INDUSTRIJSKI FORUM IRT 2023

VIR ZNANJA IN IZKUŠENJ ZA STROKO

Portorož, 12. in 13. junij 2023

14. INDUSTRIJSKI FORUM IRT

VIR ZNANJA IN IZKUŠENJ ZA STROKO

Zbornik foruma

Urednik
Darko Švetak

Portorož, 12. in 13. junij 2023

Naslov:	**14. Industrijski forum IRT - VIR ZNANJA IN IZKUŠENJ ZA STROKO**
Urednik:	Darko ŠVETAK, PROFIDTP, d. o. o., Škofljica
Organizator:	PROFIDTP, d. o. o., Škofljica
Glavni pokrovitelji:	ABB d. o. o. FANUC Adria, d. o. o.
Pokrovitelji:	ABC maziva, d.o.o. BTS Company, d. o. o. MARSI group, d.o.o. METTLER TOLEDO, d. o. o. SCHUNK GmbH & Co. KG TOPOMATIKA, d. o. o. YASKAWA SLOVENIJA, d. o. o.
Medijski partnerji:	Revija IRT3000 Revija OBRTNIK-PODJETNIK Revija VENTIL Revija Računalniške novice Finance.si
Oblikovanje, prelom in priprava za tisk:	Darko Švetak, s. p., Škofljica
Založnik in izdajatelj:	PROFIDTP, d. o. o., Škofljica
Tisk:	Tiskarna SCHWARZ PRINT, d. o. o., Ljubljana
Naklada:	350 izvodov

CIP - Kataložni zapis o publikaciji
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

338.45(497.4)(082)
001.895(082)
621(082)

INDUSTRIJSKI forum IRT (14 ; 2023 ; Portorož)
Vir znanja in izkušenj za stroko : 14. industrijski forum IRT : zbornik foruma : Portorož, 12. in 13. junij 2023 / urednik Darko Švetak ; [organizator Profidtp]. - Škofljica : Profidtp, 2023

ISBN 978-961-95800-3-5
COBISS.SI-ID 151199747

Programski odbor smatra, da je tematika prispevkov v skladu s cilji foruma, ne odgovarja pa za noben podatek ali drugo informacijo, podano v zborniku.

Uvodnik

Modri ljudje delajo modre stvari

Če ste letos v živo obiskali Industrijski forum IRT v Portorožu, potem se vam je v spomin zagotovo vtisnil modri lik iz Avatarja, bržkone enega najbolj prepoznavnih filmov znanstveno-fantastičnega žanra, ki je bil na 3D-tiskalniku natisnjen v »naravni« velikosti. Modrih ljudi pač ne vidite vsak dan. Ali pač? Slovenščina v tem primeru omogoča igro besed, modra ni le barva, modra je tudi oznaka za inteligentno, pametno osebo. Takih pa verjetno imate več okoli sebe, če prebirate ta zbornik zelo verjetno sodite mednje. In takšne ljudi oziroma njihove inovacije iščemo tudi na Industrijskem forumu IRT. Iščemo modre ljudi, ki znajo dobre zamisli spraviti v denar, v zlato, če želite.

Modra barva simbolizira nebo, pa tudi morje. Modro je tudi marsikaj vmes. Če se za trenutek še vrnem k Avatarju. Vedno, že od malih nog, so mi bili všeč znanstveno-fantastični filmi, saj so prikazovali nekaj neverjetnega, nedosegljivega. Moj prijatelj se rad pošali, da so vsa znanstveno-fantastična dela pravzaprav peskovnik idej za inženirje – kaj neki bi lahko še naredili. Menim, da ima še kako prav. Scenaristi in režiserji so pogosto navdih za tehnološki napredek, že na prizoriščih snemanja filmov, saj od osebja in tehnike pogosto želijo nemogoče. In ker »nemogoče« tudi dobijo, postane mogoče. Podobno je s premikanjem meja v industriji – nekaj je nemogoče le do trenutka, ko nekdo to naredi/izdela/razvije.

Pred vami je zbornik Industrijskega foruma IRT. Vsebuje zgovorne primere in projekte, ki so v preteklem letu nastali v svetu domače industrije in akademskega okolja. Kot sem v preteklosti že poudaril, ta zbornik v mojih očeh predstavlja neke vrste življenjepis oziroma CV domače industrije. Kako uspešno so nosilci znanj v industriji in širše letos sodelovali in kaj je nastalo na temelju tega sodelovanja, lahko preberete na naslednjih straneh – dovolj zgovoren je že pogled v kazalo, ki razkriva vrsto zanimivih dosežkov.

Očitno je, da Slovenija ima veliko modrih ljudi. Te je treba negovati, kot tudi učiti druge, da postanejo modri oziroma vsaj modrejši. Bolj kot bomo kot družba modri, bolje nam bo. Izkoriščali bomo modre oziroma obnovljive vire energije in z njimi ustvarjali boljše rešitve za naš, da, uganili ste, moder planet. Imamo namreč vse naravne danosti za to –

kakovostno naravo, s čistim zrakom in vodami, obilo rastja. Letne temperature se zdijo ravno pravšnje, da je za vsakogar nekaj, ni ne pretoplo, ne premrzlo. Edino, česar se moramo bati, je lastna lenoba. Ne smemo ji pustiti, da bi v tem okolju zgolj uživali, saj tehnološki napredek nikoli ne počiva. Ne smemo dopustiti, da bi nas svet prehite(va)l. Nasprotno, glede na to, da imamo relativno kakovostno okolje, moramo svetu dokazati, kako modri dejansko smo.

Industrijski forum IRT je nekakšen svetilnik domače industrije in hkrati njeno ogledalo. V kolikor boste nad vsebinami v zborniku navdušeni, smo tudi mi dobro opravili svoje delo. In ga bomo tudi v prihodnje, saj je to naše poslanstvo in hkrati naš moder načrt za modre ljudi.

Portorož, junij 2023

Darko ŠVETAK

PROFIDTP, d. o. o.
Škofljica

Na povezavi ali preko črtne kode, lahko dostopate do mape, kjer se nahajo zbornik Industrijskega foruma IRT

https://www.forum-irt.si/o-forumu/arhiv-zbornikov/

QR koda:

VSEBINA

Strokovni prispevki foruma

DAN 1 - DVORANA 1

PREDSTAVITEV PODJETJA ABB
Robert LOGAR
ABB d.o.o. ……. 3

PREDSTAVITEV PODJETJA FANUC IN ZAKAJ SO SERVISNE STORITVE NAŠA KLJUČNA NALOGA
Miha KAVAŠ
FANUC Adria d.o.o. ……. 7

DAN 2 - DVORANA 1

IZBOLJŠEVANJE KAKOVOSTI V PROCESU PROIZVODNJE Z IQS IN IMPLEMENTACIJO POVRATNE KONTROLNE ZANKE
Peter KORENČAN, Jelena TOPIĆ BOŽIČ, Boštjan MALAVAŠIČ, Andraž ŽERTEK, Dušan BOŽIČ
Inden, informacijske rešitve, d.o.o. ……. 11

POVEZLJIVOST STROJEV Z IOT PLATFORMO MIMAP Pro (Machine Integration Monitoring and Automation Platform)
Jelena TOPIĆ BOŽIČ, Peter KORENČAN, Andraž ŽERTEK, Dušan BOŽIČ
Inden, informacijske rešitve, d.o.o. ……. 15

DVIG PRODUKTIVNOSTI PROIZVODNJE Z INOVATIVNO UPORABO STROJNEGA VIDA IN UMETNE INTELIGENCE
Jure SKVARČ
SICK d.o.o. ……. 19

ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR YOUR PRODUCTION PROCESSES
Franz KLAIBER
SOFLEX Fertigungssteuerungs-GmbH ……. 23

TEH CUT TOOLSHOP IS BOOSTING THE AUTOMATION
Ivan MARCEKOVIĆ[1], Franz KLAIBER[2]
[1]TEH CUT d.o.o.
[2]SOFLEX GmbH ……. 25

PRIMERJALNA ŠTUDIJA UČINKOVITOSTI IN TRAJNOSTI PROIZVODNE LINIJE: ROČNO DELOVNO MESTO V NASPROTJU Z ROBOTSKIM DELOVNIM MESTOM
Robert OJSTERŠEK, Borut BUCHMEISTER, Iztok PALČIČ, Klemen KOVIČ, Aljaž JAVERNIK
Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo ……. 27

RABA DIGITALNIH IN NAPREDNIH PROIZVODNIH TEHNOLOGIJ V SLOVENSKIH PROIZVODNIH PODJETJIH
Iztok PALČIČ, Borut BUCHMEISTER, Robert OJSTERŠEK, Aljaž JAVERNIK, Klemen KOVIČ
Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo ……. 33

ABB INTEGRATED FORCE CONTROL – UPORABA VEČOSNEGA SENZORJA SILE PRI ROBOTSKEM BRUŠENJU
Tomaž LASIČ, Žiga MAJDIČ, Robert LOGAR
ABB d.o.o. ……. 41

3D TISK APLIKACIJI PRILAGOJENIH ZAZNAVAL SILE IN DEFORMACIJ
Tilen KOŠIR, Janko SLAVIČ
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo ……. 45

KATAPULT ROBOTIKA IN S.O.S. ŠOLA STEAM IZOBRAŽEVANJE
Maša JAZBEC, Alenka KNEZ, Neja BRLOGAR, Žan RAJŠEK
Katapult ……. 51

DAN 2 - DVORANA 2

BIOKOMPOZIT IZ ODPADNIH KOKOSOVIH VLAKEN IN RECIKLIRANE TERMOPLASTIČNE MATRICE
Silvester BOLKA[1], Teja PEŠL[1], Tamara ROZMAN[1], Natalija ŠTUMPFL[2], Primož MLAČNIK[2], Blaž NARDIN[1]
[1]Fakulteta za tehnologijo polimerov
[2]KO-SI d.o.o. ……. 55

IZZIVI PRI RAZVOJU ELEKTRONIKE ZA OSVETLJEVANJE AVTOMOBILSKIH PANELOV
Luka URBAS, Andrej KREJAN
HELLA Saturnus Slovenija d.o.o. ……. 61

IZBOR IN UVAJANJE RAZIGLAVANJA ODBRIZGANIH KOSOV IZ DUROPLASTA BMC S SUHIM LEDOM CO2
Igor DEMŠAR, Janez VIRANT
DOMEL, d. o. o. ……. 67

MEHANSKO RECIKLIRAN DUROPLASTIČNI KOMPOZIT KOT OJAČITEV ZA RECIKLIRAN TERMOPLASTIČNI KOMPOZIT
Silvester BOLKA[1], Teja PEŠL[1], Tamara ROZMAN[1], Aljaž KOLAR[2], Bojan BREZNIK[2], Primož HABERMAN[2], Blaž NARDIN[1]
[1]Fakulteta za tehnologijo polimerov
[2]O.P.S. Breznik d.o.o. ……. 73

POPOLNOMA ELEKTRIČNI BRIZGALNI STROJ ROBOSHOT
Miha PUŠNIK
FANUC Adria d.o.o. ……. 79

5 STOPENJSKA ANALIZA ZA NASTAVITEV ROBUSTNIH PARAMETROV PROCESA BRIZGANJA PLASTIKE
Janez TURK, Luka VOUK, Tjaš BOŽIČ
HELLA Saturnus Slovenija d.o.o. ……. 83

RAZVOJ IN IZDELAVA PROJEKCIJSKE OPTIKE
Andraž TEKAVČIČ, Marko VIRŠEK, Aleš ADAMLJE
HELLA SATURNUS SLOVENIJA d.o.o. ……. 89

TEHNOLOŠKI IZZIVI PRI SNOVANJU IN INDUSTRIALIZACIJI PANELOV IN EMBLEMOV NOVIH VOZIL
Aleš ADAMLJE, Pavel OBLAK, Borut MATKO, Tomaž ŠTAJNER, Andrej WAGNER
HELLA SATURNUS SLOVENIJA, d. o. o. ……. 95

UP-CYCLING PRI INDUSTRIJSKI RECIKLAŽI
Silvester BOLKA[1], Teja PEŠL[1], Tamara ROZMAN[1], Gašper BERGANT[2], Blaž NARDIN[1]
[1]Fakulteta za tehnologijo polimerov
[2]Polycom Škofja Loka d.o.o. ……. 99

PODCENJEN POTENCIAL HLAJENJA GLEDE CIKLA IN VARČEVANJA Z ENERGIJO
Jörn SENGELAUB[1], Boštjan ŠMUC[2]
[1]CONTURA-MTC GmbH
[2]ABC-Brizganja d.o.o ……. 103

DAN 2 - DVORANA 3

KAKO ADITIVNA PROIZVODNJA PRELAZI IZ FAZE IZRADE PROTOTIPA U PROIZVODNJU GOTOVIH KOMADA
Luka NAGLIĆ, Amir ŠEĆERKADIĆ
IZIT d.o.o. ……. 109

3D TISK KOVIN S TEHNOLOGIJO BINDER JETTING
David HOMAR, Jernej LOKOVŠEK
SOLID WORLD d.o.o. ……. 115

RAZVOJ IN IZDELAVA VISOKO TEHNOLOŠKE REŠITVE ZA IZBOLJŠAN DOVOD ZRAKA ZA AVTO PORSCHE 991.2 GT3 Z UPORABO OGLJIKOVIH VLAKEN
Tomaž VUJASINOVIČ[1], Peter HORVAT[1], Žan LAZAREVIČ[2]
[1]3WAY d.o.o.
[2]ANGSTROM PERFORMANCE ……. 119

ANALIZA POROZNOSTI POLIMERNIH PROIZVODOV NA PREREZIH IN VOLUMNU Z UPORABO RAČUNALNIŠKE TOMOGRAFIJE
Luka KURTALJ[1], Josip KOS[1], Nenad DRVAR[1], Tomislav HERCIGONJA[1], Matic VOGRIN[2], Mario ŠINKO[2], Aljaž ŠUMLAJ[2]
[1]Topomatika d.o.o.
[2]MARSi GROUP d.o.o. ……. 123

AVTOMATIZIRANO 3D SKENIRANJE PRI PROCESU BRIZGANJA PLASTIKE
Matic VOGRIN[1], Aljaž ŠUMLAJ[1], Mario ŠINKO[1], Luka LUKAČIĆ[2], Josip KOS[2], Nenad DRVAR[2], Tomislav HERCIGONJA[2]
[1]MARSi GROUP d.o.o.,
[2]TOPOMATIKA d.o.o. …… 131

PROCES INOVIRANJA IN RAZISKAV V PROIZVODNEM PODJETJU AVTOMOBILSKE INDUSTRIJE
Andrej WAGNER
HELLA SATURNUS SLOVENIJA d.o.o. …… 139

NAPREDNI PRISTOPI K NAČRTOVANJU, TESTIRANJU IN ZAGONU PROIZVODNIH LINIJ Z UPORABO DIGITALNEGA DVOJČKA
Jože PERKO, Peter SKOPEC
ControlTech d.o.o. …… 143

LabTOP: INOVATIVEN MODEL SODELOVANJA MED INDUSTRIJO IN RAZISKOVALNIM INŠTITUTOM
Nika BRILI, Krištof DEBELJAK
Rudolfovo – Znanstveno in tehnološko središče Novo mesto ……. 147

INDUSTRIJA 5.0: NOVA INDUSTRIJSKA PARADIGMA ZA TRAJNOSTNO IN ODPORNO PROIZVODNJO
Urška BUTOLEN[1], Iztok PALČIČ[2]
[1]Gorenje, d.o.o.,
[2]Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo …… 151

IZRAČUN OGLJIČNEGA ODTISA PODJETJA ADRIA MOBIL D. O. O. IN UPORABA REZULTATOV V RAZVOJU NOVIH IZDELKOV
Polona MOŽE[1], Gašper GANTAR[2,3]
[1]Adria Mobil d. o. o.
[2]Visoka šola za proizvodno inženirstvo
[3]Fakulteta za varstvo okolja ……. 157

DAN 2 - DVORANA 4

NADZOR OBRABE REZALNEGA ORODJA S SISTEMOM STROJNEGA VIDA
Uroš ŽUPERL, Goran MUNĐAR
Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo …… 161

CELOVIT PRISTOP K VISOKO-UČINKOVITI OBDELAVI
Branko UŠAJ
BTS Company d.o.o. Ljubljana ……. 167

PRIMERJAVA KONČNIH ELEMENTOV PRI SIMULACIJAH PREOBLIKOVANJA PLOČEVINE
Mitja VIDMAR[1], Marko VRH[1,2]
[1]Univerza v Novem mestu Fakulteta za strojništvo
[2]CADCAM Lab d.o.o. ……. 173

VPLIV KVALITETE POVRŠINE IN PODMERE NA ČAS ERODIRANJA
Rudi PINTAR
Domel d.o.o. ……. 179

ROBOTSKA CELICA ZA MANIPULACIJO Z MEHKIMI IZDELKI
Hubert KOSLER, Aljoša ZUPANC, Matej MERKAČ
Yaskawa Slovenija d. o. o. 185

CENTRALNI SISTEM IZVAJANJA MEDALBORATORIJSKIH PRIMERJAV V NACIONALNEM MEROSLOVNEM SISTEMU RS
Bojan AČKO[1], Rok KLOBUČAR[1], Urška TURNŠEK[2], Rado LAPUH[2]
[1] Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo
[2] MGTŠ, Urad RS za meroslovje 189

NAPREDNI VIBRACIJSKI PREIZKUSI NA APLIKACIJAH IZ INDUSTRIJSKEGA OKOLJA
Martin ČESNIK, Janko SLAVIČ, Miha BOLTEŽAR
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo 195

VPLIV VIBRACIJ NA FUNKCIONALNOST OBLIKOVNO NAVARJENIH KOVINSKIH IZDELKOV
Mirza IMŠIROVIĆ, Uroš TRDAN*, Aljaž ŠČETINEC, Mohammad Reza GHAVI, Nejc AVBELJ, Damjan KLOBČAR
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo 199

VELJAVNO MODELIRANJE HRUPA IN VIBRACIJ NA PODLAGI VISOKOLOČLJIVOSTNIH ANALIZ S HITRIMI KAMERAMI
Domen GORJUP, Klemen ZALETELJ, Janko SLAVIČ, Miha BOLTEŽAR
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo 205

ANALIZA TOPLOTNOTEHNIČNIH KARAKTERISTIK IZMENJEVALCA TOPLOTE NA POTISNI PEČI
Matic BOBNAR[1,2], Špela JERAJ[1], Gašper KREK[1], Bojan RAJAKOVIĆ[2], Aleš NAGODE[1], Borut KOSEC[1,3]
[1] Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta
[2] SIJ Acroni d.o.o.
[3] Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo 211

SODELUJOČI NA INDUSTRIJSKEM FORUMU IRT2023 215

KOMERCIALNI OGLASI PODJETIJ 221

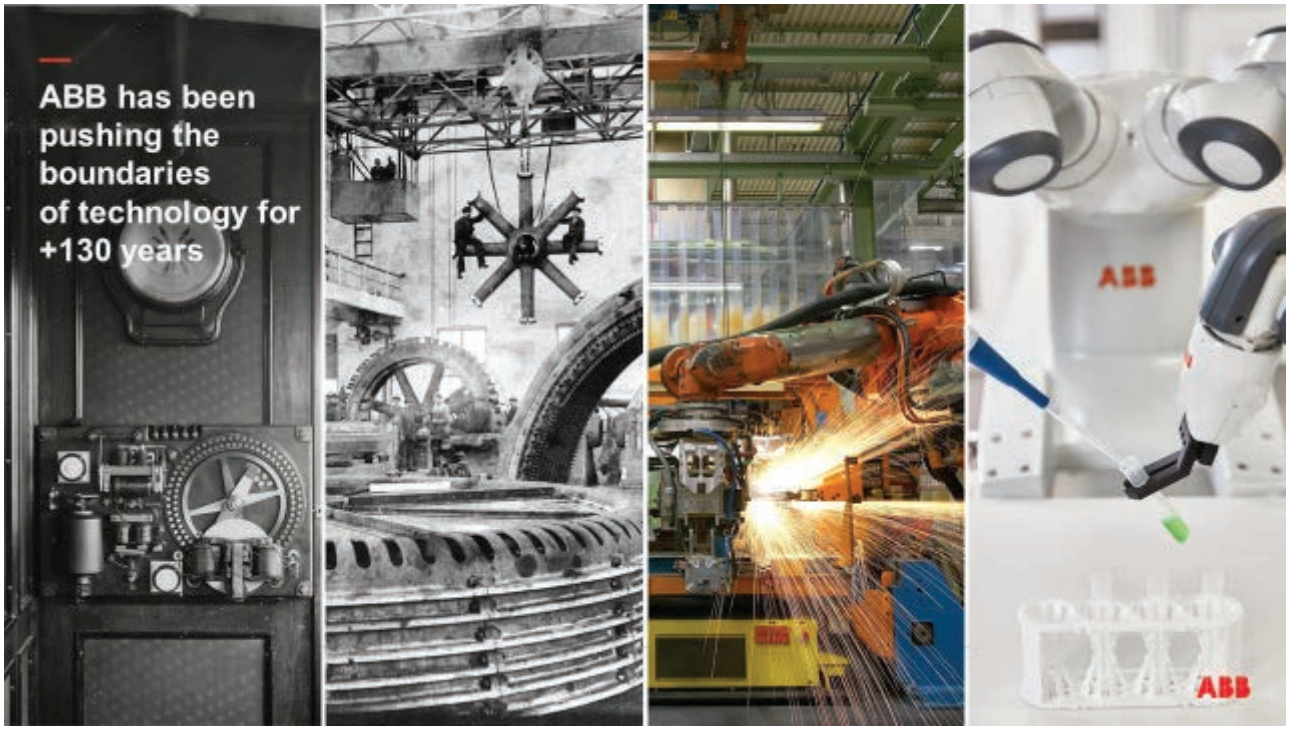
14. INDUSTRIJSKI FORUM IRT

STROKOVNI PRISPEVKI

Portorož, 12. in 13. junij 2023

PREDSTAVITEV PODJETJA ABB

Robert LOGAR
ABB d.o.o.



Reducing customer emissions

Example: Pixel Paint

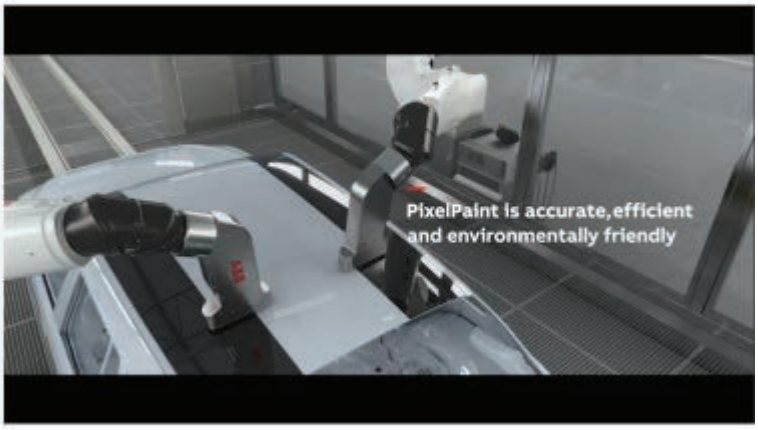
- **⅓ electricity use** vs. spray applications

Eliminates the 30% paint waste that occurs from spray paint applications

46 tons CO_2 saved per PixelPaint robot (IRB 5500) due to paint savings[1]

Additional environmental and cost savings thanks to no masking

Water-borne paint, hence zero VOC emissions



©ABB
May 16, 2023 | Slide 4 1 IRB 5500 lifetime savings assuming average operation times, average paint use, and average emission factors for paint production

ABB

Reducing customer emissions

Example: Omnicore controllers

Up to **20% energy savings*** due to:
- Regenerative braking
- Transformer removal
- Efficient power electronics

©ABB
May 16, 2023 | Slide 5 *Compared to previous controller, the IRC5

ABB

ffers **repair, upgrades, and remanufacturing** of its robots and spare parts.
mers can refurbish their existing robots.
rchase remanufactured robots with like-new condition and durability.
rbished robot has a **75% lower carbon** footprint in manufacturing.

ABB v Sloveniji

Nova lokacija: Brnčičeva ulica 19g, Ljubljana

- 35 zaposlenih
- Poslovna področja **RA, MO in EL**
- **Prodaja**
- **Izvedba projektov**
- **Lokalni servis**

ABB

PREDSTAVITEV PODJETJA FANUC IN ZAKAJ SO SERVISNE STORITVE NAŠA KLJUČNA NALOGA

Miha KAVAŠ
FANUC Adria

IZVLEČEK

Podjetje FANUC Adria se ukvarja s prodajo in vzdrževanjem industrijske opreme, s sedežem v Celju. Naša ključna prednost je usposobljena ekipa strokovnjakov, ki se redno usposabljajo in so seznanjeni z najnovejšimi trendi in tehnologijami. Podjetje uporablja najnaprednejše diagnostične metode in opremo za zagotavljanje najvišje kakovosti storitev in hitro odpravljanje težav. Prizadevamo si za dolgoročno sodelovanje s strankami, ki jim zagotavljamo prilagojene storitve za povečanje produktivnosti in konkurenčnosti. Naša vizija je postati vodilni ponudnik servisiranja in vzdrževanja industrijske opreme v jadranski regiji. Podjetje se osredotoča na stalno izboljševanje procesov in storitev, da bi zagotovilo najvišjo kakovost storitev in zadovoljstvo strank.

1 UVOD

Podjetje FANUC Adria je ena izmed podružnic mednarodno priznane japonske korporacije FANUC, ki se ukvarja s prodajo in vzdrževanjem industrijske opreme. Sedež podjetja se nahaja v Celju, kjer deluje že vrsto let. Pridobili smo bogate izkušnje na tem področju, ki temeljijo na znanju in izkušnjah strokovnjakov, ki so usposobljeni na najvišji ravni. Naša ključna naloga je zagotavljanje najvišje kakovosti storitev na področju vzdrževanja in servisiranja industrijske opreme ter strojev.

Podjetje je osredotočeno na zagotavljanje visoko-kakovostnih storitev in rešitev, ki strankam pomagajo povečati produktivnost, znižati stroške in izboljšati celotno učinkovitost. Zagotavljamo širok nabor storitev, ki vključujejo popravilo in vzdrževanje industrijske opreme, prenovo, nadgradnjo in optimizacijo obstoječih sistemov ter svetovanje in izobraževanje strank..

2 OPIS PODJETJA

Usposobljena in izkušena ekipa strokovnjakov je podjetju pravzaprav največja prednost, saj ima globoko razumevanje delovanja opreme in si prizadeva za hitro in učinkovito odpravljanje napak in težav. Vsi naši strokovnjaki se redno dodatno usposabljajo in informirajo o najnovejših trendih in tehnologijah na področju industrijske opreme, da lahko strankam zagotovijo najnovejše in najboljše storitve.

FANUC Adria ima tudi dostop do najnovejših tehnologij in orodij, ki pomagajo pri diagnosticiranju težav in optimizaciji delovanja opreme. Podjetje uporablja najnaprednejše diagnostične metode in opremo za zagotavljanje najvišje kakovosti storitev in hitro odpravljanje težav. Strankam ponuja tudi širok nabor nadomestnih delov in opreme, ki jih potrebujejo za vzdrževanje in popravilo njihove industrijske opreme. FANUC Adria se zavezuje k dolgoročnemu sodelovanju s svojimi strankami in zagotavljanju visokokakovostnih storitev. Podjetje si prizadeva za zagotavljanje storitev, ki so prilagojene posameznim potrebam stranke, s ciljem, da bi ji pomagalo povečati produktivnost in konkurenčnost na trgu.

Slika 1: FANUC

Naša vizija je postati najboljši partner za servisiranje in vzdrževanje industrijske opreme, ki strankam zagotavlja najboljše storitve in rešitve za povečanje produktivnosti in konkurenčnosti na trgu. S svojimi storitvami in rešitvami želimo biti vodilni ponudnik na področju servisiranja in vzdrževanja industrijske opreme v jadranski regiji.

S široko mrežo poslovnih partnerjev omogočamo zagotavljanje celovitih rešitev za različne industrije in panoge. V podjetju smo sposobni nuditi podporo pri različnih fazah življenjskega cikla opreme, od načrtovanja do implementacije in vzdrževanja.

Zavezani k izboljševanju in nadgrajevanju svojih storitev in rešitev, da bi se prilagodili novim trendom in zahtevam trga, se naše podjetje osredotoča na stalno izboljševanje procesov in storitev, da bi zagotovilo najvišjo kakovost storitev in zadovoljstvo strank.

V podjetju FANUC Adria se lahko pohvalimo s številnimi uspešnimi projekti in referencami, ki potrjujejo naše znanje, izkušnje in kakovost storitev. Stranke nam brez dvoma lahko zaupajo, saj jim zagotavljamo najboljše rešitve in storitve, ki temeljijo na najnovejših tehnologijah in najboljših praksah na področju industrijske opreme. FANUC Adria se osredotoča na ponudbo najboljših rešitev in storitev za industrijsko opremo, s ciljem povečanja produktivnosti in konkurenčnosti svojih strank. Naše znanje in izkušnje namreč presegajo zgolj prodajo opreme. Podjetje nudi širok spekter poprodajnih storitev, med katerimi so popravila, preventivno vzdrževanje, nadgradnje, nadomestni deli in izobraževanja uporabnikov.

Naši strokovnjaki imajo bogate izkušnje in so usposobljeni za delo s širokim spektrom tehnologij, od preprostih do najzahtevnejših aplikacij. Specializirni smo tudi za servisiranje in vzdrževanje visoko specializiranih strojev in opreme, ki zahtevajo natančno in zanesljivo delovanje. Vsi naši tehniki so certificirani in imajo visoke standarde kakovosti pri delu. Poleg tega FANUC Adria ponuja tudi različne programe usposabljanj in izobraževanj za stranke, ki želijo izboljšati svoje znanje o industrijski opremi in njihovi uporabi. Naš cilj je zagotoviti celovito podporo za naše stranke in jim pomagati pri reševanju težav in izboljševanju njihovega poslovanja.

V naši ponudbi imamo tudi različne nadgradnje in posodobitve obstoječe opreme, ki omogočajo izboljšanje učinkovitosti in zmanjšanje stroškov. Naša ekipa strokovnjakov za nadgradnje in nadomestne dele lahko pomaga pri izbiri pravih delov in opreme za vašo opremo, ki jo bo izboljšala in prilagodila vašim potrebam.

FANUC ima tudi svoj lastni center za obnovo opreme v Luksemburgu, kjer se obnavljajo različne komponente, ki omogočajo daljšo življenjsko dobo FANUC opreme. S tem se zmanjšujejo stroški zamenjave opreme in povečuje njena zanesljivost.

Slika 2: FANUC center

Naše poslovanje temelji na vrednotah kot so zanesljivost, odzivnost in strokovnost. Naša ekipa je sestavljena iz visoko motiviranih strokovnjakov, ki so predani zagotavljanju najboljših rešitev za naše stranke. Vsi naši strokovnjaki so usposobljeni za delo s sodobno tehnologijo in najnovejšimi produkti in tehnologijami, ki nam omogočajo, da smo vedno korak pred konkurenco.

Glavna prednostna naloga je, da se osredotočamo na potrebe naših strank in jih razumemo. Na ta način lahko nudimo prilagojene rešitve, ki se natančno prilegajo njihovim potrebam. Vemo, da je vsaka stranka edinstvena in ima svoje specifične zahteve in izzive, zato se osredotočamo na sodelovanje s stranko in prilagajanje naših storitev tem zahtevam.

V podjetju si prizadevamo za dolgoročne odnose s strankami in partnerji, saj jasno razumemo, da je zadovoljna stranka najboljša referenca. Redno spremljamo zadovoljstvo strank in se trudimo izboljšati svoje storitve in procese, da bi zagotovili najboljše izkušnje za naše stranke.

V nadaljevanju bi rad predstavil naše konkurenčne prednosti in kako smo uspeli doseči vodilni položaj na trgu servisiranja in vzdrževanja industrijske opreme. Eden od ključnih dejavnikov naše uspešnosti je naša zavezanost kakovosti storitev. Naši strokovnjaki imajo bogate izkušnje in znanje na področju industrijske opreme, zato smo sposobni nuditi vrhunsko storitev in reševati tudi najzahtevnejše izzive na tem področju. Poleg tega se nenehno izobražujemo in spremljamo najnovejše trende na tem področju, da bi vedno ostali korak pred konkurenco.

Poleg kakovosti storitev pa je naša prednost tudi naša široka ponudba storitev in rešitev. Našim strankam nudimo celovite rešitve za servisiranje in vzdrževanje industrijske opreme, vključno z rednim vzdrževanjem, popravili, nadgradnjami in optimizacijo procesov. Poleg tega nudimo tudi svetovanje in izobraževanje za naše stranke, da bi lahko izkoristile največ iz svoje opreme.

Skrbimo tudi za to, da smo vedno dosegljivi in odzivni našim strankam. Naša ekipa strokovnjakov je na voljo 24/7 za reševanje morebitnih težav in vprašanj. Poleg tega smo se v zadnjih letih osredotočili na digitalizacijo naših procesov in storitev, kar nam omogoča, da smo še bolj učinkoviti in prilagodljivi v odzivanju na zahteve naših strank.

V podjetju FANUC Adria se močno zavedamo pomena trajnostnega razvoja in odgovornega ravnanja do okolja. Zato naša storitvena dejavnost temelji tudi na principih trajnosti, zmanjševanju emisij in obnovljivih virih energije. Skrbimo za zmanjševanje odpadkov in odgovorno ravnanje z nevarnimi odpadki.

Razvoj novih tehnologij in inovativnih rešitev na področju industrijske opreme nam veliko pomeni. Sodelujemo s strateškimi partnerji in vlagamo v raziskave in razvoj, da bi ponudili najnovejše rešitve za izboljšanje produktivnosti, zanesljivosti in varnosti procesov. Naša strateška usmeritev se osredotoča tudi na razvoj digitalizacije industrijskih procesov in podatkovne analitike, kar omogoča še boljšo učinkovitost, prilagodljivost in nadzor nad proizvodnimi procesi.

Skratka, naša zgodba uspeha se odraža tudi v uspehih naših strank. Z dolgoročnimi partnerskimi odnosi s strankami, smo jim pomagali doseči izboljšanje produktivnosti, zmanjšanje stroškov in boljše upravljanje procesov. S svojim pristopom smo si pridobili zaupanje številnih vodilnih proizvodnih podjetij v regiji.

3 ZAKLJUČEK

V FANUC Adria verjamemo, da so zaposleni ključ do uspeha. Skupaj gradimo kulturo odličnosti in inovativnosti, ki temelji na medsebojnem spoštovanju, sodelovanju in osebnem razvoju. S svojo usposobljeno in motivirano ekipo smo pripravljeni na izzive prihodnosti in zagotavljamo kakovostne storitve in rešitve našim strankam.

V zaključku bi poudaril, da je FANUC Adria vaš partner za vse vaše potrebe na področju servisiranja in vzdrževanja industrijske opreme. Ponosni smo na svojo dediščino kakovosti in storitev. Naša ekipa strokovnjakov vam lahko pomaga izboljšati produktivnost in konkurenčnost vašega poslovanja, medtem ko bomo skrbeli za vašo opremo in jo ohranjali v najboljšem možnem stanju. Če iščete vrhunske storitve na področju industrijskih robotov in vzdrževanja industrijske opreme, je podjetje FANUC Adria prava izbira za vas. Kontaktirajte nas za več informacij o naših storitvah in rešitvah, ki so na voljo za vas.

Kontaktni podatki:
FANUC Adria d.o.o., Ipavčeva 21, 3000 Celje
info@fanuc.si
robot@fanuc.si
cnc@fanuc.si

Sledite nam tudi na naših socialnih omrežjih:
Facebook LinkedIn Instagram YouTube

IZBOLJŠEVANJE KAKOVOSTI V PROCESU PROIZVODNJE Z IQS IN IMPLEMENTACIJO POVRATNE KONTROLNE ZANKE

Peter KORENČAN, Jelena TOPIĆ BOŽIČ, Boštjan MALAVAŠIČ, Andraž ŽERTEK, Dušan BOŽIČ
Inden, informacijske rešitve, d.o.o.

IZVLEČEK

Stalno izboljševanje procesa in celovito obvladovanje kakovosti temelji na sistematičnosti izboljšav. Za izboljšanje kakovosti proizvoda je potrebno smiselno in kar najbolj učinkovito izboljšati proces izdelave izdelka. Analiza možnih okvar in njihovih posledic je iterativni proces odkrivanja potencialnih okvar, njihovih vzrokov in učinkov ter preprečevanja okvar izdelka ali procesa, ki je usmerjena k povečevanju varnosti in zadovoljstva kupcev.

iqs CAQ sistem temelji na načelih W. Edwardsa Deminga in stremi h kakovosti in stalnim izboljšavam (CIP) znotraj proizvodnega procesa. Pri iqs CAQ sistemu ima osrednja vlogo FMEA – orodje kakovosti za analizo možnih napak in njihovih posledic, ki je ključna točka za učinkovito preprečevanje napak. Metoda FMEA je odličen pripomoček za analitično ocenjevanje konstrukcije novega ali spremenjenega izdelka, prav tako pa tudi samega procesa izdelave. S pomočjo Demingovega kroga se zagotavlja kakovost posameznega procesa s štirimi zaporedno izvajajočimi se aktivnostmi. Začne se z načrtovanjem (angl. Plan – P), nato pride do izvedbe (Angl. Do -D), izvedeno se preverja (angl. Check – C) in proces se konča. V kolikor je potrebno, se ukrepa (angl. Act – A).

Vse pritožbe in odstopanja, ki se pojavijo v življenjskem ciklu izdelkov, vključno z njihovo analizo, povzročijo spremembo ustrezne FMEA. Takojšnja povratna informacija za načrtovanje se zgodi z vzpostavitvijo kontrolne zanke med upravljanjem pritožb in FMEA.

1 UVOD

Kakovost v proizvodnem procesu je zelo pomembna, saj vpliva na uspešnost podjetja in zadovoljstvo strank. Veliko je definicij, ki opredeljujejo pojem kakovosti. Dojemanje definicije kakovosti se s časom spreminja, zato je težko najti definicijo, ki bi splošno veljala [1]. ISO standardi opredeljujejo kakovost kot doseganje vseh lastnosti izdelka ali storitve , ki jih kupec pričakuje [2]. Standardi, se uporabljajo za zagotavljanje enotnosti in učinkovitosti proizvodov ter storitev po vsem svetu. Opredeljujejo specifikacije, smernice, postopke in merila, ki se uporabljajo pri proizvodnji, preizkušanju, ocenjevanju, trženju in uporabi izdelkov ali storitev [2].

Obvladovanje kakovosti pomeni zagotavljanje, da so izdelki ali storitve ustrezni in izpolnjujejo pričakovanja strank ter, da so v skladu z ustreznimi standardi in predpisi. To dosežemo z uporabo metod, procesov in orodij, ki nam zagotavljajo stalno izboljševanje kakovosti izdelkov in storitev. To lahko ustvarimo s tako imenovano »kakovostno zanko«.

2 KAKOVOSTNA ZANKA

Kakovostna zanka (angl. *quality loop*) je proces, ki nam omogoča, da se izdelki ali storitve neprestano izboljšujejo na podlagi povratnih informacij in jih lahko pridobivamo že v procesu samega proizvajanja izdelka. Gre za cikličen proces, ki se začne s pridobivanjem povratnih informacij, kateri sledi analiza le-teh, nato se na podlagi pridobljenih podatkov izvedejo izboljšave in ponovno preveri izdelek.

Kakovostna zanka se pogosto uporablja v industriji, kjer želijo podjetja zagotoviti, da so njihovi izdelki ali storitve v skladu s potrebami in pričakovanji naročnika.

3 FMEA METODA

FMEA, ki je kratica za izraz (angl. *Failure Mode and Effects Analysis*) "Analiza možnih napak in njihovih posledic". Je metoda za

upravljanje tveganj in preprečevanje napak v proizvodnem procesu ali izdelku. FMEA je sistematičen pristop, ki se uporablja za identifikacijo potencialnih napak že pri razvoju proizvoda ali storitve. Gre za cenjevanje verjetnosti njihovega nastanka ter ocenjevanje vpliva napak na končni izdelek ali storitev [3].

4 SISTEMSKA REŠITEV IQS

IQS (angl. *Intelligent Quality Solutions*) je celovita platforma za upravljanje kakovosti, ki omogoča podjetjem spremljanje kakovosti izdelkov, procesov in dobaviteljev ter preko nje tudi upravljanje dokumentacije in izvajanje analize kakovosti. Platforma ponuja funkcije za sledenje in upravljanje napak ter izvajanje izboljšav procesov [4].

Pri sistemu IQS se kakovost zagotavlja s pomočjo orodja PDCA (angl. *Plan, Do, Check, Act*). To je orodje strukturiranega vodenja, ki se izvaja v štirih korakih. Imenujemo ga tudi DEMINGOV KROG ali DEMINGOV CIKEL, poimenovan po dr. William Edwards Demingu (1900 – 1993), ki ga je definiral v 50-ih letih prejšnjega stoletja.

Osrednjo vlogo v IQS sistemu imajo metode FMEA.

Slika 1: Kakovostna zanka v IQS [4].

4.1 IQS FMEA – PRIČAKUJTE NEPRIČAKOVANO

FMEA je srce sistema iqs CAQ in ključna točka za učinkovito preprečevanje napak. Vse reklamacije in odstopanja, ki se pojavijo v življenjskem ciklu izdelkov, vključno z njihovo analizo, povzročijo spremembo ustrezne FMEA. Takojšnja povratna informacija za načrtovanje se zgodi z vzpostavitvijo kontrolne zanke med upravljanjem pritožb in FMEA. To pomeni, da se vse proizvodne izkušnje zbirajo v FMEA in se lahko uporabijo kot zbirka znanja za podjetje tudi v prihodnje. Vsaka novo ustanovljena FMEA zelo pripomore h kakovostnemu znanju in izkušnjami podjetja.

4.2 NAČRTUJ – NAČRTOVANJE, NEPREKINJEN PROCES

Načrtovanje zanesljive kakovosti je osnova za stabilne procese in zmanjšanje stroškov pri izdelavi. Pred začetkom proizvodnje je treba opredeliti vse zahteve in specifikacije, skupaj s potencialnimi napakami v zvezi s proizvodi in postopki, ter vzpostaviti ustrezne ukrepe.

4.3 NAREDI – ZAGOTAVLJANJE KAKOVOSTI

Zelo pomembno je, da se prične z izvajanjem kontrole že pri sprejetju in prevzemu materiala v podjetje. Ker so poznejši pregledi zagotavljanja kakovosti dragi, jih je treba izvajati le, kadar je mogoče pričakovati napake. Pomembno je, da se vse ugotovitve in znanje uporabi ne le za ugotavljanje trenutnega stanja kakovosti, temveč tudi za širjenje zbirke znanja podjetja.

4.4 PREVERI – PRIMERJAVA Z REALNIM STANJEM

Da bi se izognili ponavljajočim se napakam, je pri načrtovanju kakovosti pomembno, da se napoved primerja z realnim stanjem v proizvodnem okolju. Na začetku proizvodnje se opredeljeni ukrepi preverijo. Potrebno je preveriti učinkovitost ukrepov in jih po potrebi popraviti.

4.5 UKREPAJ – UČENJE IZ NAPAK

Znanje se pridobiva skozi celoten razvoj izdelka. Te ugotovitve so neprecenljive, če se jih potem aktivno uporablja za optimizacijo procesa, kar je glavna prednost rešitve IQS CAQ.Vsi

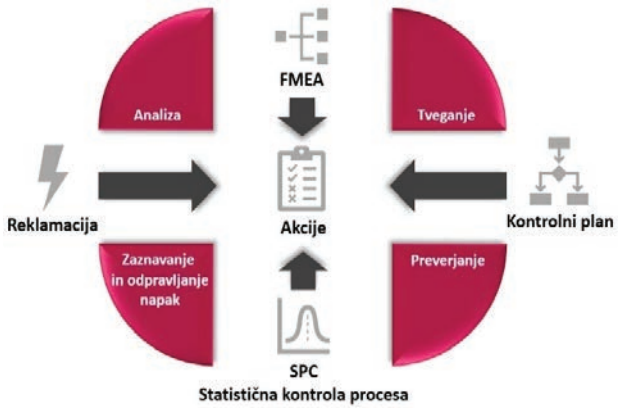
podatki se beležijo in shranjujejo v center znanja. Napake, pritožbe in informacije se vrnejo v vse module in dvignejo kakovost na novo raven.

5 IQS IN KONTROLNA ZANKA

Pri sistemu IQS je lahko vsak proces samostojen in neodvisen od drugih, vendar se morajo v določenih delih procesi medsebojno ujemati. V FMEA modulu se določijo akcije za izboljšanje zaznavanja napake, ki se morajo odražati v inšpekcijskem planu. Na drugi strani pa se skozi reklamacije pridobi podatke o napaki/-ah, ki se je pojavila na izdelku, kar je podlaga za dodelavo oz. posodobitev FMEA procesa. Do zanesljive ocene tveganja lahko privede samo ustrezna statistična obdelava podatkov.

Preko takšnega primera je mogoče lažje razumeti pomen integritete podatkov, ki jo je sicer mogoče doseči ročno, vendar z veliko vloženega truda in natančnosti ljudi. Velikokrat se izkaže, da se po določnemu času pojavijo odstopanja, ki so na začetku manjša, vendar se sčasoma povečajo. Vse to je posledica preobremenjenosti oddelka kakovosti z drugimi nalogami.

V duhu industrije 4.0 se vse več podjetji odloča za uvedbo digitalnih platform. Te omogočajo poenotenje podatkov preko štirih področij zagotavljanja kakovosti in skrbi za integriteto podatkov. S tem se prihrani ogromno časa kontrolnemu oddelku, po drugi stani pa se onemogoči napake, ki so neizbežna posledica človeškega udejstvovanja. Spodnja slika nam grafično prikazuje kakovostno zanko v IQS.



Slika 2: Grafični prikaz kakovostne zanke [4].

Celoten proces kontrolne zanke v IQS bi lahko za potrebe te optimizacije razdelili na štiri področja:

- Vodenje FMEA procesa.
- Kontrolni in inšpekcijski plan.
- Statistična obdelava podatkov.
- Obravnavanje reklamacije.

5.1 VODENJE FMEA PROCESA SKOZI IQS

FMEA je najpomembnejše orodje pri preprečevanju napak v proizvodnji. Vsako reklamacijo ali težavo v proizvodnji, iqs Quality Center vrne v FMEA in zagotovi, da je nabor napak vedno ažuren in posodobljen. Tudi poročila 8D se nanašajo na FMEA, saj sta notri opisana napaka in vzrok. Ko se pojavi nova napaka, je oseba, ki je odgovorna za FMEA samodejno obveščena, FMEA pa se v trenutku posodobi, kar zagotavlja, da je povratna kontrolna zanka PDCA sistematično zaprta.

V primerjavi s klasično metodo izdelave kopij in ročnega vnašanja podatkov, ta tehnika zahteva minimalne napore in je dosti bolj prijazna do uporabnika. Možnosti za nastanek napake pri prepisovanju podatkov so nižje. Velika prednost modula je tudi, da se iz FMEA samodejno kreira kontrolni plani.

5.2 KONTROLNI IN INŠPEKCIJSKI PLAN

Kontrolni plan se kreira neposredno iz FMEA. Nepotrebni kontrolni pregledi se sistematično ugotavljajo in odpravljajo. Tako se ohranjajo samo kontrole, ki se osredotočajo na dejanske zahteve in povzročajo občutno zmanjšanje stroškov in prihranek časa. Da bi zagotavljali kakovost proizvodov, je potrebno izvajati kontrolo v vsakem segmentu izdelave. Začeti je potrebno že s pregledom vhodnega materiala, potem kontrolirati skozi vse procesne faze ter na koncu tudi pri odpremi izdelka, preden le-ta zapusti proizvodnjo. Modul za kontrolo in inšpekcijski pregled omogoča izdelavo poročila za vhodne in izhodne izdelke ter tudi vmesna preizkušanja in statistično obdelavo podatkov (SPC).

5.3 STATISTIČNA OBDELAVA PODATKOV

SPC (angl. *Statistical Process Control*) zagotavlja osnovo za spremljanje proizvodnje, regulacijo procesov in nadzor ter vmesno testiranje. Kontrola se lahko sproži s trenutnim proizvodnim procesom kot tudi s kontrolnim delovnim nalogom. Možna je tudi povratna kontrolna zanka v bazo napak FMEA, kar omogoča stalni nadzor. Vsi pridobljeni rezultati se lahko uporabijo, ne le za oceno trenutnega stanja kakovosti, temveč tudi za dodatno znanje in izkušnje v podjetju. Vsi izmerjeni podatki so na voljo takoj in za vse vrste analiz.

5.4 OBRAVNAVANJE REKLAMACIJE

Modul za reklamacije (RKM) (angl. *Complaints Management*) omogoča ustvarjanje, urejanje in sledenje, tako notranjim kot zunanjim reklamacijam. Na ta način je omogočena spremljava in nadzor dobaviteljev, kupcev in tudi posameznih oddelkov znotraj podjetja.

Modul omogoča kreiranje ustrezne predloge za podjetje, za vse korake in potek dela v zvezi z obravnavno reklamacij. Prav tako so na voljo predloge za 8D in 4D poročila ter predloge za korektivne in preventivne ukrepe.

Napake in ukrepi se neposredno prenesejo v iqs FMEA. Le-ta je tako vedno posodobljen in noben ukrep ni spregledan. Modul prav tako omogoča pregled nad ponavljajočimi se napakami in reklamacijami.

6 FMEA HIERARHIJA IN DEDOVANJE

Tehnika dedovanja poenostavi integracijo ostalih gradnikov iz iste produktne družine v statusno kontrolno poročilo.

Procesno strukturo sestavljajo trije nivoji:

- MASTER (glavni – popisani vsi procesi v organizaciji)
- DRUŽINA IZDELKOV (ki se delajo po enakih postopkih in so podobnih dimenzij)
- PRODUKTNI FMEA (nazivne karakteristike se povežejo z vrednostmi)

Ta funkcionalnost omogoča, da se ugotovljeno oz. izmerjeno napako na določenem artiklu, lahko prenese tudi na izdelke, ki se delajo po enakem postopku in so podobnih dimenzij. Prav tako je možno to napako posodobiti na nivoju procesa (nivo Master), kar omogoči, da se bo ta upoštevala za vse izdelke, ki se obdelujejo s tem tehnološkim procesom.

Pri dedovanju tako velja, da spremembe na MASTER nivoju vplivajo na vse nižje nivoje.

7 SKLEP

Kakovostna zanka v proizvodnem procesu že dolga leta omogoča neprestano izboljševanje. S pomočjo zanke se pridobi informacije o tem, kako dobro deluje določen proces ali izdelek. Zanka omogoča tudi stalno spremljanje in analiziranje, kar pripomore k boljšim rezultatom. S pomočjo digitalizacije nadzora kakovosti v proizvodnem procesu se lahko prihrani ogromno časa, ker se vsi zajeti podatki shranjujejo in posodabljajo v realnem času. Na podlagi tega tudi ne prihaja več do napak pri prepisovanju podatkov med dokumenti. IQS sistem predstavlja orodje oz. sistem, ki, ne samo olajša dela, temveč tudi poskrbi za zmanjšanje stroškov, kar je v današnjih časih ključnega pomena, zaradi zagotavljanja konkurenčnosti na trgu.

Viri:

[1] Božič, S.: *Kakovost in zanesljivost proizvodnje*, Zavod IRC, Ljubljana, 2009.
[2] Potočnik, E, Babnik, T, Černe, F, Gunčar, U, Kiauta, M, Novak, R, Pivka, M, Potočnik, J, Čuk, J, Mihelčič, M.: *ISO 9001 – iz teorije v prakso*, Taxus, Ljubljana, 1996.
[3] Pregrad, B, Musil, V, Turina, N.: *Proizvodi – tehnologija, kakovost in varstvo okolja*, Ekonomsko-poslovna fakulteta, Maribor, 2000.
[4] 4 osrednja področja zagotavljanja kakovosti v proizvodnem procesu, INDEN, (https://www.inden.si/4-osrednja-podrocja-zagotavljanja-kakovosti-v-proizvodnem-procesu/), objavljeno na spletu (10.4.2023).

POVEZLJIVOST STROJEV Z IOT PLATFORMO MIMAP Pro (Machine Integration Monitoring and Automation Platform)

Jelena TOPIĆ BOŽIČ, Peter KORENČAN, Andraž ŽERTEK, Dušan BOŽIČ
Inden, informacijske rešitve, d.o.o.

IZVLEČEK

Internet stvari (IoT) je paradigma, ki omogoča komunikacijo med elektronskimi napravami in senzorji prek interneta. IoT koncepti se uporabljajo v različnih industrijskih procesih. V industrijskih procesih in vzdrževanju so IoT rešitve za upravljanje s sredstvi so nadgradnja klasičnih sistemov za upravljanje s sredstvi. V teh procesih se vse bolj vpeljujejo industrijski IoT (IIoT) koncept. IIoT je ekosistem naprav, senzorjev, aplikacij in povezane omrežne opreme, ki skupaj zbirajo, spremljajo in analizirajo podatke. IIoT omogoča povečanje časa delovanja proizvodnje s prediktivnim vzdrževanjem strojev in pospešitev odzivnega časa z zbiranjem in obdelavo operativnih podatkov v realnem času.

Idejni cilj generičnih IoT platform je, da omogočajo povezavo različnih strojev, ki lahko pošiljajo različne podatke. Storitve v oblaku omogočajo pošiljanje velikih količin podatkov in skalabilnost v primeru integracije večjega števila strojev. S povezanostjo spletne in mobilne aplikacije in prikaza po-up obvestilih, se poveča nadzor nad delovanjem strojev. IoT platforme, ki pridejo s stroji so pogosto omejene z integracijo strojev proizvajalca. Pomanjkanje generičnosti takšnih platform otežujejo pridobitev celostnega pogleda in povzroči razdrobljenost informacij. MIMAP PRO platforma zagotavlja generičnost, saj se lahko tip podatkov, ki jih stroj pošilja spreminja glede na potrebe in v eni platformi lahko za različne stroje spremljamo različne informacije.

1 UVOD

Internet stvari (IoT) je nastajajoča paradigma, ki omogoča komunikacijo med elektronskimi napravami in senzorji prek interneta. Izraz se je prvič pojavil konec 20. stoletja. IoT tako omogoča povezovanje predmetov in vsakdanjih izdelkov v digitalno omrežje, kar omogoča zbiranje informacij o napravi, programski opremi pa omogoča spremljanje delovanja in zbiranje podatkov. Uporabniki imajo na ta način omogočen nadzor nad napravami. Ena najpomembnejših komponent, ki označuje IoT, je povezljivost med vsemi napravami, ki so del tako imenovanega ekosistema IoT. Ekosistem interneta stvari sestavljajo naprave interneta stvari, varnost, omrežje, prehod, oblak, aplikacija in uporabniki [1]. IoT platforme so postale del vsakdana. Poleg tega pa se nadgrajujejo tudi z vključitvijo umetne inteligence na različnih področjih [2].

2 DELOVANJE IOT PLATFORM

Vsaka platforma IoT je večplastna tehnologija. Vsebuje na stotine gonilnikov in orodij za izvajanje naslednjih funkcij (McClelland, 2020):

- priključitev strojne opreme, kot so senzorji in naprave,
- ravnanje z različnimi komunikacijskimi protokoli strojne in programske opreme,
- zagotovitev varnosti in pristnosti za naprave in uporabnike,
- zbiranje, vizualiziranje in analiziranje podatkov, ki jih zbirajo senzorji in naprave,
- povezovanje vsega zgoraj naštetega z drugimi spletnimi storitvami.

IoT platforma je integrirana storitev, ki ponuja sredstva za povezavo fizičnih objektov v splet. Deluje kot zbiralnik za povezovanje naprav na enem in aplikacij na drugem koncu. IoT platforme tako uporabniku omogočajo upravljanje in avtomatizacijo [3].

2.1 IoT arhitektura in tehnologija

Arhitektura IoT sistema je v osnovi sestavljena iz petih pomembnih strukturnih komponent. Te določajo funkcionalnosti IoT. S tem se zagotavlja nadzor, varnost in enostavno vključevanje in povezovanje novih in sedanjih tehnologij. Prav

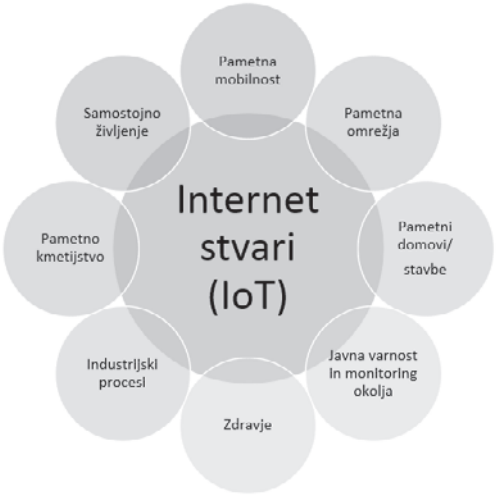
tako takšna arhitektura zagotavlja modularnost in skalabilnost. Komponente oz. plasti IoT sistema so [1]:

- Zaznavna plast
- Omrežje
- Vmesna programska plast
- Aplikacijska plast
- Poslovni sloj

3 PODROČJA UPORABE IoT APLIKACIJ

IoT koncepti se uporabljajo v najrazličnejših panogah, med njimi zelo pogosto na področjih: mobilnosti, pametnega omrežja, pametnih domov, in stavb, javne varnosti, in okolja, kar je prikazano na sliki 1. Koncept se uporablja tudi v medicini in nadzoru zdravja, v preciznem kmetijstvu in industrijskih procesih [2]. Nabor IoT aplikacij lahko v osnovi razdelimo na tri glavna področja [4], ki so:

- Komercialna
- Industrijska
- Infrastrukturna.



Slika 1: Področja uporabe IoT aplikacij.

- povezovanje vsega zgoraj naštetega z drugimi spletnimi storitvami.

Platforme IoT predstavljajo "hrbtenico" pametnih mest, sredstvo za spremljanje okoliškega okolja (vreme, temperatura, vlažnost), inteligenco transportnih sistemov, ki vključuje tudi pametna parkirna mesta. Podatki se zbirajo v oblaku in shranjujejo v porazdeljeni bazi podatkov za potrebe izvajanja filtriranja, analiz, računanja, odločanja, upravljanja, in vizualizacije podatkov v končnih aplikacijah (Hejazi et al., 2018). Vedno večje število IoT platform lahko v osnovi razdelimo v štiri kategorije [3]:

- celovite platforme,
- platforme za povezljivost,
- platforme v oblaku
- podatkovne platforme.

Za uspešno implementacijo in uporabo IoT platforme je ključnega pomena varnost. Ta mora vključevati močne varnostne mehanizme na vseh nivojih, omrežjih in protokolih. Tako aplikacija kot končni uporabnik morata pridobiti dovoljenje za dostop, posamezen uporabnik pa se lahko nahaja na drugem nivoju dostopa do podatkov in platforme.

2.2 Uporaba IoT v industriji

Znotraj industrije so IoT platforme pomembne pri upravljanju z delovnimi sredstvi in industrijski avtomatizaciji. Upravljanje v času IoT platform lahko doprinese veliko pozitivnih koristi in omogoči obvladovanje obsežne infrastrukture, kadar ta temelji na velikem številu naprav in strojev.

Koristi uporabe IoT v upravljanju lahko vključujejo:

- Zmanjšanje stroškov:
- Optimizacija delovnih procesov: pridobivanje podatkov v realnem času in analitika omogočata bolj predvidljivo načrtovanje vzdrževanja, kar lahko zmanjša stroške in optimizira delovne procese
- Sledenje sredstvom: omogočen je nadzor nad lokacijami sredstev, kar je dobrodošlo, ko se oprema veliko uporablja po terenu, na ta način pa se tudi zmanjša verjetnost tatvin sredstev.

V vzdrževanju je vzpostavitev IoT platform omogoča digitalno vzdrževanje, katerih glavne strategije so [5]:

- Oddaljeno vzdrževanje: omogočeno je spremljanje in nadzor sredstev na daljavo
- Prediktivno vzdrževanje: ob implementaciji umetne inteligence se lahko predvidi možnost napak in opozoril, ko je potreba po vzdrževalnih delih. S tem se lahko lažje načrtuje delovne procese.
- Vzdrževanje v realnem času: z obveščanjem v realnem času je omogočena takojšna reakcija in ocena stanja.

3 IOT PLATFORME ZA POVEZOVANJE STROJEV

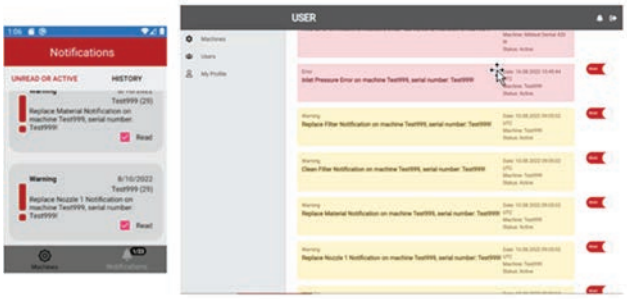
IoT rešitve za upravljanje s sredstvi so nadgradnja klasičnih sistemov za upravljanje s sredstvi. Sistemom dodajo avtomatizacijo in inteligenco ob implementaciji umetne inteligence. Uporaba IoT pri povezovanju s stroji je torej pomembna saj se avtomatizira pridobivanje podatkov iz fizičnih sredstev, prav tako pa se poveča uporabnost teh podatkov za prepoznavanje zgodnjih opozorilnih znakov

Uporaba senzorjev omogoča aktivno sledenje določenim informacijam. Senzorji podatke pošljejo v oblak, kjer se potem analizirajo in uporabniku omogočajo vpoglede o uporabi in stanju sredstev.

3.1 MIMAP Pro (Machine Integration Monitoring and Automation Platform)

Idejni cilj generičnih IoT platform je, da omogočajo povezavo različnih strojev, ki lahko pošiljajo različne podatke. Storitve v oblaku omogočajo pošiljanje velikih količin podatkov in skalabilnost v primeru integracije večjega števila strojev.

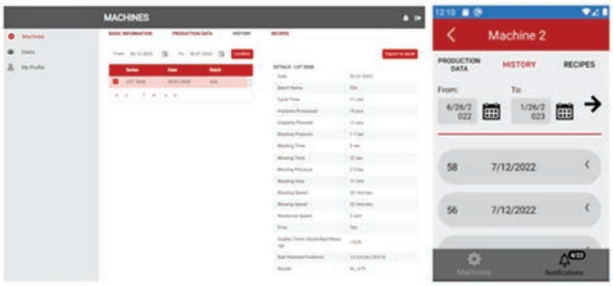
S povezanostjo spletne in mobilne aplikacije in prikaza po-up obvestilih, se poveča nadzor nad delovanjem strojev (slika 2).



Slika 2: Obveščanje v sklopu IoT platforme.

MIMAP IOT platforma torej omogoča (slika 3):

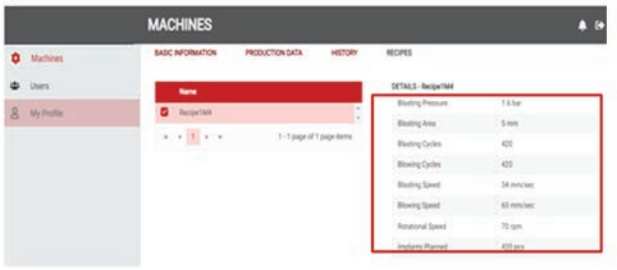
- Spremljanje strojev v realnem času
- Takojšne obvestilo o težavah
- Prikaz obvestil strojev v realnem času (v spletni in mobilni aplikaciji, tudi s pop-up obvestili)
- Prikazovanje podatkov o trenutnem delovanju stroja
- Prikazovanje zgodovine delovanje za potrebe vzdrževanje
- Prikaz zgodovine proizvodnje za posamezno serijo
- Recepti delovanja stroja



Slika 3: MIMAP Pro platfroma.

IoT platforme, ki pridejo s stroji so pogosto omejene z integracijo strojev proizvajalca, kar pomeni, da je včasih potrebno uporabljati več platform, v kolikor ima določeno podjetje veliko strojev različnih proizvajalcev. Pomanjkanje generičnosti takšnih platform otežujejo pridobitev celostnega pogleda in povzroči razdrobljenost informacij.

MIMAP PRO platforma zagotavlja generičnost, saj se lahko tip podatkov, ki jih stroj pošilja spreminja glede na potrebe in v eni platformi lahko za različne stroje spremljamo različne informacije (slika 4).



Slika 4: Prikaz podatkov o delovanju stroja (trenutna proizvodnja).

Zaradi storitev v oblaku je tudi omogočena skalabilnost in povezovanje večjega števila strojev. Pomislek pri uporabi IoT platform je varnost, a je potrebna več stopenjska identifikacija za dostop do podatkov. V današnjem času je ažuren dostop do informacij nujen, ker omogoča tudi nadzor nad stroji.

4 SKLEP

Z vsesplošno pojavnostjo IoT platform v različnih panogah je zaščita podatkov ključna zahteva, za kar se uporabljajo različni varnostni protokoli. Z nadaljnjim razvojem tehnologije se pričakuje, da bo umetna inteligenca vse bolj pridobivala na pomenu in postala del vsakdana. Umetna inteligenca in IoT imata vzajemno razmerje. AI ima koristi od IoT s porazdeljenimi podatki, IoT pa od AI z naprednim upravljanjem. IoT senzorji so tako neizmerna prednost za podatkovni cevovod strojnega učenja. Podatki in kvaliteta le-teh bo postala še toliko bolj pomembna. Prav tako bo večji pomen dobila virtualna resničnost z razvojem tehnologije vizualnega pregleda, ki bo lahko še nadgradila pomembnost uporabnost IoT platform za uporabo tako v vzdrževanju, kot tudi v drugih panogah.

Viri:

[1] Kumar, S., Tiwari, P. & Zymbler, M. *Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review*. J Big Data 6, 111 (2019).
[2] Khanna, A., Kaur, S. *Internet of Things (IoT), Applications and Challenges: A Comprehensive Review*. Wireless Pers Commun 114 (2020), str. 1687–1762
[3] Dobrin, S.: *Platforme interneta stvari za pametna mesta, diplomska naloga*. Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, 2019.
[4] Perrera, C, Liu, CH, Jayawardena, S: *The Emerging Internet of Things Marketplace From an Industrial Perspective: A Survey*. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, 3(4)(205), str. 585-598
[5] Muller, A., Crespo Marquez A., Iung, B.: On the concept of e-maintenance: Review and current research. Reliability Engineering & System Safety, 93(8) (2008), str.1165-1187, https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.08.006.

