



MICROESTRUTURA DE REVESTIMENTOS DE STELLITE 6, DEPOSITADOS POR SOLDAGEM A PLASMA POR ARCO TRANSFERIDO E LASER

Bruna de Bernardo Foltran¹, **Edgar Yoshio Kuwabara**², **Ana Sofia C. M. D'Oliveira**³

(1) Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais UFPR, bruna@convoy.com.br

(2) Bolsista PIBIC - Departamento de Engenharia Mecânica/ UFPR

(3) Professora Titular do Departamento de Engenharia Mecânica/ UFPR, sofmat@demec.ufpr.br

Resumo. *As aplicações de revestimentos duros resistentes ao desgaste depositados por técnicas não convencionais, como soldagem a plasma por arco transferido (PTA) e deposição assistida por laser (laser cladding), vêm ganhando espaço em relação aos processos de soldagem tradicionais. Com vistas à identificação da melhor alternativa para utilização em condições de operação severas em indústrias petroquímicas, procedeu-se à caracterização dos revestimentos duros obtidos com a superliga à base de cobalto, Stellite 6 (Co-Cr-W-C), em condições de baixa diluição. As ligas foram depositadas sobre um substrato de aço inoxidável AISI 304 pelos processos de soldagem a plasma por arco transferido e deposição assistida por laser, sendo posteriormente submetidas a cinco ciclos térmicos em condições extremas de temperatura (1050 °C, 5 ciclos). As características dos revestimentos foram avaliadas através da análise microestrutural, composição química e determinação da microdureza. Os resultados obtidos são analisados levando em consideração outros trabalhos na literatura. Para as condições analisadas, as principais tendências observadas revelam que o processo de deposição assistida por laser produz uma microestrutura mais fina e de maior dureza a temperatura ambiente. No entanto em condições severas de temperatura, os revestimentos obtidos por soldagem a plasma por arco transferido exibiram elevada estabilidade microestrutural e de dureza.*

Palavras-chave: ligas de Co, stellite, laser cladding, PTA, revestimentos

1. INTRODUÇÃO

A deposição de um material duro e resistente ao desgaste na superfície de um material menos nobre (substrato) através de um processo de soldagem é chamado de endurecimento superficial (*hardfacing*). Sua função é reduzir o desgaste, ou seja, a perda de material por abrasão, impacto, erosão, cavitação ou qualquer outra deterioração por atrito (Davis 1993). O endurecimento superficial também é muito utilizado para controlar a combinação desgaste/ corrosão (Crook e Farmer 1992; Davis 1993).

Em situações de emprego sujeitas a elevadas temperaturas e desgaste erosivo, usualmente reveste-se as peças com a liga à base de cobalto, Stellite 6, através de processos de soldagem convencionais. Como alternativa encontram-se processos de deposição de elevada eficiência, como a soldagem a plasma por arco transferido (PTA), que vem sendo utilizado na aplicação de revestimentos duros tanto na fabricação de peças resistentes ao desgaste (tais como válvulas de motores de combustão interna, assentos de válvulas de controle de processo e parafusos-sem-fim de extrusoras), como em componentes de processos industriais (palletas de turbinas industriais, válvulas de controle de fluxo de catalisador) (Chen et al. 1992; Lugscheider et al. 1991A; Lugscheider et al. 1991B; Raghu e Webber 1996).

Paralelamente, o processo de deposição assistida por laser (laser cladding) oferece novas possibilidades na aplicação de revestimentos resistentes ao desgaste, sendo indicado como um processo alternativo para a aplicação de ligas na forma de pó. Tem características atraentes e sem iguais – entre as quais intensa fonte de energia dirigida, aplicável em diversas atmosferas, com efeitos localizados no espaço e tempo, o que se reflete em microestrutura fina – que explicam seu desenvolvimento como ferramenta de processo, sendo especialmente indicado para sistemas industriais automatizados. Este tipo de processamento tem se desenvolvido muito rapidamente nos últimos anos, encontrando-se já algumas aplicações na indústria de moldes de plásticos (Colaço *et al.* 1994), componentes para a indústria automotiva (Belmondo and Castagna 1979), componentes de turbinas a gás, (Coulon *et al.* 1992, Macintyre 1983), entre outras (Copley 1993; Lugscheider e Oberlander 1992; Singh 1993; Steen 1994).

