

ESTUDO DA FORMAÇÃO DE TRINCAS A QUENTE EM LIGAS DE ALUMÍNIO DE ALTA RESISTÊNCIA SOLDADAS POR LASER DE Yb:FIBRA *

Rafael Humberto Mota de Siqueira¹
Sheila Medeiros de Carvalho²
Milton Sergio Fernandes de Lima³

Resumo

O objetivo da presente contribuição é discutir o aparecimento das trincas a quente em três ligas de alumínio, AA2024, AA6063 e AA6013, soldadas a laser. Para tanto um laser do tipo Yb:fibra foi usado em condições de aportes térmicos diferentes. Os resultados indicam uma tendência ao trincamento em várias condições experimentais. No entanto, para os parâmetros de processo utilizados e para as ligas estudadas, observa-se que quando a liga possui entre 0,6% e 1% de silício a sensibilidade ao trincamento diminui.

Palavras-chave: Alumínio de Alta Resistência; Soldagem a Laser; Trincamento a Quente; Laser

A STUDY OF THE HOT CRACK FORMATION IN HIGH STRENGTH ALUMINUM ALLOYS WELDED BY Yb:FIBER LASER

Abstract

The objective of the present contribution is to discuss the appearance of hot cracks in three laser welded aluminum alloys, AA2024, AA6063 and AA6013. For this purpose an Yb:fiber type laser was used under different thermal input conditions. The results indicate a tendency to crack in various experimental conditions. However, for the process parameters used and for the studied alloys, it is observed that when the alloy has between 0.6% and 1% of silicon, the sensitivity to cracking decreases.

Keywords: High Strength Aluminum Alloys; Laser Beam Welding; Hot Cracking; Laser

¹ Engenheiro de Materiais, Ph.D., Colaborador Técnico Científico, Subdivisão de Fotônica, Instituto de Estudos Avançados, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.

² Engenheira Metalúrgica, Ph.D., Colaborador Técnico Científico, Subdivisão de Fotônica, Instituto de Estudos Avançados, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.

³ Físico, Ph.D., Pesquisador Adjunto, Subdivisão de Fotônica, Instituto de Estudos Avançados, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Desde a década de 1930, a indústria aeroespacial tem utilizado ligas de alumínio na fuselagem e nas asas de aeronaves [1]. Segundo os métodos atuais de fabricação, os reforçadores (*stringers*) são fixados ao revestimento (*skin*) da aeronave fazendo uso de rebites. Cada fuselagem utiliza milhões de rebites, um processo lento e que, embora altamente automatizado, oferece pouco potencial para aumento da velocidade de produção ou redução no peso das aeronaves. Este processo de fixação por rebites é responsável por até 40% do tempo de fabricação da estrutura da uma aeronave [2]. Nesse sentido, as maiores empresas do setor aeroespacial, em conjunto com os centros de pesquisa e universidades de seus países, vêm desenvolvendo extensos programas de pesquisa para substituir os atuais sistemas de manufatura. Os projetos de pesquisa nesta área são principalmente direcionados para métodos alternativos de junção das partes da fuselagem por *Friction Stir Welding* (FSW – Soldagem por fricção linear) [3] ou *Laser Beam Welding* (LBW – soldagem a laser) [4]. O primeiro processo consiste na mistura mecânica, no estado-sólido, de duas partes metálicas, enquanto o segundo utiliza a energia concentrada de um feixe de laser para fundir as partes entre si.

Entre estes processos, o LBW tem apresentado mais confiabilidade até o presente momento. As aeronaves da série A3XX, do consórcio europeu AIRBUS, já contêm inúmeras partes da fuselagem soldadas com laser. Com a introdução desta tecnologia no processo de fabricação, a empresa obteve uma redução de 5% no peso da aeronave. Com o avanço nas pesquisas em processos de soldagem e em desenvolvimento de novos materiais, espera-se alcançar uma redução no peso de até 5% [5]. Outras empresas também possuem programas mais ou menos avançados de aplicação do laser na manufatura aeronáutica.