DVIG PRODUKTIVNOSTI PROIZVODNJE Z INOVATIVNO UPORABO STROJNEGA VIDA IN UMETNE INTELIGENCE

Jure SKVARČ
SICK d.o.o.

IZVLEČEK

Strojni vid in tehnologije umetne inteligence se več desetletij uspešno uporabljajo v industriji, predvsem za namene avtomatizacije končne kontrole izdelkov. Takšna uporaba teh tehnologij omogoča dvig kakovosti izdelkov, ki jih prejme končni uporabnik, vendar sama po sebi ne prispeva k izboljšanju proizvodnih procesov. V prispevku bomo predstavili inovativen pristop k povečanju produktivnosti z uporabo tehnologije strojnega vida in umetne inteligence.
Poseben poudarek bomo namenili spremljanju razpoložljivosti strojev. Sistem, ki ga razvijamo v podjetju SICK, deluje neodvisno od krmilja strojev in omogoča realno-časovno zajemanje podatkov o stanju proizvodnih sredstev. Te informacije zagotavljajo boljši vpogled v proizvodne procese in omogočajo njihovo optimizacijo.
Naše rešitve smiselno nadomeščajo človeka, njegove sposobnosti vidnega zaznavanja in kognitivne sposobnosti, s tem pa uporabniki naših sistemov bolje razumejo svoje proizvodne procese. Sistemi ponujajo informacije, ki jih ni mogoče zajeti s klasičnimi postopki, kar omogoča boljše obvladovanje in nadzor proizvodnje.
V prispevku bomo predstavili ključne prednosti in primere uporabe strojnega vida in umetne inteligence pri optimizaciji proizvodnje. S tem bomo pokazali, kako inovativna uporaba teh tehnologij prispeva k večji produktivnosti in konkurenčnosti podjetij na trgu.

1 STROJNI VID IN UMETNA INTELIGENCA V INDUSTRIJSKEM OKOLJU

Strojni vid se že vrsto let uporablja v industriji za avtomatizacijo končne kontrole izdelkov. Vizualne tehnologije, v kombinaciji z metodami umetne inteligence so ključne omogočitvene tehnologije pri sistemih za doseganje višje transparentnosti. S tem prispevajo k izboljšanju proizvodnih procesov in povečanju produktivnosti.

Pomemben kazalnik uspešnosti proizvodnih procesov je OEE, ki ga sestavljajo razpoložljivost, zmogljivost in kakovost. Visoka produktivnosti omogoča podjetjem konkurenčen nastop na trgu.

Le spremljanje OEE ne zagotavlja visoke produktivnosti. Zato je ključno, da zagotovimo vidnost in transparentnost procesov. To pomeni, da vzpostavimo okolje, kjer v dejanskem času zbiramo relevantne podatke in si na njihovi osnovi zgradimo dejansko sliko procesov (digitalni dvojnik). Podatkom zaupamo in na njihovi osnovi sprejemamo odločitve za izboljšave.

Vse to so koraki s katerimi dvigujemo digitalno zrelost in postopno izvajamo transformacijo proizvodnje proti popolni avtonomiji. V prvem koraku nas zanima, ali stroji obratujejo in če ne, zakaj ne. Razlogov za nedelovanje je veliko: napaka v delovanju, pomanjkanje vstopnega materiala, napaka in zastoj izven stroja, ni razpoložljivega operaterja, menjava orodij in podobno.

Tudi na zmogljivost vpliva več dejavnikov, na primer taktni čas ali izkoriščenost ležišč v večdelnih orodjih.

Pri zajemu podatkov se v splošnem v industrijskem okolju srečujemo z dvema scenarijema: »green field«, kjer zajem podatkov načrtujemo v fazi zasnove produkta in proizvodnih procesov ter »brown field«, kjer izziv apliciramo na že obstoječo proizvodnjo, ki obratuje. V primeru že obstoječe proizvodnje predstavlja dodaten izziv vsak poseg v obstoječe stanje. V panogah, kot je na primer farmacevtska industrija lahko že najmanjši poseg v krmilje linije pomeni ponovno validacijo stroja ali linije. Ne-invazivna namestitev takšnega dodatnega sistema mora biti njegova pomembna lastnost.

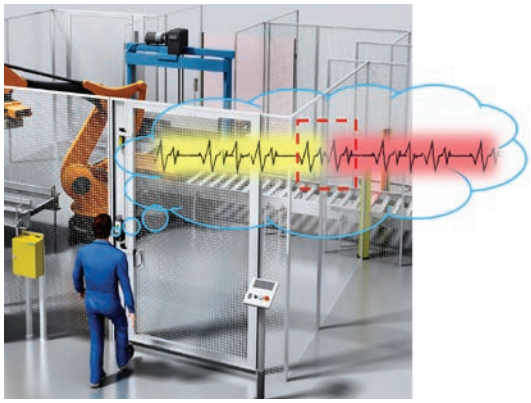
Za vsako izboljšavo procesov moramo najprej poznati vzrok. Želimo si vsebinsko bogat opis dejanskega stanja, v obliki kot bi ga zapisal izkušen upravljalec linije, če bi pozorno spremljal delovanje.

V podjetju SICK razvijamo vizualnega kognitivnega asistenta (VIVIAN), ki je sposoben ustvarjati kontekstualno bogate informacije o delovanju strojev in s tem avtomatizirati procese, ki ji upravlja izkušen operater na osnovi vizualne zaznave in kognitivnih sposobnosti. Pri tem uporabljamo kamere in metode umetne inteligence. Rešitev je prilagodljiva, preprosta za namestitev in uporabo, ter povezljiva v obstoječ OT/IT sistem.

2. VIVIAN

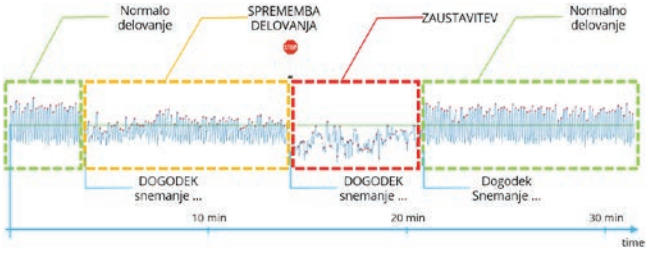
2.1 Razpoložljivost strojev

Pristop si poglejmo na primeru razpoložljivosti strojev. V vsakem trenutku nas zanima ali stroj deluje. Po definiciji, ki jo uporabljamo ima stroj vsaj en gibljiv del in med obratovanjem izvaja nekakšno ciklično gibanje. Pri tem ni pomembno ali gre za robota, rotacijsko mizo ali tekoči trak. Vsak opazovalec je sposoben prepoznati značilen cikel stroja. Naš izziv je zgraditi sistem, ki bo sposoben ustvariti enako interpretacijo delovanja kot človek (Slika 1).



Slika 1: Vizualni kognitivni asistent – kopira zmogljivosti človeka

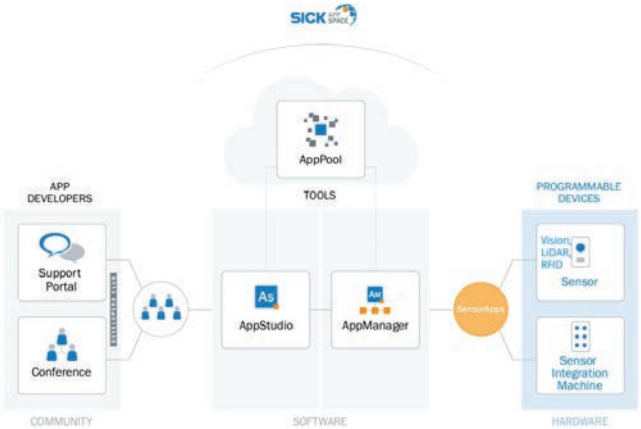
S kamero z visoko frekvenco zajamemo sliko naprave. Na vsaki sliki prepoznavamo značilke, jim časovno sledimo in kot rezultat ustvarimo poenostavljeno časovno vrsto, signal, ki predstavlja dinamiko delovanja stroja (Slika 2). Z metodami globokega učenja na osnovi minimalne količine podatkov ustvarimo sliko pričakovanega, normalnega delovanja stroja. To nam omogoča, da štejemo cikle stroja in prepoznamo anomalije v delovanju. Podatke, ki jih pridobimo so veliko bolj natančni kot podatki, ki jih npr. ponuja krmilnik stroja. Zaradi visoke frekvence vzorčenja lahko prepoznamo manjša odstopanja v delovanju, ki jih človek ne more zaznati. Enak pristop nam omogoča identifikacijo različnih operacij stroja, npr. razlikovanje normalnega obratovanja od cikla za izmet slabega izdelka. Ne glede na veliko količino podatkov, ki jih zajemamo, je količina izhodnih podatkov, ki jih ponuja sistem, minimalna. Sistem sporoča stanje, oziroma spremembe stanja (stroj deluje/ne deluje).



Slika 2: Prepoznavanje značilnih dogodkov med delovanjem stroja

2.2 Ekosistem

Celostna rešitev VIVIAN je sestavljena iz komponent, ki so del ekosistema podjetja SICK (Slika 3).



Slika 3: Ključne komponente ekosistema AppSpace podjetja SICK

Programska rešitev je fleksibilna in modularna. Glede na specifične zahteve lahko uporabimo različno strojno opremo, ki najbolj ustreza primeru uporabe (Slika 4).

Slika 4: Dva primera VIVIAN IoT naprav

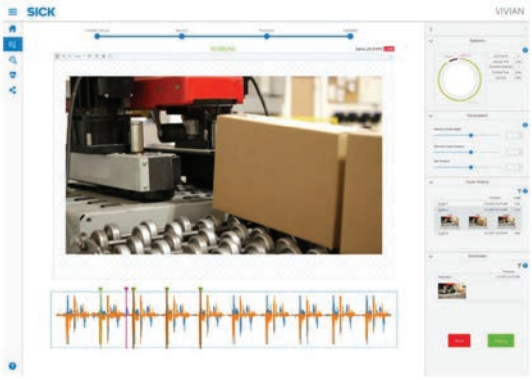
V splošnem je rešitev sestavljena iz dveh delov: IoT naprave, ki deluje na robu (angl.: edge) in na mestu namestitve, na osnovi slikovnih podatkov ustvarja dogodke, ter podpornih programskih storitev, ki podpirajo delovanje sistema. V to kategorijo spadajo tudi servisi za oddaljen nadzor, nadgradnjo in vizualizacijo podatkov.

2.3 Podatki

Ustvarjeni podatki se v omejenem obsegu shranjujejo na napravi, v celoti pa zapisujejo v podatkovno zbirko ekosistema, kjer so na voljo ostalim aplikacijam, ki delujejo nad podatki. Na voljo so spletne aplikacije za vizualizacijo podatkov in obveščanje uporabnikov. Prek različnih vtičnikov in protokolov (mqtt, REST API, OPC UA) se podatki lahko posredujejo drugim zbirkam in napravam v ali izven ekosistema.

2.4 Uporabniška izkušnja

Pri razvoju sistema smo poleg robustnega delovanja v ospredje postavili uporabniško izkušnjo. Identificirali smo potrebne interakcije uporabnika z napravo in jih smiselno uredili v pot, ki jo opravi uporabnik od prvega priklopa do uspešne namestitve naprave. Grafični uporabniški vmesnik spletne aplikacije (Slika 5) omogoča, intuitivno interakcijo in učinkovito upravljanje z napravo. V fazi namestitve uporabnik usmeri kamero, določi področje zanimanja in nastavi optiko. Na grafičnem vmesniku ima na voljo vse podatke za objektivno nastavljanje ključnih parametrov sistema.



Slika 5: VIVIAN, primer grafičnega vmesnika

IoT naprava je majhna, se na preprost način fizično namesti, za delovanje potrebuje le napajanje prek omrežnega kabla. Deluje samostojno in kar je najpomembneje, ne povezuje se z obstoječimi napravami v proizvodnji

3 SKLEP

Številni dejavniki spodbujajo uporabnike, da vlagajo v sisteme s katerimi zvišujejo vidnost in transparentnost svojih procesov. Proizvajalci komponent se odzivajo z nadgradnjo svojih produktov v katere vgrajujejo več senzorike in ponudbo dopolnjujejo s sistemi za zajem podatkov in vizualizacijo. Tak pristop, sam po sebi še ne privede do višje produktivnosti.

Menimo, da lahko uporabnikom najbolj pomagajo sistemi, ki ustvarjajo minimalno število zanj relevantnih podatkov do katerih preprosto dostopa ne glede na ostale okoliščine (digitalna zrelost proizvodnje). Tem smernicam sledimo v podjetju SICK. V prispevku smo na kratko predstavili le eno sposobnost sistema VIVIAN. Ker je rešitev modularna in fleksibilna, lahko isto strojno opremo uporabljamo za različne naloge. S preprosto zamenjavo programskega dela IoT naprave lahko spremljamo delovanje strojev, zaznavamo anomalije, shranjujemo video posnetke, zaznavamo in sledimo objekte, štejemo izdelke, ugotavljamo polnost vsebnikov in podobno.

Delovanje vizualnega kognitivnega asistenta smo preizkusili v pilotnih projektih priznanih globalnih podjetjih. Pomembna zahteva uporabnikov je bila, da na noben način ne posegamo v obstoječe stroje. Pri nekaterih namestitvah smo imeli možnost primerjave naših podatkov s podatki iz krmilnikov stroja (referenčni podatki). Pri tem smo potrdili popolno ujemanje. V vseh primerih nas je prijetno presenetilo dejstvo, da smo s sistemom VIVIAN zaznali podrobnosti v spremembi dinamike delovanja strojev, ki bi (so) kasneje privedle do večjih odstopanj ali celo zaustavitev. To pomeni, da lahko z uporabo sistema VIVIAN pogosto preprečimo neželene dogodke.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR YOUR PRODUCTION PROCESSES

Franz KLAIBER
SOFLEX Fertigungssteuerungs-GmbH

EXTRACT

On the way to digital production and automation of manufacturing processes, software solutions play a significant role. For over 40 years, SOFLEX software products have been leading the way in this field.

In the mid-seventies of the last century, purely mechanically controlled machines were replaced by machines with programmable controls. This made it possible to program a machine that was rigidly geared to the production of specific series part in such a way that a wide variety of parts could be produced on it. From then on, production companies needed programming experts who could create NC programs for such flexible machines.

In the next development step, flexible machines were equipped with automation systems for workpiece provisioning, thus creating the basis for 24/7 operation. The software in the automation control system ensures that the degree of utilization of the machines and productivity reached new dimensions.

The current trend towards the individualization of products as well as shorter product life cycles is responsible for the fact that ever smaller batch sizes down to lot size 1 and with a large variety of parts must be produced economically. This situation is generally encountered in the manufacturing areas of tool and die making.

To cope with this task, intelligent control systems are required that dynamically organize and control the production process. Flexible manufacturing cells and entire production areas are equipped with control systems to manufacture efficiently and minimize the use of resources like tools, fixtures, etc….

In the factories of the future, highly automated production cells will be interlinked by automatic guided vehicles and will increasingly handle production processes autonomously. This calls for control systems that not only take over the control of a single manufacturing cell, but also cover all tasks from planning and organization to the coordination of entire manufacturing areas.

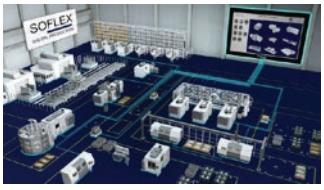


Fig.1: SOFLEX control system software organizes, controls and visualizes an automated production area

Another task of the control system is to link the commercial and technical organizational systems with the production area. For this purpose, it is necessary that an automatic data exchange and information flow is a part of the production control system.

As a basis for a system architecture in manufacturing companies that meets these requirements, the pyramid model can be used, which shows 3 levels of software solutions:

- the level of commercial and technical-organizational systems with the typical representatives ERP, PDM, and CAD/CAM systems,
- the level of production control with control systems and MES installations,
- the level of machine and device controls

The following division of tasks has proven successful:

- In the ERP, PDM or CAD/CAM systems, the specifications for product and production-relevant processes such as technical routings, bills of materials, NC programs and production

parameters, etc... are managed and transferred to the production control level with the production orders. The ERP system is also used for rough planning of monthly and annual capacities, forecasting, and order processing for the materials and resources required for procurement.

- The production control level receives all information for processing production orders from the organizational systems. This includes quantities, priority and delivery date information for production orders as well as information on raw materials and the necessary operating resources such as tools and clamping devices. Starting with detailed planning, whose planning horizon is limited to several days or weeks and which dynamically adapts to the constantly changing framework conditions of the production environment (disruptions in the workflow, changing operating times of the machines, changes in personnel presence, unpredictable maintenance intervals, etc....), the core functions of a control system include the provision of the machining programs (NC programs, measuring programs, parameters, etc...) on the machine controls and the organization of the operating equipment such as tools, measuring equipment and fixtures. Based on this information, the control system controls the production processes and records the machine and operating data.
- The main task of the machine and equipment control level is to handle the basic functions of automated production. Essentially, this includes the execution of provisioning transports as well as the processing of a machining task. Status changes, alarm and error messages that occur during execution are reported directly to the production control level and trigger a status-oriented response there.

Fig.2: Level model for IT architecture in manufacturing companies

SOFLEX Fertigungssteuerungs-GmbH, one of the most important international manufacturers of control systems, has been active worldwide since 1984. The experience goes back to the installation of the first control systems for flexible manufacturing plants in the industrial environment. In the more than 2000 projects realized until today, the following factors have been decisive for success:

- Planning of the plant design from the point of view of workpiece and operating resource logistics to achieve maximum productivity of the processing machines used.
- Detailed process descriptions from the end user's point of view as specifications for the necessary software functions
- Definition of the communication functions and contents between the control system and all coupled systems and controls
- Intuitive operator guidance for easy control of the system functions and transparency of the system statuses

Particular attention must be paid to intuitive user surface, as a key factor in the acceptance of software. It should be an easily understandable and manageable component. Here, the different areas in which the software is used must be taken into account.

In the area of work preparation, a filigree operation via mouse and keyboard has proven itself, while in the area of the workshop and especially on the production lines as well as the machines, a touch-based operation has proven to be target-oriented. The essential functions combined in individual APP's increase the clarity and make the software functions transparent for the operator.

Fig.3: The touch-based workshop operator surface of SOFLEX control systems is the key to high acceptance and successful implementation of digital production.

By using SOFLEX software solutions in automated production lines or in non-automated production areas, the user gains decisive advantages in the international competition for cost-effective and efficient manufacturing.

TEH CUT TOOLSHOP IS BOOSTING THE AUTOMATION

Ivan MARCEKOVIĆ[1], Franz KLAIBER[2]
[1]TEH CUT d.o.o.
[2]SOFLEX GmbH

EXTRACT

The fourth industrial revolution has run and is called Industry 4.0. Things such as the Internet of Things, artificial intelligence, machine learning, and big data are all being used to expand and enhance the manufacturing sector. The gradual CNC machining workshop must be prepared to implement the transition to compete in the current and future markets. In the medium term, we expect to see companies invest in additive manufacturing, digital factory, and digital supply chain solutions. Investment in these technological capabilities will result in increased machine-based manufacturing which will not only increase manufacturing efficiency but also reduce the risk of operational disruptions due to human causes.

1 INTRODUCTION

Tool and die manufacturing is a key and strategic industrial sector as it represents the final stage of developing a new product. It is the phase that combines product development and technological development, determining the manufacturing method and the desired productivity by which the tooling customer achieves their production goals. Over the past decade, the tool and die sector has been under constant pressure to lower the prices of its services due to the increasingly competitive pace set by Asian competitors. Additionally, business conditions, particularly the financial aspects of deal agreements, have become much more stringent, significantly impacting the financial health of individual companies.

Given the uncertainty caused by trade and supply chain disruption we have seen during the pandemic, we expect to see a renewed focus on product sourcing and supply chain efficiency. As the trade war with China continues to play out and companies begin to re-evaluate where they produce and sell their products, supply chains will likely become more localized. This factor inherently will provide increased opportunities for Tooling sector.

2 TEH CUT TOOLSHOP

TEH CUT Toolshop has been operating for 30 years, staying up to date with the latest advancements in technology. Integration of CAD/CAM software, CNC machining, EDM (Electrical Discharge Machining), and other advanced technologies improves efficiency, accuracy, and productivity in our processes. Lately, more focus is addressed to customization and flexibility. Toolmakers that can provide customized solutions tailored to their clients' specific needs gain a competitive edge. Flexibility in adapting to different design requirements, production solutions, and timelines allows company to serve a diverse range of industries and customers.

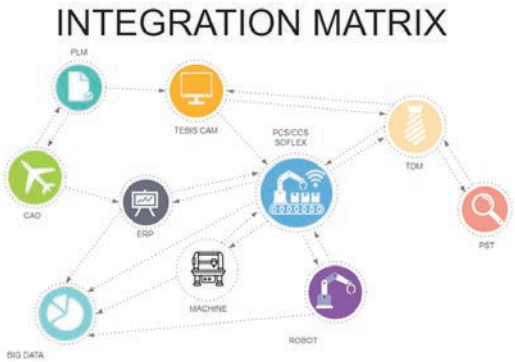
Ivan MARCEKOVIĆ[1], Franz KLAIBER[2]
[1]TEH CUT d.o.o.
[2]SOFLEX GmbH

For the last 30 years THE-CUT Company sees the need for daily progress to remain competitive in a hard market such as Mold and Die . We saw if our machines will work only when an operator is handling it, we can't be competitive and there in no future. Traditional manufacturing techniques and machine tools are not always reliable. Downtime increases costs, including production, labour, and maintenance costs.

The biggest shift in our production was implementation of our first automated cell with 24/7 working regime. After put the automatic machining cell into production, we understood that buying the automated cell is the "easy" part but manufacturing execution 24/7 is the hard part. Using the new technology – cell, opened a need to develop much more efficient planning process, NC programming, cutting tools and tool assembly's data library ,clamping devices, palettization with zero-point system, 3D models, machine information and etc, understanding, what relay means digital transformation.

Taking care of those things separately is complicated and gives limited results, but the trigger is connecting those systems into one functional solution.

TEH CUT know how and innovation have been growing with that cell for the last decade, so Company made the next big step and developed an automated cell with two 5-axis machines and our own-designed manipulator. The manipulator was complete developed and made at TEH-CUT and we chose that the brain of the cell will be a management platform from SOFLEX. In the same time we did also a big step in the digitalization part so we spent a lot of time to connect 11 different softwares as on the diagram.



AS result we have a hybrid cell with which we can produce complex Mold parts from first shot without human intervention during milling process. Of course nothing is perfect, but with each new day we are trying to improve our production and try to be the "best " in our job. How much we trust our system can be seen from the fact that we are in the process of installing 3 new cells and in the process of implementing Soflex system on our independent CNC machines. Management platforms is next level of job organization in individual production systems. Giving a huge challenge to boost productivity and quality of our outputs.

Expertise and Experience, goodwill with excellent future perspective, SOFLEX can support that growth.

3 CONCLUSIONS

Industry 4.0 is the latest wave of changes in manufacturing and commerce as a whole. The integration of new technologies and the embrace of data can create more efficient processes for manufacturers and CNC machining factories. The design and production phase have been successful, know it comes daily challenge, motivation, and development of employees. Investing in the training and skill development of employees ensures a competitive workforce. Providing opportunities for ongoing training on new technologies, machining techniques, and industry trends keeps our key people up to date and adaptable to use and improve those advanced technologies.

PRIMERJALNA ŠTUDIJA UČINKOVITOSTI IN TRAJNOSTI PROIZVODNE LINIJE: ROČNO DELOVNO MESTO V NASPROTJU Z ROBOTSKIM DELOVNIM MESTOM

Robert OJSTERŠEK, Borut BUCHMEISTER, Iztok PALČIČ, Klemen KOVIČ, Aljaž JAVERNIK
Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo

IZVLEČEK

Zagotavljanje trajnostne in učinkovite proizvodnje proizvajalce sili k nenehnemu spreminjanju in prilagajanju. V našem primeru preučujemo proizvodno linijo FESTO CP LAB 400, ki je namenjena izobraževanju kadra na področju avtomatizacije, ki je v današnjem svetu nujna za ohranjanje globalne konkurenčnosti. Proizvodno linijo sestavlja sedem popolnoma avtomatiziranih delovnih postaj in ena ročna montažna postaja. Ročna sestava predstavlja ozko grlo linije, zato je predlagana vpeljava sodelovalnega robota na delovno mesto sestave. V delu je predstavljena primerjalna študija proizvodnih linij (ročna sestava v primerjavi z robotsko sestavo) s poudarkom na ekonomskem in okoljskem vidiku. Vhodni parametri proizvodne linije so bili pridobljeni na podlagi meritev v realnem svetu, medtem, ko je bil čas sestavljanja sodelovalnega robota določen s pomočjo simulacijskega okolja. Rezultati študije so predstavljeni grafično in numerično ter potrjujejo prispevek sodelovalnega robota tako v finančnem kot v okoljskem smislu.

1 UVOD

Za ohranjanje globalne konkurenčnosti podjetja strmijo k zagotavljanju učinkovitih in prilagodljiv sistemov, ki omogočajo zagotavljanje potreb trga [1]. V osnovi je bila linijska proizvodnja namenjena masovni proizvodnji standardiziranih izdelkov, vendar s pojavom novih tehnologij, razvojem avtomatizacije in doprinosu k prilagodljivosti, se je njena uporaba razširila. Ozka grla oz. delovna mesta, ki omejujejo pretok oz. kapacitete sistema predstavljajo največji problem linijske proizvodnje. Hitra in ustrezna identifikacija ozkih grl je nujno potrebna za zagotovitev ustrezne produktivnosti sistema [2]. Inženirji se zato poslužujejo tako analitičnega kot numeričnega pristopa zaznave ozkih grl, vendar je zaradi vse večje kompleksnosti sistemov uporaba simulacijskih orodij nujno potrebna. Simulacijska orodja omogočajo modeliranje in analiziranje obravnavanega sistema [3] ter dandanes z razvojem optimizacijskih metod in računalniške tehnologije predstavljajo pomembno podporno in odločitveno orodje [4]. S pomočjo uporabe simulacij lahko v relativno kratkem času, in brez poseganja v realni sistem, preverimo učinkovitost delovanja sistema, doprinos načrtovanih sprememb in zaznamo oz. analiziramo morebitna problematična področja [5][6]. Izziv trenutne globalizacije predstavlja hkratno zadoščanje potreb trga in zagotavljanja trajnostnih aspektov. Raziskave navajajo različne koncepte, metode in orodja, ki pripomorejo k celostni obravnavi trajnostne proizvodnje [7]. V zadnjem obdobju je potreba po bolj prilagodljivih in učinkovitih proizvodnih sistemih doprinesla k vse večjem zanimanju in uporabi sodelovalnih robotov v proizvodnih sistemih. Sodelovalni roboti omogočajo sodelovanje z človekom znotraj enakega prostora, ob enakem času, brez vmesnih varnostnih pregrad, še vedno pa ohranjajo prednosti robotov kot so: hitrost, ponovljivost in natančnost [8]. Raziskovalci navajajo različne doprinose vpeljave sodelovalnega robota v proizvodni sistem in poudarjajo pomembnost ustrezne nastavitve parametrov [9]. Ustrezna vpeljava in nastavitev parametrov sodelovalnega robota pripomore pri odpravi ozkih grl, učinkovitejšemu delovanju sistema [10][11].

V obravnavanem delu želimo podrobneje raziskati vpliv sodelovalnega robota na učinkovitost in trajnost proizvodne linije FESTO CP LAB 400. S pomočjo simulacijskega modeliranja je bila izvedena primerjalna študija proizvodnih linij: linije z delovnim mestom ročne

sestave in linije z delovnim mestom robotske sestave. Rezultati študije obsegajo ekonomski in okoljski vidik trajnostne proizvodnje.

2 OPIS PROBLEMA

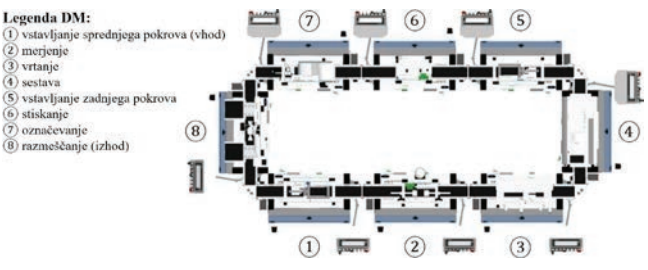
Zagotovitev učinkovitega delovanja in trajnosti sta ena izmed pomembnejših vidikov današnjega sveta. Podjetja s konstantnimi izboljšavami stremijo k izpopolniti sistemov in zagotavljanju omenjenih vidikov, ki se posledično odražajo v dobičku.

V delu obravnavamo proizvodno linijo FESTO CP LAB 400, ki je namenjena izobraževanju kadra na področju avtomatizacije. Linija je skoraj v celoti popolnoma avtomatizirana, a kljub vsej avtomatizaciji vsebuje ročno delovno mesto sestave, ki predstavlja ozko grlo sistema. Predlagan korak optimizacije je vpeljava sodelovalnega robota na delovno mesto ročne sestave.

Rezultat dela predstavlja primerjalna študija proizvodnih linij z delovnih mestom ročne sestave in delovnim mestom robotske sestave, s poudarkom na učinkovitosti delovanja in zagotavljanju trajnostne proizvodnje.

2.1 Opis proizvodnega sistema

Sistem predstavlja proizvodnja linija FESTO CP LAB 400. Linija obsega osem delovnih mest (Slika 1), od tega sedem (①, ②, ③, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧) popolnoma avtomatiziranih in eno (④) ročno delovno mesto. Delovni proces vsebuje operacije kot so: vstavljanje sprednjega pokrova, merjenje višine pokrova, vrtanje lukenj, sestave (vstavljanje vezja in dveh varovalk), vstavljanje zadnjega pokrova, stisk pokrovov, lepljenje etikete in razmestitev končanih produktov.



Slika 1: postavitev FESTO CP LAB 400

Končen izdelek predstavlja "telefon", ki je sestavljen iz sprednjega pokrova, vezja, dveh varovalk, zadnjega pokrova in etikete (Slika 2).

Slika 2: Nabor komponent za končen izdelek

3 SIMULACIJSKI MODEL

Raziskovalno delo obsega primerjalno študijo proizvodnih linij. Za izgradnjo in preučitev obeh scenarijev je bilo uporabljeno simulacijsko okolje SIMIO. V prvi študiji obravnavamo obstoječo linijo z ročnim delovnim mestom sestave, v drugi študiji pa novo nastalo linijo s predlaganim sodelovalnim robotom na delovnem mestu sestave. Za izvedbo študij so bili uporabljeni realni časi operacij, čas sestave delavca je bil določen na podlagi preizkusov, čas sestave robota pa je bil določen s pomočjo simulacijskih okolij. Prisotnost človeka v proizvodni liniji vodi do variabilnosti časa sestave, zato smo glede na pridobljene meritve časa sestave predlagali čas sestave z upoštevajočo naključno trikotno porazdelitvijo.

Simulacijska scenarija vsebujeta naslednje predpostavke:

- Simulacijski čas 1350 oz. 1440 min.
- Komponente so vedno na voljo.
- Odprema v serijah 500 kosov.
- Velikost zalogovnikov ni omejena.
- Čas transporta med delovnimi mesti je 9 s.
- Simulacijski rezultati so povprečje desetih ponovitev simulacijskega modela.
- Cena električne energije 0,2 €/kWh.

Zaradi predpostavljene oblike dela so v nadaljevanju uporabljene naslednje spremenljivke oz. oznake:

- t_p – procesni čas [s]
- t_{Kr} – razpoložljiv čas kapacitete [s]
- S_{dela} – stroški obratovanja [€]
- $S_{čak.}$ – stroški čakanja [€]
- E – poraba energije [W]
- $S_{ser.}$ – stroški serije [€]
- η – zasedenost [%]
- DM – delovno mesto

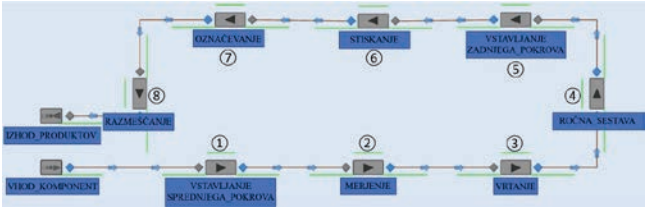
Za izvedbo simulacijskih študij je bilo potrebno delovna mesta stroškovno opredeliti. Tabela 1 predstavlja stroškovno analizo delovnih mest ročne sestave (ROČ_DM) in robotske sestave (ROB_DM). Ostala delovna mesta so med izvedbo simulacijskih študij ostala nespremenjena zato niso podrobneje predstavljena.

Tabela 1: Stroškovna kalkulacija DM [12]

Stroškovna kalkulacija	ROČ_DM	ROB_DM
Nabavna vrednost stroja [€]	31250	61250
Priključna moč stroja [W]	97	143
Površina DM [m^2]	1,72	1,07
Amortizacijska doba [leto]	5	5
Koristna kap. stroja [h/leto]	5049	5814
Odpis [€]	1,24	2,11
Obresti [€]	0,031	0,053
Stroški vzdrževanja [€]	0,062	0,105
Stroški najemnine [€]	0,041	0,022
Stroški energije [€/h]	0,019	0,029
Stroški na stroju [€/h]	1,24	2,32
Stroški DM [€/h]	16,24	2,319
Stroški DM na serijo [€/ser.]	63,15	3,93

3.1 Simulacijski model proizvodnega sistema

Slika 3 prikazuje simulacijski model (ROČ_S) linije FESTO CP LAB 400 z delovnim mestom ročne sestave ④. V simulacijski študiji so bili uporabljeni podatki Tabele 2 in navedene predpostavke. Pri popolnoma avtomatiziranih delovnih mestih je bil upoštevan koeficient izkoriščenosti 95 % medtem ko pri ročnem delovnem mestu 88 % zaradi prisotnosti človeka.



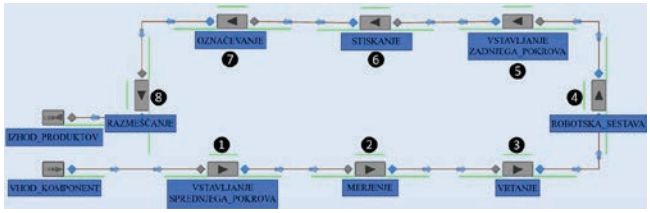
Slika 3: ROČ_S – simulacijski model proizvodnje linije z ročnim delovnim mestom sestave

Procesni časi v Tabeli 2 so pridobljeni na podlagi realnih meritev. Čas sestave delavca je povprečje večih meritev v realnem okolju. Za pridobitev kakovostnih rezultatov simulacijskega modela je pri času sestave delavca upoštevana trikotna naključna porazdelitev. Ostali podatki v Tabeli 2 so rezultati podanih karakteristik s strani proizvajalca linije in predpostavljenih predpostavk za namen raziskave.

Tabela 2: Parametri delovnih mest ROČ_S

DM	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
t_p	1	3	4	T(25/28/31)	1	10	6	6
S_{dela}	1,27	1,27	1,27	16,24	1,27	1,27	1,27	127
$S_{čak}$	0,42	0,42	0,42	5,41	0,42	0,42	0,42	0,42
E	97	97	97	97	97	97	97	97

Delovno mesto ročne sestave ④ predstavlja ozko grlo linije, kar je tudi numerično potrjeno v Poglavju 4. Kot optimizacijski korak je bila predlagana vpeljava sodelovalnega robota na delovno mesto sestave. Slika 4 prikazuje nov simulacijski model (ROB_S) linije z vpeljanim sodelovalnim robotom na delovnem mestu sestave ❹. V simulacijskem modelu so bili uporabljeni podatki iz Tabele 3 in enake predpostavke kot v prejšnjem scenariju. Z vpeljanim sodelovalnim robotom smo proizvodnjo linijo popolnoma avtomatizirali zato je pri vseh delovnih mestih bil upoštevan koeficient izkoriščenosti 95 % in koristno število osmih ur na izmeno.



Slika 4: ROB_S – simulacijski model proizvodnje linije z robotskim delovnim mestom sestave

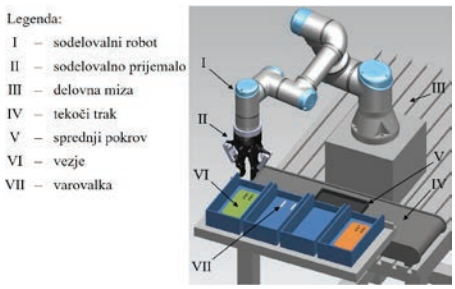
Tabela 3: Parametri delovnih mest ROB_S

DM	❶	❷	❸	❹	❺	❻	❼	❽
t_p	1	3	4	12.2	1	10	6	6
S_{dela}	1.19	1.19	1.19	2.32	1.19	1.19	1.19	1.19
$S_{čak}$	0.40	0.40	0.40	0.77	0.40	0.40	0.40	0.40
E	97	97	97	143	97	97	97	97

Razen procesnega časa delovnega mesta robotske sestave ❹ se ostali časi niso spremenili. Kljub vpeljanemu sodelovalnemu robotu delovno mesto sestave še vedno predstavlja takt linije.

3.2 Simulacijski model delovnega mesta robotske sestave

Za simuliranje modela (ROB_S) je bilo potrebno določiti oz. pridobiti čas sestave sodelovalnega robota. Čas sestave smo dobili z izgradnjo in simulacijo operacije delovnega mesta robotske sestave znotraj simulacijskega okolja Siemens Tecnomatix Process Simulate.



Slika 5: Simulacijski model delovnega mesta robotskega sestave

Simulacijski model je vseboval sodelovalnega robota UR3e, sodelovalno prijemalo Robotiq 2F-85, delovno mizo, tekoči trak in potrebne komponente za sestavo končnega produkta (sprednji pokrov, vezje, varovalki) na Sliki 5.

Sekvenca operacije sestave s pomočjo sodelovalnega robota je bila enaka sekvenci operacije ročne sestave. Sodelovalni robot (I) v začetni fazi čaka na signal, prihod sprednjega pokrova (V) na lokacijo sestave. Prihod sprednjega pokrova (V) na pred določeno pozicijo sproži signal, ki omogoči začetek sestave. Sodelovalni robot (I) najprej vstavi vezje (VI) v sprednji pokrov (V) nato pa še dve varovalki (VII) na vezje (VI). Po končani sestavi sodelovalni robot sproži nadaljevanje postopka.

V simulaciji sta bila uporabljena hitrost in pospešek sodelovalnega robota iz Tabele 4, v višini tretjine maksimalno priporočene vrednosti s strani proizvajalca sodelovalnega robota. V kolikor študija ne bi bila zgolj informativne narave in namen linije izobraževanje kadra na področju avtomatizacije, bi bila obravnava višjih vrednosti potrebna.

Tabela 4: Hitrost in pospešek sod. robota UR3e

	Gib_L	Gib_J
Hitrost	333 mm/s	120 °/s
Pospešek	833 mm/s^2	267 °/s^2

4 REZULTATI

Rezultati so predstavljeni numerično in grafično. Najprej so predstavljeni rezultati posameznega scenarija, linije z ročnim delovnim mestom sestave (ROČ_S) in linije z delovnim mestom robotske sestave (ROB_S), nato pa je izvedena primerjalna študija rezultatov, s stališča ekonomskega in okoljskega vidika.

4.1 Proizvodna linija z DM ročne sestave

V Tabeli 5 so predstavljeni rezultati simulacij proizvodne linije ROČ_S. Delovna mesta (①, ②, ③, ④) so popolnoma izkoriščena, kar je posledica konstantne razpoložljivost vhodnih komponent. Delovno mesto ④ predstavlja ozko grlo linije, kar je vidno iz rezultatov, saj izkoriščenost linije iz delovnega mesta ④ na delovno mesto ⑤ pade iz 100 % na 3,57 %, kar predstavlja zgolj 0,8 ure koristne razpoložljivosti delovnega mesta ⑤ od možnih 22,5 ur. Izkoriščenost nadaljnjih delovnih mest je relativno nizka, kar je posledica ozkega grla in majhne nadaljnje količine komponent.

Tabela 5: Rezultati simulacije ROČ_S

DM	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
η	100	100	100	100	3,57	35,70	21,42	21,41
K_r	22,50	22,50	22,49	22,49	0,80	8,03	4,82	4,82
S_{dela}	28,60	28,60	28,60	365,25	1,02	10,21	6,12	6,12
$S_{čak.}$	0	0	0	0	9,20	6,13	7,50	7,50
$S_{ser.}$	0,2	0,5	0,5	65	0,2	2	1	1
E	2183	2182	2182	2182	779	1247	1039	1038

Rezultati simulacije na podlagi 10 ponovitev predvidijo, da linija v enem delovnem dnem s koristnim številom 22,5 ur proizvede 2890 končanih izdelkov in zato porabi 12830,9 W električne energije. Stroški serije 500 končanih izdelkov znašajo 71,4 € in porabimo 2220 W električne energije.

4.2 Proizvodna linija z DM robotske sestave

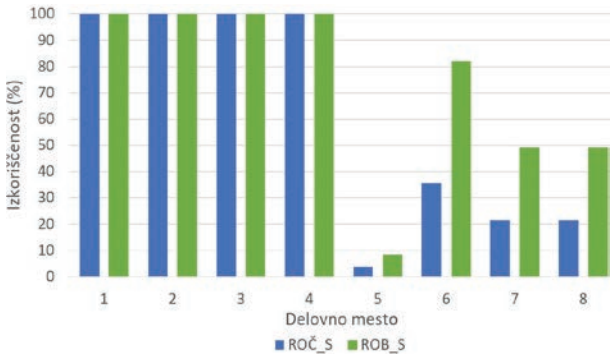
Vpeljava sodelovalnega robota je doprinesla k popolni avtomatizaciji linije, s tem je koristno število ur v enem delovnem dnem naraslo na 24 ur. Izkoriščenost delovnih mest (❶, ❷, ❸, ❹) glede na prejšnji scenarij ostaja nespremenjena, medtem ko je izkoriščenost ostalih delovnih mest narasla. Kljub vpeljavi sodelovalnega robota delovno mesto sestave ❹ še vedno ostaja ozko grlo linije, kar je razvidno iz padca izkoriščenosti med delovnima mestoma ❹ in ❺. V Tabeli 6 vidimo, da se je izkoriščenost delovnega mesta ❺ v nasprotju z delovnim mestom ⑤ dvignila iz 3,57 % na 8,19 %, kar pomeni 7074 končanih izdelkov. Poraba električne energije linije (ROB_S) v enem delovnem dnem znaša 16467,1 W, kar predstavlja višjo porabo kot v prejšnjem scenariju (ROČ_S). Višja poraba električne energije je posledica vpeljave sodelovalnega robota. Stroški serije 500 končanih izdelkov znašajo 9,05 € in porabimo 1164 W električne energije.

Tabela 6: Rezultati simulacije ROB_S

DM	❶	❷	❸	❹	❺	❻	❼	❽
η	100	100	100	100	8,19	81,91	49,13	49,13
K_r	24	24	24	24	1,97	19,66	11,79	11,79
S_{dela}	28,45	28,45	28,45	55,71	2,33	23,29	13,97	13,97
$S_{čak.}$	0	0	0	0	8,70	1,72	4,82	4,82
$S_{ser.}$	0,15	0,5	0,5	4	0,15	1,5	1	1
E	2328	2328	2355	3431	902	2047	1538	1538

4.3 Primerjava rezultatov scenarijev

Na grafu Slike 6 je prikazana izkoriščenost delovnih mest linije ROČ_S in ROB_S. Z vpeljavo sodelovalnega robota smo povprečno izkoriščenost linije dvignili za 13,3 % v primerjavi z linijo z delovnim mestom ročne sestave. Kljub vpeljavi sodelovalnega robota, so kapacitete delovnega mesta sestave še vedno premajhne glede na procesne čase predhodnih operacij, zato delovno mesto sestave še vedno predstavlja ozko grlo linije. Razvidno je (Slika 6), da se z krajšanjem procesnega časa robotske sestave izkoriščenost delovnega mesta ❻ hitro dviguje, kar bi predstavljalo novo ozko grlo po nadaljnji optimizaciji delovnega mesta sestave ❺ in zagotovitvi časa sestave nižjega od 10 sekund.

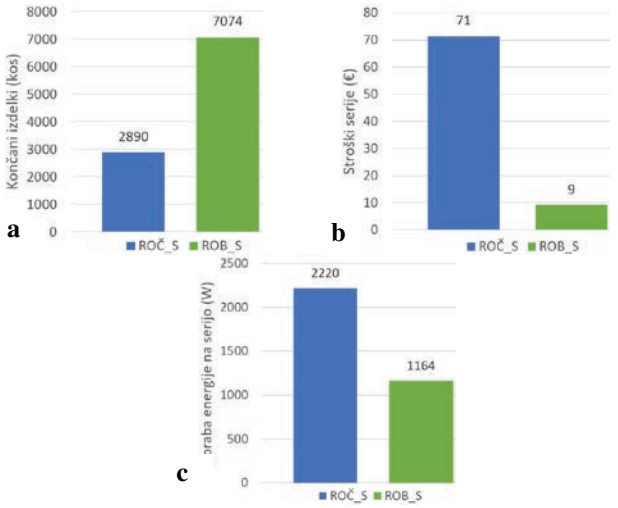


Slika 6: Izkoriščenost delovnih mest ROČ_S v nasprotju z ROB_S

Vpeljava sodelovalnega robota je omogočila 7074 končanih izdelkov v enem delovnem dnem, kar pomeni 144,8 % več izdelkov kot jih je bila sposobna proizvesti linija ROČ_S (Slika 7a).

Zanimiva je primerjava stroškov na serijo, ki jo prikazuje Slika 7b. Stroški serije so se z vpeljavo sodelovalnega robota zmanjšali za kar 87,32 %. Glede na visoke investicijske stroške vpeljave sodelovalnega robota si je pred samo izvedbo simulacij težko predstavljati takšen doprinos sodelovalnega robota. Poraba električne energije na serijo (Slika 7c), vpliva tako na finančen kot okoljski vidik zato predstavlja pomemben podatek v sodobnem svetu. Poraba električne energije DM robotske sestave je v delovnem dnem znašala 3431,1 W oz. poraba linije ROB_S 16467,1 W. Poraba električne energije delovnega mesta ročne sestave pa je dnevno znašala zgolj 2181,9 W oz. poraba linije ROČ_S 12830,9. Kljub nižji dnevni električni porabi linije ROČ_S je za pravilno oceno potrebno upoštevati še število koristnih ur in število končanih izdelkov.

Na podlagi izračunov smo ugotovili, da je poraba električne energije na serijo, linije ROB_S z vpeljanim sodelovalnim robotom, kar 47,57 % nižja kot pa poraba električne energije linije ROČ_S z delovnim mestom ročne sestave.



Slika 7: Število končanih izdelkov (a), stroški serije (b) in poraba energije na serijo (c) ROČ_S v nasprotju z ROB_S

5 ZAKLJUČEK

V raziskovalnem delu s pomočjo metod simulacijskega modeliranja preučimo proizvodnjo linijo FESTO CP LAB 400, ki je v osnovi namenjena izobraževanju kadra na področju avtomatizacije in prikaza vrednot Industrije 4.0. V obravnavanem delu se osredotočimo na ekonomski in okoljski vidik trajnostne proizvodnje. Predstavljena linija zelo dobro prikaže sodobne avtomatizacijske pristope saj vsebuje kar sedem popolnoma avtomatiziranih delovnih mest in zgolj eno ročno delovno mesto sestave.

Študija obstoječe linije je prikazala, da delovno mesto ročne sestave predstavlja ozko grlo linije, kar je povsem pričakovano saj zmogljivosti človeka niso primerljive z zmogljivostmi naprav. Kot izboljšava je bila predlagana vpeljava sodelovalnega robota na delovno mesto ročne sestave.

Rezultati primerjalne študije so prikazali, da vpeljava sodelovalnega robota pozitivno pripomore k zagotavljanju trajnostno naravnane proizvodnje. S pomočjo sodelovalnega robota smo v povprečju povišali izkoriščenost linije za 13,3 %, povečali produktivnost linije za 144,8 %, znižali stroške delovanja in stroške serije ter zmanjšali negativni vpliv na okolje v obliki porabe električne energije za kar 47,57 %.

Kljub temu, da je raziskovalna študija bila zgolj informativne narave, s predpostavkami, ki si jih realni proizvodni sistemi ne morejo privoščiti, lahko trdimo, da ustrezna implementacija sodelovalnega robota in ustrezno nastavljeni parametri pozitivno vplivajo na učinkovitost in trajnost proizvodnje linije FESTO CP LAB 400 oz. proizvodnih sistemov.

Viri:

[1] Jin, W., He, Z., Wu, Q.: Robust optimization of resource-constrained assembly line balancing problems with uncertain operation times, Engineering Computations 39(2022)3, str. 813–836.
[2] Li, L., Chang, Q., Ni, J.: Data driven bottleneck detection of manufacturing systems 47(2009)18, str. 5019–5036.
[3] Andrado'ttir, E. S., Heajy, K. J., Withers, D. H., Nelson B. L., Proceedings of the 997 Winter Simulation Conference.
[4] Tekin, E., Sabuncuoglu, I.: Simulation optimization: A comprehensive review on theory and applications, IIE Transactions 36(2010)11, str. 1067–1081.
[5] Grznar, P., Gregor, M., Gola, A., Nielsen, I., Mozol, S., Seliga, V.: Quick workplace analysis using simulation, International Journal of Simulation Modelling 21(2022)3, str. 465–476.
[6] Stevanov, B., Sremcev, N., Lazarevic, M., Anderla, A., Sladojevic, S., Vidicki, P.: Optimization of the subassembly production process using simulation, International Journal of Simulation Modelling 21(2022)4, str. 663–674.
[7] Haapala, K. R.: A review of engineering research in sustainable manufacturing, ASME 2011, str. 599–619.
[8] Bisen, A. S., Payal, H.: Collaborative robots for industrial tasks: A review, Mater Today Proc (2021).
[9] Ojstersek, R., Buchmeister, B., Javernik, A.: The Importance of Cobot Speed and Acceleration on the Manufacturing System Efficiency, Procedia Comput Sci 217(2023), str. 147–154.
[10] Ojstersek, R., Javernik, A., Buchmeister, B.: The impact of the collaborative workplace on the production system capacity: Simulation modelling vs. real-world application approach, Advances in Production Engineering And Management 16(2021)4, str. 431–442.
[11] Ojstersek, R., Javernik, A., Buchmeister, B.: Importance of Sustainable Collaborative Workplaces – Simulation Modelling Approach, International Journal of Simulation Modelling 21(2022)4, str. 627–638.
[12] Warnecke, H.-J., Bullinger, H.-J., Hickert, R., Voegele, A.: Cost Accounting for Engineers, Carl Hansen Verlag (1990).

RABA DIGITALNIH IN NAPREDNIH PROIZVODNIH TEHNOLOGIJ V SLOVENSKIH PROIZVODNIH PODJETJIH

Iztok PALČIČ, Borut BUCHMEISTER, Robert OJSTERŠEK, Aljaž JAVERNIK, Klemen KOVIČ
Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo

IZVLEČEK

Prispevek prikazuje rezultate največje slovenske in evropske ankete o proizvodni dejavnosti, ki smo jo izvedli v letu 2022. To je že sedma iteracije raziskave, saj jo redno izvajamo od leta 2003/04 dalje vsaka tri leta, pri čemer je tokrat bil štiriletni interval zaradi Covid-19 pandemije. Gre za slovenski del največje evropske raziskave o proizvodni dejavnosti »European Manufacturing Survey – EMS«, ki poteka v sodelovanju skoraj 20 evropskih držav. Rezultati temeljijo na vzorcu 141 slovenskih proizvodnih podjetij. V prispevku analiziramo stanje na področju proizvodne dejavnosti v Sloveniji v smislu uporabe naprednih proizvodnih tehnologij in digitalnih tehnologij v slovenskih proizvodnih podjetjih v luči industrije 4.0. Glavni cilj prispevka je ugotoviti, kako se uporabljajo določene tehnologije, kot so tehnologije digitalne tovarne, vključujoč umetno inteligenco, tehnologije 3D-izdelave in uporaba določenih vrst robotov. Predstavljamo možen indeks pripravljenosti na Industrijo 4.0 in ocenjujemo pripravljenost slovenskih proizvodnih podjetij na Industrijo 4.0. Rezultati so predstavljeni z uporabo opisne statistike. Rezultati kažejo, da je uporaba posameznih tehnologij v slovenskih proizvodnih podjetjih precej raznolika in da je več tehnologij očitno doseglo svoj vrh.

1 UVOD

Industrijo 4.0 lahko na kratko opredelimo kot digitalizacijo proizvodnje in storitev. Splošno razumevanje koncepta industrije 4.0 vključuje popolnoma avtomatizirane fizične sisteme, vendar je treba upoštevati tudi avtomatizirane in inteligentne sisteme odločanja, ne le avtomatizirane fizične sisteme [1]. Za industrijo 4.0 so značilni izpopolnjeni procesi avtomatizacije in digitalizacije ter uporaba elektronike in informacijskih tehnologij v proizvodnji in storitvah [2]. Digitalizacija se nanaša na različne socio-tehnične pojave in procese sprejemanja in uporabe (digitalnih) tehnologij v širših individualnih, organizacijskih in družbenih kontekstih [3]. Sprejemanje digitalnih tehnologij (DT) vpliva na skoraj vsa področja sodobnih podjetij, vključno s proizvodnimi/izdelovalnimi procesi [4]. Da bi ugotovili razširjenost različnih DT, smo analizirali izbrane tehnologije s področja "digitalne tovarne". V naši raziskavi tako predstavljamo uporabo enajstih izbranih DT (vključujoč umetno inteligenco), značilnih za obdobje industrije 4.0, v slovenski predelovalni industriji. Zraven tega predstavljajmo tudi druge napredne tehnologije, značilne za Industrijo 4.0, kot so industrijski roboti in dodajalne tehnologije. Poleg analize razširjenosti teh tehnologij je v tem članku predstavljen tudi indeks pripravljenosti na industrijo 4.0 in ocenjena pripravljenost slovenskih proizvodnih podjetij na industrijo 4.0.

Ta članek je organiziran na naslednji način: najprej predstavljamo značilnosti evropske raziskave o proizvodnji (European Manufacturing Survey - EMS). V tretjem poglavju predstavljamo razširjenost digitalnih in naprednih proizvodnih tehnologij. Četrto poglavje predstavi indeks pripravljenosti industrije 4.0, ki smo ga uporabili v naši raziskavi, in rezultate, pridobljene z uporabo omenjenega indeksa. O umetni inteligenci govorimo posebej v poglavju 5. Prispevek sklenemo z nekaj ugotovitvami in smernicami za naprej.

2 RAZISKAVA O PROIZVODNI DEJAVNOSTI

Rezultate naše raziskave smo pridobili s pomočjo ankete o proizvodni dejavnosti. Originalni naziv ankete je European Manufacturing Survey (EMS) in je največja

evropska raziskava proizvodne dejavnosti. Koordinator celotnega projekta je sloviti Fraunhoferjev inštitut iz Nemčije. Poglavitni cilj EMS projekta je pridobiti informacije o rabi proizvodnih tehnologij in informacijsko-komunikacijskih tehnologij (IKT) oz. digitalnih tehnologij, organizacijskih konceptih v proizvodnji in implementaciji najboljših poslovnih praks. V anketi sprašujemo podjetja o proizvodnih strategijah, o storitvah, ki jih nudijo podjetja zraven izdelkov, selitvi in vračanju proizvodnje, poslovnih modelih, sodelovanju z drugimi organizacijami, dobaviteljskih verigah, digitalnih elementih v izdelkih, inovativnosti pri razvoju izdelkov ter njihovem vplivu na okolje in vidikih krožnega gospodarstva. Dodatno poizvedujemo o značilnostih podjetij, izdelkov in proizvodnje, konkurenčnih kriterijih, kvalifikacijah, usposobljenosti in izobrazbi zaposlenih itd. Zbiramo tudi podatke o produktivnosti, fleksibilnosti, kakovosti, donosih ipd. Med vprašanja smo uvrstili nekaj takih, ki odgovarjajo na posledice Covid-19 situacije in vojne v Ukrajini. Na anketo odgovarjajo proizvajalci strojev in opreme, proizvajalci končnih izdelkov iz kovinsko-predelovalne industrije, proizvajalci plastičnih in gumenih izdelkov in podjetja, ki sodijo v elektro industrijo. Obsežni vprašalnik na osmih straneh pošiljamo v proizvodna podjetja, ki imajo vsaj 20 zaposlenih, v raziskavo smo vključili proizvodna podjetja iz NACE skupine C.

Anketno raziskavo izvajamo od leta 2004 naprej vsaka tri leta. Naša raziskava temelji na najnovejših podatkih iz slovenskega vzorca iz leta 2022/23. V zadnji iteraciji je na anketo odgovorilo rekordnih 146 podjetij, kar je predstavljalo več kot 15 % stopnjo odziva. Proizvodna podjetja v naši raziskavi sodijo v sledeče NACE C skupine:

- 13: Proizvodnja tekstilij;
- 14: Proizvodnja oblačil;
- 15: Proizvodnja usnja, usnjenih in sorodnih izdelkov;
- 22: Proizvodnja izdelkov iz gume in plastičnih mas;
- 23: Proizvodnja nekovinskih mineralnih izdelkov;
- 24: Proizvodnja kovin;
- 25: Proizvodnja kovinskih izdelkov, razen strojev in naprav;
- 26: Proizvodnja računalnikov, elektronskih in optičnih izdelkov;
- 27: Proizvodnja električnih naprav;
- 28: Proizvodnja drugih strojev in naprav;
- 29: Proizvodnja motornih vozil, prikolic in polprikolic;
- 30: Proizvodnja drugih vozil in plovil;
- 32: Druge raznovrstne predelovalne dejavnosti.

Za potrebe tokratne raziskave smo izločili odgovore podjetij s področja tekstila in obutve in tako ostane v bazi 140 odgovorov iz pretežno kovinsko-predelovalne industrije, elektro industrije ter industrije umetnih mas. V našem vzorcu je največ podjetij iz NACE skupin 22, 25, in 28, pri čemer je bilo približno 32% podjetij iz NACE 25, okoli 18% iz NACE 28 ter okoli 16% iz skupine NACE 22. Če pogledamo podjetja po velikosti, je bilo 31% malih, 49% srednje velikih in 20% velikih podjetij (kriterij je število zaposlenih).

Rezultate raziskave posredujemo v posameznih državah lokalnim in nacionalnim vladnim institucijam ter jih predstavljamo na najrazličnejših dogodkih, konferencah, srečanjih ter v obliki strokovnih prispevkov.

3. RAZŠIRJENOST NAPREDNIH PROIZVODNIH TEHNOLOGIJ

V zadnjo raziskavo smo vključili 21 tehnologij, ki smo jih razdelili v šest skupin:

1. Vodenje proizvodnje (7 digitalnih tehnologij);
2. Roboti in avtomatizacija (4 tehnologije);
3. Dodajalne tehnologije (2 tehnologiji);
4. Simulacije in analiza podatkov (3 tehnologije);
5. Učinkovitost izrabe energije in virov (3 tehnologije);
6. Tehnologije za ravnanje z odpadki (2 tehnologiji).

V tem prispevku analiziramo tehnologije iz prvih 4 skupin. V zadnjo izvedbo raziskave smo ob raziskavi stanja »ustaljenih« tehnologij dodali še nekaj novih, kot so mobilni industrijski roboti (vključujoč AGV), kolaborativni roboti, programska oprema za simulacije procesov (oblikovanje t.i. digitalnih dvojčkov) in programska oprema za zahtevne računske operacije, simulacije in analizo podatkov z

uporabo super-računalnikov (HPC, edge computing).

Tehnologije smo analizirali z več vidikov:
- pogostost rabe,
- leto prve uvedbe tehnologije (v povprečju za vsa podjetja s to tehnologijo),
- nadgradnja tehnologije v zadnjih treh letih,
- planirana raba tehnologije v prihodnjih treh letih,
- stopnja rabe tehnologije.

Najprej smo s frekvenčno analizo preverili pogostost rabe izbranih tehnologij v slovenskih proizvodnih podjetjih (Tabela 1). Proizvodna podjetja smo povprašali, koliko jih načrtuje uvedbo določenih tehnologij v obdobju do leta 2025. Stolpec »Planirana raba« tako prikazuje delež podjetij, ki določene tehnologije še nima, ampak jo želi uvesti v omenjenem obdobju. Stolpec »Nadgradnja« je vezan na delež tistih podjetij, ki določeno tehnologijo že imajo, in so jo v obdobju po letu 2019 nadgradili. Stopnjo rabe tehnologije smo ugotavljali glede na izkoriščanje potenciala, ki ga nudi tehnologija, z ocenami: nizka (1), srednja (2) ali visoka (3), pri čemer seveda ne gre prezreti možnosti subjektivne ocene podjetij/respondentov. Vrednost v stolpcu »Stopnja rabe« je povprečna vrednost pridobljenih odgovorov.

Tabela 1: Značilnosti rabe naprednih proizvodnih tehnologij v slovenskih proizvodnih podjetjih

Tehnologija	Pogostost rabe	Planirana raba	Nadgrad-nja	Stopnja rabe
Mobilne/brezžične naprave za upravljanje	47,5%	41,9%	56,7%	2,05
Digitalne rešitve za delo v proizvodnih obratih	64,5%	36,0%	59,3%	2,33
ERP sistemi	63,8%	31,4%	55,6%	2,51
Avtomatizirani sistemi za notranjo logistiko	27,7%	30,4%	46,2%	2,17
Digitalna izmenjava podatkov z dobavitelji in kupci	44,0%	16,5%	45,2%	2,32
PLM in/ali PDM	17,7%	19,8%	52,0%	2,30
Proizvodni kontrolni sistemi v realnem času	33,3%	33,0%	66,0%	2,49
Industrijski roboti za proizvodne procese	52,5%	19,4%	52,7%	2,42
Industrijski roboti za montažne procese	38,3%	24,1%	51,9%	2,38
Mobilni industrijski roboti	5,7%	19,5%	37,5%	2,43
Kolaborativni roboti	9,9%	19,7%	35,7%	1,75
Dodajalne tehnologije za izdelavo prototipov	39,0%	12,8%	45,5%	2,13
Dodajalne tehnologije za izdelavo proizvodov	23,4%	8,3%	36,4%	2,10
Programska oprema za simulacijo izdelkov	44,0%	12,7%	54,8%	2,31
Programska oprema za simulacije procesov	14,9%	16,7%	57,1%	2,22
Programska oprema za zahtevne računske operacije	8,5%	8,5%	50,0%	1,80

Tabela 1 prikazuje, da so digitalne rešitve za zagotavljanje načrtov, terminskih planov ali navodil za delo neposredno v proizvodnih obratih in programska oprema za planiranje in terminiranje proizvodnje (npr. sistemi ERP ali APS) najpogosteje uporabljene tehnologije, ki se vpeljane v približno dveh tretjinah slovenskih proizvodnih podjetij. Mobilne/brezžične naprave za programiranje in krmiljenje proizvodne opreme oz. proizvodnih obratov ter digitalna izmenjava podatkov o izdelkih/procesih z dobavitelji/kupci (elektronska izmenjava podatkov – EDI) iz skupine "Vodenje proizvodnje" so prav tako implementirane že v skoraj 50 % slovenskih proizvodnih podjetij. S področja digitalnih tehnologij lahko opazimo tudi pogosto uporabo programske opreme za simulacije izdelkov, medtem ko je programska oprema za simulacijo proizvodnih procesov (npr. digitalni dvojčki) še vedno redko implementirana.

Poleg industrijskih robotov za proizvodnjo in montažo smo vključili prvič še mobilne industrijske robote in kolaborativne robote/kobote. Prvi dve vrsti robotov sta že dolgo del proizvodnih podjetij, medtem ko drugi dve vrsti robotov pridobivata na pomenu. Ko smo skupaj pregledali uporabo industrijskih robotov za proizvodne in montažne procese, smo ugotovili, da je vsaj ena vrsta robotov prisotna v 64 % podjetij, s čimer so industrijski roboti poleg ERP in digitalnih rešitev

v proizvodnih obratih najbolj razširjena tehnologija z našega seznama.

Dodajalne tehnologije so del naših raziskav že več krogov. Opazujemo dve vrsti teh tehnologij: tehnologije 3D tiskanja za izdelavo prototipov in tehnologije 3D tiskanja za proizvodnjo. Če združimo obe vrsti dodajalnih proizvodnih tehnologij, lahko ugotovimo, da vsaj eno od njih uporablja približno 45 % podjetij.

Opazimo lahko tudi, da se večina tehnologij sproti nadgrajuje, v povprečju se je to zgodilo v več kot polovici proizvodnih podjetij, ki posamezno tehnologijo uporabljajo. Zlasti digitalne tehnologije so predmet nadaljnjih naložb / nadgradenj. Nekoliko manjši je delež podjetij, ki so nadgrajevala mobilne industrijske robote in kolaborativne robote, kar je pričakovano glede na njihovo novost. Delež podjetij, ki nadgrajujejo svoje tehnologije, se je v primerjavi s preteklimi iteracijami raziskave še povečal, je pa treba upoštevati, da je tokrat bil štiriletni časovni razmik od prejšnje raziskave.

Stolpec »Planirana raba« predstavlja delež podjetij, ki trenutno nimajo določene tehnologije, vendar jo nameravajo uvesti do leta 2025. Pred tremi leti smo v prejšnji izvedbi raziskave ugotovili, da se je takrat delež podjetij, ki načrtujejo vlaganje v tehnologije v obdobju 2018-2021, v primerjavi s prejšnjimi raziskovalnimi krogi močno povečal. Razpon se je gibal od 10 do 35 %, v povprečju okoli 20 %. Rezultati zadnje raziskave glede rabe tehnologij sicer nakazujejo, da se za večino tehnologij tak porast ni zgodil. Tokratna raziskava kaže, da so načrti podjetij, ki določenih tehnologij še ne posedujejo, še bolj smeli, saj nekatere tehnologije v obdobju do leta 2025 načrtuje od 30 do 40 % podjetij, ki teh tehnologij še nimajo.

