



Análise de uma união bimetálica produzida por forjamento a morno de um aço obtido por manufatura aditiva e alumínio laminado

Joélson Vieira da Silva¹

Lirio Schaeffer²

Anderson Daleffe³

Henrique Cechinel Casagrande⁴

Gilson de March⁵

Jamile Thön Langbehn⁶

Vânia Medeiros Ribeiro³

Resumo: Este estudo investiga a viabilidade da união bimetálica entre uma pré-forma de aço de baixa liga produzida por manufatura aditiva (*WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing*) e uma barra de alumínio AA6351 laminada, por meio do processo de forjamento a morno. A combinação entre manufatura aditiva e deformação termomecânica visa explorar uma associação entre a flexibilidade geométrica da deposição por arco com arame e as propriedades mecânicas melhoradas pela deformação plástica controlada. Foram realizadas uniões com temperaturas médias de 750 °C, analisando sua deformação térmica e observações do comportamento do aço em impressões na direção de 0°, 45° e 90° a fim de analisar sua anisotropia. A caracterização microestrutural evidenciou a formação de uma zona de ligação intermetálica entre os materiais, cuja união foi sensivelmente influenciada pela deformação e temperatura dos metais. Ensaios de tração e dureza revelaram que a integridade da união depende criticamente da adesão metalúrgica na interface. Os resultados demonstram que o forjamento a morno é uma rota promissora para integrar componentes bimetálicos aço-alumínio com potencial aplicação em setores como o automotivo e aeroespacial, onde se busca aliar leveza e resistência mecânica.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Forjamento a morno. Forjamento bimetálico. União bimetálica.

¹ Doutorando, UFRGS, E-mail: joelson.silva@satc.edu.br

² Doutor, UFRGS. E-mail: schaefer@ufrgs.br

³ Doutor, UNISATC. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br

⁴ Doutorando, UFSC. E-mail: henrique_cechinel@satc.edu.br

⁵ Doutorando, UFRGS, E-mail: gilson.march@satc.edu.br

⁶ Doutoranda, UFRGS, E-mail: Jamile.thon@satc.edu.br



1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por elementos metálicos mais leves e resistentes tem impulsionado o desenvolvimento de soluções bimetálicas que combinam diferentes materiais em uma única peça funcional. Em setores como o automotivo e o aeroespacial, a união entre aço e alumínio surge como uma alternativa estratégica, permitindo aliar elevada resistência mecânica com significativa redução de peso estrutural [1], [2]. No entanto, a compatibilidade metalúrgica entre esses dois metais impõe desafios técnicos relevantes, como a formação de compostos intermetálicos frágeis que comprometem a integridade da união [3].

Nesse contexto, o forjamento a morno se apresenta como uma rota promissora para promover a união entre metais dissimilares. Trabalhando em temperaturas intermediárias (entre 400 °C e 750 °C), essa técnica busca facilitar a deformação plástica e ativar mecanismos de difusão interfacial, sem causar degradação microestrutural severa ou crescimento excessivo de fases intermetálicas [4], [5]. Estudos indicam que a aplicação de pressão controlada em condições térmicas moderadas é capaz de gerar uniões metalurgicamente coesas entre aço e alumínio, com zonas de transição otimizadas para resistência mecânica e adesão [6].

A integração da manufatura aditiva ao processo convencional de forjamento amplia as possibilidades de design e funcionalidade das peças bimetálicas. Em particular, a técnica de deposição por arco com arame (*Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM*) permite a produção rápida e econômica de pré-formas metálicas com geometrias complexas, além de proporcionar controle localizado da composição e propriedades do aço depositado [7], [8], [9]. A combinação entre WAAM e forjamento a morno oferece, assim, uma abordagem híbrida capaz de unir flexibilidade de projeto, integridade estrutural e desempenho funcional em componentes multicomponentes.

