



DISPOSITIVO DE ALINHAMENTO A LASER DE BAIXO CUSTO APLICADO NA MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO DIRECIONADA DE ENERGIA COM PLASMA DE ARCO TRANSFERIDO

Viviane T. Mazur^{1,2*}, Maurício M. Mazur³, Gustavo S. Prass¹, Ana S. C. M. D'Oliveira¹

1 – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais(PIPE), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Centro Politécnico, Curitiba, PR.

2 – Coordenação de Tecnologia em Manutenção Industrial (TMI), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Avenida Laura Pacheco Basto, 800, Bairro Industrial, Guarapuava, CEP 85053-525 PR. vivianemazur@utfpr.edu.br

3 – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Ponta Grossa, PR.

RESUMO

A manufatura aditiva (MA) tem permitido o processamento de componentes de geometria complexa, com inúmeros estudos demonstrando sua confiabilidade em uma ampla variedade de ligas e compostos. Neste contexto, a MA por deposição direcionada de energia (DED) possibilita reparar ferramentas e componentes que sofreram desgaste, através da adição de sucessivas camadas de material fundido. No entanto, a disponibilidade da MA em setores industriais de manutenção e reparo tem sido limitada pelo custo relativamente alto dos sistemas robóticos utilizados. Buscando disponibilizar a técnica, tornando-a acessível para pequenas e médias empresas, foi desenvolvido um dispositivo de alinhamento a laser simples e de baixo custo, que ao ser aplicado a sistemas de soldagem mecanizados possibilite a DED em operações de reparo. Este estudo teve como objetivo validar a utilização do dispositivo de alinhamento a laser desenvolvido para operações de reparo por DED em um equipamento de soldagem com plasma de arco transferido (Plasma Transferred Arc - PTA). O dispositivo consiste em um laser em cruz com luz vermelha, um sistema de alimentação de baterias e estruturas fabricadas em polímero PLA em impressora 3D. Como estudo de caso, foi proposta a recuperação de um disco refinador de celulose, que é utilizado no processamento industrial de papel. Com auxílio do dispositivo de alinhamento a laser, foi possível depositar camadas de material metálico sobrepostas e alinhadas. Além disso, o PTA se mostrou como um processo viável para realização de operações de reparo por DED, garantindo boa ligação metalúrgica entre as camadas aditivas e o componente a ser reparado.

Palavras-chave: Manufatura aditiva, manutenção, recuperação, soldagem.

INTRODUÇÃO

A tecnologia de manufatura aditiva (MA) permite a fabricação de componentes com geometrias complexas, adicionando-se os materiais camada a camada. Diferentes tipos de materiais, na forma de pós ou arames, por exemplo, podem ser utilizados neste processo. A literatura que demonstra a possibilidade de aplicação e confiabilidade dos componentes

produzidos é vasta e abrange desde os materiais aeronáuticos, tais como Inconel 718 (WAN et al., 2022; BENAKIS et al., 2020), Hastelloy X (KARAPUZHA et al., 2021), Ti 6-4 (BENAKIS et al., 2020) e ligas de alta entropia (KUZMINOVA et al., 2021), até os materiais de uso médico e industrial, tais como as ligas de alumínio (OROPEZA et al., 2020) e os aços inoxidáveis (RIQUELME et al., 2021; LASHGARI et al., 2021; PARK et al., 2021). As pesquisas que relacionam as propriedades únicas obtidas por MA a partir de misturas de pós metálicos com partículas de reforço abrangem uma ampla gama de materiais consagrados como SiC – carbetos de silício (RIQUELME et al., 2021), TiC – carbetos de titânio (ZHAO et al., 2021) e WC – carbetos de tungstênio (SON et al., 2021), bem como novos materiais sintetizados *in-situ*, que formam intermetálicos de alta resistência (MENG, et al., 2021). A expansão da MA para aplicações que envolvam equipamentos de baixa complexidade e menor custo, passa pela disponibilização de sistemas de processamento acessíveis. Assim, além dos materiais aditivos, as diferentes formas de se realizar a construção das camadas tem recebido especial atenção e destacam-se os processos de soldagem a arco elétrico como o PTA – *plasma transferred arc* (ZHAO et al., 2021), MIG – *metal inert gas* (BENAKIS et al., 2020), TIG – *tungsten inert gas* (OROPEZA et al., 2020), o processamento a laser (WAN et al., 2022; KUZMINOVA et al., 2021; RIQUELME et al., 2021; PARK et al., 2021; SON et al., 2021) e por feixe de elétrons (KARAPUZHA et al., 2021).

