

MICROSOLDAGEM LASER Nd:YAG PULSADO DE LÂMINAS FINAS DA SUPERLIGA DE NÍQUEL MONEL 400

V. A. Ventrella¹, J. R. Berretta², W. de Rossi²

Av. Brasil centro - 56, Ilha Solteira – SP, ventrella@dem.feis.unesp.br

¹ UNESP Depto de Engenharia Mecânica

² IPEN Centro de Lasers e Aplicações Industriais

RESUMO

O presente trabalho estudou a influência da energia do pulso em processo de soldagem laser Nd:YAG pulsado de lâminas finas (100 μ m) da superliga de níquel Monel 400, utilizada no revestimento de sensores que trabalham em ambiente corrosivo da indústria sucroalcooleira e petroquímica. Utilizou-se energia de pulso de 1,0 a 2,25 Joules, com incremento de 0,25 Joules e largura temporal de 4 ms. As soldas foram realizadas com proteção gasosa de argônio. Foram realizadas análises macrográficas das juntas soldadas, através de secções transversais das mesmas e, ensaios de microdureza Vickers. Os resultados obtidos mostraram que o controle da energia do pulso, em processo de soldagem por laser de lâminas finas é de fundamental importância para a geração de juntas soldadas com boas propriedades mecânicas e livres de descontinuidades. O processo mostrou-se muito sensível à presença de gap entre as lâminas e também à formação de compostos intermetálicos.

Palavras-chave: soldagem, laser pulsado, Nd:YAG, superliga de níquel, Monel 400.

INTRODUÇÃO

A liga binária níquel-cobre (Monel 400) apresenta alta resistente à corrosão e oxidação, aliada a elevada resistência mecânica e boa ductilidade, tornando-se um material adequado para ser trabalhado a frio. Essas características fazem do Monel 400 uma liga mais atraente do que os metais puros em uma grande faixa de

aplicações. Nas indústrias químicas o Monel 400 é muito utilizado na fabricação de vasos, tubulações, filtros e válvulas, o que implica em processos de conformação mecânica e soldagem ⁽¹⁾.

A soldagem laser vem sendo utilizada como um importante processo de manufatura. Ela pode ser utilizada tanto no modo contínuo quanto no modo pulsado^(2,3). No processo onde se utiliza laser pulsado é possível realizar soldas de costura em lâminas finas, através da sobreposição dos pulsos. Nesse caso a velocidade de soldagem é definida pela taxa de sobreposição, taxa de repetição e diâmetro do pulso. A soldagem de sobreposição de lâminas finas apresenta problemas típicos como distorção excessiva da junta soldada, falta de contato entre as lâminas a serem soldadas (presença de um gap de ar), perfuração da junta e presença de altos níveis de tensões residuais. O processo de laser pulsado é preferido em relação ao processo por laser contínuo, pois ele possibilita um melhor controle da energia de soldagem^(4,5,6,7).

A literatura apresenta pesquisas com soldagem laser de Nd:YAG nos modos contínuo, pulsado, com chapas dissimilares e chapas revestidas. Kim D.J. et al. ⁽⁸⁾ utilizando um laser pulsado de Nd:YAG obteve bons resultados na soldagem do Inconel 600, utilizado em componentes tubulares de usinas nucleares. Berretta, J.R. et al. ⁽⁹⁾ utilizando um laser pulsado de Nd:YAG estudou a soldagem de juntas dissimilares de aço inoxidável austenítico AISI 304 e aço inoxidável martensítico AISI 420. Ping, D. e Molian, P. ⁽¹⁰⁾ utilizou um sistema laser pulsado de Nd:YAG com largura temporal de nanosegundos para soldar laminas finas com 60 μm de aço inoxidável austenítico AISI 304.

No presente trabalho foi realizada uma análise sobre o uso do laser de Nd:YAG, no modo pulsado, em soldagem de laminas finas ($100\mu\text{m}$) da *superliga de níquel Monel 400, utilizada no revestimento de sensores*. Foi estudado o efeito da energia do pulso de soldagem nas características microestruturais da junta soldada, buscando a obtenção de uma junta livre de defeitos.

