Broj rada: 4.4
DOI: 10.65156/wws.sjdp.si.020

ADITIVNA IZRADA METALNIH DIJELOVA NA BAZI ŽICE PRIMJENOM LASERA -PREGLED

LASER WIRE-BASED ADDITIVE MANUFACTURING OF METAL PARTS: AN OVERVIEW

ma Srđan Samardžić[1], viši asistent, ORCID broj: 0009-0003-4096-7523
dr Sebastian Baloš[2], red. profesor, ORCID broj: 0000-0002-3828-8500
dr Aleksija Đurić[1], docent, ORCID broj: 0000-0002-0251-6364
dr Milan Rackov[2], red. profesor, ORCID broj: 0000-0003-4956-5849

[1]Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Mašinski fakultet, Vuka Karadžića 30, 71123 Istočno Sarajevo, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina,
[2]Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21102 Novi Sad, Srbija

E-mail: srdjan.samardzic@ues.rs.ba

Rezime: Laserska aditivna izrada na bazi žice (*Wire Laser Additive Manufacturing —WLAM*) je tehnologija iz grupe tehnologija taloženja fokusiranim izvorom energije aktivacije (*Direct Energy Deposition – DED*). Predstavlja naprednu tehnologiju aditivne izrade metalnih dijelova kod koje se metalna žica topi laserskim snopom i nanosi sloj-po-sloj po unaprijed programiranoj putanji. Pregled obuhvata ključne tematske oblasti: optimizaciju procesnih parametara, analizu mikrostrukture i mehaničkih svojstava za dominantne materijale i napredne sisteme monitoringa procesa. Sintezom zaključaka utvrđeno je da su kontrola unosa toplote, aktivno hlađenje i razvoj specifičnih žičanih materijala ključni pravci za daljnju industrijalizaciju ove tehnologije.

Ključne reči: Laserska aditivna izrada, parametri, mehanička svojstva, monitoring

Abstract: Wire Laser Additive Manufacturing (WLAM) is a deposition technology that uses a focused source of activation energy and belongs to the group of Direct Energy Deposition (DED) processes. It is an advanced additive manufacturing method for metal parts, in which a metal wire is melted by a laser beam and deposited layer by layer along a pre-programmed path. This review covers key thematic areas: optimisation of process parameters, analysis of microstructure and mechanical properties for dominant materials, and advanced process monitoring systems. Synthesising the conclusions shows that control of heat input, active cooling, and the development of specific wire materials are the key directions for the further industrialisation of this technology.

Key words: Laser wire additive manufacturing, process parameters, mechanical properties, process monitoring

1. UVOD

Pojavom aditivnih tehnologija stvorile su se mogućnosti za izradu složenih dijelova čije karakteristike bi bilo teško ili nemoguće postići tradicionalnim metodama proizvodnje [1].

Podstaknuta slobodom razvoja oblika, optimizacijom topologije i mogućnošću izrade složenih i lakih elemenata prilagodljivih performansi, aditivna izrada (*Additive manufacturing - AM*) brzo je stekla popularnost kako u akademskoj zajednici tako i u industriji [2]. Jedno od glavnih svojstava aditivne proizvodnje je pružanje mogućnosti izrade dijelova kompleksne geometrije uz minimalan otpad [3,4] a moguća je izrada komponenti koje bi svojom kompleksnom geometrijom mogle mijenjati sklopove više pojedinačnih dijelova dobijenih konvencionalnim tehnologijama. Masovnijom implementacijom aditivnih tehnologija omogućava se skraćenje lanaca snabdijevanja, smanjenje potreba za skladištenjem dijelova i vremena zamjene dijelova pri održavanju kao i eliminacija troškova dostave rezervnih dijelova [4]. Globalno tržište aditivnih tehnologija procijenjeno je na 30,6 milijardi američkih dolara u 2025 godini, a očekuje se da zabilježi godišnju stopu rasta od preko 23% u periodu 2026-2033. Vrijednost globalnog tržišta opreme za aditivnu izradu dijelova od metala procijenjuje se na 7,3 milijardi američkih dolara u 2026. i predviđa se rast na 30,6 milijardi američkih dolara do 2033. godine. Rast ovog tržišta prvenstveno potiče od potražnje za laganim i kompleksnim dijelovima u automobilskoj industriji, avio i svemirskoj industriji, ali i namjenskoj industriji [5].

Prvi temelji za *WLAM* postavljeni su 1980-ih godina razvojem tehnologije laserskog zavarivanja a 1990-ih pojavili su se kompjuterski upravljani laserski sistemi. Ključna prekretnica bio je razvoj tehnologije *LENS* (*Laser Engineered Net Shaping*) za izradu metalnih dijelova oblika bliskog konačnom (*near-net-shape*) korištenjem lasera velike snage za topljenje metalnog praha sloj po sloj. Ova tehnologija je kasnije dovela do razvoja različitih varijanti *DED* tehnologija koje kao polazni materijal koriste žicu [6].

