

APLICAÇÃO DA SOLDAGEM POR DIFUSÃO NO ESTADO SÓLIDO PARA FABRICAÇÃO DE MICRO TUBOS DE CALOR

R.M.Nascimento⁽¹⁾, A. J. A. Buschinell⁽²⁾, K.V. Paiva⁽³⁾, M. B. H. Mantelli⁽³⁾

(1)Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN

Departamento de Engenharia Mecânica –DEM

CP. 1524 Campus Lagoa Nova Natal – RN

59072-970 rubens@dem.ufrn.br

2 - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Departamento de Engenharia Mecânica- Laboratório de Soldagem

(3) Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Departamento de Matemática - Núcleo de Controle Térmico de Satélites

RESUMO

Micro tubo de calor (MTC) é um dispositivo para troca de calor formado por um pequeno canal que utiliza o ângulo agudo formado nos cantos dos canais como capilares. Quando o calor é fornecido em uma das extremidades do tubo, o líquido dessa região é vaporizado movimentando-se em direção a extremidade fria para ser condensado e liberar o calor latente de vaporização. Neste trabalho aplicou-se a técnica da soldagem por difusão no estado sólido para a produção de micro tubos de calor de Cu. Estudou-se a influência do ciclo térmico na microestrutura e estanqueidade de dois diferentes tipos dos micro tubos. Uma prensa de aço inoxidável foi projetada para aplicar uma pressão em torno de 20 MPa durante a soldagem. A microestrutura das juntas foi avaliada através de microscopia ótica e eletrônica de varredura e a estanqueidade foi medida com He como gás rastreador. O emprego dos fios para a formação dos capilares reduziu o custo do processo tornando-o também mais rápido. A prensa desenvolvida para aplicação da pressão de soldagem, mostrou-se adequada aos requisitos do processo.

Palavras-Chaves: Micro tubos de calor, Soldagem por difusão no estado sólido, uniões.

INTRODUÇÃO

O crescimento da quantidade e da potência dos circuitos e sistemas que dissipam calor exige o desenvolvimento de novos métodos e dispositivos capazes de remover grande fluxo de calor dos circuitos de forma localizada e dissipá-lo para o meio de modo uniforme. O micro tubo de calor (Heat Pipe) é uma tecnologia promissora para a remoção localizada de calor em altas taxas, apresentando como vantagens além de sua elevada eficiência, o fato de ser possível o transporte de grandes quantidades de calor através de uma pequena seção transversal e ao longo de uma razoável distância sem a necessidade de se introduzir um sistema adicional de bombeamento. A utilização dos micro tubos de calor tem sido investigada em dispositivos semi-condutores, laser diodo, células fotovoltaicas e na indústria aero-espacial, entre outras aplicações ^[1,2].

Micro tubos de calor são simplesmente miniaturas dos tubos de calor convencionais. Quando o calor é fornecido em uma das extremidades do tubo de calor, o líquido presente nessa região é vaporizado movimentando-se em direção a extremidade fria para ser condensado e liberar o calor latente de vaporização. O processo de vaporização e de condensação do líquido no tubo de calor faz com que a interface líquido/vapor na artéria líquida mude continuamente ao longo do tubo, o que resulta em uma diferença na pressão capilar entre a região do evaporador e do condensador, promovendo o retorno do fluido de trabalho do condensador para o evaporador, através de regiões triangulares formadas nos cantos do tubo e denominadas de artérias de líquidos ^[1,2,3].