A tecnologia possui potencial disruptivo e já está sendo utilizada em vários setores (MOHANAVEL, et al., 2021). Tema de pesquisas recentes, a MA abrange ainda a possibilidade de ser utilizada na assistência à produção e manutenção (CARDOSO, et al., 2019), pois a recuperação de peças avariadas por desgaste, por exemplo, reduz custos e aumenta a produtividade das operações de manutenção. Incluindo-se o equipamento, materiais, energia elétrica, gases de proteção e mão de obra, os custos para implementação da MA são relativamente altos (YI, et al., 2021), tornando mais difícil a sua implementação em pequenas e médias empresas. Apesar disso, a soldagem de manutenção, mesmo que realizada manualmente, pode ser utilizada para realização de MA, necessitando mecanização de no mínimo um eixo (TAVARES et al., 2020), permitindo a produção de camadas lineares sobrepostas. Outra vantagem da utilização dos sistemas convencionais de soldagem é que em geral, são portáteis, não sendo obrigatório o processamento no setor de manutenção da fábrica, mas também no local de montagem.

A soldagem para a MA de manutenção não deve apresentar problemas particulares se os operadores tiverem o treinamento e a experiência necessárias. O correto alinhamento entre as camadas aditivas proporciona precisão geométrica e características mecânicas adequadas ao componente recuperado. Os defeitos comuns da MA incluem a formação de trincas, tensões residuais, poros, inclusões, delaminação e desalinhamento causados por falta de fusão ou deslocamento de camada (LI et al., 2021; HONARVAR, VARVANI-FARAHANI, 2020). Além dos parâmetros de processamento, como a corrente de deposição e a velocidade de deslocamento, a falta de fusão e a falta de alinhamento entre as camadas depositadas, podem ser melhores controladas com uso do dispositivo desenvolvido e testado neste trabalho.

Este estudo traz contribuições para a ampliação das oportunidades de processamento por MA, destacando-se em particular a adaptação de sistemas convencionais já instalados e disponíveis em plantas industriais, habilitando as vantagens oferecidas pela MA em disponibilizar serviços e produtos competitivos e de qualidade.

MATERIAIS E MÉTODOS

Um sistema de soldagem PTA mostrado na Fig.1a, marca Stellite, modelo Starweld-300M foi utilizado. O sistema de mecanização em um eixo, Fig.1a (destaque 1, 2), desloca o cabeçote do PTA mostrado no destaque 3, enquanto o substrato é posicionado manualmente na mesa

fixa indicada no destaque 4. A altura da tocha de plasma é realizada de forma manual com o sistema mostrado no destaque 5. O mecanismo de encaixe da tocha de plasma possui um ressalto, local que foi escolhido para acoplar o dispositivo de alinhamento. Em diferentes sistemas, a avaliação e ajustes devem ser realizados a partir da identificação de um local possível para acoplamento.

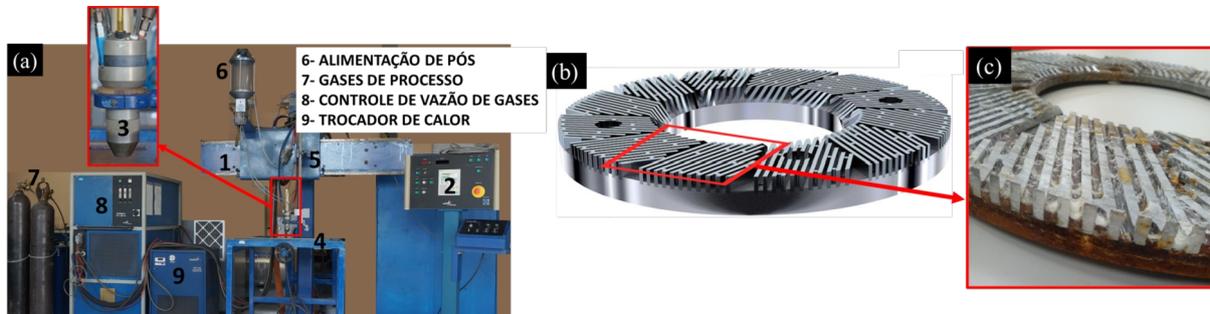


Figura 1: (a) Sistema PTA. (b) Disco refinador novo (TECHMELT, 2021) e (c) com desgaste irregular.