Tehnike *DED*-a zasnovane na žici kao osnovnom materijalu stekle su popularnost zbog visokog stepena iskorištenja materijala [6,7] i velikih brzina izrade u poređenju sa tehnikama koje koriste prah. Za razliku od široko rasprostranjenih i poznatih izvora energije aktivacije zasnovanih na električnom luku ili plazmi, laserski snop je stabilniji izvor, lakši je za upravljanje i precizniji, naročito pri korišćenju koaksijalnih laserskih sistema. Glavne odlike *WLAM* ogledaju se u manjem unosu toplote a samim tim i manjom zonom uticaja toplote (ZUT). Nakon procesa, dijelovi imaju finiju mikrostrukturu uz manje miješanje sa materijalom osnovne ploče. Zbog manjeg unosa toplote nakon izrade se javljaju i niže vrijednosti zaostalih napona i manje deformacije dijela što smanjuje potrebu za završnom obradom površine i naknadnom termičkom obradom. Korištenje materijala u vidu žice pojednostavljuje dovođenje materijala u zonu topljenja, jeftinije je, produktivnije i bezbjednije [6].

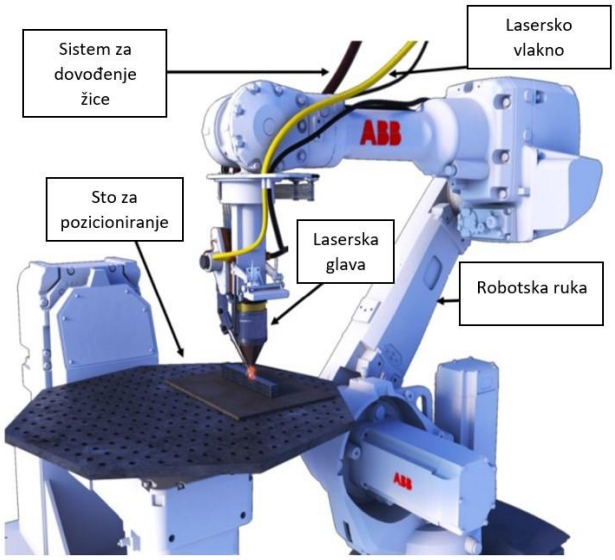
Dijelovi izrađeni *WLAM* tehnologijom danas se masovno koriste u vazduhoplovstvu i automobilskoj industriji [7,8], ali i medicinskim aplikacijama te mnogim drugim granama industrije [8]. Za postizanje visokog kvaliteta izrađenih dijelova u pogledu njihovih svojstava, ključno je upravljanje i optimizacija parametara *WLAM* procesa [8].

Osnovni cilj ovog rada je analiza trenutnog stanja tehnike u oblasti laserske aditivne izrade metalnih dijelova na bazi žice. Kroz rad će biti izvršeno mapiranje dostignutih saznanja i identifikacija otvorenih istraživačkih pitanja u oblasti *WLAM*-a.

2. OSNOVE LASERSKE ADITIVNE IZRADE NA BAZI ŽICE

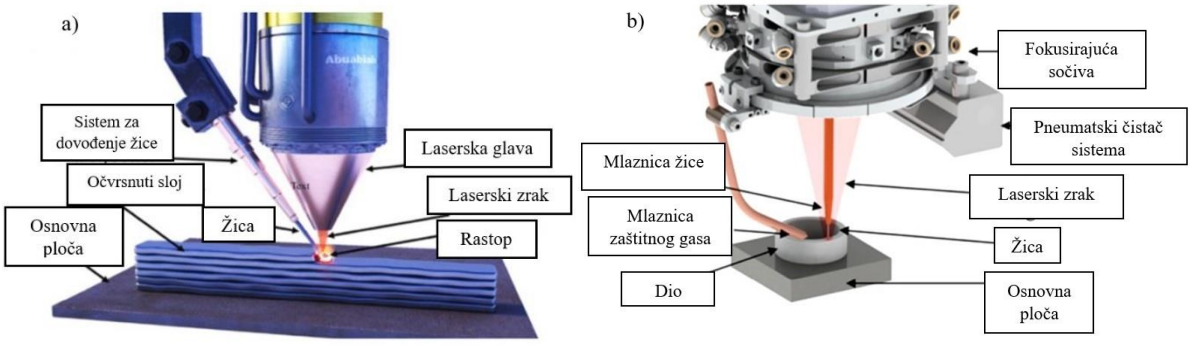
WLAM proces može biti jednostavano realizovan pomoću glave za lasersko zavarivanje postavljene na CNC mašinu umjesto alata za sječenje. Sa druge strane, njegova realizacija može podrazumijevati integraciju niza složenih i preciznih elektro-mehaničkih sistema radi postizanja boljih performansi. Laserski izvor i optičke komponente koje fokusiraju laserski snop predstavljaju ključne elemente procesa. Mehanizam za dovođenje žice obezbjeđuje kontinuirani dovod osnovnog materijala. Obično je neophodna mlaznica za zaštitni gas kako bi se spriječila oksidacija metala, ukoliko se proces ne odvija u zatvorenoj komori sa posebnom zaštitnom atmosferom. Na kraju, sistem je najčešće integrisan na robotske ruke (Slika 1.) koje obezbjeđuju za višeosno kretanje. Pored ovih ključnih komponenti, pomoćni sistemi mogu

uključivati opremu za predgrijavanje žice, ultrazvučne vibracije kao i sisteme za monitornig procesa pomoću infracrvenih (IR) kamera, laserskih skenera, CT skenera i drugih uređaja specijalizovane primjene [6].



