

Digitalizacija saržnega PVD proizvodnega procesa

dr. Denis Sušin mag. inž. el.

Gazela d.o.o. CKŽ 56, 8270 Krško

E-pošta: denis.susin@gazela.si

Digitalization of the batch oriented PVD manufacturing process

Abstract. This article summarizes the overview of the typical PVD manufacturing process with its technological suboperations. Further on the digitalization of the PVD manufacturing process and its implementation is represented. Since the process is batch oriented with multiple variants of similar, but still different technological procedures, it is crucial to understand the technical background, since the key requirements had to be specifically developed from scratch. The graphical user interface for the production worker has been developed as a result and is based on a digital twins methodology.

1 Uvod

V industrijskih evropskih okoljih ročne operacije pospešeno zamenjujejo vsaj delno avtomatizirani in/ali robotizirani sistemi, v proizvodnih procesih se uvajajo digitalizirani nadzorni sistemi, kot so SCADA (angl. Supervisory Control and Data Acquisition), MES (angl. Manufacturing Execution System) ter ERP (angl. Enterprise Resource Planning), med temi sistemi pa potekajo dvosmerne komunikacijske povezave, kar tvori enoten digitalni nadzorni sistem. Najprej so se na ta način razvila velika proizvodna podjetja s serijsko proizvodnjo (tipičen primer so podjetja v avtomobilski industriji). Ta informacijsko in digitalno razvita podjetja v proizvodne procese že uvajajo tudi aktualne in popularne kompleksnejše tehnologije - algoritmne nevronske mreže, genetskih algoritmov, modelov na osnovi GPT (angl. Generative Pretrained Transformer) algoritmov in algoritmov umetne inteligence.

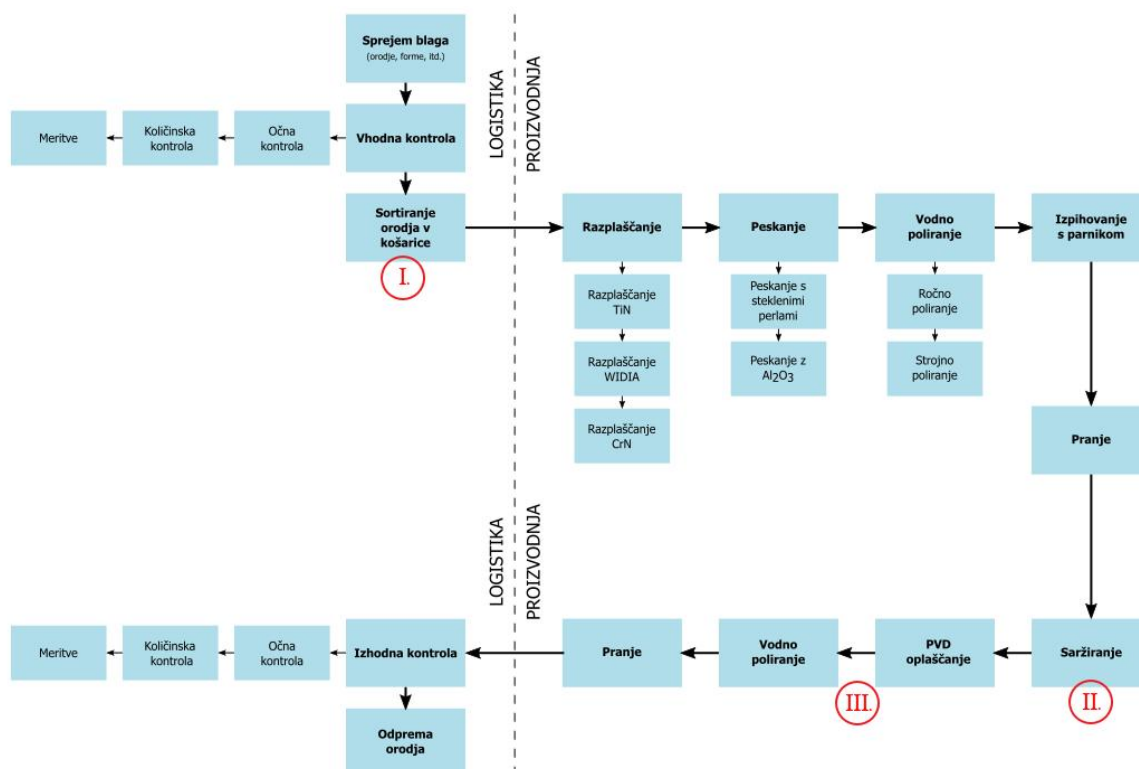
Kar se je pred kratkim dogajalo le v velikih proizvodnih okoljih, pa se sedaj širi tudi v srednja in manjša proizvodna okolja. Za uporabo algoritmov umetne inteligence je predpogoj digitalizacija podjetja in centraliziran nadzor nad množico podatkov o proizvodnem procesu, ki jih je treba beležiti v realnem času (za ta namen je večinoma dovolj visoka vzorčna frekvenca že 1 Hz, v nekaterih primerih zadošča celo še počasnejše vzorčenje, da se doseže učinek »takojšnje« zaznave spremembe sistema), zato tega razvojnega koraka ni možno preskočiti. Zavoljo pravkar opisanega, pa tudi zaradi močnega spodbujanja digitalizacije skozi mehanizme sofinanciranja na javnih razpisih, se marsikatera organizacija resno spogleduje z (nadaljnjo) avtomatizacijo in digitalizacijo proizvodnih procesov.