MATERIAIS E MÉTODOS

O arranjo experimental, um sistema laser de Nd:YAG na condição pulsado, empregado no presente trabalho é mostrado na Fig. 1.

O metal base utilizado neste estudo foi a *superliga de níquel Monel 400* na forma de chapas finas com 100 µm de espessura. As amostras foram cortadas na dimensão 20mm x 44,5mm. A composição química do metal base é mostrada na Tab. 1. Os resultados experimentais foram analisados com base na relação entre energia do pulso e geometria do cordão de solda, presença de descontinuidades e propriedades mecânicas.

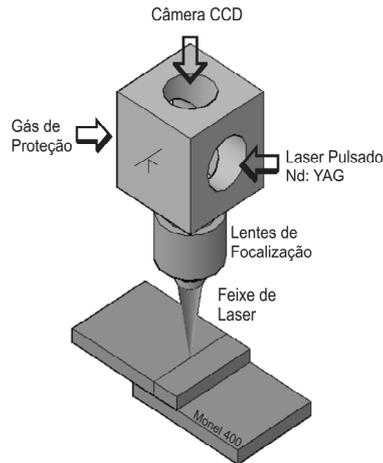


Fig. 1. Diagrama esquemático do sistema de soldagem por laser pulsado de Nd:YAG

Tab. 1. Composição química do Monel 400 (% em peso)

Elementos	Ni	Cu	Fe	Si	Mn	C	S
Monel 400	66,5	rem.	2,50	0,50	2,00	0,30	0,024

Para avaliar a influência da energia do pulso, as lâminas foram posicionadas na condição de junta sobreposta. Elas foram soldadas com feixe de diâmetro de 0,2 mm e ângulo de 90°. A energia do pulso (E_p) variou de 1,0 to 2,25 J, com um incremento de 0,25 J e largura temporal (t_p) de 4 ms. As amostras foram mantidas fixas através de um dispositivo (Fig. 2) o qual proporcionou um bom contato entre as lâminas e com mínima distorção.

As amostras foram soldadas em uma atmosfera de gás argônio utilizando-se um fluxo de 10 l/min. Após a soldagem foi realizada uma preparação metalográfica da secção transversal do cordão de solda, e posterior revelação da estrutura através de ataque químico em solução de ácido nítrico 50% e ácido acético 50%.

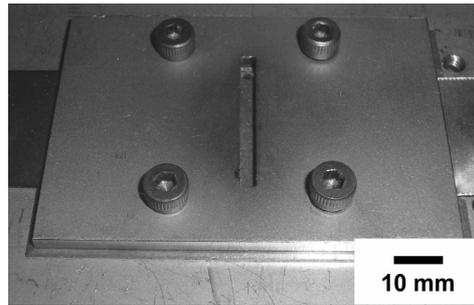


Fig. 2. Dispositivo de fixação das amostras de lâmina fina.

As propriedades mecânicas das juntas soldadas foram avaliadas através de ensaios de microdureza Vickers (HV10). As medidas de microdureza foram realizadas na secção transversal da junta soldada, numa direção paralela à superfície da chapa, próximo à linha de conexão. Procurou-se correlacionar a microdureza com possíveis efeitos de heterogeneidades microestruturais, tanto no metal base quanto no metal de solda.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 3 mostra macrografias da secção transversal das juntas sobrepostas soldadas com laser pulsado com diferentes energias (E_p). Observa-se na Fig. 3a (amostra soldada com energia de 1,0 Joule), que o metal de solda fundido não penetrou na lâmina inferior e não apresentou concavidade superficial, típica de processos autógenos. Este fato ocorreu devido à baixa energia de soldagem. Observa-se também nessa macrografia a presença de um gap entre as lâminas, fato que pode ter contribuído com a falta de penetração. A presença de um gap, na linha de conexão, entre as lâminas pode atuar também como um concentrador de tensão nessa região, o que pode reduzir a resistência mecânica da junta. Kawarito et al. ⁽¹¹⁾ observou que quanto maior o gap entre os elementos a ser soldado, maior será a concavidade na superfície do cordão de solda, desde que o metal líquido tenha tempo suficiente para preencher a região do gap, fato que não ocorreu com essas amostras. Analisando-se as amostras com energia de pulso de 1,25 a 2,0 Joules observou-se que essas amostras apresentaram uma linha de conexão, isto é, uma região de com metal fundido entre elas, caracterizando-se portanto a união entre as lâminas, conforme mostra a macrografia da Fig. 3b, 3c, 3d e 3e. Nas condições 3b e 3c as amostras apresentaram uma penetração do metal líquido na lâmina inferior e