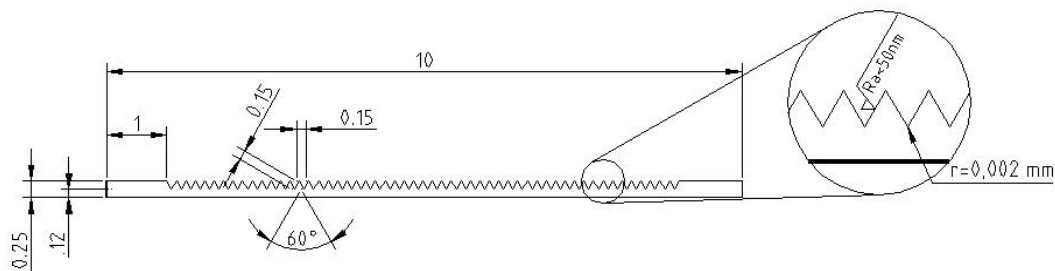
A reduzida seção transversal do micro tubo de calor aliada aos capilares torna o seu processo de fabricação complexo, uma vez que além dos requisitos geométricos e de resistência mecânica, necessita-se estanqueidade e que o processo de fabricação não altere os requisitos de projeto, como por exemplo, o fechamento parcial dos micro canais durante a união. A soldagem por difusão no estado sólido, em função de suas características intrínsecas, é uma técnica que pode ser utilizada com sucesso para a fabricação de micro tubos de calor de cobre ^[3,4]. Neste trabalho desenvolveu-se

o processo de soldagem por difusão para a fabricação de micro tubos de calor de cobre. Dois tipos de micro tubos de calor foram estudados e avaliados quanto a sua evolução microestrutural e estanqueidade. Os parâmetros do processo de soldagem foram determinados. Para permitir a soldagem uma prensa foi projetada e construída com base na diferença de expansão térmica entre o Cu e o aço inoxidável, possibilitando a aplicação da pressão de soldagem sem a necessidade de um forno especial com um sistema hidráulico para aplicação de pressão em temperatura elevada.

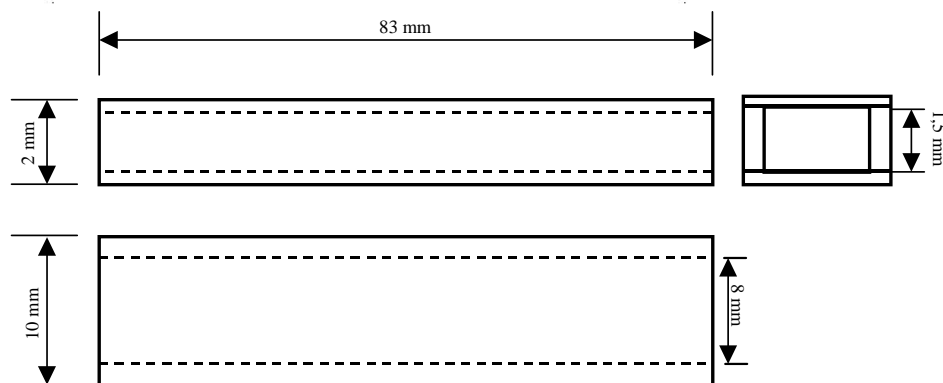
PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Dois projetos distintos de micro tubos de calor de Cu (OFHC) foram estudados. O primeiro tipo de micro tubo de calor consiste de uma chapa superior e uma chapa inferior com espessura de 0,25 mm. As paredes laterais tem uma espessura de 1 mm e altura de 1,5 mm. As chapas (superior e inferior) são ranhuradas com o intuito de aumentar a sua capacidade de troca de calor através da formação das artérias de líquidos. A missão da soldagem por difusão no estado sólido é unir as chapas superior e inferior com as paredes laterais, de forma a se obter uma união tecnicamente estanque. Na Figura 1 é apresentado um desenho esquemático do microtubo de calor e das ranhuras, assim como uma foto das chapas após a usinagem. As ranhuras foram usinadas pelo Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) da Universidade Federal de Santa Catarina (EMC-UFSC). No segundo tipo de micro tubo de calor, as chapas (superior e inferior) deixaram de ser ranhuradas e introduziu-se fios no interior do micro tubo de calor, de forma que os cantos gerados entre o fio cilíndrico e as chapas (4 cantos para cada fio) desempenham o papel da artéria de líquido em substituição as ranhuras usinadas. Estes micro tubos de calor foram produzidos com 4 fios (12 ranhuras) com diâmetro de 1,5 mm e chapas com 0,3 mm de espessura.

a)



b)



c)



Figura 1: a) desenho das ranhuras;b) desenho do micro tubo de calor; c) chapas e ranhuras.