Izračunali smo povprečne vrednosti za stopnjo rabe, kjer je »nizka raba« imela vrednost 1, »srednja / delna raba« vrednost 2 in »polna / visoka raba« vrednost 3. Največjo povprečno stopnjo rabe imajo ponovno ERP sistemi z vrednostjo 2,5 (od največje možne vrednosti 3).

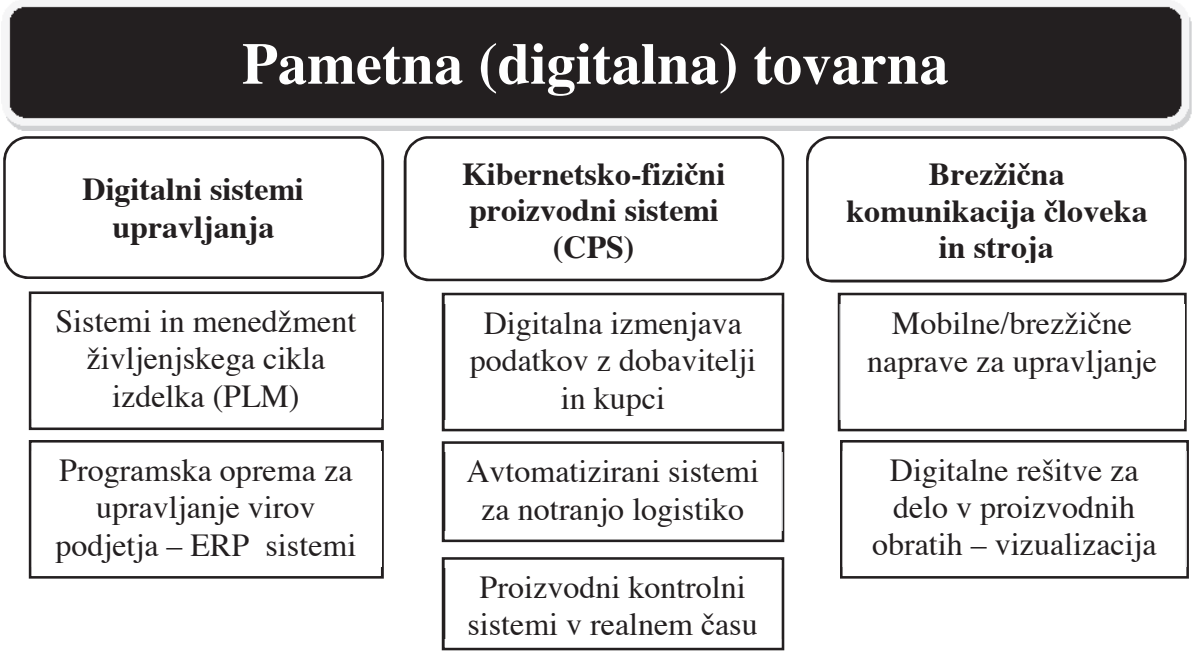
Ta digitalna tehnologija je že dalj časa prisotna v podjetjih, zato je stopnja rabe visoka. Visoka je tudi stopnja rabe za proizvodne kontrolne sisteme v realnem času, kar pomeni, da so podjetja sposobna digitalno spremljati proizvodnjo ter zajemati in analizirati pridobljene podatke. To dejstvo bi lahko bilo zelo pomembno za podjetja, ki te tehnologije še nimajo. Tudi »klasični« roboti imajo visoko stopnjo uporabe. Najnižja je stopnja rabe, kot je bilo pričakovati, za mlajše tehnologije, kot so kolaborativni roboti (1,75) in programska oprema za zahtevne računske operacije, simulacije in analizo podatkov z uporabo super-računalnikov (HPC, edge computing) (1,8), kar dokazuje, da so te tehnologije še vedno na začetku njihove uporabe v proizvodnih podjetjih.

4 INDEKS PRIPRAVLJENOSTI NA INDUSTRIJO 4.0

Kot smo že omenili, indeks pripravljenosti, ki smo ga razvili v okviru naše raziskave, temelji na uporabi DT. Za določitev indeksa pripravljenosti ni dovolj, da preštejemo tehnologije, ki jih podjetje uporablja, ampak jih je treba sistemsko prilagoditi procesom in operacijam v podjetju, spadajo pa tudi na različna tehnološka področja. Posledično smo identificirali tri tehnološka področja s pripadajočimi tehnologijami (slika 1):

1. Digitalni sistemi upravljanja – ERP sistemi in sistemi ter menedžment življenjskega cikla izdelka (PLM, PDM);
2. Brezžična komunikacija človeka in stroja: mobilne/brezžične naprave za upravljanje opreme in digitalna vizualizacija;
3. Kibernetsko-fizični proizvodni sistemi (CPS): digitalna izmenjava podatkov z dobavitelji in kupci, avtomatizirani sistemi za notranjo logistiko ter proizvodni kontrolni sistemi v realnem času.

Medtem ko prvi dve tehnološki področji zajemata procese, povezane z informacijsko-komunikacijsko tehnologijo – IKT (osnovne tehnologije Industrije 4.0), vendar osamljeno ne tvorita bistva Industrije 4.0, tehnološko področje kibernetsko-fizičnih proizvodnih sistemov že izdatneje zajema celovito idejo Industrije 4.0.

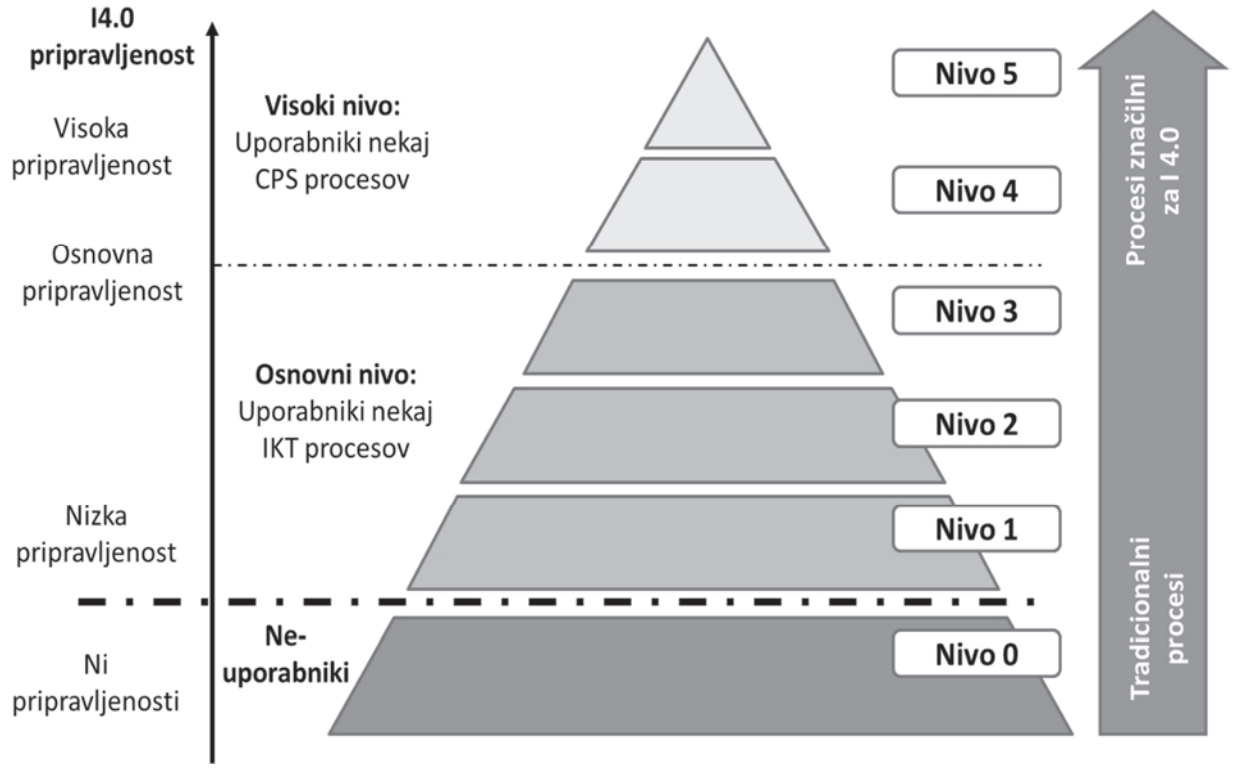


Slika 1: Tehnologije pametne (digitalne) tovarne

Slika 2 prikazuje koncept indeksa pripravljenosti, ki temelji na uporabi izbranih naprednih proizvodnih tehnologij. S predlagano klasifikacijo tehnoloških področij lahko glede na različne kombinacije rabe navedenih tehnologij razvrstimo podjetja v različne skupine glede na njihovo pripravljenost na Industrijo 4.0:

1. Ne-uporabniki tehnologij, ki še niso sploh pripravljeni na Industrijo 4.0:
   a. Nivo 0: podjetja, ki še zmeraj težijo k uporabi starih, tradicionalnih tehnologij;
2. Osnovna pripravljenost na Industrijo 4.0:
   a. Nivo 1 (začetniki): podjetja, ki uporabljajo tehnologije iz vsaj enega od treh tehnoloških področij;
   b. Nivo 2 (napredni začetniki): podjetja, ki uporabljajo tehnologije iz vsaj dveh od treh tehnoloških področij;
   c. Nivo 3 (napredni uporabniki): podjetja, ki uporabljajo tehnologije iz vseh treh tehnoloških področij;
3. Visoka pripravljenost na Industrijo 4.0:
   a. Nivo 4: podjetja, ki uporabljajo tehnologije iz vseh treh tehnoloških področij, in vsaj dve tehnologiji iz področja kibernetsko-fizičnih proizvodnih sistemov;
   b. Nivo 5: podjetja, ki uporabljajo tehnologije iz vseh treh tehnoloških področij, in vse tri tehnologije iz področja kibernetsko-fizičnih proizvodnih sistemov.

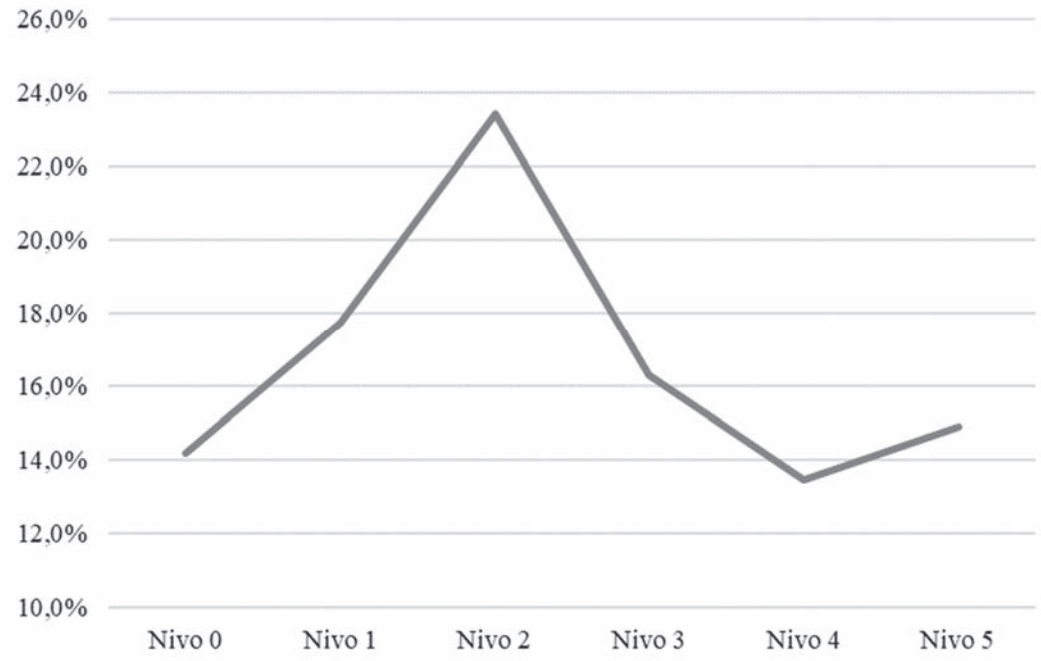
Z vsakim nivojem se stanje pripravljenosti na Industrijo 4.0 poveča oziroma zmanjšuje se oddaljenost do celovite mrežne oz. digitalne proizvodnje. Medtem ko na nivoju 0 ni pripravljenosti za industrijo 4.0, imajo podjetja na nivojih od 1 do 5 osnovno pripravljenost. Podjetja, ki že uporabljajo procese, povezane z IKT (nivo 1 in 2), imajo večjo oddaljenost od Industrije 4.0 kot podjetja na nivojih 3 do 5, ki že izvajajo prve elemente celovite mrežne oz. digitalne proizvodnje. Vendar tudi na nivojih 4 in 5 ni mogoče domnevati, da je bil prag za industrijo 4.0 dejansko v popolnosti dosežen. Lahko le domnevamo, da se je zmanjšala oddaljenost do celovite mrežne oz. digitalne proizvodnje. S pomočjo indeksa pripravljenosti Industrije 4.0 je mogoče preslikati spremembo od tradicionalne proizvodnje do proizvodnje blizu Industrije 4.0. Podjetja na višjem nivoju so prehod izdatneje naredila kot podjetja na nižjih nivojih [5].



Slika 2: Koncept indeksa pripravljenosti na Industrijo 4.0

Z uporabo teh DT smo razvili stopnje pripravljenosti na Industrijo 4.0 za slovenska proizvodna podjetja. Slika 3 prikazuje porazdelitev vseh šestih opisanih ravni pripravljenosti na Industrijo 4.0. Približno 14 % vseh podjetij v proizvodnji še ni namestilo nobene DT. Nekaj manj kot 60 % vseh podjetij ima v proizvodnji že vzpostavljene procese, povezane z DT, in tvorijo osnovne ravni. Ta skupina osnovnih uporabnikov vključuje skupino začetnikov, ki uporabljajo tehnologije samo z enega področja (skoraj 18 %; raven 1), naprednih začetnikov, ki so dejavni na dveh tehnoloških področjih (skoraj 24 %; raven 2), pa tudi že napredna podjetja, ki združujejo tehnologije z vseh treh tehnoloških področij (več kot 16 %; raven 3). Na dveh najvišjih ravneh, 4 in 5, je v tej skupini skupaj 28,4 % vseh podjetij. V skladu s tem je približno eno od štirih podjetij dejavno na vseh treh tehnoloških področjih in hkrati uporablja ne le procese, povezane z IKT, temveč tudi več procesov, povezanih s CPS. Na ravneh 4 in 5 je delež podjetij zelo podoben.

Pogled na slovenski proizvodni sektor kaže, da je še vedno določen delež podjetij, ki se v veliki meri zanašajo na tradicionalne proizvodne procese (neuporabniki). Glavna skupina slovenskih proizvodnih podjetij je počasi začela uporabljati procese, povezane z informacijsko tehnologijo, vendar obstaja velika razlika med začetniki in naprednimi uporabniki. Prvi so po vrsti proizvodnih procesov bližje neuporabnikom, napredna podjetja pa se počasi pripravljajo na vstop v glavno skupino. Vrhunska skupina ni dejavna le na vsakem od treh tehnoloških področij, temveč uporablja tudi več procesov, povezanih s CPS. Obstaja nekaj pripravljenosti za digitalizacijo proizvodnje, pri čemer se zdi, da se zlasti podjetja na ravni 5 (14,9 %) pripravljajo na uvedbo industrije 4 ali jo že poskušajo uvesti.



Slika 3: Indeks pripravljenosti za slovenska proizvodna podjetja

5 UPORABA UMETNE INTELIGENCE

V zadnjih petih letih se veliko govori o uporabi umetne inteligence (AI) v vseh vidikih našega življenja. Enako velja za proizvodna podjetja, kjer aplikacije/programska oprema s funkcionalnostjo samoučenja že kažejo svoj potencial. V naši raziskavi smo proizvodna podjetja vprašali, ali uporabljajo določene programske rešitve na različnih področjih (Tabela 2). Poleg tega smo jih vprašali, ali te programske rešitve že vključujejo algoritme samoučenja/funkcionalnost umetne inteligence. Kot je razvidno iz tabele 2, je delež podjetij, ki uporabljajo programsko opremo za posamezna področja, precej različen (stolpec 2). Na splošno približno 20 do 30 % podjetij, ki uporabljajo programsko rešitev za določeno področje, v te programske rešitve vključuje tudi algoritme za samoučenje / funkcionalnost umetne inteligence (stolpec 3). V četrtem stolpcu je predstavljen splošni delež slovenskih proizvodnih podjetij, ki uporabljajo programsko opremo, podprto z umetno inteligenco. Razvidno je, da je ta delež od 5 do 12 %. V petem stolpcu je naveden delež podjetij, ki zaenkrat ne uporabljajo rešitev z AI, nameravajo pa jih uvesti do leta 2025.

Tabela 2: Uporaba specifičnih programskih rešitev v slovenskih proizvodnih podjetjih

Raba specializirane programske opreme na področju ...	**Raba**	**SW z AI – vsa podjetja**	**SW z AI – uporab-niki SW**	**Plan rabe do 2025**
Upravljanje proizvodnih procesov (npr. nadzor procesov)	61,7%	7,8%	12,6%	20,4%
Nadzor kakovosti (npr. odkrivanje napak)	43,3%	12,1%	27,9%	21,3%
Vzdrževanje strojev in opreme (npr. spremljanje stanja, pogojev)	36,9%	7,8%	21,2%	12,4%
Upravljanje interne logistike (npr. skladišča, transport)	30,5%	5,7%	18,6%	8,2%
Upravljanje energije	23,4%	5,7%	24,2%	7,4%
Izboljšave oz. inovacije pri izdelkih ali proizvodnih procesih	26,2%	7,8%	29,7%	10,6%

V raziskavi iz leta EMS 2018 smo dodali eno splošno vprašanje o uporabi umetne inteligence in njenih prvih primerih uporabe. Pred štirimi leti je umetno inteligenco v svojih procesih uporabljalo le 5 % opazovane populacije proizvodnih podjetij. Kot vidimo, se je delež proizvodnih podjetij, ki uporabljajo posebne rešitve na podlagi algoritmov za samoučenje / AI, znatno povečal. Če združimo vseh 6 možnih vrst programske opreme, ki temeljijo na umetni inteligenci, je 20 % slovenskih proizvodnih podjetij, ki uporabljajo vsaj eno od teh šestih vrst.

6 ZA KONEC

Naši rezultati kažejo, da je uporaba DT v slovenskih proizvodnih podjetjih odvisna od vrste tehnologije in značilnosti proizvodnega podjetja. Ni presenetljivo, da vsa izbrana DT niso enako primerna za vsa proizvodna podjetja v vključenih panogah. Kljub temu so nekatera od vključenih DT koristna ali celo nujno potrebna v vseh proizvodnih podjetjih (npr. ERP ali zbiranje podatkov v realnem času), vendar še vedno niso prisotna v vseh podjetjih. Odsotnost DT v več proizvodnih podjetjih je razvidna tudi iz ocene pripravljenosti na Industrijo 4.0. Skoraj 50 % proizvodnih podjetij uporablja le od 0 do 2 DT.

Naša raziskava ima več omejitev in posledično več načrtov za prihodnje raziskave. V tej raziskavi smo upoštevali le splošno porazdelitev izbranih DT, ne glede na značilnosti podjetja, kot so velikost, status proizvajalca originalne opreme ali dobavitelja, tehnološka intenzivnost panoge, ki ji pripada, itd. Prav tako smo zanemarili nekatere druge posebne značilnosti, kot so kompleksnost izdelka, vrsta proizvodnje in inovacijska sposobnost. Druga omejitev je, da smo opazovali samo eno državo in da je bilo število primerov omejeno. V prihodnjih raziskavah bomo izvedli več-nacionalno študijo z veliko večjim vzorcem proizvodnih podjetij. Naša prihodnja raziskava bo tudi podrobneje preučila kombinacije in odnose med DT ter njihove učinke na uspešnost podjetja.

Naše ugotovitve imajo nekaj začetnih posledic za upravljanje podjetij. Predstavljeni indeks pripravljenosti na Industrijo 4.0 lahko služi kot preprosto orodje za menedžerje, da ocenijo, katera DT in narava njihove strukturne porazdelitve prispevajo k določitvi osnovnega indeksa pripravljenosti na Industrijo 4.0. Prav tako omogoča menedžerjem, da primerjajo raven pripravljenosti svojega podjetja na Industrijo 4.0 z drugimi slovenskimi proizvodnimi podjetji iz njihove panoge.

Viri:

[1] Elibal, K., Özceylan, E.: A systematic literature review for industry 4.0 maturity modeling: state-of-the-art and future challenges, *Kybernetes* 50(2021) 11, str. 2957-2994.
[2] Yang, L.: Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues, *Journal of Industrial Information Integration*, 6(2017), str. 1-10.
[3] Legner, C., Eymann, T., Hess, T., Matt, C., Bohmann, T., Drews, P., Ahlemann, F.: Digitalization: Opportunity and challenge for the business and information systems engineering community, *Business and Information Systems Engineering* 59(2017)4, str. 301-308.
[4] Plekhanov, D., Franke, H., Netland, T.: Digital transformation: A review and research agenda, *European Management Journal* (2022).
[5] Lerch, C., Jaeger, A., Meyer, N.: I4.0-Readiness – Baden-Württemberg auf dem Weg zur Industrie 4.0?, Fraunhofer ISI working paper, (2016).

ABB INTEGRATED FORCE CONTROL – UPORABA VEČOSNEGA SENZORJA SILE PRI ROBOTSKEM BRUŠENJU

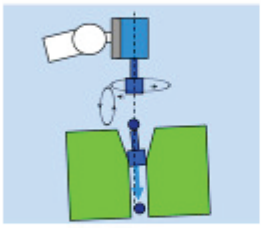
Tomaž LASIČ, Žiga MAJDIČ, Robert LOGAR
ABB d.o.o.

IZVLEČEK

Sodobni večosni senzorji sile in navora omogočajo v realnem času prilagajanje gibanja robota glede na silo, ki deluje na nanj. Pri uporabi senzorja je pomembno, da so meritve senzorja neposredno vezane v samo osnovno gibanje robota. Le na ta način dobimo neposreden hiter odziv robota na sile iz okolice. ABB Integrated Force Control omogoča prilagajanje robota spremembam v realnem času. To funkcionalnost lahko zelo koristno uporabljamo pri brušenju varov. Robot zato odbrusi le želeni del vara in se pri tem samostojno prilagaja vsaki situaciji sproti.

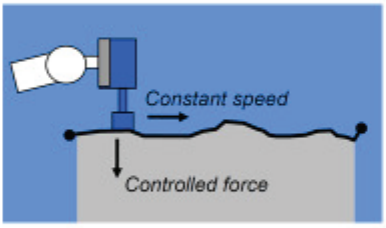
ABB Force Control - tehnologija

Montaža s senzorjem sile



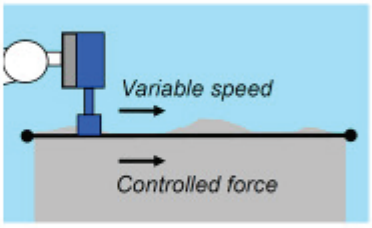
+ Prilagodljiva pot
+ Prilagodljiva hitrost
+ Nadzorovana sila dotika
+ Odstrani poškodbe izdelkov
+ Večja življenjska doba orodij
+ Zmanjša možnost napak montaže

Krmiljenje po sili "Pressure"
- **Konstantna hitrost**
- **Kontrolirana sila**



+ Prilagodljiva pot
+ Konstantna hitrost
+ Nadzorovana pritisna sila
+ Odstranjene poškodbe izdelka
+ Daljša življenjska doba orodja
+ Vgrajen proces kvalitete

Krmiljenje po sili "SpeedChange"
- **Spremenljiva hitrost**
- **Kontrolirana sila**

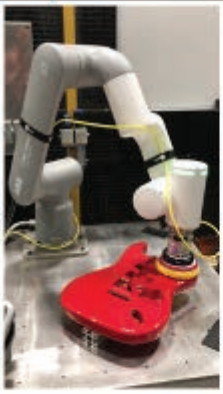


+ Konstantna pot
+ Prilagodljiva hitrost
+ Nadzorovana pritisna sila
+ Odstranjene poškodbe izdelka
+ Daljša življenjska doba orodja
+ Vgrajen proces kvalitete

©ABB
May 16, 2023 | Slide 2
ABB

GoFa – Sodelujoči robot z ABB Integrated Force Control

GoFa poliranje



Integrirani senzorje sile na vseh 6 oseh
Ni potreben dodatni zunanji senzor sile

Programska Uporaba Integrated Force Control enako kot za standardne industrijske robote.

Uporaba Wizard Easy Programming

Wizard Easy Programming

©ABB
May 16, 2023 | Slide 3
ABB

Brušenje streh in/ali osnov bivalnih zabojnikov

Izhodišče: neobdelan var → Brušenje varov → Poliranje

Brusilna celica Arcont

Layout

Sklopi

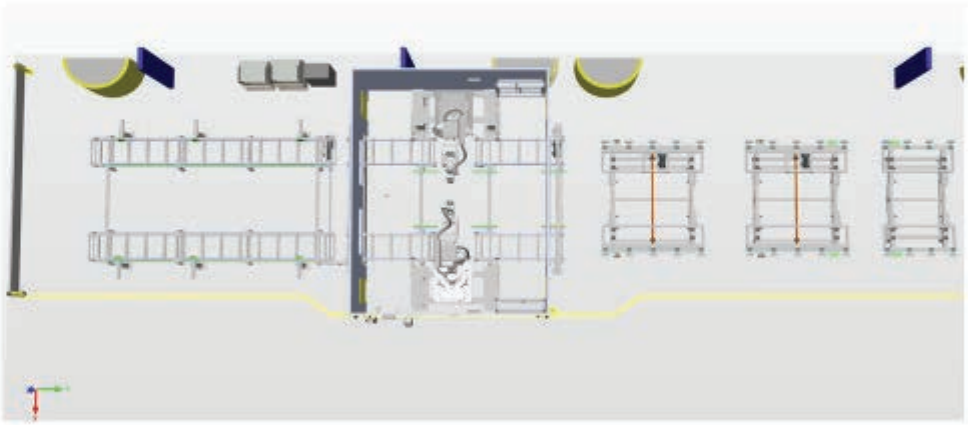
Vstopna postaja

Brusilna celica

- Brusilna robota
- Zalogovnik orodij
- Postaji za menjavo orodij
- Lovilec prahu

Izhodna postaja

- Ročna poprava



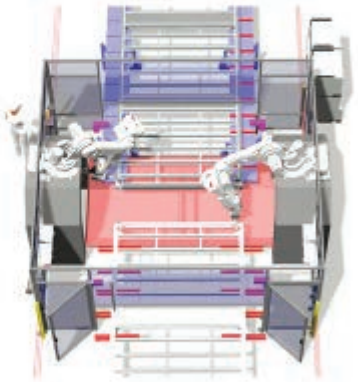
Brusilna robotska celica s Force Control

Brusilna celica

Zalogovnik orodij

- IRB 6620 robota
- Force Control
- Avtomatska menjava orodja
- Okno za menjavo orodja
- Lovilec prahu
- Menjava med novo in končano streho brez ustavitve
- Avtomatska menjava obrabljenih diskov
- Zaprta kabina omejuje širjenje prahu in ropota

Brusilna Robota



ABB

Brusilna celica Arcont

Zaključek

Izboljšave

- 20 krat manj odbrušenega materiala
  - Ohranjanje debeline in nosilnosti profilov
  - Manj prašnih delcev
  - Bolj zdravo delovno okolje
- Večja prilagodljivost
  - Novi modeli streh in osnov
  - Različni širini modelov
- Večja kvaliteta izgleda
- Manj potrebe po ročnih popravkih na račun nekoliko daljšega robotskega brušenja

ABB

3D TISK APLIKACIJI PRILAGOJENIH ZAZNAVAL SILE IN DEFORMACIJ

Tilen KOŠIR, Janko SLAVIČ
Univerza v Ljubljani, fakulteta za strojništvo

IZVLEČEK

Piezoelektrična zaznavala pretvarjajo mehansko energijo v električno in se pogosto uporabljajo za merjenje v različnih panogah, vključno z medicino ter vesoljsko in avtomobilsko industrijo. Tradicionalni proizvodni proces je sestavljen iz več korakov, in vključuje izdelavo piezoelektrične plasti, nanašanje elektrod in poravnavo molekularne strukture, znano tudi kot električna polarizacija.
Nedavni napredek v tehnologiji 3D-tiskanja je omogočil izdelavo piezoelektričnih zaznaval s termoplastično materialno ekstruzijo (TME). Z uporabo TME je mogoče celoten postopek izdelave izvesti v enem koraku, vključno s proizvodnjo piezoelektrične plasti, prevodnih elektrod, prevodnih poti in strukturnih elementov zaznavala. Postopek električne polarizacije se izvede takoj po izdelavi s samodejnim povezovanjem zaznavalnih elektrod na visokonapetostni vir.
Uporaba TME pri izdelavi piezoelektričnih zaznaval ponuja številne prednosti, saj omogoča izdelavo kompleksnih geometrij, ki jih je težko ustvariti s konvencionalnimi proizvodnimi tehnologijami. Piezoelektrična zaznavala so tako lahko s svojo obliko in velikostjo prilagojena specifičnim aplikacijam. 3D natisnjena piezoelektrična zaznavala je mogoče v enem samem koraku vgraditi tudi v različne 3D natisnjene strukture, s čimer le-te postanejo možne zaznavanja obremenitev in dogajanja v svoji okolici. Kot primer je predstavljen 3D natisnjen nosilec s tremi vgrajenimi piezoelektričnimi zaznavali deformacij, kjer je vse skupaj izdelano v enem procesu.

1 UVOD

V zadnjih letih je izdelava zaznaval s pomočjo aditivnih tehnologij prejela precejšno pozornost [1]. 3D tisk omogoča izdelavo kompleksnih oblik zaznaval in vgrajevanje v strukture že v proizvodnih fazah [2]. Ena izmed bolj obetavnih aditivnih tehnologij je termoplastična materialna extruzija (TME) pri kateri talimo že v naprej pripravljen filament in ga nanašamo v slojih po 3D prostoru [3]. Najpogostejši principi zaznavanja vključujejo piezoresistivni [4], kapacitivni [5] in piezoelektrični efekt [3]. Izmed naštetih, piezoelektrična zazanavala ponujajo najboljšo občutljivost[3]. Visoko občutljivost piezoelektričnih zaznaval dosežemo v procesu električne polarizacije, kjer poravnamo molekularne dipole v visokem električnem polju pri povišanih temperaturah [6].

Izdelava tankih 3D-natisnjenih piezo-električnih zaznaval običajno vključuje tri osnovne korake in sicer izdelavo filma, pritrditev elektrod in električno polarizacijo. Z uporabo TME je mogoče vse korake združiti v en sam postopek, kot je to predstavljeno v [3], kjer se je za izdelavo piezoelektrične plasti, elektrod in strukturnih delov uporabila večmaterialna tehnologija TME. Z avtomatskim povezovanjem 3D natisnjenih elektrod na visokonapetostni vir, je bilo mogoče električno polarizacijo opraviti že v fazi 3D tiska.

2 TEORETIČNO OZADJE

Če piezoelektrično zaznavalo deformiramo ali pa obremenimo s silo, se v njem spremeni gostota električnega toka D_3. V primeru merjenja mehanskih napetosti z nabojnim ojačevalnikom je gostota električnega pretoka D_3 enaka [7]:

$$D_3 = d_{31}\,\sigma_1 + d_{32}\,\sigma_2 + d_{33}\,\sigma_3 \qquad (1)$$

Kjer so d_{31}, d_{32} in d_{33} deformacijski piezoelektrični koeficienti, σ_1, σ_2, σ_3 pa predstavljajo normalne napetosti v smereh 1, 2 in 3. V primeru merjenja specifičnih deformacij pa je gostota električnega pretoka D_3 enaka [7]:

$$D_3 = e_{31}\,\varepsilon_1 + e_{32}\,\varepsilon_2 + e_{33}\,\varepsilon_3 \qquad (2)$$

Kjer so e_{31}, e_{32} in e_{33} napetostni piezoelektrični koeficienti, ε_1, ε_2, ε_3 pa so normalne specifične deformacije. Gostoto električnega pretoka D_3 Lahko povežemo z nabojem q kot:

$$q = \int_A D_3 \, dA \qquad (3)$$

Kjer je A površina elektrod piezoelektričnega zaznavala.

2 IZDELAVA 3D NATISNJENEGA ZAZNAVALA V ENEM PROCESU

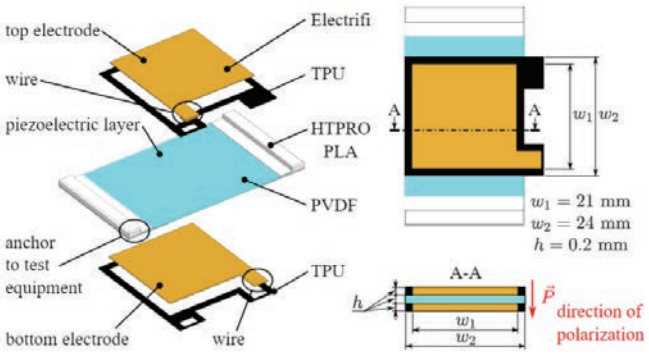
Piezoelektrični zaznavalni element, prikazan na sliki 1, je zasnovan za doseganje dobre občutljivosti ob časovno spremenljivih dinamičnih obremenitvah z ozirom na proizvodni proces TME. 3D-natisnjeno zaznavalo je narejeno v dveh osnovnih korakih: Izdelava zaznavalnega elementa s pomočjo TME in električna polarizacija.

V procesu TME so bili za izdelavo zaznavala uporabljeni štirje različni materiali: PVDF (Nile Polymers), Electrifi (Multi3D), HTPRO (Plastika Trček) in TPU (Plastika Trček). 3D natisnjen piezoelektrični PVDF film je kontaktiran s 3D natisnjenimi elektrodami iz prevodnega Electrifi filamenta. Relativno podajen TPU služi kot električna izolacija in se uporablja na mestih, kjer želimo, da piezoelektrični PVDF film nosi večino obremenitev, s čimer se poveča občutljivost zaznavala. HTPRO PLA se uporablja za strukturne elemente kjer je potrebna relativno visoka togost.

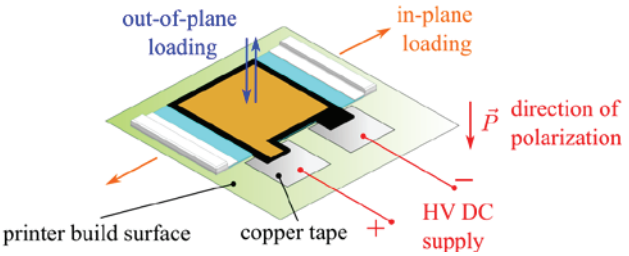
V naslednjem koraku se zaznavalo električno polarizira kot to prikazuje slika 2. Ker se elektrode delno natisnejo tudi na predhodno prilepljen prevodni bakreni trak, je zaznavalo samodejno že električno kontaktirano z visoko napetostnim virom kot to prikazuje slika 2. Posledično se proces električne polarizacije lahko izvede samodejno po 3D tisku, brez dodatnega poseganja operaterja v proces.

Za izdelavo piezoelektričnega zaznavala je bil uporabljen 3D tiskalnik E3D Toolchanger s štirimi različnimi extruzijskimi orodji. G-koda za proces TME je bila ustvarjena s programom Prusa Slicer 2.5.0. Električna polarizacija je trajala 14 minut pri povišani temperaturi 90°C in končni električni napetosti 3,3 kV.

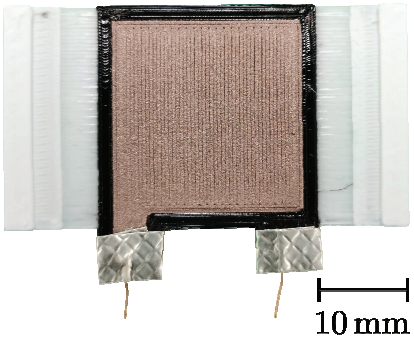
Primer končnega izdelanega 3D tiskanega piezoelektričnega zaznavala je prikazan na sliki 3. Pri vseh šestih vzorcih je bila opažena rahla ukrivljenost zaznaval zaradi zaostalih napetosti in različnih koeficientov toplotnega raztezanja materialov.



Slika 1: Koncept 3D tiskanega piezoelektričnega zaznavala.



Slika 2: Proces električne polarizacije in možne smeri obremenjevanja 3D tiskanega zaznavala.

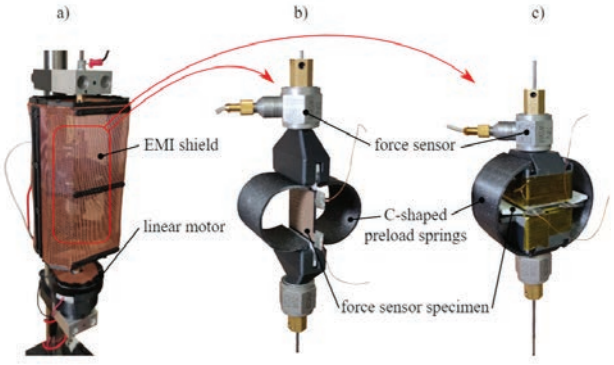


Slika 3: Primer končnega 3D tiskanega piezoelektričnega zaznavala.

2 MERJENJE OBČUTLJIVOSTI

Natisnjeno piezoelektrično zaznavalo lahko obremenjujemo na dva različna načina kot to prikazuje slika 2. Silo lahko apliciramo v ravnini zaznavala (prečno na smer merjenja naboja), ali

pa izven ravnine v smeri debeline (v smeri merjenja naboja). Za merjenje občutljivosti je bila na zaznavalo aplicirana sinusna sila v ravnini in izven ravnine kot to prikazuje slika 3. Ustvarjeni naboj v obeh primerih je bil pomerjen z uporabo nabojnega ojačevalnika. Za zmanjšanje elektromagnetnih motenj je bila uporabljena Faradayeva kletka.



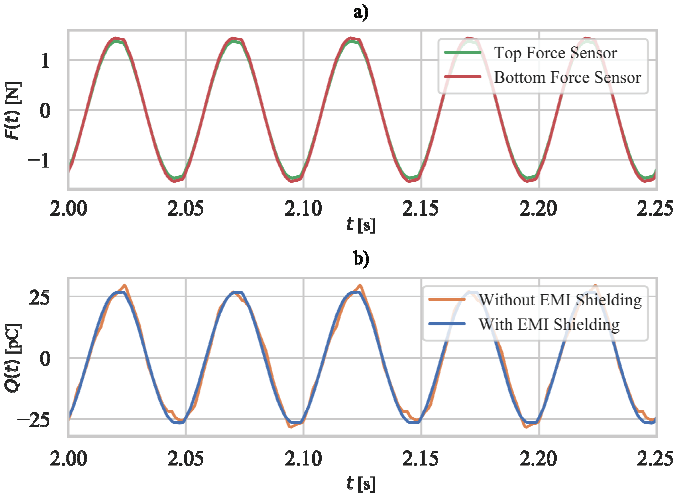
Slika 3: a) Test merjenja občutljivosti 3D tiskanega zaznavala, b) obremenjevanje v ravnini zaznavala, c) obremenjevanje izven ravnine zaznavala.

Na sliki 4 lahko vidimo primer pomerjene vzbujevalne sile in pa pomerjenega naboja na zaznavalu za primera z in brez Faradayeve kletke. Opazimo lahko da pomerjen naboj na zaznavalu povsem sledi aplicirani sili. Elektromagnetne motnje so znatno zmanjšane z uporabo Faradayeve kletke, kar je dobro razvidno iz slike 5, kjer je prikazana diskretna Fourierjeva transformacija vzbujevalne sile in pomerjenega naboja na zaznavalu.

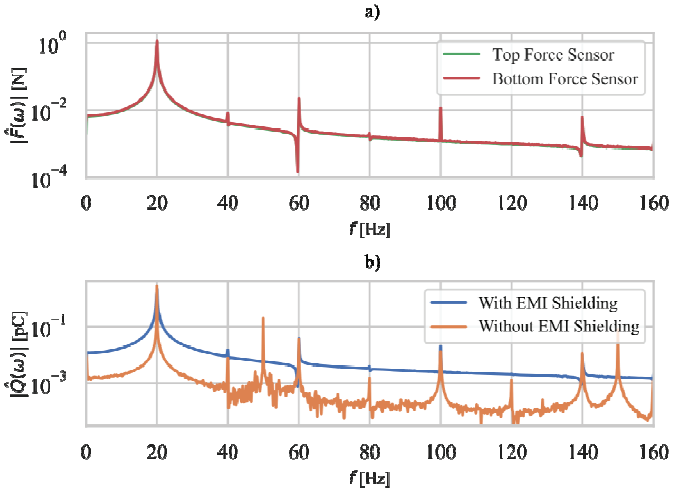
Občutljivosti senzorjev v ravnini in izven ravnine so bile določene na podlagi linearne regresije:

$$|Q(f)| = K\,|F(f)| \qquad (4)$$

Kjer je |Q(f)| amplitudni spekter Fouriejeve transformacije naboje, |F(f)| amplitudni spekter Fouriejeve transformacije sile, K pa je občutljivost zaznavala. Rezultati so zbrani v tabeli 1. Ugotovljeno je bilo, da je občutljivost v ravnini zaznavala za red velikosti višja od občutljivosti zunaj ravnine, z vrednostmi približno 17,2 pC/N in 0,76 pC/N.



Slika 4: Primer pomerjenega časovnega signala vzbujevalne sile in pomerjenega naboja na zaznavalu.



Slika 5: Primer pomerjene vzbujevalne sile in pomerjenega naboja na zaznavalu v frekvenčni domeni.

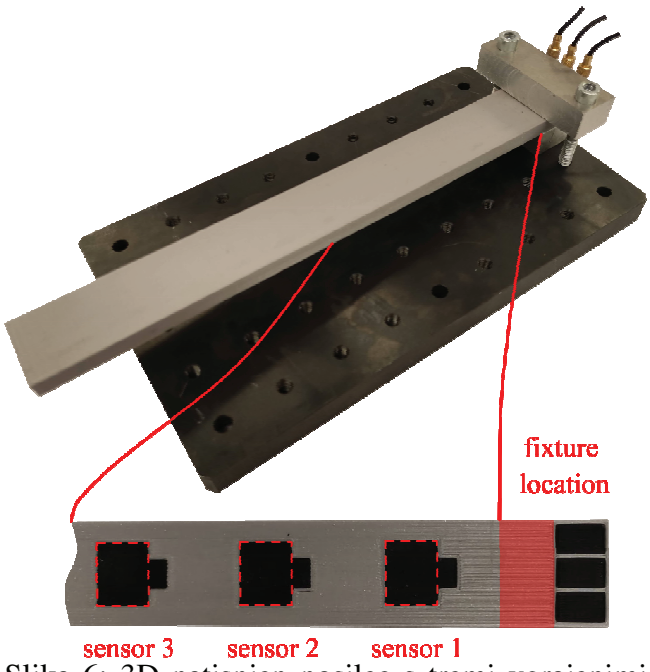
Tabela 1: Pomerjene občutljivosti 3D natisnjenih piezoelektričnih zaznaval.

Koeficient občutljivosti	**Vrednost**	
	Povprečje	Maksimalna
		Minimalna
$K_{v\ ravnini}$ [pC/N]	17.2	19.0
		15.3
$K_{izven\ ravnine}$ [pC/N]	0.76	0.92
		0.59

4 PRIMER APLIKACIJE

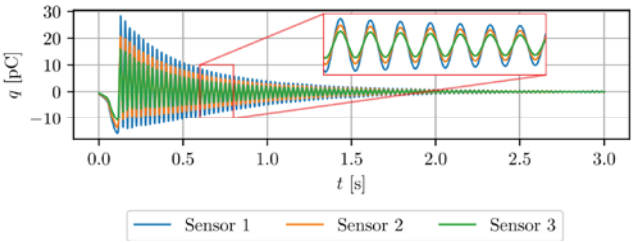
Primer vgrajevanja 3D natisnjenih zaznaval v strukture je prikazan na 3D natisnjenemu nosilcu, ki vsebuje 3 natisnjena zaznavala deformacij. Ta so vgrajena na spodnjo stran prve polovice nosilca kot prikazano na sliki 6. Nosilec, zaznavalni elementi in prevodne poti, so bile vse izdelane v enem samem procesu, brez dodatne naknadne obdelave. Po 3D-tiskanju so bila vsa tri zaznavala hkrati električno polarizirana, kot je to opisano v poglavju 2.

3D-natisnjen nosilec s tremi zaznavali deformacije je bil fiksno vpet na enem koncu, drugi prosti konec pa je bil izmaknjen za približno 3 mm in nato sproščen, s čimer se je vzbudilo njegov lasten odziv. Lastni odziv se je pomeril s pomočjo vgrajenih 3D natisnjenih piezoelektričnih zaznaval, ki so bili priklopljeni na ojačevalnik naboja. Na ojačevalniku naboja je bil nastavljen nizkopasovni filter z mejno frekvenco 0,1 Hz.



Slika 6: 3D natisnjen nosilec s tremi vgrajenimi piezoelektričnimi zaznavali.

Slika 7 prikazuje časovni odziv treh vgrajenih zaznaval deformacije na prosto nihanje nosilca. Izmerjeni naboji, ki odražajo specifične deformacije, kažejo pričakovani eksponentni vpad amplitude. V prvih 0,1 sekunde meritve časovni signali odražajo začetni odmik konca nosilca. Po približno 0,6 sekund odziva, kjer struktura niha predvsem s prvo lastno obliko (vse druge oblike se do takrat iznihajo), opazimo, da se amplitude senzorjev 1, 2 in 3 (glej sliko 6) ujemajo z njihovo pozicijo na nosilcu. Zaznavalo 1 je pomerilo najvišjo amplitudo naboja in s tem največjo deformacijo, sledi zaznavalo 2 in zaznavalo 3. Izmerjeni časovni signali izkazujejo visoko razmerje signala proti šumu.



Slika 7: Pomerjen naboj na treh 3D natisnjenih zaznavalih, vgrajenih v nosilec v enem samem procesu.

V danem primeru občutljivosti posameznih 3D-natisnjenih piezoelektričnih zaznaval niso znane, saj po izdelavi ni bila izvedena nobena kalibracija. Vendar pa lahko iz prostega odziva nosilca opazimo, da je trend izmerjenih nabojnih količin, ki predstavljajo deformacije, pravilen. Natančneje, večjo obremenitev izmerijo 3D natisnjena zaznavala obremenitve, ki so bližje vpetemu koncu, kar kaže, da so občutljivosti podobne.

3 SKLEP

Predstavljena je bila metoda izdelave dinamičnega piezoelektričnega zaznavala v enem procesu z uporabo TME. Pomerjeni sta bili občutljivosti zaznavalnega elementa v ravnini in izven ravnine, ki znašata v povprečju 17.2 pC/N in 0.76 pC/N.

Predstavljeni principi izdelave piezoelektrične zaznaval, izdelanih z uporabo TME, omogočajo izdelavo kompleksnih geometrij zaznaval in vgrajevanje v različne 3D-natisnjene strukture kot je bilo to prikazano na primeru nosilca. Izmerjeni naboji iz 3D-natisnjenih zaznaval v nosilcu so uspešno zajeli prosti odziv konzolnega nosilca.

Hitro izdelavo prototipnih zaznaval in vgradnjo v 3D-natisnjene strukture je mogoče doseči z nižjimi stroški, saj za morebitne

spremembe oblike niso potrebna dodatna orodja. Poleg tega aditivna narava tehnologije zmanjšuje materialne odpadke. Predstavljene prednosti 3D-natisnjenih piezoelektričnih zaznaval imajo potencial, da revolucionirajo aplikacije zaznavanja in merjenja.

Viri:

[1] Palmić, T.B., Slavič, J.: *Single-process 3D-printed stacked dielectric actuator*, International Journal of Mechanical Sciences, 230(2022)
[2] Arh, M., Slavič, J., Boltežar, M.: *Design principles for a single-process 3d-printed accelerometer – theory and experiment*, Mechanical Systems and Signal Processing, 152(2021)
[3] Košir, T., Slavič, J.: *Single-process fused filament fabrication 3D-printed high-sensitivity dynamic piezoelectric sensor*, Additive Manufacturing, 49(2022)
[4] Arh, M., Slavič, J., Boltežar, M.: *Experimental identification of the dynamic piezoresistivity of fused-filament-fabricated structures*, Additive Manufacturing, 36(2020)
[5] Laszczak, P., Jiang, L., Bader, D.L., Moser, D., Zahedi, S.: *Development and validation of a 3D-printed interfacial stress sensor for prosthetic applications*, Medical Engineering & Physics, 37(2015)1
[6] Eßlinger, S., Geller, S., Hohlfeld, K., Gebhardt, S., Michaelis, A., Gude, M., Schönecker, A., Neumeister, P.: *Novel poling method for piezoelectric 0–3 composites and transfer to series production*, Sensors and Actuators A: Physical, 270(2018)
[7] Rupitsch, S.J.: Piezoelectric sensors and actuators, *Simulation of Piezoelectric Sensor and Actuator Devices*. Piezoelectric Sensors and Actuators. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering, Springer, 2019, str. 49-53.

KATAPULT ROBOTIKA IN S.O.S. ŠOLA STEAM IZOBRAŽEVANJE

Maša JAZBEC, Alenka KNEZ, Neja BRLOGAR, Žan RAJŠEK
Katapult

IZVLEČEK

Izobraževalni in raziskovalni moduli S.O.S. šola in Katapult Robotika bazirata na STEAMu. V nadaljevanju članka predstavljamo kako izvajamo inovativne izobraževalne module. Pristop STEAM (Science, Technology, Engineering & Ecology, Arts, and Mathematics - znanost, tehnologija, inženirstvo & ekologija, umetnost in matematika) je nastajajoča disciplina, ki je edinstvena v svoji želji po zagotavljanju celovitega pristopa k izobraževanju.

1 STEAM PRISTOPI IN IZOBRAŽEVANJE

Danes svet razumemo skozi paradigmo tehnologije in znanosti. Živimo v dobi, ki jo zaznamujejo nenehne in temeljite spremembe. Umetnost nam lahko nudi oporo pri razumevanju vseh teh preobrazb in pri razumevanju kompleksnosti sodobnega sveta, ki nas obdaja. Umetnost, ki vključuje znanost, postavlja pod vprašaj naš obstoj in nam na ta način kaže pot naprej. Umetnost ima lahko nekaj pomenov ali sporočil, toda tisto, kar jo dela umetnost, ni le njena vsebina, temveč tudi njen učinek, čutna sila ali slog, s katerim ustvarja dejansko vsebino, ne glede na to, koliko je pomešana z drugimi funkcijami. Potrebno je izpostaviti pomen interakcije med umetnostjo in tehnologijo na eni strani ter pomen kritičnega razmisleka umetnosti o znanosti in tehnologiji na drugi strani za koristen in premišljen razvoj naših informacijskih družb. Vse to je zajeto v izobraževanju STEAM. Izobraževanje STEAM je zasnovano za povečanje znanstvene učinkovitosti in ustvarjalnosti ter povečanje zanimanja in motivacije za znanost, kar pripomore k izboljšanju znanstvene konkurenčnosti.

2 STEAM IZOBRAŽEVANJE KATAPULT ROBOTIKA

Nove tehnologije na začetku 21. stoletja omogočajo vedno večjo stopnjo simbioze med človekom in strojem. Danes najbrž nihče več ne dvomi, da živimo v času, ko roboti postajajo del našega vsakdanjega življenja. V osnovi je robotika interdisciplinarna znanstvena disciplina, ki predstavlja široko področje znanj in ključne razvojne usmeritve na različnih znanstvenih področjih. Lahko rečemo, da je robotika v ožjem smislu zaradi hitrega razvoja znanosti in novih tehnologij, predvsem pa uporabnosti na mnogih novih področjih, že zdavnaj presegla svoj izvorni pomen. Ena izmed pomembnih robotskih smeri v sodobni družbi je tudi razvoj družabne in humanoidne robotike.

Slika 1: Učenje upravljanja robota z možganskim vmesnikom BCI

Prihodnost industrije in družbe bo močno povezana z roboti, zato smo se v Katapult Robotiki odločili, da ne predstavljamo zgolj industrijskih robotov, temveč tudi takšne, ki bodo človeku še precej bližje. Predstavljamo humanoidne robote. Humanoidni roboti so

človeku podobni stroji – roboti. Industrijski roboti predstavljajo kapitalistični inženiring optimizacije gospodarskih koristi, medtem ko humanidni roboti predstavljajo novo vsebino in dodano vrednost znotraj polja robotike.

Tako smo za humanoidna robota NAO razvili identiteti in karakter. Razvili smo robotski osebnosti Evo in Lili. Za robotki Evo in Lili smo razvili več izobraževalnih in demonstrativnih aplikacij s katerimi seznanjamo širšo javnost o humanoidni robotiki. S predstavljanem robotke Eve in Lili ne podajamo znanja zgolj s tehničnega vidika, temveč tudi s humanističnega in umetniškega. Namen tovrstnega izobraževanja je spodbuditi širšo javnost, da razmišlja izven ustaljenih okvirjev, ko gre za uporabo robotov v naši družbi.

Slika 2: Delavnica spoznavanja robotskih tehnologij z osnovnošolskimi otroci

Robotka Eva in Lili sta v zadnjih dveh letih opravili več nastopov v domovih za starejše, šolah in vrtcih. Moderirali sta že nekaj konferenc. Med drugim sta se odlično izkazali tudi v moderatorskem tandemu z novinarjem in voditeljem Igorjem Bergantom. S slovenskim komikom in animatorjem Tilnom Artačem sta pripravili glasbeni nastop in zabavni skeč. Robotka Eva pa je na zaključnem dogodku ob predsedovanju Slovenije EU v Bruslju predstavljala Slovenijo. Tam je obiskovalcem predstavljala slovenske umetnike, športnike in slovenske turistične atrakcije. Svojo nalogo je opravila več kot odlično.

Očaranost nad roboti je zelo različna, odvisno od družbe, kulture in njene zgodovine. Na Zahodu si ob pojmu beseda “robot” še vedno predstavljamo mehanskega terminatorja, ki mu ne gre zaupati; na Japonskem pa so roboti superjunaki in človeški prijatelji. Japonci so tako navdušeni nad roboti, da svojo deželo pogosto imenujejo “kraljestvo robotov” (roboto okoku). Vendar sedaj lahko lahko rečemo, da se stanje v Sloveniji glede ozaveščanja in s tem sprejemanja robotov v družbo spreminja. Opažam, da se je v Sloveniji v zadnjem letu pojavil trend predstavljanja humanoidnih robotov širši javnosti. Tako lahko spoznamo in se družimo s humanoidnimi roboti v Tehnološkem parku Celje, v Vitanjah v centru vesoljskih tehnologij Noordung, ter verjetno še kje. Kajti nismo daleč obdobju, ko bomo obdani z družabnimi roboti za različno rabo: v zdravstvu, rehabilitacijskih centrih, izobraževanju, turizmu in celo v domačih okoljih.

3. STEAM IZOBRAŽEVANJE S.O.S. ŠOLA

S.O.S. šola se zavzema za dobro znanje matematike in je podpora šolarjem, staršem, učiteljem in javni šoli. Z didaktičnimi pristopi, ki temeljijo na povsem konkretni ravni, želimo doseči razumevanje temeljev matematike v prvih razredih osnovne šole in s tem spodbuditi njihovo veselje do te nepogrešljive življenjske veščine in preprečiti zaplete in nezadovoljstvo v višjih razredih. Snujemo in izdelujemo inovativna konkretna matematična učila iz materialov ponovne rabe, robotike in ostalih tehničnih materialov, ki so namenjena ne le demonstraciji, pač pa aktivnemu delu učenca z njimi. S tem S.O.S. šola pripomore k razvoju še kako pomembnega tehniškega kadra.

Slika 3: Delavnica matematike z S.O.S. šola učili

V S.O.S. šoli si že šest let prizadevamo za razumevanje in veselje do matematike. Pri našem delu smo preučili učne načrte, upoštevali mnoge nasvete učiteljev praktikov, preučili 200 letno zgodovino poučevanja matematike v naši deželi in preštudirali 100 tujih učbenikov iz 16 držav za 6,7 in 8 let stare otroke.

S.O.S. šola ima portal sos-sola.si, ki je namenjen v pomoč staršem otrok pri težavah z matematiko v prvih treh razredih osnovne šole. Na S.O.S. šoli imamo veliko nazornih in preprostih učnih pripomočkov za delo v razredu in domačo uporabo. Izvajamo dneve dejavnosti za šole, predavanja za učitelje, izposojamo učne pripomočke, izvajamo počitniške delavnice za šolarje v Katapultu in sobotne delavnice v Tehnoparku Celje. Matematične vsebine povezujemo z najsodobnejšo tehnologijo, z robotko Evo, ki jo ustvarja DDTLab in zna računati v slovenščini. Posneli smo tudi kratke filme, ki učenca pri nakupu učil v tulcih s pomočjo QR kode vodijo do razumevanja pincetnega prijema (1.r), mestne vrednosti števil (2.r) ter celote in njenih delov (3.r).

Glavni vodili S.O.S. šole sta: *Matematika brez svinčnika in papirja* in *Matematiko z rokami delam sam, zato več znam*.

Naša posebnost so matematične zgodbe, kjer s pomočjo glinenih figuric brez pisanja naredimo več kot 30 računov in imajo zato različni tipi učencev veliko možnosti, da materialni svet prevedejo v simbolni svet številk.

Edinstvena posebnost v slovenskem prostoru S.O.S. šole je sodelovanje s Katapult Robotiko, kjer humanoidna robotka Lili računa v slovenskem jeziku in navdušuje za matematiko.

Slika 4: Računanje z robotko Lili

Verjamemo, da razumevanje matematike krepi splošno otrokovo samozavest, širi nabor smeri nadaljevanja šolanja, povečuje veselja do naravoslovja in do poklicev v gospodarstvu, ki jih že danes primanjkuje.

Naš namen pa je pri razumevanju matematike povečati učinkovitost in zmanjšati zapletenost ter šolarjem pokazati njeno uporabno vrednost v vsakdanjem življenju.

3 ZAKLJUČEK

Izobraževanje, umetnost ter znanost niso hermetični ali neodvisni sistemi. Vse se neizogibno prepleta z drugimi družbenimi podsistemi, torej tudi s tehnološkimi in gospodarskimi, zato so izobraževalni programi STEAM usmerjeni veliko širše kot le na področje umetniških, tehnoloških in znanstvenih raziskav. V zlitju tehnologije, naravoslovja, matematike in umetnosti se skriva izjemen potencial tudi za gospodarski razvoj.

Viri:

[1] Khine, Myint Swe, Areepattamannil, Shaljan (Eds.), STEAM education: Theory and practice. Springer, 2019
[2] Claudia Schnugg, Creating Artscience Collaborations: Bringing Value to Organisations. Palgrave Macmillan, 2019
[3] Tehnopark Celje, 1. STEAM Konferenca, Zabavni STEAM kot inovativno učno okolje, marec 2023
[4] Maša Jazbec, STEAM Education in the Case of Engineering (Empowerment Informatics: Tsukuba University, Japan) and the Art Studies (Interface Cultures: University of Arts and Design Linz, Austria), Article in the book: Transformation of Higher Education in the Age of Society 5.0, Springer, 2022 ISBN 978-3-031-15526-0 https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-15527-7_3

BIOKOMPOZIT IZ ODPADNIH KOKOSOVIH VLAKEN IN RECIKLIRANE TERMOPLASTIČNE MATRICE

Silvester BOLKA[1], Teja PEŠL[1], Tamara ROZMAN[1], Natalija ŠTUMPFL[2], Primož MLAČNIK[2], Blaž NARDIN[1]

[1]Fakulteta za tehnologijo polimerov
[2]KO-SI d.o.o.

IZVLEČEK

V prispevku bomo predstavili razvoj biokompozita iz odpadnih kokosovih vlaken, ki smo jih uporabili kot ojačitev za reciklirano termoplastično matrico na osnovi polietilena nizke gostote (rPE-LD) v prvem primeru in na osnovi polimlečne kisline (PLA) v drugem primeru. Odpadna kokosova vlakna so tehnološki odpad podjetja KO-SI. Pri izdelavi smo poleg predelovalnih dodatkov uporabili tudi kompatibilizator za boljše medfazne interakcije med (reciklirano) termoplastično matrico in vlakni.

V prvem primeru smo kompavndiranje izvedli na Fakulteti za tehnologijo polimerov na dvopolžnem ekstruderju. V rPE-LD matrico smo dodali 50 % odpadnih kokosovih vlaken in 8 % kompatibilizatorja. Za izvedbo karakterizacije smo preizkušance, skladne z oblikama ISO 527 tip 1BA in ISO 178 oz. ISO 179, pripravili s postopkom brizganja. Kot referenco smo uporabili rPE-LD. Togost in trdnost kompozita smo uspeli dvigniti, hkrati se je drastično znižal raztezek pri pretrgu, kar je bilo tudi pričakovano. Udarna žilavost je bila presenetljivo zelo visoka, saj ni prišlo do porušitve. Temperatura tališča je ostala skoraj nespremenjena. Dobili pa smo trostopenjski razpad, kjer so pri najnižji temperaturi razpadla odpadna kokosova vlakna.

Tudi v drugem primeru smo kompavndiranje izvedli na Fakulteti za tehnologijo polimerov na dvopolžnem ekstruderju. V PLA matrico smo dodali 20 % odpadnih kokosovih vlaken in 5 % kompatibilizatorja. Za izvedbo karakterizacije smo preizkušance, skladne z oblikama ISO 527 tip 1BA in ISO 178 oz. ISO 179, pripravili s postopkom brizganja. Pri predelavi je bila maksimalna temperatura 180 °C, da odpadna kokosova vlakna niso degradirala. Z uporabljeno recepturo smo uspeli ohraniti mehanske lastnosti biokompozita na nivoju inženirskih termoplastov. Z uporabo ustreznega kompatibilizatorja smo uspeli tudi ohraniti žilavost na dokaj visokem nivoju. Temperatura steklastega prehoda in temperatura tališča sta ostali nespremenjeni. Dobili pa smo dvostopenjski razpad, kjer so pri nižji temperaturi razpadla odpadna kokosova vlakna, pri tem pa je ostal pepel po žarjenju, kot posledica anorganskega deleža v odpadnih kokosovih vlaknih. Z materialom smo izvedli teste ekstruzije, kjer smo pripravili dva različna tipa ekstrudiranih izdelkov.

Delo je rezultat večletnega uspešnega sodelovanja Fakultete za tehnologijo polimerov in podjetja KO-SI.

1 UVOD

Komercialno dostopni biorazgradljivi PLA je prva izbira kot rešitev za krožno gospodarstvo v številnih sektorjih, med drugim zelo pogosto v embalaži.

Biokompoziti, ki vsebujeno bioosnovano in biorazgradljivo termoplastično matrico oz. reciklirano termoplastično matrico vedno bolj pridobivajo na pomembnosti, pri predelavi plastike, še posebej zaradi manjšega ogljičnega odtisa in v primeru uporabe reciklirane termoplastične matrice zaradi usmeritve v krožno gospodarstvo. Krožno gospodarstvo pa je še posebej učinkovito, če je izvedeno lokalno, kar pomeni, da dobimo surovino za izdelavo biokompozita v lokalnem okolju, kjer potem biokompozit tudi kompavndiramo in predelamo v nadaljevanju v končni izdelek. Da bi izboljšali tudi trdnost in v čim večji meri ohranili žilavost biokompozita, je potrebno zagotoviti dobre medfazne interakcije med termoplastično matrico in dodanimi naravnimi vlakni. Prva možnost je površinska modifikacija naravnih vlaken, kjer je obdelava kokosovih vlaken s kromovim sulfatom in natrijevim bikarbonatom zvišala tako mehanske kot toplotne lastnosti [1]. Druga možnost je uporaba kompatibilizatorja pri kompavndiranju. Kot odličen kompatibilizator med kokosovimi vlakni in nepolarno termoplastično matrico se je pokazal termoplastični elastomer, ki s svojimi

Silvester BOLKA[1], Teja PEŠL[1], Tamara ROZMAN[1], Natalija ŠTUMPFL[2], Primož MLAČNIK[2], Blaž NARDIN[1]
[1]Fakulteta za tehnologijo polimerov
[2]KO-SI d.o.o.

funkcionalnimi skupinami (izocianatne skupine) zagotavlja dobre interakcije s površino kokosovih vlaken (ligninom) [2].

V naši študiji smo se odločili za uporabo termoplastičnega elastomera kot kompatibilizatorja na osnovi stiren etilen butilen stirena graftiranega z malein anhidridom (SEBS-*g*-MA) in dveh različnih termoplastičnih matric in sicer rPE-LD in PLA.

2 EKSPERIMENTALNI DEL

2.1 Uporabljeni materiali

rPE-LD je bil mlevec reciklata skrčljivih folij, ki smo ga dobili od podjetja Adria Polymers, Hrvaška. PLA nam je dobavilo podjetje KO-SI in sicer je bil material Plarenew 602 Grade PLA, dobavitelja Futerro S.A., Belgija. Komercialno dostopni SEBS-*g*-MA s trgovskim imenom Taipol SEBS 7126 smo kupili od podjetja TSRC Corporation, Tajvan. Antioksidant (AT 10) smo kupili pri Amik Italia S.p.A iz Italije. Odpadna kokosova vlakna nam je dobavilo podjetje KO-SI.

2.2 Priprava vzorcev

Izdelali smo 7 serij vzorcev in sicer je bil vzorec PLAPC kot referenca, kjer smo uporabili mešanico PLA in PC z vsemi dodatki, vendar brez dodatka NCC. V Tabeli 1 je prikazana sestava vzorcev.

Tabela 1: Sestava vzorcev za kompavndiranje

Vzorec	rLD-PE (%)	PLA (%)	SEBS-*g*-MA (%)	AT 10 (%)	Kokosova vlakna (%)
rPE-LD	100	-	-	-	-
rPE-LD+kokos	41,5	-	8	0,5	50
PLA+kokos	-	74,7	5	0,3	20

Za oba primera kompavndiranja so bili materiali ločeno zmešani in ekstrudirani na dvopolžnem ekstruderju Labtech LTE 20-44. Premer polžev je bil 20 mm, razmerje L/D 44:1, obrati 400 vrtljajev na minuto, temperaturni profil je naraščal od lijaka (160 °C) do šobe (180 °C). Po kompavndiranju sta bila oba proizvedena filamenta ohlajena v vodni kopeli in narezana na pelete dolžine približno 5 mm in premera 3 mm.

