

INFLUÊNCIA DO CISALHAMENTO NA TEXTURA E NA FORMAÇÃO DE PADRÕES MACROESTRUTURAIS EM CHAPAS HÍBRIDAS DE AA1050/AA7050 PRODUZIDAS POR PROCESSOS DE LAMINAÇÃO ACUMULADA

Danielle C. C. Magalhães¹, Osvaldo M. Cintho², José B. Rubert³, Vitor L. Sordi¹, Andrea M. Kliauga^{1*}

1 - Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Rodovia Washington Luís, km 235, São Carlos, CEP 13565-905, SP.

2 – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). Av. Carlos Cavalcanti, 4748, Ponta Grossa, CEP 84030-900, PR.

3 – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Rodovia Washington Luís, km 235, São Carlos, CEP 13565-905, SP.

kliauga@ufscar.br

RESUMO

Este estudo foi projetado para determinar o efeito da deformação por cisalhamento na evolução da macroestrutura e textura cristalográfica em chapas híbridas multicamadas de AA1050/AA7050. As chapas foram produzidas por Laminação Acumulada (LA) e Laminação Acumulada Assimétrica (LAA) à 450 °C e 500 °C. A componente de cisalhamento no processamento demonstrou ter grande importância para o desenvolvimento de padrões macroestruturais na chapa. Para a LA, um padrão macroestrutural retilíneo com pequenas ondulações foi obtido, enquanto que para a LAA a macroestrutura é mais ondulada e descontínua devido à formação de bandas de cisalhamento interceptando as camadas. O atrito nas superfícies e nas interfaces em conjunto com a distribuição de deformação e interação de discordâncias com precipitados nas camadas de AA7050, influenciaram a formação das bandas de cisalhamento. Como consequência, uma redução na textura para as chapas produzidas via LAA foi mensurada. Os resultados obtidos permitiram uma compreensão detalhada do papel do cisalhamento na evolução macroestrutural de chapas híbridas multicamadas e deram suporte para o desenvolvimento futuro de novas arquiteturas internas destes materiais.

Palavras-chave: *laminação acumulada, cisalhamento, ligas de alumínio, macroestrutura, textura cristalográfica.*

INTRODUÇÃO

Dentre as diversas rotas de processamento no estado sólido para produção de chapas híbridas multicamadas, a Laminação Acumulada (LA) é amplamente utilizada^(1,2). Neste processo, a junção é consolidada pela combinação de deformação plástica e difusão. No caso de junções de metais dissimilares, uma etapa crítica é atingir uma interface forte, coesa e virtualmente livre de defeitos e, também, controlar a continuidade das camadas. Entretanto, até

o momento, poucos trabalhos dedicaram-se a aplicar a LA em ligas de alumínio, em particular, de alta resistência (série 7000)⁽³⁾.

Similarmente à laminação convencional, o processo de LA resulta em grãos alongados com textura típica de laminação, tais como componentes S {123}<634>, Cobre {112}<111> e Latão {011}<211>, independentemente do material processado⁽⁴⁾. Para atingir um material mais isotrópico, uma componente de deformação por cisalhamento por ser introduzida no processo de LA, pelo uso de um laminador assimétrico. Neste equipamento, as velocidades circunferenciais ou o atrito são diferentes nos rolos e considerável cisalhamento e rotação de corpo rígido são introduzidos. Como consequência, há uma transição da textura de laminação para a textura de cisalhamento, tornando o material mais isotrópico. Assim, pela combinação de processos origina-se a Laminação Acumulada Assimétrica (LAA), que foi primeiramente investigada por Wang e Shi⁽⁵⁾. O principal objetivo, além da modificação da textura cristalográfica, é também melhorar a adesão entre as camadas devido à presença da deformação de cisalhamento que poderia auxiliar na fratura da camada superficial de óxido e favorecer a soldagem no estado sólido⁽⁶⁾.

