

ESTABILIDADE TÉRMICA DE PLACAS MULTICAMADAS DE AÇO-ALUMÍNIO FABRICADAS POR LAMINAÇÃO ASSIMÉTRICA

Gabriele Ribeiro Gomes

Anibal de Andrade Mendes Filho

CECS - UFABC – Av. dos Estados, 5001, Santo André - SP

gabriele.ribeiro.ismart@gmail.com; anibal.mendes@ufabc.edu.br

Resumo. Processos de laminação são comumente empregados na fabricação de metais planos, barras e outros perfis. Estes processos são caracterizados por possibilitar alta produtividade, bom controle dimensional e microestrutural dos metais processados. Neste trabalho é investigada a utilização de laminação acumulada assimétrica, para a obtenção de laminados multicamadas de Aço IF e Alumínio. Na laminação assimétrica incorpora-se à deformação uma componente adicional de cisalhamento que pode beneficiar a união das camadas e o refino microestrutural. Laminados de Aço-Al têm grande potencial para aplicação elétrica por combinarem elevada resistência mecânica e condutividade elétrica. Neste estudo foram fabricadas placas multicamadas de Aço-Alumínio com dois passes de laminação acumulada assimétrica e avaliada sua estabilidade térmica a 450 °C. As amostras foram caracterizadas através de medidas de microdureza Vickers e a microestrutura foi observada com microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura. Foi observado que a microdureza e a microestrutura destas seções é gradiente, com grãos mais refinados e elevados valores de microdureza nas vizinhanças das interfaces internas. O recozimento pós-deformação a 450 °C não causou redução significativa na dureza do Aço e do Alumínio. Uma camada do intermetálico Al_5Fe_2 formou-se a 450 °C e sua fração volumétrica é diretamente proporcional ao tempo de recozimento.

Palavras chave: Laminados multi-metálicos. Aço-Al. Laminação assimétrica. Junção por laminação

1. INTRODUÇÃO

Uma quantidade relevante da energia elétrica produzida no Brasil é desperdiçada durante a transmissão e distribuição da energia até os centros de consumo. Estas perdas poderiam ser reduzidas pela diminuição da resistência elétrica dos cabos, se, por exemplo, for reduzida a resistividade elétrica do condutor ou a deflexão dos cabos que ocorre entre os postes de suporte. Uma das abordagens para esse problema é a busca de materiais com combinações otimizadas de resistência mecânica e condutividade elétrica. Essa solução foi parcialmente explorada em estudos de cabos de transmissão construídos por compósitos de Al com diferentes tipos de reforços (Lao e Delannay, 1998; Peng, 2005; Chellappa et al., 1995; Liu et al., 2001; Ding et al., 1999; Seo e Kang, 1997; Li et al., 2007). Apesar de possuírem características de desempenho atraentes, tanto os compósitos de matriz metálica quanto os de matriz polimérica não obtiveram penetração no mercado devido aos seus altos custos de produção. Portanto, há necessidade de um novo método de fabricação que seja capaz de aumentar a resistência mecânica do condutor e do reforço, através da redução do tamanho de grão, e ao mesmo tempo diminuir a resistividade elétrica dos condutores de Al e de Cu.

Uma estratégia promissora para obtenção desses materiais é a utilização de técnicas de deformação plástica severa (DPS) (Lapovok, 2012; Ng, 2013; Mendes, 2017; Medvedev, 2018a; Medvedev, 2018b). Mais recentemente essas técnicas têm sido empregadas com sucesso na obtenção de materiais híbridos (Ashby e Bréchet, 2003; Belgelzimer, 2017), os quais são conhecidos por combinar valores não usuais de propriedades concorrentes. Na prática o material condutor é quase sempre uma liga de Al ou Cu composto por vários fios associados ao reforço, que comumente é de fios de aço; porém outros materiais mais leves têm emergido como candidatos para o reforço. Deve ser notado que se o constituinte com alta condutividade elétrica tiver sua resistência mecânica aumentada em função da redução do tamanho de grão, o volume de fios de reforço de aço pode ser diminuído, diminuindo assim o peso do cabo, e, como explicado anteriormente, diminuindo as perdas de energia durante a transmissão e distribuição.

