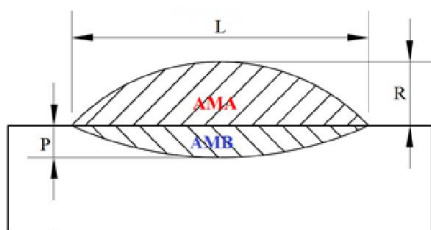


Figura 1. Características do cordão de solda, L(largura), R(reforço), P(penetração), AMA(área adicionada pelo metal de adição), AMB(área fundida do metal de base).

A diluição (D) pode ser definida como o grau de mistura entre o metal de base e o metal de adição, e esta pode ser medida conforme indicado na Eq. (2).

$$\text{Dilution } D = \frac{AMB}{(AMA+AMB)} \times 100 (\%) \quad (2)$$

Para a análise microscópica, as seções transversais dos cordões foram lixadas com lixas (# 2000), polidas com óxido de cromo, com pasta de diamante 6 μm e sílica coloidal com 0,5 μm . Ataque eletrolítico utilizado uma solução de

ácido crômico em água destilada (10% em peso) sob 2V durante 10 s. A microscopia óptica, MEV ajudaram a identificar as diferentes microestruturas em função das condições de deposição.

As amostras para o ensaio de microabrasão foram obtidas retificando 0,5 mm a partir do topo do cordão e na sequência lixadas até a lixa (#600). A resistência à abrasão foi avaliada por um microabrasômetro de esfera livre, e como contra corpo utilizou esferas de aço AISI 52100 e zircônia de diâmetro de 25,4 mm. A carga normal introduzida pela esfera de aço foi de $0,190 \pm 0,010$ N e pela esfera de zircônia foi de $0,165 \pm 0,15$ N. Como abrasivo utilizou a sílica (SiO_2) com partículas de diâmetro médio de 2,60 mm que foram diluídos em água destilada em concentrações de 1 e 40% em peso. A rotação do eixo de acionamento foi mantida constante a 80 rpm, que corresponde a uma velocidade relativa entre as superfícies das esferas e da amostra de cerca de $0,1 \text{ ms}^{-1}$. SEM foi utilizado para investigar os mecanismos de desgaste depois dos ensaios.

3. RESULTOS E DISCUSSÃO

Todos os revestimentos produzidos, visualmente apresentavam características homogêneas e livres de microfissuras. A condição de menor energia de soldagem apresenta uma diluição menor. No entanto, a energia de soldagem afeta diretamente as características geométricas dos cordões, bem como a diluição, valores quantificados na Tab. (3).

Tabela 3. Características geométricas dos cordões de soldas

Teste	Largura (mm)	Penetração (mm)	Reforço (mm)	Diluição (%)
Menor Energia	22,4	0,85	3,63	4,1
Maior Energia	23,5	1,11	3,07	8,9

Os revestimentos exibiram microestruturas dendríticas (dentritas finas), típicas de materiais de solda, as quais formam uma solução sólida Ni-Fe orientada na direção do fluxo de calor, conforme Fig. (2a). A primeira fase que se forma durante o resfriamento, do estado líquido das ligas a base de níquel, depositadas por PTA é uma dendrita primária rica em níquel e o líquido restante se solidifica por uma reação eutética, numa mistura interdendrítica com uma fase rica em níquel e outra com carbonetos ricos em cromo, (Hou, He et al. 2007) Fig. (2b).

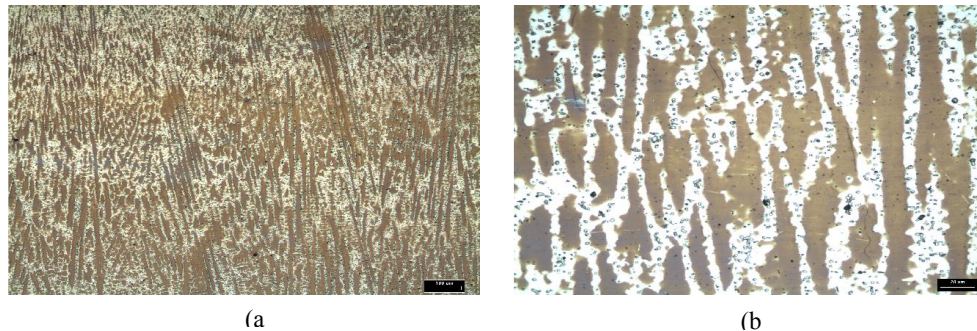


Figura 2. Microscopia óptica típica dos depósitos: (a) visão geral do depósito; (b) detalhe da matriz eutética.

A morfologia do revestimento é complexa e varia de acordo com as distâncias a partir da interface substrato-depósito, região a qual se forma uma fina camada de grãos finos equiaxiais. Esta formação ocorre porque o substrato possibilita a nucleação heterogênea, e a taxa de resfriamento é alta. Estruturas laminadas aparecem adjacentes à linha de fusão. As regiões entre as lamelas são enriquecidas de Ni e Fe. Em termos de testes de desgaste a variação da concentração da solução de abrasivo e o tipo da esfera mudou a dinâmica das partículas, tal como demonstrado na Fig. (3).