As soldagens foram realizadas em forno resistivo de alto-vácuo ($<3,0 \times 10^{-5}$ mbar). O ciclo térmico de soldagem foi otimizado para permitir a produção de um micro tubo de calor estanque, sendo utilizada uma temperatura de 850 °C por um tempo de 2 horas. No ciclo térmico de soldagem foi realizado um patamar a 500 °C (30min) visando a homogeneização da temperatura entre a matriz e os micro tubo de calor. As taxas de aquecimento e resfriamento foram de 10 °C/min. Para permitir a aplicação da pressão durante a soldagem foi desenvolvido um dispositivo baseado no princípio da diferença de expansão térmica dos materiais envolvidos. Utilizou-se na soldagem do cobre uma prensa de aço inoxidável, na qual a peça de cobre é fixa na mesma e depois o sistema completo é colocado dentro do forno. O aquecimento provoca a dilatação da prensa e do cobre, mas como estes materiais têm coeficientes de expansão térmica distintos isto resulta na aplicação de uma pressão na peça de cobre ^[4.]. Com este dispositivo e controlando o torque aplicado nos parafusos, aplicou-se uma pressão em torno de 20 MPa durante o processo de soldagem. A estanqueidade dos micro tubos de calor foi avaliada utilizando He como gás rastreador. As interfaces foram caracterizadas através de microscopia ótica e eletrônica de varredura.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

No processo de soldagem por difusão dos micro tubos de calor ranhurados, procurou-se minimizar a temperatura e a pressão de soldagem de forma a produzir uniões estanques e com a menor distorção possível do componente. Antes da realização da soldagem, as chapas ranhuradas foram recozidas visando o alívio das tensões residuais oriundas do processo de usinagem das ranhuras, reduzindo-se assim a possibilidade de distorção durante a soldagem. A questão da distorção durante a soldagem é crítica nestes micro tubos em função da reduzida espessura das chapas de Cu, que com a presença das ranhuras ficam muito susceptíveis a deformação, reduzindo o volume útil do componente, aumentando a probabilidade de corte (ruptura) das chapas nas extremidades do micro tubo e principalmente a eliminação de algumas ranhuras em função do contato entre os picos das mesmas durante a soldagem. A eliminação de ranhuras reduz consideravelmente a capacidade de troca térmica do componente, podendo inviabilizar a sua utilização. Na Figura 2 é apresentada uma fotografia de um micro tubo de calor ranhurado ressaltando-se a presença da deformação do componente (abaulamento) em virtude da reduzida rigidez das chapas de Cu em temperatura elevada e um corte (ruptura) localizado da chapa superior, também provocada pela deformação das chapas.

Na Figura 3(a) é apresentada uma micrografia (MEV) da interface soldada por difusão do micro tubo ranhurado, evidenciando a presença de pequena porosidade, resultado do processo de difusão. É importante salientar que a presença de porosidade residual na interface pode ocorrer no processo de soldagem por difusão sem comprometer a estanqueidade do componente. O aumento do tempo e da temperatura de soldagem, provavelmente reduzirá a porosidade interfacial, entretanto aumentará a probabilidade de deformação e de ruptura na extremidade das chapas, em função da restrição de movimento imposta pela prensa de aço inoxidável e pela reduzida rigidez da chapa ranhurada em elevada temperatura. Observa-se que nas amostras que não apresentaram ruptura na chapa ranhurada, apesar da deformação (abaulamento) do componente, a porosidade interfacial é fechada, não comprometendo a estanqueidade do componente.