Um requisito importante para avaliar-se a qualidade do revestimento é a diluição, definida como a fração fundida de substrato no volume total de revestimento depositado. O coeficiente de diluição pode ser determinado através da equação abaixo

$$d = \frac{\text{massa fundida de substrato}}{\text{massa total de revestimento}} \times 100 = \frac{B}{A + B} \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

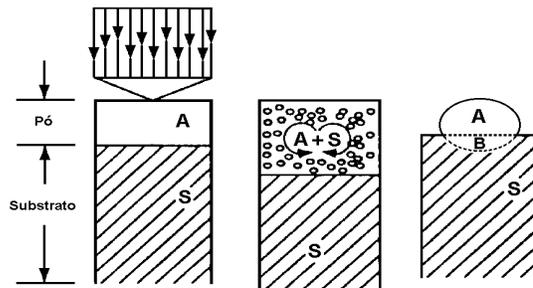


Figura 1 – Representação esquemática de como ocorre a diluição.

Na Figura 1 esquematiza-se o fenômeno de diluição, considerando o metal de adição em pó, como o utilizado no presente trabalho. Ao expor o metal de adição e o substrato a uma fonte de calor, ambos alcançam rapidamente seus pontos de fusão. A profundidade da região fundida do substrato depende das características do processo de deposição e do tempo de interação. Nesta fase há interdifusão, ou mistura, do metal de adição com a região fundida do substrato, por um mecanismo de convecção. A interdifusão na região de fusão continua até a completa solidificação. Assim a seção transversal do conjunto substrato/revestimento revela uma camada de revestimento e uma região onde ocorreu diluição com o substrato. A diluição irá causar uma mudança na composição da liga de endurecimento superficial e deve ser minimizada o quanto possível para manter as propriedades da liga. A resistência ao desgaste e outras propriedades desejadas no revestimento tendem a degradar-se com o aumento da diluição.

Este trabalho tem por objetivo comparar as características de revestimentos duros das superligas à base de cobalto - Stellite 6, depositadas por Soldagem PTA e Laser cladding, em condições de baixa diluição. Os revestimentos são analisados com relação à sua microestrutura, composição química e dureza nas condições de temperatura ambiente e após ciclagem térmica em condições severas de temperatura.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Revestimentos duros da liga à base de Co (C-Cr-W-C) – Stellite 6, com uma e duas camadas, foram depositados sobre aço inoxidável AISI 304 (120x15x12mm), pelos processos de deposição PTA e laser cladding. As composições químicas, antes do processamento, dos materiais do substrato e revestimento, estão apresentada na Tabela 1. As condições de processamento, tabela 2, foram otimizadas pela Eutetic/Brasil e pelo Instituto Superior Técnico de Lisboa/Portugal, que processaram as amostras por soldagem a plasma por arco transferido e por laser cladding, respectivamente.

Tabela 1 – Composição química dos materiais utilizados

| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Fe | W | Mo | Co |
|-------------------|---------------|--------------|--------------|----------------|---------------|----------------|---------------|-----------|----------|-----------|-----------|
| AISI 304 | 0.08 (máx) | 1.0 (máx) | 2.0 (máx) | 0.045 (máx) | 0.03 (máx) | 18.00/ 20.0 | 8.00/ 10.5 | Bal. | --- | --- | --- |
| Stellite 6 | 1.1 | 2.0 | 2.0 | --- | --- | 30.0 | 3.0 | 3.0 | 4.5 | 1.5 | Bal |

Ciclagem térmica foi realizada para avaliar a estabilidade das estruturas produzidas a temperatura elevada, acima da temperatura do peritetoide (diagrama Co-Cr). Corpos de prova permaneceram por 20min à temperatura de 1050°C, sendo resfriados ao ar, este procedimento foi repetido cinco vezes. A caracterização dos diferentes corpos de prova foi realizada na seção transversal, recorrendo a microdureza Vickers (Hv0.5) e análise microestrutural através de microscopia ótica e eletrônica de varredura, a 100µm da superfície. As amostras metalográficas foram preparadas de acordo com procedimentos usuais. Análise química semi-quantitativa foi feita por EDS. Diluição dos revestimentos foi calculada de acordo com a equação 1.