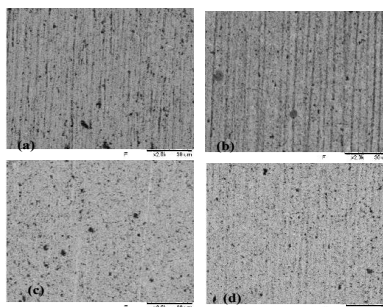


Figura 3. Imagens MEV das superfícies das calotas: (a) concentração 1% esfera de aço; e (b) concentração 40% esfera de aço; (c) concentração 1% esfera de zircônia; (d) concentração 40% esfera de zircônia.

Para concentração baixa Fig. (3a), observa-se que predominam os riscos devido ao deslizamento das partículas abrasivas, já na Fig. (3 b e d) ocorre uma combinação de deslizamento e rolamento das partículas abrasivas (misto) conforme a literatura (Hutchings 1998) e, finalmente, a predominância indentações devido ao rolamento das partículas Fig. (3c). O efeito da concentração sobre os coeficientes médios de desgaste demonstraram uma tendência semelhante ao encontrado para os outros materiais dúcteis em testes de microabrasão.

4. CONCLUSÕES

O processo PTA foi usado para depositar Inconel 625 em substratos de aço carbono, a parametrização do processo permitiu identificar condições de soldagem que levaram a depósitos de boa qualidade. As variações dos parâmetros de soldagem resultaram em grânulos com diferentes características macro e microscópicas.

A microestrutura dos depósitos obtidos foi complexa e variada a partir da interface com o substrato (microestrutura muito fina) variando em direcção ao meio do cordão (mais grossa).

O depósito com maior energia de soldagem resultou em coeficiente de desgaste maior. A utilização de esferas de zircônia produziu crateras mais irregulares e de baixo k, mas o uso de concentrações mais elevadas reduziram estes efeitos. Observou-se que para a condição de menor energia a calota formada pela esfera de zircônia é menos regular do que as formadas pela esfera de aço. Em particular para a menor concentração de abrasivo, onde a cratera é irregular e com poucos riscos. Para ambas as esferas o aumento da concentração resultou numa calota mais regular e num sistema misto de deslizamento e rolamento. O mesmo comportamento é verificado para a condição de maior energia.

5. REFERÊNCIAS

- Badisch, E. and M. Kirchgassner (2008). "Influence of welding parameters on microstructure and wear behaviour of a typical NiCrBSi hardfacing alloy reinforced with tungsten carbide." *Surface & Coatings Technology* 202(24): 6016-6022.
- Diaz, V. V., J. C. Dutra, et al. (2011). *Hardfacing by Plasma Transferred Arc Process*. Arc Welding. W. Sudnik, InTech.
- Fernandes, F., A. Cavaleiro, et al. (2012). "Oxidation behavior of Ni-based coatings deposited by PTA on gray cast iron." *Surface & Coatings Technology* 207: 196-203.
- Fox, G. R. and H. Liang (2010). "Wear Mode Comparison of High-Performance Inconel Alloys." *Journal of Tribology-Transactions of the Asme* 132(2).
- Gatto, A., E. Bassoli, et al. (2004). "Plasma Transferred Arc deposition of powdered high performances alloys: process parameters optimisation as a function of alloy and geometrical configuration." *Surface & Coatings Technology* 187(2-3): 265-271.
- Hong, J. K. and I. S. Kim (2003). "Environment effects on the reciprocating wear of Inconel 690 steam generator tubes." *Wear* 255: 1174-1182.
- Hou, Q. Y., Y. Z. He, et al. (2007). "Influence of molybdenum on the microstructure and wear resistance of nickel-based alloy coating obtained by plasma transferred arc process." *Materials & Design* 28(6): 1982-1987.
- Houghton, A., R. Lewis, et al. (2011). "Characterising and reducing seizure wear of inconel and incoloy superalloys in a sliding contact." *Wear* 271(9-10): 1671-1680.
- Hutchings, I. M. (1998). "Abrasive and erosive wear tests for thin coatings: a unified approach." *Tribology International* 31(1-3): 5-15.
- Jeshvaghani, R. A., M. Jaberzadeh, et al. (2014). "Microstructural study and wear behavior of ductile iron surface alloyed by Inconel 617." *Materials & Design* 54: 491-497.
- Keränen, M. (2010). *Effect of welding parameters of plasma transferred arc welding method on abrasive wear resistance of 12v tool steel deposit*. PhD, Aalto University.
- Kim, H., J. H. Choi, et al. (2003). "Reciprocating sliding wear of Inconel 600 tubing in room temperature air." *Journal of Alloys and Compounds* 351(1-2): 309-313.
- Liu, Y. F., Z. Y. Xia, et al. (2006). "Microstructure and wear behavior of (Cr,Fe)(7)C-3 reinforced composite coating produced by plasma transferred arc weld-surfacing process." *Surface & Coatings Technology* 201(3-4): 863-867.
- Mathew, M. D., P. Parameswaran, et al. (1998). *Materials Characterization*. Metals Handbook Desk Edition. 59.
- Ramesh, C. S., D. S. Devaraj, et al. (2011). "Slurry erosive wear behaviour of thermally sprayed Inconel-718 coatings by APS process." *Wear* 271(9-10): 1365-1371.
- Yun, J. Y., M. C. Park, et al. (2014). "Effects of amplitude and frequency on the wear mode change of Inconel 690 SG tube mated with SUS 409." *Wear* 313(1-2): 83-88.
- Zhang, H. Y., Y. H. Lu, et al. (2014). "Effect of precipitated carbides on the fretting wear behavior of Inconel 600 alloy." *Wear* 315(1-2): 58-67.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro dos órgãos de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG..

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O(s) autor(es) é (são) os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.