Brizganje je potekalo na stroju Krauss Maffei 50-180 CX s premerom polža 30 mm. Temperaturni profil je naraščal od lijaka (165 °C) do šobe (180 °C). Temperatura orodja je bila nastavljena na 45 °C, čas hlajenja pa na 10 s. Protitlak je bil nastavljen na 195 barov, obrati polža pa na 175 vrtljajev na minuto. Hitrost brizganja je bila nastavljena na 50 mm/s, za zadnja 2 mm pa na 20 mm/s.

2.3 Laboratorijski testi

Upogibni in natezni preskusi so bili opravljeni na napravi Shimadzu AG-X plus v skladu z ISO 178 oziroma ISO 527-1. Za vsak vzorec je bilo opravljenih pet meritev. Pri nateznih preskusih smo vrednotili natezni E modul (E_t), natezno trdnost (σ_m) in raztezek pri pretrgu (ε_{tb}). Pri upogibnem testu smo vrednotili upogibni E modul (E_f) in maksimalno upogibno trdnost (σ_{fM}) ter upogib pri maksimalni upogibni trdnosti (ε_{fM}). Termo-dinamične lastnosti smo vrednotili z napravo Perkin Elmer DMA 8000. Vzorce smo segrevali z 2 °C/min od 25 °C do 100 °C v zračni atmosferi. V načinu z dvojno prižemo smo uporabili frekvenco 1 Hz in amplitudo 20 μm. Toplotne meritve smo vrednotili z diferenčnim dinamičnim kalorimetrom (DSC 2, Mettler Toledo) v dušikovi atmosferi (20 mL/min). Temperaturo vzorca smo povečevali od -50 do 190 °C za izvedbe z rPE-LD in od -70 do 210 °C za izvedbo s PLA s hitrostjo segrevanja 10 °C/min, vzorec pa je bil 5 minut v staljenem stanju, da se je izbrisala njegova toplotna predzgodovina. Po ohlajanju s hitrostjo 10 °C/min smo vzorce ponovno segreli na 190 °C (rPE-LD) oz. na 210 °C (PLA) s hitrostjo 10 °C/min. Temperaturo kristalizacije (T_c), kristalizacijsko entalpijo (H_c), temperaturo taljenja (T_m) in talilno entalpijo (H_m) smo vrednotili pri ohlajanju in drugem segrevanju. Za rPE-LD biokompozit smo termogravimetrične analize (TGA) izvedli na instrumentu Mettler Toledo TGA/DSC 3+. Vzorec smo segrevali od 40 °C do 550 °C, s hitrostjo segrevanja 10 °C/min, v dušikovi atmosferi (20 mL/min), nato

pa izotermno držali pri 550 °C 20 min v kisikovi atmosferi (20 mL/min). Za PLA biokompozit smo termogravimetrične analize (TGA) izvedli na instrumentu Mettler Toledo TGA/DSC 3+. Vzorec smo segrevali od 40 °C do 550 °C, s hitrostjo segrevanja 10 °C/min, v dušikovi atmosferi (20 mL/min), nato pa od 600 °C do 900 °C s hitrostjo segrevanja 10 °C/min v kisikovi atmosferi (20 mL/min). Vrednotili smo temperaturo degradacije in odstotek razpada. Udarni preizkus smo izvedli na napravi Dongguan Liyi Test Equipment, tip LY-XJJD5, v skladu s standardom ISO 179. Razdalja med podporama je bila 60 mm, za udarne preskuse pri rPE-LD biokompozitih smo uporabili nihalo z energijo 5 J, pri PLA biokompozitih nihalo z energijo 1 J in za zarezno udarne preskuse nihalo z energijo 1 J. Meritve indeksa tečenja taline smo izvedli na napravi Dongguan Liyi Test Equipment, tip MFI LY-RR. Za biokompozite z rPE-LD smo meritve izvedli pri temperaturi 190 °C in z utežjo 2,16 kg. Za biokompozite s PLA smo meritve izvedli pri temperaturi 210 °C in z utežjo 2,16 kg.

3 REZULTATI

Dodatek 20 % odpadnih kokosovih vlaken v rPE-LD matrico vpliva na zvišanje togosti in trnosti, drastično zniža raztezek pri pretrgu (Tabeli 2 in 3). Hkratni dvig togosti in trdnosti pomeni, da smo s pomočjo kompatibilizatorja SEBS-*g*-MA (8 %) dosegli dobre medfazne interakcije med odpadnimi kokosovimi vlakni in rPE-LD matrico. Dodatek kompatibilizatorja je bil zadosti nizek, da sta se dvignili tako togost kot trdnost biokompozita z dodanimi 50 % odpadnih kokosovih vlaken.

Dodatek 20 % odpadnih kokosovih vlaken v PLA matrico (Tabeli 2 in 3) je ohranil togost na zelo visokem nivoju (2,9 GPa), dvignil trdnost na 65 MPa (v tehničnem listu je navedena natezna trdnost 50 MPa) in znižal raztezek pri pretrgu na 3,7 %. Tudi pri tem biokompozitu je dodatek kompatibilizatorja SEBS-*g*-MA, katerega smo dodali 5 %, omogočil dobre medfazne interakcije med odpadnimi kokosovimi vlakni in PLA matrico, hkrati pa je bil dodatek kompatibilizatorja še vedno zadosti nizek, da ni vplival na znižanje togosti in trdnosti. Kombinacija 5 % kompatibilizatorja in 20 % dodanih odpadnih kokosovih vlaken v PLA matrico je receptura, ki zagotavlja visoko togost, trdnost ob hkratni zadovoljivi žilavosti.

Tabela 2: Zbrani rezultati upogibnih testov

Vzorec	E_f (GPa)	σ_{fM} (MPa)	ε_{fM} (%)
rPE-LD	-	-	-
rPE-LD+kokos	0,5±0,1	13,6±0,2	7,2±0,1
PLA+kokos	2,9±0,1	64,6±0,3	3,71±0,10

Tabela 3: Zbrani rezultati nateznih testov

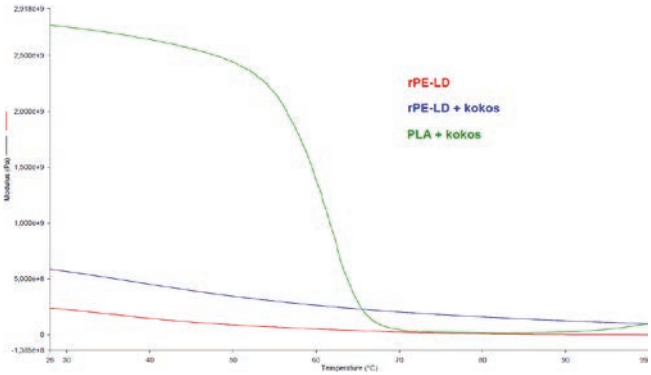
Vzorec	E_t (GPa)	σ_m (MPa)	ε_{tb} (%)
rPE-LD	0,3±0,2	10,3±0,6	221,4±120,2
rPE-LD+kokos	0,7±0,2	12,3±0,2	6,2±0,2
PLA+kokos	2,9±0,1	64,6±0,3	3,7±0,1

Dinamični E modul (Slika 1) rPE-LD močno naraste po celotnem temperaturnem intervalu, ko dodamo 50 % odpadnih kokosovih vlaken in sicer od 0,25 GPa pri rPE-LD na 0,57 GPa pri biokompozitu z odpadnimi kokosovimi vlakni. Pri dodanih 20 % kokosovih vlaken v PLA matrico, je pri dinamičnem E modulu viden steklasti prehod okoli 60 °C, naraščanje dinamičnega E modula od 80 °C naprej predstavlja hladno kristalizacijo biokompozita pri segrevanju.

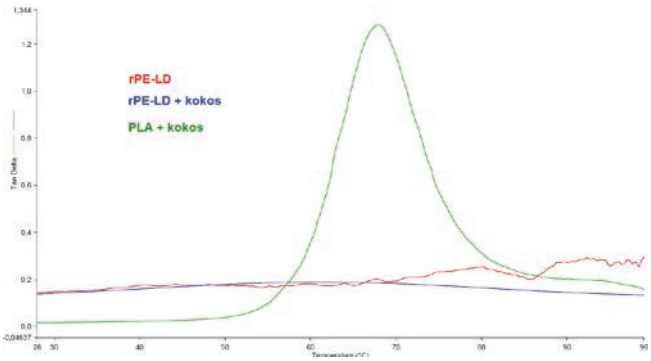
Faktor izgub (Slika 2) za biokompozit z rPE-LD matrico je konstanten po celotnem izmerjenem temperaturnem intervalu. Dodatek odpadnih kokosovih vlaken v rPE-LD matrico le to temperaturno stabilizira in prepreči viskozno obnašanje od 70 °C naprej, kjer pri čisti rPE-LD matrici opazimo naraščanje faktorja izgub v primerjavi s faktorjem izgub biokompozita z odpadnimi kokosovimi vlakni.

Pri biokompozitu z odpadnimi kokosovimi vlakni in PLA matrico je vrh faktorja izgub pri 68 °C, kar predstavlja steklasti prehod biokompozita. Višina faktorja izgub je pri steklastem prehodu 1,28, kar je posledica dodanega kompatibilizatorja SEBS-*g*-MA, ki poleg izboljšanja medpovršinskih interakcij med odpadnimi kokosovimi vlakni in PLA matrico dodatno še zelo dobro duši vibracije.

Silvester BOLKA[1], Teja PEŠL[1], Tamara ROZMAN[1], Natalija ŠTUMPFL[2], Primož MLAČNIK[2], Blaž NARDIN[1]
[1]Fakulteta za tehnologijo polimerov
[2]KO-SI d.o.o.



Slika 1: Rezultati meritev dinamičnega E modula



Slika 2: Rezultati meritev faktorja izgub

Dodatek odpadnih kokosovih vlaken ne vpliva na temperaturo tališč pri rPE-LD biokompozitu, le talilna entalpija je za rPE-LD delež višja kot pri rPE-LD. To pomeni, da delujejo odpadna kokosova vlakna kot nukleacijska jedra za rPE-LD matrico in malenkostno zvišajo stopnjo kristaliničnosti in sicer iz 40 % za čisto rPE-LD matrico na 42 % za biokompozit iz odpadnih kokosovih vlaken in rPE-LD matrico. Tako pri čisti rPE-LD matrici kot biokompozitu iz odpadnih kokosovih vlaken in rPE-LD je prisoten tudi majhen delež polipropilena s tališčem 159 °C (Tabela 4).

Pri biokompozitu z odpadnimi kokosovimi vlakni in PLA matrico je talilna entalpija le malenkost višja od entalpije hladne kristalizacije, kar pomeni, da biokompozit z odpadnimi kokosovimi vlakni in PLA matrico pri ohlajanju ne kristalizira in ostane zamrznjena amorfna morfologija. Steklasti prehod je pri 60 °C, tališče je pri 160 °C. Do hladne kristalizacije pri segrevanju pa pride pri 117 °C (Tabela 4).

Tabela 4: Zbrani rezultati za drugo segrevanje pri DSC testih

Vzorec	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	ΔH_{cc} (J/g)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	ΔH_m (J/g)	T_{m3} (°C)
rPE-LD	-	-	-	110	123	117,0	159
rPE-LD+kokos	-	-	-	110	123	51,2	159
PLA+kokos	59,8	117	27,4	160	-	28,1	-

Pri biokompozitu z odpadnimi kokosovimi vlakni in rPE-LD matrico (Tabela 5) dobimo dvostopenjski razpad. Pri 336 °C razpade del odpadnih kokosovih vlaken, pri 476 °C razpade rPE-LD matrica. Po testu ostane 16,5 % anorganskega ostanka, ki je po vsej verjetnosti ostanek od anorganskih gradnikov odpadnih kokosovih vlaken. Odpadna kokosova vlakna vplivajo na znižanje temperature degradacije (za 3 °C) rPE-LD matrice pri biokompozitu z odpadnimi kokosovimi vlakni in rPE-LD matrico.

Pri biokompozitu iz odpadnih kokosovih vlaken in PLA matrico (Tabela 5) je razpad dvostopenjski. Glavni razpad je pri 348 °C, kjer razpade 87,4 % biokompozita. Prvi razpad je torej razpad tako odpadnih kokosovih vlaken kot PLA matrice. Drugi razpad je pri 455 °C, kjer razpade 11,4 % biokompozita. Anorganskega ostanka je 1,2 %.

Temperatura degradacije odpadnih kokosovih vlaken je višja pri biokompozitu s PLA matrico v primerjavi z rPE-LD matrico, kljub dejstvu, da je temperatura degradacije rPE-LD matrice veliko višja kot temperatura degradacije PLA matrice.

Tabela 5: Zbrani rezultati TGA testov

Vzorec	T_{d1} (°C)	Razpad$_1$ (%)	T_{d2} (°C)	Razpad$_2$ (%)	Ostanek (%)
rPE-LD	-	-	479	99,3	0,7
rPE-LD+kokos	336	29,7	476	53,8	16,5
PLA+kokos	348	87,4	455	11,4	1,2

Biokompozit iz odpadnih kokosovih vlaken in rPE-LD matrice (Tabela 6) ima še vedno odlično udarno žilavost, saj pri testu ne pride do porušitve vzorca. To pomeni, da je uporabljen termoplastični elastomer kot kompatibilizator ne le izboljšal medfazne interakcije med odpadnimi kokosovimi vlakni in rPE-LD matrico, ampak je hkrati tudi izboljšal žilavost biokompozita in s tem odigral vlogo plastifikatorja za biokompozit z dodanimi 50 % odpadnih kokosovih vlaken.

Silvester BOLKA[1], Teja PEŠL[1], Tamara ROZMAN[1], Natalija ŠTUMPFL[2], Primož MLAČNIK[2], Blaž NARDIN[1]
[1]Fakulteta za tehnologijo polimerov
[2]KO-SI d.o.o.

Zarezna udarna žilavost je visoka in znaša 13,1 kJ/m^2.

Udarna žilavost biokompozita z odpadnimi kokosovimi vlakni in PLA matrico (Tabela 6) znaša 11,6 kJ/m^2, zarezna udarna žilavost znaša 3,6 kJ/m^2. Vrednosti so za biokompozit s PLA matrico zelo visoke, kar pomeni da je tudi pri tem biokompozitu iz odpadnih kokosovih vlaken in PLA matrice termoplastični elastomer kot kompatibilizator ne samo zvišal medfazne interakcije med odpadnimi kokosovimi vlakni in PLA matrico ampak hkrati prevzel vlogo plastifikatorja za biokompozit.

Tabela 6: Zbrani rezultati za teste udarne iz zarezne udarne žilavosti

Vzorec	**Udarna žilavost (kJ/m^2)**	**Zarezna udarna žilavost (kJ/m^2)**
rPE-LD	-	-
rPE-LD+kokos	Ne poči	13,1±0,4
PLA+kokos	11,6±2,0	3,6±0,4

Indeks tečenja taline (Tabela 7) pri rPE-LD je zelo nizek (0,25 g/10 min), se pa pri dodajanju odpadnih kokosovih vlaken praktično ne spremeni (0,26 g/10 min).

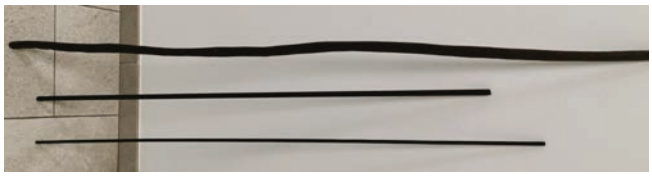
Indeks tečenja taline za biokompozit iz odpadnih kokosovih vlaken in PLA matrice je visok in znaša 11,2 g/10 min. .

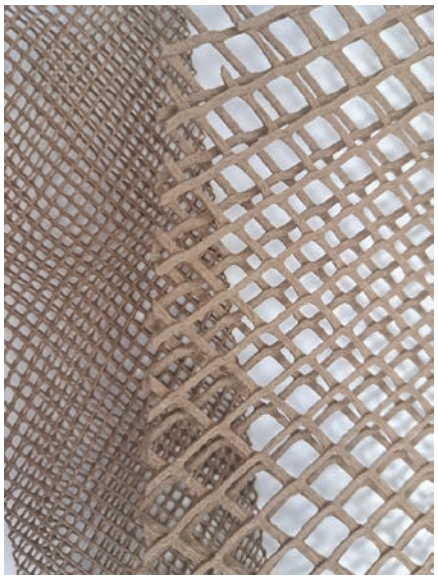
Tabela 7: Zbrani rezultati za MFI teste

Vzorec	**MFI (g/10 min)**
rPE-LD	0,25±0,02
rPE-LD+kokos	0,26±0,02
PLA+kokos	11,18±0,60

4 SKLEP

Podjetje KO-SI (ki ima veliko odpadnih kokosovih vlaken) in Fakulteta za tehnologijo polimerov smo skupaj zasnovali dve izvedbi biokompozitov, kjer smo odpadna kokosova vlakna dodali tako recikliranemu termoplastu rPE-LD kot bioosnovanem in biorazgradljivemu PLA. Kokosova vlakna delujejo kot ojačevalo, tako da sta dobljena biokompozita uporabna v številnih aplikacijah. Prve demonstratorje iz odpadnih kokosovih vlaken in PLA matrice smo izdelali v podjetju Uteksol (Slika 3), kjer smo ekstrudirali cevi, druge demonstratorje iz odpadnih kokosovih vlaken in PLA matrice smo izdelali v podjetju MAAR, kjer smo ekstrudirali mrežice (Slika 4).


Slika 3: Ekstrudirane palice


Slika 4: Ekstrudirane mrežice

Zaradi ustreznega kompatibilizatorja, ki je hkrati izboljšal medpovršinske interakcije med odpadnimi kokosovimi vlakni in termoplastično matrico (tako rPE-LD, kot PLA) in obenem močno zvišal žilavost dobljenih biokompozitov, smo biokompozitom uspeli dvigniti tako togost kot trdnost, hkrati pa ohraniti žilavost na zelo visokem nivoju.

Viri:

[1] Mir SS, Hasan M, Hasan SMN, et al. Effect of chemical treatment on the properties of coir fiber reinforced polypropylene and polyethylene composites. Polym Composites 2015; 38(7): 1259–1265.

[2] Guillen-Mallette, J.,Valadez-Hozalez, A., Rosado-Sanchez, S. I.: Recycled thermoplastic polyurethane as a coupling agent in automotive polypropylene compounds with coconut fibers, Journal of Thermoplastic Composite Materials (2022), 0(0).

Silvester BOLKA[1], Teja PEŠL[1], Tamara ROZMAN[1], Natalija ŠTUMPFL[2], Primož MLAČNIK[2], Blaž NARDIN[1]
[1]Fakulteta za tehnologijo polimerov
[2]KO-SI d.o.o.

IZZIVI PRI RAZVOJU ELEKTRONIKE ZA OSVETLJEVANJE AVTOMOBILSKIH PANELOV

Luka URBAS, Andrej KREJAN
HELLA Saturnus Slovenija d.o.o.

IZVLEČEK

Članek opisuje izzive pri razvoju in industrializaciji elektronskih vezij za osvetljene avtomobilske panele. Predstavljene so splošne karakteristike osvetljenega avtomobilskega panela, nato pa različne možnosti osvetljevanja z njihovimi pozitivnimi in negativnimi lastnostmi, s poudarkom na vplivu na kompleksnost rokovanja v produkcijski liniji svetlobnega panela.

1 UVOD

Neverjetni oblikovni presežki skozi celotno zgodovino avtomobilizma jemljejo dah in navdušujejo slehernega človeka, različni novi materiali, procesi oblikovanja in najnovejše naprave za krivljenje pločevine pa v zadnjih nekaj letih omogočajo oblike, ki so bile pred nekaj desetletji mogoče samo v sanjah. Serijska proizvodnja električnih vozil, ki za hlajenje motorja ne potrebujejo vstopnih hladilnih odprtin med obema žarometoma, je odprla dodatne možnosti za oblikovalce, ki so odprtine najprej zapirali s klasičnimi pokrovi hladilnika. Kasneje so sledili pokrovi v barvi vozila, nato razne dekorativne folije, dodatek pokrova radarja z radarjem in končno tudi svetlobne funkcije. Regulativa po različnih področjih sveta še ni popolnoma enotna glede legalnosti uporabe dodatnih svetlobnih funkcij, zato so se le te najprej pojavljale kot statični dodatki svetlobnim funkcijam v žarometih. Kasneje so sledile animacije v eni liniji in tudi ploskovne animacije v dveh dimenzijah. Različne prostorske omejitve v povezavi z ukrivljenostjo površine v vseh smereh in želja po dvodimenzionalnih animacijah zelo otežijo koncept osvetljevanja, ki je opisan v nadaljevanju.

2 OPIS SVETLOBNIH TELES IN NJIHOVIH FUNKCIJ NA AVTOMOBILIH

Svetlobna telesa na vozilih so bila v času žarnic običajno omejena na žaromete, zadnje združene luči, meglenke in tablične svetilke. Poudarek je bil na izpolnjevanju zakonsko predpisanih svetlobnih funkcij, kot so smerokaz, kratki in dolgi pramen itd. Odkritje LED (Light Emitting Diode) diod, ki so dimenzijsko veliko manjše kot žarnice, pa je omogočilo več svobode pri oblikovanju svetil in njihovo miniaturizacijo, posledično pa tudi možnost razvoja dekorativnih svetil. Ta svetila niso nujno potrebna za delovanje avtomobila, imajo pa velik doprinos k privlačnosti vozila. Zahteve za dekorativna svetila tako niso povezana s funkcijsko varnostjo, ampak predvsem z lepim izgledom.

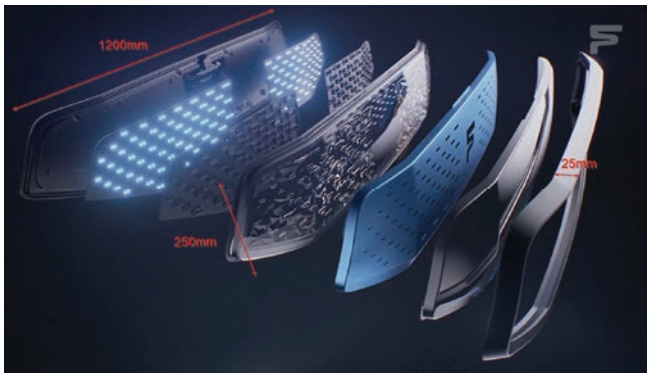
Slika 1: Škoda Enyaq s sprednjim osvetljenim panelom v celoti razvitim v HELLA Saturnus Slovenija d.o.o. [1]

Slika 2: Forvia HELLA predrazvoj sprednjega osvetljenega panela [2]

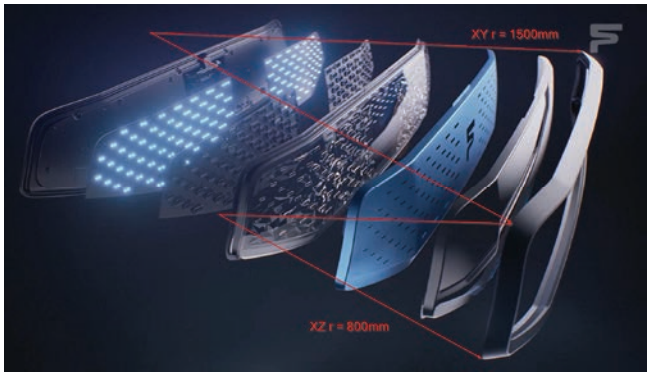
3 GEOMETRIJSKE, OPTIČNE IN ELEKTRIČNE ZAHTEVE PRI DIZAJNIRANJU AVTOMOBILSKIH PANELOV

Sprednji del je vedno bil prepoznavni atribut avtomobila, zato oblikovalci včasih zahtevajo oblike in dimenzije, ki so težko izvedljive. Za lažjo predstavo si bomo ogledali realni model sprednjega dela vozila, ki predstavlja potencialno obliko panela. Le ta dosega dolžino približno 1200 mm in širino približno 250 mm, krivinski radij v XY ravnini je približno 1500 mm in v XZ ravnini približno 800 mm. Tudi globina panela je omejena in lahko dosega le približno 25 mm po celotnem obodu panela.

Slika 3: Forvia HELLA sprednji osvetljeni panel [2]



Slika 4: Približne mere panela [2]



Slika 5: Približni radiji panela v različnih ravninah [2]

Pri dekorativnih svetilkah si kupci pogosto želijo nevtralen izgled v izključenem stanju. Ob vklopu svetilke tako svetloba prodre skozi površino v barvi karoserije ali celo skozi površino kovinskega izgleda (kromiran izgled). Takšne površine seveda zelo slabo presevajo svetlobo, zato moramo uporabiti tudi 10x močnejše svetlobne vire kot bi jih potrebovali sicer.

Slika 6: Izgled osvetljenega panela podnevi in ponoči [2]

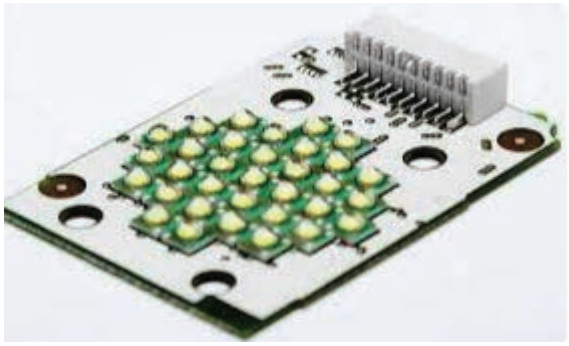
3 MOŽNOSTI OSVETLITVE IN PROBLEM PRI MANIPULACIJI

Pri velikoserijskih izdelkih v avtomobilski industriji igrata pomembno vlogo nizka cena in robustnost. Koncept s svetlobnimi vodniki in vezji v zgornjem ter spodnjem delu panela, ki omogočajo 1D animacije levo in desno, je sicer cenovno ugoden, ne omogoča pa 2D animacije. Za to potrebujemo elektronski koncept z LED diodo usmerjeno proti opazovalcu oz. pravokotno na sprednjo površino panela z dodatno optiko pred LED diodo, ki svetlobo ustrezno preoblikuje v homogen izsevan videz. Zaradi geometrijskih

omejitev je tak elektronski koncept možno izvesti na dva načina, in sicer z uporabo standardnih FR4 (Flame Retardant) vezij ali z uporabo FPC (Flexible Printed Circuit) vezij.

3.1 DVOSLOJNA FR4 VEZJA

Prvi način je uporaba klasičnih dvoslojnih FR4 vezij, ki so cenovno ugodna, robustna in preizkušena tehnologija.

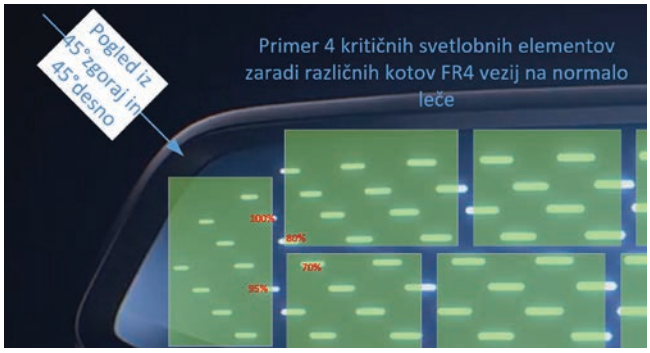


Slika 7: Primer FR4 vezja z LED diodami [3]

FR4 vezja v takem sistemu imajo dodatne prednosti pred FPC vezji. Prva prednost je dobra termalna razporeditev vročih točk, ki se pojavljajo v okolici gonilnikov LED diod, saj se velike bakrene površine lahko uporabijo kot hladilnik. Druga velika prednost je populacija in programiranje gonilnika LED diod z nastavitvami za uporabljen LED svetlobni razred direktno na SMT liniji. LED diode imajo običajno v isti številki komponente 3 različne svetlobne razrede, kar po domače povedano pomeni, da lahko tri različne LED diode pri istem toku svetijo približno 15% več ali manj in lahko povzročijo nehomogen videz svetlobnega telesa. Te razlike mora elektronsko vezje izravnati, npr. s programiranjem posameznega odmika v gonilnike LED diod. Največja prednost FR4 vezij pred FPC vezji pa je v njihovi trdnosti in posledičnem enostavnem rokovanju z njimi, kar omogoča cenejšo opremo in lažjo montažo vezij v svetlobno telo na produkcijski liniji.
Žal pa je trdnost FR4 vezij v primeru ukrivljenosti sprednjega panela tudi njihova največja slabost, saj je potrebno zaradi geometrijskih omejitev panela in zahtev strank po homogenem izgledu panela iz različnih kotov opazovalca zagotavljati čim manjši kot normale LED diode na normalo sprednje leče. Slednje zahteva drobljenje elektronike na več FR4 vezij. Taka razdrobljenost v povezavi s stroški manipulacije in z dodatnimi kablažami, potrebnimi za medsebojno povezavo FR4 vezij, postane cenovno manj ugodna od FPC vezij.

Slika 8: Iskanja kompromisa med najboljšim optičnim izgledom in drobljenjem FR4 vezij

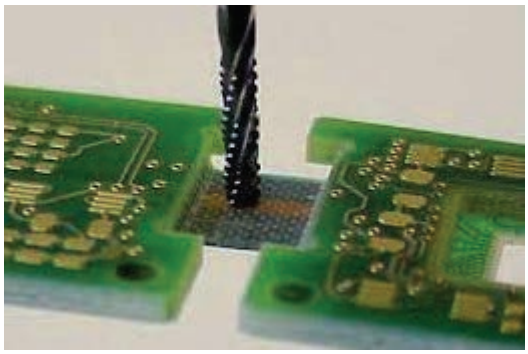
Ko iščemo kompromis z dovolj majhnim številom FR4 vezij, ki bi še zagotavljalo ustrezno homogenost sprednjega panela, so najbolj kritična področja na stičiščih posameznih FR4 vezij. Na teh mestih dobimo približno 30% razlike v izsevani svetlobi pod kotom gledanja 45° s strani in 45° od zgoraj. Ker je kot gledanja opazovalca zelo velik in ker ima človeško oko logaritmično percepcijo svetlobe, teh 30% razlike med sosednjimi svetlobnimi segmenti v realnosti ne izgleda zelo slabo, so pa razlike vsekakor vidne.



Slika 9: Pogled zunanjega opazovalca iz kota 45° od zgoraj in 45° iz desne in linearna skala izsevane svetlobe iz šterih kritičnih LEDic na stiku FR4 vezij

Ena izmed rešitev, ki bi zmanjšala število potrebnih kablaž za povezavo med FR4 vezji je bila tudi rezkanje po Z osi, kjer z rezkarjem zarežejo v približno 4/5 FR4 vezja kar omogoča pregib vezja pod določenim kotom pod nadzorovanimi parametri. Žal je število pregibov omejeno na približno enega do dva, poveča pa se tudi strošek rokovanja in potrebne opreme za montažo vezij. Zaradi prevelike trodimenzionalne ukrivljenosti panela, je bila rešitev z rezkanjem

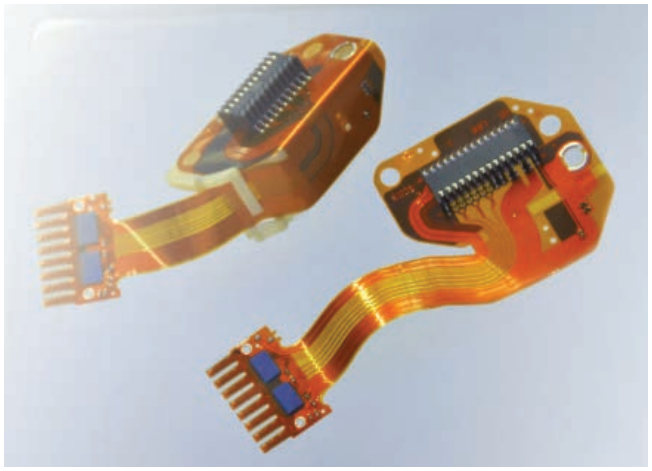
po Z osi opuščena, saj omogoča krivljenje v samo dveh dimenzijah, tako da doprinos v našem primeru ni bil dovolj dober.



Slika 10: Primer rezkanja po Z osi [4]

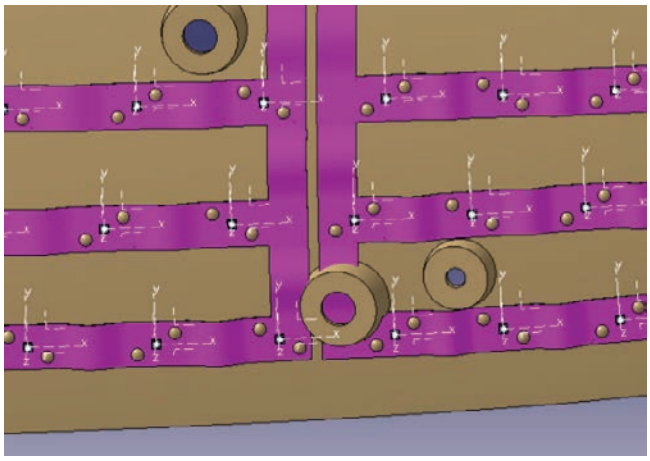
3.2 FPC VEZJA

Pri FPC vezjih je izolator izdelan iz tanke folije, kar daje FPC vezjem gibljivost in s tem dodatne prednosti, žal pa so s tem povezane tudi nekatere slabosti.



Slika 11: Primer FPC vezja [5]

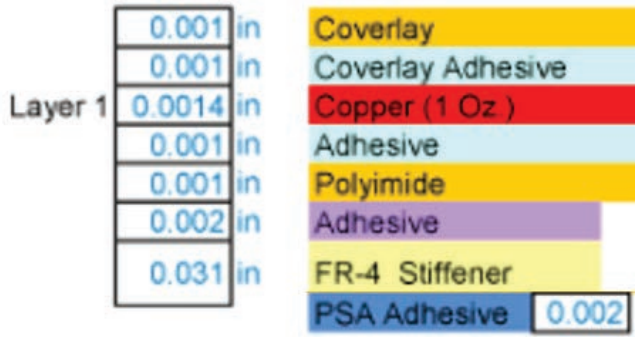
Ena izmed prednosti je seveda oblikovanje FPC vezja glede na zahtevano zvitost prednje leče, s katerim dosežemo usklajenost normale LED diode z normalo leče in posledično homogen izgled izdelka. Zavoljo zvitosti leče v treh dimenzijah moramo tudi pri FPCu uporabiti določene trike pri oblikovanju, saj se tudi gibljiva folija ne zvija poljubno v vseh treh dimenzijah. Tako so naši razvojni inženirji uporabili obliko črke E s katero lahko sledimo ukrivljenosti sprednje leče v vseh treh dimenzijah. Prednost take oblike je tudi boljši izkoristek panela, saj lahko iz enega panela za izdelavo FPC vezij dobimo levo in desno vezje v panelu tako, da dva kosa »E« oblike zložimo enega v drugega. S tako obliko se sicer poveča zahtevnost orodij za rokovanje z vezji in pritrjevanje na pod-strukturo, vendar je zaradi prihranka pri ceni taka oblika vseeno smiselna.



Slika 12: »E« oblika FPC vezij, ki se lahko zložijo v isti panel za cenejšo izdelavo

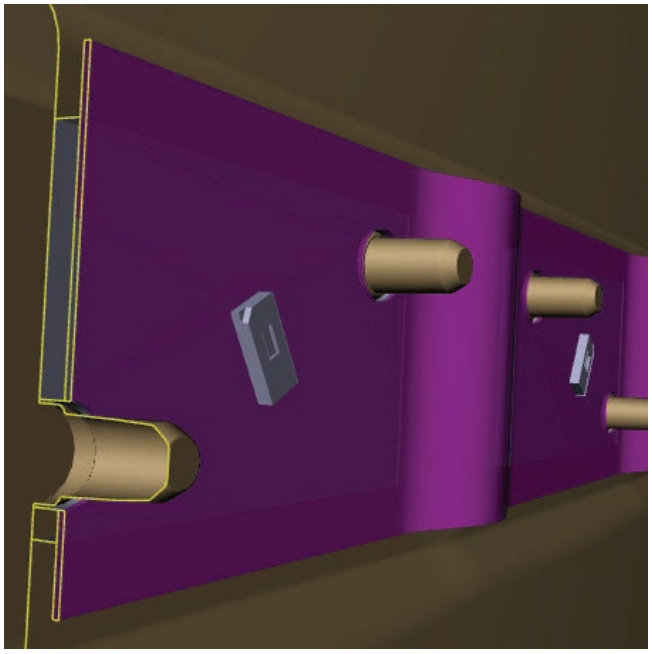
Veliko časa je bilo vloženega tudi v raziskovanje primerne pritrditve FPC vezja v panel. Pri tem je potrebno upoštevati več dejavnikov, od tolerančne verige končnega izdelka do optimalnega procesa sestavljanja svetilke in s tem povezanega tveganja za poškodbo izjemno gibljivih FPC vezij in LED diod na njih. Z vpeljavo dodatne lahke plastične pod-strukture in z montažo FPC vezja nanjo neposredno po končanem klasičnem delu SMT proizvodnje, se je tveganje za poškodbe gibljivih FPC vezij zelo zmanjšalo. Celoten sestav namreč dosega potrebno togost za rokovanje in eliminira potrebo po dragih orodjih na montažni liniji panela. Odprto ostaja še vprašanje, na kakšen način pritrditi E obliko FPC vezja na plastično pod-strukturo, da bo proizvodnja hitra in cenovno ugodna, hkrati pa bo združen komplet zagotavljal odpornost na klasične temperaturne, vibracijske in ostale teste, zahtevane v avtomobilski industriji.
Preverjenih je bilo več rešitev, v ožji izbor pa sta prišli dve. Prva rešitev je uporaba PSA (Pressure-sensitive adhesive) lepila, ki se aktivira s pritiskom in predstavlja dodaten sloj med plastično pod-strukturo in vezjem. PSA lepilo sicer prinaša dvig cene kosa zaradi dodanega

sloja, vendar ne potrebuje dodatne drage opreme za montažo.

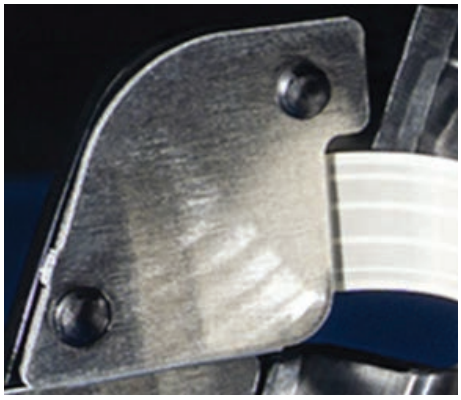


Slika 13: Primer FPC materialnega prereza z vključenim PSA lepilom za pritrditev na plastično pod-strukturo [6]

Žal za PSA lepilo kot edini vir pritrjevanja še niso znani rezultati dolgotrajnih testiranj, s katerimi se preverja delovanje v celotnem življenjskem ciklu izdelka. Zato je bila raziskana tudi druga rešitev v obliki toplotnega kovičenja, kjer dodaten sloj lepila ni potreben, je pa potrebna posebna oblika pod-strukture z izrastki, na katere se skozi luknje namesti FPC vezje.

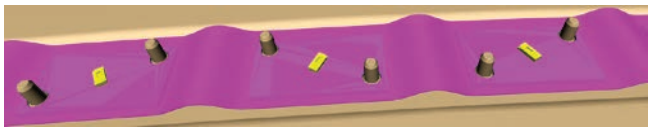


Slika 14: Prerez plastičnega izrastka za toplotno kovičenje na katerega se pritrdi FPC vezje in nato zatopi



Slika 15: Primer realnega zatopljenega plastičnega izrastka za toplotno kovičenje [7]

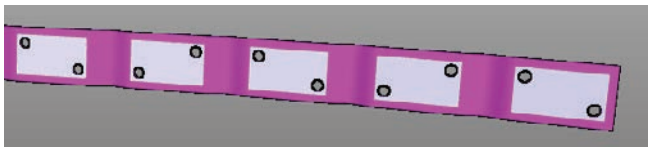
Plastični izrastki se s posebnim orodjem z visoko temperaturo zatopijo, kar ustvari gobo, ki drži FPC vezje trdno na pod-strukturi. Izziv pri panelih je veliko število svetlobnih elementov, za katerimi je potrebna pritrditev LED diod z vsaj dvema izrastkoma za toplotno kovičenje, kar močno poveča število izrastkov in poveča kompleksnost brizgalnega orodja za pod-strukturo. Problem velikega števila izrastkov za toplotno kovičenje je tudi v tem, da je potrebno drago orodje, ki zatopi vse ali večino izrastkov v enem koraku, kar podaljša cikel izdelave posameznega kosa za nekaj sekund, ali pa uporaba nekoliko cenejše robotske roke, ki topi manjše število izrastkov naenkrat in podaljša cikel kosa za nekaj minut.



Slika 16: Del FPC vezja s tremi LED diodami in izrastki za toplotno kovičenje

Veliko dela je bilo vloženega tudi v raziskavo potrebnih ojačevalnih elementov pod LED diodami, ki so lahko narejeni iz aluminija, FR4 materiala, dodane folije ali pa jih sploh ni. Ojačevalni element v okolici LED diode ima dve glavni vlogi in sicer razprši termalno vročo točko ter zagotavlja togost različnih materialov. To je pomembno predvsem v okolici lotov LED diode, kjer se stikajo različni materiali z različnimi temperaturnimi raztezki, kar lahko pri temperaturnih obremenitvah privede do pokanja lotov in s tem okvaro izdelka. S posebnimi simulacijami realnih CAD (Computer Aided

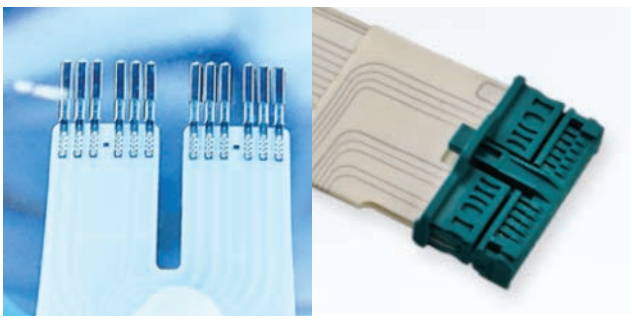
Design) modelov in z upoštevanjem raztezkov materialov se je izkazalo, da je uporaba najcenejših FPC vezij brez ojačevalnih elementov preveč tvegana, zato je bilo potrebno uporabiti dražje aluminijaste ojačevalne elemente.



Slika 17: Aluminijasti ojačevalni elementi pod LED diodami

Zelo zanimiv izziv je bil tudi robustna in cenovno ugodna povezava FPC vezja, na katerem so LED diode, in FR4 napajalnega vezja, kjer je napajalno vezje. Po prvotno predvidenem konceptu bi bili na FR4 vezju tudi gonilniki LED diod, vendar bi s tem konceptom potrebovali med FR4 in FPC vezjem zelo veliko število povezav. S premikom LED gonilnikov na FPC vezja se je število povezav med vezji bistveno zmanjšalo, poleg tega pa so se povezave tudi skrajšale. Tako smo lahko uporabili preizkušene konektorje in hkrati dosegli boljše EMC lastnosti. Celoten sistem smo dodatno pocenili z uporabo »crimp« konektorjev na FPC vezjih, ki se direktno priključijo v FR4 napajalno vezje brez uporabe dodatne kablaže.

Dodatna prednost takega sistema je tudi standardizacija FR4 napajalnega vezja, ki je lahko uporabljen za več različnih grafik sprednjega panela z različnimi FPC vezji. To dodatno ugodno vpliva na ceno končnega izdelka.



Slika 18: Levo primer »crimp« terminalov na FPC vezju, ki se nato vstavi v plastično ohišje konektorja na desni [7]

4. ZAKLJUČEK

Paneli s svetlobno funkcijo navkljub izjemno zahtevnemu razvoju, problematični industrializaciji in zgolj dekorativni funkciji vsekakor predstavljajo ogromen potencial pri osvetljevanja vozil, saj bi se lahko iz dekorativnih namenov razvile dodatne funkcije, kot so na primer obveščanje mimoidočih v primeru avtonomne vožnje ali pa napolnjenost baterije električnega avtomobila. Prihodnost osvetljenih panelov bo zato nedvomno … svetla.

Viri:

[1] https://www.skoda.si/aktualno/novice/2456-to-je-novi-skoda-enyaq-coupe-iv
[2] https://www.hella.com/lighting/en/Products-1848/
[3] https://www.led-professional.com/resources-1/articles/reliable-thermal-management-of-high-power-leds-by-haeusermann
[4] https://www.eevblog.com/forum/manufacture/leads-on-pcb-manufacturer-that-does-z-milling/
[5] https://www.mektec.co.th/FPCpcb
[6] https://www.epectec.com/FPC/material-stackup.html
[7] https://mektec.de/technologies/mechatronic-modules
[8] https://www.led-professional.com/resources-1/articles/reliable-thermal-management-of-high-power-leds-by-haeusermann

IZBOR IN UVAJANJE RAZIGLAVANJA ODBRIZGANIH KOSOV IZ DUROPLASTA BMC S SUHIM LEDOM CO_2

Igor DEMŠAR, Janez VIRANT
DOMEL, d. o. o.

IZVLEČEK

Pri izdelavi in obdelavi brizganih kosov se srečujemo z vedno bolj strogimi zahtevami. Ena od pomembnejših zahtev je tudi tehnična čistoča izdelka. Kupec je svojem izdelku zahteval čiščenje oziroma raziglavanje odbrizganega kosa s pomočjo suhega ledu CO2.

Za Domelovo proizvodnjo BMC odlitkov je bila to nova tehnologija, ki jo je bilo potrebno uvesti v proizvodnjo in avtomatizirati za navedeni nov izdelek .

V članku je kratek opis tehnologije čiščenja s suhim ledom in postopke izbora ponudnika opreme za načrtovano avtomatizacijo.

1 KRATEK PREGLED PRISPEVKA

Članek predstavlja vzroke in potek uvajanja raziglavanja odbrizganih kosov iz duroplasta BMC s suhim ledom. V Domelu smo se soočili z izzivom, da obstoječi način čiščenja z obstreljevanjem (peskanjem) s plastičnimi delci zaradi zahtev kupca po tehnični čistoči ni bil primeren.

Testiranje različnih medijev je vodilo do izbire suhega ledu kot medija za čiščenje kosov.

Izbrani način se je v začetku uporabljal za ročno čiščenje, kasneje pa integriral v robotsko avtomatizirano celico. Kot zadnja faza uvedbe se postavlja naprava za direktno proizvodnjo suhega ledu CO2 iz utekočinjenega CO2.

2 NOV NAČIN RAZIGLAVANJE BMC IZDELKOV

Standarden način čiščenje kosovi iz duroplasta BMC je v Domelu obstreljevanje (peskanje) s plastičnimi delci. Pri tem nastaja droben prah, ki se odprašuje skozi kaskadne separatorje v zračne filtre. Kljub temu na kosih ostane nekaj prahu. Večino tega prahu se odpihne z izpihavanjem z deioniziranim zrakom, vendar ne v popolnosti. Nekaj prahu še vedno ostane ne izdelku. To do sedaj ni predstavljalo problema in tehnična čistoča izdelkov je zadostovala zahtevam internih in eksternih kupcev. Med njimi so bili tudi kosi za avtomobilsko industrijo, ki ima običajno višje zahteve čistoče. Pri novem izdelku pa je bila zaradi optičnih zahteva (kos se kasneje lakira in metalizira) zahtevano, da je površina brez prahu.

Za nove zahteve sta se predvideli dve možni rešitvi.

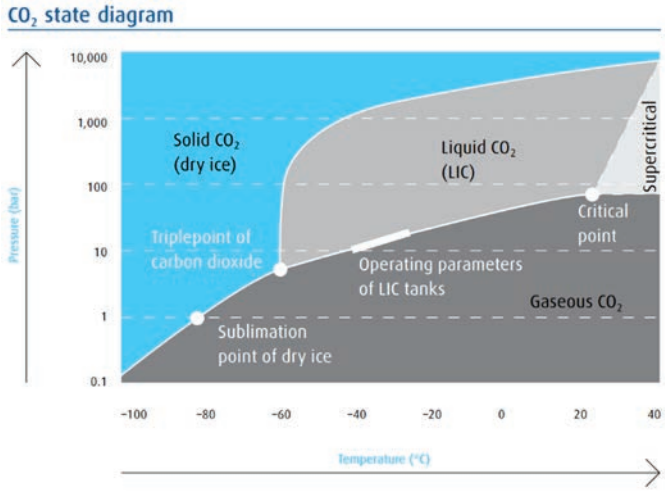
- Standardno čiščenje z obstreljevanjem s plastičnimi kroglicami in ščitenjem kritičnih površin. V tem primeru, bi se površine z zahtevo brez prahu prekrivalo s namensko zaslonko, ki se je izdelala s tehnologijo 3D tiskanja. Zaslonka se je izkazala kot dobra rešitev, površine, ki so bile ščitene, so bile brez prahu.
- Čiščenje z delci suhega ledu CO2. Ročno napravo za suhi led smo imeli v podjetju, uporabljala se je v vzdrževanju orodij.

Alternativno se je testiralo še kose očiščene po standardni metodi, torej očiščene s plastičnimi delci in komprimiranim ioniziranim zrakom.

Med ponujenimi možnostmi se je po testiranju pri kupcu izbrala varianta čiščenja / raziglavanja s suhim ledom, predvsem zaradi boljših rezultatov (manj izmeta) pri naslednjih operacijah.

3 KAJ JE SUHI LED?

Suhi led je trdna oblika ogljikovega dioksida ali krajše CO2. Tekoči CO2 se shranjuje v jeklenkah pri temperaturi okolice pod tlakom približno 60 barov ali v vakuumsko izoliranih rezervoarjih pri temperaturi približno -20 °C pod tlakom 20 barov.



Slika 1: Fazni diagram CO_2, [1]

Ko se tekoči CO_2 razširi, nastane sneg v obliki drobnega prahu. Ta drobni prah oziroma sneg se potem v stiskalnici stisne v trdne pelete.

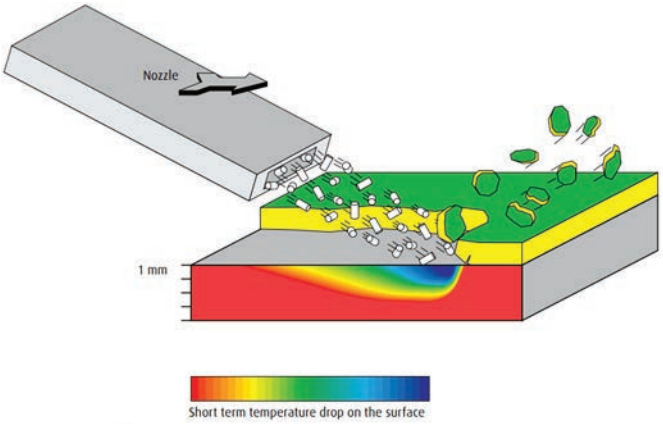
Suhi led je zelo podoben običajnemu vodnemu ledu, vendar ima zelo različne lastnosti.

- suhi led ne vsebuje vode
- njegova temperatura ostaja konstantna pri - 79°C
- ko uporabimo energijo (npr. toploto ali energijo, ki se sprosti pri udarcu), se suhi led neposredno pretvori v plinasto stanje, ne da bi se prej utekočinil. To odpravlja potrebo po posebnih ukrepih za odstranjevanje, s tem pa se stroški manjšajo.
- ogljikov dioksid ni strupen.
- je negorljiv
- ogljikov dioksid se obnaša kot inertna snov, to pomeni, da običajno ne pride do kemične reakcije z drugimi izdelki.
- ne obstaja tekoča faza CO2 pod trojno točko (5,18 bara), zato se pri čiščenju nastopa samo trdni in plinasti ogljikov dioksid.

4 POSTOPEK ČIŠČENJA S SUHIM LEDOM

Peskanje s suhim ledom je bilo razvito za potrebe odstranjevanje barv in premazov z letal v sedemdesetih letih dvajsetega stoletja

Peskanje s suhim ledom je postopek čiščenja pri katerem delčke – pelete suhega ledu s komprimiranim zrakom pospešimo in usmerimo proti površini, ki jo čistimo. Podobno kot pri peskanju s plastičnimi delčki. Hitrosti peletov suhega ledu je do 300 m/s, medtem ko imamo pri peskanju s plastičnimi delci dosegamo do 1/3 te hitrosti Razlika, poleg hitrosti medija je tudi da pri peskanju s suhim ledom ne ustvarjamo sekundarnih odpadkov ali kemičnih ostankov. Postopek ni abraziven, ni prevoden, ne gorljiv in ni strupen. Zmanjša ali odpravi se izpostavljenost kemikalijam in je okolju prijazna metoda čiščenja.



Slika 2: Čiščenje površine s suhim ledom [2]

Pospešeni delci suhega ledu z visoko hitrostjo udarjajo v površino, ob udarcu pa zrnca odtrgajo nečistočo s površine in se uparijo, sprememba agregatnega stanja je hipna, pri čemer ni ostankov na površini. Zaradi hitre spremembe se na površino prenese le majhna količina sile, ki zapusti površino brez obrabe.

Zaradi razpok na površini lahko peleti prodrejo med in pod umazanijo se tam uplinijo, nastali zračni tok zaradi uplinjanja pa delčke odstrani, odpihne. Kinetična energija še dodatno pomaga odstranjevati nečistoče s površine. Ker takoj po udarcu peleti sublimirajo in se vrnejo v atmosfero kot čisti plin (CO2), za sabo ne puščajo vlage ali katerikoli drugega ostanka. S površine odstranjene nečistoče odnese s sabo zračni tok.

Zaradi trdote peletov je čiščenje praktično neabrazivno, kakovost površine pa se ohrani.

5 ČIŠČENJE ODBRIZGANIH BMC KOSOV S SUHIM LEDOM

V našem primeru potrebe po čiščenju površine ni bilo. Kos iz brizgalnega orodja pride s čistimi površinami, potrebno pa je odstraniti srh na delitvah orodja. Pri odstranjevanju srha je bolj pomembna kinetična energija toka zraka s peleti, manj pomemben pa je termični šok na površini, vendar pa hipna sprememba temperature tudi dodatno pripomore k drobljenju srha. Krhkost BMC materiala se z nižjo temperaturo poveča.

Volumen ogljikovega dioksida ob spremembi iz trdnega v plinasto stanje naraste do 500 krat. Zračni tok ojačan s spremembo volumna ogljikovega dioksida odnese vse delce stran od odbrizganega kosa. S pravilnim usmerjanjem toka suhega ledu tako zelo hitro dobimo tehnično čist kos brez nezaželenega srha.

Ob tem pa je potrebno poudariti da poleg prahu odstranjenega srha v procesu ne nastajajo drugi odpadki. Proces je čist in okoljsko prijazen.

Čeprav za samo raziglavanje ali čistočo ni toliko pomembno, se po raziglavanju s suhim ledom dodatno curek suhega ledu usmeri še na površine, ki se kasneje lakirajo in metalizirajo.

S preizkusi pri kupcu je bilo ugotovljeno, da je izmet na lakiranju veliko manjši, če so te površine še dodatno očiščene s suhim ledom

6 IZBOR PONUDNIKA OPREME

Odločitev kupca je bila, naj bodo kosi očiščeni s suhim ledom, čeprav je bila to dražja rešitev.

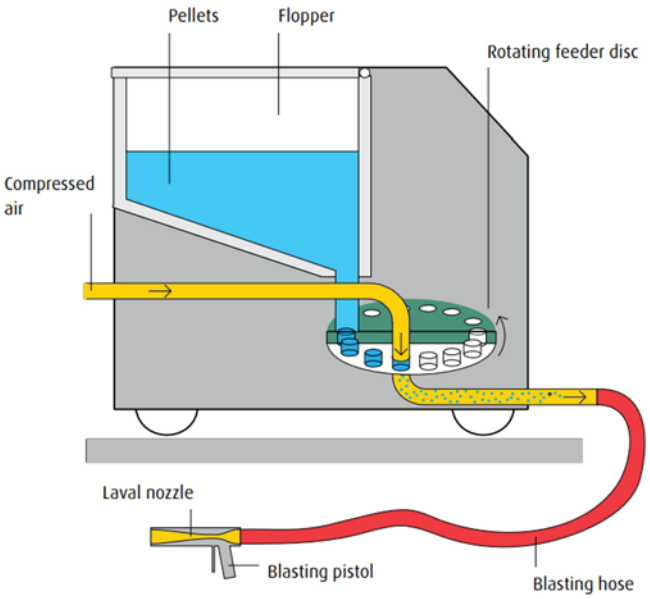
Za vgradnjo v predvideno čistilno celico je bilo potrebno izbrati dobavitelja, ki bo izdelal napravo – blaster za čiščenje kosov. Predvideno je bilo da se kosi v začetku čistijo ročno, kasneje pa bo delo človeka prevzel robot in bo celoten proces čiščenja avtomatiziran v robotski celici.

Na trgu je kar nekaj ponudnikov opreme za čiščenje s suhim ledom. V osnovnem principu delujejo vse naprave po enakem sistemu, vsak proizvajalec pa ponuja svoje variante rešitve in izboljšave za katere se mora kupec odločiti.

V grobem se delijo naprave med seboj na tiste, kjer se uporablja suhi led kot nasipni material in se ga polni v zalogovnik naprave in tiste, ki imajo v napravi tudi možnost izdelovanje suhega ledu skupaj z napravo za čiščenje – blasterjem

Pri izbiri ponudnika opreme so se kot najbolj zahtevne točke – kriteriji na katerih je odpadla večina ponudnikov opreme za suhi led pokazali dve zahtevi:

- stroj – blaster mora znati komunicirati s PLC krmilnikom, ki bo upravljal vse funkcije delovanja znotraj avtomatske celice,
- ponudnik izdeluje oziroma ponuja tudi opremo za izdelavo suhega ledu (ice-maker).



Slika 3: Shema čistilnega sistem za suhi led, kot se je uporabljal za ročno čiščenje [3]

Končni kriterij izbora je bila poleg cene tudi fleksibilnost. Izbrali smo podjetje, ki se je bilo pripravljeno prilagoditi zahtevam postavljenim tako z naše strani, kot tudi s strani izdelovalca avtomatske robotske celice za čiščenje BMC brizganih kosov. Poleg tega je to podjetje že imelo pripravljene rešitve glede na naše zahteve, končni kriterij cena, pa je bila prav tako ugodna.

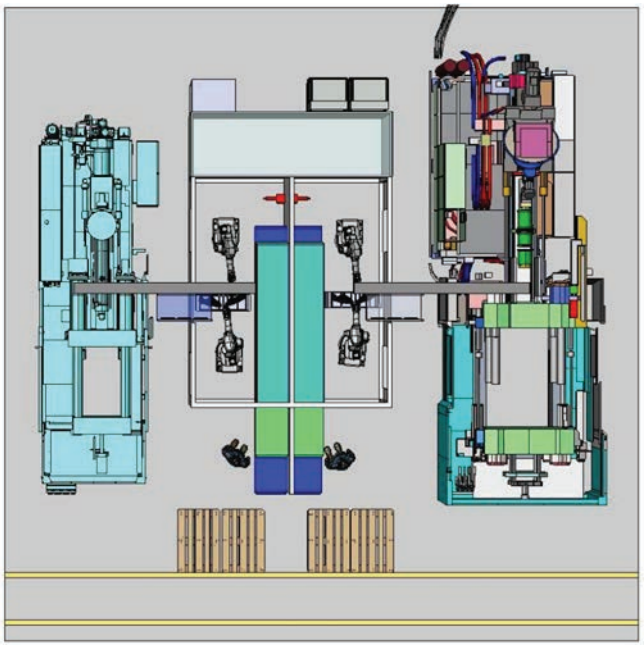
Skozi testiranja, ki so bila izvedena, se je ugotovilo, da se s suhim ledom lahko kvalitetno in z majhno porabo odpravi odvečne dele plastike (srhe) debeline do 0,05 mm, za debelejše pa se poraba suhega ledu hitro povečuje, čas potreben za čiščenje pa hitro preseže planiran čas v ciklu izdelave kosov.

Zato je bila sprejeta odločitev za kombinacijo mehanskega čiščenja in čiščenja s suhim ledom. Kosi naj bi bili tako najprej mehansko grobo očiščeni na mestih kjer je velika verjetnost pojavljanja močnejšega srha. Robot vodi kos preko trdega robu, na katerem se ta močnejši srh – film podrobi. V naslednjem koraku pa sledi obstreljevanje s suhim ledom, tako že delno očiščenih robov, ostalih delov s predvidenimi neproblematičnimi srh, kot tudi površin pomembnih za kasnejše obdelave - kritičnih površin.

S tako očiščenimi kosi smo še vedno dosegali predvidene časovne okvire znotraj zahtevanega časa cikla in dodatno še privarčevali na porabi suhega ledu.

7 KONCEPT ČIŠČENJA V CELICI

Koncept čiščenja kosov v avtomatski celici je sestavljen iz več operacij.



Slika 4: Shema postavitve celice za čiščenje odbrizganih kosov BMC. Dva brizgalna stroja in med njima postavljena čistilna celica [4]

Zaradi predvidenih količin se je avtomatizacija avtomatske čistilne celica načrtovala za količine, ki bi jih brizgala dva brizgalna stroja. Prvotno zasnovo ene naprave, smo morali opustiti in predvideti dve vzporedni napravi. Delilnih robov in površin je bilo preveč, da bi se kosi z dveh strojev obdelali samo z eno napravi za čiščenje. Tako je bilo v končni različici predvideno, da se postavi dve vzporedni napravi, ki ločeno čistita kose vsaka s svojega stroja.

Odbrizgani kosi se z linearim robotom odložijo na namenska vmesno ležišče. Tu jih prvi šestosni robot prevzame in izvede mehansko čiščenje debelejših srhov in lomljenje tehnoloških odduškov pripetih na kosu. Po končani operaciji kos odloži nazaj na ležišča. Delo nadaljuje drugi šestosni robot, ki postavi kos pod curek suhega ledu. Robot se skupaj s kosom giblje po določeni poti pod fiksno šobo iz katere z visokim tlakom suhi led obstreljuje površino kosa.

Pot čiščenja kosov mora biti pri tem zelo točno definirana. S tem lahko kos očistimo v krajšem času in porabimo manjšo količino ledu.

8 POSTAVITEV CELICE

Postavitev celotne avtomatizirane celice smo razdelili v dve fazi.

8.1 Prva faza postavitve celice - blaster

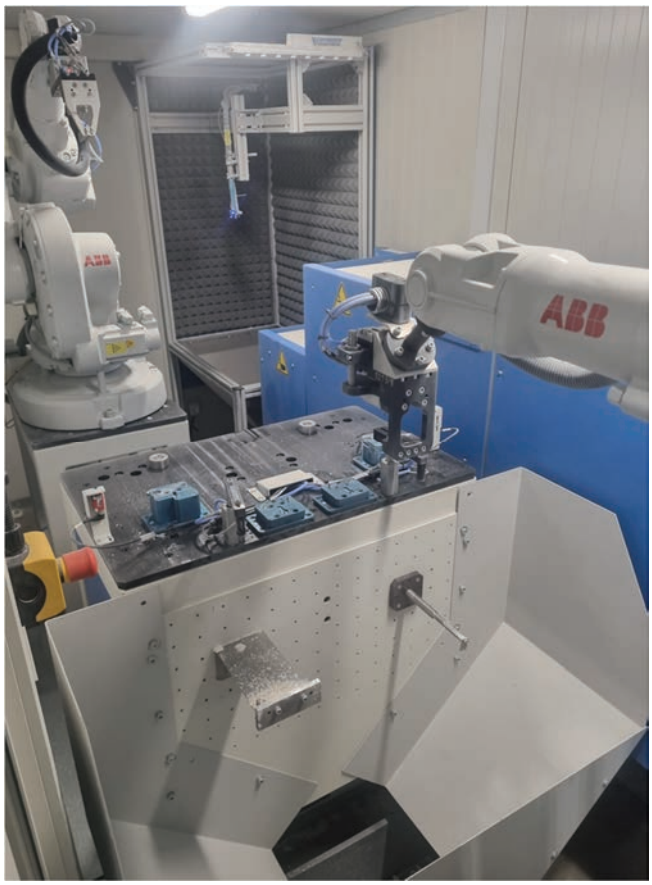
Postavitev celotne celice z roboti, ki opravljajo vso manipulacijo, od pobiranja kosov iz orodja, čiščenja odbrizganih kosov s suhim ledom in na kocu odlaganje očiščenih kosov na transportni trak.

Slika 5: Postavitev čistilne celice med dva brizgalna stroja. [5]

V prvi fazi za čiščenje kosov se uporablja že v naprej pripravljen suhi led, ki se kupuje pri

dobavitelju in kot nasipni granulat polni v blasterje.

V tej fazi so se pojavile težave s sprijemanjem suhega ledu, saj ta stalno nase veže vlago. Starejši, kot je bil suhi led, več vlage se je vezalo, kar je privedlo do sprijemanja granulata in težav pri doziranju v blaster. V zalogovniku nastale grudice, so onemogočale enakomerno doziranje ledu, zato je bilo treba strmeti, da je bil led čim bolj svež in da smo pri polnjenju zalogovnika vanj vnesli čim manj vlage.



Slika 6: Notranjost robotizirane čistilne celice. Dva robota manipulirata s kosi. Prvi (desni) grobo očisti kos, drugi (levi) pa ga »spiha« pod curkom suhega ledu. [6]

Rešitev je v krajšem času od dobave do porabe suhega ledu, kar pomeni več dobav z manjšimi količinami. To nam je povečevalo stroške. Dokončno pa bi se problem rešil z izpeljavo druge faze.

Opaziti je bilo tudi da se je to sprijemanje razlikovalo tudi glede na dobavitelje suhega ledu. Suhi led najcenejšega ponudnika ni bil vedno enakovredne kakovosti dražjih ponudnikov. Kar naj bi bila posledica primesi v tekočem ogljikovem dioksidu.

8.2 Druga faza postavitve celice – ice maker

V drugi fazi je predvidena vključitev procesa izdelave suhega ledu v avtomatizacijo. Sem spada naprava za izdelavo suhega ledu, postavitev cevovoda iz zalogovnika do ice-makerja in zalogovnika tekočega ogljikovega dioksida - cisterne

V fazi načrtovanja projekta je bilo izračunano, da je lastna izdelava ledu nujna, saj je možno izdelovati led približno polovico ceneje, kot je prodajna cena suhega ledu na trgu.