Tabela 2 – Parâmetros de processamento

| PTA | Laser cladding |
|--|--|
| Fluxo do gás de plasma – Ar: 2,33 l/min | Equipamento: CO ₂ , CW potência máx 3.0 KW |
| Fluxo do gás de proteção – Ar/H ₂ : 4,72-7,08 l/min | Potência aplicada: 2.2kW |
| Fluxo do gás de alimentação – Ar: 2,36 l/min | Distancia focal: 25cm |
| Faixa de corrente: 53-70A (1ª camada) e 90-93 A (2ªcamada e cp com uma camada) | Velocidade de varredura: 480 mm/min |
| Faixa de tensão: 20,6 a 23 V | Taxa de deposição do pó: 1,2 g/min |
| Taxa de alimentação: 26,5 g/min | Taxa de sobreposição dos cordões em cada camada: 33.3% |
| Oscilação do arco: largura–16 mm; frequência–1,3-1,5 Hz | |
| velocidade de varredura: 200 mm/min. | |

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Características gerais dos revestimentos

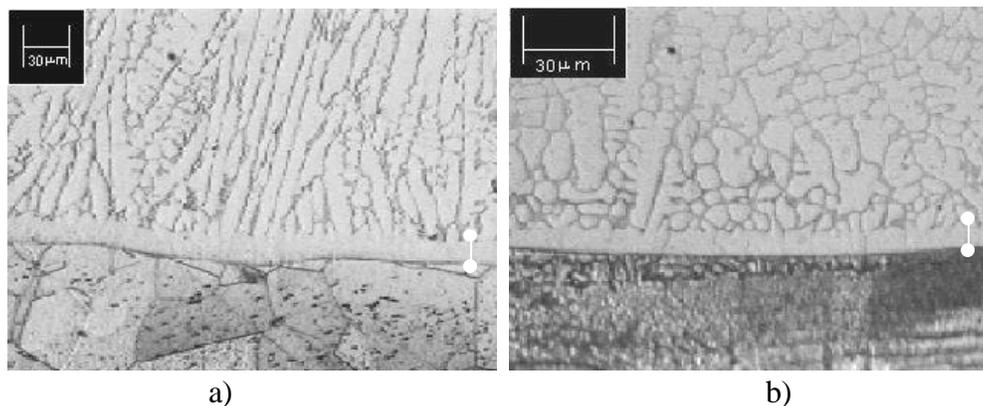
As superfícies produzidas apresentaram um bom acabamento após deposição, sem irregularidades. Os revestimentos apresentaram espessuras finais, após deposição de uma e duas camadas, de 1.0 mm e 1.6 mm, para o laser e de 2.5 mm e 4.5 mm para o PTA.

Com o emprego do estereoscópio foram obtidas imagens macrográficas da seção transversal das amostras com uma camada de revestimento para a determinação do grau de diluição. O grau de diluição foi calculado como mostrado na figura 1, utilizando-se um software de análise quantitativa de imagem. Comparando-se os valores de diluição medidos com os mencionados na literatura (Davis 1993) constatou-se que o grau de diluição do laser ficou dentro da faixa, próximo ao limite superior, e o do PTA próximo ao limite inferior.

Tabela 3 - Grau de diluição

| Processo de Deposição | Grau de diluição medido | Faixa do grau de diluição conforme [ASM 1] |
|-----------------------|-------------------------|--|
| Laser | 9,4 % | 1 a 10 % |
| PTA | 6,9 % | 5 a 15 % |

A Figura 2 apresenta a microestrutura dos revestimentos na região de ligação substrato/revestimento. A estrutura de solidificação é influenciada pela velocidade de resfriamento. No caso do laser cladding obteve-se uma região planar, seguida de uma estrutura celular e dendrítica. Os depósitos feitos por PTA apresentaram uma região planar imediatamente seguida por uma estrutura



dendrítica. Estas diferenças podem ser atribuídas à maior velocidade de resfriamento induzida no processo a laser em relação ao PTA. A diferença esperada nas velocidades de solidificação das duas técnicas utilizadas, foi ainda incrementada em consequência das dimensões dos dos revestimentos produzidos. Sendo a relação de espessura (deposito/substrato) maior para o PTA, é esperado que o escoamento de calor através do substrato seja menos eficiente, do que no caso de razões menores, como no laser cladding.