Os arquivos com código de máquina para impressão foram obtidos com o software Creality Slicer 4.2 e as peças em polímero PLA (Ácido Polilático) foram produzidas em impressora Ender V3, com os seguintes parâmetros: bico de extrusão = 0,4 mm; aquecimento da mesa = 65°C; aquecimento do filamento = 200 °C; velocidade de deslocamento = 60 mm/s; espessura de camada = 0,12 mm; densidade da peça = 20 %; malha de preenchimento = cúbica.

Com o PTA, foram depositadas camadas a partir de pós atomizados de aço inoxidável AISI 316L, em substratos de AISI 316 e em um disco refinador de celulose. Uma representação do disco novo é mostrado na Fig. 1b, o qual possui uma base de aço carbono AISI 1020, com palhetas de AISI 316L. A operação industrial em fábrica de papel gera desgaste da superfície das palhetas (Fig. 1c), sendo necessária sua substituição ou reparo. Previamente às deposições, todos os substratos foram limpos com escova de aço e alinhados abaixo do cabeçote com o auxílio do dispositivo desenvolvido. Os materiais depositados foram cortados, lixados, polidos e atacados quimicamente em sua secção transversal para observação em microscópio óptico Olympus BX-51, com câmera digital QColor 3.

Custos e montagem do dispositivo

Na Tabela 1 pode ser visualizada a lista de componentes adquiridos no mercado nacional, entre junho e julho de 2021. Inclui-se na Tabela 1, além dos componentes, o custo relacionado a impressão em PLA das peças do suporte. O custo total do dispositivo foi de 62 reais e 50 centavos.

Tabela 1: Especificação dos componentes do dispositivo de alinhamento adquiridos no mercado nacional e custos relativos ao processo de impressão.

Especificação do componente	Aspecto físico	Custo
01 Módulo Laser formato cruz, 650 nm (vermelho), potência de 5 mW, com foco ajustável, Ø 12 mm e comprimento 40 mm.		R\$ 25,00

04 Parafusos M6x30 sextavado e porcas borboleta em aço inoxidável AISI 304 para fixação e ajuste		R\$ 10,00
01 Case para 4 pilhas AA		R\$ 4,00
04 Pilhas AA, 1,5 V cada, totalizando 6 V em CC		R\$ 10,00
01 Botoeira luminosa verde		R\$ 1,00
04 Parafusos M3x10 Philips para fechamento da caixa para sistema de alimentação		R\$ 1,00
Impressão 3D em PLA, com custo calculado pela soma da massa dos componentes impressos (105 g) com valor 0,1 R\$/g		R\$ 10,50
Custo Total	(26/08- 5,06) Equivalência US\$ 12,34 - R\$ 62,50	

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Modelagem e impressão em PLA do dispositivo de alinhamento

Na Figura 2a é possível visualizar imagens dos componentes modelados e na Figura 2b os componentes impressos. Os arquivos com o código de máquina para impressão estão disponibilizados em: https://drive.google.com/drive/folders/1d5kGD-koWwkx65J_BHB_e3NkK5KU-Cre?usp=sharing. O sistema incluiu um braço articulado composto pela união das peças 4 e 5, que permite ajustar o feixe de laser em cruz na superfície do substrato ou da camada previamente depositada. Conjuntos de parafuso sextavado M6 e com porca borboleta foram utilizados para acoplar o dispositivo ao PTA, fixar o laser e ajustar a articulação central.