Diante desse panorama, este trabalho investiga a união bimetálica entre uma pré-forma de aço de baixa liga AWS A5.28 E110C-G obtida por WAAM e uma barra de alumínio laminado ABNT NBR ISO209 6351, por meio do processo de forjamento a morno. O objetivo é compreender os mecanismos de ligação interfacial, caracterizar as propriedades microestruturais e mecânicas da zona de união e avaliar o potencial da rota híbrida para aplicações industriais. A análise inclui a



análise metalográfica da união, comportamento isotrópico e resistência mecânica do material depositado e, visando otimizar a qualidade metalúrgica e a resistência da junção bimetálica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 UNIÃO BIMETÁLICA ENTRE AÇO E ALUMÍNIO

A união de metais dissimilares, como aço e alumínio, tem ganhado destaque na engenharia de materiais devido ao crescente interesse em componentes leves e resistentes, especialmente em setores que exigem eficiência estrutural e energética, como os segmentos automotivo e aeroespacial [1]. Entretanto, a diferença significativa nas propriedades físico-químicas desses metais, como pontos de fusão, coeficientes de expansão térmica e comportamento eletroquímico, impõe desafios técnicos à criação de uniões duráveis. Um dos principais entraves é a formação de compostos intermetálicos frágeis na interface, que comprometem a resistência mecânica da união [3].

2.2 FORJAMENTO A MORNO COMO TÉCNICA DE UNIÃO SÓLIDA

O forjamento a morno se apresenta como uma alternativa promissora para promover uniões metalurgicamente coesas entre metais dissimilares. Operando em temperaturas intermediárias (tipicamente entre 400 °C e 750 °C), esse processo visa ativar mecanismos de difusão sem induzir fusão localizada ou crescimento excessivo de fases intermetálicas [9]. Em comparação ao forjamento a quente, o forjamento a morno oferece menor oxidação superficial e maior precisão dimensional, além de reduzir o consumo energético e os riscos de deterioração microestrutural [4]. Estudos mostram que, ao controlar adequadamente os parâmetros térmicos e a pressão aplicada, é possível obter uma ligação sólida entre aço e alumínio, com espessura intermetálica minimizada e boa adesão interfacial [6].



2.3 MANUFATURA ADITIVA POR ARCO COM ARAME (WAAM)

A manufatura aditiva por arco com arame (WAAM, *Wire Arc Additive Manufacturing*) tem se destacado como uma solução versátil e econômica para a produção de pré-formas metálicas de aço. Essa técnica permite a deposição controlada de material metálico camada a camada, utilizando fontes convencionais de soldagem (como MIG ou TIG), com alta taxa de deposição e liberdade geométrica [7]. Além disso, o WAAM permite a fabricação de peças com propriedades mecânicas satisfatórias, principalmente após tratamentos térmicos ou processos subsequentes de conformação, como o forjamento [8]. A integração da manufatura aditiva com processos tradicionais amplia as possibilidades de engenharia de materiais e manufatura híbrida.

2.4 INTEGRAÇÃO ENTRE WAAM E FORJAMENTO EM UNIÕES BIMETÁLICAS

A combinação entre WAAM e forjamento a morno em uniões bimetálicas representa uma abordagem inovadora, pois integra a flexibilidade da adição de material com a eficiência da deformação termomecânica. Diversos trabalhos têm demonstrado que o pós-processamento de peças produzidas por WAAM via forjamento melhora não apenas a densidade e a resistência mecânica, mas também contribui para uma ligação mais eficiente em interfaces com outros materiais, como o alumínio [11]. A deformação aplicada durante o forjamento promove o fechamento de poros e descontinuidades, além de favorecer o crescimento controlado de camadas intermetálicas finas, essenciais para a integridade da junção bimetálica [3].

2.5 CARACTERIZAÇÃO DA INTERFACE E AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA UNIÃO

A caracterização dessas uniões exige uma análise detalhada da microestrutura, da dureza e do comportamento mecânico, especialmente na zona de transição intermetálica. Técnicas como microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia por dispersão de energia (EDS) e ensaios mecânicos de tração e dureza são amplamente utilizadas para avaliar a qualidade da união [12]. A literatura evidencia que a espessura e a composição da zona intermetálica têm papel decisivo

na resistência e na tenacidade do conjunto, sendo diretamente influenciadas pela temperatura de forjamento, tempo de exposição e grau de deformação [3], [6]. Assim, compreender os mecanismos que regem a união aço-alumínio nesse contexto híbrido é essencial para viabilizar aplicações industriais robustas e eficientes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Todos os recursos e equipamentos descritos a seguir, necessários à execução dos testes foram disponibilizados pelo Centro Universitário UniSATC

3.1 IMPRESSÃO DA PRÉ-FORMA DE AÇO

Para a fabricação das peças de teste, foram confeccionadas amostras, utilizando a máquina de solda Lincoln Electric, modelo YRC1000 AR1440 Power Wave E600, do fabricante Yaskawa, disponível no Laboratório de Manufatura Aditiva da Unisatc. As amostras foram impressas na forma de dois cilindros e posteriormente removidas e usinadas nas medidas desejadas, totalizando 9 corpos de prova. O braço robótico de impressão pode ser visto na Fig. 1.