Figura 2 - Micrografias da região de ligação substrato/revestimento: a) PTA, b) laser.

3.2 Microestrutura da liga como depositada

As microestruturas dos revestimentos depositados pelos dois processos em estudo estão apresentadas na Figura 3. Os revestimentos de Stellite 6 apresentam uma microestrutura hipoeutética clássica com dendritas primárias compostas por uma matriz rica em Co, rodeadas pelo eutético divorciado (região interdendrítica) apresentando uma matriz rica em Co intercalada com lamelas de carbonetos do tipo M_7C_3 . O revestimento a laser apresenta uma microestrutura mais fina

em função da elevada velocidade de solidificação, como pode ser observado pela média do espaçamento dos braços das dendritas secundárias – λ (medidas em seções transversais, acompanhando a direção do tronco da dendrita primária, sobre o plano metalográfico) apresentado na Tabela 4. Tendências similares são mencionadas na literatura por Monson e Steen (1987) ao compararem revestimentos de Stellite 6 depositados pelos processos de soldagem oxi-acetilênica, soldagem a arco com eletrodo de tungstênio (TIG), PTA e laser. Os valores de λ também são bem próximos aos encontrados por Lungscheider e

Tabela 4 - Média do espaçamento dos braços das dendritas secundárias.

| Téc. de Processamento | l [mm] | Desvio padrão [mm] |
|------------------------------|---------------|---------------------------|
| PTA | 6,65 | 1,63 |
| Laser | 1,68 | 0,31 |

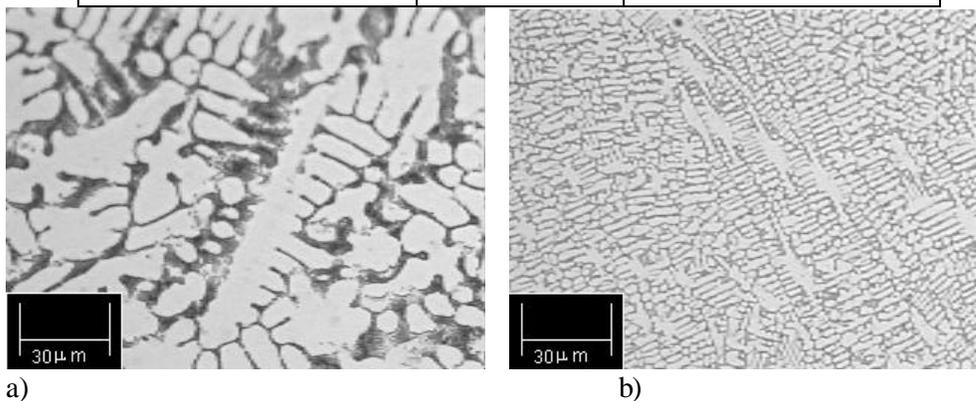


Figura 3 – Microestrutura dos revestimentos, como depositadas, a) PTA; b) Laser.

Oberländer (1992) ao estudarem o processo de PTA ($\lambda = 3\sim 8 \mu\text{m}$) e laser ($\lambda = 1\sim 5 \mu\text{m}$), e por Frenk et al. (1993) em revestimentos a laser de Stellite 6 com condições de processamento equivalentes às utilizadas no presente trabalho ($\lambda = 1,5\sim 3 \mu\text{m}$).