PVD (angl. Physical Vapor Deposition) tehnologija nanašanja trdih zaščitnih prevlek je sicer redko poznana,

a kljub temu dobro uveljavljena industrijska panoga [1], [2]. Trde prevleke se uporablja v polprevodniški tehniki (npr. izdelava silicijevih rezin), za oplemenitenje različnih orodij, kot npr. cilindričnih odrezovalnih orodij (svedrov, rezkarjev, prebijal, itd.), orodij za preoblikovanje (npr. orodja za tlačni liv, štanice, za brizganje plastike, itd.), v medicinske namene (npr. orodja za medicinske namene, implantanti), v dekorativne namene ali za raziskave in razvoj [3], [4]. V PVD proizvodnih centrih ne gre za klasičen proizvodni proces serijske proizvodnje, kjer je treba zagotoviti en stabilen proizvodni proces in narediti ogromno število enakih izdelkov s čim manj ustavljanja, ampak ravno nasprotno. Gre za množico proizvodnih procesov bolj ali manj različnih saržno orientiranih proizvodnih procesov. Količine enega saržnega proizvodnega procesa v tem primeru dosegajo nekaj deset ali nekaj sto izdelkov – da bi bilo treba na enak način obdelati več kot tisoč izdelkov, pa je prej izjema, kot pravilo.

Proizvajalci programskih in digitalnih rešitev za digitalizacijo na trgu sicer že nudijo razvite in predpripravljene rešitve tudi za proizvodne procese, kar pa je le redko jasno prikazano, dovolj dobro dokumentirano in primerno razvito [5]. Za tovrsten proizvodni proces, kot je saržni PVD proces, žal uporaba predpripravljenih rešitev ne pride v poštev zaradi vrste specifičnih okoliščin:

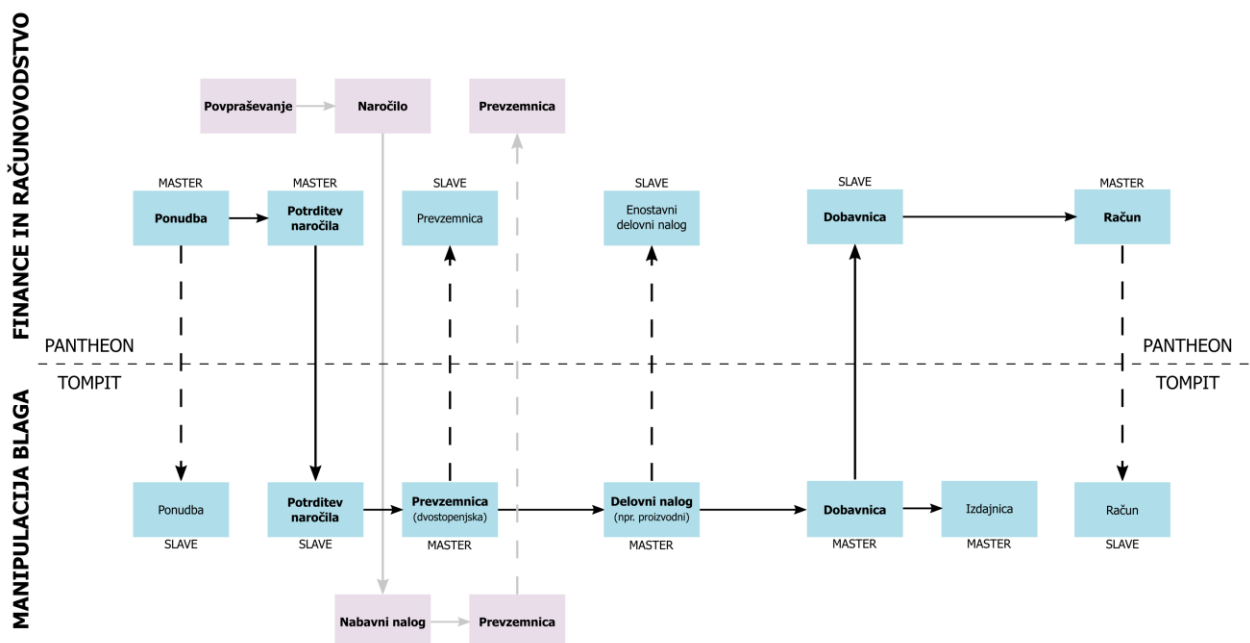
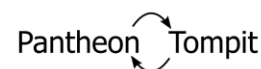
1. digitalizacija proizvodnih procesov je kompleksna,
2. ne gre za velikoserijsko proizvodnjo,
3. obdelovati je treba množico različnih družin izdelkov s svojstvenimi zahtevami – različne družine izdelkov se obdelujejo po različnih tehnoloških postopkih,
4. raznolik nabor trdih PVD prevlek – izdelki z različnimi prevlekami se ne morejo obdelovati hkrati,
5. izdelki, ki se obdelujejo na enak način, in hkrati, se sicer združujejo v sarže, vendar je ta operacija ročna, saj zahteva ročne spretnosti, iznajdljivost delavca in sprotne spremembe,
6. pri saržiranju gre za geometrijski problem v prostoru, zato je najbolj primerna oblika za prikaz grafična oblika – zahtevan je razvoj grafičnega uporabniškega vmesnika po meri,
7. predpripravljene rešitve omejujejo uporabnika, razvoj in nadgradnja pa sta otežena,
8. specifične zahteve ni možno zadostiti z vnaprej pripravljenimi rešitvami.



Slika 1: Shematski prikaz tipičnega PVD proizvodnega procesa s posameznimi tehnološkimi operacijami



Standardni dokumentni tok



OPOMBA: VSI NAVEDENI DOKUMENTI V SHEMI SO IZDANI S STRANI GAZELE V ODNOSU DO KUPCA IN DOBAVITELJA!

OPOMBA: DOKUMENTI Z OZNAKO "SLAVE" SE NE SMEJO SPREMINJATI ZNOTRAJ LASTNE PLATFORME, AMPAK IZKLJUČNO PREKO SINHRONIZACIJE - SO VEDNO KOPIJA "MASTER" DOKUMENTA!

OPOMBA: VSI DOKUMENTI ZNOTRAJ ISTE PLATFORME MORAJO BITI MEDSEBOJNO POVEZANI NE GLEDE NA IZVOR (MASTER/SLAVE KONFIGURACIJO)!

LEGENDA:

- Dokumenti v odnosu do kupca
- Dokumenti v odnosu do dobavitelja
- Glavni dokumentni tok
- Sinhronizacija (podvajanje dokumentov)

Slika 2: Shematski prikaz komunikacijskih povezav med ERP programsko opremo (Pantheon) in MES programsko opremo (Tompit)

2 Opis tipičnega PVD proizvodnega procesa

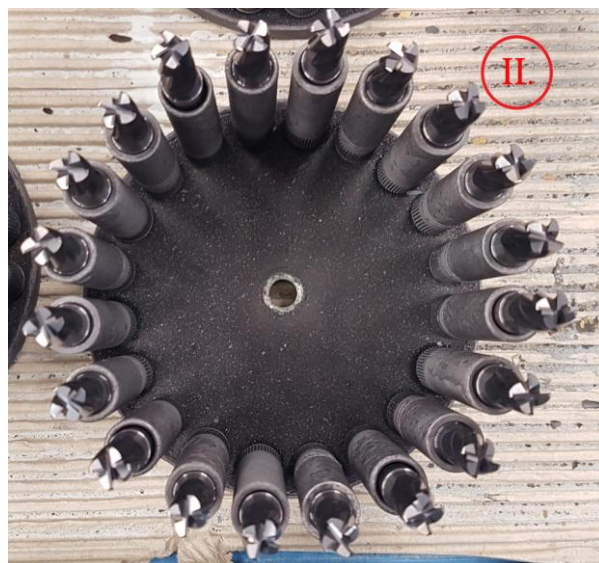
Tipičen PVD proizvodni proces v podjetju Gazela d.o.o. s podrobnejšimi tehnološkimi operacijami prikazuje slika 1. Orodje (svedri, rezkarji, prebijala, forme, ipd.) prispe v podjetje, kjer se oplemeniti s trdo PVD prevleko in se nato vrne kupcu.