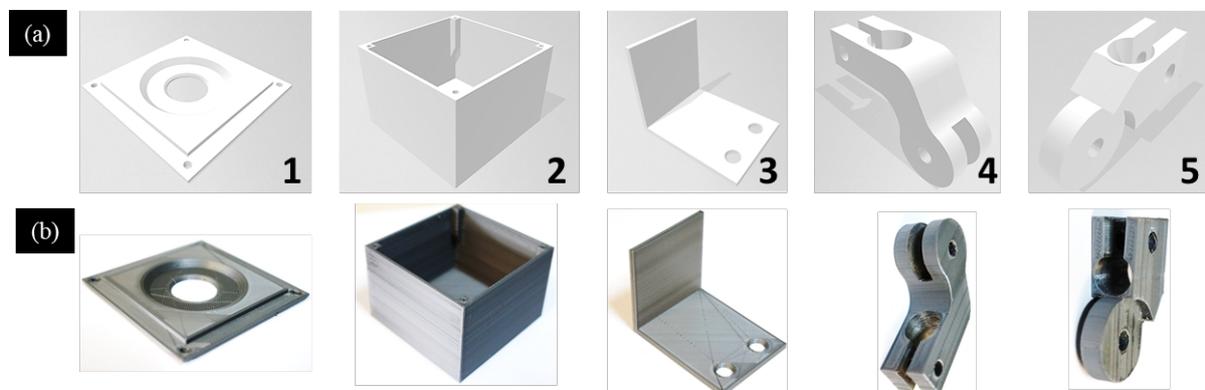


Figura 2: (a) Partes modeladas em 3D e (b) partes impressas em PLA: 1-tampa, 2-caixa para sistema de alimentação, 3-base de encaixe no PTA, 4-articulação de fixação no PTA e 5-articulação de fixação do laser.

O sistema elétrico possui quatro pilhas, o que evita cabos elétricos próximos a região da deposição, facilitando manutenção e uso. Para acomodar o sistema elétrico, uma caixa (peça 2) com tampa impressa (peça 1), acopladas por uma cantoneira (peça 3), permitem o encaixe de uma botoeira de acionamento do laser.

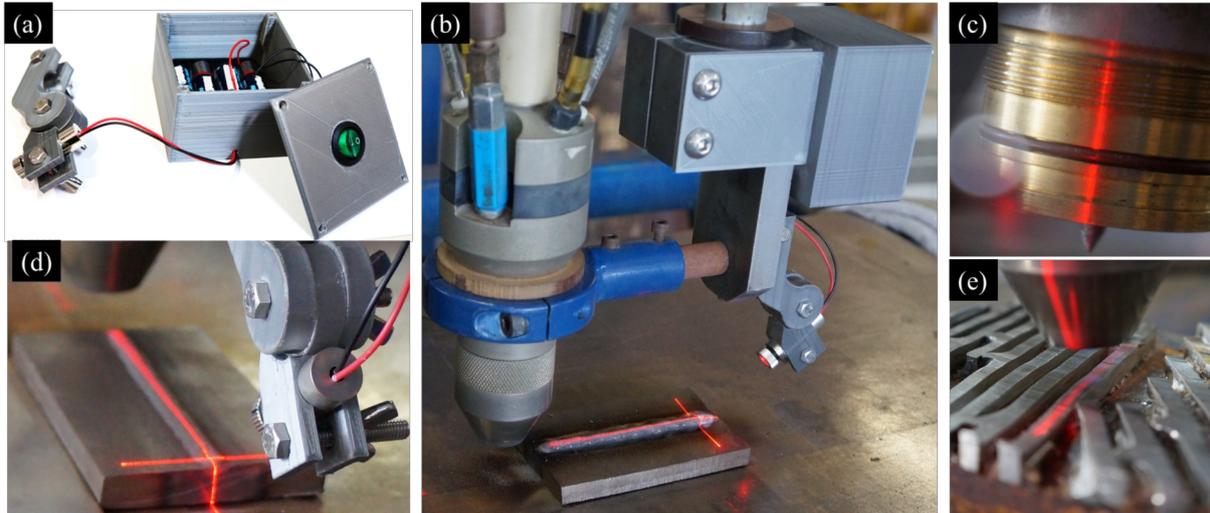


Figura 3: (a) Dispositivo de alinhamento de baixo custo; (b) dispositivo de alinhamento sobre uma camada após a deposição. (c) detalhamento do alinhamento com o cabeçote do PTA. (d) alinhamento da luz laser com o eletrodo da tocha. (e) alinhamento da tocha sobre a palheta do disco refinador de celulose.