Figura 1: Braço robótico de soldagem automática

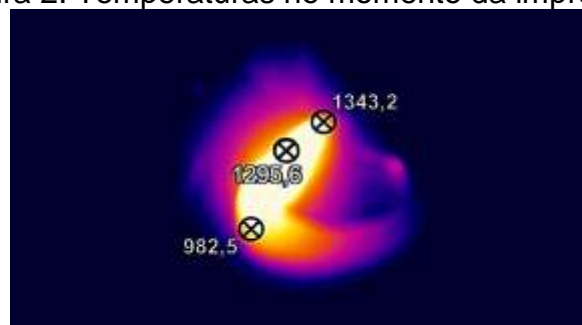


A programação do processo de manufatura aditiva foi realizada por meio do software fornecido pelo fabricante do braço robótico, com utilização de controle

numérico computadorizado (CNC). A trajetória de deposição foi planejada considerando as dimensões das peças a serem impressas, seguindo um percurso com padrão de movimento circular, visando a obtenção de cordões de solda mais largos.

O monitoramento foi realizado por meio de uma câmera termográfica Optris, modelo PI 08M, capaz de capturar imagens térmicas na faixa de 575 a 1.900 °C. Na Fig. 2 é possível observar a temperatura de 1.343,2 °C no bico da tocha no momento da impressão das amostras.

Figura 2: Temperaturas no momento da impressão



A aquisição dos dados de deposição foi feita com o auxílio da ferramenta SAP 3SR. A velocidade de deposição adotada foi de 350 mm/min, com um incremento de 2,5 mm por camada. Os parâmetros utilizados no processo estão detalhados na Tab. 1.

Tabela 1: Parâmetros de impressão das amostras

Parâmetro:	Valor:
Corrente (A)	110
Tensão (V)	15
Vazão do gás (L/min.)	12,5
Velocidade do arame (m/min.)	5,5
Argônio (%)	75
Dióxido de carbono (%)	25
Deslocamento tocha (mm/min.)	300

3.2. MONTAGEM DAS AMOSTRAS

Os tarugos de alumínio para o preenchimento do núcleo das peças foram adquiridos comercialmente na liga ABNT NBR ISO 209 6351 e usinados na medida

de \varnothing 18 x 18 mm. O conjunto montado, antes do forjamento, pode ser visto na Fig. 3:

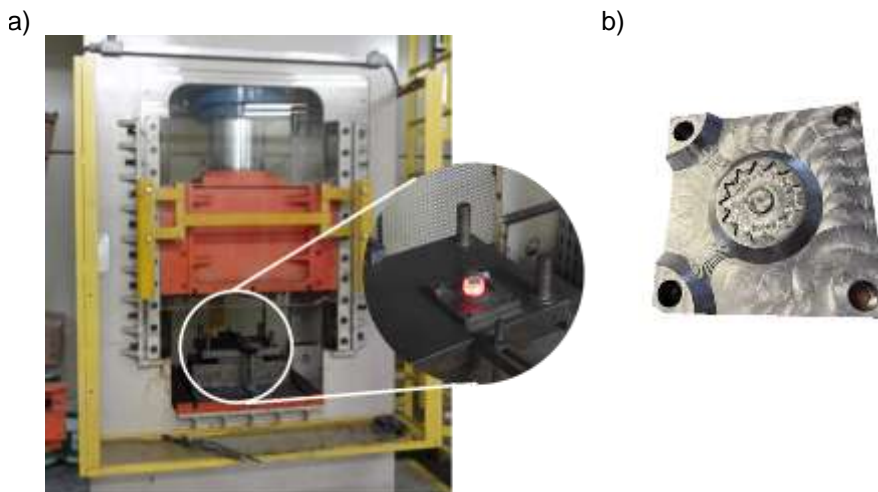
Figura 3: Montagem dos anéis e núcleos antes do forjamento



3.3 FORJAMENTO A MORNO

O processo de forjamento foi realizado em etapa única para cada amostra, utilizando uma prensa hidráulica modelo FN150, com capacidade de 150 toneladas, fabricada pela FKL Máquinas e instalada no Laboratório de Conformação Mecânica da Unisatc. As amostras foram previamente aquecidas a uma temperatura de 1.150 °C antes da conformação, permitindo a obtenção da geometria final do componente a ser analisado. A Fig. 4 apresenta a prensa e matriz empregada no processo.