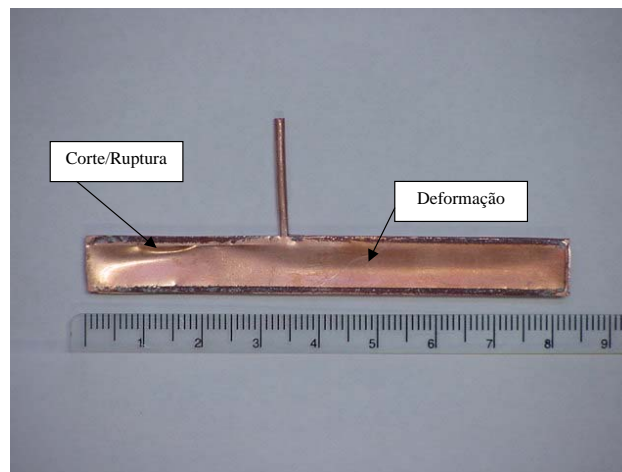


Figura 2: Fotografia de micro tubo ranhurado após soldagem por difusão.

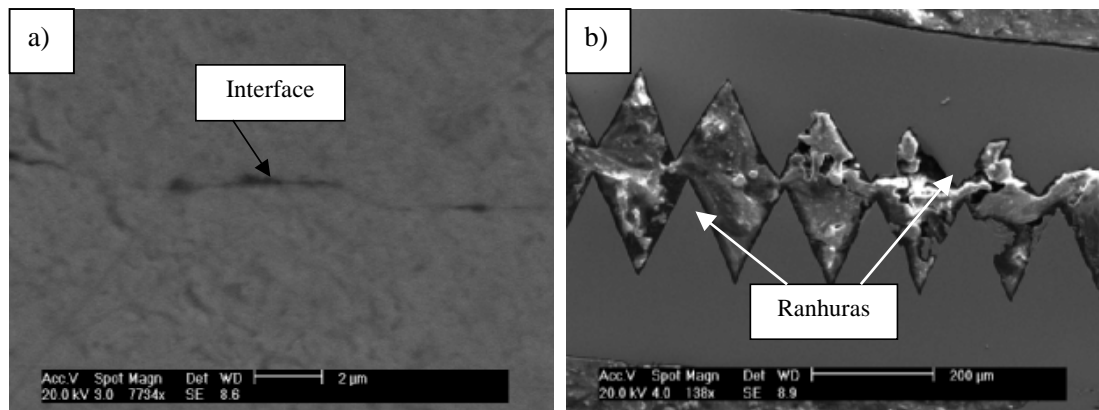


Figura 3: a) Detalhe da Interface; b) Ranhuras.

Na Figura 3(b) tem-se uma micrografia (MEV) de um corte transversal do micro tubo de calor, ressaltando a presença das ranhuras usinadas nas duas chapas (superior e inferior). Percebe-se que em função da deformação das chapas durante o processo de soldagem por difusão, ocorreu na região central do micro tubo o contato de picos das ranhuras da chapa superior com picos das ranhuras da chapa inferior. Este contato provocou a deformação das ranhuras, em função da elevada temperatura e alta pressão localizada de contato. Como conseqüência na região central dos micro tubos os caminhos para retorno do fluido condensado por capilaridade foram eliminados durante a soldagem, reduzindo a eficiência termodinâmica do trocador de calor. O contato dos picos das ranhuras na região central é função da grande deformação (flexão) que a chapa é submetida pela restrição de movimento nas bordas imposta pela prensa. Desta forma, como a rigidez da chapa fica comprometida ela apresenta uma elevada deformação (flecha) que compromete a funcionalidade do componente.

O micro tubo de calor com fios foi idealizado com o intuito de reduzir os problemas relativos a fabricação dos micro tubos ranhurados, reduzindo o seu custo (eliminação da usinagem das ranhuras) e procurando manter a capacidade de dissipação de calor. Neste projeto as chapas não são ranhuradas e são apoiadas pelos fios de cobre ao longo de todo o seu comprimento, reduzindo consideravelmente a possibilidade de flexão das mesmas. A maior área de soldagem exigiu que a prensa de aço inoxidável fosse aperfeiçoada, aumentando-se a quantidade de parafusos e o torque aplicado.