Slika 1: Robotska ruka za WLAM [6]

Prema načinu dovođenja žice razlikuju se dva tipa *WLAM* postupka: postupak sa bočnim dovođenjem žice (Slika 2a) i postupak sa koaksijalnim dovođenjem žice (Slika 2b). Prvi tip u suštini predstavlja proces laserskog zavarivanja kod kojeg se žica dovodi u zonu dejstva laserskog snopa pod uglom između 15° i 60° kako bi se istopila. Ovakav tip sistema je najpogodniji za jednosmjerno navarivanje. U slučaju primjene ovakvog sistema za aditivnu izradu, često dolazi do defekata u pogledu asimetrične geometrije. Najveći dio trenutnih saznanja o *LW-DED* procesu stečen je upravo na takvim sistemima. Drugi tip podrazumijeva koaksijalno dovođenje žice kroz centar laserskog snopa, koji se najprije dijeli na više snopova raspoređenih u obliku prstena oko žice, a zatim usmjerava ka žici u blizini podloge [6].

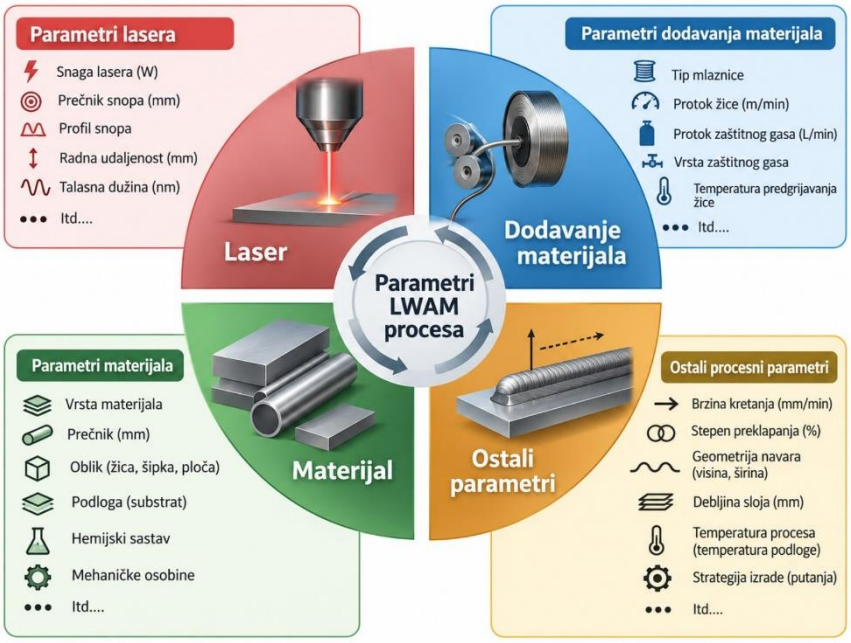


Slika 2: a) bočno dovođenje žice b) koaksijalno dovođenje žice [6]

Konačni izgled dijela nakon izrade postupkom *WLAM* zavisi od velikog broja parametara i njihove usklađenosti. Parametri koji utiču na proces (Slika 3) mogu se svrstati u četiri osnove grupe [9]:

- parametri lasera: snaga, prečnik snopa, talasna dužina, radna udaljenost glave lasera od radnog predmeta itd.
- parametri materijala: hemijski sastav, mehanička svojstva, prečnik žice, oblik osnovne ploče itd.

- parametri dodavanja materijala: brzina dovođenja žice, vrsta i protok zaštitnog plina, tip mlaznice itd.
- ostali procesni parametri: brzina kretanja laserske glave, način kretanja laserske glave (strategija putanje), temperatura predgrijavanja podloge itd.

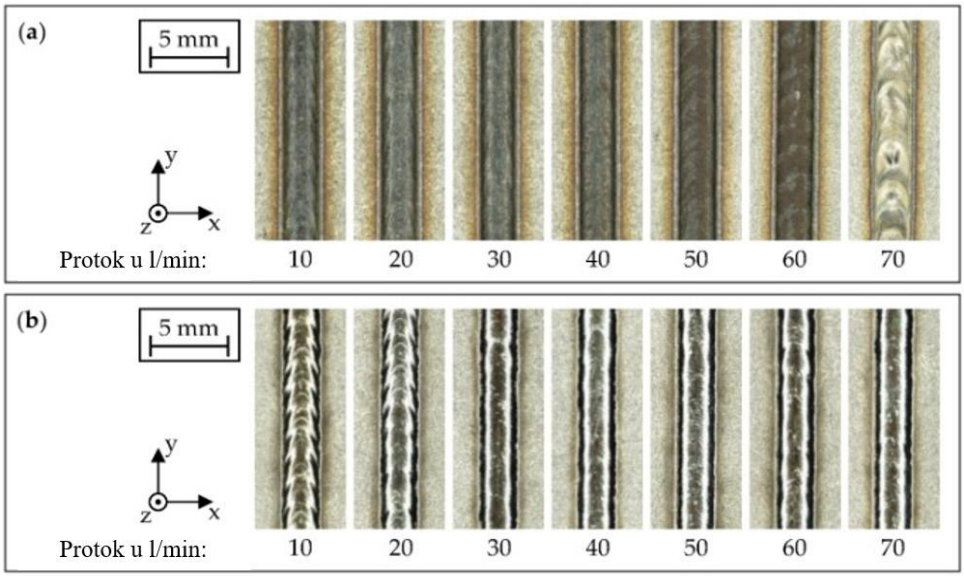


Slika 3: Parametri LWAM procesa (generisano pomoću alata vještačke inteligencije prema [9])

3. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Bernauer i sar. [10] ističu da se većina dosadašnjih istraživanja fokusira na analizu tankozidnih struktura. Kroz rad je analizirana varijacija parametara *WLAM* procesa u cilju formiranja preporuka za izradu debelozidnih dijelova bez defekata. Razmatrana je varijacija snage laserskog zraka, brzina kretanja laserske glave i brzina dovođenja žice. Nakon izbora optimalnog seta ovih parametara, variran je razmak između susjednih šavova pri cik-cak putanji laserske glave. Utvrđeno je da razmak između susjednih šavova (*track distance*) predstavlja ključan parametar za depoziciju materijala bez defekata. Autori ističu i da optimalni razmak značajno odstupa od teorijskog optimalnog modela jer fizički fenomeni procesa nisu obuhvaćeni modelom. Optimalni razmak šavova, brzina kretanja na zavojima putanje i visina sloja, omogućuje proizvodnju prizmatičnih dijelova bez defekata. Visina dijela i temperatura rastopljenog materijala su presudni za stabilan proces a autori predstavljaju i inovativni sistem monitoringa koji koristi CT i infracrveno mjerenje temperature.

Istraživanje [11] navodi da značajan uticaj na mehanička svojstva dijelova dobijenih *WLAM* postupkom ima oksidacija do koje dolazi tokom procesa. U pogledu troškova, kao bolje rješenje se nudi lokalna zaštitna atmosfera inertnog gasa u zoni procesa umjesto zatvorene gasne komore. Istraživači predstavljaju razvoj novog tipa mlaznice za dovođenje zaštitnog gasa te analiziraju uticaj protoka gasa. U istraživanju je kao osnovni materijal korišten nehrđajući čelik 316L. Korištenjem novog razvijenog koncepta mlaznice postignuta je depozicija materijala bez oksida kako za pojedinačne šavove (Slika 4), tako i za prizmatične uzorke. Nova geometrija mlaznice sa unutrašnjim kanalima za hlađenje pokazala je zaštitna svojstva nezavisno od smjera kretanja laserske glave, uz minimalne turbulencije koje onemogućavaju miješanje zaštitnog gasa sa atmosferom. Povećanje protoka zaštitnog plina sa 10 l/min na 70 l/min dovelo je do pada temperature rastopa za 15 K i smanjenjem širine za približno 110 µm.



Slika 4: Izgled pojedinačnih šavova pri različitim vrijednostima protoka gasa a) sa bočnom mlaznicom b) sa novom razvijenom mlaznicom [11]

Kao poseban doprinos ovog rada autori naglašavaju da je novi koncept koaksijalne mlaznice primjenjiv i na druge komercijalno dostupne glave za *WLAM*.

Casalino i sar. [12] predstavili su komparativnu analizu metalne aditivne izrade na bazi žice. Kroz rad su analizirana tri postupka različita po fokusiranom izvoru energije aktivacije: taloženje žice u strujnom luku (*Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM*), taloženje žice u laserskom snopu (*Wire Laser Additive Manufacturing – LWAM*) te hibridni postupak taloženja žice u laserskom snopu i zavarivanje plazmom sa direktnim lukom (*Laser Arc Hybrid Wire Deposition - LAHWD*). *LAHWM* predstavlja postupak koji objedinjuje procese proizvodnje pomoću električnog luka (*WAAM*) i proizvodnje pomoću lasera (*WLAM*) i žice. Moguće su različite konfiguracije sistema u zavisnosti koji se izvor koristi za topljenje žice a koji za stabilizaciju rastopljenog materijala što za direktnu posljedicu ima izradu dijelova sa boljim mehaničkim svojstvima i površinama većeg kvaliteta. Kao osnovne odlike hibridnog postupka, autori ističu [12]:

- veliku brzina nanošenja materijala - omogućava izradu velikih i složenih delova u relativno kratkom vremenskom roku;
- isplativost - zahtjeva manje materijala u poređenju sa aditivnom proizvodnjom na bazi praha za izradu velikih dijelova;
- visoku preciznost – velika gustina energije lasera i električnog luka omogućava izradu dijelova visoke preciznosti i kvaliteta površine;
- svestranost – postupak se može koristiti sa širokim spektrom materijala;
- poboljšana mehanička svojstva - izrada dijelova sa poboljšanim mehaničkim svojstvima, prvenstveno čvrstoća i žilavosti.

Kao jedno od glavnih ograničenja *WLAM* procesa je upotreba metala koji reflektuju svjetlost, jer se laserski snop može odbiti i oštetiti izvor lasera. Komparacija ove tri tehnologije data je u Tabeli 1. *WAAM* je poznat po velikoj brzini nanošenja materijala, niskim troškovima i slobodom u pogledu izbora materijala, ali ga odlikuju niska preciznost i loš kvalitet površine. *WLAM* se odlikuje visokom preciznošću i brzinom, ali je skup i ograničen u pogledu izbora materijala. *WLAHM* je poznat po visokoj preciznosti, velikoj efikasnosti, dobrom kvalitetu površine i fleksibilnosti u pogledu materijala ali ga karakterišu visoki troškovi i složenost.