Dodatno bi bile lahko kapacitete izdelave suhega ledu uporabljene tudi za druge potrebe po suhem ledu znotraj podjetja. (npr. pri čiščenju orodij v procesu brizganja, pri vzdrževalnih delih na orodjih v orodjarni, … Za vse te namene se suhi led kupuje, z lastno proizvodnjo pa bi lahko te potrebe zadovoljili sami. Zato se je pri kalkulaciji kapacitet proizvodnje suhega ledu upoštevalo tudi te dodatne količine.

Zaradi prostorskih zahtev; predvsem višine, lažjega dostavljanja materiala in varnosti, je postavitev cisterne s tekočim ogljikovim dioksidom predvidena izven obstoječe stavbe.

Za postavitev zalogovnika za tekoči CO_2 in cevovoda do avtomatizacije je bilo izbrano podjetje, ki je ponudilo avtomatiziran proces preko krmilne in ventilske tehnike. Z njim bo zagotavljan celoten nadzor in komunikacijo med napravo za izdelavo ledu in zalogovnikom.

Komunikacija zalogovnika, cevovoda, naprave za izdelavo ledu in blasterja je zelo pomembna, saj ob neustreznem delovanju lahko pride do zamrznitve cevovoda. Zato je zelo pomembno, da je celotna pot od zalogovnika CO_2 do čiščenja kosov računalniško vodena in nadzorovana.

Trenutno smo v fazi, da je vsa dokumentacija vključno z izborom izvajalca pripravljeno za začetek postavljanja zalogovnika tekočega ogljikovega dioksida in gradnjo cevovoda do avtomatizacije in naprave za proizvodnjo suhega ledu. Celica trenutno deluje z nasipanjem kupljenega suhega ledu.

9 SKLEP

Zaradi zahtev pri novem izdelku smo se v Domelu seznanili z novim načinom raziglavanja BMC duro-plastičnih kosov z suhim ledom. Postavljen je bil koncept raziglavanja, ki nam zagotavlja, da lahko BMC kos raziglamo in hkrati izpolnimo vse zahteve kupca, ki jih je postavil zaradi nadaljnjih operacij v lastni proizvodnji.

Raziglavanje s suhim ledom smo naprej uporabljali v kombinaciji z ročnim čiščenjem. Z izgradnjo avtomatizacije se je čiščenje vgradilo v celico in proces avtomatiziralo.

Zaradi zmanjševanja stroškov pa se je dodatno predvidelo še izgradnjo postrojenja za proizvodnjo suhega ledu. Projekt postavitve cisterne za tekoči CO_2, cevovodov in naprave za izdelavo je v teku.

Viri:

[1] CRYOCLEAN dry ice blasting, brošura, stran 7, Linde GmbH, 2011
[2] CRYOCLEAN dry ice blasting, brošura, stran 9, Linde GmbH, 2011
[3] CRYOCLEAN dry ice blasting, brošura, stran 10, Linde GmbH, 2011
[4] Domel, d.o.o., dokumentacija projekta avtomatske čistilne celice 2022
[5] Domel, d.o.o., fotografija avtomatske čistilne celice 2023

MEHANSKO RECIKLIRAN DUROPLASTIČNI KOMPOZIT KOT OJAČITEV ZA RECIKLIRAN TERMOPLASTIČNI KOMPOZIT

Silvester BOLKA[1], Teja PEŠL[1], Tamara ROZMAN[1], Aljaž KOLAR[2], Bojan BREZNIK[2], Primož HABERMAN[2], Blaž NARDIN[1]
[1]Fakulteta za tehnologijo polimerov
[2]O.P.S. Breznik d.o.o.

IZVLEČEK

V prispevku bomo predstavili primer dobre prakse krožnega gospodarstva iz Slovenije. Uporabili smo odpadni termoplastični kompozit, ki smo ga ojačali z odpadnim duroplastičnim kompozitom. Da bi združili dobre lastnosti obeh materialov smo dodali kompatibilizator, da smo dosegli kompatibilnost obeh reciklatov.

Odpadni termoplastični kompozit so bili dolivki in zagonski kosi iz podjetja OPS Breznik, odpadni duroplastični kompozit nam je poslalo podjetje Technol v zmleti obliki. Za namen karakterizacije smo izvedli dizajn eksperimenta pri kompavndiranju na dvopolžnem ekstruderju, kjer smo dodali 5 % in 30 % odpadnega duroplastičnega kompozita v reciklat termoplastičnega kompozita. Variirali smo tudi delež kompatibilizatorja in sicer smo ga dodali 2 % in 6 %. Tako pripravljen mehansko recikliran termoplastični kompozit smo brizgali in nato karakterizirali mehanske in toplotne lastnosti. Da bi preverili proizvodljivost, smo pripravili večjo količino mehansko recikliranega termoplastičnega kompozita, kjer smo dodali 10 % odpadnega termoplastičnega kompozita, 3 % kompatibilizatorja v reciklat termoplastičnega kompozita. S postopkom brizganja smo izdelali več kot 100 kosov montažnih ključev za filter za vodo, ki smo jih naknadno še lasersko gravirali.

Delo je bilo izvedeno v okviru projekta DeremCo.

1 UVOD

Komercialno dostopni biorazgradljivi PLA je prva izbira kot rešitev za krožno gospodarstvo v številnih sektorjih, med drugim zelo pogosto v embalaži. Glavna ovira za PLA je njegova krhkost.

100-odstotno recikliranje katerega koli materiala je praktično nedosegljivo in ostanke materiala je potrebno odlagati na odlagališča odpadkov. Zakonodaja je vedno bolj naklonjenost recikliranju. Sistem ravnanja z odpadki bi se moral osredotočati na različne postopke recikliranja za ponovno pridobivanje energije iz ogljikovodikov oz. njihovo ponovno uporabo v obliki sekundarnih surovin (reciklatov). Z uporabo različnih tehnik recikliranja duroplastičnih kompozitov lahko ponovno pridobimo ojačitvena vlakna. Reciklirani kompozitni materiali so tudi cenejši kot uporaba svežih ojačitvenih vlaken [1].

S steklenimi in ogljikovimi vlakni ojačani polimerni kompoziti so zaradi svoje nižje mase in boljše korozijske odpornosti v primerjavi s kovinami korenito spremenili pomembne proizvodne sektorje, kot sta promet (avtomobili, letala, plovila) in gradbeništvo (zgradbe in infrastruktura, obrati, vetrne turbine). Na trgu kompozitov po obsegu prevladuje plastika, ojačana s steklenimi vlakni. Zato razvoj trajnostnih rešitev krožnega gospodarstva za ravnanje s kompozitnimi materiali po njihovi končani življenjski dobi predstavlja enega od ključnih izzivov sodobne predelovalne industrije plastike. Recikliranje je najpogosteje preučevana rešitev za trajnostno rešitev po končani življenjski dobi kompozitnih izdelkov. Obstoječe tehnologije in metode recikliranja so mehanska, termična ali kemična reciklaža [2].

2 DEREMCO PROJEKT

Cilj projekta DeremCo je vzpostaviti sistemsko, medsektorsko rešitev krožnega gospodarstva, ki temelji na povpraševanju, ki bo omogočila

Silvester BOLKA[1], Teja PEŠL[1], Tamara ROZMAN[1], Aljaž KOLAR[2], Bojan BREZNIK[2], Primož HABERMAN[2], Blaž NARDIN[1]
[1]Fakulteta za tehnologijo polimerov
[2]O.P.S. Breznik d.o.o.

stroškovno učinkovito ponovno uporabo kompozitnih materialov in komponent po uporabi v novih izdelkih z visoko dodano vrednostjo. DeremCo je projekt EU_I3, ki bo trajal do novembra 2025 in bo vključeval 30 evropskih partnerjev iz Italije, Finske, Avstrije, Španije, Slovenije, Belgije in Portugalske. V projektu sodeluje tudi 7 slovenskih partnerjev: Fakulteta za tehnologijo polimerov, Veplas, O.P.S. Breznik, Technol, Tehnos, Turnaplast in CAP. Na FTPO smo pričeli s pripravo materialov za prve teste termoplastičnih kompozitov izdelanih iz odpada duroplastov, katerega smo prejeli od projektnega partnerja Technol.

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Uporabljeni materiali

Reciklat termoplastičnega kompozita na osnovi PA 66 ojačenega s 15 % steklenimi vlakni (rPA66GF15) nam je dobavilo podjetje O.P.S. Breznik iz Mute. Osnovni material je bil BASF Ultramid A3WG3. Reciklat duroplastičnega kompozita v zmeti obliki (rGF) nam je dobavilo podjetje Technol iz Izole. Gre za termoplastični kompozit iz poliestrske matrice, ki je ojačan s steklenimi vlakni. Komercialno dostopni modificirani TPU s trgovskim imenom Kuramiron U TU-S5265 (TPU, v Tabeli 1 v stolpcu Vzorec z oznako K) smo kupili od podjetja Kuraray, Nemčija. Sestava vzorcev je navedena v Tabeli 1.

3.2 Priprava vzorcev

Izdelali smo 4 serije vzorcev, dodatno smo izvedli teste z reciklatom rPA66GF15 brez dodatkov, ki nam je služil kot referenca. V Tabeli 1 je prikazana sestava vzorcev, vključno z referenco.

Vse materiale smo ločeno zmešali in ekstrudirani na dvopolžnem ekstruderju Labtech LTE 20-44. Premer polžev je bil 20 mm, razmerje L/D 44:1, obrati 600 vrtljajev na minuto, temperaturni profil je naraščal od lijaka (250 °C) do šobe (280 °C). Po kompavndiranju sta bila oba proizvedena filamenta ohlajena v vodni kopeli in narezana na pelete dolžine približno 5 mm in premera 3 mm.

Brizganje je potekalo na stroju Krauss Maffei 50-180 CX s premerom polža 30 mm. Temperaturni profil je naraščal od lijaka (265 °C) do šobe (280 °C). Temperatura orodja je bila nastavljena na 80 °C, čas hlajenja pa na 10 s. Protitlak je bil nastavljen na 25 barov, obrati polža pa na 50 vrtljajev na minuto. Hitrost brizganja je bila nastavljena na 50 mm/s, za zadnja 2 mm pa na 20 mm/s.

Tabela 1: Sestava vzorcev za kompavndiranje

Vzorec	rPA66GF15 (%)	rGF (%)	TPU (%)
rPA66GF15	100	0	0
rPA66GF15 rGF5 K2	93	5	2
rPA66GF15 rGF30 K2	68	30	2
rPA66GF15 rGF5 K6	89	5	6
rPA66GF15 rGF30 K6	64	30	6
rPA66GF15 rGF5	95	5	0
rPA66GF15 rGF30	70	30	0

3.3 Laboratorijski testi

Upogibni in natezni preskusi so bili opravljeni na napravi Shimadzu AG-X plus v skladu z ISO 178 oziroma ISO 527-1. Za vsak vzorec je bilo opravljenih pet meritev. Pri upogibnem testu smo vrednotili upogibno togost (E_f) in maksimalno upogibno trdnost (σ_{fM}) ter upogib pri maksimalni upogibni trdnosti (ε_{fM}). Pri nateznih preskusih smo vrednotili natezno togost (E_t), natezno trdnost (σ_m) in raztezek pri pretrgu (ε_{tb}). Termodinamične lastnosti smo vrednotili z napravo Perkin Elmer DMA 8000. Vzorce smo segrevali z 2 °C/min od 25 °C do 250 °C v zračni atmosferi. V načinu z dvojno prižemo smo uporabili frekvenco 1 Hz in amplitudo 20 µm. Termogravimetrične analize (TGA) smo izvedli na instrumentu Mettler Toledo TGA/DSC 3+. Vzorec smo segrevali od 40 °C do 550 °C, s hitrostjo segrevanja 10 °C/min, v dušikovi atmosferi (20 mL/min), nato pa izotermno držali

Silvester BOLKA[1], Teja PEŠL[1], Tamara ROZMAN[1], Aljaž KOLAR[2], Bojan BREZNIK[2], Primož HABERMAN[2], Blaž NARDIN[1]
[1]Fakulteta za tehnologijo polimerov
[2]O.P.S. Breznik d.o.o.

pri 550 °C 20 min v kisikovi atmosferi (20 mL/min). Udarne preskuse smo izvedli na napravi Dongguan Liyi Test Equipment, tip LY-XJJD5, v skladu s standardom ISO 179. Razdalja med podporama je bila 60 mm, za udarne preizkuse smo uporabili nihalo z energijo 2 J, za zarezno udarne preskuse pa nihalo z energijo 1 J.

4 REZULTATI

Dodatek reciklata duroplastičnega kompozita v zmeti obliki v reciklat termoplastičnega kompozita na osnovi PA 66 ojačenega s 15 % steklenimi vlakni vpliva na mehanske lastnosti (Tabeli 2 in 3). 5 % dodatek rGF malenkostno zviša upogibno togost in upogibno trdnost, ter zniža upogib pri maksimalni upogibni trdnosti (Tabela 2). Če dodamo 2 % kompatibilizatorja, potem se zvišajo tako upogibna togost, trdnost kot upogib pri maksimalni upogibni trdnosti. Če dodamo 6 % kompatibilizatorja, potem se upogibna togost le minimalno poviša, zniža se upogibna trdnost in tudi upogib pri maksimalni upogibni trdnosti. 30 % dodatek rGF opazno zviša upogibno togost, upogibna trdnost in upogib pri maksimalni upogibni trdnosti ostaneta praktično nespremenjena (Tabela 2). Če dodamo 2 % kompatibilizatorja, potem se zvišata upogibna togost in trdnost, upogib pri maksimalni upogibni trdnosti se zniža. Če dodamo 6 % kompatibilizatorja, potem se poviša upogibna togost, znižata se upogibna trdnost in upogib pri maksimalni upogibni trdnosti.

5 % dodatek rGF praktično ne vpliva na natezno togost, trdnost in raztezek pri pretrgu (Tabela 3). Če dodamo 2 % kompatibilizatorja, potem se zvišata natezna togost in raztezek pri pretrgu, natezna trdnost se malenkostno zniža. Če dodamo 6 % kompatibilizatorja ostane natezna togost nespremenjena, zniža se natezna trdnost, zviša pa raztezek pri pretrgu. 30 % dodatek rGF zviša natezno togost, natezna trdnost in raztezek pri pretrgu ostaneta praktično nespremenjena (Tabela 3). Če dodamo 2 % kompatibilizatorja ostane natezna togost na enakem nivoju, natezna trdnost rahlo pade, rahlo se zviša raztezek pri pretrgu. Če dodamo 6 % kompatibilizatorja, potem se rahlo poviša natezna togost, zniža se natezna trdnost in zviša se raztezek pri pretrgu.

Tabela 2: Zbrani rezultati upogibnih testov

Vzorec	E_f (GPa)	σ_{fM} (MPa)	ε_{fM} (%)
rPA66GF15	3,8±0,1	135,4±3,2	5,8±0,9
rPA66GF15 rGF5 K2	4,0±0,1	136,4±0,6	6,4±0,1
rPA66GF15 rGF30 K2	5,8±0,1	137,1±2,8	3,0±0,1
rPA66GF15 rGF5 K6	3,9±0,1	132,2±0,7	6,3±0,1
rPA66GF15 rGF30 K6	5,3±0,1	132,4±1,1	3,3±0,1
rPA66GF15 rGF5	4,1±0,1	142,6±1,8	5,5±0,5
rPA66GF15 rGF30	5,6±0,1	141,8±2,6	3,0±0,1

Tabela 3: Zbrani rezultati nateznih testov

Vzorec	E_t (GPa)	σ_m (MPa)	ε_{tb} (%)
rPA66GF15	4,0±0,2	96,8±1,1	4,8±0,1
rPA66GF15 rGF5 K2	4,4±0,3	95,5±1,0	5,0±0,4
rPA66GF15 rGF30 K2	5,1±0,2	94,4±1,9	4,8±0,7
rPA66GF15 rGF5 K6	4,0±0,1	95,0±0,8	6,4±0,2
rPA66GF15 rGF30 K6	5,2±0,1	92,5±1,5	5,2±0,3
rPA66GF15 rGF5	4,0±0,2	96,7±2,7	4,5±0,3
rPA66GF15 rGF30	5,1±0,2	96,0±1,5	4,6±0,4

Dodatek reciklata duroplastičnega kompozita v zmeti obliki v reciklat termoplastičnega kompozita na osnovi PA 66 ojačenega s 15 % steklenimi vlakni zviša upogibno in natezno togost, upogibno trdnost. Raztezek pri pretrgu se poviša, ko dodamo kompatibilizator in sicer višji kot je odstotek dodanega kompatibilizatorja, višja je natezna togost, višji je raztezek pri porušitvi, ter nižja je natezna trdnost. Izbran kompatibilizator na osnovi termoplastičnega poliuretana je bil izbran, da bi tudi pri velikih odstotkih dodanega reciklata duroplastičnega kompozita v zmeti obliki v reciklat termoplastičnega kompozita na osnovi PA 66 ojačenega s 15 % steklenimi vlakni ohranil določeno stopnjo žilavosti. Zvišanje togosti in padec trdnosti je po vsej verjetnosti povezano z zmeto duroplastično matrico v reciklatu duroplastičnega kompozita, ki ne deluje kot ojačevalo, ampak le kot polnilo, zaradi svojega nizkega aspektnega razmerja.

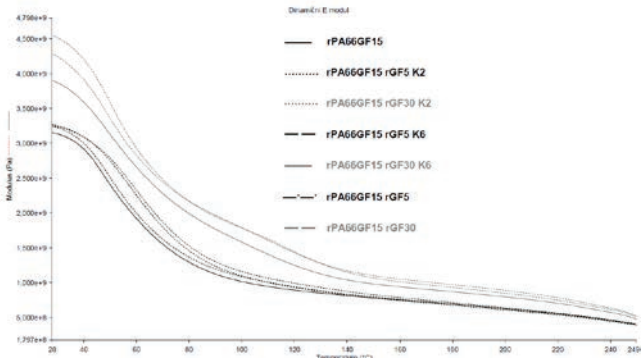
Krivulje dinamičnega E modula (Slika 1 in Tabela 4) pokažejo, da je najnižji dinamični E modul za reciklat termoplastičnega kompozita na osnovi PA 66 ojačenega s 15 % steklenimi vlakni. Najvišji dinamični E modul dobimo pri

Silvester BOLKA[1], Teja PEŠL[1], Tamara ROZMAN[1], Aljaž KOLAR[2], Bojan BREZNIK[2], Primož HABERMAN[2], Blaž NARDIN[1]
[1]Fakulteta za tehnologijo polimerov
[2]O.P.S. Breznik d.o.o.

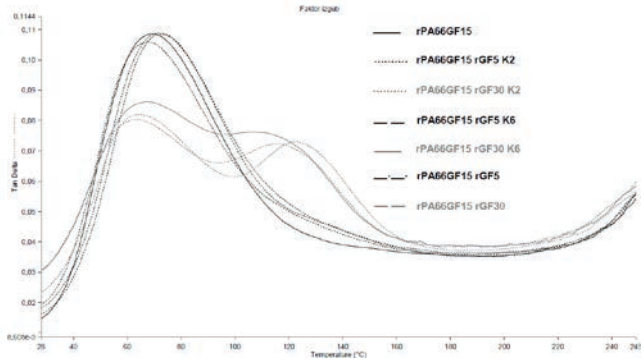
izvedbi s 30 % dodanega reciklata duroplastičnega kompozita v zmeti obliki v reciklat termoplastičnega kompozita na osnovi PA 66 ojačenega s 15 % steklenimi vlakni. Krivulje za vzorce brez dodanega reciklata duroplastičnega kompozita in s 5 % dodanega reciklata duroplastičnega kompozita imajo vidno eno znižanje dinamičnega E modula, pri krivulji faktorja izgub imajo tudi le en vrh (Slika 2), krivulje s 30 % dodanega reciklata duroplastičnega kompozita imajo vidna dva znižanja dinamičnega E modula in pri krivulji faktorja izgub dva vrhova. Če dodamo kompatibilizator, potem se dinamični E modul z višanjem dodanega kompatibilizatorja znižuje pri vzorcih s 30 % dodanega reciklata duroplastičnega kompozita, pri vzorcih s 5 % dodanega reciklata duroplastičnega kompozita pa ostaja dinamični E modul praktično nespremenjen po celotnem temperaturnem intervalu. Prvi upad dinamičnega E modula je steklasti prehod za PA 66 matrico, drugi upad (pri izvedbah z dodanimi 30 % duroplastičnega reciklata duroplastičnega kompozita) pa je steklasti prehod duroplastične matrice. Višji kot je dodatek kompatibilizatorja, nižji je steklasti prehod za duroplastični kompozit karakteriziran kot vrh za faktor izgub, kar pomeni, da je kompatibilizator dobro mešljiv z reciklatom duroplastičnega kompozita. Steklasti prehod za vzorec s 30 % reciklata duroplastičnega kompozita je 123 °C, pri dodanih 2 % kompatibilizatorja se zniža ne 116 °C, pri 6 % dodanega kompatibilizatorja se dodatno zniža na 108 °C. Višina faktorja izgub, ki pomeni elastični odziv vzorcev, se pri 30 % dodanega reciklata duroplastičnega kompozita zniža na 0,07-0,09 iz 0,11 za vse ostale vzorce.

Tabela 4: Zbrani rezultati dinamičnih mehanskih testov

Vzorec	E´ pri 30 °C (GPa)	T_g pri tan δ (°C)	tan δ (-)
rPA66GF15	3,14	69	0,11
rPA66GF15 rGF5 K2	3,22	68	0,11
rPA66GF15 rGF30 K2	4,24	64/116	0,08/0,07
rPA66GF15 rGF5 K6	3,25	72	0,11
rPA66GF15 rGF30 K6	3,87	67/108	0,09/0,08
rPA66GF15 rGF5	3,24	73	0,11
rPA66GF15 rGF30	4,51	65/123	0,08/0,07



Slika 1: Zbrani rezultati dinamičnega E modula za prvo kompavndiranje



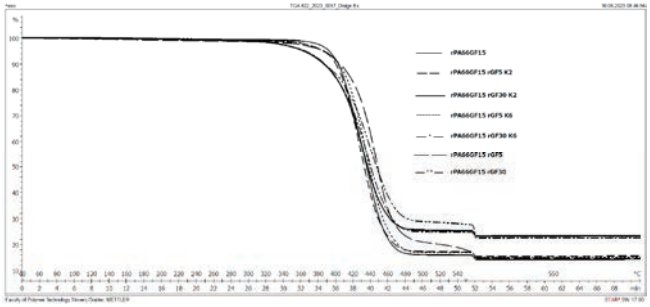
Slika 2: Zbrani rezultati faktorja izgub za prvo kompavndiranje

Temperatura degradacije (Tabela 5, Slika 3) se zviša, ko dodamo 5 % reciklata duroplastičnega kompozita in rahlo pade, ko dodamo 30 % reciklata duroplastičnega kompozita, vendar je še vedno višja kot pri reciklatu termoplastičnega kompozita na osnovi PA 66 ojačanega s 15 % steklenimi vlakni. Pri vseh vzorcih dobimo enostopenjski razpad v dušikovi atmosferi, kar pomeni, da je temperatura degradacije PA 66 matrice in duroplastične smole primerljiva. Višji kot je odstotek dodanega reciklata duroplastičnega kompozita, višji je odstotek saj, ki zgorijo pri preklopu v kisikovo atmosfero in višji je ostanek po TGA meritvi. Pri vzorcu reciklata termoplastičnega kompozita na osnovi PA 66 ojačanega s 15 % steklenimi vlakni je 14,2 % ostanka, pri dodanih 5 % reciklata duroplastičnega kompozita naraste ostanek od 14,5 – 15,5 %, pri dodanih 30 % reciklata duroplastičnega kompozita je ostanek 22,4 – 23,2 %. Iz rezultatov bi lahko zaključili, da je v reciklatu duroplastičnega kompozita le okoli 30 % steklenih vlaken in okoli 70 % duroplastične matrice.

Silvester BOLKA[1], Teja PEŠL[1], Tamara ROZMAN[1], Aljaž KOLAR[2], Bojan BREZNIK[2], Primož HABERMAN[2], Blaž NARDIN[1]
[1]Fakulteta za tehnologijo polimerov
[2]O.P.S. Breznik d.o.o.

Tabela 5: Zbrani rezultati TGA testov

Vzorec	T_{d1} (°C)	Razpad$_1$ (%)	Saje (%)	Ostanek (%)
rPA66GF15	439,8	84,16	1,62	14,22
rPA66GF15 rGF5 K2	432,9	82,97	1,57	15,46
rPA66GF15 rGF30 K2	434,7	74,75	2,01	23,24
rPA66GF15 rGF5 K6	438,6	83,20	1,80	15,00
rPA66GF15 rGF30 K6	438,9	75,37	2,19	22,44
rPA66GF15 rGF5	452,8	82,19	3,29	14,52
rPA66GF15 rGF30	443,2	72,36	4,52	23,12



Slika 3: Zbrani rezultati TGA analize

Udarna žilavost (Tabela 6) se zniža pri 5 % dodatka reciklata duroplastičnega kompozita in se drastično zniža pri 30 % dodatka reciklata duroplastičnega kompozita. Pri 2 % dodanega kompatibilizatorja se udarna žilavost skoraj ne spremeni, pri 6% dodanega kompatibilizatorja se močno zviša, vendar je pri vzorcu s 30 % dodanega reciklata duroplastičnega kompozita še vedno nižja kot pri reciklatu termoplastičnega kompozita na osnovi PA 66 ojačenega s 15 % steklenimi vlakni. Podobno obnašanje je tudi pri testih zarezne udarne žilavosti. Zaključimo lahko, da sta tako udarna žilavost kot zarezna udarna žilavost odvisni od dodane količine kompatibilizatorja in da sta pri višjem odstotku dodanega reciklata duroplastičnega kompozita udarna in zarezna udarna žilavost nižji. Relativno majhen vpliv na udarno in zarezno udarno žilavost bi lahko pripisali rezultatom TGA analize, saj je v reciklatu duroplastičnega kompozita le slaba tretjina steklenih vlaken, ki vplivajo na dvig žilavosti, ostalo so polnila, ki s svojim nizkim aspektnim razmerjem delujejo le kot polnilo in znižujejo tako udarno kot zarezno udarno žilavost vzorcev.

Tabela 6: Zbrani rezultati udarne in zarezne udarne žilavosti vzorcev

Vzorec	Udarna žilavost (kJ/m^2)	Zarezna udarna žilavost (kJ/m^2)
rPA66GF15	26,5±1,6	6,6±0,5
rPA66GF15 rGF5 K2	24,9±2,5	4,9±0,6
rPA66GF15 rGF30 K2	9,9±1,0	3,1±0,1
rPA66GF15 rGF5 K6	34,0±2,6	6,0±0,8
rPA66GF15 rGF30 K6	16,3±1,8	3,3±0,1
rPA66GF15 rGF5	22,1±3,9	4,9±1,1
rPA66GF15 rGF30	10,4±0,7	2,6±0,2

5 SKLEP

Preučevali smo vpliv dodajanja reciklata duroplastičnega kompozita v zmeti obliki v reciklat termoplastičnega kompozita na osnovi PA 66 ojačanega s 15 % steklenimi vlakni in hkrati preučevali vpliv dodanega kompatibilizatorja. Na podlagi rezultatov TGA analize smo ugotovili, da je v reciklatu duroplastičnega kompozita le slaba tretjina steklenih vlaken, ostalo je duroplastična matrica, ki deluje le kot polnilo in ne kot ojačevalo. Kljub vsemu, pa višanje dodatka reciklata duroplastičnega kompozita zvišuje togost kompozitov iz reciklata duroplastičnega kompozita v zmeti obliki in reciklata termoplastičnega kompozita na osnovi PA 66 ojačenega s 15 % steklenimi vlakni. Zvišanje togosti je odvisno od količine dodanega kompatibilizatorja. Upogibna trdnost se zviša, če dodamo le reciklat duroplastičnega kompozita, tudi v kombinaciji z dodanimi 2 % kompatibilizatorja, natezna trdnost pa se pri vseh izvedbah zniža. Raztezek pri pretrgu se ohrani oz. zviša če dodamo poleg reciklata duroplastičnega kompozita tudi kompatibilizator. Na podlagi DMA testov smo dokazali, da sta reciklat duroplastičnega kompozita in kompatibilizator mešljiva, saj je bil steklasti prehod za duroplastično matrico odvisen od količine dodanega kompatibilizatorja.

Glavni cilj raziskave, dodajanje reciklata duroplastičnega kompozita v zmeti obliki v reciklat termoplastičnega kompozita na osnovi PA 66 ojačenega s 15 % steklenimi vlakni, ki sta

kompatibilizirana z različnimi količinami dodanega kompatibilizatorja je bil uspešno izveden. S testi smo pokazali, da je v reciklatu duroplastičnega kompozita le okoli tretjine steklenih vlaken, ki delujejo kot ojačevalo, da s kompatibilizatorjem na osnovi termoplastičnega poliuretana ohranimo žilavost na visokem nivoju kljub dodanim 30 % reciklata duroplastičnega kompozita in da je kompatibilizator mešljiv z duroplastično matrico. Za nadaljevanje raziskav se bomo osredotočili na ločevanje duroplastične matrice in steklenih vlaken pri reciklatu duroplastičnega kompozita, da bi tako dobili še boljši ojačitveni efekt pri dodajanju reciklata duroplastičnega kompozita v termoplastično matrico in tako dvignili tudi natezno trdnost dobljenih kompozitov.

Viri:

[1] S. Utekar, S. V K, N. More, A. Rao, Comprehensive study of recycling of thermosetting polymer composites – Driving force, challenges and methods, Compos. Part B Eng. 207 (2021) 108596. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108596.

[2] M. Colledani, Systemic Circular Economy Solutions for Fiber Reinforced Compositesnull, 2022.

Izjava o omejitvi odgovornosti: Ta projekt je financiral Evropski sklad za regionalni razvoj (ESRR) v okviru sporazuma o dodelitvi sredstev št. 101084037. Vendar so izražena stališča in mnenja izključno avtorjev in ne odražajo nujno stališč in mnenj Evropske unije ali Izvajalske agencije Evropskega sveta za inovacije in MSP (EISMEA). Niti Evropska unija niti organ, ki dodeljuje sredstva, zanje ne moreta biti odgovorna.

Funded by
the European Union

POPOLNOMA ELEKTRIČNI BRIZGALNI STROJ ROBOSHOT

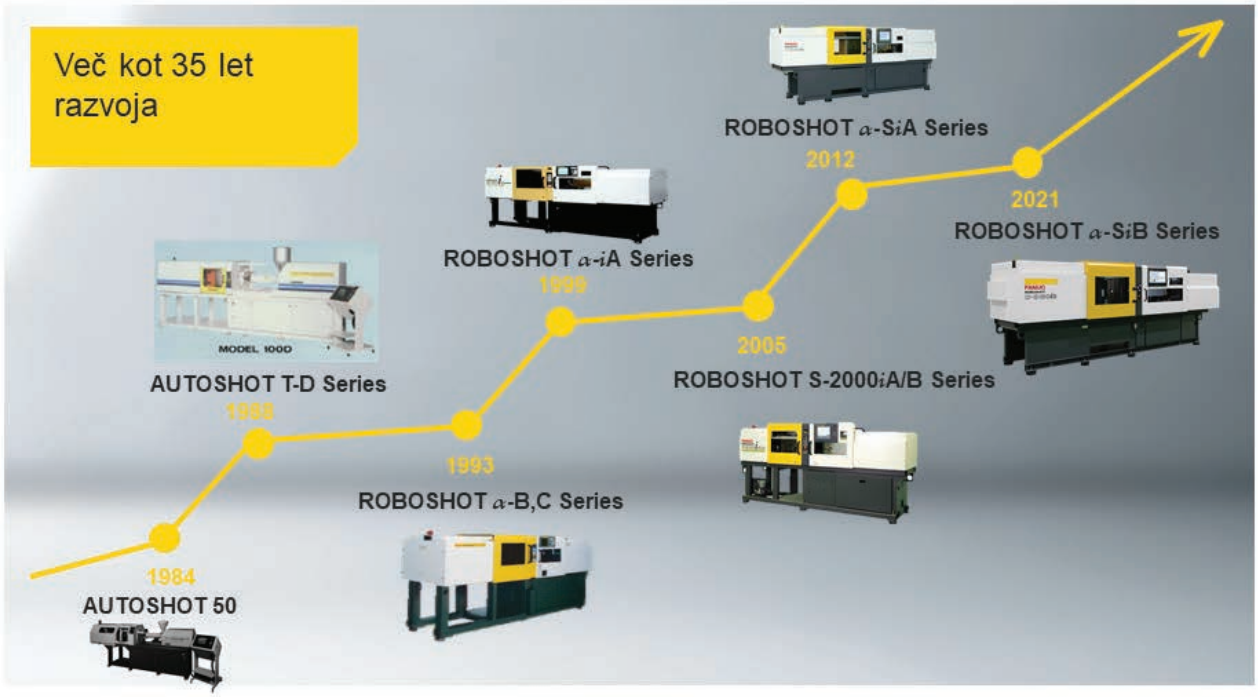
Miha PUŠNIK
FANUC Adria d.o.o.

IZVLEČEK

Popolnoma električni brizgalni stroj Fanuc Roboshot je na trgu prisoten že več kot 35 let. Skozi leta se stroj nenehno razvija in tako vsaka nova različica na naš trg prinaša japonske vrednote kot so natančnost, doslednost in perfekcionizem.

Glavne komponente stroja so Fanuc CNC krmilnik in Fanuc servo motorji, ki stroju zagotavljajo učinkovitost, nadzor in nizko porabo energije. Fanuc Roboshot stroji so v svetu prepoznani kot izjemno zanesljivi in z izjemno nizkimi stroški vzdrževanja.

Fanuc Roboshot v vašo proizvodnjo prinaša stabilnost in konstantno kvaliteto z večjo dodano vrednostjo..


Več kot 35 let razvoja
ROBOSHOT α-SiA Series
2012
2021
ROBOSHOT α-SiB Series
ROBOSHOT α-iA Series
1999
AUTOSHOT T-D Series
2005
ROBOSHOT S-2000iA/B Series
1993
ROBOSHOT α-B,C Series
1984
AUTOSHOT 50

35 LET razvoja in proizvodnje na japosnkem
Na svetu več kot 75,000 strojev delujočih strojev
Več kot 400 strojev Proizvodnja zmogljivost na mesec.

Življenjska doba
Makasimalna natančnost
Izjemna ponovljivost
FANUC CNC kontroler
Najnižji stroški lastništva
Dobavljivost rezervnih delov
Nizka poraba energije
Dokazana zanesljivost
FANUC
ROBOSHOT
α-S150iB

Električni pogoni
vseh osi
z lastno servo tehnologijo

Najboljša CNC tehnologija
Izboljšan vmesnik za posluševanje robota
Vmesnik za CF kartico in USB
Interaktivni HMI zaslon
21.5" HD zaslon na dotik
Hitr in enostaven vnos
Enostavna avtomatizacija

Pokrivanje različnih aplikacij z enim strojem

5 STOPENJSKA ANALIZA ZA NASTAVITEV ROBUSTNIH PARAMETROV PROCESA BRIZGANJA PLASTIKE

Janez TURK, Luka VOUK, Tjaš BOŽIČ
HELLA Saturnus Slovenija d.o.o.

IZVLEČEK

Za dosego stabilnega procesa brizganja predlagamo izvajanje modificirane standardne šeststopenjske analize, ki je predstavljena v knjigi "Robust Process Development and Scientific Molding". Večina teh analiz je na področju brizganja plastike splošno znanih, vendar sta pomembna tudi zaporedje in doslednost. Izbrali smo štiri analize, ki so najbolj primerne za plastične kose v proizvodnji avtomobilskih svetil, jih povzeli in dopolnili s primeri izvedbe. Dodatna peta študija je bila uvedena kot novost.

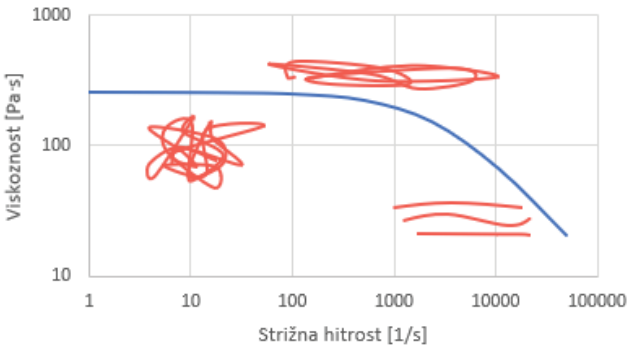
1 UVOD

Pri vzpostavljanju procesa brizganja plastičnih izdelkov je potrebno nastaviti nabor brizgalnih parametrov. Nastavitve parametrov lahko pomenijo razliko med sprejemljivo in nesprejemljivo kvaliteto brizganega izdelka. Med sprejemljivimi nabori parametrov so robustni ali stabilni parametri takšni, ki zagotavljajo stalno sprejemljivo kakovost kljub variaciji zunanjih pogojev. To je zaželeno, saj tako posebne kontrole izdelkov niso potrebne. Izraz "kakovost" lahko pomeni dimenzije kosa, videz ali kateri koli drug vidik, ki je pomemben za obliko, videz ali funkcijo izdelka. Za dosego stabilnega procesa brizganja predlagamo izvajanje standardne šeststopenjske študije, ki je predstavljena v knjigi "Robust Process Development and Scientific Molding" [1]. Večina teh študij je na področju brizganja plastike splošno znanih, vendar sta pomembna tudi zaporedje in doslednost. Izbrali smo štiri študije, ki so najbolj primerne za plastične kose v proizvodnji avtomobilskih svetil, jih povzeli in dopolnili s primeri izvedbe. Dodatna peta študija je bila uvedena kot novost. Izvajanje petih študij naj bi, vključno z zapisom rezultatov, izkušenemu tehnologu vzelo približno polovico izmene. Trdimo da se strošek izvedbe takšne študije v življenjski dobi izdelka hitro povrne.

2 PET STOPENJSKA ANALIZA

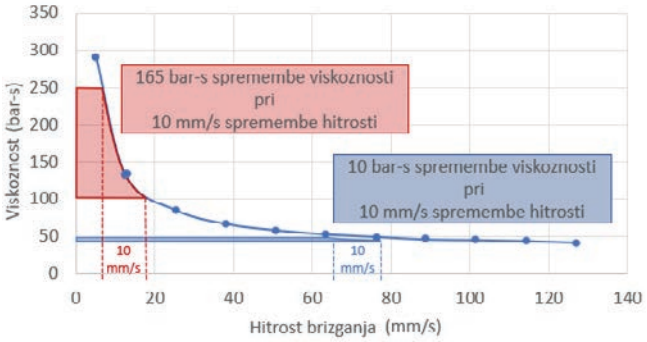
2.1 Analiza viskoznosti

Tlak in pretok sta osrednji fizikalni količini pri procesu brizganja plastike. Določata namreč čas polnjenja, skrčke, deformacijo končnega izdelka, itd. Pri brizganju plastike običajno določimo pretok z nastavitvijo hitrosti brizganja, tako da je pravzaprav pretok razlog in tlak posledica. Nastavitev pretoka ima svojo toleranco, prav tako viskoznost vhodnega materiala. Stabilen proces brizganja je takšen, da zmerno nihanje teh dveh količin povzroči čim manjše nihanje v kakovosti končnega izdelka, tukaj govorimo predvsem o teži in deformaciji končnih izdelkov. Pretok in tlak sta med seboj povezana z viskoznostjo. Viskoznost plastike, ki je sestavljena iz prepletenih polimernih klobk, pa je močno odvisna od pretoka, saj so pri višjih pretokih razlike hitrosti med plastmi tekočine višje, kar vodi v razpletanje polimernih klobk kar pomeni nižjo viskoznost in s tem lažji pretok plastike. Razliki hitrosti med plastmi tekočine pravimo tudi strižna hitrost, odvisnost viskoznosti od strižne hitrosti je na sliki 1.



Slika 1 Odvisnost viskoznosti polimera od strižne hitrosti. Pri višjih strižnih hitrostih se polimerne klobke razpletejo, kar ima za posledico nižjo viskoznost Pri brizganju termoplastov je tipična strižna hitrost 1000 1/s.

Zaradi kompleksne odvisnosti med pretokom, tlakom in viskoznostjo plastike, je moč izbrati takšno hitrost brizganja, ki bo ob dani toleranci povzročila manjše spremembe viskoznosti. Na sliki 2 je prikazan princip izbire. Namen analize viskoznosti je pripraviti takšen slika za določen izdelek in iz njega odčitati priporočeno hitrost brizganja.



Slika 2 Graf viskoznosti glede na hitrost brizganja, ki je osrednji rezultat študije viskoznosti. Priporočena je najmanjša hitrost brizganja, ki je še na ravnem delu grafa.

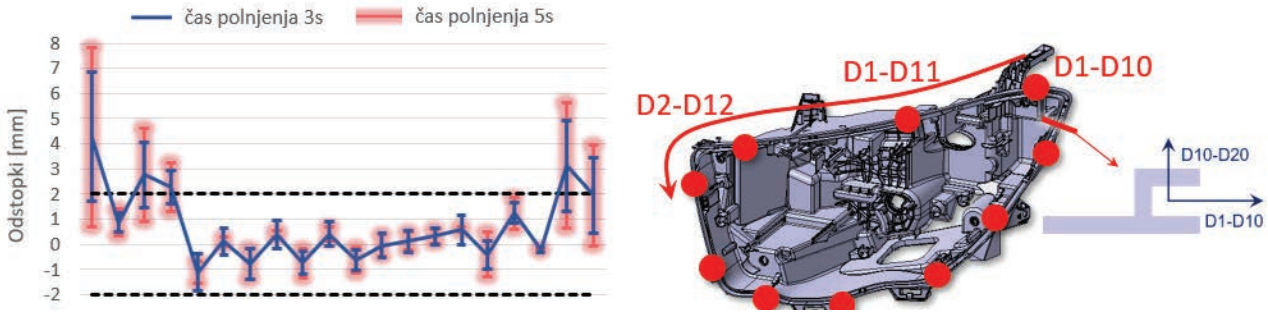
Analizo viskoznosti izvedemo tako, da nastavimo najvišjo smiselno hitrost brizganja in poskrbimo, da so izdelki ob preklopu zapolnjeni do približno 90%. Nato postopoma znižujemo hitrost brizganja v približno desetih korakih, dokler ne dosežemo zelo nizke hitrosti brizganja, okoli 10% najvišje hitrosti. Med zmanjševanjem hitrosti brizganja zapisujemo brizgalni tlak in čas polnjenja vsakega vzorca ter izračunavamo njun produkt, ki predstavlja viskoznost. Na koncu pripravimo graf kot na sliki 2, in izberemo najmanjšo hitrost brizganja, ki se nahaja na položnem delu grafa. To zagotavlja stabilen proces brizganja z manjšimi nihanji viskoznosti.

Primer vpliva hitrosti brizganja na variacijo deformacije oboda ohišja žarometa je prikazan na sliki 3. Iz desetih zaporednih vzorcev smo izračunali povprečno deformacijo in variacijo kot trikratnik standardne deviacije, ki je opazno manjša pri krajšem času brizganja. Trdimo, da bi bil efekt izbire višje hitrosti polnjenja še večji, če bi imeli na voljo meritve za daljše časovno obdobje in bi zajemali vzorce iz različnih šarž materiala.

2.2 Analiza polnjenja več-gnezdnega kalupa

V kalupu za proizvodnjo plastičnih izdelkov je običajno več gnezd. Proizvodnja je tako cenejša, saj se lahko v enem ciklu proizvede več izdelkov naenkrat. Da bi dosegli enako kakovost izdelkov iz vseh gnezd, morajo biti tlačni in termalni pogoji v vseh gnezdih podobni. Neuravnoteženo polnjenje gnezd lahko povzroči dimenzijska odstopanja in razlike v vizualni kakovosti med izdelki. Pri izdelkih proizvedenih v kalupih z veliko gnezd npr. 16 ali 32, so lahko te razlike zelo velike. V skrajnem primeru je lahko gnezdo zapolnjeno še pred preklopom na naknadni tlak, kar pomeni da bo brizgalni tlak na to gnezdo deloval pravzaprav kot nekontroliran naknadni tlak. Po načelu najmanjšega upora bo plastika lažje tekla v gnezda z manj upora, zato bodo ta hitreje zapolnjena. Obstaja več razlogov za razlike v tokovnem uporu med gnezdi, glavni pa so:

- Odstopki pri izdelavi dolivnega sistema povzročijo, da ima tok na poti v eno gnezdo zaradi drugačnega preseka drugačen upor kot na poti v drugo.
- Neenako odzračevanje zraka, ki ga talina med polnjenjem izpodriva, povzroči neuravnotežen zračni pritisk med gnezdi. Zračni pritisk deluje proti tlaku in ovira polnjenje neuravnoteženo.
- Neenakomerno hlajenje povzroči neenakomerno temperaturo orodja, kar vodi v neenakomerno temperaturo taline, od katere pa je odvisna viskoznost. Ob različnih viskoznostih je upor toka v posamezna gnezda različen.

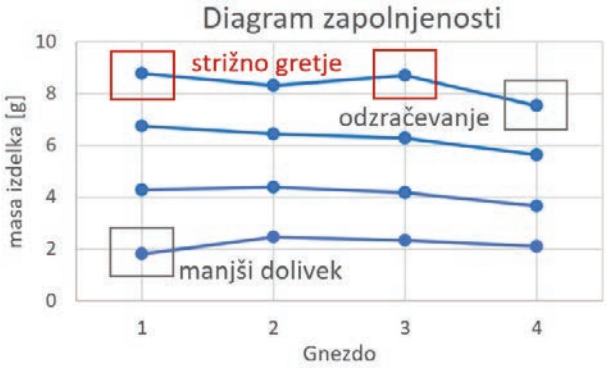


Slika 3 Vpliv hitrosti brizganja na variacijo deformacije oboda ohišja žarometa. Povprečje in variacija sta izračunana iz meritev desetih zaporedno brizganih vzorcev. Narisana variacija je trikratnik standardne deviacije.

• Neuravnoteženost zaradi strižnega gretja je pojav, ki se mu je težko izogniti. Tok plastike ima največjo strižno hitrost ob plašču dolivnega sistema, tam se tudi najbolj greje. Laminarnost toka plastike zagotavlja, da tokovnica ostane ob plašču in se vedno bolj greje. V dolivnem sistemu imamo tako naravno neenakomeren profil temperaturnega polja. V štiri ali več gnezdnem orodju dolivni sistem večkrat nesrečno razdelimo, tako da v nekatera gnezda teče toplejša plastika. Vizualna razlaga je na sliki 4.

Slika 4 Temperaturna razlika taline med različnimi gnezdi zaradi strižnega gretja in več razvodov.

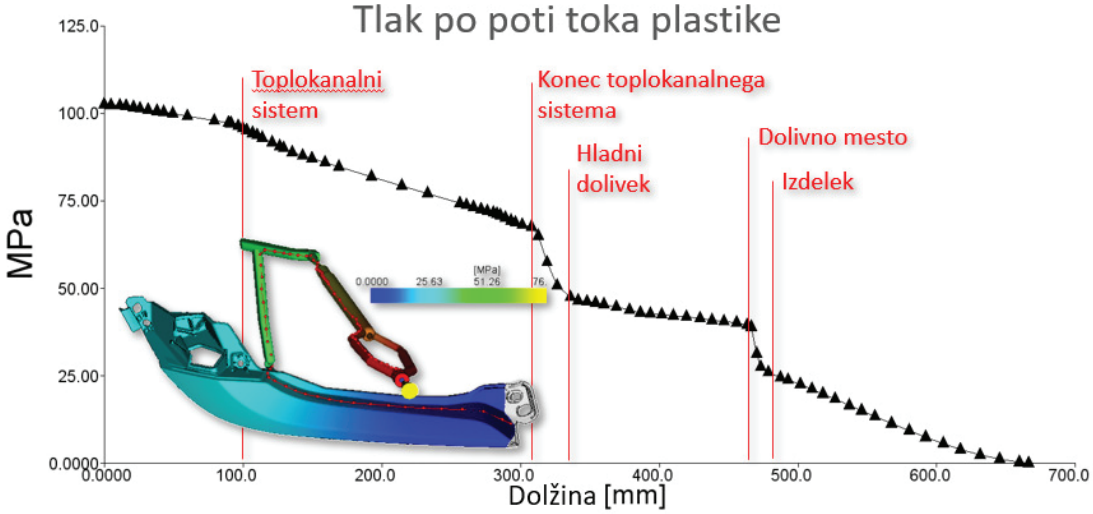
Analizo polnjenja gnezd izvedemo tako, da proizvedemo izdelke z več stopnjami napolnjenosti, nato tri vzorce posamezne stopnje napolnjenosti iz vsakega gnezda stehtamo in pripravimo slika napolnjenosti, kot na sliki 5. Z analizo diagrama zapolnjenosti ugotavljamo, ali je neuravnoteženost polnjenja med gnezdi sprejemljiva ali ne. Splošnega kriterija ni mogoče podati, saj so zahteve kakovosti različnih izdelkov med seboj zelo različne, vendar govorimo o nekajodstotnem dovoljenem odstopanju. Z analizo diagrama zapolnjenosti lahko tudi ugotavljamo razlog za neuravnoteženo polnjenje. Slabo odzračevanje povzroči zaostajanje polnjenja ob koncu, strižno gretje povzroči simetrično prehitevanje polnjenja toplejših gnezd, zaostajanje na začetku pa lahko kaže na manjši presek dolivne poti. Vsako sumljivo območje je treba preveriti in v primeru, da se potrdi, odpraviti.



Slika 5 Izrisane so mase izdelkov iz različnih gnezd pri različnih zapolnjenosti. Iz načina prehitevanja ali zaostajanja polnjenja je moč sklepati na razlog zanj.

2.3. Analiza tlačnih padcev

Brizgalni tlak je ena izmed najbolj pomembnih količin za proces brizganja plastike. Najvišji tlak polnjenja, ki ga je možno prebrati s krmilnika brizgalne naprave je pravzaprav seštevek posameznih tlačnih padcev vseh odsekov toka plastike, ilustracija je na sliki 6. Analiza tlačnih padcev skozi posamezne odseke orodja je način preverbe dimenzioniranja dolivnega sistema, kvaliteto izdelave orodja in izbire materiala. Za odpravo težav, ki jih takšna analiza razkrije je



Slika 6 Tlak ob preklopu izrisan po poti toka in razčlenjen po posameznih odsekih.

Slika 7 Delni brizgi in pripadajoči brizgalni tlaki

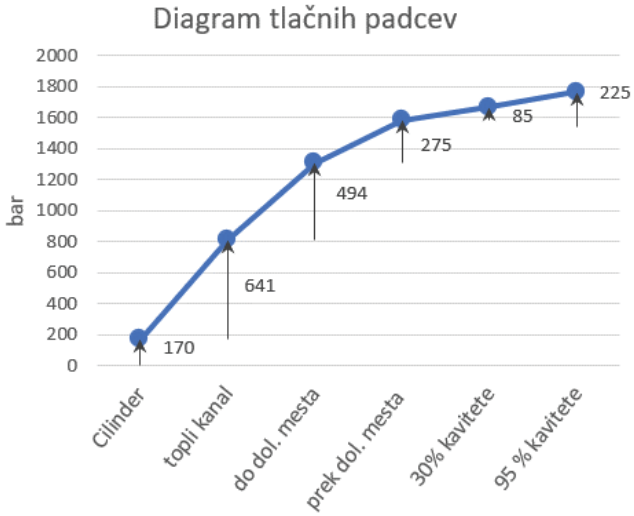
ključno, da so ugotovljene karseda zgodaj, saj lahko vključujejo popravke na orodju, kar lahko traja več tednov.

Analizo izvedemo tako, da izvedemo brizg v prazno z odstavljenim cilindrom in zapišemo dosežen tlak. Tako izmerimo tlačni padec skozi cilinder in ustje cilindra. Naslednji je brizg v prazno s pristavljenim cilindrom in odprtim orodjem. Izmerjen tlak je seštevek prejšnjega tlačnega padca in tlačnega padca skozi toplokanalni sistem. Z odštevanjem izračunamo posamezna tlačna padca. Nadaljujemo z zaprtim orodjem, tako da zapolnimo hladnokanalni sistem vsakokrat do njegovega naslednjega sestavnega dela in izdelek do nekaj stopenj zapolnjenosti, kot na je prikazano na Sliki 7. Brizgalni tlak vmes zapisujemo in od njega odštevamo prejšnje.

Tabela 1 Tabela z navedenimi padci tlaka

Opis	preklop [mm]	Tlak [bar]
Cilinder	-	170
Topli kanal	-	811
do dol. mesta	58	1305
prek dol mesta	49	1580
50% kalupa	45	1665
95% kalupa	19	1765

Zbrane podatke o tlačnih padcih zapišemo v tabelo, kot v tabeli 1. Narišemo lahko tudi diagram tlačnih padcev kot je prikazano na sliki 8.



Slika 8. Diagram padcev tlaka.

Nenavadno visoke tlačne padce je potrebno raziskati in ugotoviti njihov vzrok. Običajne vrednosti tlačnih padcev za različne dele orodja v običajnih delovnih pogojih so:

- Gnezdo < 800bar
- Hladnokanalni dolivni sistem < 400bar
- Toplokanalni dolivni sistem < 600bar
- Cilinder < 200bar
- Skupni tlak < 2000bar

Tlačni padec skozi posamezen odsek je lahko višji od priporočenega, vendar je ga je potrebno uravnotežiti z manjšim tlačnim padcem skozi drug odsek. Z analizo tlačnih padcev opravimo najbolj rigorozen preizkus orodja in ujamemo napake, ki vodijo v nizko kvaliteto kosov, povečan izmet ter nepredvideno popravilo orodij.

2.4 Analiza zamrzovanja

Plastika vstopi v kalup prek dolivnega sistema, ki je na dolivnem mestu povezan z izdelkom. Dolivni sistem se deli na dva dela: toplega, ki ga obdajajo grelci, ki preprečujejo, da bi plastika v njem zmrznila, ter hladnega, ki zamrzne in se vsak cikel skupaj z izdelkom odstrani iz orodja.

V naknadni fazi brizgalna enota zagotavlja tlak v tekoči sredici plastike in nadomešča izgubljeni volumen zaradi termičnega skrčka, dokler se plastika ne ohladi in narasla viskoznost ne prekine toka. Dolžina naknadne faze je ključnega pomena za vizualno kakovost izdelka, saj zagotavlja, da je izdelek pritisnjen na stene kalupa in ima enako obliko kot kalup. Po koncu te faze se izdelek odmakne od sten kalupa in se bolj ali manj prosto krči. Naknadni tlak mora biti dovolj dolg da staljena sredica ne izteka iz kalupa nekontrolirano in da je prostega krčenja čim manj. Hladni dolivek in dolivno mesto morata biti dimenzionirana tako, da zmrzneta kasneje kot izdelek in ne omejujeta časa pakiranja.

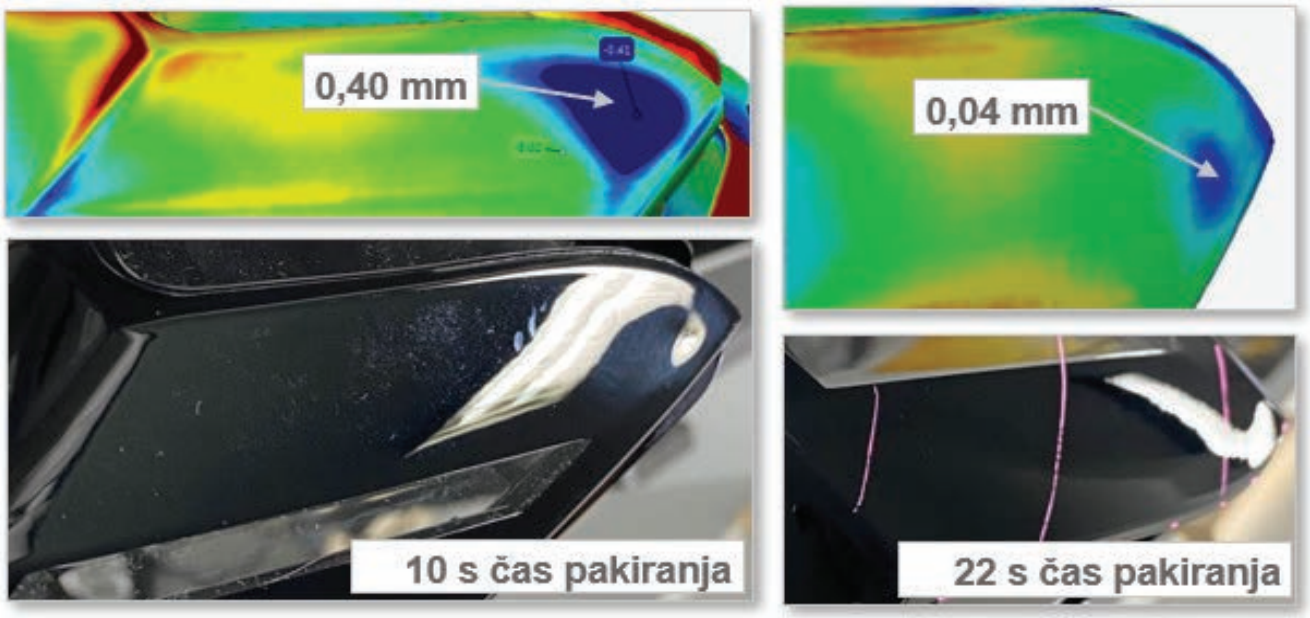
Namen analize zamrzovanja je določiti dolžino naknadnega tlaka, ki še vpliva na izdelek. To ugotavljamo s tehtanjem izdelkov. Izdelek je težji, če je v njem več plastike, ki je zamrznila pod višjim tlakom. Predlagamo, da se za to analizo nastavi srednjo višino naknadnega tlaka t.j. 500 barov in proizvede izdelke z različnimi dolžinami naknadnega tlaka z eno-sekundnim razmakom. Priporočljivo je, da se za vsak čas naknadnega tlaka stehtajo trije različni vzorci, izračuna povprečna masa ter rezultate vpiše v tabelo. Primer tabele je tabela 2, ki jo lahko dopolnimo s pripadajočim grafom.

Tabela 1. Masa vzorcev proizvedenih z različnimi dolžinami naknadnega tlaka, v medsebojnem razmaku 1 sekunde.

Tlak (s)	1	2	3	4	5	6	7	8
Masa (g)	12,98	13,26	13,84	14,06	14,12	14,23	14,23	14,23

Čas zamrznitve je moč razbrati iz meritev kot čas po katerem se masa izdelka več ne spreminja. Dolžina naknadnega tlaka naj ne bo krajša. S tem zagotovimo, da masa, vizualna kvaliteta in deformacija izdelka ne bodo nihale zaradi tolerance nastavitve brizgalnega stroja ali nekontroliranega iztekanja taline iz kalupa. Čas zamrznitve je tudi dragocena informacija pri nastavljanju kompleksnejših profilov naknadnega tlaka, kot je npr. padajoč naknadni tlak.

Primer vpliva dolžine naknadnega tlaka na posedenost izdelka je predstavljen na sliki 9. Velik



Slika 9 Posedenost na izdelku je manjša z ustrezno dolžino naknadnega tlaka.

presek je zahteval nenavadno dolg naknadni tlak. Zaradi dolgega naknadnega tlaka cikla ni bilo potrebno podaljševati, saj se je fazo hlajenja ustrezno skrajšalo.

2.5 Procesno okno naknadnega tlaka

Čas naknadnega tlaka smo določili s prejšnjo analizo. Namen te, zadnje analize, pa je določiti višino naknadnega tlaka. Naknadni tlak mora biti dovolj visok, da se izognemo pretirani deformaciji, posedanju, lunkerjem in drugim vizualnim napakam. Po drugi strani pa lahko previsok naknadni tlak tudi povzroči težave npr. pri izmetavanju. Izjemno koristno je, če prečešemo različne vrednosti naknadnega tlaka in ugotovimo, katere težave se pojavljajo pri katerih vrednostih. Idealno bi bilo, če bi lahko brizgali z naknadnim tlakom do 1600 barov. V večini primerov bo dosežen nižji naknadni tlak, saj se bodo težave pojavile že pri nižjem tlaku in bo analiza prekinjena preden bi dosegli 1600 barov.

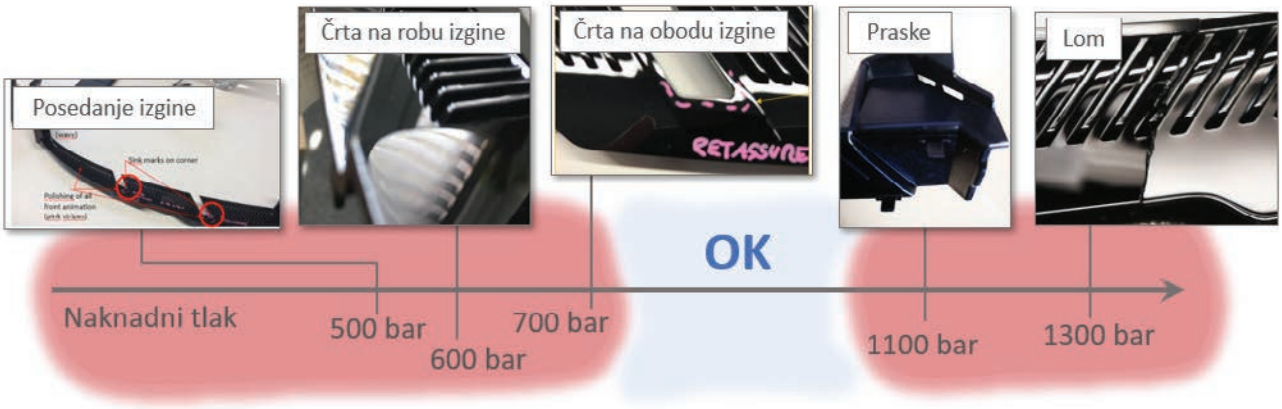
Analizo izvedemo tako da proizvedemo vzorec z nizkim naknadnim tlakom npr. z 200 bari. Nato pa proizvedemo serijo vzorcev pri katerih naknadni tlak korakoma dvigujemo po 100 barov. Vmes pregledujemo vzorce, jih fotografiramo in beležimo obnašanje. Ugotovitve lahko predstavimo v tabeli ali pa premočrtno, kot na primeru izvedbe takšne analize na sliki 10. Primeri težav, ki jih je potrebno zabeležiti, so:

• Prekoračitev zapiralne sile: Izdelek ima lahko tako veliko projekcijsko površino, da je potrebno tlak omejiti, da ne bi presegli zapiralne sile. Pred preizkusom je potrebno opraviti izračun.

• Težave pri izmetavanju: Vsak primer lomljenja ali praskanja med izmetavanjem je potrebno fotografirati in zabeležiti tlak pri katerem se je primer začel pojavljati.

• Prelivanje: Vsak primer nesprejemljivega srha je potrebno fotografirati in zabeležiti tlak pri katerem se je začel pojavljati.

• Posedanje: Vsak primer posedanja je potrebno fotografirati in zabeležiti višino tlaka, ki ga odpravi. V primeru, da posedanje ni mogoče odpraviti ga je potrebno fotografirati pri nekaj višinah naknadnega tlaka.



Slika 10 Fotografije in pojasnila dogodkov ob dvigovanju višine naknadnega tlaka

3 SKLEP

Pet-stopenjska analiza na sistematičen način predpisuje, kako nastavljati ter analizirati ključne procesne parametre pri brizganju termoplastičnih izdelkov. Rezultati analize so v veliko pomoč razvojni ekipi, saj nudijo vpogled v izdelek, kvaliteto izdelave orodja, zrelost brizgalnega procesa, hkrati pa dobljeni podatki služijo pri optimizaciji procesnih parametrov. V dobi kompleksnejših plastičnih izdelkov, ki morajo izpolnjevati vedno več kvalitetnih in funkcionalnih zahtev, prestavlja takšna analiza nepogrešljivo vez med proizvodnjo in razvojem.

Viri:

[1] Kulkarni, S.: *Robust Process Development and Scientific Molding: Theory and Practice*, Hanser Verlag GmbH Co KG, Munich, 2017.

RAZVOJ IN IZDELAVA PROJEKCIJSKE OPTIKE

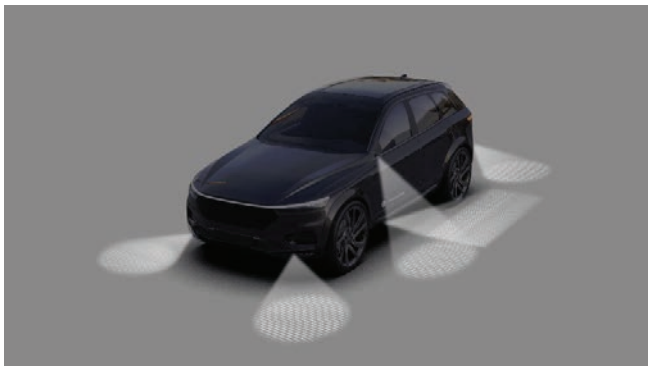
Andraž TEKAVČIČ, Marko VIRŠEK, Aleš ADAMLJE
HELLA SATURNUS SLOVENIJA d.o.o.

IZVLEČEK

Projektorje za projekcijo slike ob vozilu nekateri proizvajalci vgrajujejo v nova vozila. Projekcijske leče predstavljajo ključno komponento. Opisujemo postopek razvoja optike in konstruiranja optičnega sistema. Zahteve za natančnost izdelave projekcijskih leč so višje kot v standardnih izdelkih avtomobilske industrije. Predstavimo izdelavo prototipov, optimizacijo in nadaljnje možnosti izboljšav z namenom doseganja optičnih zahtev.

1 UVOD

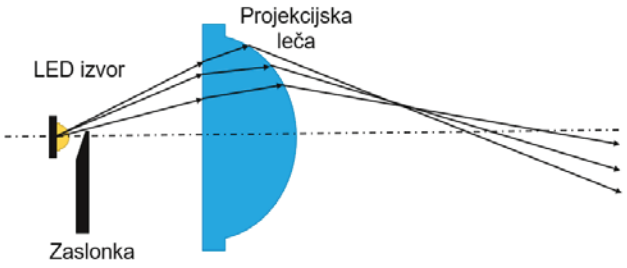
Proizvajalci avtomobilov na svoja nova vozila vgrajujejo vedno več svetlobne opreme, med novimi produkti so tudi projekcijski moduli. Projektorji se uporabljajo za različne varnostne projekcije, kot tudi za projekcijo pozdravnih sporočil [1] ali pozdravnih animacij. Slika ali animacija je lahko projecirana na tla ob različnih delih vozila (Slika 1).