Na produção dos micro tubos de calor com fios o processo de soldagem foi realizado em duas etapas, em virtude da necessidade de montagem e alinhamento dos fios entre as chapas de cobre. Na etapa inicial, com auxílio de um dispositivo especialmente desenvolvido, os fios internos foram tensionados e alinhados de forma a garantir o alinhamento e a distância entre eles. Nesta condição as chapas de Cu foram montadas na prensa de aço inox e após o fechamento da mesma (aperto dos parafusos) os fios foram liberados, ficando fixos entre as chapas de Cu. Com esta configuração é realizada a primeira etapa da soldagem por difusão, seguindo o mesmo ciclo térmico da soldagem dos tubos ranhurados. Na etapa seguinte o capilar e os fios externos, responsáveis pela estanqueidade dos componentes, são montados no tubo com as chapas e os fios internos e colocados na prensa de aço inoxidável para a segunda etapa de soldagem por difusão. Nas duas etapas de soldagem os parâmetros do processo (ciclo térmico e pressão) são idênticos. Com este procedimento conseguiu-se produzir micro tubos de calor tecnicamente estanques ($< 3,0 \times 10^{-9}$ mbar/l.s). Nestes micro tubos de calor não foi detectado nenhuma distorção, deformação ou ruptura (corte) das chapas de cobre após o processo de soldagem. Na Figura 4 (a) é apresentado um micro tubo de calor de fios após as duas etapas de soldagem e teste de estanqueidade, estando pronto para os ensaios térmicos ou para utilização como trocador de calor. Na Figura 4 (b) tem-se o detalhe interno do micro tubo, que após teve uma das superfícies de união rompida para permitir a avaliação interna do componente.

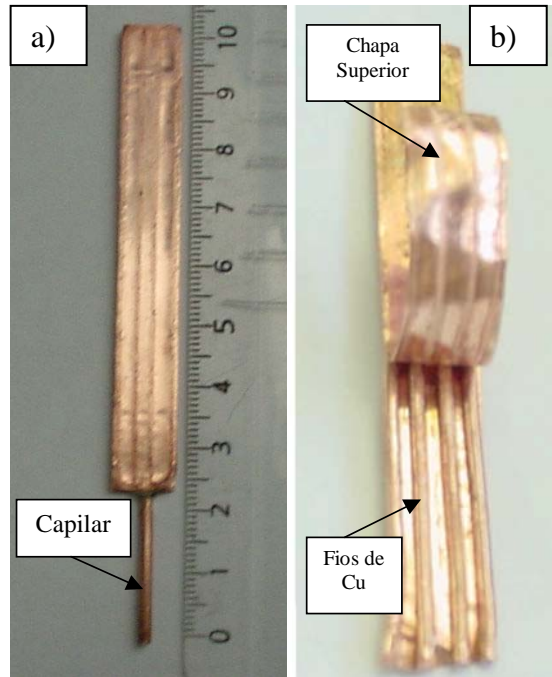


Figura 4: Micro tubo de calor de fios. a) Micro tubo após soldagem. b) Detalhe interno do micro tubo.

Na micrografia (MEV) apresentada na Figura 5 observa-se a interface formada entre um fio e as chapas de Cu. Percebe-se que o fio após a soldagem passou a ter uma seção transversal elíptica e que um houve a formação clara de um canal próximo da interface chapa/fio. Para cada fio, tem-se portanto a formação de quatro canais, que deverão funcionar como artéria de líquido, em substituição as ranhuras dos micro tubos de calor ranhurados. Os ensaios térmicos mostraram que apesar dos micro tubos ranhurados apresentarem uma maior capacidade de troca (53 ranhuras) absoluta em relação aos micro tubos de fios (12 ranhuras), em termos relativos os tubos com fios tem um melhor desempenho, consistindo em uma tecnologia promissora para fabricação destes componentes ^[5].