V podjetju Gazela d.o.o. oddelek logistike sprejme pošiljko z orodji ter opravi vhodno kontrolo (količinska kontrola, očna kontrola kakovosti orodja za npr. izločanje odkrušenega orodja ter morebitne kontrole dimenzij ali druge meritve). Orodje se nato zloži v košarice, kot prikazuje slika 3, kar hkrati preprečuje neželene trke (poškodbe) in tudi omogoča nadaljnjo tehnološko obdelavo brez nepotrebnega dodatnega prelaganja orodja.



Slika 3: Primer sprejetega orodja (svedri), ki je po vhodni kontroli zložen v košarico za nadaljnjo obdelavo v PVD proizvodnji

Če gre za že rabljeno orodje z obstoječo PVD prevleko, je treba to »staro« prevleko najprej odstraniti, sicer pa gre orodje dalje na predobdelavo – obdelavo pred PVD oplaščanjem. Faza predobdelave sestoji iz peskanja, vodnega poliranja, ostrenja oz. brušenja in dodatnega poliranja ter pranja. Ko je orodje čisto, se ga z golimi rokami več ne sme prijemat zaradi nečistoč in maščob, kar lahko rezultira v neakovostno izdelavo prevleke, saj je operacija PVD oplaščanja zelo občutljiva glede čistoče orodij. Po pranju sledi t.i. operacija saržiranja, ko se posamezna orodja zloži na krožnike (slika 4), več krožnikov se sestavi v eno os in nato več osi v eno mizo, kar predstavlja saržo. Celotna miza z naloženim orodjem se naloži v komoro PVD stroja, ki v nekaj urah nanese izbrano trdo PVD prevleko na orodje (npr. prevleke, kot so TiN, Smux, DLC itd.) [6].



Slika 4: Primer zloženega orodja (rezkarji) na krožnik

Po končanem PVD oplaščanju se v obratnem vrstnem redu sarža z orodjem razstavi. V nekaterih primerih sledi še postobdelava po PVD oplaščanju, kot prikazuje slika 1, če pa postobdelava ni predvidena, se orodje vrne v prostore logistike na izhodno kontrolo (kontrola kakovosti PVD prevleke, dimenzijska kontrola, ipd.) ter nato na odpremo orodja v originalni embalaži, kot so bila orodja prejeta.

3 Digitalizacija PVD proizvodnega procesa

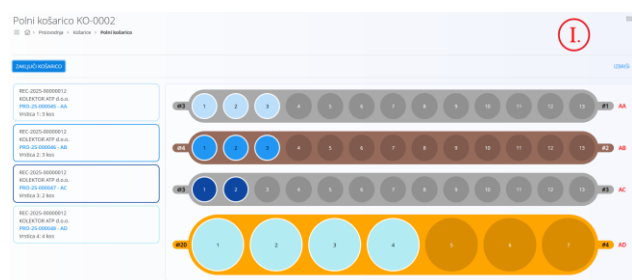
Pred uvedbo digitalizacije PVD proizvodnega procesa je bil nabor spremne dokumentacije minimalen. Vsa dokumentacija je bila izključno v fizični (tiskani) obliki, delovni nalogi so bili izdani ročno v precej poenostavljeni obliki, iskanje informacij je bilo izredno zamudno, sledljivost pa otežena. Tehnološki postopki niso bili standardizirani, niti podrobno definirani. Vsa komunikacija je potekala ustno od človeka do človeka, organizacija dela je bila sprotna, le nekatera znanja so bila popisana. Delovna mesta so bila opremljena z minimalno opremo.

