



Aplicação da técnica de fricção e agitação para a obtenção de compósitos superficiais em alumínio AA6082 com reforços de NbC

Application of the friction stir processing technique to obtain surface composites in AA6082 aluminum with NbC

José Augusto Liberato Ribeiro da Silva¹, Anquises Costa Portes²,
Dr^a. Simone do Rocio Ferraz Sabino³, Prof. Dr. Hipólito Carvajal Fals⁴,
Prof. Dr. Luciano Augusto Lorençato⁵

RESUMO

Foram obtidos compósitos superficiais de matriz da liga AA6082 com reforços de NbC, utilizando o processo de fricção e agitação. Foram utilizadas 3 rotações da ferramenta com um passe e ainda 2 passes com rotações diferentes. Foi utilizada a técnica de aspersão térmica para formar uma camada pre-alocada de NbC na superfície da matriz. Foi usada uma ferramenta de aço H13, com ombro côncavo de 18 mm e um pino cônico de 4 mm de altura. As secções transversais das amostras, foram caracterizadas utilizando microscopia ótica e eletrônica de varredura (MEV). As medidas da geometria (penetração, largura e área) das zonas modificadas, foram obtidas pela técnica de análises de imagens. Perfis de microdureza nas seções transversais das zonas modificadas, foram realizados. Foi constatado que a rotação da ferramenta influencia na dispersão do reforço de NbC. A penetração da zona modificada é independente da velocidade de rotação da ferramenta e do número de passes, no entanto, a largura foi incrementada quando foram utilizados 2 passes no processamento. A dureza foi variável e dependeu das regiões da zona modificada, estando relacionada com a formação de cluster e o tamanho dos reforços de NbC.

PALAVRAS-CHAVE: compósito superficial, ligas de alumínio, fricção e agitação, carbonetos de Nb, dureza

ABSTRACT

Surface matrix composites of the AA6082 alloy with NbC reinforcements were obtained using the friction stir processing. Three rotations of the tool were used with one pass and 2 passes with different rotations. The thermal spray technique was used to form a pre-allocated layer of NbC on the surface of the matrix. An H13 steel tool was used, with an 18 mm concave shoulder and a 4 mm high conical pin. The cross sections of the samples were characterized using optical and scanning electron microscopy (SEM). The geometry measurements (penetration, width and area) of the modified zones were obtained using the image analysis technique. Microhardness profiles in the cross sections of the modified zones were carried out. It was found that the rotation of the tool influences the dispersion of the NbC reinforcement. The penetration of the modified zone is independent of the tool rotation speed and the number of passes; however, the width was increased when 2 passes were used in processing. The hardness was variable and depended on the regions of the modified zone, being related to the cluster formation and the size of the NbC reinforcements.

KEY WORDS: surface composite; aluminum alloys; friction stir processing; Nb carbides; hardness.

¹ Bolsista da UTFPR AF. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. E-mail: joseaugusto@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2737222756716818>.

² Bolsista da Fundação Araucária. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. E-mail: portes@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2737222756716818>.

³ Bolsista técnico, Fundação Araucária(AF) do C2MMA. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. E-mail: mone.sab@hotmail.com. ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1428171771155660>

⁴ Docente do PPGEM. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. E-mail: hipolitofals@utfpr.edu.br. ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8883136649448444>.

⁵ Docente no Curso de Engenharia Mecânica/ DAMEC/ PPGEM. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta-Grossa, Paraná, Brasil. E-mail: lalouren@utfpr.edu.br. ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3421117431876101>



INTRODUÇÃO

(NETTO et al., 2020) definiram o processo de fricção e agitação como um processo termomecânico, que ocorre devido à ação de rotação de uma ferramenta sobre a superfície do material base. Neste processo, a ferramenta é caracterizada por um ombro, que gera aquecimento por atrito; e um pino, que realiza movimentos de avanço axial e promove deformação plástica.

O processo por fricção e agitação também tem sido utilizado como uma técnica para a obtenção de compósitos com matriz de alumínio (*Aluminium matrix composites - AMCs*), como explica (MISHRA; MA, 2005). Para tanto, as partículas de reforços têm sido prealocadas na superfície, para posteriormente ser adicionadas ao fluxo de material altamente deformado pela ferramenta. Dessa forma o *AMCs* é formado e consolidado devido ao movimento da ferramenta e a força axial gerada no processo.

