cbecimat26
26° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
22 a 26 de novembro de 2026
Costão do Santinho
Florianópolis-SC

Influência da Transformação Martensítica devido à Deformação a Frio do Aço Inoxidável AISI 321 Estabilizado Termicamente com Titânio

Alex Pereira de Souza[1], Pedro Soucasaux Pires Garcia[2], Juan Manuel Pardal[1] Sérgio Souto Maior Tavares[1], Geronimo Perez[1], André Rocha Pimenta[3]
1. Universidade Federal Fluminense; 2. Universidade Federal do Rio de Janeiro; 3. Instituto Federal do Rio de janeiro.

Introdução

Os aços inoxidáveis austeníticos metaestáveis, como o grau AISI 321, são amplamente utilizados devido à sua excelente conformabilidade e resistência à corrosão, sendo frequentemente processados por conformação a frio [1]. Durante a deformação plástica, a matriz austenítica (γ- CFC) pode se transformar em martensita induzida por deformação (α' - TCC) via efeito TRIP (*Transformation-Induced Plasticity*), o que eleva a resistência mecânica e a capacidade de encruamento, mas pode reduzir a ductilidade e a resistência à corrosão do material [2,3]. A estabilidade da austenita e a cinética dessa transformação dependem diretamente da Energia de Falha de Empilhamento (SFE), controlada pelo teor de carbono em solução sólida [4]. No AISI 321, o titânio atua sequestrando o carbono para formar carbetos de titânio (TiC), inibindo a precipitação deletéria de carbetos de cromo ($Cr_{23}C_6$) [5]. Contudo, essa precipitação reduz o carbono livre na matriz, alterando localmente a SFE e influenciando diretamente a suscetibilidade à transformação martensítica [6]. Compreender a interação entre o teor de carbono, os tratamentos térmicos e a deformação a frio é crucial para otimizar as propriedades finais da liga em aplicações industriais [7].

Objetivos

Este estudo tem como objetivo avaliar o impacto da transformação martensítica induzida por deformação no aço inoxidável AISI 321, analisando a influência do teor de carbono no tratamento térmico de estabilização, a fim de fornecer subsídios para otimizar o processamento dessa liga em aplicações industriais que envolvem conformação a frio.

Metodologia

Para o desenvolvimento do estudo, foram utilizados três lotes de tubos de aço inoxidável AISI 321 com teores distintos de carbono em peso, classificados em baixo (BC - 0,015%), médio (MC - 0,035%) e alto carbono (AC - 0,064%). As amostras extraídas foram submetidas a um tratamento térmico de solubilização a 1100°C por 40 minutos em atmosfera inerte, seguido de resfriamento em água para garantir a homogeneização da matriz austenítica. Posteriormente, o material foi processado por laminação a frio à temperatura ambiente sob diferentes níveis de deformação verdadeira (ε variando de 0,00 a 3,68), incluindo uma condição adicional na qual a liga AC foi submetida a resfriamento criogênico em nitrogênio líquido (77 K) entre os passes de laminação. A caracterização microestrutural e a quantificação das fases foram realizadas por microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios X (DRX) e magnetometria de amostra vibrante (MAV). A resposta mecânica e o endurecimento das ligas foram monitorados por ensaios de microdureza Vickers com carga de 9,8 N por 15 segundos. Por fim, realizou-se a estimativa da Energia de Falha de Empilhamento (SFE) por modelos matemáticos e a previsão do equilíbrio de fases em função da temperatura utilizando o software Thermo-Calc®.

Resultados e Discussão

A caracterização inicial por MO e MEV confirmou matrizes totalmente austeníticas e a presença de precipitados finos de TiC, os quais atuam inibindo a formação deletéria de $Cr_{23}C_6$. Com o avanço da deformação plástica a frio, observou-se a nucleação progressiva de martensita (α'), cuja cinética de transformação seguiu um comportamento sigmoidal com excelente ajuste aos modelos cinéticos da literatura. A liga de BC apresentou a menor Energia de Falha de Empilhamento (SFE) calculada e, consequentemente, a maior suscetibilidade ao efeito TRIP, atingindo frações volumétricas de martensita significativamente superiores em baixos níveis de deformação em comparação às ligas MC e AC. Em contrapartida, o maior teor de carbono em solução sólida na liga AC elevou drasticamente a SFE (incremento de 75,6% em relação à BC via equações termodinâmicas), retardando a transformação e exigindo deformações severas (ε>2,0) para iniciar uma reação expressiva. Os ensaios de microdureza Vickers corroboraram diretamente a evolução microestrutural e os dados de magnetometria (MAV), revelando um endurecimento precoce e extremamente agressivo na liga BC (ultrapassando 480 HV em ε≈0,52) decorrente da rápida formação de martensita ferromagnética associada ao refino por dispersão de carbetos de TiC. Por fim, as análises de DRX via refinamento de Rietveld validaram a integridade estrutural das fases e confirmaram a complementaridade das técnicas na quantificação da instabilidade da austenita frente à conformação mecânica.

