

Kompenzacija višine pri 3D-tiskanju kovin

Matej Barukčič^a, Jan Žužek^a, Luka Selak^a

^aUniverza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

Izvleček

Projektna naloga se osredotoča na izvajanje korekcije višine pri 3D-tiskanju kovin. Do sedaj je bilo nekaj dela že opravljenega na to temo, vendar sistem ni vseboval povratne zanke. Pri tiskanju kovin namreč zelo hitro pride do vprašanja, kako navariti enakomerno tako po ravni poti kot tudi po robu izdelka, kjer zelo hitro pride do nižjega navarjenja kot sicer. Enega od načinov rešitve omenjenega problema predstavlja spremjanje hitrosti varjenja. Po ravni poti bi varjenje potekalo počasneje kot po vogalih izdelka. Odločili smo se za kompenzacijo neravnin z dovarjenjem prenizko zavarjenih področij. V projektni nalogi smo sistem nadzorovali s senzorjem, ki meri višino zavarjenega profila. Oblika testnega modela je bila pripravljena tako, da je vseboval neenakomerno višino profila. Ugotovljeno je bilo, da je z razvitim sistemom mogoča kompenzacija neravnin modela. Ta je bila opravljena že po nekaj plasteh.

Ključne besede: 3D-tiskanje kovin, Varjenje, Krmiljenje, ToF senzor

1. Uvod

3D tiskanje kovin je proces navarjanja materiala. Material je varilna žica, slednja se dovaja preko varilne šobe. Izdelek se gradi po plasteh. Prihaja do zlivanja materiala s predhodnimi plastmi, ki so ustvarjene z varjenjem. Proses tiskanja kovin se uporablja za izdelke velikih dimenzij v panogi kot je ladje-delništvo.

1.1. Pregled literature

Članek Pregled nadzorovalnega procesa in metrologije na mestu varjenja za 3D tiskanje kovin [1] se v določeni smeri navezuje na našo projektno nalogu. Tudi tam želijo krmiliti sistem, ki tridimenzionalno tiska kovine. Razlika je v tem, da želijo krmiliti sistem s pomočjo kamere, bodisi običajne ali pa IR kamere. V primeru običajne kamere bi ta zaznavala napake, kot je recimo premalo ali preveliko navarjenje. V primeru IR kamere pa bi ta podala podatek o temperaturnem gradientu, ki bi nam podal informacijo, kdaj je primerno na obstoječo plast kovine nanesti novo plast.

V članku Uporaba merilnega sistema na podlagi stereo videa za pregled poti varjenja preko spletja [2] je govora o triangulaciji, s pomočjo katere krmilijo sistem. Prednost metode je v tem, da omogoča 3D-pogled namesto 1D-pogleda, ki ga ponuja običajna kamera. Problem metode uporabe kamere je obdelava podatkov. Pri varjenju zvar pri obdelavi predstavlja svetlo točko, vendar tudi drobci materiala predstavljajo svetlo točko. V primeru uporabe dveh kamer je tako potrebno nastaviti 16 parametrov.

Avtorji se v članku z naslovom Slikovni sistemi in nadzirne navarjanja večplastnih izdelkov [5] ukvarjajo z neenakomerno debelino zvara pri obločnem varjenju na triosnem CNC-stroju. Za cilj so si izbrali ravno in ozko steno, ki ima po celotni višini enakomerno debelino. To dosežejo tako, da razvijejo krmilni sistem, ki spreminja hitrost varjenja na podlagi debeline zvara. Razvili so tudi slikovni sistem ter postopek filtriranja slike, iz katere nato razberejo parametre vara. Avtorjem je uspelo zvariti steno s konstantno debelino, ugotovili pa so tudi, da je zaprtozančni sistem sposoben prihraniti 10 % materiala in energije v primerjavi z odprtozančnim sistemom.

