SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO EFEITO MARANGONI DURANTE O TRATAMENTO SUPERFICIAL DE REFUSÃO SUPERFICIAL A LASER NA LIGA AL-FE

André Felipe Taques (PIBIC/Fundação Araucária/UEPG), Moisés Meza Pariona (Orientador), e-mail: mmpariona@gmail.com.

Universidade Estadual de Ponta Grossa/Departamento de Engenharia de Materiais.

3.03.00.00-2 - Engenharia de Materiais e Metalúrgica
3.03.03.00-1 - Metalurgia de Transformação
3.03.03.06-0 - Tratamentos Térmicos, Mecânicos e Químicos
Palavras-chave: Efeito Marangoni, Laser, Refusão superficial.

Resumo

Utilizou-se a simulação numérica baseada no método dos elementos finitos para resolver a equação de Navier-Stokes bidimensional, assumindo fluido incompressível, com fluxo laminar envolvendo o efeito Marangoni. Este efeito é devido à ação de um feixe de laser que incide sob a superfície da amostra da liga Al-1,5% Fe, ocasionando a refusão superficial ou micro-fusão. Um modelo 3D foi construído a fim de calcular o campo de temperatura e o campo de fluxo do fluido na seção transversal da poça de fusão, estabelecendo-se diferentes velocidades de feixes de laser. O efeito Marangoni é um fenômeno complexo provocado pelo gradiente térmico que causa transferência de massa e certa turbulência interfacial. Por meio da simulação numérica, nota-se que o efeito Marangoni é mais destacado em baixas velocidades do feixe de laser, o que influencia a qualidade, propriedades, microestrutura e morfologia da região tratada a laser.

Introdução

Historicamente, diversos autores discutiram o efeito Marangoni. De acordo com Siwek (1), um modelo válido para estudar este efeito deve levar em consideração as propriedades termofísicas do metal, parâmetros do feixe de laser e condições de contorno do processo. O aquecimento do material por meio de um laser, causa a fusão localizada do metal, originando uma poça de fusão, cujo tamanho e formato depende da convecção causada pelo efeito Marangoni. A direção em que ocorre esse fluxo também depende do gradiente térmico e da composição química do material (1). Nota-se que este efeito induz a transferência de massa na zona fundida, fazendo com que a convecção causada pelo efeito Marangoni seja considerada importante nos processos que envolvem transferência de calor e massa (2). Para tanto, verifica-se que a simulação numérica pelo método dos elementos finitos é uma ferramenta importante no estudo deste fenômeno, pois por meio desta técnica é possível prever o comportamento térmico e transporte de massa na região de incidência do laser, permitindo a compreensão do fenômeno físico (3,4).

Materiais e Métodos

A simulação numérica foi executada com o software COMSOL multiphysics, versão 5.2 em um microcomputador com processador Intel ® i7, CPU com 3.1 GHz e 34 GB RAM em sistema operacional Linux – UBUNTU. Neste trabalho, a simulação numérica foi feita com intuito de análise dos campos de fluxo de fluido e

dos gradientes térmicos existentes em regime transiente. Efetuaram-se três simulações numéricas com modelos similares, onde a única diferença era variar a velocidade do feixe de laser, com 20, 40 e 60 mm/s, respectivamente. Para a velocidade de 40 mm/s, criou-se a geometria da peça sendo um paralelepípedo de dimensões 4x0,7x0,3 mm. Para a velocidade de 20 mm/s, fez-se uma geometria similar, com dimensões de 2x0,7x0,3 mm. Enquanto que para a velocidade de 60 mm/s, as dimensões do paralelepípedo foram de 3x0,7x0,3 mm. Nas condições de contorno, definiu-se a incidência do feixe de laser na parte superior do modelo, bem como o efeito Marangoni nesta superfície. O domínio do tempo estudado foi de 0,1 segundos com intervalos de 0,01 segundos.