Os componentes impressos e montados com os componentes eletroeletrônicos (Fig. 3 a) foram acoplados ao cabeçote do PTA (Fig. 3b). O ajuste de posicionamento foi realizado com indicações das coordenadas X e Y em relação ao feixe da cor vermelha do laser ao cabeçote (Fig. 3c). Depois disso, o substrato ou as camadas previamente depositadas podem ser posicionados de acordo com a necessidade da deposição (Fig. 3d). O posicionamento de peças de aresta definida é simples, entretanto, componentes como o disco refinador de celulose apresenta geometria mais complexa. Com isso, foi possível utilizar o dispositivo de alinhamento a laser para o correto posicionamento do cabeçote do PTA para a deposição das camadas aditivas (Fig. 3e).

Camadas aditivas e o dispositivo de alinhamento

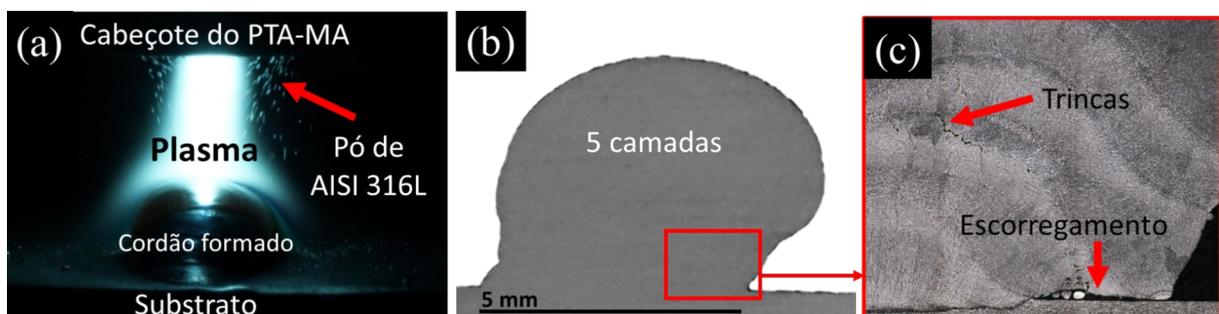


Figura 4: (a) Fotografia do momento da deposição com PTA; (b) exemplo de camadas aditivas desalinhadas e (c) ampliação da região, mostrando trincas e escorregamento.

Durante o processo de deposição, o pó metálico é injetado com um gás de arraste (argônio) dentro da região do plasma, conforme a indicações na Fig. 4a. O desalinhamento entre a tocha

e a camada anterior pode levar ao comprometimento da parede processada, o que pode provocar o escorregamento do material ainda quente, como mostra a Fig. 4b e a ampliação na Fig. 4c. O escorregamento gera deformações da parede para o lado, acarretando no aumento das tensões responsáveis pela formação e propagação de trincas, indicadas na Fig. 4c.

Na Fig. 5 são mostradas sequencialmente as imagens da deposição de 1 até 5 camadas, produzidas com o auxílio do dispositivo de alinhamento desenvolvido. Ao se observar a secção transversal, nota-se que o alinhamento entre as camadas depositadas foi garantido.



Figura 5: Seções transversais de camadas depositadas com o auxílio do dispositivo de alinhamento a laser.

Para promover a recuperação do disco refinador de celulose, foi realizada a deposição de 7 camadas aditivas. A Fig. 6 mostra uma fotografia das camadas sobrepostas, com o feixe de laser na superfície. Houve alinhamento entre as 7 camadas depositadas, o que demonstra que o dispositivo de alinhamento desenvolvido proporcionou um bom posicionamento, inclusive sobre uma superfície com rugosidade irregular apresentada pela peça que foi recuperada.

