

Proprietățile mecanice ale componentelor din Ti6Al4V realizate prin fabricație aditivă cu arc electric și sârmă

Mechanical properties of Wire Arc Additive Manufactured Components made of Ti6Al4V

Herbert Staufer¹, Rick Grunwald²

¹ Fronius International GmbH

² Fronius International GmbH

Rezumat

Fabricația aditivă cu arc electric și sârmă (WAAM), procedeul de depunere bazat pe arcul electric și care utilizează un electrod de sârmă ca material de adaos, este în prezent un subiect de mare interes pentru industrie. Acest fapt a dus la apariția de tehnologii care se pot utiliza la producerea de componente complexe din titan pentru aplicații aerospațiale, medicale și alte aplicații de nișă. Unele componente din titan pot avea dimensiuni de ordinul a câtorva metri, iar una dintre provocările în domeniul fabricației aditive este producerea cât mai rapidă a unor componente mari și de înaltă calitate. Fabricația aditivă cu arc electric și sârmă pentru sudare a fost identificată ca o potențială soluție, deoarece are rate de depunere foarte ridicate și este cu un ordin de mărime mai puțin costisitoare decât tehnologiile de fabricație aditivă cu pat de pulbere. Fabricația aditivă cu arc electric și sârmă se bazează pe procedeele ieftine de sudare cu arc electric în mediu de gaz protector cu electrod nefuzibil (WIG), de sudare cu arc electric cu electrod fuzibil în mediu protector de gaz (MAG) sau de sudare cu plasmă (PAW) și utilizează o alimentare cu sârmă pentru sudare cu argon ca și gaz de protecție. Există un potențial notabil de aplicabilitate a WAAM în producția de componente cu nervuri mari pentru aplicațiile aerospațiale, deoarece astfel de componente sunt prelucrate în mod convențional din bucăți masive și, în consecință, există o risipă substanțială de material. Pe lângă analizarea unei comparații generale a procedeelor, acest articol va explora proprietățile pieselor realizate prin WAAM, aplicând procedeul de sudare GMAW, în special cu ajutorul examinărilor metalografice și mecanice, al unei analize chimice și al rugozității suprafeței. Vor fi prezentate două aplicații industriale prin intermediul unor componente de construcție de înaltă rezistență realizate din TiAl6V4.

Cuvinte cheie

WAAM, TiAl6V4, sudare cu arc electric cu electrod fuzibil în mediu protector de gaz, tratament termic, încercări mecanice

Abstract

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), the arc-based additive process that uses a wire electrode as the filler metal, is currently the subject of great industrial interest. A number of technologies have emerged which are suited to producing complex titanium components for aerospace, medical and other niche applications. Some titanium components can be of the order of several meters in size and one of the challenges in additive manufacturing is to produce high quality, large components as quickly as possible. It has been identified that Wire Arc Additive Manufacturing has a potential solution because it has very high deposition rates and is an order of magnitude less expensive than powder bed AM technologies. Wire Arc Additive Manufacturing is based on inexpensive Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), Gas Metal Arc Welding (GMAW) or Plasma Arc Welding (PAW) technology and uses a wire feedstock with argon gas shielding. There is a potential for WAAM in the production of large ribbed components for aerospace applications because such components are conventionally machined from solid wrought billets and consequently there is substantial material waste. In addition to discussing a general comparison of the processes, this article will explore the properties of WAAM workpieces, applying the GMAW process, in particular using metallographic and mechanical examinations, a chemical analysis and surface roughness. Two industrial applications by means of a high-strength construction components made from TiAl6V4 will be presented.

Keywords

WAAM, TiAl6V4, gas metal arc welding, heat treatment, mechanical testing

1. Introducere

Raportul mare dintre rezistența și densitatea titanului, rezistența la coroziune și capacitatea de a rezista la temperaturi ridicate fac din aliajele sale candidați de primă clasă pentru aplicațiile aerospațiale. Proprietățile mecanice și termice

1. Introduction

Titanium's high strength to weight ratio, corrosion resistance and ability to withstand high temperatures makes its alloys prime candidates for aerospace applications. The highly desirable properties of titanium such as

ridicate ale titanului, cum ar fi ductilitatea, rezistența mecanică și rezistența la temperaturi ridicate, sunt căutate pentru multe aplicații, dar îl fac relativ dificil de prelucrat. Fabricația tradițională prin prelevare de material este ineficientă din punct de vedere al pierderilor de timp și de material. De fapt, în cadrul unui studiu de caz care a evaluat consolele pentru aeronave Ti-6Al-4V fabricate aditiv și forjate, Dehoff și colab. [1] au constatat că, dacă se iau în considerare deșeurile rezultate, costul cu materialul pentru componente complexe prelucrate din Ti6Al4V poate depăși aproximativ 2000 EUR/kg. În plus, titanul este, după cum se știe, dificil de prelucrat, iar costurile de prelucrare, asociate cu un coeficient scăzut de utilizare a materialului în structura componentelor, agravează problema de natură economică. Froes și colab. [2] au raportat că, pentru unele componente din titan, numai costul de prelucrare reprezintă jumătate din costul total al componentei. WAAM reprezintă o oportunitate unică pentru piața aerospațială, deoarece poate produce rapid componente mari, care sunt apoi prelucrate ulterior până la dimensiunile finale, eliminând operațiunile costisitoare de prelucrare brută. Foarte important la prelucrarea titanului în timpul transformărilor din lichid în solid (de exemplu, la turnare, sudare, fabricație aditivă) este gestionarea potențialului de contaminare cu aer, și în special contaminarea cu oxigenul din aer. Cunningham și colab. [3] au raportat că, de obicei, costul este punctul cheie în luarea deciziilor. În literatura de specialitate actuală se găsesc deja câteva lucrări despre modelarea costurilor aplicate la fabricația aditivă. Martina și colab. [4], au prezentat un model de cost care a comparat costul unei piese produse pe calea tradițională (prelucrată din solid) cu cel al unei piese finite realizate cu ajutorul WAAM. Mai departe, Fera și colab. [5] au prezentat o abordare nouă pentru a clasifica și a analiza producția de produse specifice realizate prin fabricație aditivă (AM) sau fabricație substractivă (SM), un criteriu de analiză, pe lângă numărul de produse fabricate, fiind și complexitatea acestora. Astfel, costul legat de producția prin SM este o funcție crescândă cu complexitatea produsului. Există și alte aspecte considerate în cercetări, cum ar fi impactul WAAM asupra mediului, care a fost abordat de Bekker și colab. [6]. Rezultatele indică faptul că impactul WAAM asupra mediului este comparabil cu cel al turnării

high ductility, strength and thermal resistance also makes it very difficult to machine. Subtractive manufacturing is inefficient in terms of time and material waste. In fact, in a case study evaluating additive manufactured and wrought Ti-6Al-4V aircraft brackets.

Dehoff et al. [1] found that the material cost for a complex Ti6Al4V machined components can exceed around € 2000 / kg when the swarf scrap is considered. Furthermore, titanium is notoriously difficult to machine and the machining costs associated with high buy-to-fly aspect components compound the problem. Froes et al. [2] reported that for some titanium components the cost of machining alone accounts for half of the total component. cost. WAAM presents a unique opportunity for the aerospace market because it can produce large components quickly which are then subsequently finish machined to final tolerance, eliminating the expensive rough machining operations.

A very important consideration when processing titanium during liquid to solid transformations (e.g., casting, welding, additive manufacturing) is to manage the potential for atmospheric contamination, particularly oxygen.

Cunningham et al. [3] reported, that cost is usually the key point for decision making. Some papers about cost modelling applied to additive manufacturing are already found in current literature. Martina et al. [4], presented a cost model which compared the cost of a part produced via the traditional route (machined from solid) to a finished part made using WAAM. Further on, Fera et al. [5] presented a novel approach to classify and analyse the production of specific products using AM or subtractive manufacturing (SM), applying complexity as a decision guide and not only the number of products to manufacture. However, the cost related to the production with SM is a growing function of the part complexity. There are other considerations, such as environmental impact of WAAM, was dealt by Bekker et al. [6]. Results indicate that the environmental impact of WAAM production is comparable to green sand casting. When the casting, machining and WAAM are compared in an environmental sphere, they state that the outcome can vary

în nisip crud. Atunci când compară turnarea, prelucrarea mecanică și WAAM, din punct de vedere al impactului de mediu, autorii afirmă că rezultatul poate varia semnificativ în funcție de forma produsului și de setările procesului.

