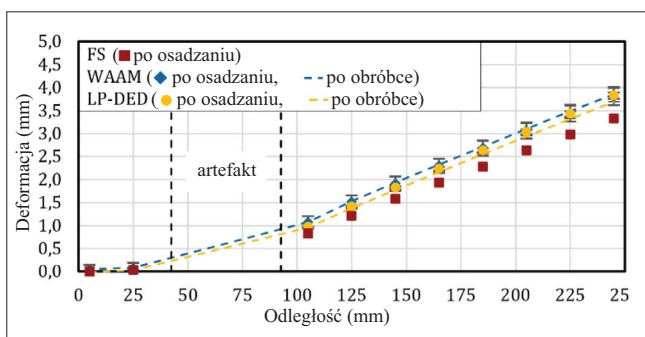


Porównanie trzech hybrydowych procesów wytwarzania addytywno-ubytkowego metali

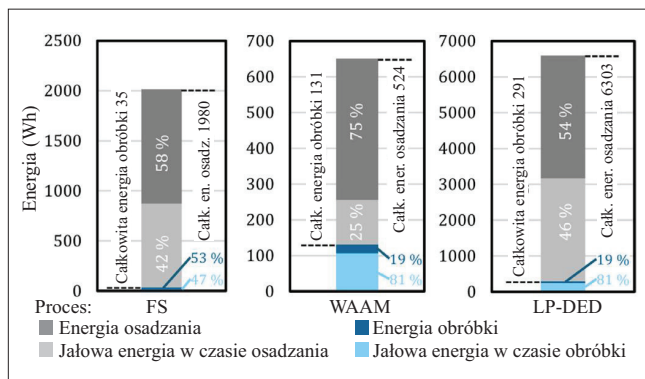
Porównano trzy hybrydowe technologie łączące procesy przyrostowe i ubytkowe w celu oceny ich przydatności do wytwarzania elementów metalowych. Analizie poddano jakość materiału, zużycie energii oraz dokładność geometryczną artefaktów ze stali nierdzewnej 316L.

W badaniach porównano: napawanie cierne (*Friction Surfacing* – FS), wytwarzanie addytywne łukiem drutowym (*Wire Arc Additive Manufacturing* – WAAM) oraz laserowe napylanie proszkowe (*Laser Powder Directed Energy Deposition* – LP-DED). W każdym przypadku wytwarzano identyczny artefakt o wymiarach $50 \times 50 \times 10$ mm, który po osadzeniu poddano obróbce skrawaniem. Oceniano efektywność osadzania, deformacje cieplne, zużycie energii, mikrostrukturę, twardość i właściwości mechaniczne.

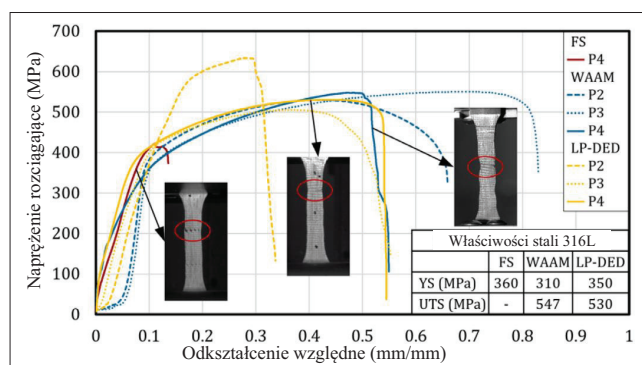
Największą efektywność osadzania (97%) uzyskano w procesie WAAM, który charakteryzował się także najkrótszym czasem całkowitym – 15 min na artefakt. LP-DED zapewnił najwyższą efektywność hybrydową i dokładność geometryczną dzięki minimalnemu nadatkowi materiału, natomiast FS, jako proces stałotemperaturowy, wymagał najdłuższego cyklu (93 min), lecz powodował najmniejsze od-



Rys. 1. Odształcenie podłoża po osadzeniu i po obróbce w trzech procesach hybrydowych



Rys. 2. Zużycie energii podczas osadzania i obróbki dla trzech procesów hybrydowych



Rys. 3. Wyniki prób rozciągania dla trzech procesów hybrydowych

kształcenia cieplne podłoża. Na rys. 1 przedstawiono porównanie deformacji po osadzeniu i obróbce w trzech procesach.

Analiza energetyczna (rys. 2) wykazała, że WAAM cechuje się najmniejszym zużyciem energii, natomiast LP-DED – największym udziałem energii jałowej wynikającym z pracy zintegrowanej maszyny hybrydowej. FS, mimo że nie wymaga topienia materiału, zużyło trzykrotnie więcej energii niż WAAM z powodu licznych operacji frezowania międzywarstwowego.

Na rys. 3 pokazano wyniki prób rozciągania. Próbkę P2 i P3 wycięto równolegle do kierunku nakładania, przy czym P2 ma interfejs warstwa-podłoże w połowie swojej długości, a P3 wykonano w całości z osadzonego materiału. P4 wycięto prostopadłe do kierunku nakładania. WAAM i LP-DED wykazały większe wydłużenie przy rozciąganiu, natomiast FS wyższą wytrzymałość, lecz gorsze wiązanie międzywarstwowe.

Podsumowując: WAAM zapewnia największą wydajność i najmniejsze zużycie energii, LP-DED – najwyższą dokładność geometryczną, a FS – najmniejsze odkształcenie cieplne. Dobór technologii zależy od wymagań aplikacyjnych: precyzji wymiarowej, efektywności energetycznej lub jakości połączenia warstw.

LITERATURA

C. Baumann, M. Yerranagu, W. Zhang et al., *Comparison of three hybrid metal additive-subtractive manufacturing processes*, CIRP Annals – Manufacturing Technology 74 (2025), 321–325, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2025.04.074>

Opracował: prof. dr hab. Krzysztof Jemielniak