Tabela 1: Poređenje procesa WAAM, LWAM i LAHWM [12]

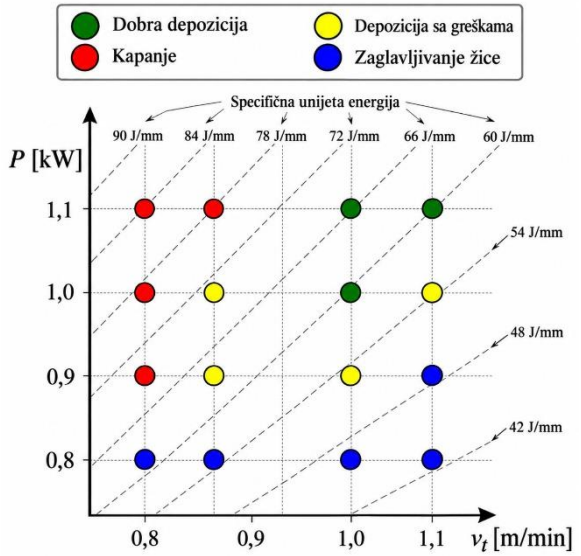
Karakteristika	WAAM	WLAM	LAHWM
Izvor električnog luka	✓	–	✓
Ekonomičnost	✓	–	–
Laserski izvor	–	✓	✓
Svestranost (izrada od različitih metala)	✓	✓	✓
Bolja kontrola procesa	–	+	++
Veća brzina depozicije materijala	–	+	++
Veća preciznost	–	+	++
Veća geometrijska tačnost izrađenih zidova	–	+	++
Potreba za naknadnom obradom	++	+	–
Veća složenost sistema	–	+	++
Složenija instalacija	–	+	++
Bolja mobilnost	++	+	–
Legenda: ✓ – karakteristika je prisutna; – nisko/odsutno; + srednje; ++ visoko izraženo.			

Kao glavni zaključak autori navode da *WAAM, WLAM i LAHWM* imaju jedinstvene prednosti i nedostatke te da je neophodna identifikacija i detaljna analiza ključnih procesnih parametara i strategija depozicije materijala u cilju postizanja boljih mikrostrukturnih svojstava, tačnosti izrađenih dijelova i kvaliteta površine. Dalja obimna istraživanja su neophodna kako bi se u potpunosti iskoristio potencijal ovih tehnologija u svim granama industrije a preporučuje se i razvoj prediktivnih modela koji uzimaju u obzir sve faktore prema karakterističnim industrijama. Autori naglašavaju i potrebu usvajanja jedinstvenih standarda u oblasti metalne aditivne izrade u cilju konzistentnosti i ponovljivosti eksperimentalnih rezultata [12].

Zapata i sar. [13] ističu nedostatak informacija u domenu prilagođavanja i optimizacije parametara procesa *WLAM* za izradu dijelova bez defekata. Istraživanje je realizovano na koaksijalnom sistemu za predstavnike grupe nehrđajućih čelika i legura aluminijuma. Istraživači su prvo odredili optimalne parametre procesa za obje grupe materijala a zatim je ispitivan uticaj snage lasera, brzine dovođenja žice i brzine kretanja na geometriju slojeva. Na kraju je analiziran uticaj visinskog inkrementa (koraka). Autori ističu da odgovarajuća kombinacija odnosa brzina (brzine kretanja laserske glave i brzina dovođenja žice) i energije po jedinici dužine igra ključnu ulogu u izradi bez grešaka (defekata). Ova dva parametra nude alternativu najčešće nezavisno analiziranim parametrima (snaga lasera, brzina žice, brzina prolaza) nezavisno od vrste materijala. Minimalna energija za realizaciju procesa bila je 50 J/mm za oba materijala. Zbog niže temperature topljenja aluminijuma, defekti su eliminisani samo primjenom odnosa brzina većeg od 1, dok su kod nerđajućeg čelika niži odnosi brzina rezultirali eliminacijom defekata. Zavisnost između parametara procesnih i dimenzija šava (visina i širina) za obje istražene grupe materijala (nehrđajući čelik i legura aluminijuma) može se aproksimirati linearnim modelima. Nezavisno od grupe materijala utvrđeno je da visina šava raste sa većom brzinom žice i većim odnosom brzina, opada pri većim brzinama prolaza, a na visinu šava ne utiče snaga lasera niti energije po jedinici dužine. Širina šava raste pri većim snagama lasera i energijom po jedinici dužine a opada pri većim brzinama kretanja laserske glave.