Prin urmare, la WAAM trebuie luate în considerare mai multe aspecte, ceea ce face ca un model cuprinzător de cost de producție să fie încă o provocare. Concentrându-se pe reglarea procesului (doar o parte a procesului de depunere), numărul de lucrări de cercetare privind parametrizarea și costurile, publicate în literatura de specialitate actuală, nu este atât de mare, spre deosebire de cele privind relația parametri – calitate produs. Desigur că, precizia dimensională, regularitatea suprafeței superioare (ondulații) și finisarea suprafeței laterale afectează costul prelucrării prin depunere. În continuare, acești factori, acceptați sub formă de grup în această lucrare, vor fi numiți drept calitate peretelui. În lucrarea lui Xiong și colab. [7] se studiază efectele principalilor parametri ai procedurii WAAM asupra calității peretelui. Aceștia arată că viteza de avans a sârmei (WFS) este principalul factor de influență asupra modului de formare a pieselor cu pereți subțiri. În plus, menținând constant raportul dintre viteza de avans a sârmei și viteza de deplasare, rugozitatea suprafeței crește odată cu creșterea vitezei de avans a sârmei (o viteză mai mică de avans a sârmei corespunzătoare unei viteze de deplasare mai mici poate scădea rugozitatea suprafeței). În altă publicație, aceștia au afirmat și că nivelul calitativ al formării peretelui scade o dată cu creșterea curentului arcului electric (Im). Yurii și colab. [8] au investigat efectul vitezelor de deplasare și de avans al sârmei asupra aspectelor operaționale și economice ale WAAM pentru un aliaj Al-Mg5.

Cu toate acestea, prevenirea contaminării rămâne o provocare permanentă pentru orice proces AM în aer liber, așa cum este WAAM. La bază, provocările cu care se confruntă procesele AM în aer liber sunt similare cu cele ale sudării. O trecere în revistă a procedurilor de sudare în aer liber realizată de Short [9] a concluzionat că prevenirea contaminării atmosferice se realizează, de obicei, prin protejarea suprafeței fierbinți cu un gaz de protecție conținând argon de înaltă puritate, utilizând o duză specială de aducțiune a acestuia care este conectată la pistolul de sudare. Se pot utiliza și dispozitive de protecție localizată, care mențin protecția cu

significativ pe baza formei produsului și a setărilor de proces.

Prin urmare, WAAM are mai multe fațete, făcând un model de cost cuprinzător încă o provocare. Prin concentrarea pe setarea de proces (doar o parte din procesul de depunere), numărul de cercetări publicate în literatura de specialitate actuală care relatează parametrizarea și costurile nu este atât de larg, în schimb, în opoziție cu relația parametri – calitate produs.

Definitiv, precizia dimensională, regularitatea suprafeței (ondulații) și finisarea suprafeței laterale afectează costul prelucrării prin depunere. În continuare, acești factori, acceptați sub formă de grup în această lucrare, vor fi numiți drept calitate peretelui. În lucrarea lui Xiong et al. [7] s-a studiat efectul principalelor parametri ai procedurii WAAM asupra calității peretelui. Ei au indicat că viteza de alimentare cu sârmă (WFS) este principalul factor de influență pentru formarea peretelui subțire. În plus, menținând constant raportul dintre viteza de alimentare cu sârmă și viteza de deplasare, rugozitatea suprafeței crește odată cu creșterea vitezei de alimentare cu sârmă (o viteză mai mică de alimentare cu sârmă corespunzătoare unei viteze de deplasare mai mici poate scădea rugozitatea suprafeței). În altă publicație, aceștia au afirmat și că nivelul calitativ al formării peretelui scade o dată cu creșterea curentului arcului electric (Im). Yurii et al. [8] au investigat efectul vitezelor de deplasare și de alimentare cu sârmă asupra aspectelor operaționale și economice ale WAAM pentru un aliaj Al-Mg5.

În altă publicație, ei au afirmat și că nivelul calitativ al formării peretelui scade o dată cu creșterea curentului arcului electric (Im). Yurii et al. [8] au investigat efectul vitezelor de deplasare și de alimentare cu sârmă asupra aspectelor operaționale și economice ale WAAM pentru un aliaj Al-Mg5.

În altă publicație, ei au afirmat și că nivelul calitativ al formării peretelui scade o dată cu creșterea curentului arcului electric (Im). Yurii et al. [8] au investigat efectul vitezelor de deplasare și de alimentare cu sârmă asupra aspectelor operaționale și economice ale WAAM pentru un aliaj Al-Mg5.

În altă publicație, ei au afirmat și că nivelul calitativ al formării peretelui scade o dată cu creșterea curentului arcului electric (Im). Yurii et al. [8] au investigat efectul vitezelor de deplasare și de alimentare cu sârmă asupra aspectelor operaționale și economice ale WAAM pentru un aliaj Al-Mg5.

argon a metalului sudat fierbinte până când acesta se răcește la o temperatură la care contaminarea atmosferică nu mai prezintă un risc. Principalii producători de titan, cum ar fi TIMET [10], recomandă protejarea titanului până când temperaturile scad sub aproximativ 400 °C.

2. Compararea proceselor de fabricație aditivă

Fabricația aditivă (AM) s-a dezvoltat și acoperă o gamă largă de procedee. În tabelul 1 este prezentat un extras din clasa procedeelor pe bază de pulbere și pe bază de sârme pentru materiale metalice, cu rata de depunere aferentă. În timp ce procedeele pe bază de pulbere sunt asociate cu precizia, procedeele cu consum mai mare de energie care utilizează fasciculul laser, fasciculul de electroni sau arcul electric generează o rată de depunere semnificativ mai mare.

Depunerea directă cu fascicul laser (DLD) atinge, prin urmare, o rată de depunere care este de aproximativ zece ori mai mare decât topirea selectivă cu laser (SLM) pentru procedeele pe bază de pulbere. În ceea ce privește procedeele pe bază de sârme, depunerea de metale cu fascicul laser (LMD) nu poate egala rata de depunere a fabricației aditive cu fascicul de electroni (EBAM), deși EBAM are costuri mai mari din cauza tehnologiei camerei de vid necesare. O tehnologie mult mai simplă este utilizată în cazul procedeelor WAAM. Ratele de depunere de până la 4 kg/h deschid perspectiva multor aplicații comerciale noi, în condițiile în care soluțiile cu mai multe sârme ar putea da naștere la rate de depunere chiar mai mari.

Major titanium producers such as TIMET [10] now recommend that it is best practice during welding processes to shield titanium until temperatures fall below approximately 400 °C.

2. Comparison of Additive Manufacturing Processes

Additive manufacturing (AM) has grown to cover a wide variety of process variants. An extract of certain powder-based and wire-based processes for metallic materials with the corresponding deposition rate is shown in Table 1. While powder bed processes are associated with precision, the more energy-intensive processes that use lasers, electron beams, or arcs generate a significantly higher deposition rate.

Direct laser deposition (DLD) therefore achieves a deposition rate that is approximately ten times higher than selective laser melting (SLM) for powder-based processes. As for the wire-based processes, laser metal deposition (LMD) cannot match the deposition rate of electron beam additive manufacturing (EBAM), although EBAM does have higher costs due to the vacuum chamber technology needed.

Much simpler technology is used WAAM processes. Deposition rates of up to 4 kg/h open up the prospect of many new commercial applications, whereby multi-wire solutions could give rise to even higher deposition rates.

Tabel 1. Compararea ratelor de depunere

Table 1. Comparison of deposition rates

	Pulbere Powder		Sârmă Wire		
	Fascicul laser Laser Beam		Fascicul de electroni Electron beam	Arc electric Electric Arc	
Procedeu AM AM process	Pat de pulbere Powder bed (SLM)	Depunere cu laser Laser deposition (DLD)	Fascicul de electroni Electron beam (EBAM)	WIG / plasma TIG / plasma (WAAM)	GMAW (WAAM)
Oțel Steel	0,05-0,3 kg/h	1-7 kg/h [1]*	3-9 kg/h	-	4 kg/h
Aluminiu Aluminium			1 kg/h [11]	-	1,2 kg/h
Titan Titanium			2,4 kg/h [12]	1,8 kg/h [13]	3,7 kg/h

*LMD, oțel / LMD steel = 2 kg/h

Pentru procedeele GMAW, WAAM necesită un nivel scăzut de energie în arc electric și un proces cu o înaltă stabilitate a transferului de picături, pentru un nivel scăzut de stropire și o depunere consistentă de straturi.

3. Partea experimentală

Standul experimental este prezentat în figura 1. Pentru această investigație a fost utilizat un sistem robotizat personalizat cu 6 axe pentru manipularea pistolului. Pistolul de sudare s-a deplasat pe axele x și y pentru a depune strat după strat. După fiecare strat, axa z a fost ajustată pentru a se suda stratul următor. Distanța dintre duza de curent și suprafața superioară a stratului anterior a fost setată și menținută constantă de către masa de lucru la distanța de 15 mm, verificată înainte de începerea fiecărui strat. Pentru procesul de depunere a fost ales un echipament CMT. Este important de menționat că, în modul de funcționare CMT, este posibil ca valorile de ieșire ale vitezei de avans al sârmei să nu fie identice cu valoarea setată, deoarece unitatea de control adaptează această valoare conform liniei sinergice. Valorile curentului și tensiunii sunt, așadar, adaptate la ceilalți parametri pentru linia sinergică dată. Cu toate acestea, variația acestor valori este foarte mică pentru o funcționare corectă a CMT.

For GMAW processes, WAAM requires a low level of energy in the arc and a process with the most stable droplet transfer possible for low spattering and a consistent build-up of layers.