Slika 1: Različne pozicije za uporabo projekcije

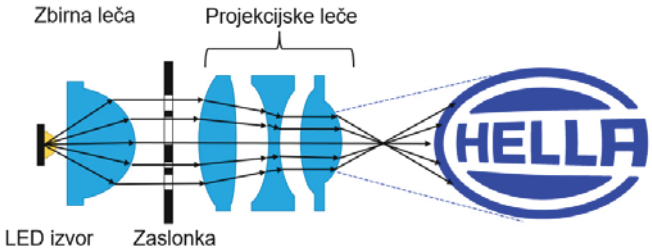
Enostaven tip projekcijskega sistema z eno ali dvema projekcijskima lečama je uporabljen v žarometih, kjer se uporablja za projekcijo kratkega pramena (Slika 2).

Leče v žarometu so izdelane iz stekla ali polikarbonata in so večjih dimenzij (40 - 50 mm). Zahteve za kvaliteto teh leč so mnogo višje kot za klasično optiko, uporabljeno v avtomobilski industriji in pomembno vplivajo na porazdelitev svetlobe na cestišču ter barvne aberacije na svetlo temno meji.



Slika 2: Projekcijski sistem za kratki pramen

V tem prispevku bo predstavljen razvoj mnogo manjše in bolj zapletene projekcijske optike (Slika 3), namenjene projekciji pozdravnih sporočil ob približevanju vozilu. Projekcija je lahko statična ali pa dinamična (video projekcija), odvisno od uporabljene tehnologije zaslonke. Veliko proizvajalcev vozil ima željo projecirati logotip proizvajalca, le te pa so zapletenih oblik z majhnimi detajli.



Slika 3: Projekcijski sistem pozdravnega sporočila

Za zagotavljanje enakomerno osvetljene dovolj ostre projekcije brez barvnih aberacij moramo

uporabiti sistem večih leč. V našem primeru izberemo štiri projekcijske leče izdelane iz plastičnih materialov, saj je steklo za tako svetilko predrago.

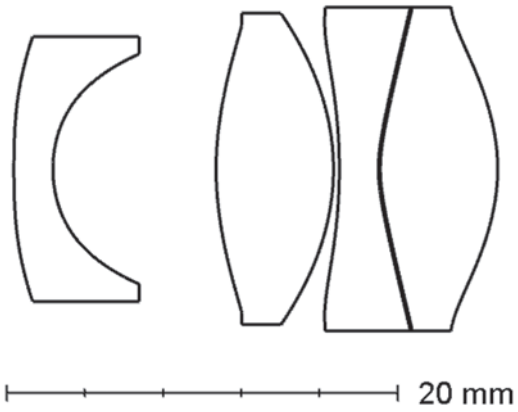
Vgradni prostor take svetilke je najpogosteje stransko ogledalo, kjer je vgrajenih že veliko drugih naprav (ogledalo, smernik, kamera, radar,…). Prostora za projekcijski del svetilke tako ne ostane veliko, zato moramo uporabiti leče manjših dimenzij in mas. Premer leč v takih projektorjih je tipično 7-15mm. Druge možne vgradne prostore predstavljajo prag vozila, ter območja na sprednjem in zadnjem delu vozila. Možna je tudi integracija projektorjev v notranjost vozila.

2 RAZVOJ PROJEKCIJSKE OPTIKE

Projekcijski modul je zapleten sistem, ki ga ne razvija le en razvojni inženir, ampak je za to potrebna celotna razvojna ekipa. Osnovni člani ekipe so optik, konstrukter in elektronik. Ti člani na podlagi zahtev kupca in zmožnosti proizvodnje definirajo koncept izdelka.

2.1 Definicija optičnih površin

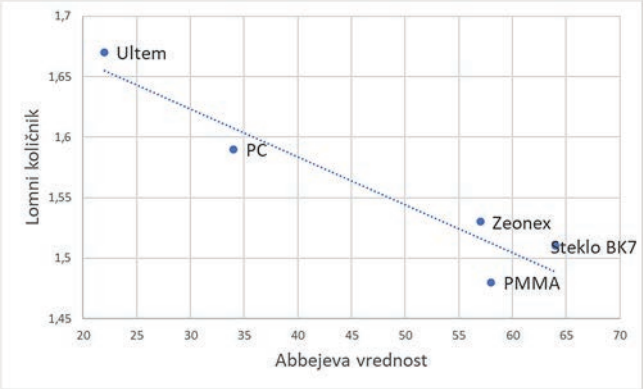
Konstrukcija optičnih površin (Slika 4) poteka na podlagi optičnih zahtev, prostorskih omejitev, omejitev svetlobnega vira ter zunanjih pogojev, pri katerih mora produkt delovati [2].



Slika 4: Optične površine

Optične zahteve so specifične za posamičen izdelek. Projekcijska razdalja je razdalja med projektorjem in projekcijsko ravnino. Po navadi optična os ni pravokotna na ravnino projekcije. Kot osnovne zahteve so podane velikost slike, osvetljenost in homogenost osvetljenosti. Kvaliteto slike se določi z zahtevami za gradient med temnimi in svetlimi deli slike, omejitvami glede izgubljene svetlobe, barvnih aberacij ipd. Svetilnost svetlobnega izvora (po navadi LED) in prostor, ki je na voljo za optične elemente, omejujeta osvetljenost slike.

Optične aberacije določajo kvaliteto projekcije. Aberacije se lahko zmanjša z uporabo asferičnih površin, dodatnih leč in z uporabo različnih kombinacij optičnih materialov. Osnovna lastnost optičnih materialov je lomni količnik. Ta se spreminja z valovno dolžino, kar poenostavljeno opišemo z Abbejevo vrednostjo (Slika 5), pri čemer višja Abbejeva vrednost pomeni manjše spreminjanje lomnega količnika z valovno dolžino svetlobe.



Slika 5: Primerjava optičnih materialov

Tipično imajo optični materiali z višjim lomnim količnikom nižjo Abbe vrednost in obratno [3]. Da lahko zmanjšamo optične aberacije v sistemu projekcijskih leč, je potrebno kombinirati materiale z visokim lomnim količnikom z nizko Abbe vrednostjo in materiale z nizkim lomnim količnikom in visoko Abbe vrednostjo.

V našem primeru smo se odločili za uporabo kombinacije ciklo olefinskega polimera (Zeonex) in polikarbonatov z visokim lomnim količnikom (PC). Ta izbor se sklada tudi z zahtevami glede zunanjih pogojev, npr. delovanje do 85°C ali 90°C pri povišani vlagi. PMMA kot pogost optični material ima podobne optične lastnosti kot ciklo oefinski polimeri, vendar je pri temperaturi 85° že na meji območja delovanja. Pri tej temperaturi

lahko pričakujemo slabšanje lastnosti skozi življenjsko dobo izdelka, kar pa ni sprejemljivo.

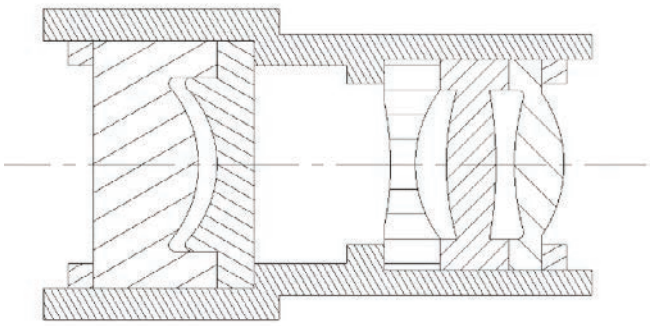
Rezultat razvoja optike so optične površine (Slika 4), pri čemer določimo obliko optičnih površin, debeline leč in razmak med lečami. Optik konstrukterju preda 3D podatke optičnih površin, konstrukter pa doda še ustrezna pritrdišča, ki omogočajo mehansko vgradnjo leč. Nominalna simulacije projekcije (Slika 6) prikazuje črno-belo sliko z gradienti, ki ustrezajo zahtevam, in barvnimi aberacijami na meji opazljivosti.

Slika 6: Nominalna simulacija projekcije

Preveri se tudi tolerančno občutljivost sistema, kot npr. vpliv toleranc debeline leč in razmikov med lečami. Večji izziv je analiza toleranc kvalitete obdelave optičnih površin, torej hrapavosti, valovitosti in ostalih napak. Tip napak površin je odvisen od podrobnosti tehnološkega postopka izdelave leč. Ker so zahteve za kvaliteto optičnih površin projekcijske optike višje kot v avtomobilskih svetilkah, smo morali dejanske parametre poiskati na prototipih. Podatki iz literature pravijo, da mora biti hrapavost površine ca. 20 krat manjša kot je valovna dolžina uporabljene svetlobe. V praksi pa naj bi bile ciljne vrednosti za hrapavost orodja med 5 – 10 nm [3].

2.2 Iz optičnih površin v 3D model

Naloga konstrukterja je, da iz optičnih površin, ki jih je prejel od optika, oblikuje projekcijske leče. Upoštevati mora tudi način montaže in pritrditve v celoten sistem. Tipično so projekcijske leče vgrajene v tako imenovani sodček (Slika 7) [3].



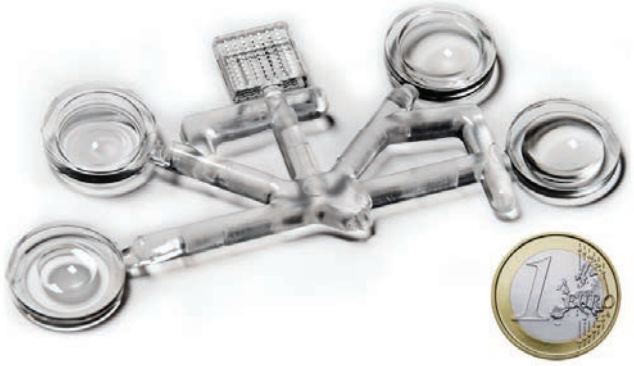
Slika 7: Prerez projekcijskega sistema

Sodček je cevasto oblikovan kos, v katerega iz ene ali obeh strani vstavimo leče. Zaradi svoje oblike le ta definira pozicijo v prečni smeri. V smeri optične osi pa leče pritrdimo z lepilom, dodatnim elementom ali pa se leče med seboj dotikajo in s tem definirajo pozicijo.

Pri definiranju koncepta pritrditve je potrebno upoštevati zahtevane tolerance pozicije optičnih površin, ki jih definira optik, zmožnost proizvodnje (tolerance brizganja leč, natančnost montažne linije…), ciljno ceno izdelka, temperaturno območje itd. V našem primeru je bil cilj enostaven sistem, brez dodatnih kosov in brez uporabe lepila. Zato ima vsaka leča na obodu ravno površino, na katero se nasloni sosednja leča. Na obeh straneh sodčka je pritrdilni obroč, ki onemogoča premik leč v smeri optične osi.

3 IZDELAVA PROJEKCIJSKE OPTIKE

Eden od ciljev projekta je bil tudi izdelava prototipa in testiranje različnih metod izdelave orodja za injekcijsko brizganje.



Slika 8: Prvi prototip

3.1 Metode izdelave orodja

Za izdelavo optičnih površin v orodju za injekcijsko brizganje uporabimo optični vložek. Le tako zagotovimo boljšo natančnost in lažjo prilagajanje. Optični vložek je izdelan na obdelovalnih strojih, ki omogočajo visoko natančnost in majhne radije rezkanja. Končni optični vložek je potrebno polirati do visokega sijaja, v večini primerov to naredimo ročno.

Za izdelavo najboljšega vložka je potreben pravilen izbor materiala vložka in velika pozornost pri procesu rezkanja.

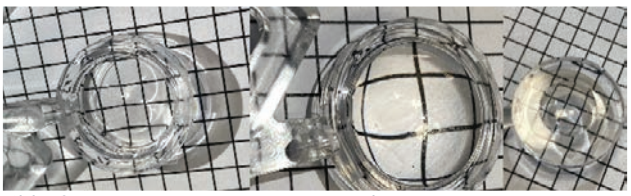
3.2 Optični vložek

Za izdelavo prototipa smo v sodelovanju s podjetjem DAPZ d.o.o. izdelali optični vložek za obstoječe orodje, v katerem je možno izdelati štiri projekcijske leče in dodatno MLA (multi lens array) lečo (Slika 8). Izkazalo se je, da so zaradi specifičnih zahtev brizganja izbranih optičnih materialov in majhnih mas posameznih leč (masa ene leče je približno 1g) potrebne izboljšave vložka. Optimizirali smo geometrijo dolivnih kanalov, jih povečali in tako lahko uporabili bolj optimalne parametre brizganja.

4 ANALIZA PROTOTIPOV

4.1 Meritve prvih kosov

Po prvih optimizacijah orodja so bile leče dovolj dobre za prva testiranja (Slika 9). Leče smo dimenzijsko ovrednotili z metodo 3D skeniranja. Analizirati je bilo potrebno odmik optičnih površin od teoretičnih, kot tudi njihovo centričnost glede na optično os.



Slika 9: Leče po prvi optimizaciji orodja

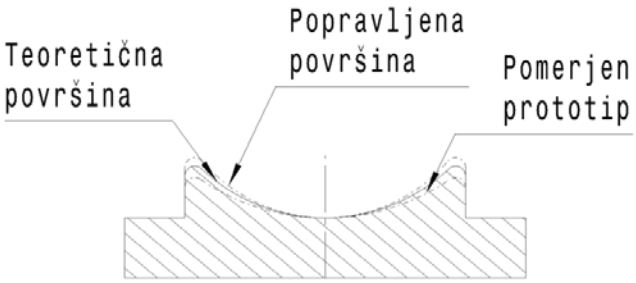
Leče smo sestavili v sodček in opravili prvi preizkus projekcije. Na steno smo projecirali logotip podjetja HELLA (Slika 10). Projekcija je bila razvidna, vendar nismo dosegali zahtevane ostrine projecirane slike.

4.2 Optimizacija orodja

Ker prvi testi projekcije niso pokazali dovolj dobrih rezultatov, je bila potrebna ponovna optimizacija orodja. Podrobneje smo analizirali rezultate 3D skeniranja in jih uvozili v 3D modelirnik Catia.

Slika 10: Prvi test projekcije na steno

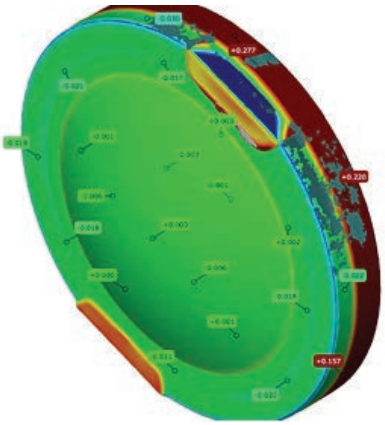
S tako imenovano metodo ˝obratnega inženiringa˝ smo izrisali nove površine (Slika 11). Analizirali smo velikost posedanja (skrčka) na posameznih odsekih leče in linearno povečali debelino leče. Zaradi kompleksnosti oblike leč je bila oblika na nekaterih delih poenostavljena.



Slika 11: Popravek optične površine

4.3 Analiza optimiziranih kosov

Po optimizaciji optičnih površin smo prve analize naredili (Slika 12) že pred poliranjem orodja. Odstopki površine so bili veliko manjši in znotraj prvotno zahtevanih toleranc. Površina je na pogled že izgledala polirana, kljub temu, da je bila samo rezkana z natančno metodo in ne polirana.

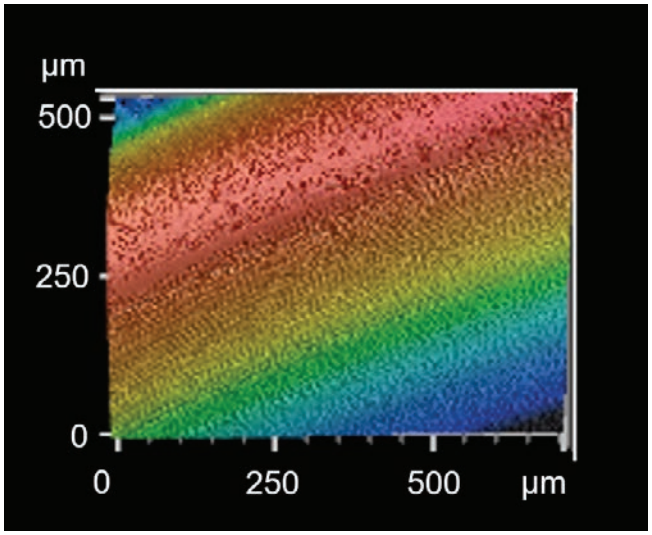


Slika 12: Meritve optimizirane leče

Kljub dobremu izgledu leč, le te pričakovano niso dajale dobrih rezultatov projekcije, saj je za take leče potrebna visoka kakovost površine. V naslednjem koraku smo orodje spolirali in naredili nove prototipe. Projekcija Hella logotipa je bila mnogo bližje zahtevanemu cilju, vendar še vedno ne idealna (Slika 13).

Slika 13: Projekcija po optimizaciji

Analiza leč, narejenih v poliranem orodju, je pokazala zanimive rezultate. Meritve hrapavosti (Slika 14) površine kažejo na to, da je površina sedaj gladka, saj so vsi parametri (Ra, Rz…) boljši kot pred poliranjem. Po ponovnem 3D skeniranju polirane površine, pa so se odstopki na nekaterih delih povečali nad mejo zahtevanih toleranc. Iz tega lahko sklepamo, da je poliranje zmanjšalo hrapavost površine, vendar je obenem pokvarilo obliko površine. Na lečah z večjim radijem je ta efekt manjši, na lečah z manjšim radijem (večja globina konkavne površine) pa je napaka po poliranju večja.



Slika 14: Meritve hrapavosti površine

Teoretična analiza (simulacija s površinami, ki smo jih 3D skenirali, Slika 15) je potrdila da je ta napaka dovolj velika, da pokvari projekcijo. Simulacija v tem primeru sicer prikazuje samo vpliv oblike površine na projekcijo, ne pa tudi odmikov posamičnih leč od idealnih leg, kar v določenem deležu vpliva na rezultat prototipa (Slika 13). Vendar je že vpliv odstopanja oblik leč prevelik, saj je simulirana slika predaleč od nominale.

Slika 15: Simulacija s skeniranimi podatki po optimizaciji

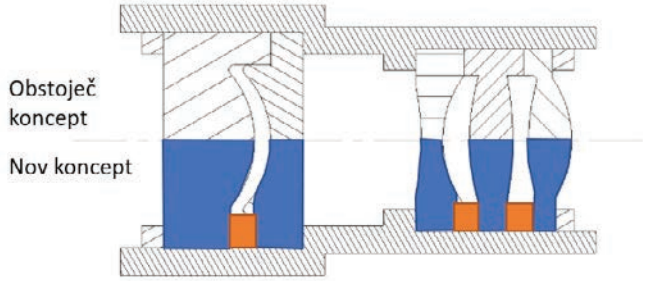
5 NASLEDNJI KORAKI

Kljub večim korakom optimizacije ne dosegamo željene kvalitete projekcije slike. S pridobljenim znanjem izdelave trenutnih prototipov vidimo dve možni poti do boljših prototipov.

Prva možnost je ponovna optimizacija obstoječega optičnega vložka. Glede na zadnje rezultate 3D skeniranja bi izvedli novo zanko ˝obratnega inženiringa˝ (Slika 16). Za dosego zahtevane kvalitete površine pa je potrebna izboljšana metoda obdelave optičnega vložka. Za boljše rezultate bi uporabili dodatno prevleko za izboljšanje kvalitete površine. Izogniti pa se je potrebno tudi ročnemu poliranju. Za najboljše rezultate je potrebno uporabiti strojno poliranje.

Slika 16: Metoda ˝obratnega inženiringa˝

Druga možnost je nov optični vložek. Za doseganje najboljših optičnih rezultatov iz prototipnega orodja je potrebna poenostavitev oblike leč. Trenutna oblika leč je kompleksna, ker ima oblika leče tudi vlogo zagotavljanja položaja in pritrditve. V primeru, da je leča bolj enakomerne debeline, je metoda ˝obratnega inženiringa˝ enostavnejša in dobimo boljše rezultate, saj je skrček enakomeren. V primeru bolj enostavne oblike leč potrebujemo dodatne kose - distančnike, ki zagotavljajo položaj leč (Slika 17). Ti distančniki so običajno kovinski z drugačnimi lastnostmi kot plastične leče (imajo npr. višji termalni raztezek), kar je v tem primeru potrebno upoštevati pri testiranju celotnega prototipa. Rezultati so lahko drugačni, kot bi bili s konceptom namenjenim serijski proizvodnji.



Slika 17: Nov koncept projekcijskega sistema

6 SKLEP

Projekcijska optika je, kljub temu da ima le nekaj elementov, zahteven sistem. Sistem je potrebno koncipirati tako, da deluje v vseh pogojih in ga je mogoče izdelati z danimi sredstvi za ciljno ceno. Za izdelavo prototipa imamo običajno manj časa, potrebujemo le nekaj kosov, želimo pa jih narediti čim ceneje. Večina prototipov je namenjena predstavitvi kakovosti projekcije in ne testom v ekstremnih pogojih. Za take prototipe je smiselno spremeniti koncept, tako da so leče enostavnejše. S takim konceptom bomo z dobro metodo izdelave hitreje prišli do prototipov višje kakovosti.

Viri:

[1] M. Sc. Alexander Stuckert et al: Review of user's evaluation and the needs for road projections around a vehicle Book of Proceedings SIA VISION (2022), str. 80-87

[2] M. Viršek: Automotive car-body lighting digital projector based on LCoS technology, Proceedings of the 14th International Symposium on Automotive Lighting ISAL 2021, str. 222 -232

[3] Stefan Bäumer, Handbook of Plastic Optics, 2nd edition, 2010 Wiley-VCH

TEHNOLOŠKI IZZIVI PRI SNOVANJU IN INDUSTRIALIZACIJI PANELOV IN EMBLEMOV NOVIH VOZIL

Aleš ADAMLJE, Pavel OBLAK, Borut MATKO, Tomaž ŠTAJNER, Andrej WAGNER
HELLA SATURNUS SLOVENIJA, d. o. o.

IZVLEČEK

Za ohranjanje konkurenčne prednosti je dizajn vozil ključnega pomena. Proizvajalci namenjajo posebno pozornost oblikovanju sprednjega dela vozila, kjer enega ključnih sestavnih delov vozila predstavlja panel z integriranim emblemom ali panel z ločenim emblemom. S težnjo po individualizaciji in z razvojem električnih vozil panel ne predstavlja le funkcionalnega polizdelka sprednjega dela vozila kot v preteklosti, temveč predstavlja pomemben oblikovni in funkcijski element. Individualizacija panelov, implementacija posebnih oblik ter integracija svetlobnih funkcij, radarskega sistema, kamer in senzorjev so ključne zahteve za panele.

Z novimi zahtevami proizvajalcev avtomobilov uporaba standardnih proizvodnih tehnologij ne omogoča izdelave panelov in emblemov v pričakovani kakovosti in s stroški, ki bi zagotavljali konkurenčnost na trgu, zato sta uporaba novih tehnologij in posebnih izvedb orodij nujni.

V članku so predstavljeni nove proizvodne tehnologije, uporabljene pri izdelavi panela Forvia in emblema Saturn, koncept izdelkov ter ključni izzivi pri snovanju in industrializaciji izdelkov.

1 UVOD

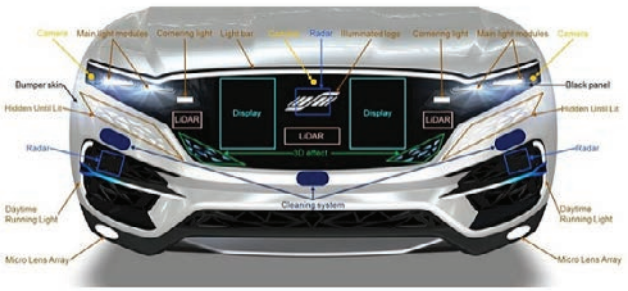
Avtomobilska industrija je v zadnjih letih doživela veliko sprememb. Trajnostni razvoj, povezljivost in interakcija avtomobilov z okolico, avtonomna vožnja, novi koncepti in oblike karoserij električnih avtomobilov ter individualizacija so postali ključni izzivi pri snovanju avtomobilov za proizvajalce in za dobavitelje posameznih sklopov (slika 1).

Slika 1: Ključni izzivi za avtomobile prihodnosti

Proizvajalci vozil pri snovanju avtomobilov vedno večjo pozornost posvečajo oblikovanju zunanjosti in notranjosti. Omejitev pri oblikovanju, ki smo jim bili priča pri vozilih z motorji z notranjim izgorevanjem, pri snovanju električnih avtomobilov ni. S tem so se oblikovalcem odprle povsem nove možnosti oblikovanja predvsem sprednjega dela avtomobila. Proizvajalci avtomobilov v panele integrirajo vedno več elementov in funkcij (slika 2).

Slika 2: Primeri panelov električnih vozil. Prirejeno po [1,2,3]

Dodatne zahteve po znižanju stroškov, večji prepoznavnosti dizajnov posameznih znamk, večji prilagodljivosti kupcem glede individualizacije avtomobila, integraciji dodatnih funkcij in varnostnih elementov v sprednji del avtomobila ter prihod novih proizvajalcev avtomobilov na globalni trg silijo vse proizvajalce avtomobilov k snovanju povsem novih, bolj inovativnih rešitev za sprednji del avtomobila. Koncepti novih pametnih panelov so pogojeni s strategijo posameznih proizvajalcev avtomobilov in s cenovnim rangom avtomobilov. Oblikovni in funkcijski koncept panela je pogojen tudi s tehnološkimi postopki, ki so potrebni za izdelavo posameznih sestavnih delov panelov. Podjetji Hella in Plastic Omnium sta leta 2020 skupaj razvili prototip pametnega panela, ki skupaj z odbijačem tvori sprednji del avtomobila (slika 3). V pametni panel so integrirani glavni žarometi, svetlobni vodniki, osvetljen emblem, kamere, zasloni, radar in lidar. Z namenom atraktivnejše oblike je v panelu integriran 3D-efekt. Dodatne funkcije so vgrajene tudi v odbijaču. Panel in odbijač skupaj predstavljata neločljivo celoto. Tvorita večfunkcijski sistem, ki sledi zahtevam proizvajalcev po avtonomni vožnji, individualizaciji ter komunikaciji avtomobila z okolico.



Slika 3: Koncept pametnega panela s komunikacijskim modulom [4]

V podjetju Hella Saturnus smo zasnovali tudi prototipni demonstrator – panel, ki je zasnovan modularno in omogoča integracijo različnih elementov ter funkcij glede na zahteve kupca (slika 4).
Različne koncepte in rešitve panelov razvijajo tudi proizvajalci avtomobilov sami.

Slika 5: Prototip panela Saturn [5]

Proizvajalec Škoda je osvetljeni panel za model Enyaq (slika 5), razvit v podjetju Hella Saturnus, nadgradil z novimi rešitvami, ki omogočajo komunikacijo z udeleženci v prometu.

Slika 5: Osvetljeni panel Škode Enyaq [6]

Panel ima vgrajen zaslon osvetljen z LED-diodami. Vsaka od diod je programabilna in omogoča animacijo. S tem je omogočena komunikacija z okolico in tako večja varnost (slika 6) [7].

Slika 6: Pametni LED-panel Škode Enyaq [7]

Intenziven razvoj poteka tudi na področju osvetljenih emblemov in emblemov z integrirano funkcijo radarja. V podjetju Hella Saturnus razvijamo osvetljen emblem, ki omogoča visoko stopnjo individualizacije glede dizajna in ima možnost integracije radarja (slika 7).

Slika 7:Osvetljen emblem Saturn, vgrajen v panel [8]

2 KONCEPTA PANELA IN EMBLEMA

Na trgu se pojavljajo različne izvedbe sprednjih panelov električnih vozil. Z namenom raziskave novih tehnologij smo se v podjetju Hella Saturnus odločili za izdelavo prototipnega panela Forvia (slika 8), v katerem so implementirane za trg najzanimivejše tehnične rešitve. Zasnova izdelka nam omogoča brizganje različnih variant sprednje plošče panela glede na zahteve kupca. Zasnova sprednje plošče panela omogoča izdelavo večkomponentne plošče s 3D-strukturo, plošče z zabrizgano folijo ali plošče, neposredno lakirane v orodju.

Slika 8: Plošča panela Forvia

Koncept plošče panela omogoča popolno individualizacijo, saj z uporabo folij, ki so predhodno potiskane s postopkom sitotiska in predformirane, lahko barvo plošče panela harmoniziramo z barvo karoserije (slika 9) ali delno spremenimo dizajn plošče panela po željah končnega kupca (slika 10).

Slika 9: Različne variante plošč panela Forvia

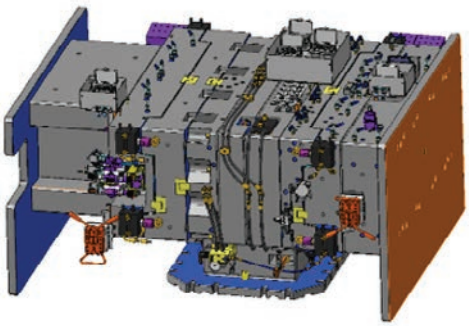
Slika 10: Panel Forvia z logom Saturn [9]

Pomemben segment na trgu predstavljajo osvetljeni emblemi. V ta namen smo v podjetju zasnovali in izdelali osvetljen emblem Saturn, ki je tako kot panel zasnovan modularno in omogoča izdelavo različnih variant izdelka. Tako kot pri plošči panela je možna izdelava večkomponentne variante s 3D-strukturo ali variante z integrirano predformirano folijo različnih dizajnov (slika 11). Tehnološki postopek izdelave folije je enak kot pri plošči panela.

Slika 11: Emblem Saturn

3 TEHNOLOŠKI IZZIVI PRI IZDELAVI PANELOV

Pri izdelavi panelov smo se srečali z izzivi na področju uporabe novih materialov in tehnoloških postopkov. Plošče panelov in emblemov so izdelane po postopku injekcijskega brizganja. Zaradi zahtev panelov in emblemov, predstavljenih v poglavju 2, uporaba standardnega postopka injekcijskega brizganja ni možna.
Za izdelavo uporabljamo specialne postopke brizganja, ki omogočajo izdelavo polizdelkov v pričakovani kakovosti. Za dosego ustrezne kakovosti je pomembno pravilno zaporedje faz dvo- in trikomponentnega brizganja, ki so vsaj v eni fazi kombinirane s postopkom kompresijskega brizganja. Dodatne zahteve kupcev po individualizaciji zahtevajo uporabo postopka brizganja z zabrizgavanjem 2D- ali predformirane 3D-folije. Ta postopek zahteva dodatno strojno in programsko opremo na stroju za brizganje ter prilagojene parametre brizganja, ki omogočajo brizganje izdelkov brez estetskih napak. Za robustno proizvodnjo je ključna tudi izbira koncepta orodja, ki pogojuje izbiro koncepta brizgalnega stroja ter posameznih sistemov orodja (slika 12).



Slika 12: Koncept orodja plošče panela

Velik izziv na področju brizganja panelov predstavlja tudi zahteva kupcev po neposrednem lakiranju izdelka v orodju. Sam postopek neposrednega lakiranja v orodju je specifičen in zahteva za dosego ustrezne kakovosti pravilen koncept izdelka in orodja – ustrezno dodatno enoto za lakiranje in nadgradnjo brizgalnega stroja, ki omogoča komunikacijo z enoto za lakiranje.

4 SKLEP

Hitre spremembe na trgu avtomobilske industrije prinašajo veliko izzivov dobaviteljem sestavnih delov in sklopov karoserije avtomobila. Dodatne funkcije panelov, večji gabariti panelov in težnja po individualizaciji prinašajo izzive, ki zahtevajo povsem nove prijeme pri snovanju in industrializaciji panelov in emblemov.
Za ohranjanje konkurenčnosti na trgu so nujni inovativnost, hitro prilagajanje zahtevam trga, osvajanje novih znanj in pravočasno uvajanje novih tehnoloških postopkov.
Partnersko sodelovanje in skupni cilj vseh sodelujočih na projektih sta ključna za uspešen razvoj in industrializacijo zahtevnih izdelkov. Poleg razvojnih in ostalih oddelkov je treba že v fazi koncipiranja izdelka v razvoj vključiti oddelke proizvodnje ter dobavitelje materialov, strojev in ostale opreme. S tem bo konstrukcija izdelka prilagojena izbranemu tehnološkemu postopku in tako izdelek robustnejši za proizvodnjo.

Viri:

[1] Electric vehicle database: Nissan Leaf (2023, 28, april). Pridobljeno na: https://ev-database.org/car/1106/Nissan-Leaf
[2] The EQS (2023, 28, april). Pridobljeno na: https:// www.-mercedes-benz.com/en/vehicles/passenger-cars/eqs/eqs/
[3] Mercedes' F 015 Luxury in motion Is an autonomous Vehicle from year 2030 (2023, 28, april). Pridobljeno na: https://www.carscoops.com/2015/01/mercedes-f-015-luxury-in-motion-is/
[4] PO and HELLA awarded at the 2020 CLEPA Innovation Awards (2023, 28, april). Pridobljeno na: https://www. plasticomnium.com/wp-content/uploads/2021/01/plastic -omnium-news-clepa-innovation-awards-en.pdf
[5] Panel technology: HELLA develops new design concepts for the vehicle front end (2023, 28, april). Pridobljeno na: https://www.hella.com/hella-com/en/press/Technology-Products-24-03-2022-20192.html
[6] Sets the scene for the Skoda Enyaq iV with an illuminated radiator grille (2023, 28, april). Pridobljeno na: https://www.hella.com/soe/en/News/HELLA-sets-the-scene-for-the-Skoda-Enyaq-iV-with-an-illuminated-radiator-grille-5149/?msclkid=43ab28dacf2311ecbed3e361c7f9bd
[7] Future pedestrians may be assisted by robots and smart grilles (2023, 28, april). Pridobljeno na: https://www.skoda-storyboard.com/en/skoda-world/future-pedestrians-may-be-assisted-by-robots- and-smart-grilles/
[8] Car body lighting: Light is the new chrome (2023, 28, april), Pridobljeno na: https://www.hella.com/techworld/ae/Lounge/Car-body-lighting-63088/
[9] Panel technology: HELLA develops new design concepts for the vehicle front end (2023, 28, april). Pridobljeno na: https://www.hella.com/soe/en/News/Panel-technology-HELLA-develops-new-design-concepts-for-the-vehicle-front-end-5022/

UP-CYCLING PRI INDUSTRIJSKI RECIKLAŽI

Silvester BOLKA[1], Teja PEŠL[1], Tamara ROZMAN[1], Gašper BERGANT[2], Blaž NARDIN[1]
[1]Fakulteta za tehnologijo polimerov
[2]Polycom Škofja Loka d.o.o.

IZVLEČEK

V prispevku bomo predstavili primer up-cyclinga industrijskega odpada v podjetju Polycom kot odličen primer krožnega gospodarstva. Uporabili smo zmlet termoplastičen kompozit na osnovi polifenilen sulfida (PPS), ki je bil ojačen s steklenimi vlakni. Pri predhodnih testih smo ugotovili, da je glavni vzrok za degradacijo materiala oksidacija, zato smo se odločili, da variiramo delež antioksidanta in sicer 0,1 % in 0,5 %, ter hkrati spreminjamo obrate pri kompavndiranju na dvopolžnem ekstruderju 100 obr/min in 400 obr/min. Kompavndiranje smo izvedli pri dveh temperaturah in sicer pri 280 °C in 290 °C. Tako pripravljen mehansko recikliran termoplastični kompozit smo brizgali, da smo pripravili testne epruvete za namen karakterizacije. Končni rezultat dizajna eksperimentov je pripravljen popis mehanskih lastnosti mehansko recikliranega termoplastičnega kompozita v odvisnosti od temperature taline, deleža antioksidanta in obratov polžev pri kompavndiranju. Tako bodo lahko v podjetju Polycom sami izvajali up-cycling reciklata PPS na dvopolžnem ekstruderju in s tem poskrbeli za drastično zmanjšanje odpada s pomočjo ponovne uporabe industrijskega reciklata.

Izvedeno delo je zgleden primer sodelovanja raziskovalne inštitucije in podjetja v smeri krožnega gospodarstva skladno z zavezo predelovalcev plastike za ponovno uporabo odpadnega termoplasta.

1 UVOD

Reciklaža polimernih materialov se uveljavlja predvsem zaradi višanja cen svežih polimernih materialov ter zaradi vpliva na okolje. Z uporabo reciklaže lahko podjetja dolivke in slabe izdelke ponovno uporabijo in tako znižajo stroške končnim izdelkom. Hkrati se je potrebno zavedati, da se lastnosti materialu med mehansko reciklažo spremenijo. Pri predelavi mletih dolivkov in slabih oz. zagonskih kosov s parametri kompavndiranja in brizganja vplivamo na lastnosti končnega izdelka [1].

Z uporabo recikliranih ojačitvenih vlaken v kombinaciji s PPS matrico, ki jih kompavndiramo z dvopolžnim ekstruderjem, lahko dosežemo primerljive lastnosti kot pri kompozitih z »virgin« vlakni [2].

2 EKSPERIMENTALNI DEL

2.1 Uporabljeni materiali

Mlevec PPS kompozita (rPPS), ki je bil ojačen s steklenimi vlakni smo prejeli iz podjetja Polycom, kot njihov industrijski reciklat. Material je bil Fortron 9141L4 proizvajalca Celanese. Matrica je PPS, kateri je dodano 40 % steklenih vlaken in zaviralec gorenja. Antioksidant (AT 10) smo kupili pri AMIK ITALIA S.p.A iz Italije.

2.2 Priprava vzorcev

Izdelali smo 5 serij vzorcev in sicer je bil vzorec 3 kot referenčna srednja vrednost dizajna eksperimentov, kjer smo uporabili srednje vrednosti variiranih parametrov. V Tabeli 1 je prikazana sestava vzorcev.

Tabela 1: Sestava vzorcev za kompavndiranje

Vzorec	rPPS (%)	AT 10 (%)	Obrati kompavndiranja (RPM)	Temperatura kompavndiranja (°C)
Vzorec 1	99,9	0,1	100	290
Vzorec 2	99,5	0,5	400	290
Vzorec 3	99,7	0,3	250	270
Vzorec 4	99,5	0,5	100	280
Vzorec 5	99,9	0,1	400	280

Za kompavndiranje smo vse materiale ločeno zmešali skladno z recepturami navedenimi v Tabeli 1 in ekstrudirali na dvopolžnem ekstruderju Labtech LTE 20-44. Premer polžev je

bil 20 mm, razmerje L/D 44:1, variirali smo obrate 100, 250 in 400 vrtljajev na minuto, ter temperaturni profil, ki je naraščal od lijaka (260 °C, 270 in 280 °C) do šobe (270 °C, 280 °C in 290 °C). Po kompavndiranju sta bila oba proizvedena filamenta ohlajena v vodni kopeli in narezana na pelete dolžine približno 5 mm in premera 3 mm. Pred kompavndiranjem smo material osušili na vlago po 0,1 %. Sušili smo ga pri 140 °C 5 ur. Brizganje je potekalo na stroju Krauss Maffei 50-180 CX s premerom polža 30 mm. Temperaturni profil je naraščal od lijaka (280 °C) do šobe (300 °C). Temperatura orodja je bila nastavljena na 120 °C, čas hlajenja pa na 10 s. Protitlak je bil nastavljen na 5 barov, obrati polža pa na 50 vrtljajev na minuto. Hitrost brizganja je bila nastavljena na 30 mm/s, za zadnja 2 mm pa na 10 mm/s. S tehnologijo brizganja smo izdelali testne epruvete (oblike ISO 527 1BA in ISO 179, z in brez zareze) za namen karakterizacije.

2.3 Laboratorijski testi

Natezni preskusi so bili opravljeni na napravi Shimadzu AG-X plus v skladu z ISO 527-1. Za vsak vzorec je bilo opravljenih pet meritev. Pri nateznih preskusih smo vrednotili natezno togost (E_t), natezno trdnost (σ_m) in raztezek pri pretrgu (ε_{tb}). Toplotne meritve smo vrednotili z diferenčnim dinamičnim kalorimetrom (DSC 2, Mettler Toledo) v dušikovi atmosferi (20 mL/min). Temperaturo vzorca smo povečevali od 0 do 310 °C s hitrostjo segrevanja 10 °C/min, vzorec pa je bil 5 minut v staljenem stanju, da se je izbrisala njegova toplotna predzgodovina. Po ohlajanju s hitrostjo 10 °C/min smo vzorce ponovno segreli na 310 °C s hitrostjo 10 °C/min. Temperaturo steklastega prehoda (T_g), temperaturo kristalizacije (T_c), kristalizacijsko entalpijo (H_c), temperaturo taljenja (T_m) in talilno entalpijo (H_m) smo vrednotili pri ohlajanju in drugem segrevanju. Termogravimetrične analize (TGA) smo izvedli na instrumentu Mettler Toledo TGA/DSC 3+. Vzorec smo segrevali od 40 °C do 550 °C, s hitrostjo segrevanja 10 °C/min, v dušikovi atmosferi (20 mL/min), nato pa izotermno držali pri 550 °C 30 min v kisikovi atmosferi (20 mL/min). Udarni preizkus smo izvedli na napravi Dongguan Liyi Test Equipment, tip LY-XJJD5, v skladu s standardom ISO 179. Razdalja med podporama je bila 60 mm, za udarne preskuse smo uporabili nihalo z energijo 2 J, za zarezno udarne preskuse pa nihalo z energijo 1 J. Ostanek po žarjenju po TGA testu smo karakterizirali z mikroskopom Keyence VHX-7000, kjer smo izmerili dolžino steklenih vlaken. Izračunali smo povprečno dolžino steklenih vlaken in maksimalno dolžino steklenih vlaken pri vsakem vzorcu.

3 REZULTATI

Na natezni E modul (Tabela 2, Slika 1) ima temperatura taline najvišji vpliv: višja kot je temperatura taline, višji natezni E modul dosežemo. Vsaj pol manjši vpliv imajo obrati kompavndiranja: nižji kot so obrati kompavndiranja, višji natezni E modul dobimo. Najmanjši vpliv imamo pri dodajanju antioksidanta: nižji kot je odstotek dodanega antioksidanta, višji natezni E modul dobimo.

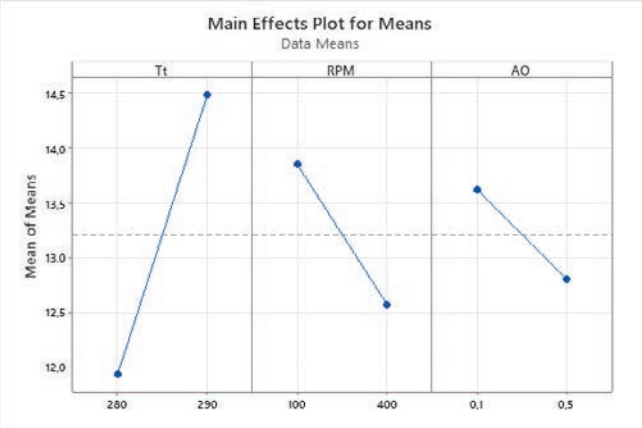
Na natezno trdnost (Tabela 2, Slika 2) ima količina antioksidanta najvišji vpliv: višja kot je količina dodanega antioksidanta, višjo natezno trdnost dosežemo. Zelo primerljiv vpliv imajo obrati kompavndiranja: nižji kot so obrati kompavndiranja, višjo natezno trdnost dobimo. Najmanjši vpliv ima temperatura taline: višja kot je temperatura taline, višjo natezno trdnost dobimo.

Na raztezek pri pretrgu (Tabela 2, Slika 3) ima temperatura taline najvišji vpliv: visoka temperatura taline, višji raztezek pri pretrgu dosežemo. Manjši vpliv imajo obrati kompavndiranja: nizki obrati kompavndiranja, višji raztezek pri pretrgu dosežemo. Najmanjši vpliv ima količina dodanega antioksidanta: nižji kot je odstotek dodanega antioksidanta, višji raztezek pri pretrgu dobimo.

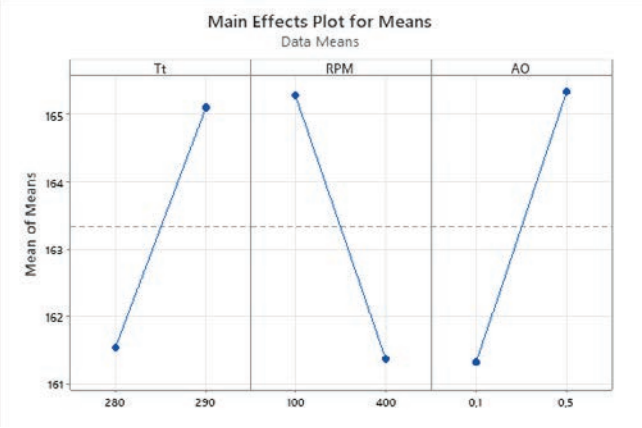
Tabela 2: Zbrani rezultati nateznih testov

Vzorec	E_t (GPa)	σ_m (MPa)	ε_{tb} (%)
Vzorec 1	15,5±1,6	165,1±1,0	6,34±0,67
Vzorec 2	13,4±0,7	165,2±1,1	5,27±0,24
Vzorec 3	11,0±0,5	157,4±0,8	5,08±0,38
Vzorec 4	12,2±1,0	165,5±1,7	5,04±0,29
Vzorec 5	11,7±0,3	157,6±1,0	4,86±0,32

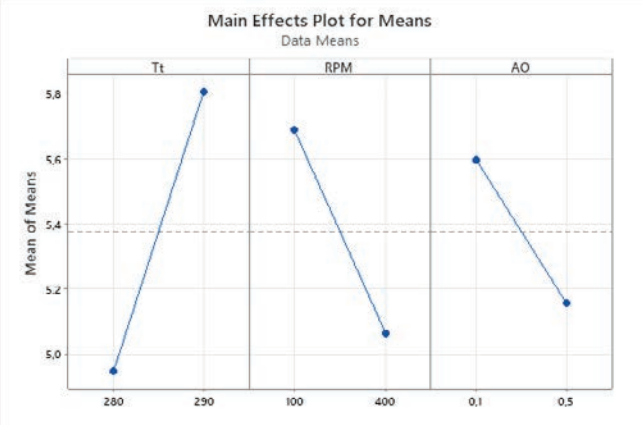
Silvester BOLKA[1], Teja PEŠL[1], Tamara ROZMAN[1], Gašper BERGANT[2], Blaž NARDIN[1]
[1]Fakulteta za tehnologijo polimerov
[2]Polycom Škofja Loka d.o.o.



Slika 1: Zbrani rezultati DoE za natezni E modul



Slika 2: Zbrani rezultati DoE za natezno trdnost



Slika 3: Zbrani rezultati DoE za raztezek pri pretrgu

Toplotne lastnosti (Tabeli 3 in 4) so malenkostno odvisne od parametrov kompavndiranja. Višja kot je temperatura kompavndiranja, višji je steklasti prehod, nižje tališče in nižja talilna entalpija, temperatura in entalpija kristalizacije pa sta neodvisni od temperature kompavndiranja. Višji kot je odstotek dodanega antioksidanta, višji steklasti prehod dobimo, višje tališče in višjo talilno entalpijo, temperatura kristalizacije je neodvisna od dodanega antioksidanta, zniža se pa entalpija kristalizacije z višjim odstotkom dodanega antioksidanta.

Tabela 3: Zbrani rezultati za drugo segrevanje pri DSC testih

Vzorec	T_g (°C)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)
Vzorec 1	90,0	280,8	27,7
Vzorec 2	90,5	281,1	28,4
Vzorec 3	87,4	281,2	27,0
Vzorec 4	90,2	281,2	29,2
Vzorec 5	88,7	281,3	28,9

Tabela 4: Zbrani rezultati ohlajanja pri DSC testih

Vzorec	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)
Vzorec 1	239,6	27,3
Vzorec 2	239,6	26,6
Vzorec 3	242,2	26,4
Vzorec 4	239,6	27,9
Vzorec 5	239,3	28,2

Višja temperatura kompavndiranja zviša temperaturo prvega razpada in zniža temperaturo drugega (glavnega) razpada (Tabela 5). Višji odstotek dodatka antioksidanta zviša tako prvo kot drugo temperaturo razpada. Obrati kompavndiranja nimajo zaznanega vpliva na temperature razpadov. Odstotek dodanih steklenih vlaken je dokaj konstanten, saj niha med 39,8 % in 40,2 %.

Tabela 5: Zbrani rezultati TGA testov

Vzorec	T_{d1} (°C)	Razpad$_1$ (%)	T_{d2} (°C)	Razpad$_2$ (%)	Ostanek (%)
Vzorec 1	547,3	24,18	555,7	35,65	40,17
Vzorec 2	547,5	25,08	557,0	35,09	39,83
Vzorec 3	546,5	24,31	556,2	35,54	40,15
Vzorec 4	547,5	24,52	558,4	35,56	39,92
Vzorec 5	544,7	25,37	554,2	34,84	39,79

Višja temperatura kompavndiranja zviša udarno in zarezno udarno žilavost (Tabela 6). Antioksidant nima vpliva niti na udarno, niti na zarezno udarno žilavost. Obrati kompavndiranja nimajo vpliva niti na udarno, niti na zarezno udarno žilavost.

Silvester BOLKA[1], Teja PEŠL[1], Tamara ROZMAN[1], Gašper BERGANT[2], Blaž NARDIN[1]
[1]Fakulteta za tehnologijo polimerov
[2]Polycom Škofja Loka d.o.o.

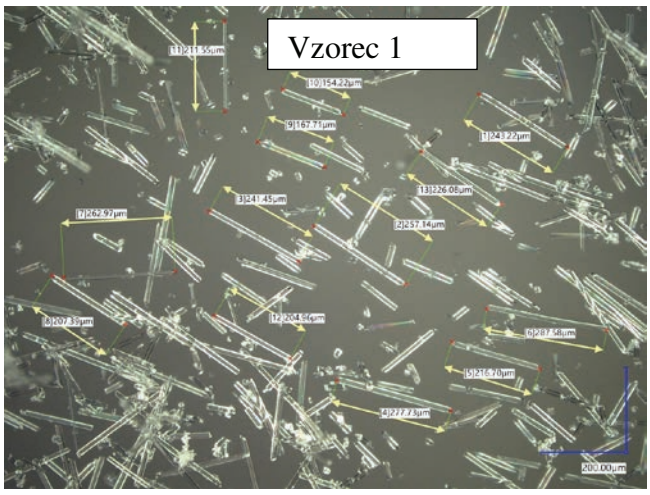
Tabela 6: Zbrani rezultati za teste udarne in zarezne udarne žilavosti

Vzorec	**Udarna žilavost (kJ/m²)**	**Zarezna udarna žilavost (kJ/m²)**
Vzorec 1	24,5±2,4	5,6±0,4
Vzorec 2	24,1±2,5	5,9±0,5
Vzorec 3	22,9±1,7	5,1±0,5
Vzorec 4	22,3±3,1	5,6±0,5
Vzorec 5	20,6±2,4	5,3±0,5

Višja temperatura kompavndiranja (Tabela 7, Slika 4) ohrani večjo povprečno dolžino steklenih vlaken. Višji obrati kompavndiranja zmanjšajo povprečno dolžino steklenih vlaken pri višji temperaturi kompavndiranja in povišajo povprečno dolžino steklenih vlaken pri nižji temperaturi kompavndiranja. Višji odstotek dodanega antioksidanta zmanjša povprečno dolžino steklenih vlaken.

Tabela 7: Zbrani rezultati meritev dolžine steklenih vlaken po TGA analizi

Vzorec	**Povprečna dolžina (µm)**	**Maksimalna dolžina (µm)**
Vzorec 1	228	288
Vzorec 2	167	261
Vzorec 3	175	343
Vzorec 4	100	397
Vzorec 5	131	392



Slika 4: Dolžine steklenih vlaken za vzorec 1 po TGA analizi

4 SKLEP

Proučevali smo vpliv parametrov kompavndiranja s hkratnim dodajanjem antioksidanta na industrijski reciklat PPS iz podjetja Polycom.

Da bi dosegli visok natezni E modul potrebujemo:

- **visoko temperaturo taline, nizke obrate kompavndiranja in nizek odstotek dodanega antioksidanta.**

Da bi dosegli visok raztezek pri pretrgu potrebujemo:

- **nizek odstotek dodanega antioksidanta, nizke obrate kompavndiranja in visoko temperaturo taline.**

Da bi dosegli visoko natezno trdnost potrebujemo:

- **visoko temperaturo taline, nizke obrate kompavndiranja in visok odstotek dodanega antioksidanta.**

Da bi dosegli visoko udarno žilavost potrebujemo:

- **visoko temperaturo taline, nizke obrate kompavndiranja in visok odstotek dodanega antioksidanta.**

Da bi dosegli visoko zarezno udarno žilavost potrebujemo:

- **visok odstotek dodanega antioksidanta, visoko temperaturo taline in visoke obrate kompavndiranja.**

Z izvedenim testom dizajna eksperimentov smo popisali mehanske in toplotne lastnosti industrijskega reciklata PPS. Podjetje Polycom bo lahko s temi rezultati ciljno kompavndiralo svoj industrijski reciklat, glede na zahteve posameznih izdelkov.

Viri:

[1] R.T. Young, D.G. Baird, The Influence of processing variables on injection molded in situ composites based on polyphenylene sulfide and a melt processable glass, Compos. Part B Eng. 31 (2000) 209–221. https://doi.org/10.1016/S1359-8368(99)00080-3.

[2] K. Stoeffler, S. Andjelic, N. Legros, J. Roberge, S.B. Schougaard, Polyphenylene sulfide (PPS) composites reinforced with recycled carbon fiber, Compos. Sci. Technol. 84 (2013) 65–71. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.05.005.

PODCENJEN POTENCIAL HLAJENJA GLEDE CIKLA IN VARČEVANJA Z ENERGIJO

Jörn SENGELAUB[1], Boštjan ŠMUC[2]
[1]CONTURA-MTC GmbH
[2]ABC-Brizganja d.o.o

POVZETEK

Produktivnejša orodja ustvarjajo več izdelkov. Največji del časa cikla brizganja je čas hlajenja, zato je eden največjih potencialov izboljšanje toplotne prestopnosti v orodjih. Obstaja način, da lahko vnaprej izračunamo, kaj nam omogoča konformno hlajenje, ki je glavni dejavnik pri skrajševanju cikla. Z uporabo konformnega hlajenja bi lahko proizvodnjo izdelkov v določenem času povečali in čas cikla znatno skrajšali. V vseh teh primerih bo prihranek energije stranska korist. Ta prihranek energije pomeni tudi zmanjšanje ogljičnega odtisa.

1 UVOD

Teme pogovorov so predvsem produktivnost in varčevanje z energijo. Obstaja več možnosti za izdelavo produktivnejšega orodja za brizganje. Orodja za brizganje so teoretično toplotni izmenjevalniki, zato boljša izmenjava toplote vedno pomeni večjo produktivnost. Da bi dosegli boljšo izmenjavo toplote, moramo razumeti fizikalne osnove.

2 FIZIKALNE OSNOVE PROCESA BRIZGANJA

Za razumevanje vpliva hlajenja v orodju, moramo najprej razumeti fizikalni postopek brizganja.

Začnemo s plastičnim granulatom, ki ga vsujemo v lijak stroja nad cilindrom. Na tej točki je agregatno stanje tega granulata trdno.

Od lijaka do šobe stroja vnesemo energijo v granulat preko zunanjih grelcev in preko trenja med vrtenjem polža.

Zaradi vnosa energije granulat spremeni svoje agregatno stanje iz trdnega v tekoče. To je pomemben korak v procesu, saj brez te spremembe, ne bi bilo mogoče vbrizgati materiala v orodje.

Granulat se je spremenil v talino in čaka na vbrizgavanje. Včasih bo talina neposredno vbrizgana v kalup, v nekaterih drugih primerih pa bomo uporabili vroče kanalni dolivni sistem.

Glavna funkcija vroče kanalnega dolivnega sistema je ohranjanje toplote v talini, dokler ne doseže dolivne točke. To zagotavlja, da je talina še vedno v pravem stanju za vbrizgavanje, ko zapusti plastifikator. Tehnično gledano je vroče kanalni dolivni sistem aktivni zunanji grelec, kjer lahko talina teče do konice šobe.

Do zdaj smo ugotovili, da imamo dva možna vira, ki lahko vneseta toploto v proces brizganja. Ta dva vira toplote se bosta izvajala, dokler talina ni vbrizgana v orodje. Naslednji viri toplote v procesu so viri toplote, ki bodo po vbrizgavanju taline odvzeli toploto iz procesa. Toda najprej bo talina oddala toploto orodju. Zaradi tega se bo orodje segrelo.

Naš cilj je odvzem energije iz taline, da bo spet trdna in dosegla temperaturo snemanja. Ko dosežemo to temperaturo, lahko odpremo kalup in snamemo plastični izdelek.

Toplota, ki je bila dana v orodje, segreje jeklo. Zdaj imamo tri toplotne tokove, ki odvajajo toploto iz jekla. Prva je toplotna izguba zaradi sevanja, druga zaradi konvekcije in tretja zaradi prevajanja toplote.

Da bi dosegli stabilen proces, mora biti vsota vseh toplotnih tokov enaka nič. V tem primeru bi imeli popolnoma enake pogoje pred začetkom procesa in na koncu. Poleg tega so pogoji enaki iz cikla v cikel.

Jörn SENGELAUB[1], Boštjan ŠMUC[2]
[1]CONTURA-MTC GmbH
[2]ABC-Brizganja d.o.o

$$\dot{Q}_M + \dot{Q}_{HR} + (-\dot{Q}_R) + (-\dot{Q}_C) + (-\dot{Q}_{CD}) = 0 \quad (1)$$

- $\dot{Q}_M$ Toplota taline +
- $\dot{Q}_{HR}$ Toplota vročih kanalov +
- $\dot{Q}_r$ Izgube sevanje -
- $\dot{Q}_c$ Izgube konvekcija -
- $\dot{Q}_{cd}$ Izgube prenos toplote -

Če rezultat ni nič, imamo nestabilen proces, ki bo vplival na izdelek, kar je lahko sprememba cikla ali sprememba kakovosti izdelka. Na to enačbo bolj ali manj nimamo vpliva (1).

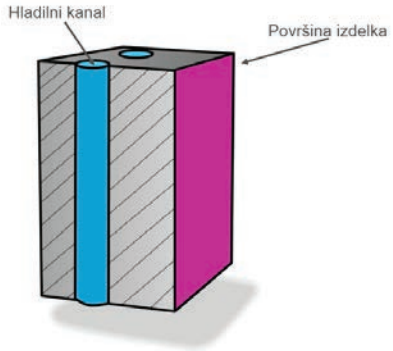
Dodati moramo še en vir toplote, ki je hlajenje orodja. Z dodajanjem tega se enačba spremeni v naslednjo enačbo (2).

$$\dot{Q}_M + \dot{Q}_{HR} + (-\dot{Q}_R) + (-\dot{Q}_C) + (-\dot{Q}_{CD}) + (\pm\dot{Q}_{CO}) = 0 \quad (2)$$

Toplotni tok hladilne tekočine je lahko pozitiven ali negativen. Če je pozitiven, vnašamo v proces toploto, če je negativen, toploto odvzemamo. Vidimo lahko, da je hladilno sredstvo edini toplotni tok, na katerega imamo dejanski vpliv. S spremembo toplotnega toka hladilne vode neposredno vplivamo na toplotno stanje orodja za brizganje.
Hladilno sredstvo je krmilo celotnega procesa brizganja.

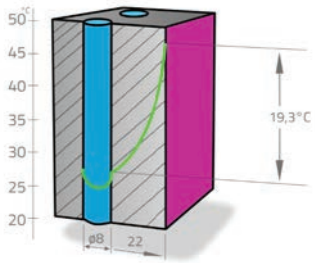
2.1 Vpliv toplotne prevodnosti orodnega materiala

Med izdelkom in hladilno tekočino imamo orodni material. Tlak vbrizgavanja in trdnost orodnega materiala vplivata na razdaljo hladilnih kanalov. (*Slika 1*)



Slika 1: Razdalja hladilnih kanalov

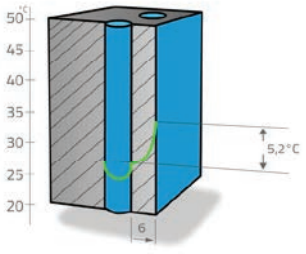
Vpliv toplotne prevodnosti lahko vidimo na naslednji skici. (*Slika 2*)



Slika 2: Temperaturno obnašanje na hladilnih kanalih na dolgih razdaljah

Če imamo hladilni kanal s premerom 8 mm in razmikom 22 mm, bo temperatura na steni kavitete okoli 19,3 °C višja od temperature napajalne vode. Razlog za to razliko je v tem, da toplota, ki jo talina plastike vnese v votlino, segreje jeklo, toplotna prevodnost materiala kalupa pa upočasni toploto do hladilne tekočine.

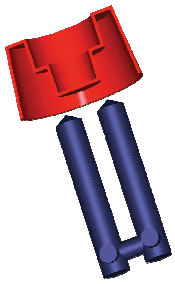
Če zmanjšamo razdaljo hladilnega kanala, zmanjšamo tudi vpliv materiala kalupa (*Slika 3*)



Slika 3: Temperaturno obnašanje na hladilnih kanalih na kratkih razdaljah

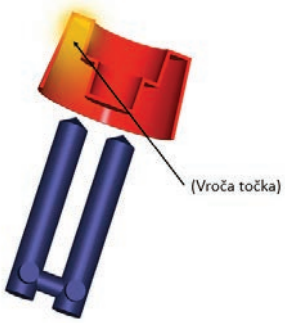
Zmanjšanje učinka toplotne prevodnosti nam omogoča neposreden vpliv na proces. Orodje reagira hitreje na spremembo napajalne vode.

Vpliv toplotne prevodnosti je vedno prisoten. Če imamo na delu 3-dimenzionalno obliko, je nemogoče ohraniti enakomerno razdaljo hladilnih kanalov z uporabo standardnih metod. V naslednjem primeru imamo standardno postavitev hladilnih kanalov z dvema izvrtinama. (*Slika 4*)



Slika 4: Standardna postavitev hladilnih kanalov

V središču izdelka najdemo prostor za hladilne kanale. Zaradi oblike je razdalja do konice izdelka velika. Poleg tega bo jekleni vložek na tem področju tanek. Zaradi majhne količine jekla se bo temperatura drastično povišala in končala v vroči točki. (*Slika 5*)



Slika 5: Vroča točka na izdelku

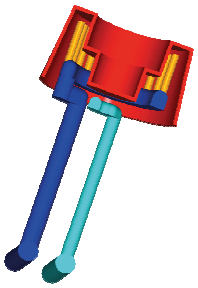
Cilj je čim bolj zmanjšati vpliv toplotne prevodnosti jekla z zmanjšanjem razdalje hladilnih kanalov in povečanjem površine za izmenjavo toplote.

Če imamo zelo ozke površine v orodju, je skoraj nemogoče izvesti pravilno delujoč hladilni kanal. Če je premer kanala majhen, bo pretok majhen, kar pomeni, da bo hladilno sredstvo odneslo manj toplote. Pri kombinaciji majhnega premera in majhnega pretoka obstaja še eno tveganje - zamašitev kanalov.

Zato za takšna področja uporabljamo drug pristop.

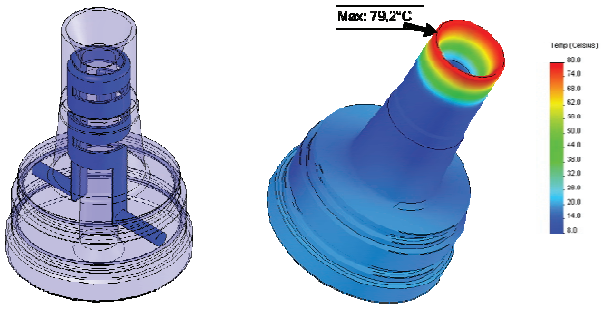
2.2 Uporaba toplotno prevodnih elementov

Do sedaj smo vedno poskušali čim bolj zmanjšati vpliv materiala orodja z zmanjšanjem toplotno aktivne plasti - razdalje med kanalom in orodno votlino ter povečanjem površine za izmenjavo toplote. Če to zaradi geometrije izdelka ni mogoče, lahko uporabimo posebne elemente za prenos toplote, ki so trdno vpeti v jeklo. Ti elementi za prenos toplote imajo toplotno prevodnost več kot 380 (W/(m*K)). Ideja v ozadju je delno povečanje toplotne prevodnosti v ozkih predelih. Pod elementi za prenos toplote uporabljamo večji kanal za odvajanje toplote iz ozkih predelov. (*Slika 6*)



Slika 6: Konformni hladilni kanali z elementi za prenos toplote

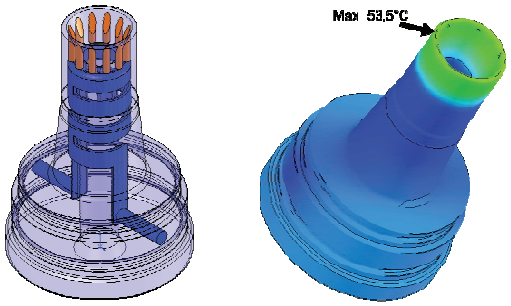
Uporabo lahko prikažemo s FEM-simulacijo. Za to simulacijo uporabljamo vložek, ki ima na konici ozek predel. Optimizirali smo tudi postavitev hlajenja, kolikor je bilo mogoče, vendar se bo zaradi oddaljenosti hladilnega kanala od konice vložek med postopkom brizganja segrel.



Slika.7: Konformni hladilni kanali brez elementa za prenos toplote

Implementacija elementov za prenos toplote v ta vložek in ponovna simulacija z istimi parametri pokažeta vpliv in korist.

Jörn SENGELAUB[1], Boštjan ŠMUC[2]
[1]CONTURA-MTC GmbH
[2]ABC-Brizganja d.o.o



Slika.8: Konformni hladilni kanali z elementi za prenos toplote [2]

2.3 Vpliv toplotnega režima na čas hlajenja

V večini primerov bomo našli možnosti za optimizacijo toplotnega režima orodij za brizganje.