Resultados e Discussão

Nas três simulações numéricas, o feixe de laser se movimentou com certa velocidade, consequentemente houve o aquecimento e fusão do material localmente. Essa fusão ocorre de maneira rápida, de modo que o resfriamento também ocorre de mesmo modo. Como resultado do aquecimento do material, forma-se o que é chamada de poça de fusão na região em que o laser está operando. Este aquecimento pode ser visualizado por meio de imagens das isotermas obtidas através dos resultados da simulação numérica. A Figura 1a ilustra as isotermas de temperatura em 3D na superfície do material, cuja velocidade do laser foi de 20 mm/s no instante 0,05 segundos da passagem do feixe de laser:

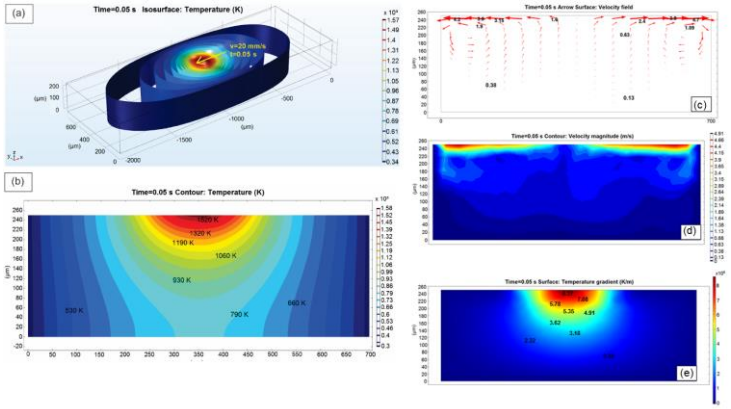


Figura 1 – Isotermas geradas na passagem do laser com velocidade de 20 mm/s no instante 0,5 s. (a) Vista 3D, (b) Vista 2D, (c) fluxo do fluido, (d) módulo do vetor velocidade do fluido e (e) gradiente térmico.

Observa-se que a geometria da poça de fusão tem o formato de uma elipse, além disto, pode ser visualizado que a temperatura está focada em uma região, correspondente ao ponto de aplicação do laser. Este fato é confirmado pelos autores Liu et al. e Hong-yun Z. et al. (5,6). Ainda, verifica-se que a poça de fusão e o campo de temperatura são aproximadamente simétricos bilateralmente relativos à linha do feixe de laser. A Figura 1b ilustra este fato, mostrando a seção transversal da peça simulada, onde é possível notar as isotermas e a faixa de atuação da temperatura em relação à geometria da peça. O resultado para a velocidade do feixe de laser de 20 mm/s pode ser observado na Figura 1c, onde o campo de velocidade é ilustrado com auxílio de setas, enquanto que a Figura 1d ilustra o módulo da velocidade na seção transversal do material, ambas no instante 0,05 s. Ainda, nota-se que o fluxo do fluido apresenta vórtices com movimento anti-horário (esquerda) e horário (direita) na poça de fusão, de modo que é possível ver dois vórtices simétricos

partindo da linha central da poça de fusão. Esta simetria é atribuída ao fato do laser possuir um comportamento gaussiano e a linha central da poça de fusão ser exatamente na origem da geometria Gaussiana. De qualquer forma, observa-se que as velocidades máximas do fluxo do fluido ocorrem na superfície da peça, de modo que a medida que se afasta da superfície, a velocidade do fluido decresce. Este resultado é corroborado pelo estudo feito por Yang et al. (8), onde citam que a velocidades maiores, há maior transferência de calor e convecção na poça de fusão, cuja força motriz do fluxo do fluido é principalmente o gradiente da tensão superficial. O efeito Marangoni, portanto, causa uma convecção, que faz com que o metal líquido flua de uma região de maior temperatura para uma região de menor temperatura. A Figura 1e ilustra o gradiente térmico, onde os valores mais proeminentes estão nas vizinhanças da superfície da peça. Para a velocidade do feixe de laser de 40 mm/s, são ilustrados na Figura 2 as isotermas de temperatura (a) em 3D e na seção transversal (b), ambas no instante 0,05 s:

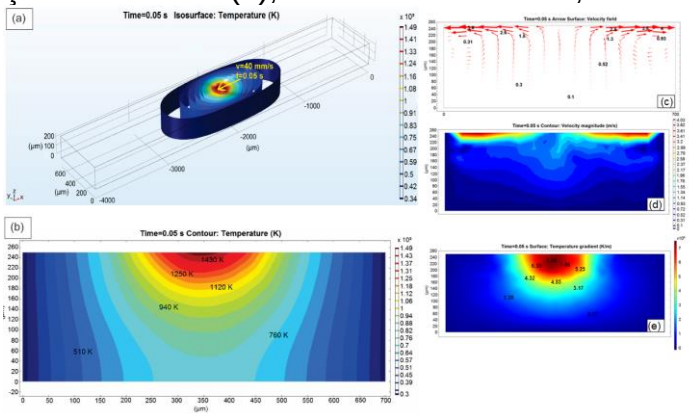


Figura 2 – Isotermas geradas na passagem do laser com velocidade de 40 mm/s no instante 0,5 s. (a) Vista 3D, (b) Vista 2D, (c) fluxo do fluido, (d) módulo do vetor velocidade do fluido e (e) gradiente térmico.