Razvoj senzorja za merjenje oddaljenosti šobe do zgornje plasti varjenca pri obločnem varjenju po plasteh opisuje članek Krmiljenje višine navarjanja pri MIG/MAG aditivnih izdelovalnih tehnologijah [3]. Avtorji oddaljenost kompenzirajo s spremjanjem višine delovne mize, razlike v višini zvara pa kompenzirajo v naslednjih plasteh s spremjanjem hitrosti varjenja. Na koncu ugotovijo, da se z uporabo senzorja izboljša enakomernost oddaljenosti. Višino zvara jim uspe ohraniti znotraj 1 mm.

V članku Zaprto zančni nadzor spreminjače se debeline plasti pri obločnem aditivnem izdelovanju tankih sten [4] je opisan razvoj krmilnega sistema za krmiljenje debeline zvara pri stenah s spremenljivo debelino. Debeline zvara je krmiljena preko hitrosti varjenja. Uspe jim narediti krmilnik, ki uspešno prilagaja širino navara od 6 do 9 mm z največjim odstopanjem 0,5 mm.

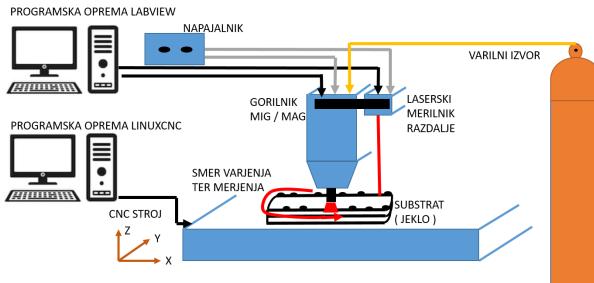
Avtorji članka Tehnike oblikovanja zlivanja kovine v 3D tiskanju [6] naredijo pregled dela na področju aditivnih tehnologij za kovinske izdelke. Tehnologije so predstavljene kot niz-kocenovni postopek za izdelavo velikih kovinskih izdelkov, ki so narejeni iz varljivih materialov. Ugotovijo, da se mehanske lastnosti izdelkov spreminjajo z lokacijo, orientacijo ter topolito obdelavo. Predstavijo tudi možnost izdelave komponent iz

Email addresses: matej.ba07@gmail.com (Matej Barukčič), jan.zuzek@gmail.com (Jan Žužek)

različnih materialov. Poudarjeno pa je tudi, da s temi postopki dobimo slabši površinski izgled, zaradi visokih temperturnih obremenitev pa so prisotne zaostale napetosti.

2. Predstavitev sistema

Nadzor in upravljanje varjenja poteka preko programske opreme Labview, ki služi kot vmesnik. CNC-stroj komunicira z računalnikom preko LAN povezave, medtem ko laserski merilnik razdalje komunicira z računalnikom preko USB serijske komunikacije. CNC-stroj se upravlja preko LinuxCNC z Labview programom, skozi katerega se pošilja G-koda CNC-stroju. Tako CNC-stroj hkrati prejema in tudi pošilja podatke nazaj preko serijske komunikacije.