A utilização do laser como ferramenta na soldagem de ligas de alumínio mostra-se interessante devido a algumas características obtidas neste processo, especialmente em relação à elevada velocidade de processo e a alta concentração de energia em áreas reduzidas, o que inibe distorções e empenamento do material soldado. Embora exista um forte movimento inovativo na soldagem a laser de ligas de alumínio, com 7800 resultados obtidos na base de patentes norte-americana (*US Patent & Trademark Office*), algumas questões importantes ainda são objeto de estudo. A alta condutividade térmica, refletividade elevada para certos comprimentos de onda e baixo ponto de fusão e viscosidade podem causar instabilidades na solda. Além disso, presença de porosidade e trincas, perda de elementos voláteis, diminuição local da resistência mecânica e a necessidade de controle da camada de óxido [6], são problemas que podem prejudicar a eficiência do processo. Dentre todos os problemas, porosidades e trincas são os principais.

Em uma estrutura aeronáutica a presença de trincas de qualquer natureza e dimensão, é fator impeditivo, devido às normas utilizadas na indústria aeronáutica. Uma limitação na soldagem a laser de alumínio, principalmente em ligas tratáveis termicamente, é a presença de trincas na região do cordão de solda. Essas trincas são classificadas em três tipos: a frio, a quente e de liquação [7]. As trincas a frio surgem após o processo de solidificação do cordão e decorrem da incapacidade da liga em resistir às tensões residuais oriundas do processo de solidificação. As trincas a quente se formam quando o cordão ainda está no processo de solidificação dentro da zona pastosa. Nestas condições, qualquer tensão existente pode dar origem a uma trinca entre os contornos de grão. Similar às trincas de solidificação, as trincas por liquação se concentram na zona termicamente afetada (ZTA), imediatamente

adjacente à zona de fusão [8]. Seu surgimento ocorre durante o resfriamento do cordão, pois o metal líquido presente nos contornos de grão pode trincar em virtude das tensões térmicas atuantes no processo [9].

As trincas de solidificação podem ocorrer em ligas de alumínio com adição de elementos de liga como Mg, Si e Cu [10]. Muitas ligas tratáveis termicamente, por exemplo, aquelas das classes AA2000 e AA6000, são susceptíveis ao surgimento de trincas durante a soldagem [11]. Este tipo de trinca ocorre quando a fração de líquido interdendrítico não suporta as tensões atuantes durante os últimos estágios de solidificação, resultando nas chamadas trincas do tipo “linha de centro” ou “de cratera”, oriundas do meio da zona de fusão. Aumentando-se a concentração de certos elementos de liga, com a conseqüente diminuição do intervalo de solidificação, é possível evitar a formação de trincas. Isto geralmente é feito através da utilização de um metal de adição (*filler metal*) adequado [12]. No entanto, já foi mostrado que a utilização de um metal de adição não resolve totalmente o problema do trincamento e ainda causa complicações ao processo de soldagem [13]. Por exemplo, o arame deve ser alimentado muito próximo ao feixe de laser, o que eventualmente leva a uma obstrução do mesmo e a interrupção da solda.

Este trabalho tem por objetivo estudar a influência da composição da liga e dos parâmetros de processo na soldagem a laser de ligas de alumínio de alta resistência na formação de trincas na zona de fusão e na zona termicamente afetada. Para esta finalidade, foram utilizadas três ligas de alumínio, tratáveis termicamente, utilizadas na indústria aeronáutica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A liga de alumínio AA2024-T3 foi recebida na forma de chapas com 220 mm de largura por 300 mm de comprimento e espessura de 1,6 mm. A liga de alumínio AA6063-T6 foi recebida na forma de barra com 75 mm de largura por 500 mm de comprimento e espessura de 9,3 mm. A liga de alumínio AA6013-T4 foi recebida na forma de chapas com 300 mm de largura por 600 mm de comprimento e espessura de 1,6 mm. Na Tabela 1 são apresentadas as composições especificadas das ligas de alumínio AA2024, AA6063 e AA6013.