3.3 Efeito da temperatura

As ligas de Stellite 6 são conhecidas pela sua elevada dureza, atribuída principalmente à elevada dureza do Cr_7C_3 ($\approx 1600 \text{ Hv}$, Antony 1983) a qual é fortemente influenciada pela morfologia e fração volumétrica dos carbonetos presentes. Sabe-se no entanto que em temperaturas elevadas estas características perdem importância. Em uma primeira análise o efeito da temperatura foi analisado medindo a microdureza dos revestimentos, verificando-se um decréscimo na dureza nas superfícies obtidas por laser, de $\approx 510 \text{ Hv}$, como depositado, para $\approx 460 \text{ Hv}$, após ciclagem térmica, enquanto que nos revestimentos PTA a dureza se manteve em $\approx 470 \text{ Hv}$ após deposição e após ciclagem térmica.

As microestruturas antes e após ciclagem térmica, para os revestimentos obtidos por PTA e Laser estão apresentadas nas Figuras 4 e 5, respectivamente. Nas amostras revestidas a plasma, foi observada uma alteração morfológica das lamelas da região interdendrítica após ciclagem térmica,

que se tornaram mais espessas e arredondadas em relação à condição de como depositado. No caso do revestimento a laser a região interdendrítica, após ciclagem térmica, mostrou-se mais grosseira se comparada às estruturas iniciais. A maior estabilidade das microestruturas produzidas por PTA, pode ser correlacionada com as menores velocidades de solidificação envolvidas, que permitiram o desenvolvimento de uma estrutura com menor energia interna, ou seja, “mais estável”.

Variações na composição química decorrentes da ciclagem térmica foram avaliadas através de análises semi-quantitativas da composição química, Figura 6. Contrariamente ao mencionado na literatura, as variações de composição química na região interdendrítica não apresentaram uma boa correlação com as medidas de dureza. Assim, verifica-se para o PTA, nos revestimentos com uma camada, que não houve alteração da composição química nas condições em estudo. A deposição de duas camadas sobrepostas acarreta em um aumento do

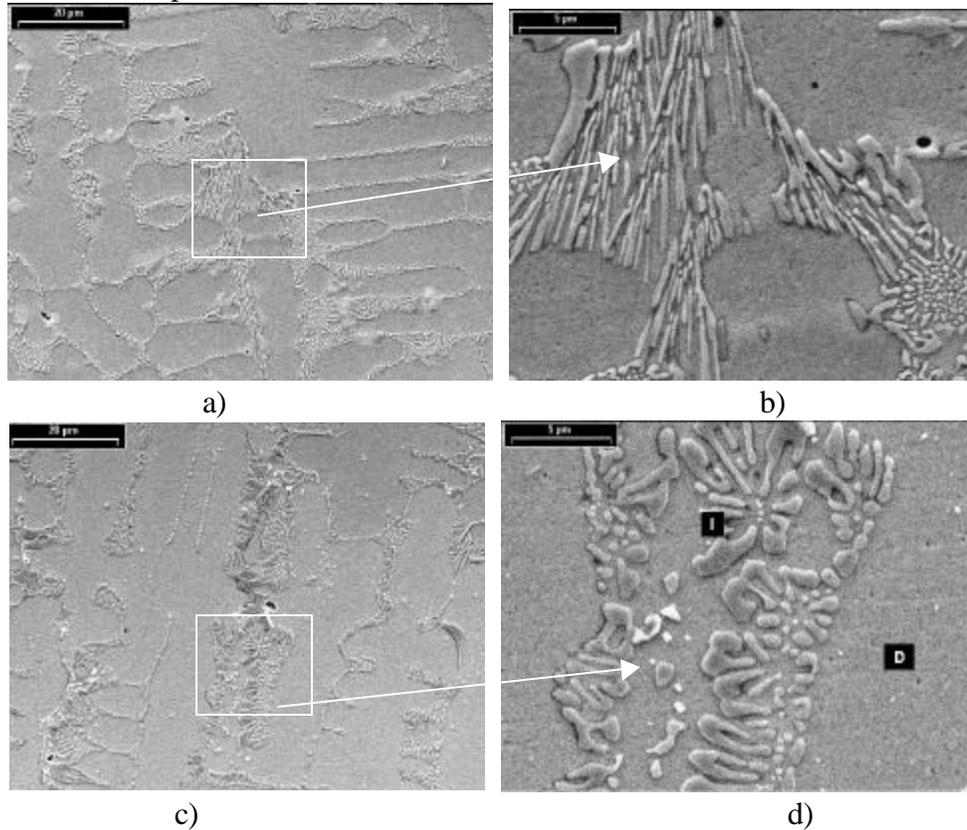
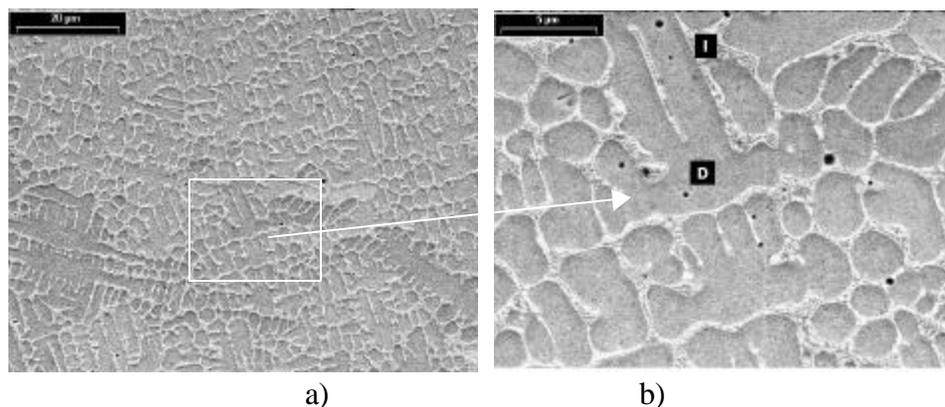