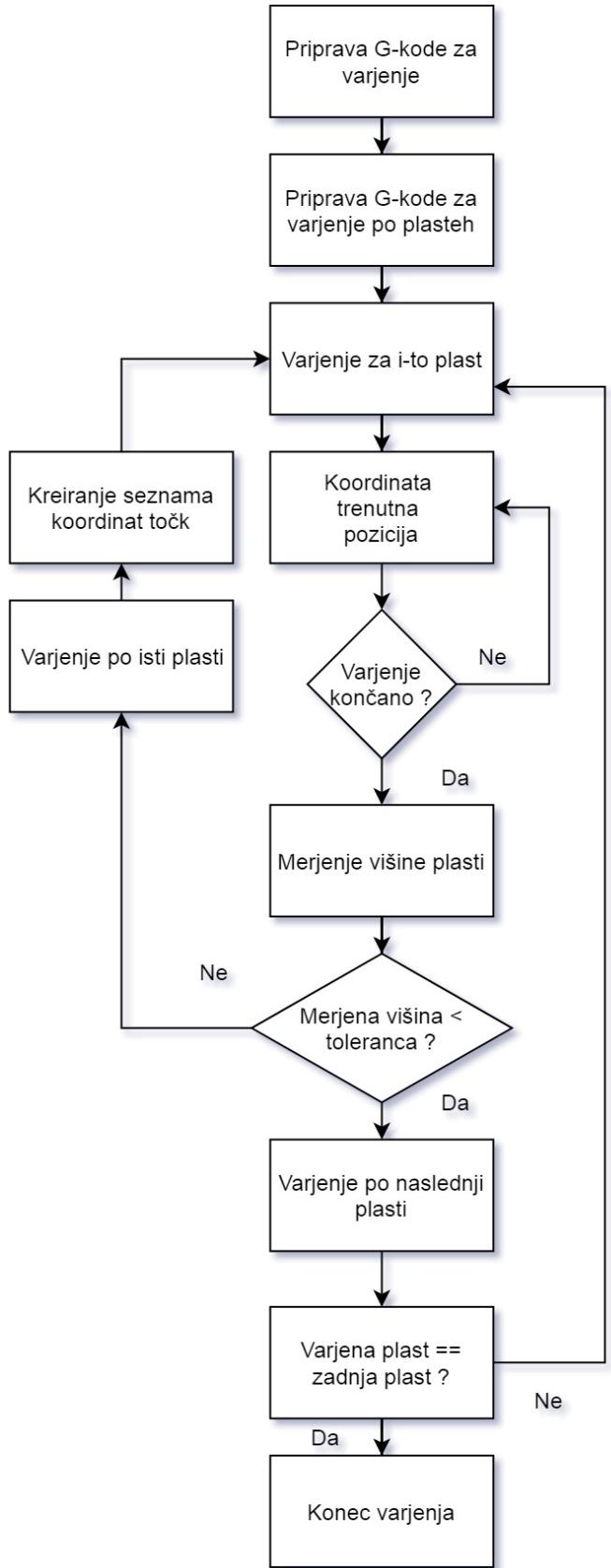


Slika 1: Semioperacijska shema sistema.

Postopek delovanja sistema je predstavljen na sliki 2 v blokovni shemi. Izdela se model v 3D-modelirniku, kot je npr. Solidworks, ki je prikazan na sliki 7. Nato je potrebna priprava G-kode. Ta se ne vpiše ročno, generira se v programu Cura, ki služi kot pretvornik v G-kodo. V Curi se lahko nastavlja parametre, kot je debelina stene ali višina posamezne plasti. Tega se nato uvozi v model v Curo, ki za naš primer generira programsko G-kodo za programsko opremo LinuxCNC, s katero se upravlja CNC-stroj.

Generirano G-kodo se uvozi v programsko opremo Labview. Tam se pripravi podprogram, ki pregleda generirano kodo, odstrani nepotrebne vrstice, zamenja vrednosti določenih parametrov in na novo generira G-kodo. Ta ima za vsako plast shranjene gibe premika CNC-stroja, ko varjenje poteka in ko preide na višjo plast, da gorilnik prične na novo variti.

Gorilnik nato sledi predvideni poti za prvo plast, ki je predvidena z opisom generirane G-kode. Z varjenjem se generira plast, preverja se, ali je gorilnik prišel na zadnjo točko poti za predvideno plast in tako zaključil varjenje. Potrebno je opraviti meritev višine plasti. Meritev se izvaja z laserskim merilnikom razdalje. Ta deluje tako, da pošlje laserski žarek v objekt, ki je za naš primer višina plasti, in beleži čas, potreben, da se žarek odbije od objekta nazaj v izvor. Tako se nato izračuna vrednost razdalje. V kolikor se objekt približuje merilniku, se vrednost razdalje znižuje in obratno: v kolikor se objekt oddaljuje od merilnika, se vrednost razdalje povečuje.