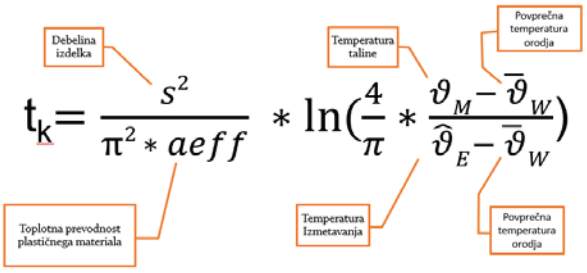
Kakšna bi lahko bila korist od tako optimiziranega toplotnega režima?

Toplotno uravnoteženo orodje bo imelo dve glavni prednosti, in sicer krajši čas cikla zaradi zmanjšanega časa hlajenja in izboljšana kakovost plastičnega izdelka.

Potencial prihranka časa pri hlajenju je mogoče pokazati vnaprej, saj imamo možnost izračunati fizikalni čas hlajenja plastičnega izdelka. Izbrati moramo ustrezno enačbo (3) glede na geometrijo izdelka.

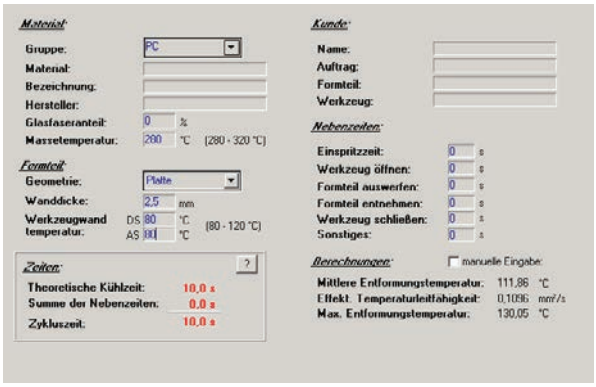
Geometry	Cooling time equation
	$t_k = \frac{s^2}{\pi^2 * a_{eff}} * \ln\left(\frac{4}{\pi} * \frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\bar{\vartheta}_E - \bar{\vartheta}_W}\right)$
	$t_k = \frac{D^2}{23{,}14 * a_{eff}} * \ln\left(1{,}602 * \frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\bar{\vartheta}_E - \bar{\vartheta}_W}\right)$
	$t_k = \frac{h^2}{3 * \pi * a_{eff}} * \ln\left(2{,}064 * \frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\bar{\vartheta}_E - \bar{\vartheta}_W}\right)$
	$t_k = \frac{D^2}{4 * \pi^2 * a_{eff}} * \ln\left(2 * \frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\bar{\vartheta}_E - \bar{\vartheta}_W}\right)$ (3)

Določiti moramo geometrijsko obliko, ki je kritična za čas ohlajanja. Običajno boste na izdelku našli več kot eno od teh geometrijskih oblik. Izbrati moramo geometrijo, ki je ključnega pomena za trdnost izdelka pri snemanju iz orodja.



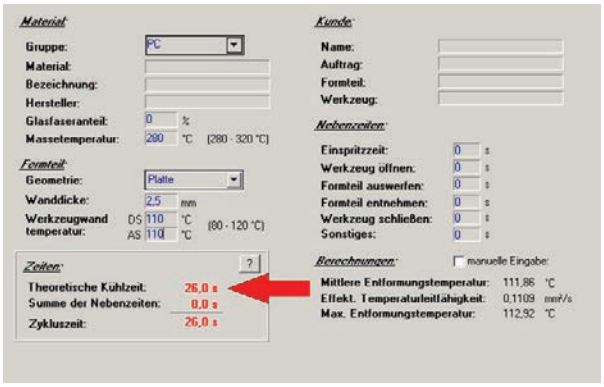
$$t_k = \frac{s^2}{\pi^2 * aeff} * \ln\left(\frac{4}{\pi} * \frac{\vartheta_M - \bar{\vartheta}_W}{\bar{\vartheta}_E - \bar{\vartheta}_W}\right) \quad (4)$$

Uporabite enačbo (4) za ploščat plastični izdelek, da si podrobneje ogledate potrebne informacije. Za izračun možnega časa ohlajanja je potrebnih le nekaj podatkov. Potrebujemo informacije o tem, kateri material je uporabljen, s temi informacijami poznamo temperaturo taline, efektivno toplotno prevodnost in razpon površinske temperature orodja. Debelino stene lahko vzamete iz 3D modela izdelka. Ključna vrednost je temperatura, ki jo lahko dosežemo v kalupu, kar predstavlja učinkovitost hladilne zasnove. Če učinkovitost hladilne postavitve ni ustrezna, bomo na koncu imeli višjo temperaturo površine kalupa. To lahko močno vpliva na čas hlajenja.



Slika 9: Kalkulacijski software - 1

Izračun časa hlajenja za plastični izdelek, izdelan iz PC-ja. Geometrija izdelka je ravna plošča, debelini stene 2,5 mm. Za temperaturo kalupa izberemo 80 °C in dobimo skupni čas hlajenja 10 sekund. Skupni čas hlajenja pomeni čas naknadnega tlaka + preostali čas hlajenja. (*Slika9*) Če sedaj spremenimo temperaturo kalupa iz 80°C na 110 °C, lahko neposredno vidimo vpliv v naslednjem izračunu. (*Slika 10*)

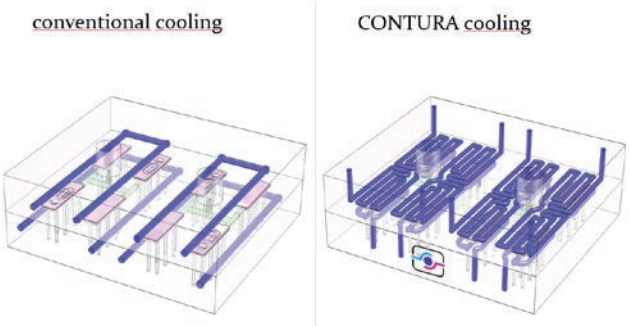


Slika 10: Kalkulacijski software - 2

Povečanje površine kalupa za 30°C bo povzročilo 16 sekund daljši čas ohlajanja. To je povečanje časa hlajenja za 160 %. Vroča točka - 30 °C višja temperatura drastično vpliva na produktivnost procesa.

2.4 Primerjava konvencionalnih in konformnih hladilnih kanalov

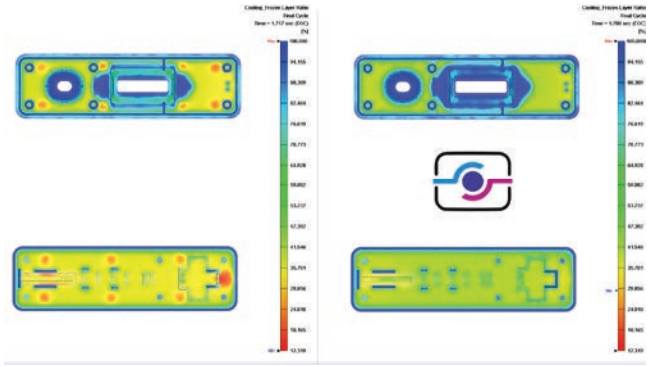
Konvencionalna metoda se večinoma izvede z vrtanjem, ki je prikazan na sliki 11. Konformno hlajenje ima več možnosti izdelave. Poudarek konformnega hlajenja je sledenje obliki plastičnega izdelka. Glavna dejavnika pri oblikovanju sta debelina in geometrija izdelka, kot je bilo razloženo v predhodnem poglavju.



Slika.11: Primerjava hladilnih kanalov

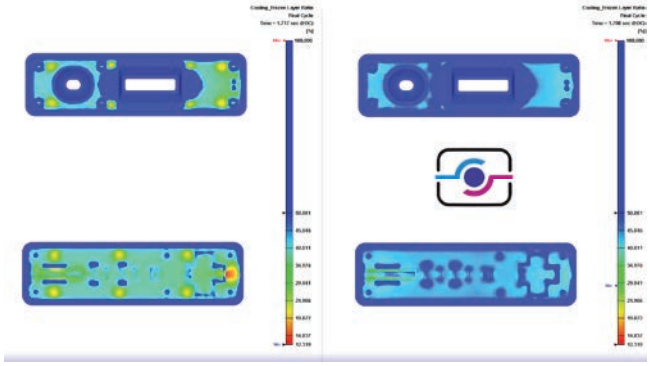
2.5 Primerjava rezultatov simulacij za različne koncepte hladilnih kanalov

Konvencionalna metoda je prikazana na levi strani rezultatov na sliki 12, 13 in 14. Konformno hlajenje pa na desni strani teh slik. Odstotek zamrznjene plasti je veliko višji pri rezultatih konformnih hladilnih kanalov. Na jedrni strani izdelka več volumna ni zamrznjenega ob koncu polnjenja, vendar je še vedno razlika velika, ko se primerjajo rezultati.



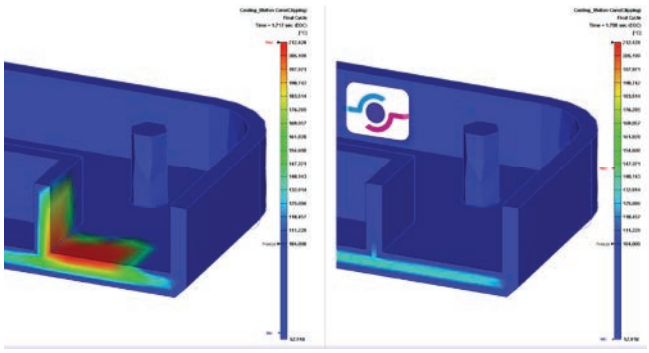
Slika 12: Primerjava odstotka zamrznitve -1

Na jedrni strani izdelka je podobna slika na koncu cikla.



Slika 13: Primerjava odstotka zamrznitve -2

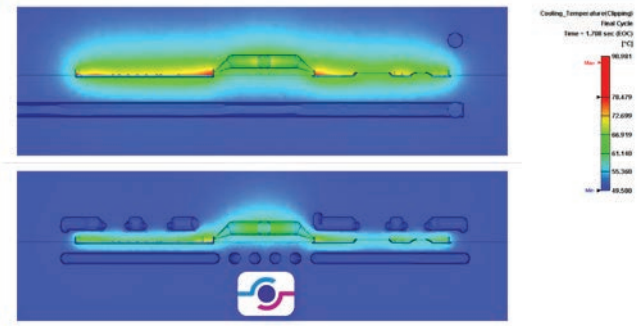
Podrobneje smo raziskali rezultate na strani jedra. Temperatura nekaterih območij hlajenih s konvencionalno metodo je 210 °C. Pri konformnem hlajenju je temperatura le 140 °C. To je velika prednost pri času hlajenja. (*Slika 14*)



Slika 14: Tekoče jedro

Prečni prerez rezultata na sliki 14 prikazuje temperaturne razlike na kalupnih vložkih. Kot pri vseh drugih rezultatih je razlika velika pri konvencionalnem hladilnem sistemu. (*Slika 15*)

Jörn SENGELAUB[1], Boštjan ŠMUC[2]
[1]CONTURA-MTC GmbH
[2]ABC-Brizganja d.o.o



Slika 15: Temperature na vložkih

2.6 Prednosti uporabe konformnega hlajenja

Obstaja več prednosti, ki so:
- boljša izmenjava toplote,
- krajši čas hlajenja,
- krajši cikel,
- stabilna kakovost izdelkov,
- stabilen proces.

V tem primeru simulacije je čas cikla s konvencionalnim hlajenjem 5,5 sekunde. Čas cikla se zmanjša s 5,5 sekunde na 3,5 sekunde z uporabo konformnega hlajenja. Ciklus se zniža za 37 %, kar pomeni prek pol milijona izdelkov več na dan. (V primeru kalupa z votlinami 64+64). Povračilo naložbe se izračuna iz cene izdelka.

3 ZAKLJUČEK

Potencialni prihranek pri vsakem kalupu z uporabo konformnega hlajenja je precej velik. Vsaka vrsta kalupa ima nekaj skritega potenciala za izboljšanje, zlasti na hladilnih kanalih. Boljša izmenjava toplote pomaga tudi pri manjši porabi energije.

Poleg tega konformno hlajenje nudi vse prednosti, ki so bile razložene v članku.

Na podlagi izkušenj CONTURA® je skrajšanje časa cikla večinoma možno tudi do 30 % celotnega časa cikla.

Uporaba konformnega hlajenja je ključna in močna metoda za izboljšanje vseh vrst kalupov v vseh sektorjih. Tehnologija konformnega hlajenja je izvedljiva tudi na obstoječih kalupih z menjavo vložkov. Glavno točka uporabe konformnega hlajenja je predhodni izračun v skladu z inženirskim znanjem in izkušnjami iz predhodnih projektov.

Reference:

[1] Beard, R.: *How to Know the True Value of Conformally Cooled Injection Molds*, Plastics Technology, USA, 2022.

[2] *Özgüven. C.B..: Comparison of conventional plastic injection molding process and plastic injection molding process with rapid heat and cool technology, Turkey, 2020.*

[3] *Richard Läpple, Tübingen, Konturnah und variotherm: Die beiden Schlüssel für hochwertige Kunststoffbauteile in a magazine, VDWF im Dialog ISSN 1860-4935, 26-29*

[4] *Main web-page of Contura-MTC GmbH https://www.contura-mtc.de, (Visit date: 20 April 2021)*

[5] *„Rapid thermal cycling with low thermal inertia tools“; Robert X. Xu, Department of Biomedical engineering, Ohio State University, Columbus Ohio 43210; Emanuel Sachs, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge Massachusetts 02139*

KAKO ADITIVNA PROIZVODNJA PRELAZI IZ FAZE IZRADE PROTOTIPA U PROIZVODNJU GOTOVIH KOMADA

Luka NAGLIĆ, Amir ŠEĆERKADIĆ
IZIT d.o.o.

SAŽETAK

Povijest aditivne proizvodnje (AM) seže do 1980-ih kada su predstavljeni prvi 3D pisači. Temelji aditivne proizvodnje postavljeni su 1980. godine kada je dr. Hideo Kodama, istraživač na Gradskom institutu za industrijska istraživanja Nagoya, podnio prvi patent za AM. Od tada je aditivna tehnologija doživjela ogromnu evoluciju, s novim tehnologijama i proizvodnim procesima koji su se razvijali i komercijalizirali. Razvoj tehnologija i materijala omogućio je da danas aditivne tehnologije možemo komparirati s tradicionalnim proizvodnim procesima i u određenim scenarijima primijeniti aditivnu tehnologiju kao optimalni proces serijske proizvodnje.

1. UVOD

Aditivna proizvodnja definira se kao proces spajanja materijala za stvaranje predmeta iz računalnog 3d modela, nanošenjem materijal sloj po sloj, za razliku od tradicionalnih tehnologija proizvodnje koje koriste metodu uklanjanja materijala. Razlozi za korištenje ove tehnologije leže u prednostima koje pruža u odnosu na tradicionalne metode proizvodnje: sloboda konstruiranja i dizajniranja novih proizvoda, izravna proizvodnja iz računalnog modela, bez potrebe za proizvodnjom kalupa što omogućuje fleksibilniju i jeftiniju proizvodnju složenih geometrija. Kombinacija ovih karakteristika omogućuje proizvodnju personaliziranih predmeta po ekonomičnijoj cijeni u odnosu na tradicionalne proizvodne tehnologije koje se koristi za masovnu proizvodnju. Kontinuirani razvoj aditivnih tehnologija rezultirao je promjenom u raznim industrijskim granama, za koje se smatralo da su neprikladne za ovu tehnologiju: zrakoplovstvo, automobilska industrija, medicina, moda, umjetnost prehrambena industrija itd.

U literaturi postoje različite klasifikacije tehnologija aditivne proizvodnje. Prema Američkom društvu za testiranje i materijale (The American Society for Testing and Materials – ASTM) procese aditivne tehnologije dijeli u sedam kategorija: 1.) binder jetting (BJ); 2.) directed energy deposition (DED); 3.) material extrusion (ME); 4.) material jetting (MJ); 5.) powder bed fusion (PBF); 6.) sheet lamination (SL); 7.) vat photopolymerization (VP).

Bez obzira koja se tehnologija koristi koraci proizvodnje su identični: 1.) izrada 3D modela, 2.) konverzija 3D modela u odgovarajući format koji stroj zahtjeva, 3.) prijenos 3D modela iz softver za pripremu i optimizaciju, 4.) priprema stroja, 5.) gradnja predmeta, 6.) uklanjanje proizvoda iz radnog volumena stroja, 7.) završna obrada.

2. POVIJEST ADITIVNE PROIZVODNJE

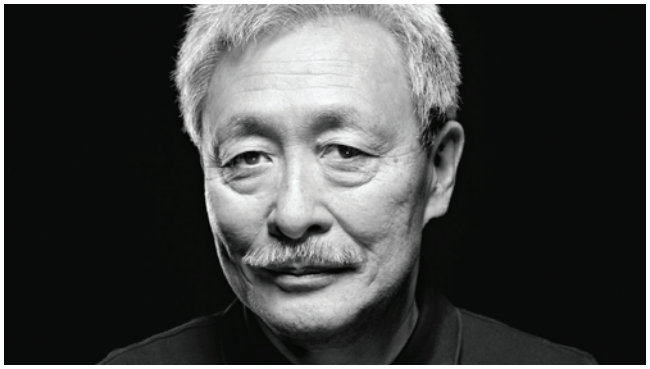
Osamdesetih godina 20. stoljeća ideja 3D printanja postala je stvarnost. Nažalost, prva polovica desetljeća bila je ispunjena obećavajućim patentima investitora koji su ili ostali bez novca ili su ih financirale skupine koje nisu uspjele vidjeti nikakve komercijalne primjene koje bi mogle nadoknaditi njihova ulaganja.

2.1 Prvi patenti i nedostatak financiranja

Prvi istaknuti patent podnio je japanski izumitelj dr. Hideo Kodama 1981. Svoj je izum opisao kao "uređaj za brzu izradu prototipa". Što je još važnije, on je bio prva osoba koja je prijavila patent koji opisuje proces stvrdnjavanja materijala laserskom zrakom. Nažalost, njegov patent nikada nije prošao jer je godinu dana nakon prijave odustao od financiranja patenta.

Sljedeći je bio trio francuskih izumitelja koji su se javili s patentom 1984. Jean-Claude André, Olivier de Witte i Alain le Méhauté bili su kolege koji su radili za francusku tehnološku tvrtku Alcatel i Francuski nacionalni centar za znanstvena istraživanja (CNRS). Slijedili su fokus dr. Kodame na "uređaj za brzu izradu prototipova" za proizvodnju složenih dijelova.

De Witte je imao prethodnog iskustva u radu s laserima za stvrdnjavanje krutih tvari i smatrao je ovu tehnologiju najboljom opcijom za korištenje u brzoj izradi prototipova. Nažalost, njihovi poslodavci u Alcatelu i CNRS-u nisu bili zainteresirani za tehnologiju i trio nije mogao financirati svoj projekt nakon prijave za patent, što ih je prisililo da odustanu od ideje.



Slika 1: Dr. Hideo Kodame, prva osoba koja je prijavila patent koji opisuje proces stvrdnjavanja materijala laserskom zrakom

2.2 Komercijalizacija i početak rasta

Charles "Chuck" Hull, otac 3D ispisa, 1984. godine podnio je patent za stereolitografski sustav, samo tri tjedna nakon što je trio u Francuskoj podnio zahtjev za patent. Hullova ideja bila je upotrijebiti UV lampe svoje tvrtke za stvrdnjavanje fotoosjetljive smole sloj po sloj kako bi se stvorili mali prilagođeni dijelovi.

Patent mu je odobren 1986. godine nakon čega je pokrenuo vlastitu tvrtku: 3D Systems. Dvije godine kasnije tvrtka je na tržištu ponudila revolucionarni prvi komercijalno dostupan 3D printer – SLA-1 – 1988.

Slika 2: prvi komercijalno dostupan 3D printer – SLA-1 – 1988

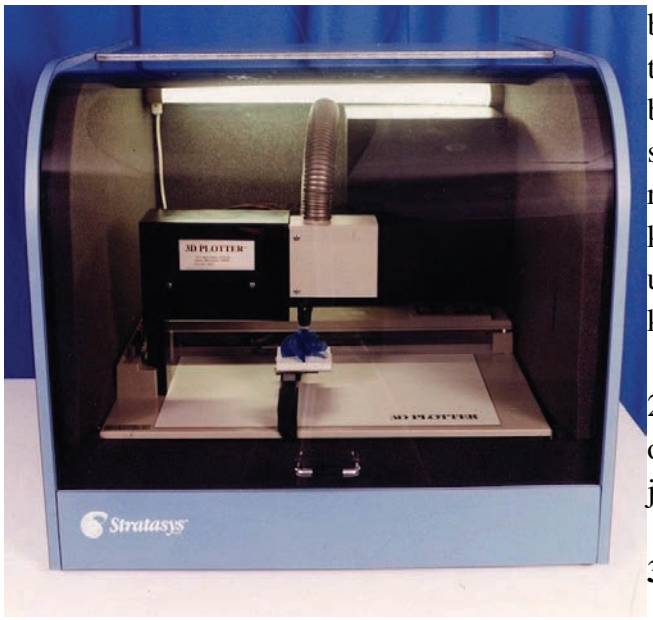
Osim samog spektakularnog stroja, Hull je također razvio STL format datoteke i digitalni proces rezanja 3D modela koji su do danas ključni za industriju 3D ispisa.

Nakon prve uspješne komercijalizacije uslijedilo je predstavljanje novih tehnologija. Prvi

patenti za FDM (fused deposition modeling) i SLS (selective laser sintering) prijavljenu su 1988. godine.

Selektivno lasersko sinteriranje izumio je Carl Deckard, u to vrijeme tek student Sveučilišta u Texsasu. Njegov je 3D printer bio rudimentaran i mogao je proizvoditi samo osnovne komade plastike. Ipak, ideja je postojala i izvedba se ubrzo razvila u SLS tehnologiju 3D printanja kakvu danas poznajemo.

Iste godine Scott Crump, suosnivač Stratasysa, prijavljuje patent za stroj koji proizvodi predmete taloženjem ekstrudirane plastike sloj po sloj. Patent je odobren tek 1992. godine nakon čega Stratasys brzo preuzima vodstvo na tržištu sa svojim novim FDM strojevima. Do danas FDM tehnologija je najčešće korišten proces aditivne proizvodnje.



Slika 3: Prvi komercijalni 3D printer FDM tehnologije tvrtke Stratasys

Profesor Emanuel Sachs s MIT-a (Massachusetts Institute of Technology) 1993. godine, uveo je pojam "3D ispis" u leksikon, a industrija ranije poznata kao "brza izrada prototipova nastavila se rapidno razvijati u smjeru serijske proizvodnje gotovih komada.

2.3 Vrijeme kada tehnologija postaje dostupna svima

U slijedećem desetljeću aditivne tehnologije se nastavljaju razvijati, veliki broj kompanija razvija nove tehnologije i jača svoj utjecaj na tržištu. Ulaskom u 21. stoljeće aditivna proizvodnja prolazi kroz najveći rast. Prvi desktop 3D printeri otvorenog koda pojavio se 2005. godine što je značilo da svatko može izraditi 3D printer za sebe, a tehnologiju učinilo dostupnu široj javnosti. 2007. godine izraelska kompanija Objet prezentira prvu tehnologiju koja omogućuje izradu modela od više materijal različitih svojstava istovremeno.

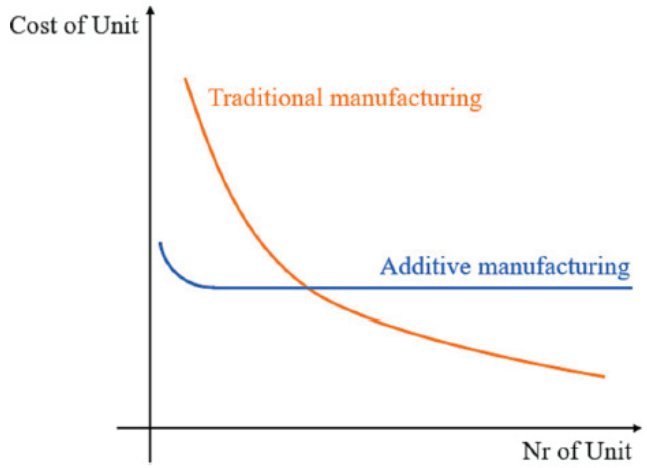
2000-e smatraju se krajem jedne ere jer je to period kada su istekli patenti koji su pokrenuli dominantne tehnologije 80-ih i 90-ih godina 20. stoljeća. Prvi patenti koji su istekli 2009. godine bili su oni za SLA i FDM tehnologiju. Ubrzo na tržište dolaze jeftini „uradi sam“ setovi koji su bili dostupni po daleko nižoj cijeni. Proizvođači su se tako povezali s pojedinačnim potrošačima i rastućom zajednicom hobista zanemarujući komercijalno industrijsko tržište na koje se usredotočio mali broj proizvođača koji danas čine kralježnicu aditivne proizvodnje.

Era patenata završila je gotovo u potpunosti 2014. godine s istekom SLS patenta. Danas su tri osnovna principa aditivne proizvodnje dostupna javnosti za nova eksperimentiranja i poboljšanja.

3. ADITIVNA PROIZVODNJA DANAS

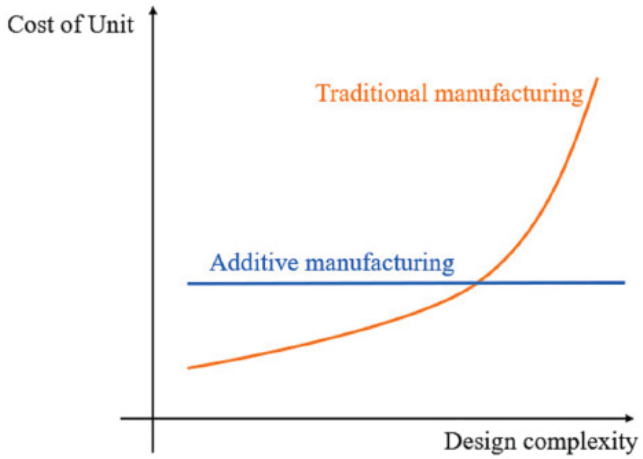
Danas se tehnologije aditivne proizvodnje koriste u različitim primjenama u različitim industrijama. Od automobilske i zrakoplovne industrije do zdravstvene zaštite i proizvodnje robe široke potrošnje, aditivna tehnologija mijenja način na koji se proizvodi dizajniraju i proizvode. U usporedbi s tradicionalnim tehnologijama, aditivna proizvodnja nema koristi od ekonomije razmjera; glavni razlozi su brzina i ograničen kapacitet izgradnje. Stoga je masovna

proizvodnja standardiziranih dijelova još uvijek u domena konvencionalnih proizvodnih tehnologija Neke studije (Hopkinson i Dickens, 2003; Ruffo i Hague, 2007) pokazale su kako se proizvedene jedinice povećavaju, dolazi do smanjenja početnih troškova a potom i stabilizacija potonjeg. Slika 4 prikazuje usporedbu između trenda troškova aditivne proizvodnje i tradicionalnih tehnologija kako se obujma proizvodnje povećava.



Slika 4: Odnos cijene i broja proizvedenih komada (Busachi et al., 2017; Hopkinson and Dickens, 2003).

Međutim, to bi mogla biti prednost za tvrtke koje masovnu proizvodnju prebacuju u zemlje u razvoju dok su na tržištima EU i SAD više usmjereni na male proizvodne serije s visokom dodanom vrijednošću što uključuje inovacije, personalizaciju i ekološku održivost (Busachi et al., 2017.). Aditivna proizvodnja omogućuje smanjenje vremena potrebnog za proizvodnju prototipova, ubrzava sljedeće faze proizvodnje jer nema potrebe za početnim ulaganjem u opremu i uređaje za konstruiranje novih proizvoda. To omogućuje smanjenje ukupnog vremena do izlaska novog proizvoda na tržište. Nadalje, tehnologija omogućuje razvoj složenih geometrija bez utjecaja na ukupni trošak proizvodnje. Strojevi nemaju ograničenja koja ovise o složenost geometrije komada koji se proizvodi. U tradicionalnim proizvodnim metodama, s druge strane, visoka razina prilagodbe proizvoda dovodi do visokih troškova proizvodnje. Razlog tome su značajna ulaganja u modifikacijama proizvodnih linija. Slika 5 prikazuje trend troškova aditivne proizvodnje i tradicionalnih procesa kako se geometrijska složenost povećava (Busachi i sur., 2017.).



Slika 5: Odnos cijene i kompleksnosti proizvoda (Busachi et al., 2017; Hopkinson and Dickens, 2003).

Prilagodba proizvoda potencijalno dovodi do povećanja vrijednost za potrošača i stoga veću spremnost na plaćanje. Aditivna proizvodnja omogućuje korisnicima sudjelovanje u konstruiranju i dizajniranju proizvoda koji su savršeno prilagođeni njihovim zahtjevima. Brojne web stranice potrošačima već omogućuju stvaranje pojedinačnih proizvoda mijenjanjem parametara dizajna; prilagođeni 3D modeli se zatim proizvode izravno s nekom od navedenih aditivnih tehnologija.

3.1 Prednosti aditivne proizvodnje

Aditivna proizvodnja ima snažan utjecaj zbog svojih prednosti u odnosu na tradicionalnu

proizvodnju. Izrada integriranih dijelova bez pribjegavanja višestrukim proizvodnim procesima i korištenju više strojeva je jedna od njih. Sklopove koji se proizvode od istog materijal moguće je proizvesti kao pojedinačni komad što smanjuje vrijeme i troškove izrade te eliminira moguće probleme koji proizlaze iz procesa montaže. Nadalje, u usporedbi s klasičnom proizvodnjom, omogućuje veću slobodu prilikom konstruiranja. S ekonomskog gledišta, složena geometrija proizvoda ne uključuje povećanje troškova proizvodnje. Budući da se predmet izrađuje sloj po sloj, troškovi i vrijeme potrebni za proizvodnju složenog komada jednaki su proizvodnji komada jednostavne geometrije. U usporedbi s konvencionalnim metodama proizvodnje kao što je kalupljenje moguće je modificirati i prilagoditi proizvod gotovo trenutno. Dodatna prednost je ekološka održivost procesa: tradicionalne tehnologije proizvodnje temelje se na subtraktivnim procesima u kojima se predmeti izrađuju uklanjanjem materijal dok aditivna proizvodnja koristi samo materijal potreban za izradu proizvoda. Osim toga, materijal koji nije iskorišten tijekom proizvodnje (npr. prah) se reciklira i ponovno koristi. Aditivna tehnologija je omogućila kreiranje i proizvodnju lakših konstrukcija dodavanjem materijal samo na mjesta gdje je to potrebno. Korištenjem aditivnih tehnologija moguće je postići važna poboljšanja u industrijskoj proizvodnji. Jedan od aktualnih primjera je opskrbni lanac koji je u zadnje tri godine znatno narušen. Mogućnost lociranja strojeva bliže kupcu i mogućnost isporuke u najkraćem roku nameću se kao razumno i optimalno rješenje.

3.2 Ograničenja aditivne proizvodnje

Unatoč brojnim prednostima, neka ograničenja sprječavaju tehnologiju od potpune implementacije. Glavni nedostaci procesa su ograničenja u dimenzijama radnog volumena, vremenu proizvodnje i troškovima nabave strojeva i materijala. U usporedbi s tradicionalnim proizvodnim metodama, procesi aditivne proizvodnje su relativno spori. Bez obzira što nema vremena čekanja između proizvodnih ciklusa, ukupno vrijeme izrade dulje je od vremena proizvodnje konvencionalnih procesa. Dakle, ako ne postoji mogućnost povećanja brzine 3D ispisa kada su potrebne velike količine proizvoda, konvencionalna tehnologije ostaju optimalni način proizvodnje. Ograničenja koja se odnose na gotovi proizvod su prisutnost potpornih struktura i nesavršenost površine. Zbog prirode procesa izrade komada kod nekih tehnologija vidljivi su slojevi gradnje. Također, potrebno je uz model graditi i potporne strukture koje se naknadno odvajaju. Na mjestima gdje su potporne strukture u doticaju s površinom modela javlja se veća površinska hrapavost i potreba za postupkom naknadne obrade. Kvaliteta površine varira ovisno o tehnologiji, orijentaciji modela u radnom volumenu i stroju koji se koristi za proizvodnju. Još uvijek su konačni rezultati lošije kvalitete od onih koji se mogu dobiti subtraktivnim procesima ali se kvaliteta površine postiže raznim tehnikama završne obrade što producira dodatne troškove i utrošak vremena.

3.3 Serijska proizvodnja – utjecaj na lanac opskrbe

Među raznim tehnologijama koje uključuje Industrije 4.0, implementacija aditivne proizvodnje pojednostavljuje opskrbi lanac, povećanjem učinkovitosti i smanjuje vrijeme odziva. Posljednjih godina razvijeni su razni koncepti opskrbnog lanca. Aditivna proizvodnja im dopušta da budu primjenjivi u praksi, jamčeći stvaranje dodatne vrijednosti unutar samog lanca opskrbe. Temeljno načelo LEAN pristupa je smanjenje troškova i otpad te ulaganje samo u aktivnosti koje stvaraju vrijednost za kupce. Budući da aditivne tehnologije omogućuju proizvodnju predmeta kroz jednostruki procesa, njegova primjena omogućuje eliminaciju zaliha

poluproizvoda. Osim toga, integracija s drugim tehnologijama Industrije 4.0 omogućuje proizvodnju prema potrebi i zahtjevima. Konstruiranje proizvoda s čim manje komponenti omogućuje dodatne uštede na troškovima nabave dijelova i komponenti koji nisu dio proizvodnog asortimana tvrtke. Ako tvrtka posluje na turbulentnim tržištima koje karakterizira promjenjiva potražnja, te proizvodi proizvode sa sve kraćim životnim ciklusom, agilni pristup postaje učinkovit u postizanju prednosti nad konkurencijom. U takvim uvjetima potrebno je povećati fleksibilnost sustava. Fleksibilnost proizvodnje postiže se korištenjem aditivnih tehnologija koje omogućuju brzu rekonfiguracija proizvoda i procesa u pogledu količine, konstrukcije i dizajna koji zadovoljava promjenjivu potražnju potrošača. U praksi, tvrtka bi mogla proizvoditi prema vremenskim intervalima, po narudžbi, koje odredi kupac. To se ne odnosi samo na proizvodnju u smislu količine nego i na karakteristike proizvoda. U mnogim je sektorima sposobnost prilagodbe proizvoda ključna za opstanak na tržištu. Aditivna proizvodnja pruža sve prednosti prilagodbe tržištu, naime: relativno niska serijska proizvodnja dijelova, smanjen rizik držanja zaliha (proizvodi se izrađuju tek nakon primljene narudžbe), i bolje upravljanje radnim kapitalom (plaćanje se događa ranije u proizvodnji), ograničavaju i smanjuju mogućnost nastanka problem u opskrbnom lancu.

4. ZAKLJUČAK

Aditivna proizvodnja tradicionalno se promatra kao tehnologija izrade prototipova. Međutim, razvoj tehnologija i materijala omogućio je da danas aditivne tehnologije možemo komparirati s tradicionalnim proizvodnim procesima i u određenim scenarijima primijeniti aditivnu tehnologiju kao optimalni proces proizvodnje. Sve češće se pojavljuju primjeri u praksi gdje tvrtke svoje proizvode prilagođavaju osobnim zahtjevima kupaca (personalizirana proizvodnja) te traže ekonomičnije načine za proizvodnju rezervnih i zamjenskih dijelova. Navedeno direktno utječe na smanjenje potrebe za proizvodnju velikih serija proizvoda što otvara vrata proizvodnji malih i srednjih serija koje su ekonomski isplative. Zaključak je da visokoproduktivni 3D pisači omogućuju brži izlazak na tržište proizvoda, izradu kompleksnih geometrija koje u većini slučajeva pospješuju ergonomiju ili čvrstoću završnog proizvoda uz smanjenje mase. Ne smije se isključiti činjenica da s mogućnošću izrade isplativih mali i srednjih serija dolazimo do optimizacije opskrbnog lanca što je danas od ključne važnosti za sve industrije globalno.

Izvori:

[1] Calignano F.,Mercurio V..: An overview of the impact of additive manufacturing on supply chain, reshoring, and sustainability, Torino, 2023.
[2] MCollan, K.-E. Michelsen (eds.), Technical, Economic and Societal Effects of Manufacturing 4.0, LUT University, Lappeenranta, Finland, 2020.

3D TISK KOVIN S TEHNOLOGIJO BINDER JETTING

David HOMAR, Jernej LOKOVŠEK
SOLID WORLD d.o.o.

IZVLEČEK

Metal Binder Jetting je dodajalni proizvodni postopek, pri katerem industrijska tiskalna glava selektivno nanese tekoče vezivo na tanko plast kovinskega prahu. Zaradi brizgalnih tiskalnih glav lahko tiskalniki z brizganjem veziva izdelujejo dele kar 100-krat hitreje kot laserski sistemi za 3D tiskanje kovin. 3D tiskalnik za kovina Shop System je sposoben proizvesti kar 670 milijonov kapljic veziva vsako sekundo. Po tiskanju gredo natisnjeni kosi, tako imenovani zeleni kosi, v peč kjer se sintrajo.

V tem članku bo tehnologija Binder Jetting predstavljena na primeru izdelave sesalnega kolektorja motorja z notranjim izgorevanjem. Ker med postopkom sintranja pride do relativno velikih krčenj in deformacij smo deformacije simulirali in zgenerirali nasprotno deformiran 3D model.

1 UVOD

Dodajalni proizvodni postopki za izdelavo kovinskih izdelkov so že zelo dobro uveljavljeni postopki v industrijskem okolju. Poleg najbolj razširjenega postopka selektivnega laserskega pretaljevanja (SLM) in laserskega nanašanja se vedno bolj uveljavlja postopek Binder Jetting [1].

2 TEHNOLOGIJA BINDER JETTING

Postopek Binder Jetting se je razvil iz tehnologije brizganja kovin (ang. Metal injection moulding – MIM), kjer se v orodja brizga kovinski prah s polimernim vezivom, tako dobimo tako imenovan zelen kos, ki pa ga nato damo na sintranje v peč. V peči se najprej pri določeni temperaturi izžge vezivo iz izdelka nato pa se temperaturo poveča, da se prične postopek sintranja prašnatih izdelkov. Pri tehnologiji Binder Jetting pa zeleni kos izdelamo s 3D tiskalnikom v našem primeru s tiskalnikom Shop System proizvajalca Desktop Metal (*Slika 1*).

Binder Jetting se začne z nanosom tankih plasti prašnega kovinskega materiala na delovno platformo. Nato se na plast prahu nanese vezivo v tekoči obliki z razprševanjem ali kapljanjem. Vezivo nanese glava, ki deluje po enakem principu kot glava pri brizgalnem tiskalniku za tiskanje dokumentov, le da tu namesto barve nanaša vezivo. Vezivo se nato strdi in veže posamezne delce prahu skupaj. Ta postopek se nadaljuje, pri čemer se dodajajo nove plasti prahu in veznega materiala, dokler se ne ustvari končni izdelek. Po končanem tisku se vse izdelke skupaj z okoliškim nepovezanim prahom prestavi v sušilnico, tam se aktivira vezivo in posuši okoliški prah. Zatem se vse skupaj prestavi v enoto za odstranitev prahu. Tam zelo pazljivo natisnjene kose oz. tako imenovane zelene kose odstranimo iz prahu, saj so relativno krhki. V enoti za odstranitev prahu se nestrjen prah preseje. Temu prahu moramo dodati le 10% novega prahu in lahko ga ponovno uporabimo.

Zelene kose se nato postavi na grafitne pladnje na katerih so keramične plošče. Te grafitne pladnje pa se nato vstavi v peč kjer se začne postopek odstranjevanja veziva in sintranja zelenih kosov. Med postopkom sintranja se izdelek skrči za približno 20%.

Binder Jetting se pogosto uporablja pri izdelavi kovinskih delov, ker omogoča hitro izdelavo kompleksnih oblik in veliko geometrijsko svobodo, kar je pogosto težko doseči s tradicionalnimi obdelovalnimi postopki. Ta tehnologija je lahko uporabna tudi za izdelavo prototipov, majhnih serij izdelkov in orodij.

Slika 1: Shop System proizvajalc Desktop Metal, ki zalema od leve proti desni: (mešalnik prahu, 3D tiskalnik, peč za sintranje in enota za odstranitev prahu

Prednosti Binder Jetting tehnologije so izredno hitre izdelava, sposobnost izdelave zapletenih geometrijskih oblik, nizki stroške proizvodnje, zmogljivost tiskanja različnih materialov in možnost tiskanja serij.

Binder Jetting je v svetu 3D-tiskanja prepoznana kot obetavna tehnologija, ki ima številne aplikacije v industriji, medicini, avtomobilski industriji, letalski industriji in drugih panogah. Raziskave in razvoj na tem področju še naprej napredujejo, kar vodi v izboljšanje zmogljivosti in razširitev možnosti uporabe te tehnologije v prihodnosti [2].

2 PROGRAM ZA SIMULACIJO DEFORMACIJ IN RAZPOK

Ker se natisnjeni izdelki med postopkom sintranja krčijo in tudi drugače deformirajo je podjetje Desktop Metal razvilo programsko opremo Live Sinter™ za simulacije deformacij in razpok med postopkom sintranja v peči.

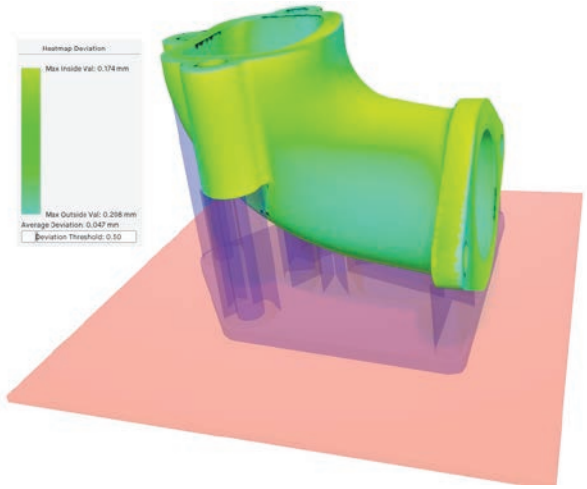
S programsko opremo Live Sinter™ zmanjšamo število poskusov in napak, ki so pogosto vključeni v proces sintranja kovinskih 3D-natisnjenih delov, izdelanih s postopkom dodajalne tehnologije Binder Jetting. Namesto da izdelek natisnemo naravnost in bi bil po sintranju deformiran, s pomočjo programa Live Sinter™, natisnemo nasprotno deformiran izdelek in tako po sintranju dobimo raven izdelek v tolerančnem območju.

3 IZDELAVA SESALNEGA KOLEKTORJA S TEHNOLOGIJO METAL BINDER JETTING

V tem članku bo predstavljena priprava 3D modela na 3D tisk in sintranje na primeru sesalnega kolektorja motorja z notranjim izgorevanjem.

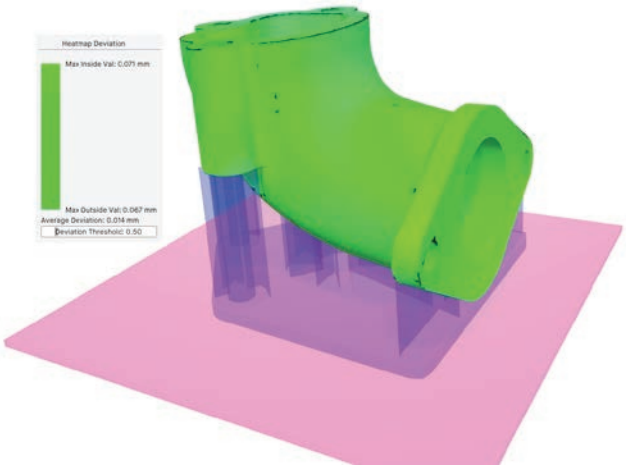
Slika 2: 3D model sesalnega kolektorja motorja z notranjim izgorevanjem

Najprej je bil uporabljen program Live Sinter™ kjer smo simulirali deformacije med postopkom sintranja. Na spodnji sliki (*Slika 3*) so prikazana odstopanja začetnega 3D modela željenega izdelka od rezultatov simulacije. Iz slike je razvidno, da je največje odstopanje v pozitivni smeri 0,174 mm in v negativni smeri 0,208 mm.



Slika 3: Rezultati simuliranja deformacij

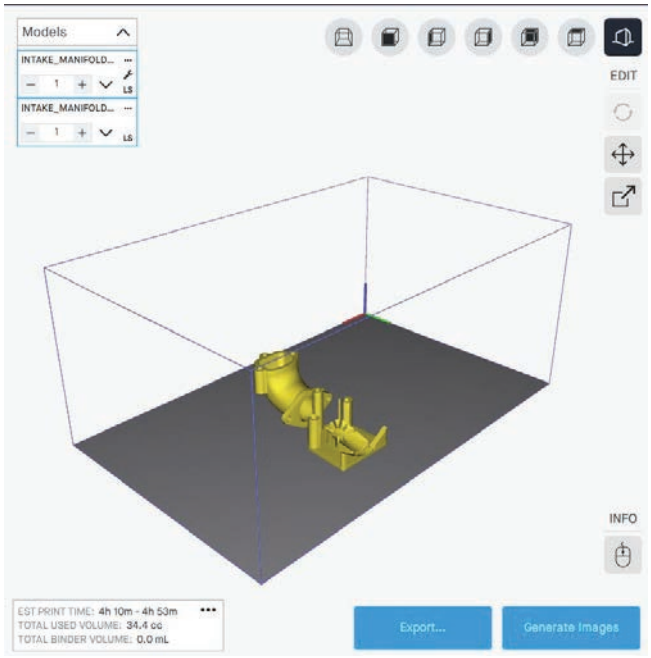
Glede na rezultate simulacij smo pripravili nasprotno deformiran 3D model in ponovili simulacijo. Tako smo naredili več iteracij. Po šesti iteraciji smo dobili rezultate (*Slika 4*), ki so bistveno boljši kot po prvi simulaciji. Tukaj je največje odstopanje v pozitivni smeri 0,071 mm in v negativni smeri 0,067 mm.



Slika 4: Odstopanja začetnega 3D modela od končnih rezultatov simuliranja deformacij

Nato smo v programu Live Sinter™ shranili nasprotno deformiran 3D model izdelka, ki smo ga dobili s simulacijo in tudi 3D model podpor, ki nam jih je zmodeliral program. Podpore pri tiskanju niso potrebne, kot je to potrebno pri drugih tehnologijah dodajanja, vseeno pa zraven izdelka natisnemo še podpore, ki so potrebne pri postopku sintranja. Ko natisnjene kose in podpore očistimo okoliškega prahu, na podpore nanesemo tanko plast keramične paste in nato na podpore postavimo natisnjen kos. Keramična pasta preprečuje, da bi se med postopkom sintranja izdelek sprijel z podporami.

Oba 3D modela smo nato odprli v programu Live Build MFG (*Slika 5*), ki zgenerira slike prerezov, ki jih 3D tiskalnik Shop System uporablja za nanos veziva. V tem programu tudi nastavimo vse parametre 3D tiska.



Slika 5: Uvožen 3D model željenega izdelka in podpor v program Live Build MFG

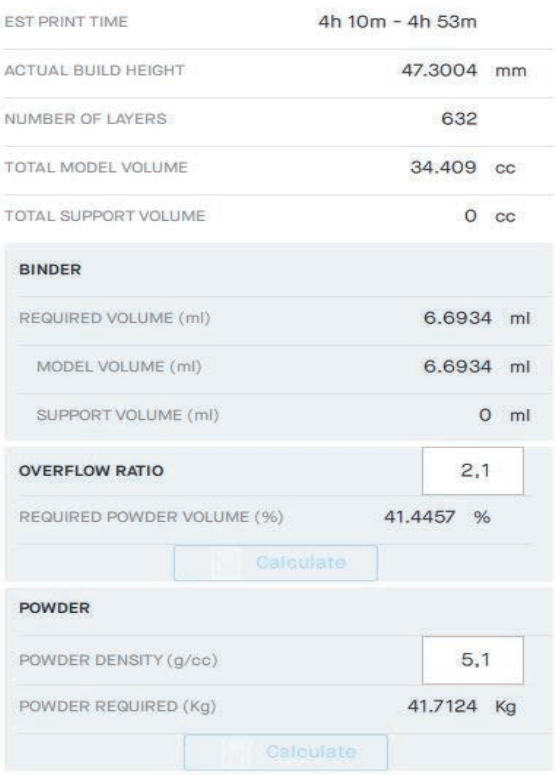
Ko 3D modeloma definiramo pozicijo in orientacijo na delovni platformi nam program izpiše koliko časa bo 3D tiskalnik potreboval za dokončanje tiska te naloge (*Slika 6*). Čas tiska je zelo hiter in sicer približno 4 ure in pol, saj brizgalna glava, ki nanaša vezivo to dela zelo hitro in natančno. Brizgalna glava v 3D tiskalniku Shop System je sposobna nanesti kar 670 milijonov kapljic veziva vsako sekundo.

Definirana je tudi količina kovinskega prahu in veziva, ki bo porabljen za izdelavo sesalnega kolektorja. Porabljenih bo 34,409 cm^3 kovinskega prahu in 6,6934 ml veziva.

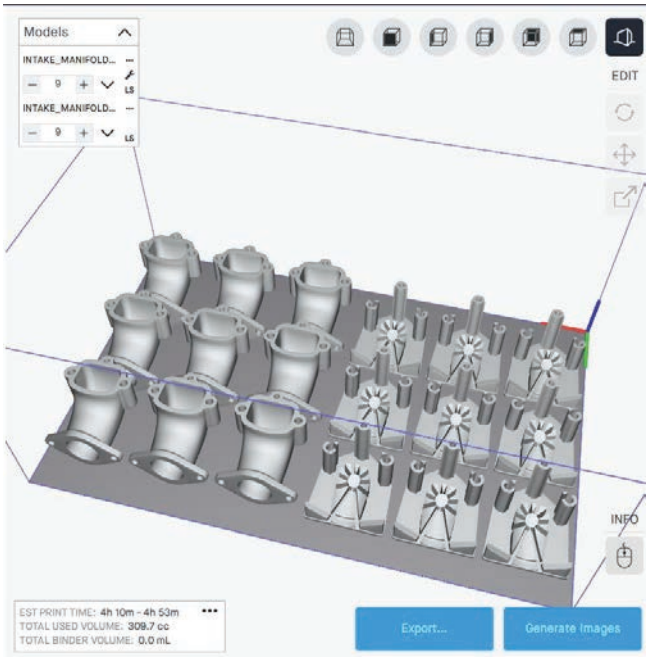
Višina tiska je 47,3004 mm, kar pomeni da je potrebno za izdelavo sesalnega kolektorja in podpor v tiskalnik pred izdelavo potrebno vnesti vsaj 41,7124 kg prahu. Le manjši del tega prahu bo povezan v zelen kos z vezivom, ves okoliški prah, ki pa ni povezan z vezivom pa se lahko kasneje ponovno uporabi.

Enako časa pa bi tiskalnik tiskal in tudi enako količino kovinskega prahu bi morali dodati v 3D tiskalnik če bi namesto enega sesalnega kolektorja in enih podpor naenkrat natisnili 9 sesalnih kolektorjev in 9 podpor (slika 9), saj je enaka višina 3D tiska. Na čas izdelave pa vpliva predvsem višina 3D tiska oziroma število plasti, ki so potrebne, da izdelek natisnemo do vrha.

Koliko veziva se doda v plasti pa ne vpliva na čas izdelave.



Slika 6: Predvideni čas tiskanja in porabljen kovinski prah ter vezivo



Slika 7: 9 kolektorjev in 9 podpor, višina tiskanja pa ostaja nespremenjena

Po končanem 3D tisku se je zelen kos sesalnega kolektorja dalo sintrati v peč. Po sintranju smo dobili kovinski sesalni kolektor (*Slika 8*).

Slika 8: Končni izdelek – sesalni kolektor

3 SKLEPI

Tehnologija Metal Binder Jetting ima številne prednosti v primerjavi z ostalimi tehnologijami 3D tiskanja kovin. Največja prednost je izdelava serij izdelkov saj različna količina izdelkov pri enaki višini tiskanja ne vpliva na čas tiskanja.

Izdelki narejeni s postopkom Binder Jetting se uporabljajo v številnih aplikacijah na vseh področjih.

Slabost postopka so deformacije izdelka, ki se pojavijo med operacijo sintranja, ki pa jih uspešno rešujemo s simulacijo sintranja in pripravo nasprotno deformiranega izdelka, kar je bilo tudi prikazano na primeru izdelave sesalnega kolektorja motorja z notranjim izgorevanjem.

Viri:

[1] Ziaee, M, Crane, N, B.: Binder jetting: A review of process, materials, and methods, Additive Manufacturing, Elsevier, 2019.
[2] Gibson, I, Rosen, D, Stucker, B, Khorasani, M.: Binder Jetting. Additive Manufacturing Technologies, Springer, 2021.

RAZVOJ IN IZDELAVA VISOKO TEHNOLOŠKE REŠITVE ZA IZBOLJŠAN DOVOD ZRAKA ZA AVTO PORSCHE 991.2 GT3 Z UPORABO OGLJIKOVIH VLAKEN

Tomaž VUJASINOVIČ[1], Peter HORVAT[1], Žan LAZAREVIČ[2]
[1]3WAY d.o.o.
[2]ANGSTROM PERFORMANCE

IZVLEČEK

3D tehnologije so v današnjem času nepogrešljive pri razvoju in proizvodnji izdelkov. Uporaba 3D skeniranja, 3D tiskanja in naprednih 3D programskih paketov omogoča hitro in učinkovito proizvodnjo prototipov in izdelkov ter prilagodljivost in prilagajanje oblik izdelkov. Poleg tega so 3D tehnologije stroškovno učinkovitejše kot tradicionalne metode proizvodnje ter spodbujajo kreativnost in inovativnost pri razvoju novih izdelkov. Vse to omogoča izdelavo izdelkov in oblik, ki bi bile sicer težko izvedljive s tradicionalnimi metodami, kar pa lahko pomembno vpliva na celotno proizvodnjo.

Prispevek obravnava razvoj modificirane dovodne cevi za avto Porsche 991.2 GT3 z najsodobnejšo 3D tehnologijo od 3D skeniranja, analize, vzvratnega inženiringa do 3D tiskanega prototipa in izdelavo orodja za izdelavo modificiranega izdelka.

1 UVOD

911 GT3 je izdelek iz Stuttgarta. Več kot 70 let napredka z nespremenjenim receptom. Porsche je malo podjetje v primerjavi z ostalimi velikani kateri izdelujejo sportne avtomobile. V vsej zgodovini znamke, je GT3 na najvisjem nivoju fizike in razvoja. Stopnicko nad njim so le se GT3RS, in veliko bolj ekstremen GT2RS.

Pri generaciji 991.2 serije GT3, je Porsche posvetil večino časa izdelavi variante GT3RS. GT3 pa je izgubil nekaj najnaprednejših dodelav in prejel kar nekaj omejitev. Glavni razliki med avtomobiloma sta v izpušnem sistemu in dovodu zraka v motor. Lastnik avtomobila je pristopil do nas s potrebo po rešitvi drugega dela.

Namen modifikacije dovodne cevi za avto Porsche 991.2 GT3 je bil seveda izboljšanje zmogljivosti in učinkovitosti avtomobila. Za lažjo in hitrejšo obravnavo je bilo potrebno najprej pridobiti 3D digitalni zapis, na katerem je bilo potem možno obstoječe digitalne vhodne podatke obdelati in nato ustrezno predelati na novo obliko. Pri tem je bilo potrebno upoštevati vse potrebne pogoje za čim boljšo izdelavo 3D modela in pripraviti končno zasnovo namenjeno za izdelavo 3D tiskanega prototipa. Po potrditvi prototipa pa je sledila izdelava novega karbonskega dela dovoda zraka.

2 IDEJA

Med modeloma GT3 in GT3RS so majhne, a zelo pomembne razlike. Okoli 10% zmogljivosti modela GT3RS inžinerji pri Porscheju ukrotijo, in izdelajo model GT3. Nekaj pomembnih razlik je pri podvozju in pogonskem agregatu. Podvozje je veliko manj agresivno in motor proizvede okoli 20 konjskih moči manj. Glavna razlika pri pogonskem agregatu je v izpušnem sistemu in sistemu dovoda zraka. Oba sta pri GT3 opremljena z restriktorjem. Po odpravi restriktorja na izpuhu smo želeli izboljšati dovod zraka.

Površina zračnega filtra je 207cm^2, cevi za dovod od pokrova naprej pa so enakih dimenzij. Od zračnega filtra do vhoda pa so cevi zmanjsane na presek 160cm^2 vse do pokrovov dovoda na pokrovu motorja. Naša priložnost je skrita tu. Izenačitev površine dovoda v motor bi pomenila več kisika za izgorevanje. Pri Porscheju so inžinerji uporabili princip dovoda zraka “RAM air”, kar pomeni, da vsak kvadratni centimeter

Tomaž VUJASINOVIČ[1], Peter HORVAT[1], Žan LAZAREVIČ[2]
[1]3WAY d.o.o.
[2]ANGSTROM PERFORMANCE

površine pomeni dovod večje količine zraka, ki je dovedemo v motor. To je seveda še bolj opazno pri višjih hitrostih, kjer GT3 preživi večino svojega časa na stezi.

3 POSTOPEK IZDELAVE

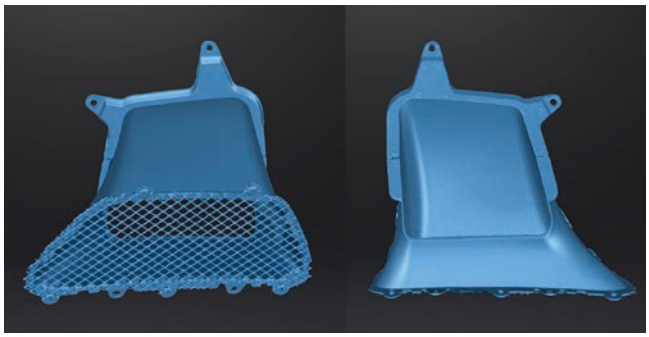
3.1 3D skeniranje

Prvi in zelo pomemben korak pri izvedbi projekta je bila izvedba meritev. Meritve so morale biti zelo natančne in hitre. Merilna oprema pa je morala imeti sposobnost zajemati zelo kompleksne površine in biti prenosna zaradi težjega dostopa željenih merjenih površin. Tako smo za zajem podatkov uporabili 3D skener podjetja Shining3D. Uporabljen je bil model Freescan UE Pro, ki spada med laserske ročne 3D skenerje in ima natančnost 0.02mm z volumskim dodatkom +0.03 mm/m.

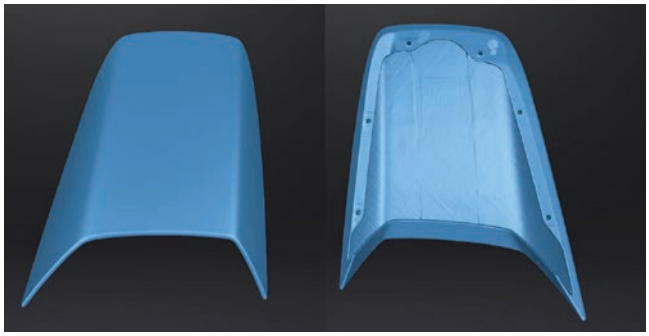
Slika 1: Shining3D Freescan UE Pro 3D skener

Za ustrezno izvedbo projekta je bilo potrebno izvesti več meritev. 3D skenirali smo sledeče predele in kose:

- pokrov zračnika v nameščenem stanju
- pokrov zračnika v celoti
- dovodna cev v nameščenem stanju
- dovodna cev v celoti



Slika 2: 3D sken dovodne cevi zračnika



Slika 3: 3D sken pokrova dovodne cevi zračnika

Slika 4: 3D skeniranje dovodne cevi v nameščenem stanju

Po opravljenem 3D skeniranju smo naredili analizo naših meritev in prišli do ugotovitve, da je vhodni prerez lupine zračnika manjši od površine zračnega filtra. Cev, ki se spaja med pokrovom motorja in zračnikom na pokrovu motorja je najverjetneje načrtovano ozko grlo. Nasadna cev ima površino 198cm^2. Originalni pokrov kateri zajema zrak iz okolice pa ima presek v izmeri 152cm^2. Glede na meritve smo na tem mestu izoblikovali načrt za nadaljevanje projekta. Cilj je bil optimizacija obeh presekov, tako da motor dobi več pozitivnega tlaka v sam dovod agregata pri višjih hitrostih.

3.2 Vzvratni inženiring

Preden smo se lotili vzvratnega inženiringa in potrebnih modifikacij smo na podlagi pridobljenih podatkov naredili še CFD analizo (računalniška dinamika fluidov) za izračun najbolj optimalne odprtine. Po preračunih smo

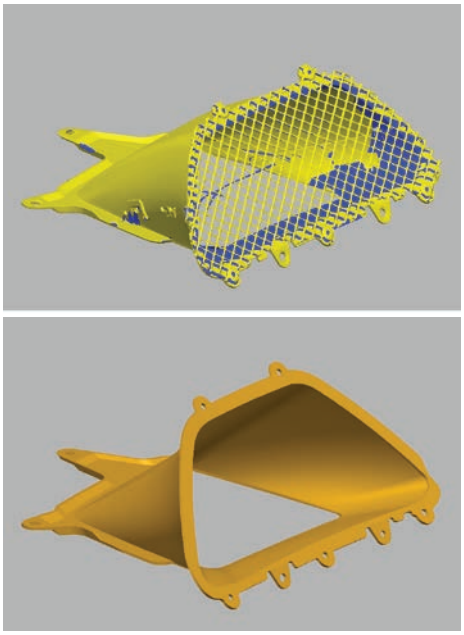
Tomaž VUJASINOVIČ[1], Peter HORVAT[1], Žan LAZAREVIČ[2]
[1]3WAY d.o.o.
[2]ANGSTROM PERFORMANCE

izvedeli, da je najbolje, če ima odprtina enak oz. malo večji presek glede na presek zračnega filtra.

Vzvratni inženiring je postopek, kjer na podlagi 3D skenov v 3D digitalnem okolju naredimo visoko kakovostne površine in modifikacije obstoječih izdelkov. V našem primeru smo za to nalogo uporabili programsko opremo Geomagic Design X.

Najprej je bilo potrebno vse naše 3D skene poravnati med seboj, da smo lahko zagotovili ustrezne ujeme končnega izdelka in popolno prileganje. Prilagoditev povečanja dovoda zraka je bila tako potrebna na dveh delih: na dovodni zračni cevi in na pokrovu zračnika.

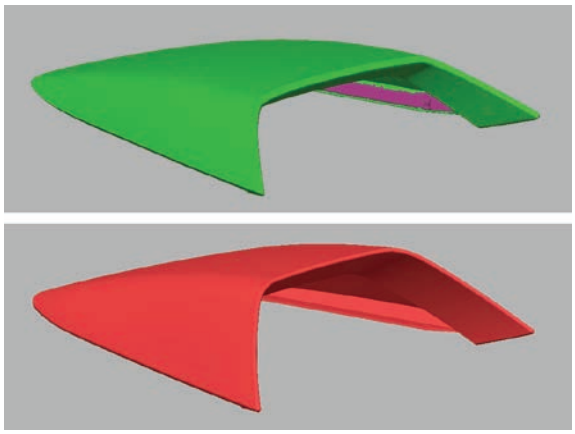
Dovodna cev je bila narejena prva, saj je potem veliko lažje prilegati pokrov, ker vemo kakšen prostor je potrebno pokriti. Izhod iz tega dela cevi se ni smel spremeniti zaradi ustrezne pritrditve in vijakov. Spremenjen je bil tako samo vhod v cev in pa sam potek poti, ki mora biti čimbolj zvezen. Končni rezultat vzvratnega inženiringa je viden na sliki XX.



Slika 5: Primerjava zračnika pred in po modifikaciji

Med samo izdelavo 3D modela je bilo potrebno zagotoviti ustrezen presek in tako končni model zračnika na vstopu meri 207cm2, kar se ujema z izračuni dinamike fluidov in smo s tem zagotovili ustrezen dovod zraka.

V drugem delu pa je bilo potrebno narediti prilagoditev pokrova zračnika. Prav tako smo zagotovili ustrezen ujem na predelu pritrditve, spremenjen in dvignjen pa je bil vrhnji del, kjer je sedaj odprtina večja. Pri tem delu pa je bila zelo pomembna tudi zunanja površina in pa estetika, saj je ta del viden in se mora prilegati obliki avtomobila. Končen rezultat je viden na sliki XX.



Slika 6: Primerjava pokrova pred in po modifikaciji

3.3 Izdelava prototipov s pomočjo tehnologije 3D tiskanja

Za izdelavo prototipov smo potrebovali tehnologijo, ki bi nam omogočala hitro izdelavo in pa cenovno ugodnost. Tako smo za izdelavo prototipnih kosov uporabili FDM (fused deposition modeling) in SLA (Stereolithography) tehnologijo 3D tiskanja. Za izdelavo notranjega zračnika smo uporabili tehnologijo FDM, končni proizvod je bil natisnjen z uporabo filamenta PA-CF (najlon z karbonskimi delci). Pokrov pa je bil natisnjen s tehnologijo SLA z materialom TR300, kateri je dimenzijsko obstojen do preko 200°C.

Slika 7: 3D printana prototipna kosa

Tomaž VUJASINOVIČ[1], Peter HORVAT[1], Žan LAZAREVIČ[2]
[1]3WAY d.o.o.
[2]ANGSTROM PERFORMANCE

Iz 3D natisnjenega izdelka smo po nekaj dneh nanašanja plasti epoksidne smole in brušenja izdelali kalup, kateri je služil izdelavi lupine katera pokriva notranji zračnik natisnjen iz najlona in usmerja zrak do notranjega elementa. Pri načrtovanju notranjega elementa nas je vodila poenotena filozofija, uskladiti povrsine notranje cevi dovoda zraka s povečano površino novega zračnika.