3. Experimental

The experimental set up is shown in Figure 1. A customized 6 axes robotic system for torch manipulation was used for this investigation. The welding torch moved in the x and y axis to weld one layer after another.

After each layer the z axis was adjusted to weld the next layer. The contact tip distance to the surface top of the previous layer was set and kept constant by the worktable at fixed distance (15 mm, checked before starting each layer). A GMAW Fronius CMT equipment was chosen for the deposition process. It is important to mention that in CMT operational mode the output values of WFS may not be the same as the setting value, because the control unit adapt this value according to the synergy line. Current and voltage values are consequently adjusted to the other parameters for the given synergic line. However, the variation of these values is very small for a CMT proper operation.

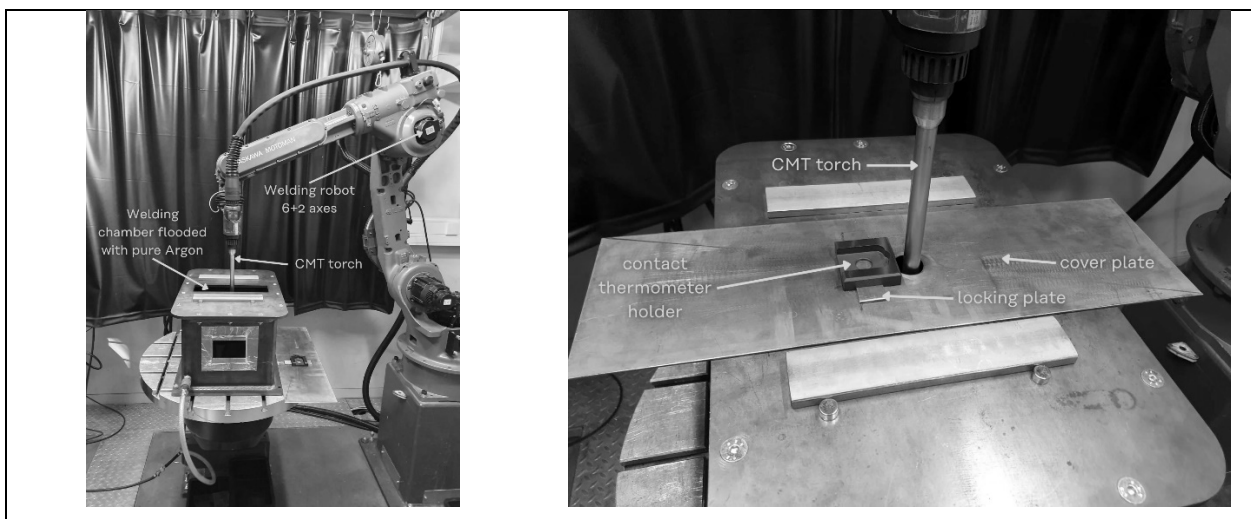


Fig. 1 Standul experimental (a. imagine de ansamblu, b. detaliu cu poziționarea capului de sudare și a senzorului de temperatură)
Fig. 1 Experimental set-up (a. general aspect, b. detail of the welding torch and temperature sensor in position)

Autorii lucrării de față consideră că pentru a atinge calitatea suprafeței peretelui (ondulații reduse) este necesară minimizarea energiei liniare și a presiunii arcului electric în scopul

The authors of the present work consider that a commandment to reach wall surface quality (low waviness) is to minimize heat input and arc pressure to avoid pool lateral sag (downward

evitării curgerii laterale a băii de metal topit. Acest lucru poate fi realizat, pentru un material și o grosime a peretelui date, prin utilizarea unui arc electric scurt, a unui raport curent - viteză de deplasare mai mic, a unei temperaturi mai mici între straturi și a unei compoziții chimice a gazului care să favorizeze emisia catodică concentrată în linia centrală a arcului.

Ca material de adaos a fost utilizată sârma Ti6Al4V (ASTM B863 Ti Gr 5), având compoziția chimică inițială: 6% aluminiu, 4% vanadiu, 2% fier, 0,15% oxigen, iar ca substrat s-a folosit o placă de bază Ti6Al4V forjată. Eșantioanele au fost sudate într-o incintă dezvoltată special pentru acest experiment. Fiecare depunere a fost creată prin deplasarea liniară a pistolului de sudare și alimentarea băii de metal cu sârmă, care ulterior s-a solidificat pentru a forma un strat. După depunerea primului strat s-a ridicat pistolul, iar după ridicare a fost depus stratul următor. Pentru a elimina acumularea de căldură ca o variabilă, piesele au fost lăsate să se răcească până la atingerea unei temperaturi maxime între straturi (200°C). După aceasta, depunerea a continuat până la dimensiunile aproximative ale piesei finale. Temperatura la sfârșitul depunerii a fost măsurată cu ajutorul unui termometru de contact la capătul stratului după stingerea arcului electric. Nu a fost posibilă măsurarea în timpul depunerii.

Tabelul 2 compară procedeele cu arc electric în funcție de parametrii electrici, puterea arcului și raportul de scurtcircuit pentru o durată a unui impuls. Energia liniară este determinată, în principal, de lungimea arcului electric și de durata fazei de scurtcircuit. Reamorsarea în faza de scurtcircuit prin utilizarea unui procedeu de sudare cu inversarea sensului sârmei-electrod permite obținerea unor durate de scurtcircuit mai lungi, cu o energie liniară redusă. Un exemplu al unui astfel de procedeu este "Cold Metal Transfer (CMT)", care este prezentat în diferite variante. Spre deosebire de caracteristica sa de "universalitate", trecerea la "aditiv" a procesului este optimizată pentru o construcție prin depunere a straturilor cu o energie liniară semnificativ mai mică și o stabilitate ridicată a procesului. Variantele "gap bridging" și "cycle step" reduc și mai mult puterea arcului electric prin dezactivarea țintită a arcului electric în timpul unei faze de proces. Arcul electric pulsat (PMC) este rareori utilizat pentru fabricația aditivă din cauza energiei liniare mai mari. În timpul sudării celui de-al

lateral running). This can be achieved, for a given material and wall thickness, by using short arc, lower current-travel speed ratio, lower interlayer temperature and gas composition that favour cathodic emission concentrated in the arc centre line.

Ti6Al4V (ASTM B863 Ti Gr 5) wire was used as the filler wire (initial composition: 6 wt% aluminium, 4 wt% vanadium, 2wt% iron, 0,15wt% oxygen) and a wrought Ti6Al4V base plate was used as a substrate for the deposits. The samples were welded in a chamber, which was especially developed for this investigation. Each deposit was created by moving the welding torch in a linear direction and feeding wire into the molten pool, which subsequently solidified to make a layer. A subsequent layer was then deposited over the first by increasing the height of the torch.

To eliminate heat accumulation as a variable, the parts were permitted to cool between layers until the inter-pass temperature was reached (200°C). After this, deposition continued until the approximate dimensions of the final size. The temperature at the end of deposition was measured using a contact thermometer at the end of the layer after the arc was terminated. It was not possible to measure during deposition.

Table 2 compares arc processes by the electrical parameters, arc power and short circuit ratio of one pulse duration. The heat input is primarily determined by the arc length and the duration of the short circuit phase. Re-ignition of the short circuit phase by using a welding process with a reversing wire electrode allows particularly long short circuit times with a low heat input to be achieved.

An example of one such process is cold metal transfer (CMT), which is presented here with different process variants. As opposed to the "universal" characteristic, "additive" is optimized for an additive build-up of layers with a significantly lower heat input and high process stability. The "gap bridging" and "cycle step" variants reduce the arc power even further through the targeted deactivation of the arc during a process phase.

Pulsed arc (PMC) is rarely used for additive manufacturing due to its higher energy input per

treilea strat au fost măsurate valorile medii ale curentului și ale tensiunii, precum și puterea momentană a arcului electric (puterea de la o frecvență de măsurare de 40 kHz)

weld. The arithmetic means of current and voltage, as well as the Instantaneous arc power (power from 40 kHz frequency), have been measured during welding of the third layer.