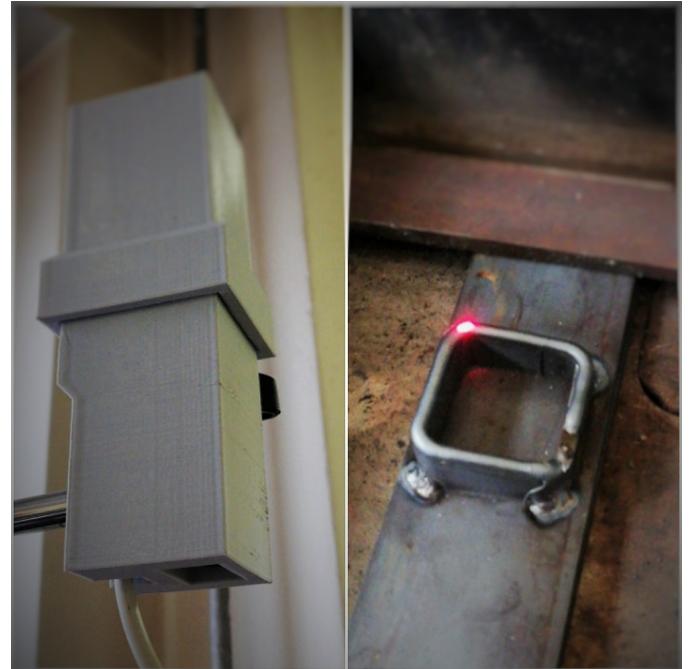


Slika 2: Blokovna shema sistema.

Pomembno je nastaviti koordinatni sistem CNC-stroja tako, da je model izdelka znotraj njegovega delovnega območja. V kolikor se pravilno ne nastavi koordinatnega sistema glede na izdelek, lahko pride do nekaterih nepravilnosti, ki jih bomo opisali kasneje. Slika 3 prikazuje triosni koordinatni stroj, na katerem je nameščen laserski merilnik razdalje.



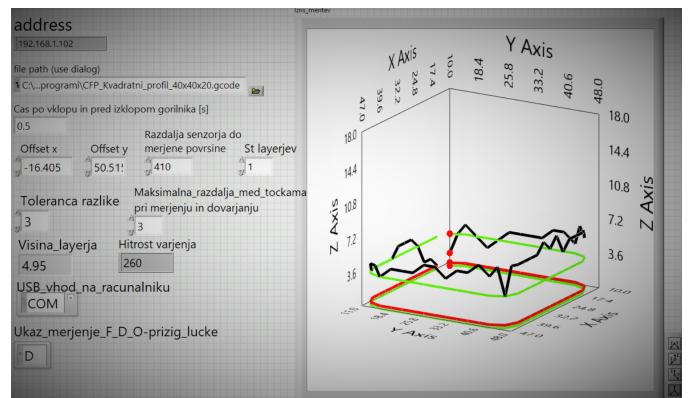
Slika 3: Eksperimentalni sistem.



Slika 4: Laserski merilnik razdalje.

2.1. Labview - uporabniški vmesnik

Uporabniški vmesnik je potrebno smiselno in v logičnem zaporedju pripraviti za uporabnika. Sprva je potrebno nastaviti, katero datoteko, ki ima generirano G-kodo, naj Labview prebere. Omenjeno predstavlja del prvega koraka, prikazanega v blokovni shemi na sliki 2.



Slika 5: Labview uporabniški vmesnik: (črna) meritev višine, (zelena) predvidena višina, (rdeča) potrebnna dovaritev.

Pri meritvah je najprej treba nastaviti začetne pogoje. V našem primeru so pomembne tolerance, in sicer za koliko lahko višina varjenja odstopa od predvidene višine za varjenje, ki je nastavljena v G-kodi. Razdalje se meri z merilnikom na sliki 4, ki ima odstopanje $\pm 1 \text{ mm}$. Potrebno je tudi upoštevati razdaljo višine med trenutno in naslednjo plastjo pri določanju vrednosti tolerance. Če je izbrana premajhna vrednost tolerance, lahko pričakujemo, da se bo dovarjenje izvedlo tudi, ko ni potrebno. V kolikor bo izbrana prevelika toleranca, se lahko zgodi, da bo dovarjenje potrebno šele po nekaj plasteh.