Tabela 1. Composições especificadas as ligas de alumínio utilizadas [14].

Elemento	AA2024 (%)	AA6063 (%)	AA6013 (%)
Cr	0,1	0,1	0,1
Cu	3,8 – 4,9	0,1	0,6 – 1
Fe	0,5	0,35	0,5
Mg	1,2 – 1,8	0,45 – 0,9	0,8 – 1,2
Mn	0,3 – 0,9	0,1	0,2 – 0,8
Si	0,5	0,2 – 0,6	0,6 – 1
Ti	0,15	0,1	0,1
Zn	0,25	0,1	0,25
Al	90,7 – 94,7	98,5 – 97,65	96,85 – 95,05

Para o processo de soldagem a laser foi utilizado um laser de Yb:fibra (IPG modelo YLR-2000) com 2 kW de potência média. O feixe do laser é guiado por uma fibra ótica com 10 m de comprimento e 0,1 mm de diâmetro até um sistema óptico de colimação e focalização. Com este sistema, o feixe de laser focalizado na superfície das amostras apresenta um diâmetro de 0,1 mm, com uma distribuição de

intensidade aproximadamente gaussiana. A potência do laser foi variada entre 500 e 2000 W, a velocidade de soldagem variou entre 5 e 150 mm/s. Hélio foi utilizado como gás de processo com fluxo de 20 l/min. Foram realizadas soldas de topo em passe único em todas as amostras.

Para os experimentos as chapas das ligas de alumínio AA2024 e AA6063 e a barra da liga de alumínio AA6063 foram cortadas em amostras com 30 mm de largura por 100 mm de comprimento. Os cordões de solda foram realizados no sentido do comprimento, iniciando e terminando a 10 mm das bordas, como apresentado na Figura 1. Antes dos experimentos todas as amostras foram lixadas em papel de carvão de silício de grana 600, lavadas e por fim limpou-se com acetona PA.

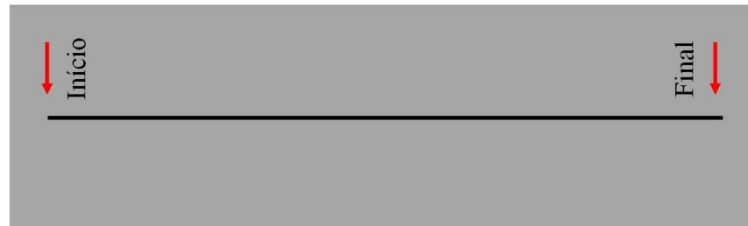


Figura 1. Esquema da metodologia de soldagem das amostras.

Análises por microscopia óptica foram realizadas no topo do cordão de solda, as quais foram polidas e atacadas quimicamente com solução de Keller (2% HF, 10% HNO₃ e 88% H₂O), por aproximadamente 10 segundos.

Neste trabalho será considerada intensidade a razão entre potência do laser (P) e área do feixe sobre a amostra (A), Equação (1), e o aporte térmico (*Heat Input* – HI) como sendo a relação entre a potência do laser (P) e a velocidade de processo (V), para um mesmo valor de absorvidade, Equação (2). O tempo de interação (t) é a relação entre o diâmetro do feixe (D) e a velocidade de processo, Equação (3).

$$I = P/A \quad (1)$$

$$HI = P/V \quad (2)$$

$$t = D/V \quad (3)$$

3 RESULTADOS

Serão apresentados separadamente os resultados para cada uma das ligas de alumínio. Para cada liga de alumínio foram utilizadas três conjuntos de potência (P) e velocidade (V). A finalidade de variar o aporte térmico para cada uma das ligas de alumínio, Equação (2), é verificar se há influência na formação de trincas a quente. Para visualização de trincas no cordão de solda, serão apresentadas macrografias do topo do cordão.