Em relação às imagens da simulação numérica, percebe-se na Figura 2c e 2d que o fluxo de velocidade é similar ao caso anterior, com o sentido do fluxo idêntico. Porém, nota-se que a velocidade máxima atingida neste caso foi menor. Este fato é explicado pelo tempo que o feixe de laser permanece na superfície da peça, de tal modo que maiores velocidades concedem menos energia a um ponto específico na passagem do laser. Para a velocidade do feixe de laser de 60 mm/s, o padrão observado anteriormente nas velocidades menores também é visualizado, visto na Figura 3:

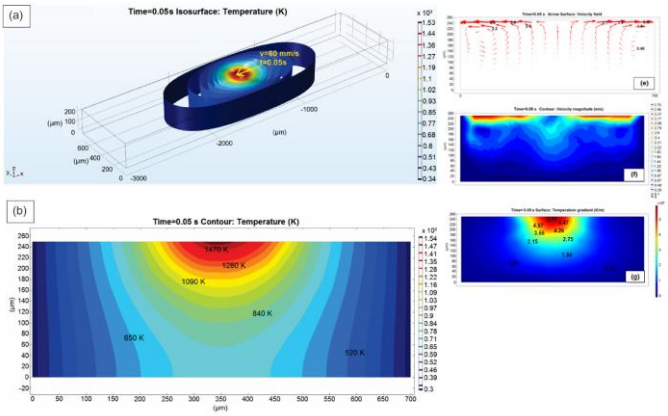


Figura 3 – Isotermas geradas na passagem do laser com velocidade de 60 mm/s no instante 0,5 s. (a) Vista 3D, (b) Vista 2D, (c) fluxo do fluido, (d) módulo do vetor velocidade do fluido e (e) gradiente térmico.

Como descrito por Siwek (1), o tamanho e formato da poça de fusão é dependente da convecção causada pela força de Marangoni. A direção do fluxo de fluido depende do gradiente de temperatura na superfície, bem como da composição química.

Conclusões

Verifica-se que na poça de fusão gerada pela incidência do feixe de laser há uma temperatura elevada, especialmente na superfície da peça, consequentemente gerando uma alta taxa de resfriamento, além de um gradiente térmico elevado. O fluxo de fluido devido ao efeito Marangoni apresenta vórtices anti-horário à esquerda e horário à direita na poça de fusão, simétricas em relação à linha central na própria poça de fusão. O efeito Marangoni em si é provocado pelo gradiente térmico, o que leva a convecção do fluido e consequentemente origina transferência de massa e turbulência interfacial. Além disto, o efeito Marangoni influencia as características morfológicas, bem como a qualidade da zona tratada pelo feixe de laser. Verifica-se que a simulação numérica é uma ferramenta eficaz para elucidar os fenômenos físicos e os mecanismos envolvidos nos processos de tratamento superficial de refusão a laser.

Agradecimentos

Agradeço ao professor Moisés Meza Pariona, ao colega Luciano Allan Woiciechowski e à Fundação Araucária.

Referências

1 SIWEK, A. Numerical simulation of the laser welding. **Computer Science**, v. 9, 2008. p. 137-147.
2 Z.-S. MAO and J. CHEN. Numerical simulation of the Marangoni effect on mass transfer to single slowly moving drops in the liquid–liquid system. **Chemical Engineering Science**, v. 59, 2004. p. 1815–1828.
3 Z. Gan, G. Yu, X. He, S. Li. Numerical simulation of termal behavior and multicomponente mass transfer indirect laser deposition of Co-base aloy on steel. **International Journal of Heat and Mass Transfer,** v. 104, 2017, p. 28-38.
4 MURPHY, A.B., 2015. A perspective on arc welding research: the importance of thearc, unresolved questions and future directions. **Plasma Chem. Plasma Process**. v. 35, 471–489.
5 Z. LIU, H. QI. Mathematical modeling of crystal growth and microstructure formation in multi-layer and multi-track laser powder deposition of single-crystal superalloy. **Physics Procedia**, v. 56, 2014. p. 411–420.
6 HONG-YUN Z., HONG-TAO Z., CHUN-HUA X., XIAN-QUN Y., HONG-YUN Z., HONG-TAO Z., CHUN-HUA X., XIAN-QUN Y. Temperature and stress fields of multi-track laser cladding. Trns. **Nonferrous Met. Soc**. China, v. 19, 2009, p. 495-501.