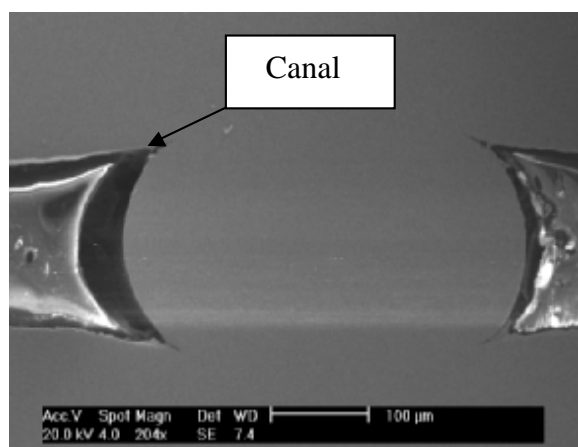


Figura 5: Micrografia (MEV) de micro tubo da calor com fios.

CONCLUSÕES

- 1-) Os micro tubos de calor ranhurados produzidos através da soldagem por difusão apresentam uma grande tendência a deformação e a ruptura nas chapas.
- 2-) O processo de soldagem em duas etapas dos micro tubos com fios possibilitou a produção de componentes estanques e sem deformação.
- 3-) Os parâmetros do processo de soldagem por difusão foi otimizado permitindo a produção de micro tubos de calor estanques.
- 4-) Os micro tubos de calor ranhurados apresentaram em termos absolutos um maior eficiência na transferência de calor que os micro tubos com fios, entretanto em termos relativos o desempenho dos micro tubos com fios foi superior, sendo um forte indicativo para o aperfeiçoamento desta tecnologia.

AGRADECIMENTOS

K. V. Paiva agradece ao CNPq pelo apoio financeiro para realização do trabalho. Os autores agradecem a FAPESP pelo apoio e ao Laboratório de Mecânica de Precisão/UFSC pela usinagem das ranhuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) MÜLLER, J. R. Study of micro heat pipe technology. Relatório de estágio na 'two-Phase Heat Transfer Lab – Texas A&M University, College Station TX/USA. Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, Vol. 1 e 2, 2000.
- 2) FAGHRI, A. *Heat pipe Science and technology*. Taylor & Francis , 1995.
- 3) Mantelli, M. B. H, Nascimento, R.M., Stoeterau, R. L., Galioto, ^a, Pierini, H. M., Paiva, K. V., Relatório sobre o desenvolvimento de micro tubos de calor, UFSC, 2001.
- 4) Lison, R., "*Diffusionsschweissen und seine Anwkdung Beispiele aus der kerntechnik*", Schweisse und Scheiden, Nº.8,18 304-308, 1971.
- 5) Mantelli, M. B. H, Buschinelli, A. J. A. Nascimento, R. M., Paiva, K. V. Diffusion Welding of Wire Micro Heat Pipe Arrays. 12th International Heat Pipe Conference, Vol. 2-E, Russia, 2002

APPLICATION OF DIFFUSION WELDING FOR FABRICATION OF MICRO HEAT PIPE

Micro Heat Pipe is a device for change of heat. The heat applied to the evaporator region vaporizes the working fluid and the resulting vapor flows to the condenser through the central region of the heat pipe. The vapor then condenses, releasing the latent heat of condensation. In this work the diffusion welding process was applied for the production of micro heat pipe. It was studied the influence of the thermal cycle in the microstructure and leaking of the two different heat pipes. A press of stainless steel was projected to apply a pressure around 20 MPa during the welding. The microstructure of the joints was evaluated through optic and scanning electron microscope and the leak it was measured with He. The employment of the wire for the formation of the capillary reduced the cost of the process also turning it faster. The press developed for application of the pressure-welding was appropriate to the requirements of the process.

Key-words: Micro heat pipe, Diffusion welding, Joints