Tabel 2. Compararea diferitelor procedee de sudare cu arc electric pentru WAAM (parametrii din al treilea strat); format text obișnuit: G3Si1, format text aldin: Ti6Al4V, viteza de avans al sârmei: 4 m/min
Table 2. Comparison of different arc processes for WAAM (parameter from the third layer); Normal text format: G3Si1, Aldin text format: Ti6Al4V, wfs: 4 m/min

Procedeu Process	I_mediu I_mean	U_mediu U_mean	Raport de scurtcircuit Short circuit ratio	Puterea momentană a arcului electric Instantaneous arc power
	[A]	[V]	[%]	[W]
MAG – arc scurt, MAG-k	165	17,4	25	2660
LSC	166	18,2	19	2720
CMT universal	142	16,1	32	2780
CMT aditiv / additive	156	13,6	44	2280
CMT gap bridging	160	11,6	55	2110
CMT cycle step	155	15,0	42	2140
PMC universal / universal	117	21,4	0,2	3080
CMT additiv Ti6Al4V	117	11,5	42	1412
LSC - Controlul Stropirilor / Low Spatter Control CMT – Transfer de Metal Rece / Cold Metal Transfer PMC – Control Multi-Puls / Pulse Multi Control			Punte între flancurile rostului / Gap bridging Etapă de ciclu / Cycle Step	

4. Caracterizarea proprietăților folosind exemplele pe Ti-Al6-V4

4. Characterization of Properties using examples of Ti-Al6-V4

4.1 Analiza metalografică

4.1 Metallographic examination

Aliajul de titan Ti6Al4V este cel mai frecvent utilizat aliaj de titan în industria motoarelor de aviație și, prin urmare, și cel mai studiat. Cu toate acestea, microstructura care se formează în timpul desfășurării unui proces, cum ar fi cazul depunerii de metale, este una complexă. Integritatea materialului reprezintă o preocupare majoră atunci când este utilizat în industria motoarelor de aviație. Microstructurile formate impun necesitatea unei examinări și înțelegeri suplimentare a comportamentului materialului. Aliajul de titan Ti6Al4V poate fi utilizat în aplicații în care temperatura de lucru este mai mică de 300°C. În titanul pur se găsesc două structuri cristaline elementare, și anume alfa (α) și beta (β). Faza α are o structură hexagonală cu legături strânse (hcp) și este faza stabilă la temperaturi scăzute. Faza β are o structură cubică centrată pe corp (bcc) și este stabilă la temperaturi ridicate până la punctul de topire. Ti6Al4V aparține familiei de aliaje α/β , cu procent masic de aluminiu de 6% care stabilizează faza α și cu procent masic de vanadiu de 4% care stabilizează faza β . În consecință, microstructura de echilibru a aliajului la temperatura camerei constă în principal din faza

The titanium alloy Ti6Al4V is the most commonly used titanium alloy in the aero engine industry and consequently the most studied. However, the microstructure that forms during process route history such as with metal deposition is complex. Material integrity is of high concern when used in the aero engine industry. The formed microstructures open the need for further examination and understanding of the behaviour of the material.

Titanium alloy Ti6Al4V can be used in applications where the working temperature is less than 300°C. In pure titanium two elementary crystal structures are found, namely alpha (α) and beta (β). The α phase has a hexagonal close-packed (hcp) structure and is the stable phase at low temperature. The β phase has a body-centred cubic (bcc) structure and is stable at high temperatures up to the melting point. Ti6Al4V belongs to the α/β alloy family, with 6 weights % aluminium that is stabilizing the α phase and 4 weight % vanadium stabilizing the β phase. Consequently, the equilibrium microstructure of the alloy at room temperature consists mainly of the α phase with some retained β phase. The β -transus defines

α cu o parte din faza β reținută. Temperatura de tranziție β definește temperatura peste care microstructura de echilibru va consta numai din faza β . Temperatura de tranziție β pentru Ti6Al4V este 995°C [14].

Figura 2 prezintă o secțiune macroscopică transversală a unei probe WAAM realizate din Ti6Al6V4. În timpul examinării metalografice au fost observați grăunți mari. Acești grăunți urmează direcția de disipare a căldurii și pot măsura până la 10 mm în lungime (direcția Z). Când se examinează la microscopul optic, se poate observa microstructura după solidificare, care se potrivește cu cea a lui Enzinger [11], care a utilizat procedeul de fabricație aditivă pe bază de sârmă cu fascicul de electroni (figura 3).

the temperature above which the equilibrium microstructure will consist only of β phase. β -transus is 995°C for Ti6Al4V [14].

Figure 2 shows a transverse macro section of a WAAM sample made from Ti6Al6V4. During the metallographic examination large grains were observed. These grains follow the direction of heat dissipation and can measure up to 10 mm in length (Z-direction).

When investigated under the optical microscope, the microstructure after solidification can be seen, which does match to Enzinger [11], who used the wire based additive manufacturing electron beam process (Figure 3).

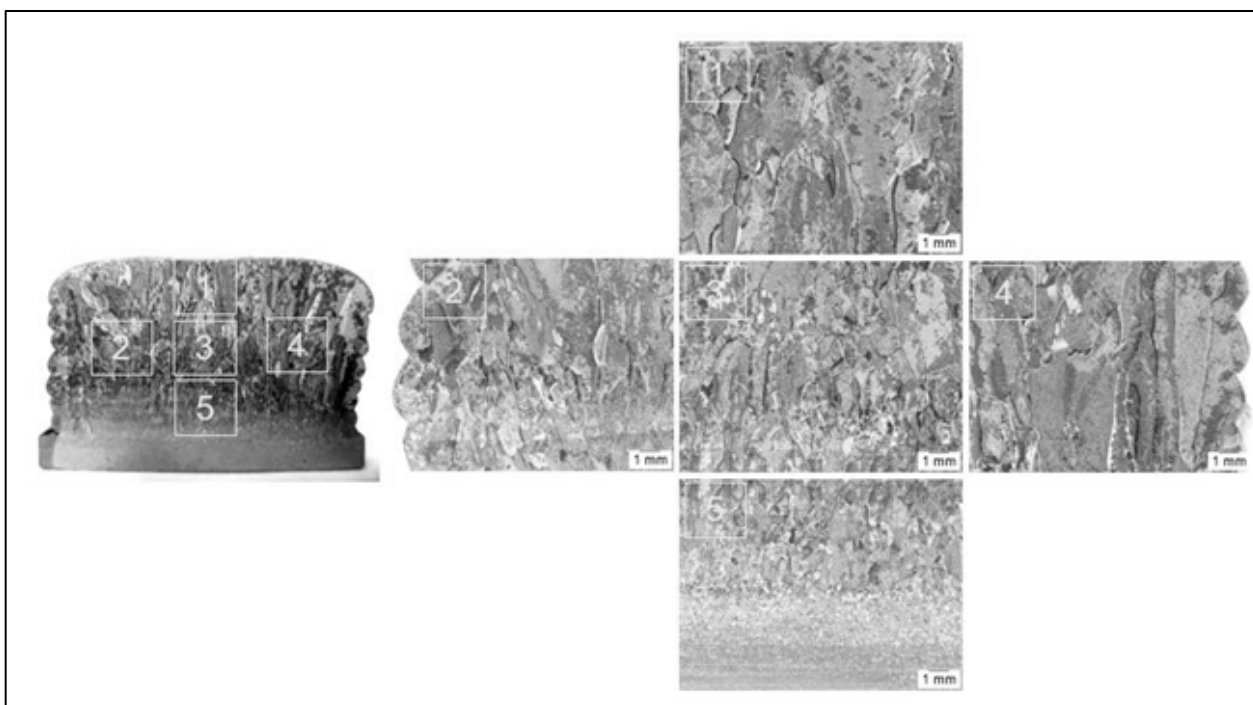


Fig. 2 Secțiune macroscopică a unei probe WAAM din TiAl6V4. Setul comun de parametri pentru toate experimentele au fost: Punct de funcționare: Ø 1,2 mm, Distanța de la duza de curent la piesă (CTWD): 15 mm, viteza de sudare vw: 30 cm/min, gaz de protecție: DIN EN 439-I1, viteza de avans a sârmei: 4 m/min

Fig. 2 Macro section of a TiAl6V4 WAAM welded sample. The common set parameters for all the experiments were: Operating point: Ø 1.2 mm, Contact tip-work distance (CTWD): 15 mm, vw: 30 cm/min, shielding gas: DIN EN 439-I1, wfs: 4 m/min

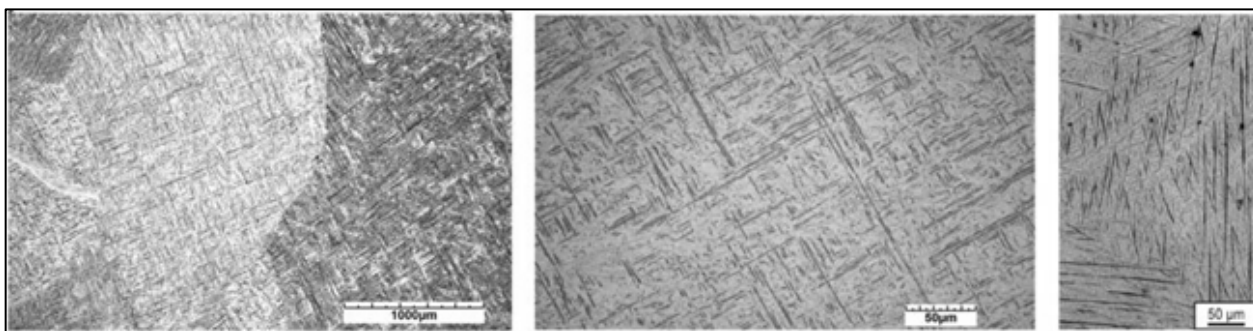


Fig. 3. Microstructura unei probe (dimensiuni: 50x30x100 mm) produsă prin WAAM, imaginea din dreapta din literatură [11]

Fig. 3. Microstructure of a test specimen (dimension: 50x30x100 mm) produced by WAAM, right picture from the literature [11]

4.2 Analiza chimică a metalului depus

Un considerent foarte important la prelucrarea titanului în timpul transformărilor de la lichid la solid (de exemplu, turnare, sudare, fabricație aditivă) este gestionarea potențialului de contaminare atmosferică, în special cu oxigen. Conrad [15] a studiat amănunțit efectul carbonului, azotului și oxigenului interstițial asupra proprietăților titanului și a recunoscut reactivitatea extremă a titanului și afinitatea puternică pentru astfel de interstiții, care provoacă o fragilizare severă. Oxigenul este un element de aliere important și asigură durificarea, dar concentrația sa admisibilă în aliaj este strict limitată. De exemplu, titanul ASTM de gradul 5 (Ti6Al4V) are un conținut de oxigen maxim admisibil de 2000 ppm. Prevenirea contaminării atmosferice în timpul manipulării topiturii se poate realiza prin prelucrarea în vid, într-o cameră de gaz inert sau prin asigurarea unei protecții localizat cu gaz inert. Majoritatea proceselor de AM a titanului, cum ar fi topirea cu fascicul de electroni, topirea selectivă cu laser etc., au loc în vid sau într-o incintă cu gaz inert, unde contaminarea nu reprezintă o problemă.