bom contato entre as mesmas, garantindo uma condição ideal para a soldagem por costura de lâminas finas sobrepostas. Na Fig. 3f (2,25 Joules) observa-se um aumento na concavidade da superfície do cordão e da penetração do mesmo. A concavidade e penetração aumentaram proporcionalmente com o aumento da energia do pulso, entretanto observou-se uma deformação das lâminas soldadas devido ao maior aporte de calor na junta.

As análises macrográficas de todas as amostras demonstraram que a morfologia do metal de solda é simétrica em relação à direção do feixe laser. Esta simetria na superfície e na raiz do cordão de solda foi observada independentemente da energia do pulso de soldagem, sugerindo um movimento estável do metal líquido na poça de soldagem.

A Fig. 4 mostra a relação entre a energia do pulso de soldagem e a geometria do cordão de solda. Quanto maior a energia do feixe maior a largura do cordão, entretanto quando a energia do pulso é muito elevada o metal líquido passa através da raiz da junta e, uma menor massa líquida transfere calor para o metal base, resultando em um cordão mais estreito.

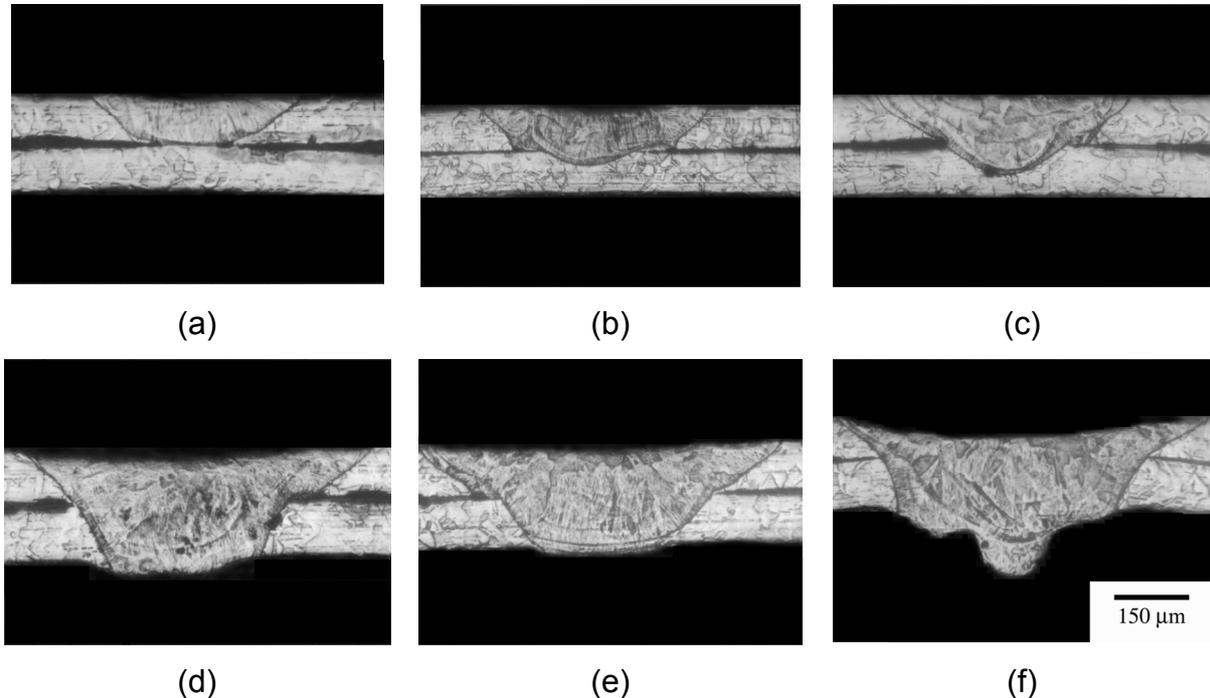


Fig. 3. Secção transversal das juntas com diferentes energias de pulso (E_p). a) 1,0 J, b) 1,25 J, c) 1,5 J, d) 1,75 J, e) 2,0 J e f) 2,25 J.