3.1 Experimentos realizados na liga de alumínio AA2024-T3

Na Tabela 2 são apresentadas as condições de soldagem utilizadas nas amostras de alumínio AA2024-T3. Observa-se que a velocidade foi mantida constante, 100 mm/s, e a potência foi variada entre 1300 W e 2000 W. Como o diâmetro do feixe de laser (D) sobre a chapa e a velocidade foi mantido constante, o tempo de

interação (t) também não foi variado. Ainda, houve pequena variação no aporte térmico (HI), de 13 J/mm a 20 J/mm.

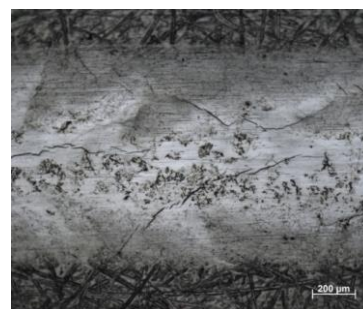
Tabela 2. Condições de soldagem da liga de alumínio AA2024-T3.

Condição	P (W)	V (mm/s)	D (mm)	I (W/mm ²)	HI (J/mm)	t (ms)
2024-A	1300	100	2,1	6,2 X 10 ²	13	16
2024-B	1800	100	2,1	8,5 X 10 ²	18	16
2024-C	2000	100	2,1	9,5 X 10 ²	20	16

A Figura 2 apresenta as macrografias da liga de alumínio AA2024-T3 soldadas nas condições da Tabela 2. Nas três imagens observa-se que há presença de trincas no centro do cordão e trincas que nucleiam na interface, entre o material de base e o zona de fusão, e se propagam para o centro do cordão.



(a) 1300 W e 100 mm/s



(b) 1800 W e 100 mm/s



(c) 2000 W e 100 mm/s

Figura 2. Macroestrutura das amostras da liga de alumínio AA2024-T3.

3.2 Experimentos realizados na liga de alumínio AA6063-T6

Na Tabela 3 são apresentadas as condições de soldagem utilizadas nas amostras de alumínio AA6063-T6. A velocidade de soldagem (V) foi variada entre 50 mm/s a 150 mm/s e foram usados dois valores de potência (P) 1300 W e 2000 W. O diâmetro do feixe de laser (D) foi mantido constante em 0,1 mm. Devido a variação da velocidade o tempo de residência variou entre 0,7 ms e 2 ms. Houve pouca variação no aporte térmico (HI), de 13 J/mm a 26 J/mm, valores próximos aos utilizados na liga de alumínio AA2024-T3.

Tabela 3. Condições de soldagem da liga de alumínio AA6063-T6.

Condição	P (W)	V (mm/s)	D (mm)	I (W/mm ²)	HI (J/mm)	t (ms)
6063-D	2000	150	0,1	2,6 X 10 ⁵	13	0,7
6063-E	2000	100	0,1	2,6 X 10 ⁵	20	1
6063-F	1300	50	0,1	2,6 X 10 ⁵	26	2

A Figura 3 apresenta as macrografias da liga de alumínio AA6063-T6 soldadas nas condições da Tabela 3. Novamente, observa-se que há presença de trincas no centro do cordão e trincas que nucleiam na interface, entre o material de base e o zona de fusão. No entanto, diferente das trincas observadas nas amostras da liga de alumínio AA2024-T3, as trincas são mais tortuosas.