Além disso, as diferentes configurações macroestruturais possíveis em materiais híbridos multicamadas desempenham um importante papel no comportamento mecânico, bem como podem determinar a iniciação e propagação de trincas e a interatividade entre diferentes materiais no híbrido multicamadas durante a deformação plástica⁽⁷⁾. Portanto, investigar a influência da LA e da LAA no desenvolvimento dessas configurações ou padrões macroestruturais é importante para controlar o processo de manufatura e predizer as propriedades mecânicas. Até o momento, não há comparações detalhadas entre os dois processos e suas implicações em termos de macroestrutura e textura cristalográfica. O objetivo deste trabalho é investigar a influência da deformação por cisalhamento utilizando LA e LAA sobre macroestrutura e textura, combinando uma liga de alumínio de alta resistência (AA7050) como camada de reforço e alumínio comercialmente puro (AA1050) como uma matriz dúctil.

MATERIAIS E MÉTODOS

Duas ligas comerciais foram utilizadas: AA1050 e AA7050. Inicialmente, foram cortadas chapas com dimensões de 50 x 70 mm com espessuras de 1 mm e 2 mm. Antes de serem empilhadas, as chapas foram escovadas com uma escova de aço e limpas em ultrassom com etanol por 5 minutos. Foi posicionada uma chapa de AA7050 com 2 mm de espessura entre duas chapas de AA1050 com 1 mm de espessura. Tal configuração foi laminada a quente, sendo feito um pré-aquecimento de 450 °C ou 500 °C por 5 minutos, com redução de espessura de 50% em um único passe. Imediatamente após a laminação, foi feita têmpera em água em todas as amostras. Na sequência, a chapa foi cortada ao meio, novamente escovada, limpa com etanol, as partes foram empilhadas e, então, foi repetido o ciclo de pré-aquecimento e laminação por LAA ou LA. Este processamento cíclico foi repetido até seis vezes. As chapas foram identificadas como LA (ou LAA) – NX-T, em que N corresponde ao número de ciclos e T é a temperatura de pré-aquecimento. Para a LA foi utilizado um laminador convencional, enquanto que para a LAA foi adotado um laminador assimétrico com razão entre diâmetro de rolos de 1:1,5. Para a caracterização da macroestrutura, amostras foram removidas da seção longitudinal das chapas, preparadas por técnicas de metalografia convencional e observadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) FEI Inspect S50. A textura cristalográfica foi determinada por meio de difração de raios X utilizando um difratômetro Phillips X'Pert MPD. As figuras de polo (111), o background e a curva de defocalização foram medidos na subsuperfície das chapas. As chapas utilizadas nas medidas de textura foram, inicialmente, lixadas para reduzir cerca de 0,5 mm a partir da superfície superior (denominado de 1/4 ao longo do texto) e o mesmo foi reproduzido na superfície inferior (denominado de ³/₄ ao longo do texto).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta as macroestruturas típicas das chapas híbridas multicamadas obtidas por LA e LAA, a 450 °C e 600 °C, após 4X e 6X ciclos. Para a LA, não se observaram significativas diferenças na forma e continuidade das camadas, formando um padrão retilíneo. À 500 °C, entretanto, uma ligeira ondulação pode ser vista nas camadas de AA7050 (Figura 1-d). Em contrapartida, no processamento por LAA, há uma grande diferença na forma e continuidade das camadas, dependendo da temperatura e número de ciclos. Após 4X à 450 °C (Figura 1-e), pode ser visto um padrão macroestrutural ondulado, o qual é acentuado após 6X. Na Figura 1-f, algumas bandas de cisalhamento cortam diversas camadas e estão associadas com a deformação não-uniforme das camadas de AA7050. À 500 °C, o processo de LAA mostrou um padrão ondulado ainda mais definido, com camadas de AA7050 alongadas, empescoçadas e rompidas em diferentes pontos, nos quais as bandas de cisalhamento interceptaram, como pode ser claramente visto na Figura 1-h.



Figura 1: Imagens de MEV em modo de elétrons retroespalhados mostrando as macroestruturas típicas das chapas híbridas de AA1050/AA7050 processadas em diferentes condições. As setas e linhas pontilhadas indicam algumas bandas de cisalhamento. As camadas mais escuras são da liga AA1050 e as camadas mais claras são da liga AA7050.