Pentru acest experiment, toate probele au fost sudate în interiorul unei incinte cu gaz de argon pur și trebuie menționat faptul că răcirea metalului sudat are loc în același mediu de gaz protector. Prin urmare, conținutul de oxigen al materialului, atât la suprafață, cât și în interiorul structurii sale, are o mare importanță.

Tabelul 3 prezintă analiza chimică efectuată prin intermediul unei spectroscopii de emisie optică cu descărcare luminiscentă (GDOES). GDOES este foarte asemănătoare cu spectrometria de emisie optică obișnuită, cu excepția faptului că permite, de asemenea, captarea unui profil de adâncime de înaltă rezoluție. Din profilul de adâncime se poate observa un strat subțire de oxid de aproximativ 2 μm în zona periferică și o oxidare constantă de un nivel suficient de scăzut de 1100 ppm în interiorul structurii materialului.

4.2 Chemical Analysis of deposited metal

A very important consideration when processing titanium during liquid to solid transformations (e.g. casting, welding, additive manufacturing) is to manage the potential for atmospheric contamination, particularly oxygen. Conrad [15] thoroughly studied the effect of interstitial oxygen, nitrogen and carbon on the properties of titanium and acknowledged titanium's extreme reactivity and strong affinity for such interstitials which cause severe embrittlement. Oxygen is an important alloy element and provides strengthening but its allowable concentration in the alloy is strictly limited. For example, ASTM Grade 5 Titanium (Ti6Al4V) has a maximum allowable oxygen content of 2000 ppm. Preventing atmospheric contamination during melt handling can be achieved by processing under a vacuum, an inert gas chamber or by providing a localised inert gas shield. Most titanium AM processes such as Electron Beam Melting, Selective Laser Melting etc. occur in a vacuum or inert gas chamber where contamination is a non-issue.

For this investigation, all samples were welded inside a pure argon gas chamber and it has to be mentioned, that the cooling of the weld metal takes place in the same shielding gas environment. The oxygen content of the material both on its surface and inside its structure is therefore of great importance.

Table 3 shows the chemical analysis performed via a glow discharge optical emission spectroscopy (GDOES). GDOES is very similar to usual optical emission spectrometry, with the exception that it also allows a high-resolution depth profile to be captured. From the depth profile we can see a thin oxide layer of roughly 2 μm in the peripheral zone, and constant oxidation of a sufficiently low-level of 1100 ppm inside the material structure.

Tabel 3. Analiza chimică a elementelor metalice și oxigenului folosind spectroscopia de emisie optică cu descărcare luminiscentă (GDOES); măsurată la 3 mm sub suprafață

Table 3. Chemical analysis of metallic elements and oxygen using a glow discharge optical emission spectroscopy (GDOES); measured 3 mm below surface

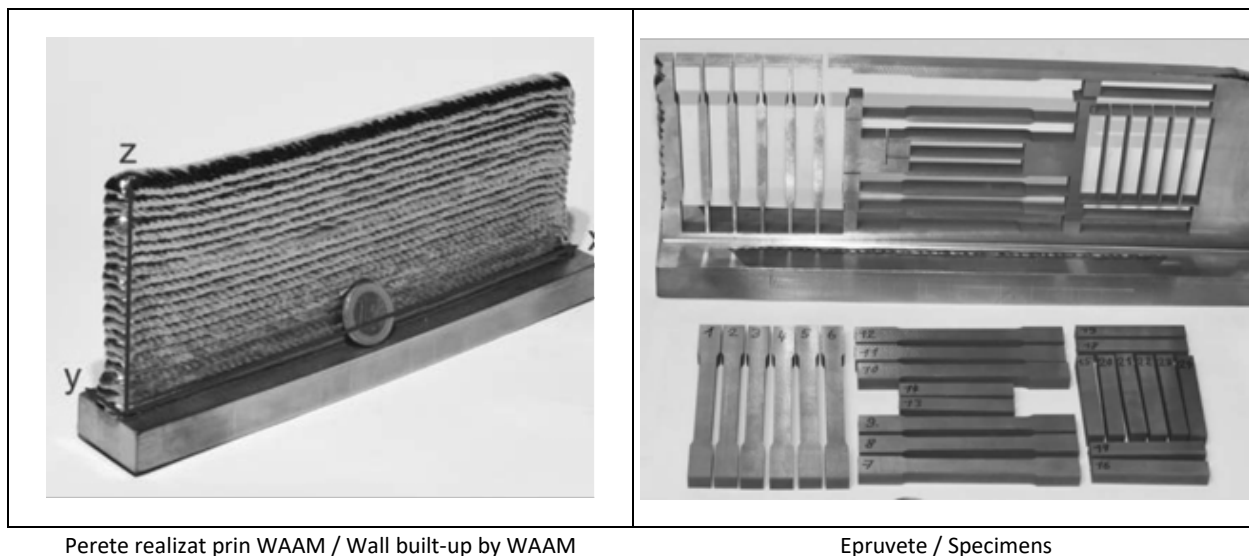
Compoziția chimică / Chemical composition, [%]	Ti	Al	V	O
Compoziția chimică a sârmei de adaos Filler wire composition	88,7	6,3	4,2	0,18
Compoziția chimică a materialului depus (valori măsurate) Chemical composition of the deposited material (measured values)	88,3	6,8	3,8	0,11

4.3 Încercări mecanice

Încercările mecanice au fost efectuate pe un perete WAAM sudat, din care s-au prelevat ulterior epruvetele de încercare la tracțiune și la încovoiere prin șoc (Charpy-V) în direcțiile X și Z, utilizând procedeul de erodare cu sârmă (figura 4). Eșantioanele WAAM au fost produse cu 21 de straturi, iar dimensiunea înainte de prelucrare a fost de 200x10x100 mm. După prelucrare, grosimea peretelui a fost redusă la 6 mm.

4.3 Mechanical Technological Examination

The mechanical examinations were conducted on a welded WAAM wall with subsequent removal of tensile and notch test specimens in X- and Z- directions using the wire eroding process (Figure 4). The WAAM samples were produced with 21 layers, and the dimension before machining was 200x10x100mm. After machining the thickness of the wall was reduced to 6 mm.



Perete realizat prin WAAM / Wall built-up by WAAM

Epruvete / Specimens

Fig. 4. Epruvete de încercare la tracțiune și la încovoiere prin șoc cu creștătură în V dintr-un perete sudat
Fig. 4. Tensile- and notch test specimens from a welded wall

Contrar așteptărilor din micro-grafiile cu o structură cu granulație grosieră, probele sudate prezintă o structură uimitor de dură, care le face extrem de rezistente. Macro-grafiile au arătat că nu există nicio dovadă de anizotropie evidentă. De exemplu, diferența dintre limita de elasticitate și rezistența la tracțiune între proba cu direcție longitudinală și cea cu direcție transversală este mai mică de 3% și, respectiv, 6%. Fără niciun tratament termic ulterior, valorile de rezistență sunt mai mici decât specificațiile generale ale metalului de bază. Tabelul 4 prezintă datele cerute de industria aerospațială, datele din starea imediat după sudare și datele după tratamentul termic post-sudare.

Epruveta pentru încercarea la încovoiere prin șoc cu creștătură în V a avut dimensiunile 40x6x6 mm și dacă ar fi convertită la dimensiunea standard (55x10x10mm) a epruvetelor Charpy-V conform DIN EN ISO 148-1 (Materiale metalice. Încercarea de încovoiere prin șoc pe epruveta

Contrary to expectations from the micrographs with a coarse grain structure, the welded samples exhibit an astonishingly tough structure that makes them extremely strong. The macrographs showed, that there is no evidence of any obvious anisotropy. For example, the difference in the yield strength and tensile strength between the longitudinal- and transverse direction sample is less than 3% and 6% respectively. Without any subsequent heat treatment, the strength values are lower than the general specifications of the base metal. Table 4 shows the required data from the aerospace industry, the data as welded and the data after post weld heat treatment.