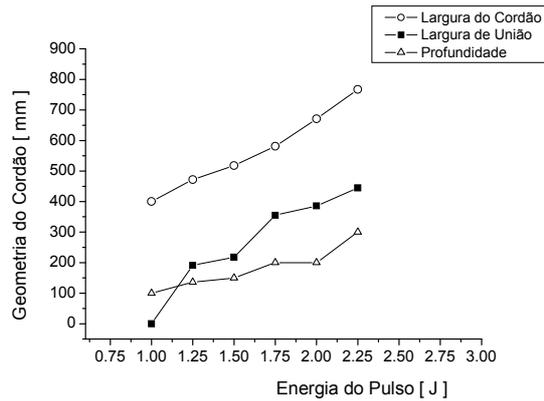


Fig. 4. Relação entre a energia do pulso [E_p] e a geometria do cordão.

A Fig. 5 mostra microestruturas típicas da junta soldada da liga de níquel Monel 400. A Fig. 5a mostra a estrutura de solidificação da linha de fusão da lâmina superior, onde pode ser visto o metal base não fundido agindo como substrato para a nucleação dos grãos colunares da zona de fusão, caracterizando o crescimento epitaxial. Nesse caso os grãos são perpendiculares à linha de fusão. A Fig. 5b mostra a ZAC onde pode ser visto o efeito do gradiente térmico nessa região. Comparando-se a soldagem de lâminas finas com a soldagem de lâminas espessas, pode-se concluir que os grãos se tornam mais grosseiros à medida que a espessura do metal base diminui. Isso mostra que à medida que o volume de material do metal base diminui, o tempo de resfriamento aumenta e a aparência da ZAC torna-se mais grosseira. O valor médio de microdureza obtido foi de 186 HV, praticamente uniforme entre o MS, ZAC e MB.

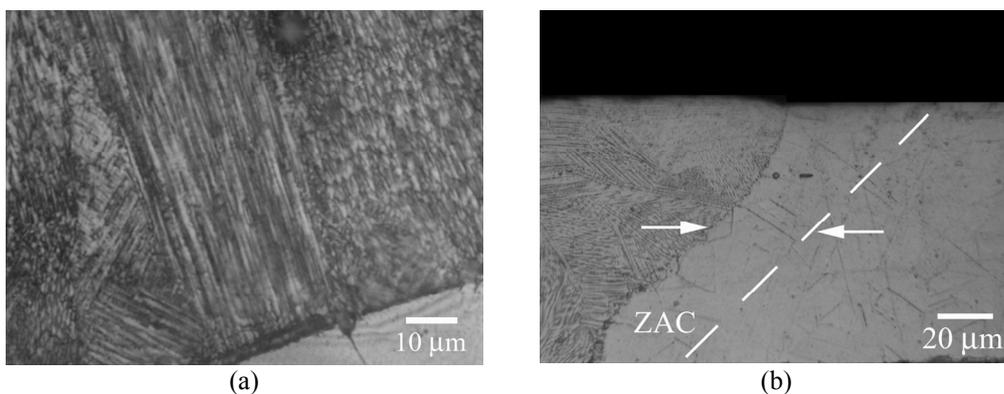


Fig.5. Microestrutura típica da zona de fusão (a) e da ZAC (b) da liga Monel 400 (amostra soldada com 2,0 Joules).