A presença de um padrão macroestrutural retilíneo ou ondulado parece ser uma consequência de três fatores principais: a estricção (ou empescoçamento) nas camadas mais resistentes a cada ciclo devido às bandas de cisalhamento macroscópicas; o escoamento das camadas menos resistentes que progridem para o interior das camadas mais resistentes, preenchendo-as; e o atrito nas superfícies e nas interfaces⁽⁸⁾. Um ponto interessante é que para a LAA observou-se uma antecipação do processo de estricção das camadas pelas bandas de cisalhamento, visíveis desde o quarto ciclo, em comparação com a LA, na qual somente poucas bandas de cisalhamento podem ser notadas e apareceram após 6 ciclos. Estes diferentes tipos de padrões macroestruturais dependem de diversos fatores, principalmente do comportamento de escoamento das ligas utilizadas nas condições de processamento e a sua tendência em desenvolver bandas macroscópicas de cisalhamento⁽⁹⁾. Além disso, tais padrões podem também afetar as propriedades mecânicas da chapa híbrida.

A Figura 2 apresenta as figuras de polo {111} obtidas por difração de raios X para as amostras submetidas a seis ciclos de LA ou LAA. Para a LA, a textura típica de laminação esperada, contendo as componentes Latão Brass {011}<211>, Cobre {112}< 111> e S {123}<634>, foi obtida em ambas temperaturas de processamento. Por outro lado, para o processamento via LAA, uma forte rotação em torno do eixo transversal é observada, visto que

as componentes A {110}<112>, Ab {112}<110>, B {111}<uvw> e Cubo Rodado {100}<110> foram medidas. Para a LA, uma ligeira rotação em torno do eixo transversal foi detectada. É importante destacar, também, que houve uma redução na intensidade de textura devido ao cisalhamento e à rotação de corpo rígido, que foram introduzidos pela assimetria dos rolos de laminação (processo LAA).



Figura 2: Figuras de polo {111} das sub-superfícies das chapas híbridas AA1050/AA7050 após 6 ciclos em LA ou LAA em duas temperaturas de processamento, como indicado na imagem.

Para metais e ligas com elevada energia de falha de empilhamento (EFE), como é o caso das ligas de Al, as bandas de cisalhamento não são um mecanismo comum de deformação devido à elevada taxa de recuperação dinâmica^{10).} Entretanto, há algumas possíveis fontes de deformação por cisalhamento que podem nuclear bandas de cisalhamento. Na LA, as fontes de cisalhamento foram o atrito nas interfaces e a diferença de tensão de escoamento entre as ligas na temperatura de processamento. Até 6 ciclos, cada camada deforma-se individualmente e a continuidade é mantida. No caso da LAA, as bandas de cisalhamento foram geradas pela componente extra de cisalhamento no processo. Em experimentos prévios com LAA na liga AA1050⁽¹¹⁾ foi mostrado que este processo induz bandas de cisalhamento macroscópicas devido ao escoamento, mesmo em materiais de alta EFE. A presença de tais bandas de cisalhamento contribuem para o refinamento de grão e uma reorientação cristalográfica induzida pela deformação⁽¹⁰⁾. Uma consequência natural desta rotação é a formação de bandas de

cisalhamento, que afetam a textura cristalográfica. No presente trabalho, o efeito predominante foi de redução de intensidade de textura. Em suma, os presentes resultados indicaram que ambos os processos possuem fontes de deformação por cisalhamento e levam à redução da intensidade de textura e à uma mistura de componentes de cisalhamento e laminação, sendo mais intenso na LAA.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi investigada a influência de cisalhamento externo e atrito na formação de padrões macroestruturais durante a LA e LAA de duas ligas de alumínio: AA1050 e AA7050. Após a laminação, foram obtidos padrões macroestruturais retilíneos para LA e ondulados para a LAA, em função da formação de bandas de cisalhamento. Para a LAA foi observada uma redução na intensidade de textura, uma vez que o cisalhamento e a rotação de corpo rígido foram introduzidos devido ao atrito e à assimetria dos rolos. As chapas produzidas por LA apresentaram predominância de textura de laminação até 6 ciclos, enquanto que para LAA as componentes de cisalhamento foram medidas, indicando uma chapa mais anisotrópica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro do Conselho Nacional para Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Proc. 153585/2018-8 e 160274/2019-2) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (Proc. 2016/10997-0).