Figura 4: a) Prensa de forjamento e b) matriz utilizada



Durante o processo de forjamento, foram monitoradas as temperaturas da peça na matriz com o objetivo de acompanhar a variação térmica e coletar dados mecânicos em tempo real. Na Fig. 5 podem ser observadas as temperaturas das amostras no momento do forjamento. Pode-se observar que em virtude do

transporte e troca de temperatura entre o ferramental, o forjamento ocorreu em torno próximas de 800 °C.

Figura 5: Temperatura das amostras no forjamento



3.4 ANÁLISE DE MICRODUREZA

Para a análise de dureza, foi utilizado um microdurômetro SHIMADZU®, modelo HMV-2TADW. A amostra foi cortada no sentido axial, sendo realizadas nove medições com carga de 1 kgf (HV1) e tempo de aplicação de 10 segundos. As indentações foram espaçadas linearmente com incrementos de 0,5 mm, a partir do ponto zero posicionado na interface entre os dois metais.

3.5 ANÁLISE DE METALOGRÁFICAS

A análise metalográfica foi conduzida de acordo com os procedimentos da norma ABNT NBR 15454, específicos para aços carbono. As observações foram realizadas utilizando um microscópio óptico Olympus SC30 – BX 51M, enquanto a composição química foi determinada por espectrometria de centelha, empregando o equipamento Q2 ION, do fabricante Bruker. A revelação microestrutural da camada depositada de metal duro foi realizada por ataque químico com reagente Villela, aplicado por 10 segundos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, as amostras foram selecionadas com base em uma análise visual da junta bimetálica, com o objetivo de identificar aquelas mais apropriadas para os ensaios subsequentes.

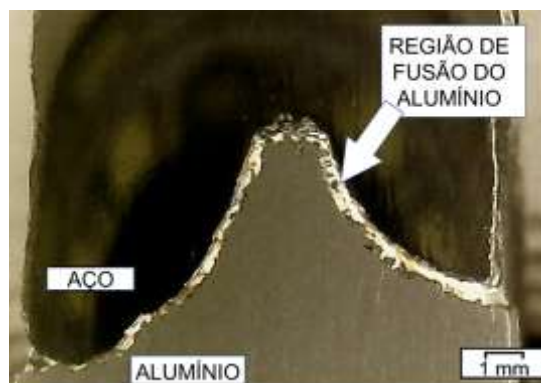
Para a análise microestrutural da junta, uma das amostras foi seccionada ao longo do eixo longitudinal. A seção transversal, ilustrada na Fig. 6, revela a proeminência do núcleo de alumínio se expandindo para fora, fenômeno atribuído às

tensões geradas durante a deformação do aço e à maior ductilidade do alumínio. Tal comportamento foi discordante dos resultados observados nos trabalhos de Politis, Lin e Dean [12] em virtude das dimensões adotadas. A deformação plástica promoveu um intertravamento mecânico entre os dois metais, favorecendo a união bimetalica, efeito também reportado por Xusheng [13].



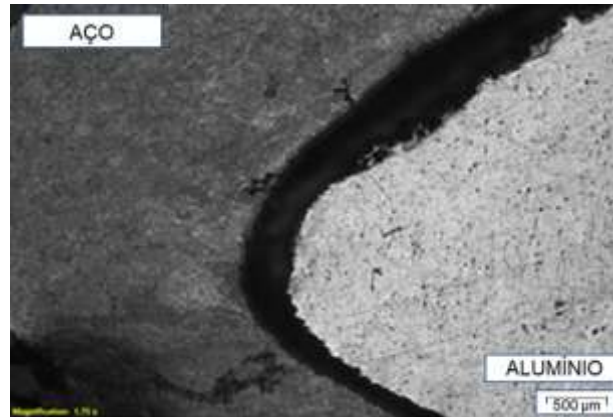
A interface entre os materiais pode ser observada na Fig. 7, evidenciando a presença de fusão superficial do alumínio, resultado do contato com o aço aquecido durante o forjamento, condição semelhante à descrita por Chang [14].