Autori su definisali i formulu za izračunavanje visine inkrementa, baziranu na dimenzijama žice, odnosu brzina i širini pojedinačnih šavova. Istraživanje na kraju naglašava i potrebu za obimnijim analizama mehaničkih i mikrostrukturnih svojstava, kreiranju prediktivnih termičkih modela za analizu temperaturnih polja kao i za izradu realnih dijelova kompleksnih geometrija.
Istraživanje [14] analizira mehanička svojstva i mikrostrukturu dijelova izrađenih od legure 316LSi. Ispitivana su dva tipa uzoraka, tankostjeni i prizmatični – sa kratkim i dugim međuslojnim vremenskim intervalima (vremenski razmak prije nanošenja narednog sloja). Utvrđeno je da su dendritna zrna dominantna u mikrostrukturi oba tipa uzoraka. Kraći vremenski interval između uzastopnih slojeva kod tankozidnih uzoraka smanjuje brzinu hlađenja, što je dovelo do grublje mikrostrukture i niže vrijednosti zatezne čvrstoće. Prizmatični uzorci su se odlikovali finiju i ujednačenijom mikrostrukturom. Autori su uspostavili i empirijsku relaciju između brzine hlađenja i površine rastopa — brzina hlađenja opada obrnuto proporcionalno s četvrtim stepenom površine kupke. Uvođenjem sistema monitoringa i automatskog upravljanja moguće je kontrolisati rezultujuću mikrostrukturu. Utvrđena je anizotropnost mehaničkih svojstava jer su uzorci paralelni sa pravcem taloženja materijala pokazali veće vrijednosti zatezne čvrstoće i veće izduženje do loma u poređenju sa uzorcima u pravcu gradnje, kod oba tipa uzoraka. Prizmatični uzorci su se pokazali kvalitetniji sa aspekta više vrijednosti mikrotvrdoće. Kao najveću grešku nakon izrade autori navode pojavu neadekvatnog stapanja (*lack of fusion*), uglavnom u prvim slojevima.
Huang i sar. [15] naglašavaju nedovoljno informacija o korišćenju aluminijuma i njegovih legura pri *WLAM* postupku. Kroz svoje istraživanje analizirali su uticaj smjera dovođenja žice i ugla dodavanja žice, a potom je analiziran uticaj snage lasera, brzine kretanja i brzina dovođenja žice na geometrijske karakteristike deponovanog materijala. Autori su dokazali da ugao dovođenja žice utiče na količinu deponovanog materijala i apsorptivnost - ugao od 45° pokazao se najbolji sa aspekta najveće količine deponovanog materijala i najbolje apsorpcije, što je od posebnog značaja za aluminijum. Visina šava je određena brzinom kretanja laserske glave, dok snaga lasera signifikantno utiče na širinu šava, značajno više nego brzina kretanja. Definisan je i matematički model u formi polinoma drugog reda koji opisuje odnos između parametara procesa sa rezultujućom širinom i visinom šava. Autori naglašavaju i važnost optimizacije odnosa preklapanja pri višeslojnom taloženju, kao ključnog parametra za smanjenje poroznosti izrađenih dijelova.
Motta i sar. [16] istraživali su mehanizme nastanka grešaka u cilju definisanja stabilnih parametara *WLAM* . U istraživanju je kao osnovni materijal analiziran nehrđajući čelik oznake AISI 308 na koaksijalnom laserskom sistemu. Identifikovane su dvije glavne greške - kapanje (*dripping*) i zapinjanje (*stubbing*). Za adekvatno prianjanje novorastopljenog sloja za prethodni ključan je položaj fokusa lasera jer se topljenje žice mora se odvijati na ispravnoj visini kako bi se greške izbjegle. Autori naglašavaju da je stabilna veličina rastopljenih kapi neophodna za adekvatan kontakt žice i prethodnih šavova, što zahtijeva smanjenje snage izvora. Pod stabilnim uslovima taloženja (Slika 5) kvalitet površine uporediv je sa *DED* procesima koji kao osnovni materijal koriste prah umjesto žice. Poseban doprinos rada je preporuka da se vremena pojave i dimenzije uočenih grešaka potencijalno iskoriste za razvoj monitoring modula.
Frönd i sar. [17] u istraživanju definišu parametarski okvir za primjenu aluminijumske žice oznake EN AW-5087 pri *WLAM* procesu. Istaknut je značaj adekvatnog definisanja parametara u cilju željenog prilagođavanja geometrije slojeva što smanjuje potrebu za naknadnim obradama dijelova. Utvrđeno je da predgrijavanje podloge (150°C) korisno utiče na smanjenje pojave grešaka u vidu poroznosti i pukotina. Na predgrijanoj podlozi izrađeni su šavovi bez grešaka pri sličnim specifičnim količinama energije po gramu deponovanog materijala ali sa pet puta većim brzinama kretanja laserske glave. Specifični unos energije manji je za ~50% u odnosu na procese zasnovane na selektivnom topljenju aluminijumskog praha (*Selective Laser Melting – SLM*).

Autori posebno naglašavaju potrebu za dodatnim istraživanjima sa uključenim temperaturnim mjerenjima kako bi se utvrdili efekti povezani sa raspodjelom temperatura i brzinama hlađenja.