Dentre os vários métodos de processamento DPS, a laminação acumulada tem sido frequentemente empregada para a produção de laminados multicamadas (Hausol et al., 2011; Yang et al., 2010; Tsuji et al., 1999). No entanto, relativamente poucos trabalhos foram realizados para estudar o efeito do cisalhamento simples adicional que pode ser introduzido com o uso de laminação assimétrica (Lee, et al., 2003; Ng et al., 2013; Wierzbka et al., 2015; Mendes, et al. 2017). Como tendência geral, tem sido demonstrado que a melhoria das propriedades mecânicas destes materiais multicamadas está diretamente correlacionada como a magnitude da deformação por cisalhamento no processo de laminação.

Neste trabalho, foi estudada a estabilidade térmica e possibilidade de melhoria de propriedades da rota de processamento envolvendo laminação assimétrica, previamente estudada pelos presentes autores (Mendes, et al. 2017), através de um tratamento térmico pós deformação. O estudo foi realizado através da análise de evolução microestrutural e microdureza dos laminados multicamadas de Al-Aço IF.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Chapas de Al AA1050 (Al-0.05Cu-0.4Fe-0.05Mg-0.05Mn-0.25Si-0.05V-0.03Ti-0.05Zn – wt%) e Aço IF (Fe-0.005C-0.05Mn-0.011P-0.001Si-0.006Cu-0.018Ni-0.08Ti-0.002N – wt%) foram cortadas em placas com dimensões de 25 mm (largura) x 100 mm (comprimento). A espessura da chapa de Al era de 1 mm e da chapa de Aço 2 mm. Para uniformizar a microestrutura dos materiais iniciais antes da laminação, as placas de Al e Aço IF foram recozidas a 350 °C por 60 min e a 800 °C por 60 min, respectivamente, seguido de resfriamento ao ar. A microestrutura inicial com grãos equiaxiais e tamanho de grão uniforme ao longo das placas. O tamanho de grão médio para o Al era de $20 \pm 5 \mu\text{m}$ e $30 \pm 7 \mu\text{m}$ para o aço IF.

O processo de laminação foi realizado na Universidade Deakin, na Austrália, em um laminador Carl Wezel Mühlacker adaptado para laminação assimétrica. Maiores detalhes sobre esse processamento e imagens deste laminador podem ser obtidas nas refs. (Ng et al., 2013; Mendes et al., 2017). O laminador era equipado com rolos assimétricos, isto é, com diâmetros diferentes. A razão entre os diâmetros (d_r) dos rolos variava de 1,0 (laminação convencional) a 2,0; criando assim uma diferença na velocidade tangencial entre os rolos de cima e de baixo. A d_r empregada no presente estudo foi 2,0.

Antes de empilhar as placas para formar o sanduiche que seria laminado, as superfícies do Al e do Aço IF foram preparadas com escova de aço e limpas com acetona. Este procedimento foi adotado para eliminar a presença de óxidos na superfície e remover possíveis graxas ou lubrificantes das superfícies. Após esta preparação as amostras foram empilhadas, com o Al entre o Aço IF, e foram fixadas através de um arame passante pelas extremidades das placas para evitar deslizamento durante a laminação.

Dois passes de laminação acumulada assimétrica (AARB) foram aplicados para obtenção da amostra de interesse. Em ambos os casos a laminação foi realizada a 400 °C com redução de espessura de 50% por passe. Após o primeiro passe o sanduiche laminado era cortado ao meio ao longo de seu comprimento. As superfícies de contato foram novamente preparadas com o mesmo procedimento descrito anteriormente, então as metades foram empilhadas e laminadas novamente para obter a amostra final. Um forno tipo mufla com atmosfera de argônio foi utilizado para aquecer as amostras antes da laminação. As amostras foram mantidas no forno a 400 °C durante 10 min antes de cada etapa de laminação. Após laminadas as amostras foram resfriadas em água para evitar mudanças estruturais durante o resfriamento.

A caracterização mecânica foi feita através de ensaios de microdureza. Utilizando a escala Vickers foram realizadas medidas de microdureza ao longo da seção transversal das amostras. Foi utilizada uma carga normal de 1 kgf e um tempo de aplicação de carga de 10s.