O processamento por fricção e agitação foi utilizado com sucesso na fabricação de *AMCs* em ligas de alumínio 1100 (DIXIT; NEWKIRK; MISHRA, 2007) e (NI; MA, 2014), resultando em ambos casos numa zona livre de defeitos e distribuição de partículas razoavelmente homogênea. No entanto, deve-se notar que o processamento por fricção e agitação pode formar defeitos nos *AMCs*, isto é, aglomerados de partículas e formação de cavidades. Esses defeitos são geralmente consequência de aporte térmico insuficiente, o que resulta em fluxo deficiente de material, conforme afirmado por (KIM et al., 2006).

O efeito da adição de partículas de TiB_2 na dureza do compósito AA7075/ TiB_2 obtido através do processamento por fricção e agitação foi aumentado em 50%, como constatado por (BISADI; ABASI, 2011). (POL et al., 2019), observaram que compósitos superficiais híbridos de AA7005- B_4C - TiB_2 fabricados por fricção e agitação melhoraram a resistência mecânica da liga de alumínio. Diversas partículas de reforço, como carboneto de silício (SiC), óxido de alumínio (Al_2O_3), carboneto de boro (B_4C) e nanotubos de carbono (CNTs), têm sido usadas para fabricar compósitos com matrizes metálicas (MAZAHERY; OSTADSHABANI, 2011); (MOUSTAFA, 2017); (MOUSTAFA; MOSLEH, 2020). No entanto, poucos trabalhos, que usem NbC como reforço na obtenção de *AMCs* a través do processo de fricção agitação, tem sido desenvolvidos. Nesse sentido, neste trabalho se avalia a influência da rotação da ferramenta, na geometria e dureza da zona modificada pelo processo de fricção e agitação, para a obtenção de compósitos superficiais da liga de alumínio AA6082 usando NbC como reforço.

Abaixo, na figura 1, é possível visualizar uma imagem esquematizada do processo de fricção e agitação.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados ensaios de modificação superficial por fricção e agitação em chapas de 4 mm de espessura da liga de alumínio A6082 revestida por aspersão térmica com camadas de 250 μm de NbC e mistura de 30 % Al. A modificação de superfície por fricção e agitação foi realizada numa fresadora CNC, utilizando um dispositivo de fixação das amostras na bancada da máquina ferramenta. Os experimentos foram realizados com uma ferramenta de aço H13 temperada e revenida com um ombro côncavo de 18 mm e um pino cônico de 4 mm de altura. Foi usado um ângulo de inclinação de $2,5^\circ$ da ferramenta. Na Tabela 1, se mostra a combinação de materiais e parâmetros de processo, realizados com uma velocidade de avanço constante de 40 mm/min.



Tabela 1. Combinação de materiais dos revestimentos e parâmetros do processo de fricção agitação

AA6082+ NbC + (Base NiAl)			AA6082+NbC +30% Al)+(Base NiAl)		
Rotação da ferramenta (rpm)			Rotação da ferramenta (rpm)		
1070	1600	2600	1070	1600	2600

Fonte: Autoria própria (2023).

Para a observação da macro e microestrutura das amostras foram cortadas na seção transversal da região modificada, embutidas em baquelite, lixadas e polidas com pastas de diamante. Foi utilizado o reagente químico composto por 30 ml de HCl, 40 ml de HNO₃ e 3,5 ml de HF, e 3,5 ml de H₂O. As imagens microestruturais foram avaliadas no microscópio óptico Olympus UC30. Também foi utilizado o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) marca Tescan Modelo Vega3 para obter imagens da microestrutura e mapeamento da composição química. A determinação das medidas da penetração, largura e área das seções transversais das zonas modificadas, foram realizadas pela técnica de análises de imagens usando o software *ImageJ*.