Slika 5: Mapa parametara za stabilno deponovanje AISI 308 [16]

Istraživanje [18] predstavlja razvoj novog prototipa laserske glave za *WLAM* postupak te validaciju njenog dizajna kroz istraživanje parametara za izradu dijelova od legura *Inconel* 718 i titanijumove legure Ti-6Al-4V. Uzorak od legure *Inconel* 718 nije pokazao znake oksidacije, niti su uočene pukotine i pore. Uočeni su određeni minorni nedostaci u stapanju slojeva. Uzorak od Ti-6Al-4V pokazao je znakove slabu oksidaciju a kao i u slučaju *Inocel* 718 nisu uočene pore niti pukotine. Takođe se uočeni nedostaci u vezivanju slojeva. Geometrijska tačnost uzoraka je analizirana primjenom 3D skeniranja a rezultati (Slika 6) su pokazali da je maksimalno odstupanje od geometrijski idealnog oblika za uzorak od *Inocel* 718 bilo -0,8mm dok je za uzorak od legure titanijuma bilo -1mm. Analizirana je i hrapavost površina u dva međusobno upravna pravca a predstavljeni su i rezultati mjerenja tvrdoće u tri karakteristične zone dva međusobno upravna poprečna presjeka. Novi dizajn koaksijalne laserske glave uspješno se pokazao za aditivnu izradu dijelova od obje vrste materijala pri maksimalnoj snazi lasera od 1 kW. Koaksijalno dovođenje zaštitnog gasa kroz glavu osigurava izradu dijelova gotovo bez oksida, uz izuzetno nisku poroznost i zadovoljavajuću vezu između slojeva.
Shaikh i sar. [19] analizirali su *WLAM* na mikro-nivou gdje su kao osnovni materijal koristili tanku žicu od nehrđajućeg čelika 304 prečnika 100 µm. Primjena ove žice u *WLAM* postupku pokazala se kao pogodna za aditivnu izradu sa poboljšanom dimenzionom tačnošću i kvalitetom površine. Uspješno su izrađene tankostijene i strukture pod uglom sa rezolucijom od ~500 µm. Optimizacija bočnog preklapanja dovela je do niske vrijednosti hrapavosti površine i eliminacije defekata među slojevima. Debljina sloja (40–80 µm), dimenziona tačnost (±30 µm) i hrapavost površine (8–16 µm) uporedivi su s procesima na bazi praha, a bolji od postojećih *DED* procesa sa debljim žicama. Brzina taloženja ograničena je na 2 g/min zbog prečnika žice.
Istraživanje [20] analizira uticaj procesnih parametara na geometrijske karakteristike dobijenih šavova pri korištenju Ti-6Al-4V žice u *WLAM* postupku. Za korištenje titanijumske žice u aditivnoj izradi *WLAM* postupkom, optimalni parametri se moraju birati u odnosu na usvojenoj putanji kretanja laserske glave. U poprečnom presjeku uzoraka pronađene su mikropore koje trebaju biti predmet posebnih analiza i ispitivanja bez razaranja. Autori ističu da veličina i ukupni udio pora u zapremini je u granicama dosadašnjih standarda u oblasti laserskog zavarivanja jer standardi za analizu ovakvih defekata u *DED* postupcima ne postoje.
Registrovano je i povećanje mikrotvrdoće kao posljedica finije mikrostrukture, uz smanjenje zone uticaja toplote.

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu analiziranih istraživanja može se zaključiti da WLAM predstavlja tehnologiju sa visokim potencijalom za industrijsku primjenu koja nudi mogućnosti implementacije u hibridnim postupcima. Dostizanje punih potencijala ove tehnologije uslovljeno je sveobuhvatnim razumijevanjem i optimizacijom procesnih parametara.
Procesni parametri (snaga lasera, brzina kretanja, brzina dovođenja žice i ugao žice) imaju signifikantan uticaj na geometriju šavova, mikrostrukturu i mehanička svojstva. Posebno se izdvajaju razmak između susjednih šavova i odnos brzina kretanja i dovođenja žice kao ključni za izradu dijelova bez defekata. Za aluminijumske legure je dokazan i značaj predgrijavanje podloge u cilju smanjenja poroznosti i smanjenja specifičnog unosa energije.
Kvalitet zaštitne atmosfere direktno utiče na prisustvo oksida u izrađenim dijelovima a razvoj inovativnih mlaznica s unutrašnjim kanalima za hlađenje i novih koaksijalnih glava pokazali su se kao odlična rješenja za bezoksidnu depoziciju materijala.
Analize mehaničkih svojstava i mikrostrukture ukazuju na značajan uticaj veličine zrna na mehanička svojstva i anizotropnost mehaničkih svojstava. Kao dominantne greške koje se mogu javiti autori ističu mikropore te neadekvatno stapanje između slojeva.
Kao zajednički nedostatak, autori identifikuju odsustvo standardizovanih procedura za *DED* procese bazirane na materijalu u obliku žice, nedostatak prediktivnih termičkih modela te ograničenost istraživanja na relativno jednostavne geometrije. Budući istraživački napori trebaju biti usmjereni ka razvoju pouzdanih prediktivnih modela, uspostavljanju standarda ispitivanja *DED* dijelova te validaciji *WLAM* procesa na kompleksnim geometrijama relevantnim za različite industrijske grane.

ZAHVALNOSTI

Sebastian Balos izražava zahvalnost na podršci pruženoj u okviru istraživanja kroz projekat pod nazivom „Napredni materijali, tehnologije spajanja i srodne tehnologije u proizvodnom mašinstvu“, koji se realizuje pri Departmentu za proizvodno mašinstvo Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, Srbija.