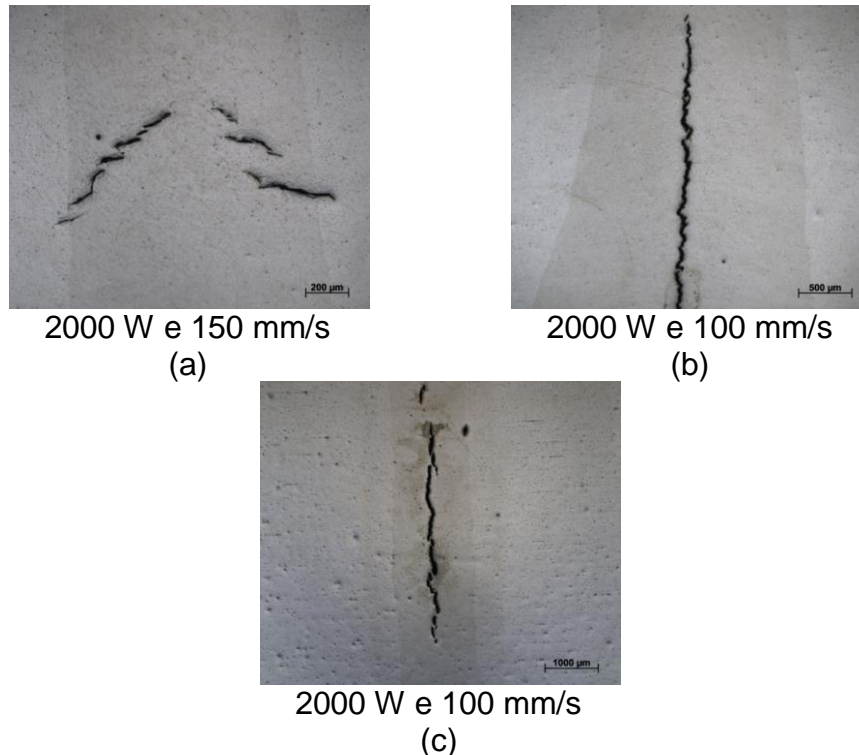


Figura 3. Macroestrutura das amostras da liga de alumínio AA6063-T6.

3.3 Experimentos realizados na liga de alumínio AA6013-T4

Na Tabela 4 são apresentadas as condições de soldagem utilizadas nas amostras de alumínio AA6013-T4. A velocidade de soldagem (V) foi variada entre 5 mm/s a 100 mm/s e foram usados dois valores de potência (P) 500 W e 1000 W. O diâmetro do feixe de laser (D) foi mantido constante em 0,1 mm. Devido a variação da velocidade o tempo de residência variou entre 1 ms e 20 ms. Houve grande variação no aporte térmico (HI), de 10 J/mm a 100 J/mm, intervalo maior ao utilizado nas ligas de alumínio AA2024-T3 e AA6063-T6.

Tabela 4. Condições de soldagem da liga de alumínio AA6013-T4

Condição	P (W)	V (mm/s)	D (mm)	I (W/mm^2)	HI (J/mm)	t (ms)
6013-G	1000	100	0,1	$1,3 \times 10^5$	10	1
6013-H	1000	50	0,1	$1,3 \times 10^5$	20	2
6013-I	500	5	0,1	$6,4 \times 10^4$	100	20

A Figura 4 apresenta as macrografias da liga de alumínio AA6013-T4 soldadas nas condições da Tabela 4. Nas imagens da Figura 4 não são observadas trincas, indicando que a liga de alumínio AA6013-T4 apresenta baixa sensibilidade a trincas, tanto no cordão de solda quanto na interface, entre o material de base e o zona de fusão.