Figura 4 – Microestruturas dos depósitos PTA: a) e b) Como depositado; c) e d) Após ciclagem térmica a 1050° C, 5 ciclos.



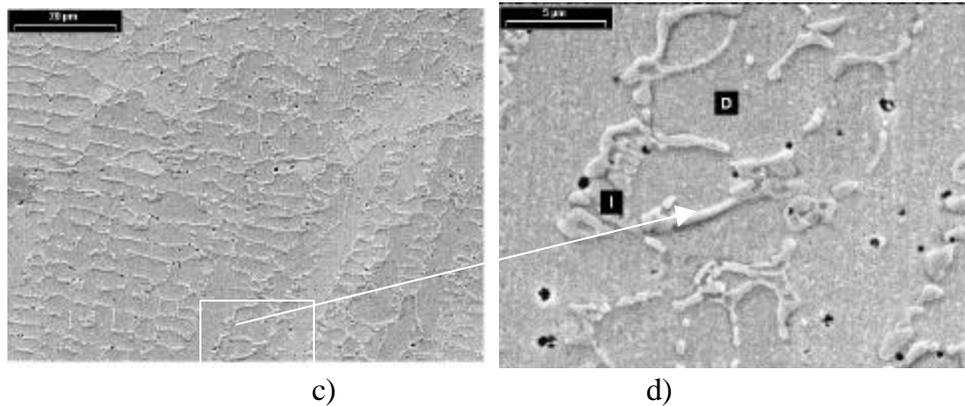


Figura 5 - Microestruturas dos depósitos obtidos por laser: a) e b) Como depositado; c) e d) Após ciclagem térmica a 1050° C, 5 ciclos.

teor de Co e diminuição dos teores de Cr e W na região interdendrítica, diferenças estas que se atenuam após ciclagem térmica. No caso da amostra obtida por laser cladding, a análise da composição química, Figura 6b, indicou não ter havido alteração significativa na composição química, nos revestimentos com uma camada. Revestimentos com duas camadas não apresentam diferenças significativas entre os teores de Co e Cr, nas duas condições analisadas. É interessante ainda analisar que, tal como seria de esperar, nos dois processos analisados, o teor de Fe na superfície diminui com a deposição de duas camadas sobrepostas.