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente trabalho demonstraram que é possível soldar lâminas finas 100 µm de espessura, da superliga Monel 400, usando um sistema de laser pulsado de Nd:YAG. A melhor junta soldada foi escolhida em função de apresentar boa penetração livre de descontinuidades. Isso foi observado na amostra soldada com uma energia de pulso de 1,5 Joules, uma taxa de repetição de 39 Hz e uma largura temporal de 4ms. Isso confirma uma das grandes vantagens da soldagem com laser pulsado, em relação a processos convencionais, que é união com mínimo aporte térmico. O trabalho também mostrou que o processo é muito sensível à presença de gap entre as lâminas da junta, porque o gap dificulta a transferência de calor entre as mesmas. A geometria do cordão de solda mostrou que ela depende não somente da energia do pulso, mas também da presença de gap entre as lâminas. A largura do cordão de solda, a largura de união e a profundidade do cordão aumentaram à medida que a energia do pulso aumentou. O perfil de microdureza mostrou-se praticamente uniforme entre o MS, ZAC e MB.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro da *FUNDUNESP* – Fundação para o Desenvolvimento da UNESP e do *CNPq* - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

REFERÊNCIAS

1. SINGH,V.B., GUPTA,A., The electrochemical corrosion and passivation behaviour of Monel (400) in concentrated acids and their mixtures, *Journal of Materials Science*, 36, p.1433-1442, 2001.
2. GILLNER, A., HOLTKAMP,J., HARTMANN,C., OLOWINSKY,A., GEDICKE,J., KLAGES,K., BOSSE,L., BAYER,A., Laser applications in microtechnology, *Journal of Materials Processing Technology* 167, p.494-498, 2005.
3. ABE, N., FUNADA, Y., IMANADA, T., TSUKAMOTO,M., Microwelding of thin stainless steel foil with a direct diode laser, *Transaction of JWRI*, 34, p.19-23, 2005.

4. TOLINSKI, M., Lasers seal the deal in medical, *Manufacturing Engineering*, 140, 5, p.14-20, 2008.
5. ION, J.C., “Laser Processing of Engineering Materials”, Ed. Elsevier, UK, 2005. 556p.
6. DULEY, W.W., “Laser Welding”, Ed. John Wiley&Sons, USA, 1999. 251p.
7. STEEN, W.M., 2005, “Laser Material Processing”, Springer, USA, 2005. 408 p.
8. KIM, D.J.; KIM, C.J. AND CHUNG, C.M. , Repair welding of etched tubular components of nuclear power plant by Nd:YAG laser, *Journal of Materials Processing Technology*, 14, p.51-56, 2001.
9. BERRETTA, J.R.; ROSSI, W.; NEVES, M.D.M.; ALMEIDA, I.A. AND JUNIOR, N.D.V., Pulsed Nd:YAG laser welding of AISI 304 to AISI 420 stainless steels, *Optics and Lasers in Engineering*, 45 (2007) 960-966.
10. PING, D. AND MOLIAN, P., Q-switch Nd:YAG laser welding of AISI stainless steel foils, *Materials Science & Engineering A*, 486, p.680-685, 2008.
11. KAWARITO, Y., KITO, M. AND KATAYAMA, S., “In-process monitoring and adaptive control for gap in micro butt welding with pulsed YAG laser”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol.40, p.183-190, 2007.

Nd:YAG PULSED LASER MICROWELDING OF MONEL 400 Ni SUPERALLOY THIN FOIL

Experimental investigations were carried out using a pulsed neodymium: yttrium aluminum garnet laser weld to examine the influence of the pulse energy in the characteristics of the weld fillet. The pulse energy was varied from 1.0 to 2.25 J at increments of 0.25 J with a 4 ms pulse duration. The base material used for this study was Monel 400 superalloy foil with 100 μ m thickness. The welds were analyzed by optical microscopy and micro hardness Vickers. The results indicate that pulse energy control is of considerable importance to thin foil weld quality because it can generate good mechanical properties and reduce discontinuities in weld joints. The process appeared to be very sensitive to the gap between couples.

Key-words: welding, pulsed laser, Nd:YAG, Ni superalloy, Monel 400.