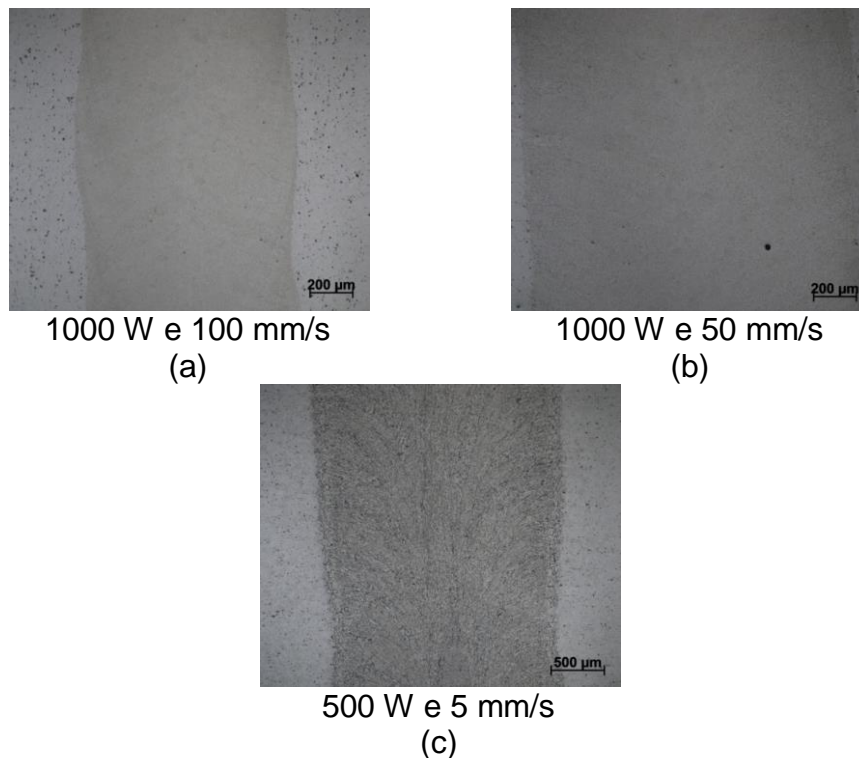


Figura 4. Macroestrutura das amostras da liga de alumínio AA6013-T4

4 DISCUSSÃO

As ligas de alumínio AA2024-T3 e AA6063-T6 apresentaram trincas no centro do cordão e trincas que nuclearam na linha de fusão, ou seja, na interface entre o material de base e a zona de fusão. Já na liga de alumínio AA6013-T4, não foram observadas trincas na zona de fusão.

A morfologia da solidificação é definida pelo gradiente térmico e pela velocidade de crescimento microestrutural que, por sua vez, definirá as propriedades mecânicas do cordão de solda [15]. O ataque químico por Keller não possibilitou visualizar a morfologia dos grãos da microestrutura bruta de solidificação, no entanto, conseguiu revelar a formação de trincas na microestrutura.

A Figura 5 apresenta uma trinca de solidificação na zona de fusão da amostra AA6063-T6, soldada com potência de 2000 W e 100 mm/s. Pode-se determinar que esta trinca é devido à microsegregação e não devido à queda de ductilidade, pois ela é intergranular. Por ser uma trinca que se propaga pelo contorno de grão, ela é sinuosa, como a morfologia observada na trinca da Figura 5. A trinca de solidificação devido à microsegregação é geralmente intergranular, com a separação do material ocorrendo na região interdendrítica, a qual está preenchida com líquido de baixo ponto de fusão e com a ação de tensões geradas durante o resfriamento pode causar a separação das duas superfícies [15].

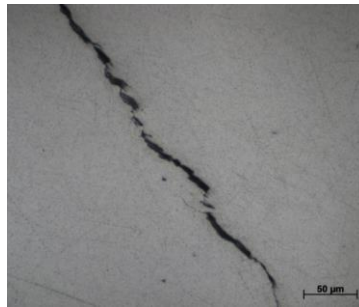


Figura 5. Trinca observada na zona de fusão da amostra AA6063-T6, soldada com potência de 2000 W e 100 mm/s.

Nas amostras da liga de alumínio AA2024, foram observadas trincas a quente e a frio, indicando um processo de trincamento heterogêneo. Na imagem (a) da Figura 6 observa-se uma trinca sinuosa, a mesma morfologia de trinca observada na imagem da Figura 5, indicando um trincamento a quente.

Já na imagem (b) da Figura 6 observa-se uma trinca linear, indicando uma trinca transgranular, portanto uma trinca a frio. As trincas a frio ocorrem a temperaturas bem abaixo da temperatura de fusão e são devidas à presença de tensões residuais trativas que promovem a propagação das trincas a quente.



(a)



(b)

Figura 6. Trincas observadas na zona de fusão da amostra AA2024-T3, soldada com potência de 1300 W e 100 mm/s.