As medições de microdureza foram realizadas no microdurômetro Shimadzu *HMV-G20 Series Equipment (Kyoto, Japan)*. Neste ensaio foram realizados perfis de microdureza nas seções transversais das amostras.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

A escolha do uso da camada revestimento de NbC possibilitou, melhor controle dimensional no desenvolvimento tecnológico do processo para a obtenção dos AMCs superficiais na liga de alumínio A6082. De forma geral foi observado que os revestimentos de NbC possuíam entre 150 e 250 μ m, contando com uma estrutura heterogênea, em forma lamelar, com a presença de poros interlamelares, sendo uma típica camada de aspersão térmica por flame spray. Deve-se lembrar neste ponto que estes revestimentos, foram depositados com objetivo de serem misturados pelo processo de modificação superficial por fricção agitação e assim obter um compósito superficial AMC + NbC.

Na seção transversal das amostras de AMCs de A6082 com reforços de NbC, não ocorreu a formação de defeitos tipo túnel ou vazios, causado pela falta de preenchimento na zona do avanço da região modificada. Também se verificou uma zona agitada com morfologia que se corresponde com a geometria da ferramenta (pino e ombro), e com uma geometria adequadas para este tipo de processo. Na Figura 1 se mostra uma imagem por microscopia ótica, de todas as regiões formadas na seção transversal da zona modificada, onde foi formado o AMCs da liga A6082 com reforço de NbC, através do processo de fricção agitação com 2 passes (1600/2600 rpm). Se constata que as zonas típicas deste processo de modificação no estado sólido estão definidas adequadamente. Se observam a formação da zona termicamente afetada (ZTA), a zona termo mecanicamente afetada (ZTMA) e zona central modificada ou "Núcleo". Ainda é possível observar a inserção dos reforços de NbC, dispersos no "núcleo" e com formação de "clusters" de NbC, principalmente na ZTMA no região chamada como "retrocesso", que se forma devido ao fluxo do material plastificado que consegue arrastar os reforços e provocar o acúmulo na zona.

Nas condições de processamento usadas neste trabalho, as partículas do reforço de NbC foram dispersas na zona modificada. Foi constatado nas amostras, pela técnica de mapeamento químico por energia dispersiva de raios x (EDS), a presença do reforço de NbC dispersas na matriz de AA6082.

Na zona modificada as partículas do reforço de NbC apresentaram diferentes tamanhos e morfologias, consequência do efeito da ferramenta durante o processamento por fricção e agitação da camada do reforço previamente depositada como revestimento.



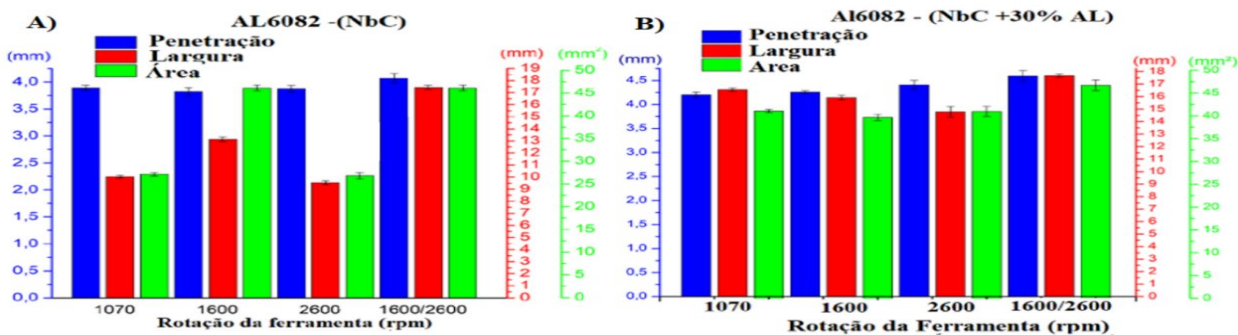
Na Figura 2 (A,B), se mostra o comportamento das dimensões das zona modificadas pelo processo de fricção e agitação. Se observa que nas amostras com reforço NbC, a velocidade de rotação da ferramenta, não influenciou a penetração da zona modificada, no entanto se verifica no gráfico um incremento não significativo no caso das amostras com 2 passes, com rotações diferentes (1600/2600 rpm). Por outro lado, a largura da zona foi incrementada, quando foram executados dois passes, aspecto muito importante que mostrou influência significativa e visa atingir aplicações com maiores áreas de processamento.