Nato je potrebno izmeriti razdaljo od laserja do merjene površine. Preden se opravi postavitev koordinatnega sistema, je potrebno vedeti smer, po kateri bo gorilnik opravil pot, ter začetno točko. Postavitev koordinatnega sistema se opravi tako, da sprva varilno žico v osi gorilnika približamo steni varjenca. Ko z varilno žico pridemo v kontakt z zunanjim stenom, se ustavimo in odčitamo koordinate za x os. Nato dvignemo v z osi gorilnik in se zopet približamo steni varjenca, vendar tokrat k notranji steni. Ko pride do kontakta med gorilnikom in varjen-

cem, se ustavimo, znova odčitamo vrednost koordinate v x osi in jo prepolovimo.

Tako smo dobili vrednost koordinate v x osi, kjer se nahaja sredina stene varjenca. Dvignemo gorilnik in se približamo robu varjenca, kot je prikazano na sliki 6. Ko zopet pride do stika med varilno žico in varjencem, tokrat iz z osi, se ustavimo in definiramo na novo izhodišče za x-os. Ponovimo postopek analogno za y os. Izberemo si sosednjo stranico stranice, na kateri smo definirali novo izhodišče za x os.

Ko definiramo novo izhodišče osi, bodisi za x os ali y os, je potrebno vnesti razdaljo od izhodišča koordinatnega sistema CNC-stroja pri definiranju novega izhodišča osi. Sedaj imamo na novo definirano relativno izhodišče za x in y os. Nato laserski žarek svetimo na izhodiščno točko osi za x in y, se ustavimo in odčitamo koordinate gorilnika preko LinuxCNC. Sedaj smo dobili vrednosti razdalj x in y med gorilnikom in laserskim merilnikom razdalje. Pri vnašanju vrednosti zamika med gorilnikom in laserskim merilnikom razdalje je potrebno sešteeti koordinate od izhodišča CNC-stroja do izbrane točke pri definiranju x in y osi ter zamika v x in y osi od laserskega žarka na izbrani točki do gorilnika, ki se je zamaknil.



Slika 6: Postavitev laserskega žarka in nastavitev koordinatnega sistema.

Laserski žarek mora svetiti na sredini stene izdelka, na takšen način je nastavljena generirana programska G-koda. Na takšen način je potrebno postopati tudi zaradi laserskega žarka. V kolikor se nastavi laserska pika na skrajni rob stene, imamo primer pri merjenju višine navarjenja, ko bodo posamezne meritve znatno odstopale. Pri robu izdelka se lahko opravi meritev, ko bo laserski žarek preblizu notranje ali zunanje stene in bo tako opravil napačno meritev, kjer bo zabeležil razdaljo od laserja do podlage, na kateri je izdelek postavljen.

Toleranca razlike je v uporabniškem vmesniku samovoljno določena. Enote so podane v mm. Če bo vnesena relativno velika vrednost, kot je recimo 5 mm, se lahko pričakuje, da bo šele po nekaj plasteh navarjenja potrebno dovarjenje. Če se vpiše relativno majhno vrednost, se lahko pričakuje po vsaki obdelani plasti potrebno dovaritev.

Maksimalna razdalja med točkama pri merjenju in dovar-

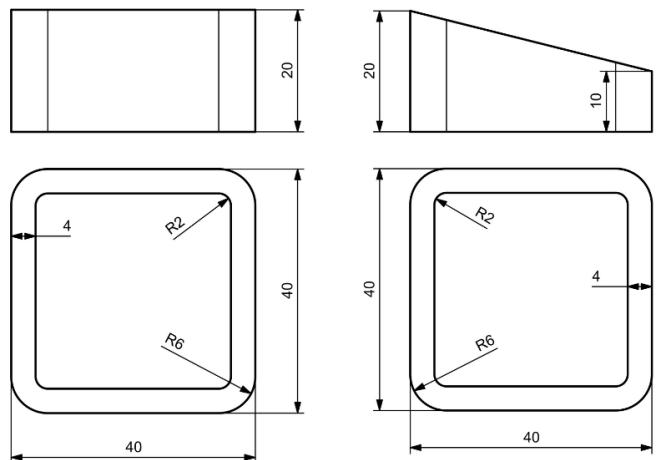
jenju je potrebna zaradi premajhnega števila točk, na katerih bi izvajali meritev. Če imamo opravka s primitivno geometrijo, kot je kvadratni profil, s programom Cura generiramo samo štiri točke, in sicer robne točke. Tako imamo premajhno število točk, s katerimi bi preverjali, ali je bilo varjenje enakomerno. Tako s parametrom generiramo na novo vmesne koordinate med koordinati, sprva generirani z G-kodo. Če povečamo vrednost parametra, dobimo manj vmesnih točk, in če vnesemo majhno vrednost, posledično generiramo večje število vmesnih točk.