A avaliação da estabilidade térmica foi realizada através de recozimentos pós-deformação a 450 °C em forno tipo mufla por 60, 90, 180 e 360 min. seguido de resfriamento ao ar. Esta temperatura foi selecionada a partir de resultados reportados na referência (Movahedi et al., 2011) para materiais similares ao do presente estudo obtidos por laminação convencional.

Para a microscopia ótica as amostras foram inicialmente cortadas por meio de um disco diamantado e embutidas a frio em resina poliéster. Na sequência, utilizando uma lixadeira e uma politriz universal, as amostras foram lixadas em lixas d'água com granulometria entre 120 e 1200, em seguida polidas em pano feltro com alumina 1 μm . Finalmente, as superfícies polidas foram submetidas ao ataque químico Nital 3%, seguido de limpeza em banho ultrassônico e secagem em corrente de ar quente. A observação da microestrutura também foi feita através via microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura (JSM-6010LA- JEOL). A quantificação da fração volumétrica da camada de intermetálico foi realizada através da medição de área no software ImageJ.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra a microestrutura da amostra como processada via laminação assimétrica e após recozimentos a 450 °C. É possível notar que os grãos de aços estão alongados e orientados na direção de laminação em todas as amostras. Além disso, a amostra inicial apresenta uma boa junção entre os materiais, livre de vazios e sem a presença de intermetálicos, como destacado na Figura 1a. Para todos os tempos de recozimento houve a formação de uma camada intermetálica entre as camadas de Al e Aço. Mesmo após o recozimento ainda é observado que a microestrutura do aço permanece refinada e orientada na direção de laminação. Por fim, nota-se que a camada intermetálica se torna mais contínua e espessa conforme se aumenta o tempo de recozimento.

A evolução da microdureza do Al e do Aço e quantificação da fração volumétrica da camada intermetálica é apresentada na Figura 2a. A Figura 2b apresenta imagens das indentações de microdureza no Aço e no Al. A indentação

e resultados de microanálise química via EDS da camada intermetálica na amostra recozida por 360min são mostrados nas Figuras 2 de c) a d).

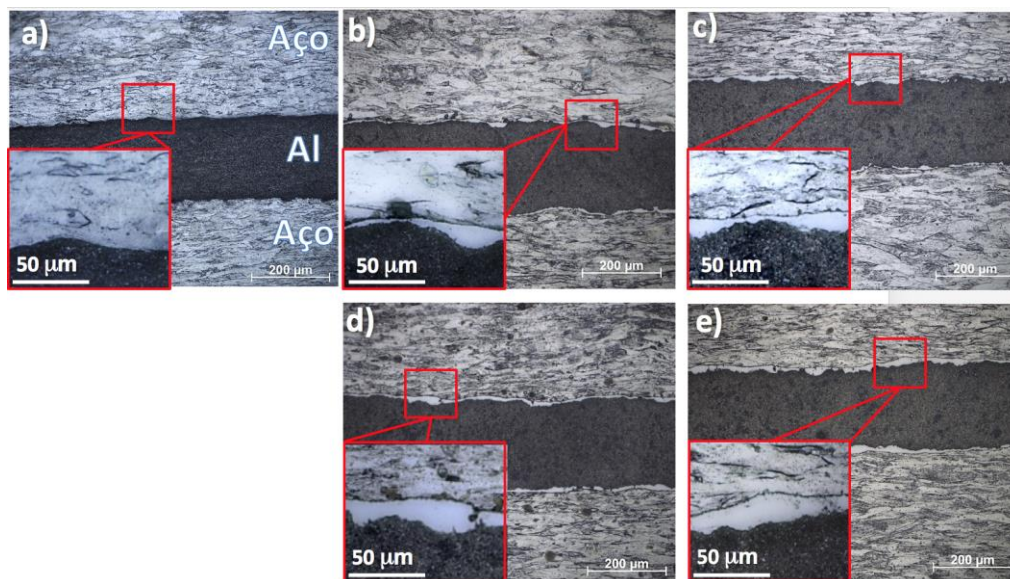


Figura 1. Observações microestruturais via microscopia óptica. Em a) amostra como processada. Em b) recozimento por 60min; em c) 90min; em d) 180min e em e) 360min.