The notch impact specimen was measured with 40x6x6 mm and if it will be converted to standard dimension (40x10x10 mm) of Charpy-V samples according to DIN EN ISO 148-1 (Metallic materials - Charpy pendulum impact test - Part 1: Test method) the notch impact would be appr. 3 times higher.

Charpy. Partea 1: Metodă de încercare), rezistența ar fi de aproximativ 3 ori mai mare. Încercările la tracțiune au fost efectuate în conformitate cu DIN EN 10002-1 (Materiale metalice. Încercarea la tracțiune. Partea 1: Metoda de încercare la temperatura ambiantă). Rezistența la tracțiune, de exemplu, poate fi mărită de la 844 MPa (în starea imediat după sudare, în direcția Z) la 895 MPa, atunci când proba a fost recoaptă în două etape, conform figurii 5:

- o Etapa 1: Epruvetele au fost încălzite la 950°C și apoi răcite în heliu într-un cuptor (viteză de răcire: 1,05°C/s) – figura 5.
- o Etapa 2: Epruvetele au fost încălzite la 520°C pentru o oră și apoi răcite în heliu într-un cuptor (viteză de răcire: 0,13°C/s).

Rezultatele încercărilor mecanice sunt prezentate în tabelul 4 și figurile 6 și 7.

The tensile test was carried out according to DIN EN 10002-1 (Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of testing at ambient temperature). The tensile strength e.g can be increased from 844 MPa (as welded in Z-direction) to 895 MPa, when the sample was annealed in two steps according to figure 5:

- o Step 1: The samples were heated to 950°C and then cooled under helium in a furnace (cooling rate: 1.05°C/s) – figure 5.
- o Step 2: The samples were then tempered at 520° for 1 hours and cooled under helium in the furnace. (cooling rate: 0.13°C/s).

The results obtained during mechanical testing are presented in table 4 and figure 6 and 7.

Tabel 4. Rezultatele încercărilor epruvetelor sudate prin WAAM
Table 4. Test results of WAAM welded samples

	Cerințe domeniu aerospațial Requirements aerospace		După sudare As welded		După recoacere Annealed	
	Direcție x x-direction	Direcție z z-direction	Direcție x x-direction	Direcție z z-direction	Direcție x x-direction	Direcție z z-direction
Limita de curgere [MPa] Yield stress [MPa]	820	785	754	734	855	795
Rezistența la tracțiune [MPa] Tensile strength [MPa]	895	835	894	844	952	895
Alungirea [%] Elongation [%]	6	5,5	10,0	14,1	6,2	11,0
Reziliența [J]* Notch impact [J]*	(11)	(11)	12,5	13,3	11	11,5

* Epruvetele de încercare la încovoiere prin șoc cu creștătură în V au avut dimensiunile 40x6x6 mm; unghiul creștăturii: 45°; adâncimea creștăturii: 1,2 mm

* Notch impact specimen was 40x6x6 mm in dimension; notch-angle: 45°; notch depth: 1.2 mm

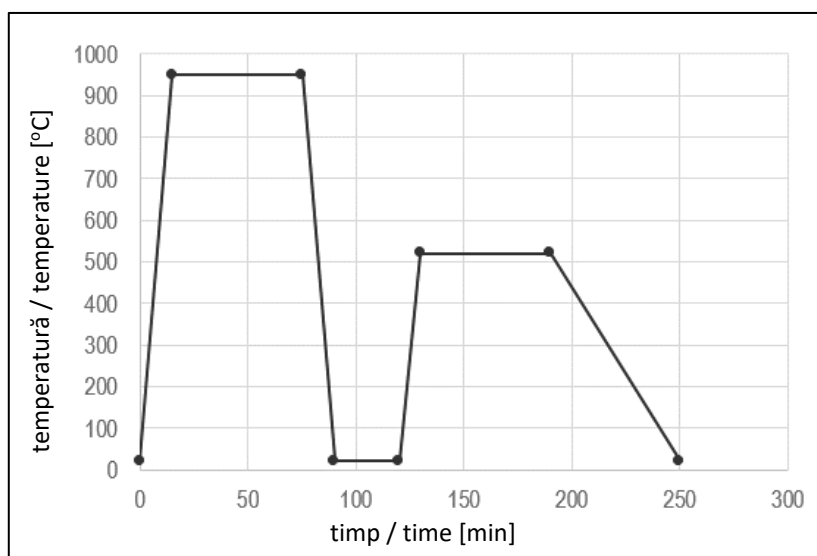


Fig. 5 Diagrama de recoacere conform probelor sudate din tabelul 4
Fig. 5 Annealing curve according to the welded samples from table 4

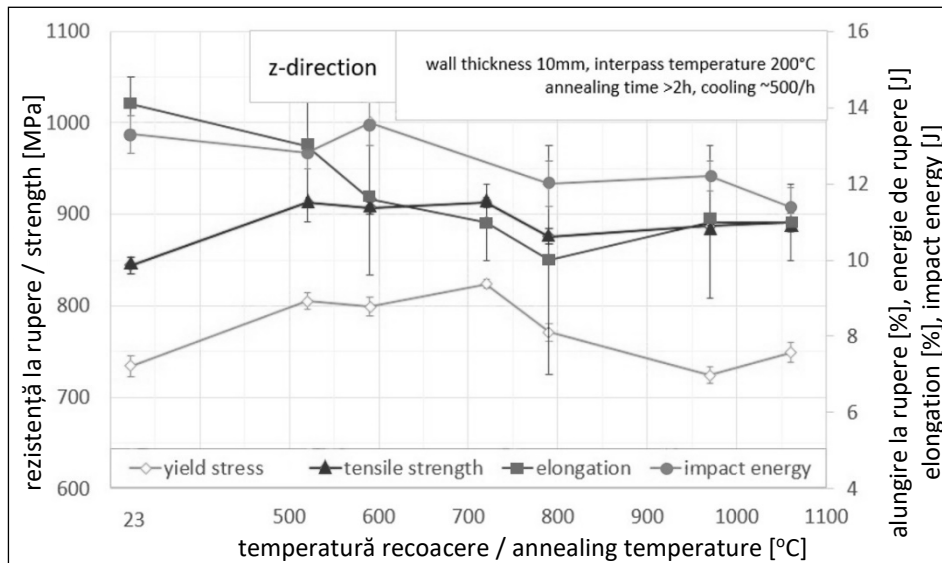


Fig. 6 Proprietățile mecano-tehnologice în funcție de temperatura de recoacere în direcția Z
Fig. 6 Mechanical-technological properties versus annealing temperature in Z-direction

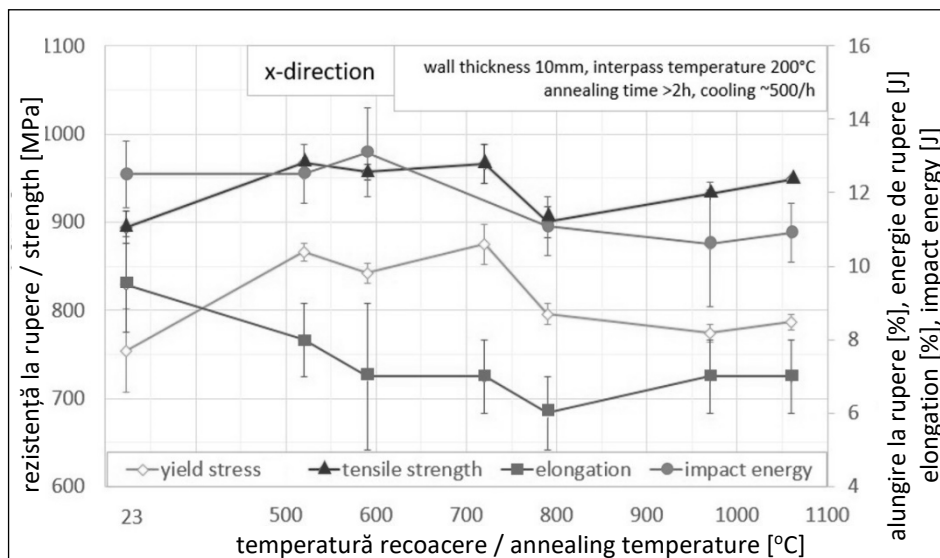


Fig. 7 Proprietățile mecano-tehnologice în funcție de temperatura de recoacere în direcția X
Fig. 7 Mechanical-technological properties versus annealing temperature in X-direction

5. Aplicații industriale

Datorită raportului ridicat dintre rezistența la tracțiune și densitate, rezistenței ridicate la coroziune și a capacității de a rezista la temperaturi relativ ridicate fără fluaj, aliajele de titan sunt utilizate la aeronave, blindaje, nave militare, nave spațiale și rachete. În astfel de aplicații, titanul aliat cu aluminiu, vanadiu și alte elemente este utilizat pentru o varietate de componente, inclusiv piese structurale critice, pereți anti-foc, trenuri de aterizare, conducte de evacuare (la elicoptere) și sisteme hidraulice. De fapt, aproximativ două treimi din întreg titanul

5. Industrial Applications

Due to their high tensile strength to density ratio, high corrosion resistance, and ability to withstand moderately high temperatures without creeping, titanium alloys are used in aircraft, armour plating, naval ships, spacecraft, and missiles. For these applications titanium alloyed with aluminium, vanadium, and other elements is used for a variety of components including critical structural parts, fire walls, landing gear, exhaust ducts (for helicopters), and hydraulic systems. In fact, about two thirds of all

metalic produs este utilizat la motoarele și cadrele aeronavelor.
În cele ce urmează vor fi descrise două componente diferite realizate din Ti6Al4V pentru posibile aplicații industriale.