Višino plasti oziroma layerja se odčita iz generirane programske G-kode. Služi kot indikator, predhodno se določi, katero datoteko G-kode naj Labview prebere. Ta nato generira modificirano G-kodo, v kateri so podane koordinate, po kateri gorilnik opravi pot. Višina plasti je podana na začetku bloka koordinat za vsak layer oziroma za vse koordinate plasti. Hitrost varjenja je pogojena z varilnim strojem.

3. Eksperimentalno delo

3.1. Priprava testnega varjenca

Za testiranje korekcije višine je bila potrebna neravnost površine. Za varjenje od začetka bi potrebovali veliko časa, da bi nastala dovolj velika neravnost za korekcijo višine plasti. Za dovarjenje je bila nastavljena neravnost večja od 3 mm, saj meritve razdalje lahko nihajo za $\pm 1 \text{ mm}$ zaradi merilne negotovosti merilnika razdalje. Da bi pospešili testiranje, smo za testni izdelek izbrali pod kotom odrezan kvadratni profil velikosti 40x40x4 mm. Največja višina razlike med stenama je bila 4 mm in s tem smo zagotovili, da bomo presegli prag za korekcijo višine plasti, saj je generirana G-koda nastavljena za raven kvadratni profil. Profil je bil zavarjen na ploščato jeklo zaradi vpetja na delovno mizo CNC-stroja.



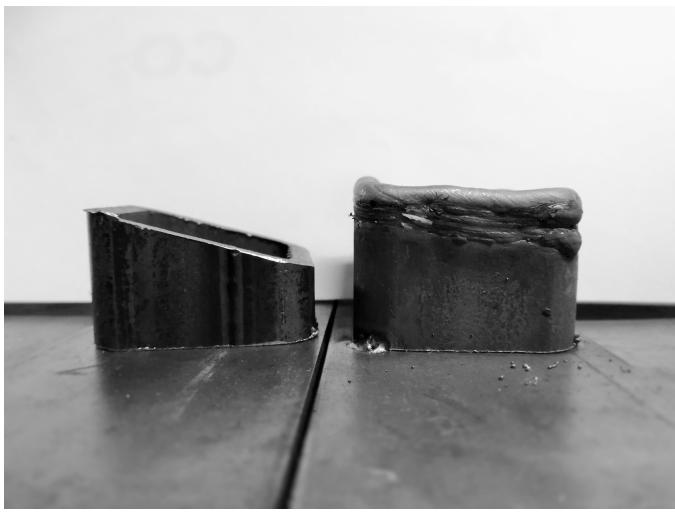
Slika 7: Oblika in mere testnega modela.

Pred pričetkom dela je bil kos postavljen na delovno mizo CNC-stroja. Preveriti je bilo potrebno, ali je varjenc po zamiku zaradi senzorja, ki ni v osi gorilnika, postavljen znotraj delovnega območja. Gorilnik je bil ročno peljan po profilu varjenca preko programa LinuxCNC, nato je bilo analogno opravljeno

še za laserski merilnik razdalje. Potrebno je bilo nastaviti koordinatni sistem stroja na profil varjenca in določiti vse parametre uporabniškega vmesnika, kot je bilo opisano v predstavitvi sistema.

4. Rezultati in diskusija

Na spodnji sliki 8 je prikazan kos pred in po varjenju. Opozimo lahko, da je program v nekaj plasteh kompenziral naklon prvotnemu kosu, tako da je na nižji strani kosa v vsaki iteraciji dovaril še eno dodatno plast. Po kompenzaciji začetne neravnine ni bilo več potrebnega dovarjenja, saj je bila višina plasti znotraj dovoljenih toleranc.