É possível observar que ambos os materiais apresentam pequena variação na microdureza com o tratamento térmico empregado. Por outro lado, nota-se um crescimento progressivo com o tempo de recozimento da camada de intermetálico. A microdureza média da camada intermetálica é de HV1068. Em função da microdureza e da análise química o intermetálico formado pode ser identificado como Al_5Fe_2 . A presença do intermetálico Al_5Fe_2 também foi observada por Kobayashi e Yakou, 2002 e Jindal e Srivastava, 2008 ao investigarem materiais similares ao aqui estudados.

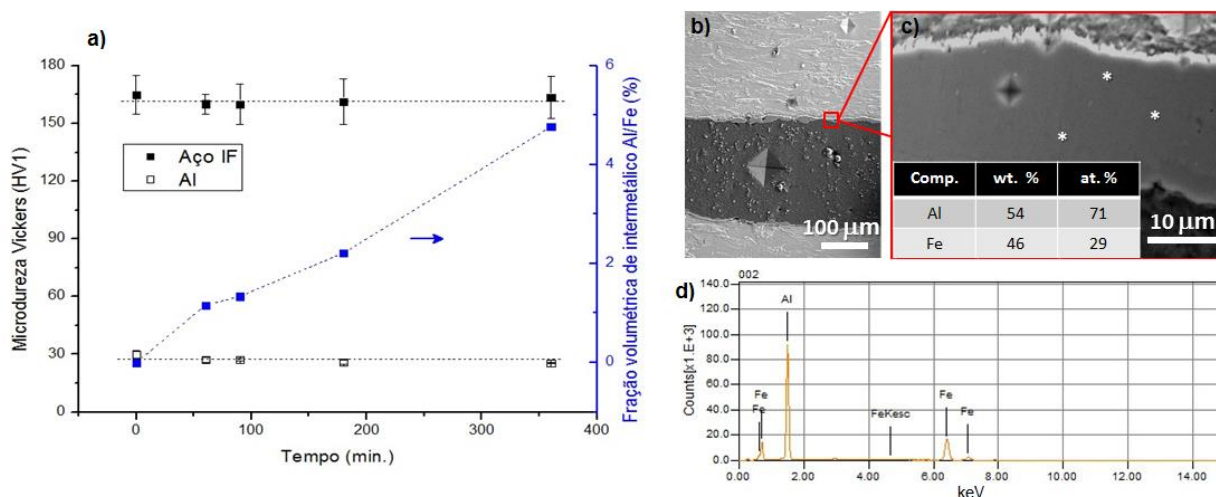


Figura 2. Em a) a evolução da microdureza Vickers e fração volumétrica da camada de intermetálico para diferentes tempos de recozimento a 450 °C. Em b) observação via MEV/SE das indentações Vickers no Al e no Aço. Em c) a indentação na camada intermetálica e quantificação da composição química. Em d) espectro de EDS típico observado nas posições destacadas com asterisco na Figura 2 c).

Tratamentos térmicos pós-deformação podem ser bastante úteis na fabricação de placas metálicas multicamadas, com potencial de aumentar a resistência da junção e diminuir a tensões residuais entre as camadas internas. Diferentemente do observado no presente estudo, Movahedi e colaboradores (Movahediet al., 2011) observaram a ocorrência de intermetálico na interface Al-Aço somente após 180min de recozimento a 450°C. Esta diferença pode ser atribuída às diferenças nas rotas de processamento nos dois casos. No presente estudo, utilizou-se laminação assimétrica, o processamento impõe ao material maiores níveis de deformação quando comparado com a laminação convencional. Maiores níveis de deformação induzem a formação de quantidades superiores de defeitos

cristalinos nas interfaces bi metálicas, favorecendo a interdifusão e acelerando a formação de intermetálicos. Estes intermetálicos são, na maioria dos casos, indesejáveis, pois contribuem para a fragilização do material e são deletérios para a condutividade elétrica. Dessa forma, os recozimentos sugeridos na literatura parecem não ser benéficos para o material e rota de processamento aqui estudados. Por outro lado, existe o potencial de se aumentar a resistência deste material com a presença de intermetálicos. Assim, é necessário que estudos mais aprofundados sejam feitos para que os parâmetros dos tratamentos térmicos pós-deformação sejam aprimorados para, possivelmente, aperfeiçoar propriedades dos materiais fabricados via laminação assimétrica.