Figura 7: Fronteira entre os dois metais



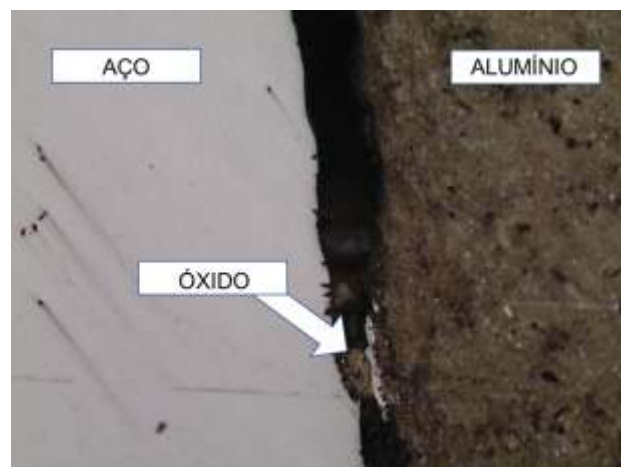
A análise visual da interface revelou a ausência de adesão completa entre os metais, conforme pode ser visto na Fig. 8, o que pode ser atribuído às distintas propriedades físico-mecânicas do aço e do alumínio. Entre os possíveis fatores que contribuíram para essa descontinuidade estão o limite de força da prensa hidráulica (150 toneladas), o processo de seccionamento da amostra e as diferenças nos coeficientes de expansão e contração térmica entre os materiais, conforme também discutido por Wang [15].

Figura 8: Lacuna entre os dois materiais



A observação ao microscópio óptico revelou a presença de fragmentos metálicos na região de ligação. Essas partículas podem ter se originado de deslizamentos entre as superfícies durante o forjamento ou da contração térmica diferencial entre os metais. O processo de forjamento também rompeu e deslocou filmes de óxido, que migraram para a matriz de alumínio devido ao fluxo de material, fenômeno igualmente relatado por Politis [16]. Tal observação reforça a importância da correta definição da janela térmica de processamento para aço e alumínio, a fim de evitar a separação na interface, como demonstrado no estudo de Politis [17]. A presença de folgas e fragmentos pode ser visualizada na Fig. 9.

Figura 9: Presença de óxidos na região da fronteira entre materiais. Sem ataque.



A temperatura relativamente moderada do aço durante o processo não promoveu alterações significativas em sua microestrutura global. No entanto,

modificações mais evidentes foram observadas na região da junta bimetálica, como resultado da troca de calor entre os metais durante o resfriamento. Segundo Wang [15], a transferência térmica associada à incompatibilidade das propriedades mecânicas dos materiais é a principal causa dessas alterações. Essa condição resultou em uma morfologia de grãos mais grosseira na região próxima à interface, conforme evidenciado na Fig. 10.

Figura 10: Alteração do tamanho dos grãos próximos à união



Os resultados indicaram que não houve variações significativas nas propriedades de dureza dos materiais. As medições no alumínio após o forjamento, apresentaram valores entre 46,7 HV e 48 HV, tanto na região próxima quanto na mais distante da junta, indicando que o contato com o aço aquecido não provocou alteração mensurável na dureza do alumínio, corroborando os achados de Politis [17]. Isso sugere que a zona termicamente afetada no alumínio é irrelevante ou está abaixo do limite de detecção do equipamento utilizado.

Da mesma forma, os valores de microdureza registrados no aço variaram entre 223 HV e 231 HV, sem evidência de zona de transição composicional provocada pelo forjamento. Em relação à oxidação superficial, foram identificados vestígios de óxidos metálicos, embora em pequena quantidade, em concordância com os estudos de Wang et al. [15].



4 CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo foi investigar preliminarmente a interface entre dois materiais metálicos forjados, a partir de um corpo de aço de baixa liga AWS A5.28 E110C-GM produzido pela WAAM e do núcleo de alumínio laminado ABNT NBR ISO209 6351. A análise experimental da interface bimetálica das peças de aço e alumínio levou às seguintes conclusões:

- O forjamento a temperatura de 800 °C e com o núcleo à temperatura de 550 °C manteve as principais características metalográficas dos metais envolvidos.
- A junta entre os dois materiais apresentou visualmente uma lacuna que pode ter ocorrido devido à contração desigual dos materiais durante o resfriamento. Isso revela a incompatibilidade das propriedades mecânicas entre os dois materiais.
- A oxidação superficial foi observada ao longo da fronteira entre os dois materiais, mesmo quando as peças foram colocadas no forno após atingir a temperatura pré-estabelecida.
- Fragmentos de material foram encontrados nas folgas, possivelmente devido ao arrasto entre as superfícies durante o forjamento.
- O aço de baixa liga sofreu alterações microestruturais nas regiões próximas à fronteira bimetálica, devido ao aquecimento e à troca de temperatura entre os metais durante o resfriamento.
- O trabalho apresentado é uma investigação preliminar e recomenda-se trabalhos futuros utilizando diferentes materiais e combinações de temperaturas para avaliar a formação de óxidos e a ocorrência de difusão atômica na zona de fronteira entre os materiais. Um fundente em pó, como o bórax, também pode ser utilizado para reduzir as camadas de óxido.

REFERÊNCIAS

[1] Zhang, H., et al. (2018). Intermetallic formation and mechanical properties of dissimilar steel–aluminum joints: A review. *Materials Science and Engineering: A*, 711, 285–303. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.10.060>

[2] Hirsch, J. (2014). Recent development in aluminum for automotive applications. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(7), 1995–2002. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63305-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63305-7)



- [3] Vaidya, W. V., et al. (2017). Joining of aluminum alloys to steels by resistance spot welding: A review. *Materials Science and Engineering: A*, 695, 39–52. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.04.051>
- [4] Kacar, I., & Acarer, M. (2003). Effect of interlayer on the bond strength of aluminum and low carbon steel joined by explosive welding. *Materials & Design*, 24(8), 659–664. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(03\)00140-8](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00140-8)
- [5] Yusof, F., et al. (2019). Diffusion bonding of dissimilar metals: A review. *Materials Today: Proceedings*, 17, 1069–1074. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.192>
- [6] Kumar, A., et al. (2019). Solid-state welding of dissimilar metals: A review of recent developments. *Journal of Manufacturing Processes*, 42, 434–451. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.05.034>
- [7] Ding, D., et al. (2015). Wire-feed additive manufacturing of metal components: Technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(1), 465–481. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>
- [8] Martina, F., et al. (2015). Microstructure of interfacial zones in wire and arc additive manufactured steel components. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46(12), 6103–6118. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3172-1>
- [9] Saturno, et. al. Avaliação do Processo de Manufatura Aditiva Baseado na Técnica WAAM a Partir do HL 85 MC-B. *Revista Vincci - Periódico Científico do UniSATC*, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 258–278, 2023.
- [9] Song, M., et al. (2016). Effect of hot deformation on the interface of Al–steel bimetallic composite. *Materials Characterization*, 121, 216–222. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.10.016>
- [11] Sun, Y., et al. (2017). Characterization of interfacial intermetallic compounds in aluminum-steel joints. *Journal of Alloys and Compounds*, 728, 203–211. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.128>
- [12] Politis, D., Lin, J., & Dean, T. (2012). Investigation of material flow in forging bi-metal components [ResearchGate]. Retrieved April 26, 2025, from <https://www.researchgate.net/publication/279540698>
- [13] Xusheng, C., Gang, C., Hongming, Z., Fei, H., Weiwei, W., & Zhiming, D. (2021). Simulation and verification for thixotropic-core compound forging formation of aluminum-steel bimetal components. *Special Casting & Nonferrous Alloys*. Retrieved from <https://www.special-cast.com/en/article/doi/10.15980/j.tzzz.2021.06.021/?viewType=HTML>
- [14] Chang, X., Chen, G., Wang, B., Chen, Q., & Zhang, H. (2021). Thixotropic-core compound forging for aluminum-steel bimetal gears. *Journal of Materials Processing Technology*, 299, 117371. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117371>



[15] Wang, W., Politis, N. J., Wang, Y., Zhou, X., Balint, D., & Jiang, J. (2022). Solid-state hot forge bonding of aluminum-steel bimetallic gears: Deformation mechanisms, microstructure and mechanical properties. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 180, 103930.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2022.103930>

[16] Politis, N. J. (2017). Forging lightweight bimetal gears [Master's dissertation, Imperial College London].

[17] Politis, D. J., Politis, N. J., & Lin, J. (2021). Review of recent developments in manufacturing lightweight multi-metal gears. *Production Engineering*, 15, 235–262.

<https://doi.org/10.1007/s11740-021-01024-9>