5.1 Proba "A" pentru industria aerospațială

Depunerea straturilor în timpul WAAM are ca rezultat diferite grade de rugozitate, în funcție de sârma pentru sudare utilizată și de parametrii de sudare. Un diametru subțire al sârmei creează o piesă cu o suprafață mai netedă. De exemplu, au fost măsurate valori limită de 100 μm și până la 1000 μm folosind sârmă din TiAl6V4 cu un diametru de 0,8 mm și, respectiv, 1,2 mm. Figura 8 prezintă o măsurare cu ajutorul sistemului de măsurare a conturului.

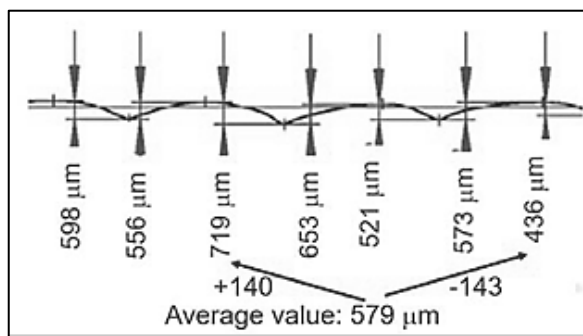


Fig. 8 Rugozitatea suprafeței măsurată folosind un dispozitiv de măsurare a conturului, diametrul sârmei: 1,2 mm
Fig. 8 Surface roughness using a contour measuring device, wire diameter: 1.2 mm

titanium metal produced is used in aircraft engines and frames.
In the following two different components made of Ti6Al4V will be described for possible industrial applications.

5.1 Specimen "A" for the aerospace industry

The build-up of layers during WAAM results in different degrees of roughness, depending on the welding wire and the welding parameters. A thin wire diameter creates a workpiece with a smoother surface. By way of example, limit values of 100 μm and up to 1000 μm were measured using TiAl6V4 with a diameter of 0.8 mm and 1.2 mm respectively. Figure 8 shows a measurement using the contour measuring system.

Aliajele de titan sunt, de obicei, prelucrate mecanic. Timpii de prelucrare și uzura sculelor reprezintă o provocare în acest caz. Figura 9 prezintă o piesă de test care, de obicei, trebuie frezată dintr-o bucată întreagă.

Titanium alloys are usually machine-finished. The machining times and tool wear are a challenge here. Figure 9 shows a test piece that usually needs to be milled from a whole piece.

Parametri economico-tehnici pentru cazul în care piesa s-ar freza dintr-o bucată de material turnat Economic and technical parameters for the case of milling a cast piece to make the product • Freză specială din carbură dură INOX-titan / Special solid carbide end mill INOX-titanium: 16 mm (€ 400) • 2 freze uzate / 2 milling cutters worn • Durată de prelucrare / machining time: 2.5 h Durată totală de fabricare: 2,5 ore Total manufacturing time: 2.5 hours	Parametri economico-tehnici pentru cazul în care piesa s-ar freza dintr-un produs semifabricat WAAM Economic and technical parameters for the case of milling a WAAM generated piece to make the product • Freză standard din carbură dură / Standard solid carbide end mill: MONSTERMILL 16 mm (€140) • 1 freză, neuzată / 1 milling cutter, unworn • Timp frezare / machining time: 25 min • Durată de sudare / welding time: 35 min Durată totală de fabricare: 1 oră Total manufacturing time: 1 hour
---	--



Fig. 9 Compararea costurilor și a duratei de fabricare
Fig. 9 Comparison of costs and manufacturing time

Tensiunea la care este supusă freza în timpul frezării frontale cu avans vertical este de multe ori mai mare decât în timpul frezării simple. Odată ce au fost luate în considerare și costurile sculelor și timpul de prelucrare, precum și uzura, costurile de prelucrare pot fi reduse de aproape 10 ori. În majoritatea aplicațiilor, componentele sunt produse prin forjare sau frezare. La prelucrarea componentelor se înregistrează costuri ridicate din cauza îndepărtării materialului, a timpului de prelucrare și a uzurii sculelor, de aceea WAAM este o alternativă rentabilă.

5.2 Proba “B” pentru industria aerospațială

Figura 10 prezintă o componentă pe care a fost produsă o îmbinare în T cu ajutorul WAAM înainte de a fi examinată ulterior. Grosimea peretelui de 5 mm și raza din punctul de intersecție necesită un metal depus cu o lățime de 11 mm.

La frezarea componentei dintr-o piesă brută în formă de bloc, gradul de îndepărtare a materialului este de 93%. Prin utilizarea fabricației aditive pentru a produce o secțiunea apropiată de cea a semifabricatului, cantitatea de deșeuri poate fi redusă de 7 ori.

The stress on the milling cutter during face plunging is many times higher than during plain milling. Once tool costs and machining time have also been taken into account as well as wear, the machining costs can be cut by nearly a factor of 10. In the majority of applications, components are produced through forging or milling. High costs are incurred when machining the components due to the stock removal, the machining time, and the tool wear, hence WAAM is a cost-effective alternative.

5.2 Probe “B” for the aerospace industry

Figure 10 shows a component on which a T-joint has been produced using WAAM before being subsequently examined. The wall thickness of 5 mm and radius at the intersection point requires a weld metal with a width of 11 mm.

When milling the component from a block-shaped blank, the stock removal is 93%. By using additive manufacturing to produce the section close to the end of the blank, the amount of metal shavings can be reduced by a factor of 7.

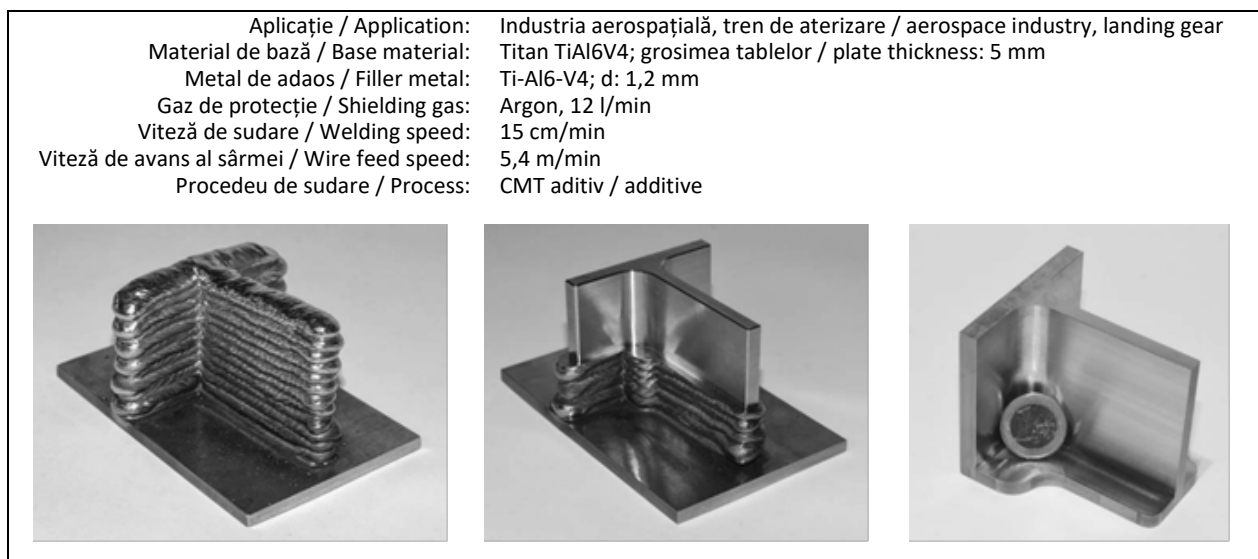


Fig. 10 Componentă de construcție realizată din TiAl6V4 (dimensiuni: 70x70x70 mm)
Fig. 10 Construction component made from TiAl6V4 (Dimension: 70x70x70 mm)

Secțiunea microscopică a componentei din figura 11 prezintă o microstructură grosieră cu o structură fină martensitică. Tomografia

The macrosection of the component in Figure 11 shows a coarse microstructure with a martensitic fine structure. The computer

computerizată nu arată niciun caz de lipsă de fuziune, însă au fost observați doi micropori cu dimensiuni mai mici de 0,3 mm (al doilea por în alt strat).

tomography does not show any instances of lack of fusion, however two micropores measuring less than 0.3 mm were observed (second pore in a different level).