4. CONCLUSÕES

Neste estudo laminados multicamadas de aço-alumínio foram obtidos com sucesso através de laminação acumulada assimétrica. A laminação assimétrica resultou em uma microestrutura refinada no Aço e aumentou a dureza do material laminado. O Aço e o Al presentes no compósito não apresentaram variações significativas de dureza mesmo após recozimentos a 450 °C. Esta temperatura de recozimento pós-deformação levou a formação de uma camada de Al_5Fe_2 com tamanho diretamente proporcional ao tempo de tratamento térmico. Os tratamentos térmicos aqui empregados não parecem ser uma boa alternativa para aprimoramento das propriedades mecânicas e elétricas deste material, outras temperaturas e tempos de recozimento precisam ser estudados no futuro para atingir esse objetivo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CEM-UFABC pelo uso das facilidades de microscopia eletrônica e à PROPES-UFABC pelo programa de iniciação científica PDPD (Pesquisando Desde o Primeiro Dia) e auxílio financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Ashby, M.F. Bréchet, Y.J.M., 2003. "Designing hybrid materials". *Acta Materialia*, Vol. 51, p. 5801-5821.
- Beygelzimer, Y. Estrin, Y. Kulagin, R., 2017. "Synthesis of Hybrid Materials by Severe Plastic Deformation: A New Paradigm of SPD Processing". *Advanced Engineering Materials*, Vol. 17, p. 1853 – 1861.
- Chellappa, V. Chiou, Z.W. Jang, B.Z., 1995. "Electromechanical and electrothermal behaviours of carbon whisker reinforced elastomer composites". *Journal of Materials Science*, Vol. 30, p. 4263-4272.
- Ding, D.Y. Wang, D.Z. Yao, C.K., 1999. "Control of the interfacial reaction in aluminum borate whisker-reinforced 6061Al composite by sol-gel alumina coating". *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 18, p. 569-570.
- Hausol, T. Hoppel, Goken, H.-W. M., 2011. "Microstructure and mechanical properties of accumulative roll bonded AA6014/AA5754 aluminium laminates". *Materials Science Forum*, Vol. 667, p. 217-222.
- Jindal, V. Srivastava, V. C. 2008. "Growth of intermetallic layer at roll bonded IF-steel/aluminium interface". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 195, p. 88-93.
- Kobayashi, S. Yakou, T., 2002. "Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminium by diffusion-treatment". *Materials Science and Engineering A*, Vol. 338, p. 44-53.
- Lapovok, R. Ng, H.P. Thomus, D. Estrin, Y., 2012. "Bimetallic Copper-Aluminium Tube by Severe Plastic Deformation". *Scripta Materialia*, Vol. 66, p. 1081-1084.
- Lee, H. Sakai, T. Shin, D.H., 2003. "Fabrication of ultrafine grained aluminum by differential speed accumulative roll-bonding (ARB) process". *Materials Transactions*, Vol. 44, p. 1382-1385.
- Li, G.R. Zhao, Y.T. Dai, Cheng, X.N. Wang, H.M. Chen, G., 2007. "Fabrication and properties of in situ synthesized particles reinforced aluminum matrix composites of Al-Zr-O-B system". *Journal of Materials Science*, Vol. 42, p. 5442-5447.
- Liu, H. Wang, N. Liang, N., 2001. "An elasto-plastic constitutive relation of whisker-reinforced metal-matrix composite". *Materials Science Research International*, Vol. 7, p. 90-95.
- Medvedev, A. E. Lapovok, R. Koch, E. Höppel, H. M. G., 2018. "Optimisation of interface formation by shear inclination: Example of aluminium-copper hybrid produced by ECAP with back-pressure". *Materials and Design*, Vol. 146, p. 142-151.
- Mendes, A. Timokhina, I. Molotnikov, A. Hodgson, P. D. Lapovok, R., 2017. "Role of shear in interface formation of aluminium-steel multilayered composite sheets". *Materials Science and Engineering A*, Vol. 705, p. 142-152.