Trabalhos realizados com a soldagem a laser de ligas de alumínio da serie 6000 (Al-Mg-Si), que utilizaram Keller para revelar a microestrutura do cordão de solda, quando a zona de fusão apresentou trincas a quente, mostraram morfologia igual às trincas da liga de alumínio AA6063, Figura 3 e Figura 5 [16]. Sheikhi et al. [17] e Ghaini et al. [18] soldaram a laser a liga de alumínio AA2024 e realizaram análise microestrutural atacando as amostras com Keller, relataram a formação de trincas a quente com a mesma morfologia observada na Figura 2. A partir destes trabalhos é possível concluir que independente da composição da liga, quando há a formação de trincas a quente elas são sinuosas, pois as trincas são intergranular.

Duas técnicas, baseadas na alteração do intervalo de solidificação, podem ser usadas para controlar a formação de trincas a quente na zona de fusão e na zona termicamente afetada. Uma técnica consiste na utilização de metal de adição e a outra em alterar o gradiente térmico do cordão de solda e das regiões próximas a ele, a partir da alteração do diâmetro do feixe de laser ou da variação da energia de soldagem.

Autores que trabalharam com a soldagem a laser de diferentes ligas de alumínio relatam a suscetibilidade ao trincamento a quente. Alguns estudos mostram que a utilização de metal de adição rico em silício diminui a suscetibilidade ao trincamento

a quente [19, 20] e para ligas de alumínio da série 6000 (Al-Mg-Si), alterando o aporte térmico e a intensidade é possível controlar a formação de trincas a quente [21, 22].

Cada classe de liga de alumínio tem um metal de adição mais apropriado, no caso das ligas da série 6000, por exemplo, são usados metais de adição ricos em silício, com a liga 4047 (Al-12Si %) [23].

Batahgy e Kutsuma [24] soldaram a laser a liga de alumínio AA6061-T6 com a utilização do metal de adição AA4043 (Al-5Si%) e eles concluíram que o silício é responsável por diminuição à sensibilidade ao trincamento a quente. O silício quando adicionado à poça de fusão aumenta a fluidez da poça de fusão.

A partir dos parâmetros de soldagem utilizados neste estudo pode-se observar que diminuir o gradiente térmico, aumentando o diâmetro do feixe (D) ou o tempo de residência (t), não diminuiu a sensibilidade ao trincamento a quente.

Para os parâmetros de processo utilizados e para as ligas estudadas, observa-se que quando a liga possui entre 0,6% e 1% de silício, liga de alumínio AA6013-T4, a sensibilidade ao trincamento a quente diminui, independentemente do diâmetro do feixe de laser (D) e do tempo de residência (t).

5 CONCLUSÃO

A partir deste estudo pode-se concluir que juntas de alumínio de alta resistência, soldadas a laser, apresentam grande sensibilidade ao trincamento a quente e a frio.

A análise da microestrutura e a partir da composição química das ligas de alumínio utilizadas neste estudo pode-se concluir que o silício é um elemento de liga importante na sensibilidade ao trincamento. Para os parâmetros de processo utilizados e para as ligas estudadas, observa-se que quando a liga possui entre 0,6% e 1% de silício a sensibilidade ao trincamento diminui.

Estes resultados indicam que a formação de trincas no cordão de solda pode ser controlada com os parâmetros de processo e com a composição química da poça de fusão.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio do CNPq, CAPES, FAPESP e FINEP no desenvolvimento da soldagem a laser.