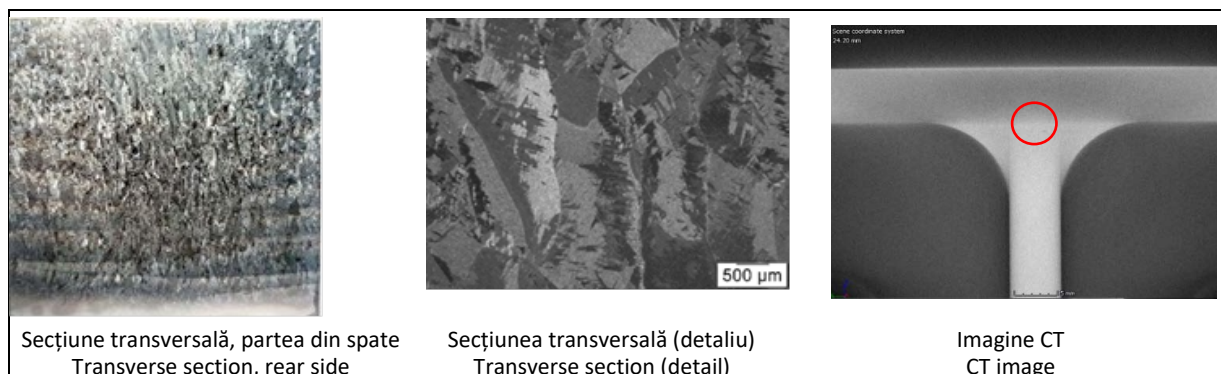


Fig. 11 Secțiune transversală și imagine CT a componentei de construcție din figura 10

Fig. 11 Transverse section and CT image of the construction component from Figure 10

6. Concluzii și perspective

În urma experimentelor efectuate și a considerațiilor teoretice abordate în acest studiu, se pot trage următoarele concluzii:

- I. Procedeele de sudare cu arc electric sunt din ce în ce mai mult utilizate pentru fabricația aditivă de componente metalice. Acestea se caracterizează prin rate de topire relativ ridicate, restricții mici de spațiu de instalare și costuri de investiție și de exploatare reduse și, astfel, sunt predestinate pentru producția în serie a structurilor mari. Progresele în programarea roboților, optimizarea traiectoriilor și dezvoltarea procedeele de sudare cu energie liniară redusă fac ca aceste procese de fabricație aditivă să devină din ce în ce mai mult punctul central al strategiilor moderne de producție.
- II. Se poate demonstra că WAAM este o alternativă rentabilă la prelucrare. Rata de depunere este foarte mare în comparație cu alte procedee aditive.
- III. Sunt necesare procedee de sudare cu stabilitate ridicată la transfer, care să asigure o depunere consistentă a straturilor de sudură, fără erori și cu energie liniară redusă. În ultimii ani, numărul variantelor de procedee de sudare cu inversarea vitezei de avans a sârmei a crescut, și în același timp au fost lansate mai multe linii sinergice care, la rândul lor sunt optimizate pentru WAAM.
- IV. Spre deosebire de linia sinergică cu aplicare "universală", linia sinergică "additive" este

6. Summary and Outlook

From the experiments conducted and the theoretical considerations dealt with in this study, we can draw the following conclusions:

- I. Arc welding processes are increasingly used for the additive production of metal components. They are characterized by relatively high melting rates, small installation space restrictions and low investment and operating costs and are therefore predestined for the series production of large structures. Advances in robot programming, path planning and the development of low-energy welding processes mean that these additive manufacturing processes are increasingly becoming the focus of modern production strategies.
- II. It can be demonstrated that WAAM is a cost-effective alternative to machining. The deposition rate is very high compared to other additive processes.
- III. Stable welding processes are needed that ensure a consistent build-up of weld layers without errors and with just a low heat input. In recent years the number of process variants of reversing welding processes has increased while more characteristics have been launched that are also optimized for WAAM.
- IV. As opposed to the "universal" characteristic, "additive" is optimized for an additive build-up of layers with a significantly lower heat input and high process stability.

- optimizată pentru o depunere aditivă a straturilor cu o energie liniară semnificativ mai mică și o stabilitate ridicată a procesului.
- V. Analizele și încercările stratului de bază pe aliajul de titan TiAl6V4 demonstrează o anizotropie redusă a valorilor mecanice și un conținut de oxigen în limitele de toleranță.
 - VI. Fără niciun tratament termic ulterior, valorile de rezistență sunt mai mici decât specificațiile generale ale metalului de bază. Valorile de rezistență necesare pot fi atinse prin tratament termic ulterior.
 - VII. Exemplele au arătat că, atât în cazul aplicațiilor speciale cu pereți subțiri, cât și în cazul construcțiilor cu rezistență ridicată, se poate obține un nivel de calitate suficient de omogen. Potențialul acestui procedeu de fabricație nu a fost încă exploatat și se pot aștepta multe aplicații noi și interesante în viitor.

- V. The base layer tests on the titanium alloy TiAl6V4 demonstrate little anisotropy of the mechanical values and an oxygen content within the tolerance limits.
- VI. Without any subsequent heat treatment, the strength values are lower than the general specifications of the base metal. The required strength values can be achieved through subsequent heat treatment.
- VII. The examples have shown that in both thin-walled special applications and high-strength constructions, a sufficiently homogeneous level of quality can be achieved. The potential of this manufacturing process has not yet been exploited and many new and exciting applications can be expected in the future.

Mulțumiri

Autorii sunt recunoscători domnului Manuel Mayr, domnului Philipp Doerner și domnului Stephan Egerland, toți de la Cercetare și Dezvoltare la Fronius International pentru asistența valoroasă și pentru efectuarea încercărilor la tracțiune și testelor de sudare. Lucrarea a fost înregistrată ca document al Institutului Internațional de Sudură, cu numărul IV-1434-19.

Acknowledgement

The authors are grateful to Mr Manuel Mayr, Mr Philipp Doerner and Mr Stephan Egerland all with Fronius International Research and Development for valuable assistance and conducting tensile and welding tests. The paper was registered as document of International Institute of Welding, under number: IV-1434-19.

Bibliografie

References

- [1] R.R. Dehoff, C. Tallman, C.E. Duty, W.H. Peter, Y. Yamamoto, Y. Chen, W. Blue: Case study: additive manufacturing of aerospace brackets. *Advanced Materials and Processes*, 2013.
- [2] Froes, F.H., Gungor, M.N., Ashraf Imam, M., 2007. Cost-affordable titanium: the component fabrication perspective. *JOM* (June), 28–31.
- [3] Cunningham, C.R.; Wikshåland, S.; Xu, F.; Kemakolam, N.; Shokrani, A.; Dhokia, V.; Newman, S.T. Cost Modelling and Sensitivity Analysis of Wire and Arc Additive Manufacturing, *Procedia Manufacturing*, v. 11, 2017, pp. 650-657.
- [4] Martina, F.; Williams, S. Wire+arc Additive Manufacturing vs. Traditional Machining from Solid: a Cost Comparison. Version 1. Cranfield University Report (Welding Engineering and Laser Processing Centre), 2015, 26 p.
- [5] Fera, M.; Macchiaroli, R.; Fruggiero, F.; Lambiase, A., A new perspective for production process analysis using additive manufacturing—complexity vs production volume, *Int J Advanced Manufacturing Technology*, v. 95, 2018, pp. 673–685.
- [6] Bekker, A.C.M.; Verlinden, J.C., Life cycle assessment of wire + arc additive manufacturing compared to green sand casting and CNC milling in stainless steel, *Journal of Cleaner Production*, v. 177, 2018, pp. 438-447, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.148.
- [7] Xiong, J.; Li, Y.; Li, R.; Yin, Z., Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 252, 2018, pp. 128-136
- [8] Yurii Yehorov, Leandro João da Silva, Américo Scotti: Effect of Travel and Wire Feed Speeds on WAAM Operational and Economical Envelop of an Al-Mg5 alloy. Joint Intermediate Meeting 2019, Greifswald, Germany, Doc.XII-2410-19 /212-1581-19 /IV-1409-19 /I-1383-19
- [9] Short, A.B., 2009. Gas tungsten arc welding of α - β titanium alloys: a review. *Mater. Sci. Technol.* 25, 309–324.
- [10] TIMET: Titanium Design and Fabrication Handbook for Industrial Applications. p. 37. 1997
- [11] P. Peter, F. G. Warchomicka and N. Enzinger (2018); Wire based additive manufacturing of Ti6Al4V using electron beam welding. EBAM 2018 Conference Presentation, Nuremberg
- [12] J. Fuchs, C. Schneider and N. Enzinger (2018); Wire-based additive manufacturing using an electron beam as heat source. *Welding in the World*, vol. 62, pp. 267-275
- [13] F. Martina, J. Mehnen, S. W. Williams, P. Colegrove and F. Wang (2012); Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, pp. 1377-1386
- [14] C. Charles: Modelling microstructure evolution of weld deposited Ti-6Al-4V. Luleå University of Technology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Division of Material Mechanics, 2008 ISSN: 1402-1757.

[15] Conrad, H., (1981); Effect of interstitial solutes on the strength and ductility of titanium. Prog. Mater. Sci. 26, 123–403.

Pentru citare:

Staufer, H., Grunwald, R., Mechanical properties of Wire Arc Additive Manufactured Components made of Ti6Al4V, Sudura, nr. 1 (2023), year XXXII, x-y