LITERATURA

[1] Hu, S., Park, C., Jeong, S., Jeon, N., Kim, J. T., Rho, J., Additive manufacturing of metastructures at the micro-and nano-scale. Chemical Society Reviews, 55(3), 1666-1716, 2026. https://doi.org/10.1039/d4cs01054j
[2] Mostafaei, A., Ghiaasiaan, R., Zhang, Y., Miner, J. P., Faegh, M., Omoodara, O., Haghighi, A., Wolff, S. J., Narra, S. P., Sun, T., Cheng, L., Additive manufacturing of titanium alloys: a comprehensive review on “process-structure-defect-property” relationship. Progress in Materials Science, 101752, 2026. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2026.101752
[3] Zhou, L., Miller, J., Vezza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., Al Tamimi, Z., Hansotte, G., Sunkara, L. D., Bernat, J., Additive manufacturing: a comprehensive review. Sensors, 24(9), 2668, 2024. https://doi.org/10.3390/s24092668
[4] Vafadar, A., Guzzomi, F., Rassau, A., & Hayward, K., Advances in metal additive manufacturing: a review of common processes, industrial applications, and current challenges. Applied Sciences, 11(3), 1213, 2021. https://doi.org/10.3390/app11031213
[5]https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/metal-additive-manufacturing-equipment-market-report (Pristupljeno 28.08.2026.)
[6] Melentiev, R., Ye, L., Wagih, A., Chen, G., Zhang, C., Catalano, A. R., Priarone, P. C.,

Xu, F., Piano, S., Spitas, C., Yu, N., A critical review of laser wire directed energy deposition: Toward large-scale metal additive manufacturing. Materials Science and Engineering: R: Reports, 171, 101273, 2026. https://doi.org/10.1016/j.mser.2026.101273
[7] Huang, W., Chen, S., Xiao, J., Jiang, X., Jia, Y., Laser wire-feed metal additive manufacturing of the Al alloy. Optics & Laser Technology, 134, 106627, 2021. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106627
[8] Jia, Y., Sun, S., Li, B., Yao, Z., Li, C., Huang, W., Fang, M., Current research status and prospect of laser wire additive manufacturing technology. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 137(7), 3229-3255, 2025. https://doi.org/10.1007/s00170-025-15228-0
[9] Abuabiah, M., Mbodj, N. G., Shaqour, B., Herzallah, L., Juaidi, A., Abdallah, R., Plapper, P., Advancements in laser wire-feed metal additive manufacturing: a brief review. Materials, 16(5), 2030, 2023. https://doi.org/10.3390/ma16052030
[10] Bernauer, C., Merk, T., Zapata, A., Zaeh, M. F., Laser metal deposition with coaxial wire feeding for the automated and reliable build-up of solid metal parts. Key Engineering Materials, 926, 65-79, 2022. https://doi.org/10.4028/p-ob7dg7
[11] Bernauer, C., Meinzinger, L., Zapata, A., Zhao, X. F., Baehr, S., Zaeh, M. F., Design and investigation of a novel local shielding gas concept for laser metal deposition with coaxial wire feeding. Applied Sciences, 13(8), 5121, 2023. https://doi.org/10.3390/app13085121
[12] Casalino, G., Karamimoghadam, M., Contuzzi, N., Metal wire additive manufacturing: a comparison between arc laser and laser/arc heat sources. Inventions, 8(2), 52, 2023. https://doi.org/10.3390/inventions8020052
[13] Zapata, A., Bernauer, C., Stadter, C., Kolb, C. G., Zaeh, M. F., Investigation on the cause-effect relationships between the process parameters and the resulting geometric properties for wire-based coaxial laser metal deposition. Metals, 12(3), 455, 2022. https://doi.org/10.3390/met12030455
[14] Akbari, M., Kovacevic, R., An investigation on mechanical and microstructural properties of 316LSi parts fabricated by a robotized laser/wire direct metal deposition system. Additive Manufacturing, 23, 487-497, 2018. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.031
[15] Huang, W., Chen, S., Xiao, J., Jiang, X., Jia, Y., Laser wire-feed metal additive manufacturing of the Al alloy. Optics & Laser Technology, 134, 106627, 2021. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106627
[16] Motta, M., Demir, A. G., & Previtali, B., High-speed imaging and process characterization of coaxial laser metal wire deposition. Additive Manufacturing, 22, 497-507, 2018. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.05.043
[17] Frönd, M., Riekehr, S., Kashaev, N., Klusemann, B.,Enz, J., Process development for wire-based laser metal deposition of 5087 aluminium alloy by using fibre laser. Journal of Manufacturing Processes, 34, 721-732, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.06.033
[18] Kelbassa, J., Gasser, A., Bremer, J., Pütsch, O., Poprawe, R., Henrich Schleifenbaum, J., Equipment and process windows for laser metal deposition with coaxial wire feeding. Journal of Laser Applications, 31(2), 2019. https://doi.org/10.2351/1.5096112
[19] Shaikh, M. O., Chen, C. C., Chiang, H. C., Chen, J. R., Chou, Y. C., Kuo, T. Y., Ameyama, K., Chuang, C. H., Additive manufacturing using fine wire-based laser metal deposition. Rapid Prototyping Journal, 26(3), 473-483, 2020. https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2019-0110
[20] Caiazzo, F., Additive manufacturing by means of laser-aided directed metal deposition of titanium wire. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 96(5), 2699-2707, 2018. https://doi.org/10.1007/s00170-018-1760-0