REFERÊNCIAS

- 1 Pfeiffer, NJ. Future airframe technologies. In: AIAA/ICAS international air and space symposium and exposition, the next 100 y, 2003, Ohio. Proceedings..., p. 14-17, 2003.
- 2 Mendez, PF. New trends in welding in the aeronautic industry. In: Conference new trends for the manufacturing in the aeronautic industry, 2000, San Sebastián. Proceedings..., p. 21-38, 2000.
- 3 He D, Yang K, Li M, Guo H, Li N, Lai R, Ye S. Comparison of single and double pass friction stir welding of skinstringer aviation aluminium alloy. Science and Technology of Welding and Joining. 2013; 18: 610-615.
- 4 Riva R, Lima MSF, Oliveira AC. Soldagem a laser de estruturas aeronáuticas. Metalurgia & Materiais. 2009; 65: 48-50.
- 5 Rötzer I. Laser beam welding makes aircraft lighter. Fraunhofer Magazine. 2005; 1(1), 36.

- 6 Siqueira GR. Soldagem a laser autógena da liga de alumínio aeronáutico AA6013: otimização de parâmetros e análise microestrutural. 2007. [Dissertação de Mestrado Profissionalizante]. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica; 2007.
- 7 Higashi ALC, Lima MSF. Occurrence of defects in laser beam welded Al-Cu-Li sheets with T-joint configuration. *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2012; 4(4): 421-429.
- 8 Pastras G, Fysikopoulos A, Giannoulis C, Chryssolouris G. A numerical approach to modeling keyhole laser welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015; 78(5): 723-736.
- 9 Garcia A. Solidificação: fundamentos e aplicações. Campinas: UNICAMP; 2007.
- 10 Allen CM. Laser welding of aluminium alloys – principles and applications. London: The Welding Institute; 2004.
- 11 Siqueira RHM, Oliveira AC, Abdalla AJ, Baptista CARP, Lima MSF. Mechanical and microstructural characterization of laser-welded joints of 6013-T4 aluminum alloy. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2015; 37: 133-140.
- 12 Hu B, Richardson, IM. Mechanism and possible solution for transverse solidification cracking in laser welding of high strength aluminium alloys. *Materials Science and Engineering A*. 2006; 429: 287-294.
- 13 Abbaschian L, Lima MSF. Cracking Susceptibility of Aluminum Alloys During Laser Welding. *Material Research*. 2003; 6(2): 273-278.
- 14 The Aluminum Association. International alloy designations and chemical composition limits for wrought aluminum and wrought aluminum alloys. Arlington; 2009.
- 15 Wainer E, Brandi SD, Mello FDH. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Blucher; 1992.
- 16 Cicala E, Duffet G, Andrzejewski H, Grevey D, Ignat S. Hot cracking in Al-Mg-Si alloy laser welding – operating parameters and their effects. *Materials Science and Engineering A*. 2005; 1-9.
- 17 Sheikhi M, Ghaini FM, Assadi H. Prediction of solidification cracking in pulsed laser welding of 2024 aluminum alloy. *Acta Materialia*. 2015; 82: 491-502.
- 18 Ghaini FM, Sheikhi M, Torkamany MJ, Sabbaghzadeh J. The relation between liquation and solidification cracks in pulsed laser welding of 2024 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering A*. 2006; 519: 167-171.
- 19 Braun R. Laser beam welding of Al-Mg-Si-Cu alloy 6013 sheet using silicon rich aluminium filler powders. *Materials Science and Technology*. 2005; 21: 133-140.
- 20 Braun R. Nd: YAG laser butt welding of AA6013 using silicon and magnesium containing filler powders. *Materials Science and Engineering A*. 2006; 426: 250-262. 2006.
- 21 Siqueira RHM, Riva R, Costa DHS, Gonçalves VO, Lima MSF. A crack propagation study on T-joints of AA6013-T4 aluminum alloy welded by na Yb: fiber laser. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017; 2017:1-11.
- 22 Siqueira RHM. Caracterização mecânica e microestrutural de juntas de alumínio 6013 T4 soldados a laser. 2012. [Dissertação de Mestrado]. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá; 2012.
- 23 Alcan. Manual de soldagem. Alcan Alumínio do Brasil S/A; 1993.
- 24 El-Batahgy A, Kutsuna M. Laser beam welding of AA5052, AA5083, and AA6061 aluminum alloys. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2009; 2009: 1-9.