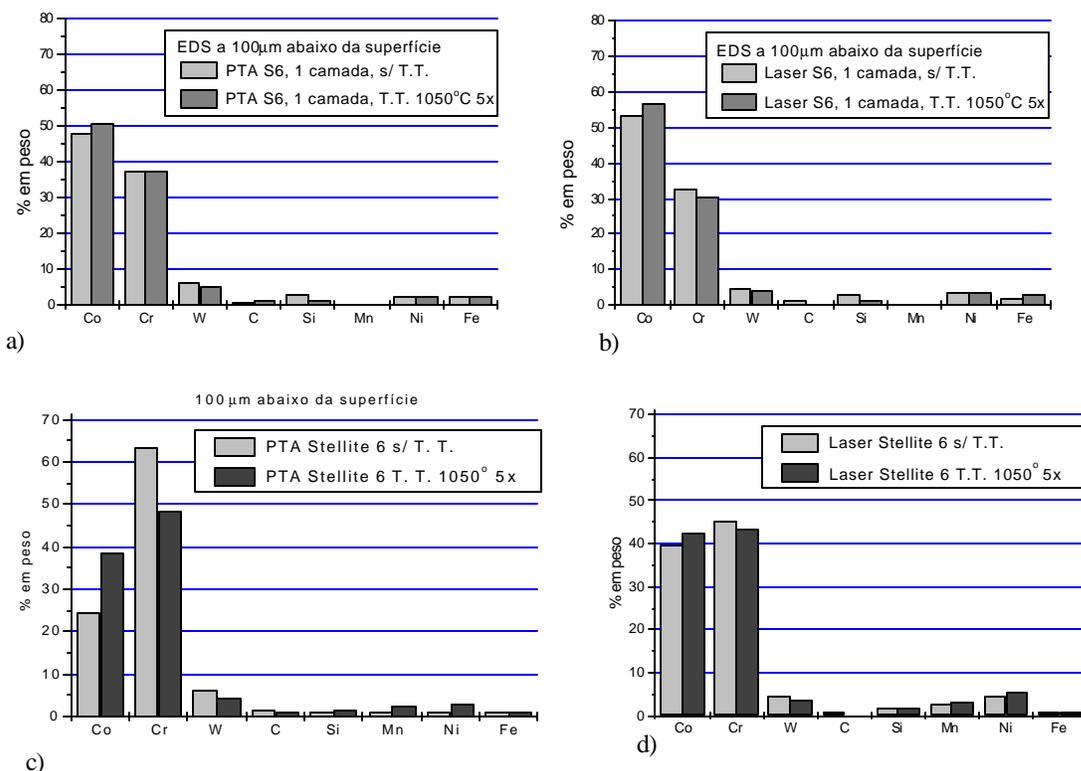


Figura 6 - Composição química na região interdendrítica nos depósitos com uma camada a) PTA, b) Laser cladding, e duas camadas, c) PTA e d) Laser cladding.

4. CONCLUSÕES

Nas condições estudadas, deposição assistida por laser resulta em estruturas mais refinadas em função da velocidade de solidificação/resfriamento mais elevada.

Revestimentos produzidos por soldagem PTA apresentam maior estabilidade de dureza e estrutura após ciclagem térmica, consequência das menores velocidades de resfriamento a que o revestimento foi submetido, para as condições utilizadas.

A diferença de dureza após ciclagem térmica dos revestimentos obtidos por laser cladding pode ser atribuída a um aumento da granulometria da estrutura.

Deposição de duas camadas sobrepostas reduz a diluição, medida pelo teor de Fe no revestimento.

Os resultados sugerem que nas temperaturas elevadas utilizadas nos processos petroquímicos os depósitos obtidos por soldagem PTA são mais adequados.