Slika 8: Stanje varjenca pred in po koncu procesa.

Korekcija testnega izdelka je bila opravljena po prvi iteraciji. Pojavljale so se napake pri začetku in koncu varjenja posamične plasti. Gorilnik se je premikal, preden se je ustvaril oblok, in zato je bilo na začetku vsake plasti vidna prenizka višina plasti. Slednja napaka je bila v vsaki iteraciji uspešno dovarjena.

Pri varjenju naslednjih plasti v povprečju ni bilo potrebno dovarjenje, višina plasti je bila višja od meje za dovarjenje. Višina plasti je bila višja od višine plasti, ki je bila nastavljena v predpripravljeni G-kodi. Zato bi bilo v nadaljnje potrebno vključiti krmiljenje hitrosti pomika za korekcijo naslednje plasti.

Iteracija varjenja, merjenja in dovarjenja je dolgotrajna. Laserski merilnik meri točko po točko, z večjim številom točk je merjenje dolgotrajnejše. Varjenje posamezne plasti testnega modela je trajalo 40 s z hitrostjo varjenja 260 mm/s. Posamezna plast je bila merjena v točkah, ki so zamaknjene za 3 mm (toleranca razlike: slika 5). Meritev posamezne plasti je trajala 60 s, kar je 1,5 kratnik časa varjenja plasti. Za hitrejšo meritev bi bil potreben drug princip merjenja. Uporabimo lahko triangulacijsko merjenje, s katerim lahko brez ustavljanja hitro pomerimo višino posamezne plasti.

Nekatere meritve so opazno odstopale od ostalih. Pri tem je bila vrednost kvalitete signalov, ki jo merilnik razdalje vrne poleg meritve razdalje, višja od ostalih. Višja vrednost kvalitete signalov pomeni slabšo meritev. Slednjo je potrebno odpraviti z

dodatnim programom, ki preverja kvaliteto meritve in jo v primeru slabe ponavlja, dokler kvaliteta razdalje ni v predpisanim območju.

5. Povzetek

V projektni nalogi je bil predstavljen problem neenakomerne višine navarjenja in razvoj ter testiranje sistema za kompenzacijo višine posamezne plasti. Potrebno je bilo izbrati primeren merilnik razdalje. Pri izbiri merilnika je bilo potrebno upoštevati visoke temperature v območju varjenja. Izbran je bil laserski merilnik razdalje, ki deluje na principu merjenja časa preleta odbitega žarka. Prednost slednjega je bila, da smo ga postavili izven delovnega območja. Ustvarjen je bil Labview program, ki je preko serijske komunikacije upravljal CNC-stroj. Program je služil kot uporabniški vmesnik za nastavitev začetnih parametrov ter spremljanje meritov za posamično iteracijo. V okviru eksperimentalnega dela je bil pripravljen testni model neenakomerne višine, na katerem je bila opravljena kompenzacija višine že po petih plasteh. Ugotovljeno je bilo, da je največja omejitev sistema merilnik razdalje, ki zaradi ukritljene površine zvara odčita napačne meritve.

Literatura

- [1] Sarah K. Everton, Matthias Hirsch, Petros Stravroulakis, Richard K. Leach, Adam T. C lare, *Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing*, 2016.
- [2] Drago Bracun, Alojzij Sluga, *Stereo vision based measuring system for online welding path inspection*, 2015.
- [3] Jun Xiong, Guangjun Zhang, *Adaptive control of deposited height in GMAW-based layer additive manufacturing*, 2013.
- [4] Jun Xiong, Ziqiu Jin, Weihua Zhang, *Closed-loop control of variable layer width for thin-walled parts in wire and arc additive manufacturing*, 2015.
- [5] Jun Xiong, Ziqiu Jin, Weihua Zhang, *Vision-sensing and bead width control of a single-bead multi-layer part: material and energy savings in GMAW-based rapid manufacturing*, 2013
- [6] Oguzhan Yilmaz, Adnan A Ugla, *Shaped metal deposition technique in additive manufacturing: A review*, 2016