Predpogoj digitalizacije je seveda ustrezna strojna oprema na delovnih mestih, ki zamenjuje fizično dokumentacijo. Na delovna mesta smo namestili predvsem računalnike z zasloni na dotik in z optičnim skenerjem. Kjer pa je okolje neprimerno za računalnike in proces ne dovoljuje zamudnih opravil, so v uporabi prenosni dlančniki na dotik. Digitalni sistem spremljanja PVD proizvodnje temelji na dvosmerni komunikaciji med programsko opremo Pantheon (ERP) in na novo uvedenim digitalnim sistemom vodenja PVD proizvodnje Tompit (MES). Pantheon sistem ni povsod in vsakomur dostopen, Tompit storitev pa poteka v oblaku in je dostopna vsakomur preko spleta.

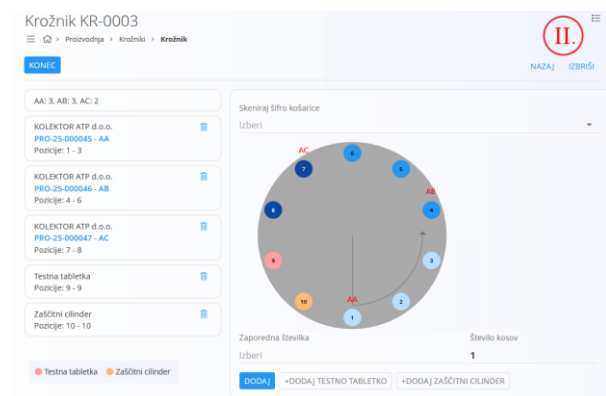
Finančno-računovodski proces (izdelave ponudb, dogovarjanja s kupcem, izdaja delovnega naloga, računa) je prikazan na sliki 2, kjer je jasno razvidna tudi želena interakcija med Pantheon-om in Tompit-om. Pozitivni učinki in ključne pridobitve po prenovi

organizacije proizvodnega sistema z digitalnim sistemom, ki jih velja izpostaviti so naslednje:

- hitri iskalnik informacij in bistveno izboljšana sledljivost procesov,
- možna takojšnja poizvedba stanja naročila brez dodatne interne komunikacije,
- digitalni dvojčki [7], kot pomoč in vodilo pri nekaterih operacijah za hitro sprotno kontrolo (slike 5, 6 in 7),
- avtomatsko poročilo posamezne sarže,
- prvi zametki naprednejšega planiranja proizvodnega procesa.



Slika 5: Prikaz grafičnega uporabniškega vmesnika – digitalni dvojček košarice z naloženim orodjem za predobdelavo v proizvodnem procesu.



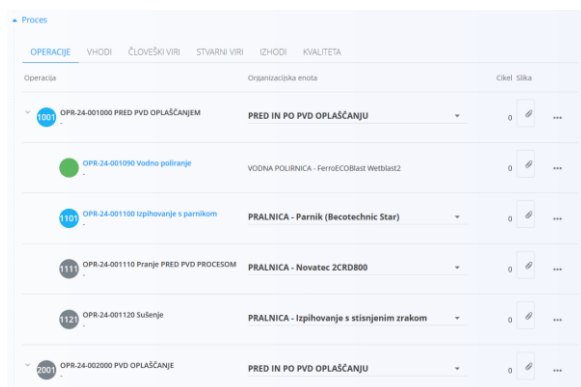
Slika 6: Prikaz grafičnega uporabniškega vmesnika – digitalni dvojček krožnika z naloženim orodjem pri operaciji saržiranja



Slika 7: Prikaz grafičnega uporabniškega vmesnika – digitalni dvojček razstavljanja mize po PVD oplaščanju nazaj v košarico

Kljub velikim prednostim, ki jih prinaša uporaba digitalnih tehnologij pa je že v samem začetku opaziti tudi preostale izzive in pomanjkljivosti po prenovi organizacije proizvodnega sistema z digitalnim sistemom:

- nezadovoljstvo uporabnikov zaradi dodatnih administrativnih del,
- nezadovoljstvo uporabnikov zaradi omejitev sistema,
- odstopanje dejanskih funkcionalnosti od želenega stanja,
- izguba dodatnega časa zaradi ročnega vnašanja informacij v sistem,
- preostali programski hrošči,
- odvisnost od interneta in sistema,
- (pre)počasen razvoj novih logičnih nadgradenj.



Slika 8: Prikaz proizvodnega naloga – vodenje uporabnika skozi operacije in enostaven dostop do naslednje operacije

4 Zaključek

Pred uvedbo digitalnega MES sistema so bile informacije razpršene, večina podatkov se ni beležila. Tehnološki postopki niso bili standardizirani, odločitve glede izvedbe tehnoloških postopkov in obdelave so se sprejemale sproti, glede na izkušnje in znanje osebja.