REFERÊNCIAS

- Belmondo, A. and Castagna, M.,(1979) Wear-Resistance Coatings by Laser Processing, *Thin solid films*, vol. 64, p.310-317.
- Chen, T. M.; Lui, T.S.; Chen, L.H.(1992) Overlaying of Stellite 6 Superalloy on Austenitic Manganese Steel by PTA Method. Conference: Surface Modification Technologies VI, Chicago, USA, p. 2-5.
- Colaço, R., Carvalho, T. and Vilar, R.,(1994) Laser Cladding of Stellite 6 on Steel Substrates, *High Temperature Chemical Processes*, vol. 3, p.21-29.
- Copley, M. (1993) Laser Processing Systems: An Overview. International Conference on Beam Processing of Advanced Materials. The Minerals, Metals and Processing Materials Society.
- Coulon, P.A., Com-Nougue, J., Kerrand, E. and Thauvin, G., (1992), Characterisation and Wear Resistance of Cobalt Base Coatings Deposited by CO₂ Laser On Steam Turbine Components, *ECLAT'92 - Laser Treatment of Materials*, Ed: B. L. Mordike, p.181-186.
- Crook, Paul ; Farmer, Howard N. (1992) Friction and Wear of Hardfacing Alloys. In: *ASM Handbook – Friction, Lubrication and Wear Technology*, Vol. 18. 1st ed. OH: ASM Metals Park , p.758-765.
- Davis, J.R.(1993) – Hardfacing, Weld Cladding and Dissimilar Metal Joining. In: *ASM Handbook – Welding, Brazing and Soldering*, Vol. 6. 10th ed. OH: ASM Metals Park , p. 699-828.
- Frenk, A.; Henchoz, N.; Kurz, W. (1993) Laser Cladding of Cobalt-based alloy: Processing parameters and microstructure. *Zeitschrift fuer Metallkunde*, Vol. 84, n. 12., p. 886-892.
- Lugscheider, E.; Hallén, H.; Ait-Mekideche, A.(1991A) Plasma Transferred Arc Surfacing with High Deposition Rates. *Proceedings of the Fourth National Thermal Spray Conference.*, USA, p.537-539.
- Lugscheider, E.; Morkramer, U.; Ait-Mekideche, A. (1991B) Advances in PTA Surfacing. *Proceedings of the Fourth National Thermal Spray Conference*. Pittsburgh, PA, USA, p. 529-535.
- Lugscheider, E. ; Oberlander, B. C. (1992) A Comparison of the Properties of Coatings Produced by Laser Cladding and Conventional Methods. Publ: The Institute of Materials, 1. Carlton House Terrace, London SW1Y 5DB, UK, p. 383-400.
- Macintyre, M., (1983), Laser hardsurfacing of gas turbine blade shroud interlocks, *International conference on Lasers in Manufacturing*.
- Monson, P. J. E.; Steen W. M. (1987), *Laser Treatment of Materials*. *Proceedings of European Conference on Laser Treatment of Materials*. B. L. Mordike, p. 123-132.
- Raghu, D.; Webber, R. (1996), PTA proves its work in high-volume hardfacing jobs. *Welding journal* Vol. 75. USA, p. 34-40.
- Singh, J. (1993), *Laser: The Leading Technology for surface Treatments*. International Conference on Beam Processing of Advanced Materials. The Minerals, Metals and Processing Materials Society.
- Steen, W. M.(1994), *Challenges in Laser Material Processing: a Global Overview*. International Conference on Beam Processing of Advanced Materials. The Minerals, Metals and Processing Materials Society.

MICROSTRUCTURE OF STELLITE 6 COATINGS DEPOSITED BY PLASMA TRANSFERED ARC WELDING AND LASER CLADDING

Abstract. *Surface welding by non-conventional techniques, such as plasma transferred arc welding (PTA) and laser cladding, have been gaining market, as alternative processes for surface welding. In order to evaluate the performance of a cobalt base alloy – Stellite 6 (Co-Cr-W-C), low dilution coatings, specimens were submitted to severe conditions of temperature. Hardfacing was done on an AISI 304 stainless steel substrate, using PTA surface welding and laser cladding processes. The present work aims to characterise as deposited features, and their stability after cycling five times, at 1050°C. The performance of hardfaced material was evaluated by microstructure, chemical analysis and microhardness measurements. For the processing conditions tested, results showed that, at room temperature, laser cladding shows a higher hardness and finer solidification structure. However for the range of temperatures tested, PTA deposits exhibited superior microstructural and microhardness stability at elevated temperatures. Although laser deposits still present a finer structure, its metastable character leads to precipitation at the high temperatures tested.*

Keywords: *Co base alloys, stellite, laser cladding, PTA welding, coatings*