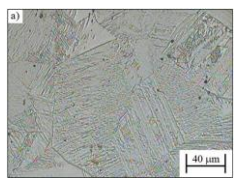
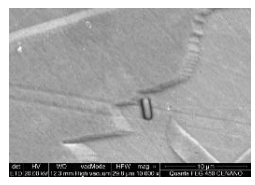


Figura 1. Microestrutura das amostras solubilizadas a 1100 °C: a) BC-0,00 e b) AC-0,00.


Figura 2. Imagem obtida no MEV-FEG exibindo a microestrutura da amostra AC-0.00,destacando a presença de precipitados finos dispersos na matriz.

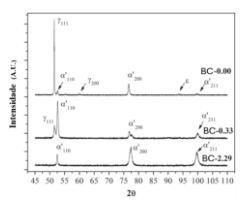


Figura 3. Difratogramas de raios X de amostras de BC com deformações verdadeiras de (ε) 0,00, 0,33 e 2,29.

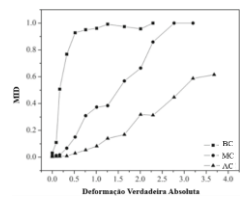


Figura 4. Fração volumétrica de martensita em função da deformação verdadeira..

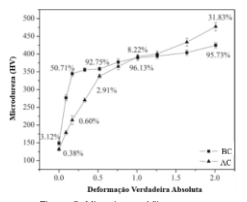


Figura 5. Microdureza Vikers em função da deformação verdadeira das ligas BC e AC.

Conclusões

O estudo demonstrou que o teor de carbono atua como o principal modulador da SFE e da cinética de transformação martensítica induzida por deformação no aço AISI 321. A liga BC apresentou a menor SFE, resultando em uma cinética extremamente ativa que favorece o efeito TRIP e promove frações volumétricas de martensita significativamente superiores sob deformações moderadas. Esse fenômeno gerou um endurecimento precoce e brusco na liga BC (ultrapassando 480 HV), potencializado pela dispersão de finos precipitados de TiC que atuam como barreiras ao movimento de discordâncias. Em contrapartida, o maior teor de carbono em solução sólida na liga AC elevou drasticamente a SFE (incremento de 75,6%), retardando a transformação e exigindo deformações severas para iniciar o processo. Por fim, a forte correlação entre os resultados de MAV, microdureza Vickers e DRX confirmou a complementaridade e a eficácia dessas técnicas no monitoramento indireto da estabilidade de fases e da evolução microestrutural da liga submetida à conformação a frio.

Referências

[1] J. M. Pardal et al., “Influence of carbon content on the martensitic transformation of titanium stabilized austenitic stainless steels,” International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 108, no. 1–2, pp. 345–356, May 2020.
[2] A. Lavakumar et al., “Role of surrounding phases on deformation-induced martensitic transformation of retained austenite in multi-phase TRIP steel,” Materials Science and Engineering: A, vol. 874, p. 145089, 2023.
[3] M. B. Leban and R. Tisu, “The effect of TiN inclusions and deformation-induced martensite on the corrosion properties of AISI 321 stainless steel,” Eng Fail Anal, vol. 33, pp. 430–438, 2013.
[4] S. Curtze, V.-T. Kuokkala, A. Oikari, J. Talonen, and H. Hänninen, “Thermodynamic modeling of the stacking fault energy of austenitic steels,” Acta Mater, vol. 59, no. 3, pp. 1068–1076, 2011.
[5] L. V. Radionova, D. V. Perevozchikov, A. N. Makoveckii, V. N. Eremin, A. M. Akhmedyanov, and S. V. Rushchits, “Study on the Hot Deformation Behavior of Stainless Steel AISI 321,” Materials, vol. 15, no. 12, Jun. 2022.
[6] P. S. P. GARCIA, “INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS TÉRMICOS NA CINÉTICA DA TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA DE AÇOS INOXIDÁVEIS ESTABILIZADOS AO TITÂNIO CONTENDO DIFERENTES TEORES DE CARBONO,” UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, 2019.
[7] S. Patil, V. Shambu, S. Chatterjee, D. Bajpeyee, N. Suryawanshi, and M. J. N. V. Prasad, “Investigation of defect formation in cold pilgered stainless steel pipes: Role of grain size and secondary phases,” Eng Fail Anal, vol. 175, p. 109587, 2025.