Figura 1. Zonas estruturais da região modificada por fricção e agitação com dois passes e formação do AMC de AL6082-NbC.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 2. Influência da rotação da ferramenta nas dimensões da zona modificada. A) AL6082 – NbC, B) AL6082-(NbC+30%Al)



Fonte: Autoria própria (2023).

Nas amostras onde foram usadas a mistura de NbC + 30% Al como reforço, observa-se que a penetração da zona modificada, não foi influenciada significativamente pela rotação da ferramenta, porém com dois passes, comprovou-se um incremento não significativo. Por outro lado a largura, mostrou ser maior quando dois passes foram realizados. Todo isso, provocou um aumento da área da zona modificada.

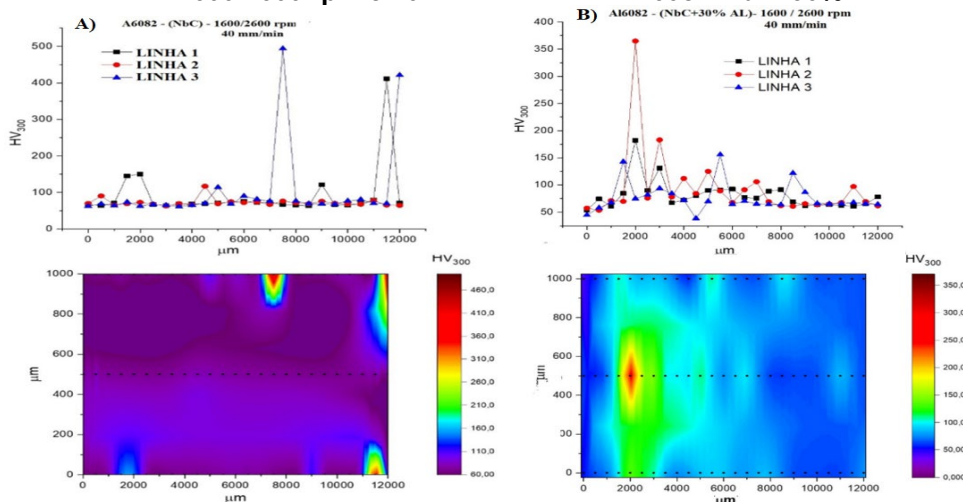
Quando foram comparadas as geometria dos tipos de reforços utilizados, seja o NbC e a mistura NbC+30%Al, observou-se que não ocorreu uma influência significativa do tipo de reforço na largura e na área da zona modificada. No entanto, a penetração mostrou-se menor quando foi utilizado NbC sem adição de 30% Al, no reforço.

Apesar do incremento da largura da zona modificada quando foram usados dois passes da ferramenta, foi comprovado que a penetração da zona onde formou-se o AMC de AA6082+NbC, depende diretamente da geometria (ombro e pino) da ferramenta.

Observou-se que a rotação da ferramenta, influenciou nos valores picos de dureza e principalmente na distribuição da dureza na zona. Nesse sentido, deve-se explicar que a rotação da ferramenta é um fator que promove a mistura dos reforços na matriz, assim como a fratura e distribuição dessas partículas, influi no fluxo de material plastificado, e a recristalização dos grãos, que determinam a dureza da zona modificada. Todos estes fatores dependem das condições energéticas do processo, como foi constatado no trabalho.

Se comprovou que os picos de dureza acima de 200 HV, se correspondem, com os valores de dureza dos reforços de NbC, e que estes se apresentaram em acúmulos em diferentes zonas da secção transversal, observando-se que quando aumentou a rotação da ferramenta a região de maior dureza mudou predominantemente da zona de avanço para a de retrocesso da zona modificada, devido ao aumento do fluxo de material plastificado e conseqüentemente ao arrastre das partículas de reforço de NbC.

Figura 3. Perfis e mapas de microdurezas na secção transversal das zonas modificadas com formação do AMC A) Dois passes - 1600/2600 rpm e 40 mm/min. AA6082-NbC. B) Dois passes - 1600/2600 rpm e 40 mm/min. AMC AA6082-NbC+30%Al



Fonte: Autoria própria (2023).