Uvedba digitalnega sistema vodenja PVD proizvodnega procesa prinaša ključne prednosti in obvladovanje podatkov na enem mestu ter sledljivost v pravem pomenu besede. Kljub trudu, planiranju in jasno opredeljenim zahtevam pa nas je vse sodelujoče spremljalo nemalo izzivov pri vzpostavitvi, delovanju in korekcijah digitalnega sistema za spremljanje tovrstnega proizvodnega sistema. Pri praktično vsakem posamezniku je bilo opaziti zadržke pri uporabi digitalnega sistema spremljanje proizvodnje ter novih postopkov, ki posledično reorganizirajo ustaljene delovne navade. Zadržanost pri uporabi in nezadovoljstvo sta se še povečala ob neuspešnih testiranjih novega sistema. Vendar pa je ob doseženem uspešnem mejniku bilo opaziti tudi navdušenje nad možnostjo vpogleda v proizvodni proces, kar nam omogoča sledljivost praktično vsakega kosa. Izredno pozitiven pa se je pokazal tudi psihološki vidik ob

uspešni implementaciji po meri razvitih funkcionalnosti. Trenutno stanje opisanega digitalnega sistema še ni zadovoljujoče do te mere, da bi deloval v 100 % primerih. Vsekakor pa je primerjava stanja pred in po uvedbi tega MES sistema že očitna. Ob ustrezni in predvideni uporabi je razdrobljenost podatkov po uvedbi manjša, podatki so dostopni, kjer jih potrebujemo in so na voljo ves čas. Vsak posameznik ima dostop do teh podatkov in je manj odvisen od informacij, ki jih je v preteklosti imela le ena oseba, ki pa ravno v želenem trenutku ni bila dosegljiva, zaradi česar je proces lahko utrpel zakasnitve. Ključno je, da to orodje služi zaposlenim, kar je prvotni namen digitalizacije, to pa zahteva dodatno usposobljenost in kompetence osebja, da bodo znali nadzirati in pravočasno in ustrezno korigirati proces z vpogledom v podatke – takrat bo dosežena prava vrednost digitalnega sistema vodenja proizvodnega procesa. V prihodnosti planiramo digitalno platformo razvijati v smer, ki bo zagotavljala napredne analize, potencialne prihranke, individualno obravnavo orodij ter natančnejše planiranje proizvodnega procesa, ki vključuje tudi vzdrževalna dela in menjave. Ravno uporaba naprednih algoritmov, kot so npr. algoritmi umetne inteligence, bi lahko v bližnji prihodnosti omogočala opisane napredne funkcionalnosti za zmanjšanje ročnih administrativnih del zaposlenih ter posredno izboljšanje stabilnosti, ponovljivosti in produktivnosti proizvodnega procesa. Vendar pa se bodo omenjene izboljšave in nove funkcionalnosti dodajale postopoma, v smiselnem zaporedju. Digitalizacija proizvodnje je postala dolgoročni razvojni projekt, ki se neprestano razvija, skladno z razvojem organizacije oz. proizvodnega procesa. Testiranje in usposabljanje vključenih se odvija hkrati in zajema večji del osebja.

Literatura

- [1] BAPTISTA, Andresa, et al., »Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands«, *Coatings*, 2018, 8.11: 402.
- [2] PANJAN, Peter, et al., »Surface topography of PVD hard coatings«, *Coatings*, 2021, 11.11: 1387.
- [3] D. Sušin, »Uporaba močnostne elektronike v PVD tehnologiji napajanja trdih zaščitnih prevlek«, predstavljeno na ERK, Portorož: UL FE, 2024.
- [4] Ž. Dobrovnik, »Vpliv razvoja PVD prevleke TiAlN na obstojnost orodja pri frezanju jekla 42CrMo4«, Diploma, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2022.
- [5] L2L, »Manufacturing Digital Transformation Roadmap«, Pridobljeno: 28. julij 2025. [Na spletu], Dostopno na: <https://www.l2l.com/blog/digitalization-transformation-roadmap-for-manufacturing>
- [6] Gazela d.o.o., »PVD Prevleke«. Pridobljeno: 28. julij 2025. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.gazela.si/PVD-Prevleke>
- [7] TargetTrend, Digitalni dvojčki: kaj je in kako deluje. Pridobljeno: 03. september 2025. [Na spletu]. Dostopno na: <https://targettrend.com/sl/digital-twins/>