REFERÊNCIAS

- 1. TSUJI, N.; SAITO, Y.; LEE, S.H.; MINAMINO, Y. ARB (Accumulative Roll-Bonding) and other new techniques to produce bulk ultrafine grained materials. Adv. Eng. Mater., v. 5, p. 338–344, 2003.
- 2. EBRAHIMI, S.H.S. *et al.* Investigation on microstructure and mechanical properties of Al/Al-Zn-Mg-Cu laminated composite fabricated by accumulative roll bonding (ARB). Mater. Sci. Eng. A, v. 718, p. 311–320, 2018.
- 3. HIDALGO-MANRIQUE, P. *et al.* Influence of accumulative roll bonding process on the microstructure and superplastic behaviour of 7075 Al alloy. J. Mater. Sci. Technol., v. 32, p. 774–782, 2016.
- 4. BEAUSIR, B. *et al.* Plastic anisotropy of ultrafine grained aluminium alloys produced by accumulative roll bonding. Mater. Sci. Eng. A, v. 527, p. 3271–3278, 2010.
- 5. WANG, J.L.; SHI, Q.N. Orientation evolution and nucleation mechanism of UFG-copper prepared by SD-AARB with heat treatment. Appl. Mech. Mater., v. 33, p. 63–167, 2010.
- 6. MENDES, A. *et al.* Role of shear in interface formation of aluminum-steel multilayered composite sheet. Mater. Sci. Eng. A, v. 705, p. 142–152, 2017.
- 7. KULAGIN, R. *et al.* Benefits of pattern formation by severe plastic deformation. Appl. Mater. Today, v. 15, p. 236–241, 2019.
- 8. MAGALHÃES, D.C.C. *et al.* The role of shear strain during Accumulative Roll-Bonding of multilayered composite sheets: pattern formation, microstructure and texture evolution. Mater. Sci. Eng. A, v. 796, p. 140055, 2020.
- 9. YAZAR, Ö.; EDIZ, T.; ÖZTÜRK, T. Control of microstructure in deformation processing of metal/metal laminates. Acta Mater., v. 53, p. 375–381, 2005.
- 10. PAUL, H.; MISZCZYK, M.M. Deformation microstructure and texture transformations in FCC metals of medium-to-high stacking fault energy: critical role of micro- and macro-scale shear bands. Arch. Metall. Mater., v. 60, n. 3, 2015.
- 11. DE GODOI, R.P. *et al.* Microstructure, texture and interface integrity in sheets processed by Asymmetric Accumulative Roll-Bonding, Mater. Sci. Eng. A, v. 771, p. 138634, 2019.

INFLUENCE OF SHEAR STRAIN ON TEXTURE AND MACROSTRUCTURAL PATTERN FORMATION IN HYBRID SHEETS OF AA1050/AA7050 PRODUCED BY ACCUMULATIVE ROLL-BONDING PROCESSES

ABSTRACT

This study was designed to determine the effect of shear strain on the macrostructure evolution and crystallographic texture in multilayered hybrid sheets of AA1050/AA7050. The sheets were produced by Accumulative Roll-Bonding (ARB) and Asymmetric Accumulative Roll-Bonding (AARB) at 450 °C and 500 °C. The shear strain demonstrated to have a great role on the development of macrostructural patterns. For ARB, a straight-pattern with slightly waviness was obtained, while for AARB a wavy-pattern and discontinuous layers were observed due to the macroscopic shear banding cutting the layers. The friction at surfaces and at interfaces together the strain distribution and dislocation-precipitation interactions on the AA7050 layers have been influenced the shear banding. As a consequence, a reduction on the texture intensity was measured in the AARB sheets. The findings in this work allowed an in-depth understand of the role of shear strain on the macrostructure evolution in multilayered hybrid sheets and they gave support to further development of new internal architectures in these materials.

Keywords: *accumulative roll-bonding, shear strain, aluminum alloys, macrostructure, crystallographic texture.*