Por outro lado, as amostras AA6082+NbC processadas com dois passes (Figura 3A), mostraram maior homogeneidade da dureza em toda a zona modificada, com menores picos de microdureza, provavelmente por causa da formação de partículas de reforços mas finas e dispersas na matriz de AA6082.

Nas secções transversais das zonas modificadas onde formaram-se os AMC AA6082-NbC+30%Al, se constatou que a adição de 30 % de Al na camada do reforço, provocou uma diminuição da dureza do compósito formado, provavelmente, por causa da menor quantidade de NbC. Por outro lado, quando foi incrementada a rotação da ferramenta aumentou a dispersão das partículas de reforço e conseqüentemente influenciou nos valores picos de dureza e principalmente na distribuição da dureza na zona. Igualmente com dois passes (Figura 3B), obteve-se maior homogeneidade da dureza em toda a zona modificada, com menores picos.

CONCLUSÕES

Foram obtidos pela técnica de fricção e agitação, compósitos superficiais homogêneos da liga AA6082 + NbC. A largura e conseqüentemente a área da zona onde foram obtidos AMC AA6082+NbC foi incrementada num 35 % quando foram aplicados dois passes com rotações diferentes (1600/2600). No entanto, quando foi adicionado 30% de Al, na camada de reforço de NbC, o incremento da largura foi menor (22%).

A altura da penetração da zona modificada onde formou-se o AMC de AA6082+NbC, dependeu diretamente da geometria (ombro e pino) da ferramenta utilizada. As amostras AA6082+NbC processadas com dois passes mostraram maior homogeneidade da dureza



em toda a zona modificada, com menores picos de microdureza, provavelmente por causa da formação de partículas de reforços mas finas e dispersas na matriz de AA6082.

A adição de 30% de Al, na camada de reforço de NbC provocou uma diminuição da dureza na zona modificada, porém uma zona modificada mais homogênea foi constatada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UTFPR, laboratório multiusuários de Caracterização de Materiais (C2MMA) que contribuíram para a realização do trabalho, e ao CNPQ pelos recursos no formato de bolsa e auxílio financeiro

CONFLITO DE INTERESSE

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

BISADI, H.; ABASI, A. Fabrication of Al7075/TiB₂ Surface Composite Via Friction Stir Processing. **American Journal of Materials Science**, v. 1, n. 2, p. 67–70, 2011.

DIXIT, M.; NEWKIRK, J. W.; MISHRA, R. S. Properties of friction stir-processed Al 1100–NiTi composite. **Scripta Materialia**, v. 56, n. 6, p. 541–544, 1 mar. 2007.

KIM, Y. G. et al. Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy. **Materials Science and Engineering: A**, v. 415, n. 1, p. 250–254, 15 jan. 2006.

MAZAHERY, A.; OSTADSHABANI, M. Investigation on mechanical properties of nano-Al₂O₃-reinforced aluminum matrix composites. **Journal of Composite Materials**, v. 45, n. 24, p. 2579–2586, 1 nov. 2011.

MISHRA, R. S.; MA, Z. Y. Friction stir welding and processing. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 50, n. 1, p. 1–78, 31 ago. 2005.

MOUSTAFA, E. Effect of Multi-Pass Friction Stir Processing on Mechanical Properties for AA2024/Al₂O₃ Nanocomposites. **Materials (Basel, Switzerland)**, v. 10, n. 9, p. 1053, 8 set. 2017.

MOUSTAFA, E. B.; MOSLEH, A. O. Effect of (Ti–B) modifier elements and FSP on 5052 aluminum alloy. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 823, p. 153745, 15 maio 2020.

NETTO, N. et al. Manufacturing high strength aluminum matrix composites by friction stir processing: An innovative approach. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 283, p. 116722, 1 set. 2020.

NI, D. R.; MA, Z. Y. Shape Memory Alloy-Reinforced Metal-Matrix Composites: A Review. **Acta Metallurgica Sinica (English Letters)**, v. 27, n. 5, p. 739–761, 1 out. 2014.

POL, N. et al. Fabrication of AA7005/TiB₂-B₄C surface composite by friction stir processing: Evaluation of ballistic behaviour. **Defence Technology**, v. 15, n. 3, p. 363–368, 1 jun. 2019.