- Medvedev, A. Mendes, A. Lapovok, R. Lee, S. 2018. "Shear-induced, solid-state joining of Ti-6Al-4V and Ti17 titanium alloys". *Materials Science and Engineering A*, Vol. 737, p. 253 – 264.
- Mohavedi, M. Kokabi, A. H. Reihani, S. M., 2011 "Investigation on the bonding strength of Al-1100/St-12 roll bonded sheets, optimization and characterization". *Materials and Design*, Vol. 32, p. 3143-3149.
- Ng, H. P. Przybilla, T. Lapovok, R., 2013. "Asymmetric accumulative roll bonding of aluminium-titanium composite sheets". *Materials Science and Engineering A*, Vol. 576, p. 306-315.
- Ng, H. P. Przybilla, T. Schmidt, C. Lapovok, R. Orlov, D. Höppel, H.-W. Göken, M., 2013. "Asymmetric accumulative roll bonding of aluminium-titanium composite sheets". *Materials Science and Engineering A*, Vol. 576, p. 306-315.
- Peng, H.-X., 2005. "Manufacturing titanium metal matrix composites by consolidating matrix coated fibres". *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 21, p. 647-651.
- Seo, H. Kang, C. G., 1997. "Micromechanical solidification heat transfer and initial strain estimation in the fabrication process of particles-reinforced aluminum composites". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 72, p. 152-161.
- Tao, L. Delannay, F., 1998 "Influence of fibre interconnections on the thermomechanical behaviour of metal matrix composites consisting of a Zn-Al alloy reinforced with steel fibres". *Acta Materialia*, Vol. 46, p. 6497-6509.
- Tsuji, N. Saito, Y. Utsunomiya, H. Tanigawa, S., 1999. "Ultra-fine grained bulk steel produced by accumulative roll-bonding (ARB) process". *Scripta Materialia*, Vol. 40, p. 795-800.
- Wierzba, A. Mroz, S. Szota, P. Stefanik, A. Mola, R., 2015. "The influence of the asymmetric ARB process on the properties of Al-Mg-Al multi-layer sheets". *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 60, p. 2821-2825.
- Yang, D. Cizek, P. Hodgson, P. D. Wen, C., 2010. "Ultrafine equiaxed-grain Ti/Al composite produced by accumulative roll bonding". *Scripta Materialia*, Vol. 62, p. 321-324.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

THERMAL STABILITY OF MULTILAYERED STEEL-ALUMINUM PLATES MANUFACTURED VIA ASYMMETRIC ROLLING

Gabriele Ribeiro Gomes

Anibal de Andrade Mendes Filho

CECS - UFABC – Av. dos Estados, 5001, Santo André - SP

gabriele.ribeiro.ismart@gmail.com; anibal.mendes@ufabc.edu.br

Abstract. Rolling processes are widely used to manufacture metallic plates, bars and some other profiles. These processes are well known for their high productivity, good dimensional and microstructure control of the processed metals. This work investigates the use of asymmetric accumulative rolling to obtain multilayered laminates of Steel and Al. Asymmetric rolling incorporates an additional shear component which is expected to benefit the joining between the layers and improve the microstructure refinement. Steel-Al laminates have great potential for application as over-head long distance electrical conductors due to the combination of high mechanical strength and electrical conductivity. Steel-Al samples were manufactured by stacking Al plates between two Steel plates in order to obtain a sandwich like structure. This sandwich like stacks, with Al in the middle, were processed by two passes of accumulative asymmetric rolling and its thermal stability at 450°C was assessed. The obtained samples were characterized by Vickers microhardness and the microstructure was observed via optical microscopy and scanning electron microscopy. It was observed a gradient microhardness and microstructure, with more refined grains and higher hardness values at regions neighbouring the internal interfaces. The post-deformation annealing at 450°C did not cause significant decrease in hardness for both Al and Steel. An intermetallic layer, identified as Al_3Fe_2 , was formed after the annealing and its size is directly proportional to the annealing time.

Keywords: Multi-metallic Laminates. Steel-Al. Asymmetric rolling. Roll bonding.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.