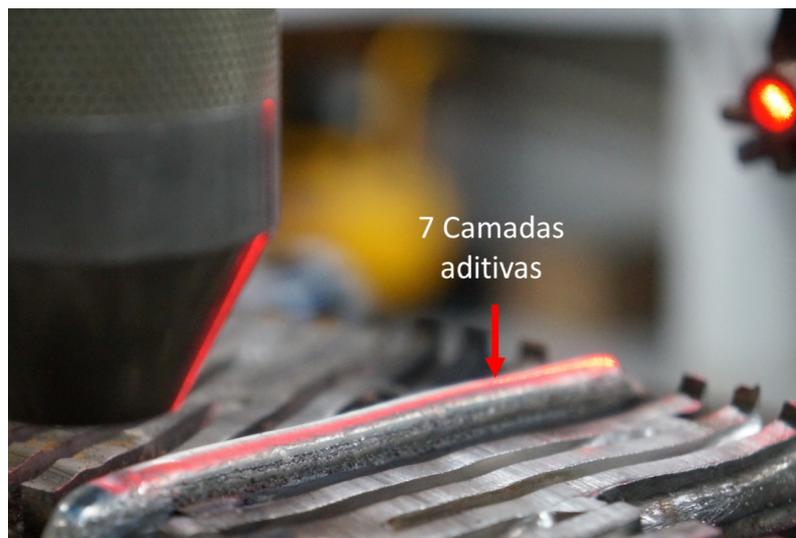


Figura 6: Fotografia do disco refinador de celulose após deposição de 7 camadas aditivas.

CONCLUSÕES

Um dispositivo de alinhamento de baixo custo (R\$62,50) foi produzido utilizando a impressão 3D em PLA e com componentes eletroeletrônicos do mercado nacional. Em um equipamento de soldagem do tipo PTA, com automatização em apenas um eixo de movimentação, o dispositivo de alinhamento permitiu fabricar paredes lineares e alinhadas entre camadas. O processo de deposição das camadas possibilitou a recuperação da palheta do disco refinador de celulose, o qual pode ser reinserido no processo de manutenção industrial. Foi demonstrado nesse trabalho que pequenos ajustes em equipamentos existentes podem habilitar o processamento por manufatura aditiva com qualidade, permitindo a recuperação de componentes mecânicos que foram degradados em serviço.

REFERÊNCIAS

1. WAN, H.Y.; YANG, W.K.; WANG, L.Y.; ZHOU, Z.J.; LI, C.P.; CHEN, G.F.; LEI, L.M.; ZHANG, G.P. Toward qualification of additively manufactured metal parts: Tensile and fatigue properties of selective laser melted Inconel 718 evaluated using miniature specimens. *J. Mat. Sci. & Technol.*, v. 97, n. 29, p. 239-253, 2022.
2. BENAKIS, M.; COSTANZO, D.; PATRAN, A. Current mode effects on weld bead geometry and heat affected zone in pulsed wire arc additive manufacturing of Ti-6-4 and Inconel 718. *J. Manufact. Proc.*, v. 60, n. 18, p. 61-74, 2020.
3. KARAPUZHA, A.S.; FRASER, D.; ZHU, Y.; WU, X.; HUANG, A. Effect of solution heat treatment and hot isostatic pressing on the microstructure and mechanical properties of Hastelloy X manufactured by electron beam powder bed fusion. *J. Mat. Sci. & Technol.*, v. 98, n. 6, p. 99-117, 2021.
4. KUZMINOVA, Y.O.; KUDRYAVTSEV, E.A.; HAN, J.K.; KAWASAKI, M.; EVLASHIN, S.A. Phase and structural changes during heat treatment of additive manufactured CrFeCoNi high-entropy alloy. *J. Alloys and Comp.*, v. 889, n. 8, artigo n. 161495, 2021.
5. OROPEZA, D.; HOFMANN, D.C.; WILLIAMS, K.; FIRDOSY, S.; BORDEENITHIKASEM, P.; SOKOLUK, M.; LIESE, M.; LIU, J.; LI, X. Welding and additive manufacturing with nanoparticle-enhanced aluminum 7075 wire. *J. Alloys and Comp.*, v. 834, n. 13, artigo n. 154987, 2020.
6. RIQUELME, A.; CANDELA, C.S.R.; RAM, J. Influence of process parameters in additive manufacturing of highly reinforced 316L / SiCp composites. *J. Mat. Proc. Technol.*, v. 299, n. 14, artigo n. 117325, 2021.
7. LASHGARI, H.R.; LI, S.; KONG, C.; ASNAVANDI, M.; ZANGENEH, S.H. Rotary friction welding of additively manufactured 17-4PH stainless steel. *J. Manuf. Proc.*, v. 64, n. 16, p. 1517-1528, 2021.
8. PARK, S.H.; SON, S.J.; LEE, S.B.; YU, J.H.; AHN, S.J.; CHOI, Y.S. Surface machining effect on material behavior of additive manufactured SUS 316L. *J. Mat. Res. Technol.*, v. 13, n. 22, p. 38-47, 2021.
9. SON, S.; PARK, J.M.; PARK, S.H.; YU, J.H.; HYEONSEOK, K.; KIM, H.S. Correlation between microstructural heterogeneity and mechanical properties of WC-Co composite additively manufactured by selective laser melting. *Mat. Lett.*, v. 293, n. 16, artigo n. 129683, 2021.
10. MENG, Y.; LI, J.; GAO, M.; ZENG, X. Microstructure characteristics of wire arc additive manufactured NiAl intermetallic compounds. *J. Manuf. Proc.*, v. 68, n. 23, p. 932-939, 2021.
11. ZHAO, T.; ZHANG, S.; ZHOU, F.Q.; ZHANG, H.F.; ZHANG, C.H.; CHEN, J. Microstructure evolution and properties of in-situ TiC reinforced titanium matrix composites coating by plasma transferred arc welding (PTAW). *Surf. Coat. Technol.*, v. 424, artigo n. 127637, 2021.
12. MOHANAVEL, V.; ALI, K.S.A, RANGANATHAN, K.; JEFFREY, J.A.; RAVIKUMAR, S. RAJKUMAR, M.M. The roles and applications of additive manufacturing in the aerospace and automobile sector, *Mat. Today: Proceed.*, in press, 2021.

13. CARDOSO, E. ; RIOS, S. ; PARDAL, G. ; GANGULY, S. ; D'OLIVEIRA, A.S.C.M. . Additive Techniques to Refurbish Ni Based Components. *Sold. & Insp.*, v. 24, p. 8, 2019.
14. YI, L.; EHMSSEN, S.; GLATT, M.; AURICH, J.C. Modeling and software implementation of manufacturing costs in additive manufacturing. *CIRP J. Manufac. Sci. Technol.*, v. 33, p. 380-388, 2021.
15. TAVARES, T.B.; PORCARO, R.R.; CÂNDIDO, L.C.; FARIA, G.L.; DÂMASO, H.V. Desenvolvimento de dispositivo de baixo custo para mecanização da soldagem GTAW e sua aplicação em estudo de solidificação de aço ABNT 430. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 13-22, 2020.
16. LI, R.; JIN, M.; PAQUIT, V.C. Geometrical defect detection for additive manufacturing with machine learning models. *Mat. & Des.*, v. 206, n. 20, artigo n. 109726, 2021.
17. HONARVAR, F.; VARVANI-FARAHANI, A. A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control. *Ultras.*, v. 108, artigo n. 106227, 2020.
18. TECHMELT. Disponível em <<https://techmelt.com/pt-br/blog/2018/10/24/discos-fundidos-e-soldados/>>. Acesso em: 07 de dez. de 2021.

LOW-COST LASER ALIGNMENT DEVICE APPLIED IN ADDITIVE MANUFACTURING BY DIRECTED ENERGY DEPOSITION WITH PLASMA TRANSFERRED ARC

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) has enabled the processing of components with complex geometry, with numerous studies demonstrating its reliability across a wide range of alloys and composites. In this context, MA by directed energy deposition (DED) makes it possible to repair tools and components that have suffered wear by adding successive layers of molten material. However, the availability of MA in industrial maintenance and repair sectors has been limited by the relatively high cost of the robotic systems used. In an effort to make the technique available and affordable to small and medium-sized companies, a simple, low-cost laser alignment device was developed that, when applied to mechanized welding systems, enables DED in repair operations. This study aimed to validate the use of the developed laser alignment device for DED repair operations on a Plasma Transferred Arc (PTA) welding machine. The device consists of a red-light cross laser, a battery-powered system, and structures made of PLA polymer in a 3D printer. As a case study, the recovery of a pulp refiner disk, which is used in industrial paper processing, was proposed. With the aid of the laser alignment device, it was possible to deposit overlapping and aligned layers of metallic material. In addition, PTA has proven to be a viable process for carrying out DED repair operations, ensuring good metallurgical bonding between the additive layers and the component to be repaired.

Keywords: *Addictive manufacturing, maintenance, recovery, welding.*