3.4 Izdelava kalupov

Kalupi na osnovi 3D natisnjenega surovca so izdelani z uporabo visoko temperaturne epoksidne smole in gelcoat-a. Za ločitvene ravnine smo se naslonili na znanje ekipe 3WAY, in izdelavo kalupov načrtovali tako, da kalup ločimo na 3 glavne dele, kar omogoča izdelavo zunanjega zračnika iz enega kosa. Karbonska vlakna so rezana z uporabo stroja CNC in s tem je poskrbljeno, da so tolerance in prekrivanja načrtovana in ne približna. Prekrivanja med spoji plasti pred impregniranih vlaken so 6mm, za montažo izdelka pa so uporabljeni navojni nastavki iz nerjavečega jekla. Nerjaveče jeklo je veliko boljša alternativa ostalim materialom, ker s karbonskimi vlakni ne reagira. Karbonska vlakna so sama po sebi električno prevodna, tako da pri uporabi aluminija in nekaterih drugih kovin lahko pride do pospešene korozije in odpovedi spojev.

3.5 Izdelava končnega izdelka

Za izdelavo notranje lupine smo se naslonili na pomoč robotov. Za zunanjo lupino, katera je vidna vsem, pa smo porabili veliko več časa. V končan kalup smo položili prepreg XC110, katerega smo rezali s pomočjo stroja CNC. Vsi šivi in prekrivanja so bila načrtovana tako da je čim manj ostanka. Spoji se prekrivajo 6mm. Več kot dovolj za zelo trden končni izdelek. Celotna zgornja površina zračnika je v kalup položena iz enega samega kosa. Vlakna za prvi kozmetični sloj so bila rezana tako, da se na sredinsko črto avtomobila naslonijo pod kotom 45 stopinj. S tem vizualno dosežemo dva zračnika, katerih linije usmerijo pogled v sredino dirkalnika iz Stuttgarta. Zunanja dela zračnika sta laminirana iz petih plasti vlaken, končna debelina izdelka meri 1.1mm, in nudi več kot dovolj trdnosti za opravljanje potrebne funkcije.

Slika 8: Končni izdelek karbonskega pokrova

4 SKLEP

Sodobne 3D tehnologije so v današnjem času postale nepogrešljive pri razvoju in proizvodnji izdelkov. Med najpomembnejše pri razvoju izdelkov gotovo spadata tehnologija 3D tiskanja in 3D skeniranja. Največje prednosti sodobnih 3D tehnologij so:

- Omogočajo hitrejše in bolj učinkovito izdelavo prototipov in izdelkov manjših serij
- Hitro in enostavno prilagajanje in spreminjanje oblik izdelkov. To je ključnega pomena za proizvodnjo izdelkov, ki se nenehno spreminjajo in izboljšujejo.
- Zmanjšamo proizvodne stroške in čas proizvodnje, kar ima lahko pomembne učinke na celotno proces izdelave in razvoj izdelka
- Izdelujemo izdelke in oblike, ki bi bile sicer težko izvedljive s tradicionalnimi metodami. To spodbuja kreativnost in inovativnost pri proizvodnji novih izdelkov.

Zaključimo lahko, da smo pri našem projektu z uporabo naprednih 3D tehnologij projekt izpeljali hitro in kakovostno. Zmanjšali smo čas od ideje do končnega izdelka in s tem smo lahko veliko bolj konkurenčni in izpeljemo veliko večje število projektov.

ANALIZA POROZNOSTI POLIMERNIH PROIZVODOV NA PREREZIH IN VOLUMNU Z UPORABO RAČUNALNIŠKE TOMOGRAFIJE

Luka KURTALJ[1], Josip KOS[1], Nenad DRVAR[1], Tomislav HERCIGONJA[1], Matic VOGRIN[2], Mario ŠINKO[2], Aljaž ŠUMLAJ[2]
[1]Topomatika d.o.o.
[2]MARSi GROUP d.o.o.

POVZETEK

Prispevek podaja pregled in prednosti uporabe industrijske računalniške tomografije (CT) za analizo temperirnih kanalov na orodnih delih za brizganje plastičnih mas ter poroznosti polimernih izdelkov na prerezih in v volumnu. Tehnologija CT poleg dimenzijske analize in analize GD&T omogoča tudi ne-destruktivno analizo notranjosti izdelka, kar pomeni, da so izdelki uporabni tudi po preizkusu. V prispevku bodo predstavljeni rezultati 3D meritev s sistemom ZEISS Metrotom CT ter obdelava s programskim paketom GOM Volume Inspect za celovito analizo rezultatov.

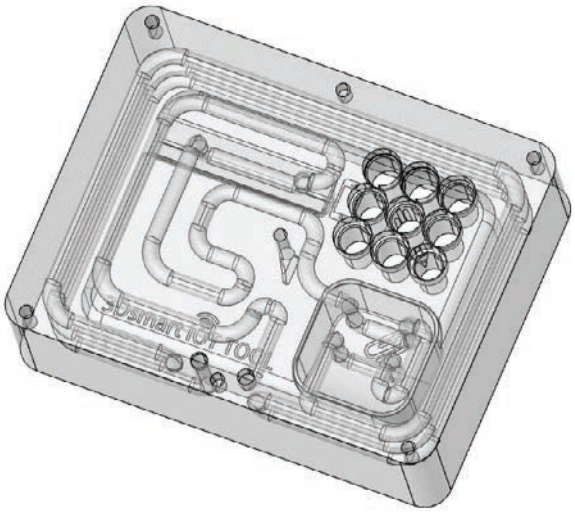
1 UVOD

V današnjem času je tehnologija izdelave sodobnih orodij za injekcijsko brizganje plastike ena najhitreje rastočih industrij na svetu. Plastika se uporablja na skoraj vseh področjih, od gospodinjskih izdelkov in izdelkov za vesoljske aplikacije, transport ter embalažo, do medicine, igrač, gradnje mostov in športnih izdelkov. S tem se povečuje tudi količina proizvodov, ki jih je treba izdelati v čim krajšem času. Da bi to dosegli, potrebujemo dobro in kvalitetno orodje.

Klasični temperirni kanali na orodju nam ne morejo zagotoviti optimalnega temperiranja. Zaradi vedno kompleksnejših izdelkov in njihovih zahtev se v orodjarski industriji vse več uporablja tudi t. i. dodajalna ali aditivna tehnologija, predvsem pri izdelavi ali optimizaciji oblikovnih delov orodij s hladilnimi sistemi, ki sledijo obliki izdelka.

2 IZDELAVA ORODJA ZA BRIZGANJE

Namen hladilnih kanalov v orodjih za brizganje plastike je nadzorovanje temperature površine orodja. Na spodnji sliki (slika 1) je prikazan model CAD oblikovnega dela orodja s hladilnimi kanali.



Slika 1: 3D model orodja s temperirnimi kanali

Na podlagi pripravljenega 3D modela smo izdelali program za 3D tisk s pomočjo programskega paketa PSW, s katerim se je 3D obliko modela razrezalo na tanke sloje debeline 0,04 mm.

Sledila je izdelava orodja z neposrednim laserskim sintranjem kovinskega praha. Pri postopku tiskanja posnemalo iz zalogovnika nanese material na delovno površino. Krmiljen laserski žarek raztopi material glede na obliko, ki jo dobi iz procesno-računalniške enote. Ko je plast v celoti končana, se delovna plošča spusti za debelino plasti in postopek se ponovi. Po končanem procesu dobimo tridimenzionalno obliko sintranega izdelka.

Luka KURTALJ[1], Josip KOS[1], Nenad DRVAR[1], Tomislav HERCIGONJA[1], Matic VOGRIN[2], Mario ŠINKO[2], Aljaž ŠUMLAJ[2]
[1]Topomatika d.o.o.
[2]MARSi GROUP d.o.o.

Ker je površina po 3D tisku relativno hrapava, smo vse orodne dele natisnili z dodatkom 0,5 mm za potrebo naknadne strojne obdelave [1, 2].

Po obdelavi vložkov sta sledila dimenzijska kontrola in testiranje ustreznosti prilagajanja posameznih delov orodja enega proti drugemu. Kontrola se izvaja tudi s pomočjo naprednih merilnih naprav, kot so 3D skenerji (GOM ScanCobot) in računalniška tomografija (CT) [1]. Za kontrolo temperirnih kanalov se uporablja CT skeniranje, ki lahko posname tudi očem nevidne dele orodja.

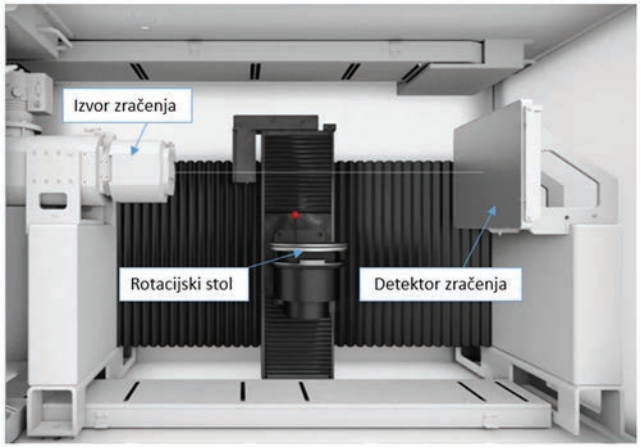
3 RAČUNALNIŠKA TOMOGRAFIJA

Poroznost materiala pogosto predstavlja velik problem pri izdelavi polimernih izdelkov.

Najpogostejše metode kontrole poroznosti so ali destruktivne (razrez vzorca in analiza prerezov) ali pa ne omogočajo popolnega vpogleda v dimenzije samih volumskih napak (rentgen).

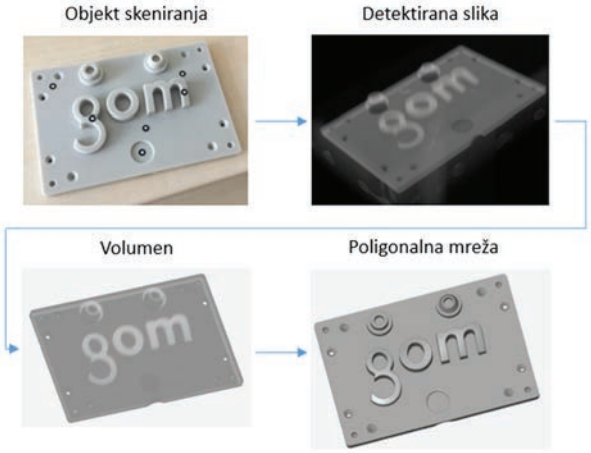
Z uporabo računalniške tomografije sta obe težavi odpravljeni, popolno poročilo poroznosti pa lahko naredimo v kratkem času ter brez uničenja vzorcev.

Glavni elementi vsake industrijske naprave CT so vir sevanja, vrtljiva miza za postavitev vzorcev in detektor sevanja (slika 2).



Slika 2: Glavni elementi naprave CT

Vir sevanja ustvarja rentgenske žarke, ki obsevajo predmet skeniranja in se ustavijo na detektorju. Slabljenje rentgenskih žarkov, ki končajo na detektorju, je odvisno od gostote materiala, iz katerega je izdelan predmet skeniranja, in od njegove debeline. Objekt se nato vrti z avtomatsko rotacijsko mizo, postopek pa se ponavlja, dokler se skenirani objekt ne obrne za 360°, programska oprema pa vse dobljene slike združi z rekonstrukcijskim algoritmom in samodejno generira volumen, ki se na koncu poligonizira. Končni rezultat je poligonalna mreža trikotnikov (slika 3).



Slika 3: Postopek pridobivanja poligonalne mreže s tehnologijo CT

3.1 Prednosti CT skeniranja

Glavna prednost CT skeniranja pred običajnimi merilnimi metodami je dejstvo, da je notranjost izdelka mogoče analizirati brez destruktivnih metod.

Pogosto so zaradi procesa izdelave polimernih izdelkov v notranjosti materiala prisotne volumske napake, ki negativno vplivajo na njegove mehanske in vizualne lastnosti, zato je treba preveriti skupni volumen napak, njihovo porazdelitev v izdelku, velikost ali oddaljenost od zunanje površine. Metoda, s katero se je analiza prostornine izvajala pred meroslovno tehnologijo CT, je vključevala rezanje tankih plasti materiala in analizo vseh odsekov. Ta proces je dolgotrajen in pomeni uničenje vzorca, pri tehnologiji CT pa lahko analiziramo več vzorcev naenkrat, analizo pa lahko popolnoma avtomatiziramo in dostavimo točno tisti izdelek, na katerem je bila izvedena.

Poleg naštetega je možno na rezultatih CT skeniranja s pomočjo programske opreme GOM Volume Inspect opraviti tudi naslednje:

Luka KURTALJ[1], Josip KOS[1], Nenad DRVAR[1], Tomislav HERCIGONJA[1], Matic VOGRIN[2], Mario ŠINKO[2], Aljaž ŠUMLAJ[2]
[1]Topomatika d.o.o.
[2]MARSi GROUP d.o.o.

• primerjavo dejanskega izdelka z nominalnim modelom,
• analizo sestave več komponent,
• analizo prereza sklopa,
• dimenzijsko analizo in analizo GD&T,
• presečno analizo izdelkov,
• analizo debeline stene,
• izdelavo merilnega poročila.

Tako lahko popoln nadzor kakovosti polimernih izdelkov in izdelkov iz aluminija izvajamo le z enim sistemom.

4 MERJENJE S SISTEMOM CT

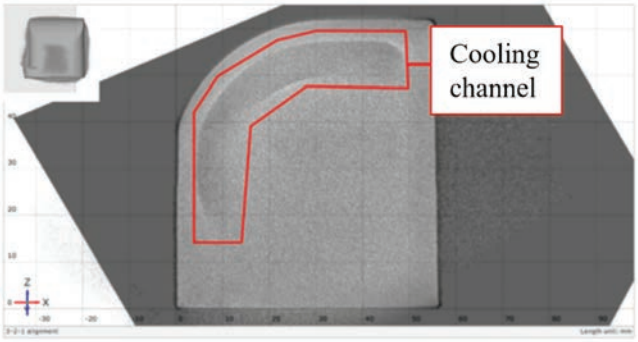
Kot smo že omenili v poglavju 3.1, je s CT-jem mogoče opraviti popolno kontrolo kakovosti izdelka. V nadaljevanju so omenjene funkcije podrobneje predstavljene.

Slika 6: Primer plastičnih izdelkov, primernih za CT skeniranje in merjenje [3]

4.1 CT skeniranje orodnih delov

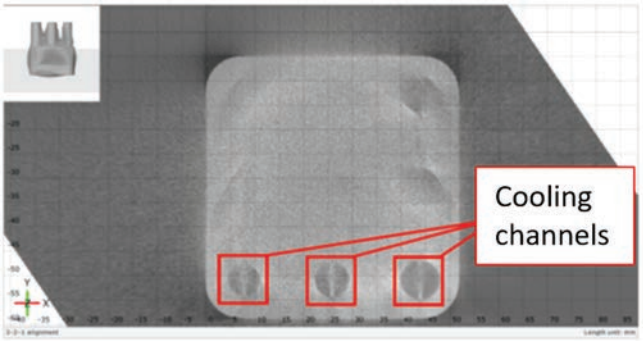
Pri postopku CT skeniranja se posname več slik iz različnih zornih kotov, da se ustvari 3D slika.

Popolna preiskava CT je bila izvedena na manjših 3D natisnjenih vložkih, kjer so premeri temperirnih kanalov zelo majhni, stene med njimi pa zelo tanke, da med samimi kanali ne bi prišlo do razpok v materialu. Po končanem skeniranju lahko pridobljeni model prerežemo na kateremkoli mestu in dobimo sliko notranjosti, kot je prikazano na sliki 4.



Slika 4: Prikaz vzdolžnega prereza vložka s hladilnim kanalom

CT skeniranje je zaradi svojih lastnosti prava izbira pri digitalizaciji sklopov in objektov z nedostopnimi notranjimi strukturami. Na sliki 5 je prikazan prečni prerez vložka s temperirnimi kanali in steno na sredini vsakega kanala.



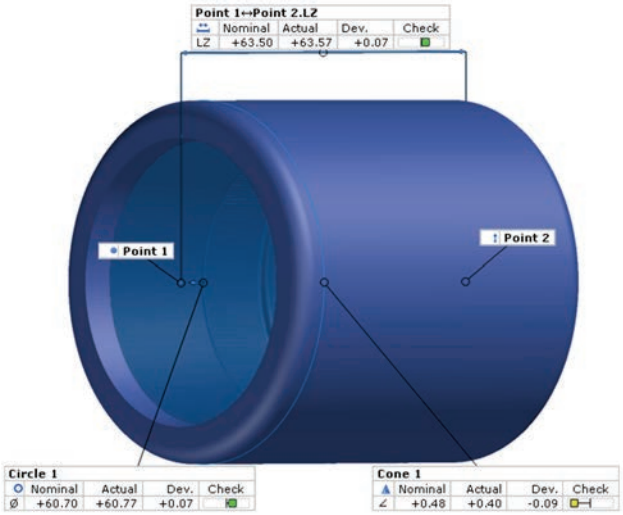
Slika 5: Prikaz vzdolžnega prereza vložka s hladilnimi kanali

Pri CT skeniranju je bilo ugotovljeno, da na tankih stenah med hladilnimi kanali ni vidnih razpok, kar pomeni, da je orodje kvalitetno natisnjeno [1].

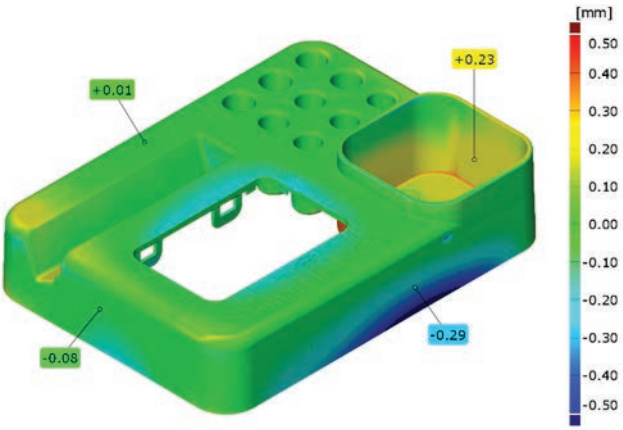
4.2 Dimenzijska analiza

CT skeniranje zagotavlja odlično natančnost in ponovljivost rezultatov, popolnoma odpravlja potrebo po površinskem matiranju, omogoča pa tudi merjenje očem nevidnih dimenzij, zaradi česa je idealna tehnologija za dimenzijsko analizo polimernih izdelkov.

Luka KURTALJ[1], Josip KOS[1], Nenad DRVAR[1], Tomislav HERCIGONJA[1], Matic VOGRIN[2], Mario ŠINKO[2], Aljaž ŠUMLAJ[2]
[1]Topomatika d.o.o.
[2]MARSi GROUP d.o.o.



Slika 6: Dimenzijska analiza



Slika 7: Primerjava površin modela CAD in dejanskega izdelka za namen postopka *First Article Inspection*

4.3 Analiza poroznosti

Nehomogenost materiala izjemno slabo vpliva na njegove mehanske lastnosti, zato je nujna analiza prostornine polimernih izdelkov.

Lunkerje lahko merimo na odseku, ki ga določa standard P202, ali na celotnem volumnu, ki ga določa standard P203.

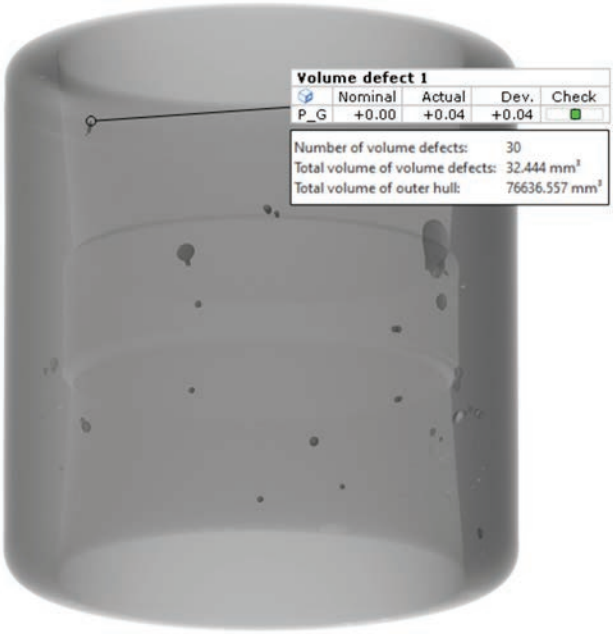
4.3.1 Analiza volumna

Analiza volumske poroznosti v programskem paketu GOM Volume Inspect omogoča vpogled v vse velikosti, ki jih določa standard P203.

4.3.1.1 Skupni volumen napak

Skupni volumen napak je ena najpomembnejših točk volumske analize, saj prikazuje nehomogenost izdelka.

Če je skupna količina napak izven tolerance, vsi mehanski testi, opravljeni na vzorcih materiala, niso več veljavni in lastnosti izdelka ni mogoče zagotoviti. CT skeniranje z napravo Metrotom 6 Scout lahko zazna napake do 3 µm pri maksimalni ločljivosti, kar zagotavlja zelo natančno analizo skupnega volumna napak (slika 8).

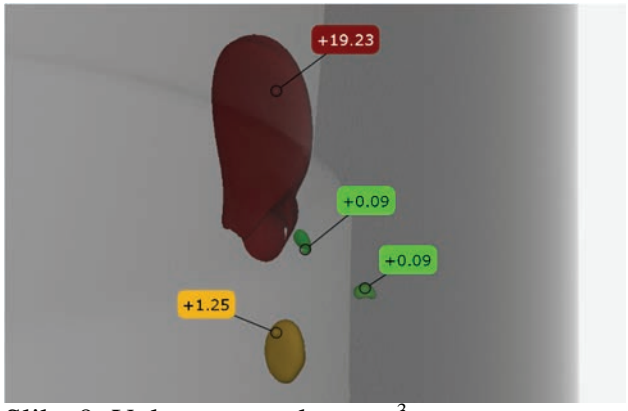


Slika 8: Skupna prostornina in število napak

4.3.1.2 Velikosti posameznih napak

Včasih ni dovolj poznati zgolj celoten obseg napak, temveč tudi omejitve dimenzij posamezne napake. Z uporabo tehnologije GOM Volume Inspect lahko na napakah izmerimo prostornino, največjo diagonalo, premer, površino in dimenzije v smereh osi x, y in z.

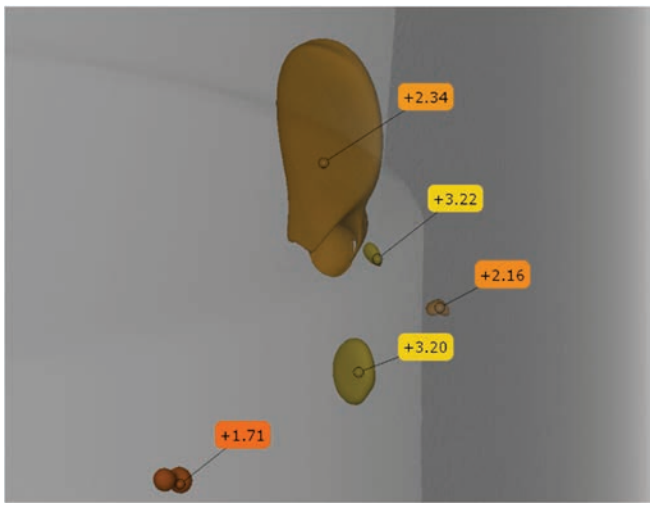
Luka KURTALJ[1], Josip KOS[1], Nenad DRVAR[1], Tomislav HERCIGONJA[1], Matic VOGRIN[2], Mario ŠINKO[2], Aljaž ŠUMLAJ[2]
[1]Topomatika d.o.o.
[2]MARSi GROUP d.o.o.



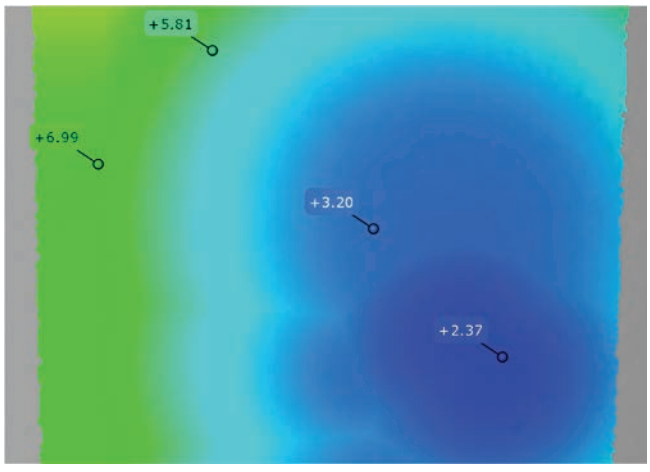
Slika 9: Volumen napak v mm^3

4.3.1.3 Razdalja napak do zunanje površine

Če gre za izdelek, ki je nosilni element v sestavu, je pomembno tudi, da morebitne volumske napake niso preblizu zunanje površine, da ne pride do pokanja sten in poškodbe celovitosti sestava. (*Slika 10*)



Slika 10: Razdalja napake do najbližje zunanje površine v mm



Slika 11: Vpliv napak na debelino stene plastičnega izdelka – napake zmanjšajo debelino stene (vrednost v mm)

4.3.1.4 Ostale analize

Poleg zgoraj omenjenih analiz, ki se najpogosteje uporabljajo za polimerne izdelke, obstaja tudi analiza oblike volumskih napak, s katero se pri napakah lahko izmerita kompaktnost in sferičnost.

Če je treba analizirati nekaj, kar ni zajeto v zgoraj omenjenih funkcijah, lahko izberete možnost *user-defined check,* kjer natančno določite, kaj želite preveriti.

4.3.2 Analiza na prerezih

Analiza poroznosti na prerezih v programskem paketu GOM Volume Inspect omogoča vpogled v vse velikosti, ki jih določa standard P202, in sicer [4]:

- razdaljo med sosednjimi poroznostmi,
- število poroznosti,
- odstotek poroznosti na referenčni površini,
- dolžino poroznosti (enakovreden premer ali največji Feretov premer).

Poleg njih je možno izmeriti tudi površino vsake poroznosti.

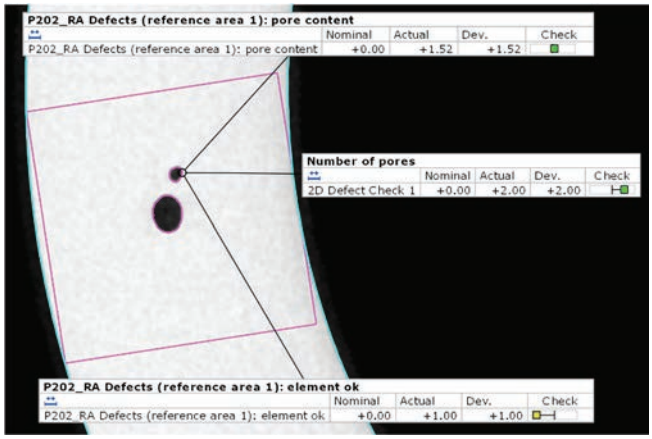
Želeno analizo v programski opremi neposredno definiramo s ključem P202; tako na primer ključ VDG P202-%15/ØF3 določa, da delež poroznosti na dogovorjeni referenčni površini ne sme presegati 15 %, ekvivalentni premer poroznosti pa 3 mm. Zaradi enostavnosti bo ta ključ uporabljen v naslednjih poglavjih na slikah, ki prikazujejo rezultate. Vse velikosti je mogoče izmeriti na referenčnih površinah ali na celotnem odseku.

4.3.2.1 Analiza na referenčni površini

Referenčne površine so definirane v primeru, da so določene površine na prerezu bolj obremenjene od preostalega materiala in so običajno v obliki kvadratov (slika 11), v posebnih

Luka KURTALJ[1], Josip KOS[1], Nenad DRVAR[1], Tomislav HERCIGONJA[1], Matic VOGRIN[2], Mario ŠINKO[2], Aljaž ŠUMLAJ[2]
[1]Topomatika d.o.o.
[2]MARSi GROUP d.o.o.

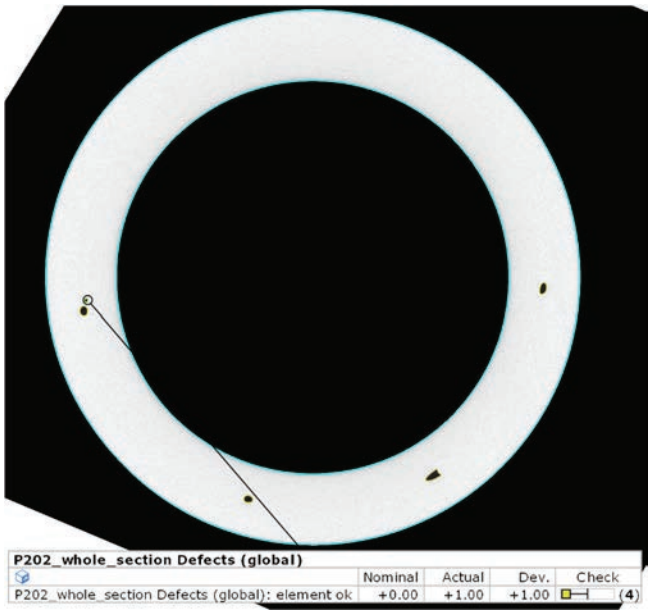
primerih pa v obliki pravokotnikov, trikotnikov ali krogov. Programski paket GOM Volume Inspect podpira izdelavo vseh omenjenih oblik referenčnih površin.



Slika 12: Analiza P202 na referenčni površini

4.3.2.2 Analiza na celotnem prerezu

Če je celoten prerez nosilni element, je možno analizo opraviti na celotnem prerezu (slika 12). V tem primeru je rezultat analize le »element ok«, ki prikazuje vrednost 1, če je 2D element znotraj toleranc, ali vrednost 0, če vsaj ena kontrola ni znotraj toleranc.

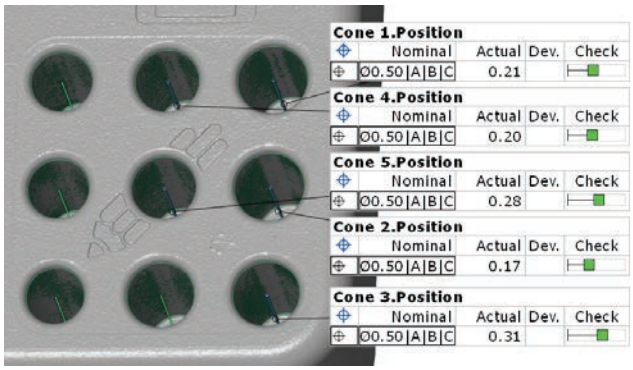


Slika 13: Analiza P202 na celotnem prerezu

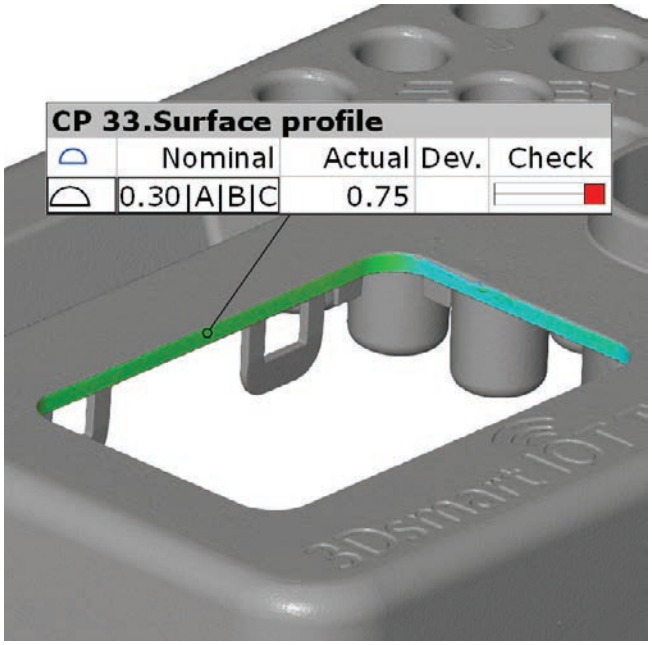
4.4 Analiza GD&T

Glede na to, da je s CT-jem možno digitalizirati celotno geometrijo izdelka, se lahko analiza GD&T izvede tudi na očem nevidnih površinah.

V programskem paketu GOM Volume Inspect je možno izmeriti tolerance oblike v skladu z mednarodnima standardoma ISO 1101 in ASME Y14.5M, kot sta ravnost ali okroglost (slika 14).



Slika 14: Meritve optično nedostopnih površin, pridobljene s CT skeniranjem [5]



Slika 15. Kontrola profila površine (angl. *surface profile*)

Luka KURTALJ[1], Josip KOS[1], Nenad DRVAR[1], Tomislav HERCIGONJA[1], Matic VOGRIN[2], Mario ŠINKO[2], Aljaž ŠUMLAJ[2]
[1]Topomatika d.o.o.
[2]MARSi GROUP d.o.o.

5 SKLEP

Zaradi enostavne uporabe in preglednosti rezultatov meritev sklepamo, da lahko merjenje z napravami CT uvedemo varno in enostavno.

V procesih kontrole kakovosti lahko uporabite rezultate za več stopenj proizvodnega procesa, kot so:

- razvoj in spremljanje 3D natisnjenih orodnih vložkov s hladilnimi kanali, ker drugače ni mogoče preveriti prehodnosti kanalov,
- meritve lastnosti napak, kot sta lunker in debelina stene,
- meritve dimenzij in napak z enim skeniranjem.

To nam zagotavlja veliko krajši čas za izdelavo kakovostnega izdelka.

Tehnologija CT ponuja velike prednosti pred drugimi merilnimi tehnologijami, saj:

- so možne meritve brez uničenja končnih izdelkov, kar ohranja njihovo polno funkcionalnost in vrednost,
- so možne meritve brez potrebe po pršenju prozornih in visoko sijajnih površin,
- lahko merimo več vzorcev hkrati, če le-ti ustrezajo merilni prostornini.

Slika 16: Merski CT ZEISS METROTOM 6 Scout [3]

Slika 17: Merski CT METROTOM 6 Scout v laboratoriju Topomatika

Viri:

[1] S. Erban: *3D natisnjeno pametno mehatronsko orodje za polimerne materiale*.
[2] M. Vogrin, S. Erban: *Razvoj izdelka z integriranim senzorjem s tehnologijo 3D tiska*, IRT Forum 2022.
[3] ZISS [splet]. Dosegljivo: www.zeiss.com, [28.4.2023].
[4] *BDG Reference Sheet P202*, BDG, Hansaallee 203, 40549 Düsseldorf.
[5] L. Kurtalj, J. Kos, N. Drvar, T. Hercigonja: *CT skeniranje za mjerenje i analizu defekata plastičnih proizvoda*, IRT Forum 2022.
[6] J. Kos, N. Drvar, P. Oković: *Računalna tomografija (CT) za nedestruktivno dimenzionalno ispitivanje proizvoda*, IRT Forum 2021.
[7] GOM Metrology [splet]. Dosegljivo: www.gom.com. [12.04.2023].

ANALIZA POROZNOSTI POLIMERNIH PROIZVODOV NA PREREZIH IN VOLUMNU Z UPORABO RAČUNALNIŠKE TOMOGRAFIJE

Luka KURTALJ[1], Josip KOS[1], Nenad DRVAR[1], Tomislav HERCIGONJA[1], Matic VOGRIN[2], Mario ŠINKO[2], Aljaž ŠUMLAJ[2]
[1]Topomatika d.o.o.
[2]MARSi GROUP d.o.o.

AVTOMATIZIRANO 3D SKENIRANJE PRI PROCESU BRIZGANJA PLASTIKE

Matic VOGRIN[1], Aljaž ŠUMLAJ[1], Mario ŠINKO[1], Luka LUKAČIĆ[2], Josip KOS[2], Nenad DRVAR[2], Tomislav HERCIGONJA[2]
[1]MARSi GROUP d.o.o.,
[2]TOPOMATIKA d.o.o.

IZVLEČEK

Povpraševanje po izdelkih iz plastičnih mas in orodjarskih storitvah je v nenehni rasti, zato imajo podjetja priložnost doseči konkurenčno prednost in velike možnosti nadaljnjega razvoja z uporabo novejših tehnologij. Skrajševanje ciklov brizganja je pri brizganju termoplastičnih izdelkov ključnega pomena, saj ima hlajenje orodja neposreden vpliv na kakovost izdelkov. S pomočjo novejših tehnologij, kot npr. s 3D tiskom kovin, lahko izdelamo trodimenzionalne hladilne sisteme, ki bistveno izboljšajo postopek hlajenja in kakovost izdelka ter zmanjšajo proizvodne stroške izdelka do 70 %. V članku bo predstavljen primer kompleksne geometrije oblikovnih delov orodja za izdelavo plastičnega večnamenskega pisarniškega organizatorja, pri katerem smo z uporabo aditivne tehnologije »neposrednega laserskega taljenja kovin« (nem. Direkt Metall Laser Schmelzen) – DMLS izdelali optimalne oblikovne dele orodja, ki nam zagotavljajo dimenzijsko natančnost izdelka. Slednjo preverjamo s postopkom 3D skeniranja na avtomatiziranem merilnem stroju GOM ScanCobot. V nadaljevanju članka bosta predstavljeni kontrola prvih kosov brizganja za povratno informacijo proizvodnji pri nastavljanju stroja ter kontrola prvih kosov za odobritev procesa s pomočjo 3D skeniranja. Članek bo zajemal še konstruiranje vpenjalne priprave za serijske meritve, izdelavo programa in enostavno serijsko 3D skeniranje za kontrolo proizvodnega procesa.

1 UVOD

Zahteve za oblikovanje izdelkov postajajo vedno bolj kompleksne, pri tem pa se povečuje število razpoložljivih materialov. Polimerni materiali v mnogih aplikacijah še vedno prevladujejo pri nadomeščanju drugih proizvodnih materialov. Injekcijsko brizganje plastike je tehnološki postopek, ki prevladuje pri izdelavi izdelkov iz polimernih materialov.

V sodobnih proizvodnih procesih oziroma tovarnah prihodnosti predstavljajo ključni člen napredna in pametna mehatronska orodja, kompleksni sistemi s funkcijami spremljanja procesnih parametrov, regulacije delovanja ter komunikacije s stroji in drugimi eksternimi napravami. Pametni stroji in avtomatizirane tovarne sami po sebi niso dovolj učinkoviti, saj so brez t. i. pametnega orodja zgolj delno uporabni.

V nadaljevanju bomo predstavili razvoj in izdelavo sodobnih orodij za brizganje plastičnih izdelkov. Gre za zelo drag in visoko zahteven tehnološki postopek, saj se za razvoj uporablja zahtevna programska oprema za računalniško podprto inženirstvo CAE, ki temelji na metodi končnih elementov z namenom analiziranja in simuliranja procesa brizganja ob predpisanih pogojih.

Slika 1: Večnamenski pisarniški organizator

Predstavili bomo postopek razvoja in oblikovanja plastičnega izdelka, »večnamenskega pisarniškega organizatorja« (slika 1), in njegovega pametnega mehatronskega orodja.

Matic VOGRIN[1], Aljaž ŠUMLAJ[1], Mario ŠINKO[1], Luka LUKAČIĆ[2], Josip KOS[2], Nenad DRVAR[2], Tomislav HERCIGONJA[2]
[1]MARSi GROUP d.o.o.,
[2]TOPOMATIKA d.o.o.

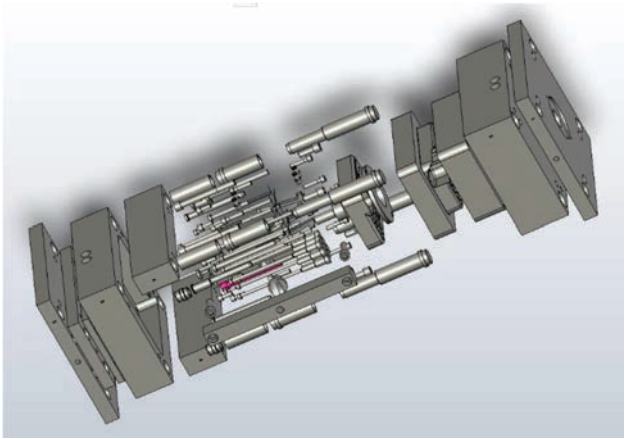
2 RAZVOJ IZDELKA IN ORODJA

Za razvoj sta bili uporabljeni programska oprema računalniško podprtega konstruiranja CAD in simulacija brizganja *Moldflow*, sledila pa je izdelava orodja, tj. orodnih delov s pomočjo 3D DMLS tiska kovin ter konvencionalnih postopkov v računalniško podprti proizvodnji CAM. Z uporabo sodobnih računalniških tehnologij smo pri razvoju pametnega orodja zagotovili nemoten razvoj, kar je pripomoglo k zmanjšanju stroškov in odlični kakovosti, ki smo jo preverili s pomočjo 3D skeniranja.

Razvoj izdelka je zajemal naslednje aktivnosti:
- izbor materiala,
- določanje mehanskih in topl. lastnosti izdelka,
- razvoj in določanje oblike izdelka.

Končni obliki izdelka je sledil razvoj pametnega orodja, ki je zajemal naslednje aktivnosti:
- določanje skrčkov,
- določanje oblike hladilnih kanalov,
- določanje senzorike,
- izdelavo simulacije procesa brizganja,
- izdelavo pametnega orodja.

Najbolj pomembni elementi orodja (slika 2) so njegovi oblikovni deli, ki ob oblikovanju izdelka skupaj z drugimi elementi orodja opravljajo vse dodatne funkcije, kot so zapolnjevanje, temperiranje, izmetavanje, vodenje in zaklepanje. Razvejanost hladilnih kanalov in njihovo sledenje konturi izdelka ter prilagajanje odvoda toplote koncentracijam debelin izdelka kažejo na celovitost problematike.

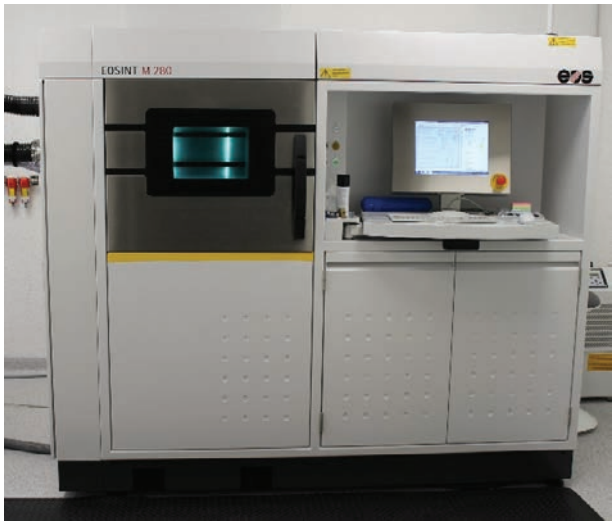


Slika 2: Eksplozijska risba orodja

Oblikovni deli orodij nam v procesu izdelave temperirnih kanalov z uporabo klasične tehnologije ne morejo zagotavljati optimalnega temperiranja. Zaradi vedno kompleksnejših izdelkov in njihovih zahtev se v orodjarski industriji vse več uporablja tudi t. i. dodajalna ali aditivna tehnologija. Po omenjenih tehnologijah se v orodjarstvu posega predvsem pri izdelavi ali optimizaciji oblikovnih delov orodij s konformnimi hladilnimi sistemi, ki sledijo obliki izdelka.

Slika 3: Vzorčni konformni hladilni sistem

Najkakovostnejša in najbolj uporabljena aditivna tehnologija za izdelavo oblikovnih delov orodij je tehnologija laserskega spajanja slojev praškastega materiala (ang. *Laser Powder Bed Fusion*) – LPBF, znana pod različnimi komercialnimi imeni, kot so DMLS®, SLM®, DMLM® ipd.



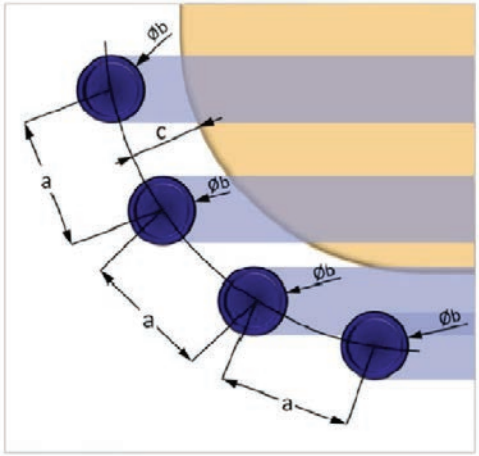
Slika 4: Stroj EOS M280

Matic VOGRIN[1], Aljaž ŠUMLAJ[1], Mario ŠINKO[1], Luka LUKAČIĆ[2], Josip KOS[2], Nenad DRVAR[2], Tomislav HERCIGONJA[2]
[1]MARSi GROUP d.o.o.,
[2]TOPOMATIKA d.o.o.

Ob vseh oblikovnih in funkcionalnih zahtevah, ki jih postavljamo za oblikovanje vložkov, pa ne smemo pozabiti na trdnostne kriterije orodnega jekla. Orodni prašni material, tj. jeklo *Maraging MS1* (W.Nr. 1.2709), ki smo ga uporabili za 3D tisk, je sposoben prenašati vse zahtevane obremenitve [1, 2].

Priprava oblikovnih delov orodja je od raziskovalne skupine zahtevala organizacijo delov za postopek 3D tiskanja ob upoštevanju vseh smernic zaradi kompleksnosti konformnih hladilnih kanalov ter velikosti, ki je zavzemala skoraj celotni prostor v procesni komori.

Nadzor temperature orodja in hlajenje taline med postopkom injekcijskega brizganja sta ključnega pomena. Pri razvoju konformnega hladilnega sistema za oblikovne dele smo uporabili smernice in priporočila strokovnjaka iz podjetja EOS GmbH na področju 3D DMLS tiska, S. Mayerja (slika 4) [2],



Debelina stene brizganega izdelka [mm]	Premer luknje [mm]	Centrična razdalja med luknjami	Razdalja med središčem lukenj in formo orodja
	b	a	c
0 - 2	4 - 8	2 - 3 x b	1.5 - 2 x b
2 - 4	8 - 12	2 - 3 x b	1.5 - 2 x b
4 - 6	12 - 14	2 - 3 x b	1.5 - 2 x b

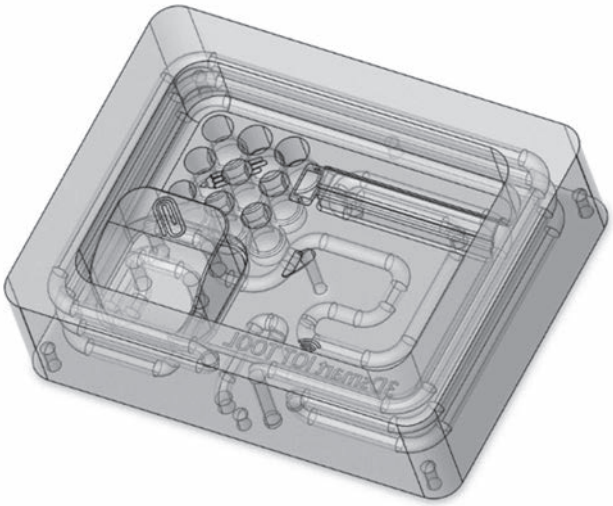
Slika 5: Konstrukcijska priporočila pri oblikovanju konformnega hladilnega sistema [2]

poleg tega pa smo se zanašali na večletne izkušnje optimizacije oblikovnih delov orodja s konformnimi hladilnimi kanali. Omenjena priporočila se v osnovi ne razlikujejo od predpisanih pravil konstruiranja standardnih hladilnih kanalov, ki se izdelujejo s konvencionalnimi tehnologijami odvzemanja. Za doseganje optimalnih razmer hlajenja kalupa orodja je potrebno izbrati optimalen premer hladilnega kanala. Če je oblikovni vložek pravilno zasnovan, bo stopnja kristalizacije izdelka iz polipropilena (PP) med hlajenjem v orodju optimalna.

Za pripravo modelov CAD oblikovnih delov orodja smo pri načrtovanju upoštevali vsa priporočila izdelave. Z uporabo programske opreme CAD smo upoštevali značilnosti materiala za 3D tiskane dele. Posledično je s tem mogoče ekonomično izdelati definirane ter visokokakovostne oblikovne dele. Pri tem smo definirali t. i. profile lastnosti oblikovnih delov za orodjarsko aplikacijo.

Pri pripravi modelov CAD oblikovnih delov orodja za 3D tisk smo dodali in upoštevali strukturne elemente:

- podporno strukturo za pritrditev vložka na osnovno ploščo (5 mm),
- oblikovanje previsnih delov konformnih hladilnih kanalov,
- dodatek za strojno in toplotno obdelavo (0,5 mm).

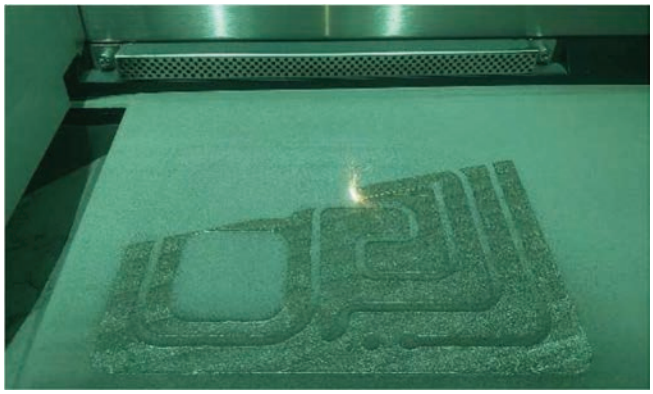


Slika 6: Konformno hlajen oblikovni del orodja – brizgalna stran

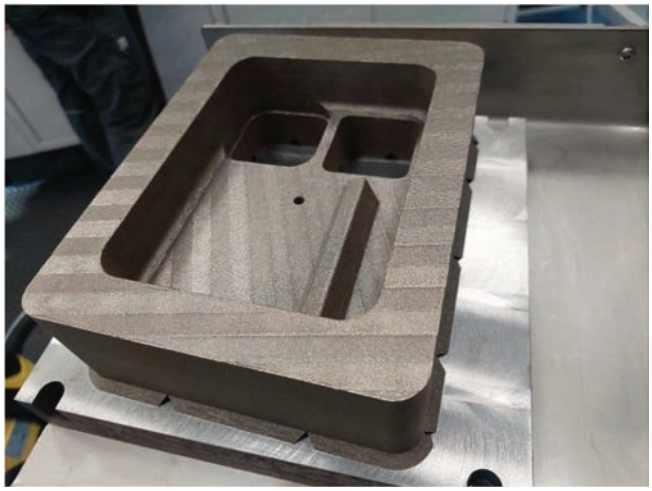
Matic VOGRIN[1], Aljaž ŠUMLAJ[1], Mario ŠINKO[1], Luka LUKAČIĆ[2], Josip KOS[2], Nenad DRVAR[2], Tomislav HERCIGONJA[2]
[1]MARSi GROUP d.o.o.,
[2]TOPOMATIKA d.o.o.

2 IZDELAVA ORODJA IN BRIZGANJE

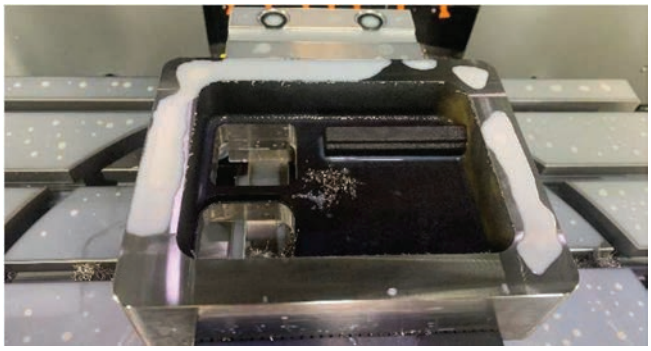
V nadaljevanju je sledilo lasersko spajanje slojev praškastega materiala – LPBF s postopkom tehnologije DMLS. Prvi korak pri procesu 3D DMLS tiska je bila priprava modela STL. Sledila sta priprava stroja EOS M280 in postopek tiska.


Slika 7: Postopek 3D DMLS tiska

Po končanem 3D DMLS tisku smo hibridni oblikovni del odstranili z delovne površine stroja, ga očistili s suhim zrakom in izdelali merilni protokol. Natisnjen oblikovni del smo nato dodatno starali po predpisanih standardih, tj. 6 ur pri temperaturi 490 °C. Z opisanim postopkom toplotne obdelave smo dosegli predpisano trdoto oblikovnega dela, 54 -2 HRc.


Slika 8: Oblikovni del po postopku tiska DMLS

Po 3D tisku oblikovnega dela orodja s konformnimi kanali je sledila naknadna obdelava na rezkalnem stroju CNC. 3D tiskanje oblikovnih vložkov orodja s konformnimi hladilnimi kanali s postopkom DMLS v orodju pogojuje dodatno naknadno strojno obdelavo z odvzemanjem materiala. Na površini orodja je potrebna določena gladkost površine zaradi razlivanja materiala, ki ga brizgamo. Ker tovrstne površine s trenutno tehnologijo 3D tiska ne moremo izdelati, so se oblikovni deli obdelali s konvencionalnimi tehnologijami.

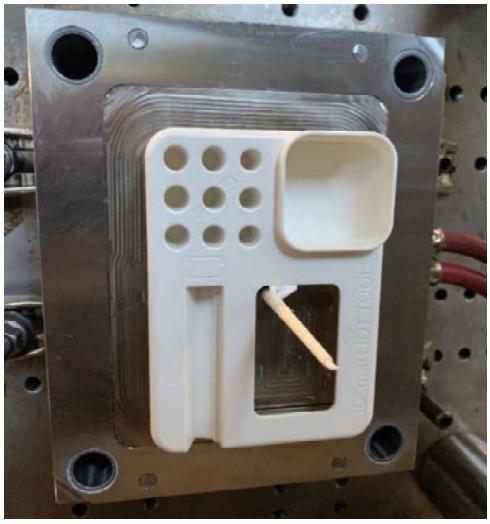

Slika 9: Naknadna strojna obdelava CNC

Sledila je montaža orodja, poseben postopek zaključka strojne obdelave, kjer so se vsi elementi pametnega mehatronskega orodja sestavili v celoto.

Slika 10: Vstavljen oblikovni del

Preizkušanje pametnega mehatronskega orodja in izdelava izdelkov sta se izvedla na brizgalnem stroju Krauss Maffei KM125. Za brizganje izdelkov je bil uporabljen material ABS.

Matic VOGRIN[1], Aljaž ŠUMLAJ[1], Mario ŠINKO[1], Luka LUKAČIĆ[2], Josip KOS[2], Nenad DRVAR[2], Tomislav HERCIGONJA[2]
[1]MARSi GROUP d.o.o.,
[2]TOPOMATIKA d.o.o.



Slika 11: Izdelek po procesu brizganja

Preizkus je na stroju za brizganje plastike izvajal preizkuševalec. V okviru testiranja orodja so se ugotavljale nastavitve stroja, parametri procesa brizganja, merska natančnost izdelka, ustreznost izdelka, funkcionalnost in varnost.

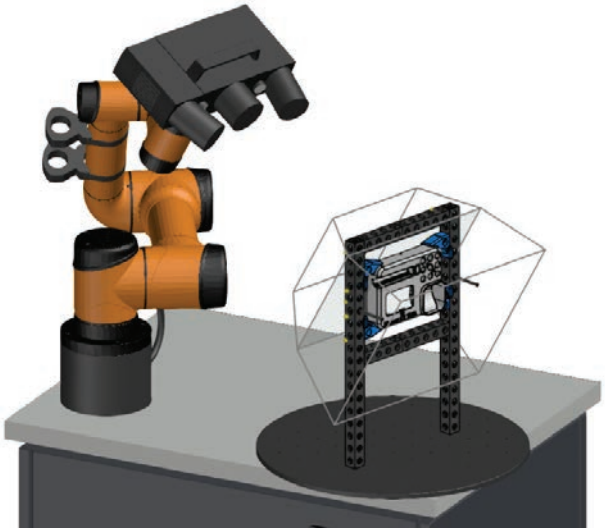
3 PREVERJANJE KAKOVOSTI IZDELKA S POSTOPKOM 3D SKENIRANJA

Za raziskavo merske natančnosti izdelkov smo uporabili metodo merjenja s 3D skeniranjem izdelka, ki deluje po principu triangulacije in interferometrije svetlobe.

3.1 Programiranje merilne celice GOM

Programiranje merilnih celic poteka v virtualni merilni sobi (angl. *Virtual Measuring Room* – VMR), centralni krmilni programski opremi za izdelavo merilnih programov.

Kadar govorimo o programiranju 3D skeniranja, ne govorimo o klasičnem vnosu kode, kot npr. na CNC strojih, temveč o interaktivnem vmesniku. VMR je digitalna kopija dejanske celice, ki jo sestavljajo 3D skener ATOS, robot in rotacijska miza. V VMR programskega paketa GOM Inspect je mogoče na enostaven način, tj. s funkcijo povleci/spusti, vstaviti modele CAD izdelkov, naprav in celo predhodno generirane merilne protokole.



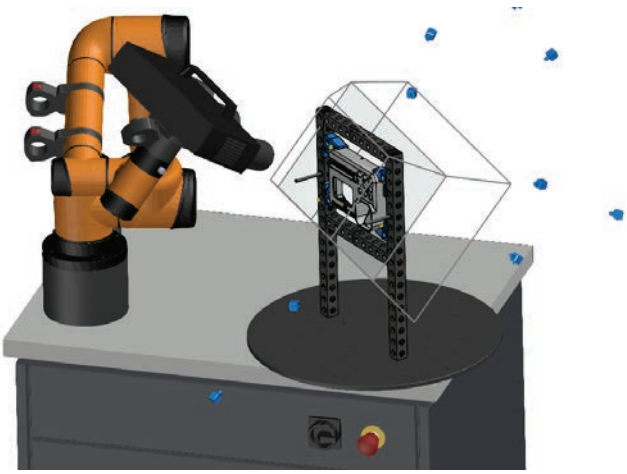
Slika 12: VMR GOM ScanCobot in ATOS Q

Obenem se lahko programiranje merilnih položajev izvede samodejno. Avtomatsko programiranje merilne celice zahteva model CAD in na njem ustvarjene elemente, ki jih je potrebno izmeriti.

Funkcija *Smart Tech* glede na ustvarjene elemente samodejno določi in optimizira poglede, iz katerih je izdelek treba skenirati, da lahko pregledamo celoten objekt.

3.2 Avtomatizirana digitalizacija

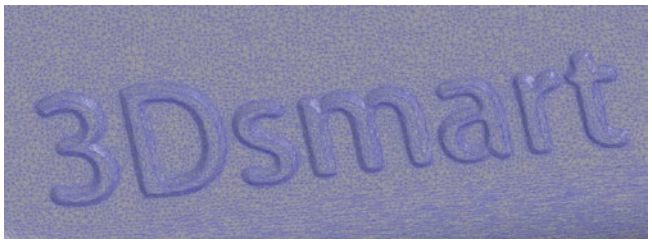
Po samodejnem generiranju pozicij z zagonom merilne serije (slika 13) 3D skener ATOS Q prične z digitalizacijo. Med postopkom 3D skeniranja sistem izračuna 3D koordinate vseh 12 milijonov slikovnih pik v kameri.



Slika 13: Generiranje pozicij s pomočjo funkcije *Smart Tech*

Matic VOGRIN[1], Aljaž ŠUMLAJ[1], Mario ŠINKO[1], Luka LUKAČIĆ[2], Josip KOS[2], Nenad DRVAR[2], Tomislav HERCIGONJA[2]
[1]MARSi GROUP d.o.o.,
[2]TOPOMATIKA d.o.o.

Točke, ki so pridobljene s postopkom poligonizacije, so združene v trikotnike minimalnih površin in na ta način zelo podrobno opisujejo geometrijo merjenega produkta (slika 14). Geometrija injekcijsko brizganega izdelka, ki je prikazan na sliki 11, je opredeljena s 1.950.000 točkami. V primerjavi s tradicionalnimi koordinatnimi merilnimi napravami omenjena tehnologija zagotavlja veliko večjo količino informacij v krajšem času.



Slika 14: Podroben prikaz rezultatov 3D skeniranja

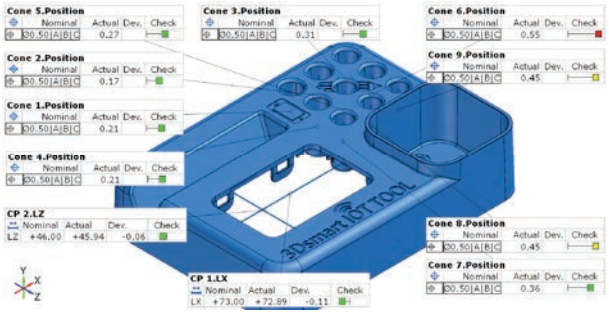
3.3 Pregled in mersko poročilo

GOM Inspect je meroslovna programska oprema za podrobno vrednotenje 3D podatkov. Uporablja se lahko tako za enostavne kot za zelo zapletene merilne naloge (slika 15). Programska oprema ima implementirane funkcije za:

- 3D skeniranje,
- urejanje 3D podatkov,
- uvoz modelov CAD,
- nominalno-dejansko primerjavo,
- analizo dimenzij,
- izračun GD&T,
- analizo trendov,
- virtualno montažo itd.

Slika 15: Programska oprema GOM Inspect VMR za programiranje robota in obdelavo – virtualna merilna celica GOM ScanCobot

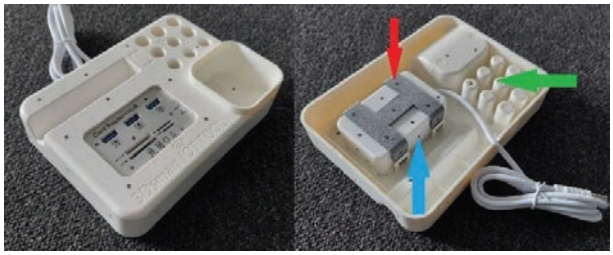
GOM Inspect je parametrizirana programska oprema, zato ni treba ponavljati istih korakov za vsak merjeni izdelek; temu so namenjene merilne predloge. Merilna predloga si zapomni vse predhodno opravljene korake, za novo-izmerjeni izdelek pa samodejno izračuna osnovno in glavno poravnavo, vse dimenzijske meritve in meritve GD&T ter tabele z vrednostmi in ustvari poročilo o meritvah.



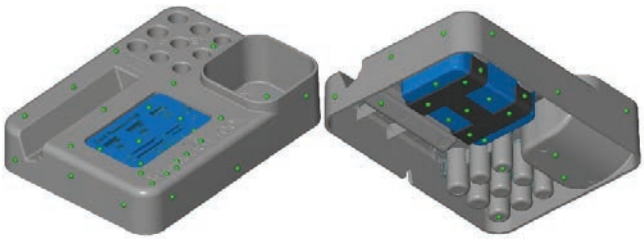
Slika 16: Podrobnosti merilnega poročila

3.4 Virtualna montaža – *Digital Assembly*

Poleg analize posameznih izdelkov je v programskem paketu GOM Inspect možna tudi analiza več izdelkov, tj. sklopov (slika 17).


Slika 17: Sestavljen sklop iz treh delov

Za analizo sklopa je izdelek treba sestaviti ter ga pripraviti tako, da nanj prilepimo referenčne točke, ki jih bomo uporabili za pretvorbo posamezne merilne serije. Kasneje vsak del posamezno digitaliziramo in pretvorimo v referenčno merilno serijo (slika 18).


Slika 18: Predstavitev referenčne merilne serije in rezultatov digitalizacije sklopa

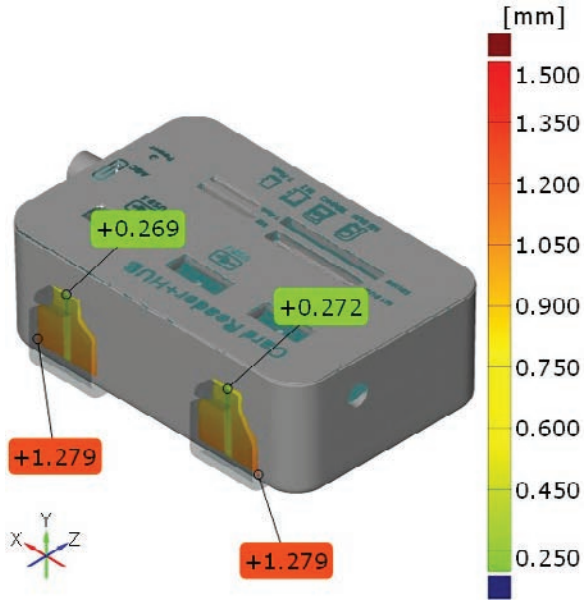
Matic VOGRIN[1], Aljaž ŠUMLAJ[1], Mario ŠINKO[1], Luka LUKAČIĆ[2], Josip KOS[2], Nenad DRVAR[2], Tomislav HERCIGONJA[2]
[1]MARSi GROUP d.o.o.,
[2]TOPOMATIKA d.o.o.

Analiza sklopov nam omogoča vpogled v sestavljeno stanje izdelka. Prednost analize sklopov je v tem, da vseh sestavnih delov ni potrebno izdelati na enem mestu. Ta metoda analize zagotavlja izjemno koristne informacije, saj se sestavni deli pogosto proizvajajo na več različnih lokacijah.

V kolikor so digitalizirani vsi posamezni deli sklopa, lahko analiziramo sestavljeni izdelek, četudi vsi deli niso izdelani pod isto streho. Na ta način je možno nadzorovati funkcionalnost izdelka, kljub temu da nimamo vseh potrebnih delov na enem mestu. S kontrolo sklopov je mogoče znižati del stroškov v distribucijski verigi in odpraviti reklamacije funkcionalno neustreznih izdelkov.

Pri sklopih se najpogosteje preverja:
- kako se prilegajo različni deli iz proizvodnje,
- ali je mogoče sestaviti posamezne dele,
- kako dobro se posamezni proizvedeni del prilega modelu CAD.

Med konvencionalno analizo sklopov se deli namestijo na posebej zasnovano vpenjalo in nato izmerijo. GOM Inspect digitalno sestavi vaše dele – katerikoli del iz proizvodnje lahko primerjate z modelom CAD, kot tudi z drugimi dejanskimi deli. To nam daje možnost, da sestavimo tudi dele, proizvedene v drugih proizvodnih obratih, ali dele drugih dobaviteljev.

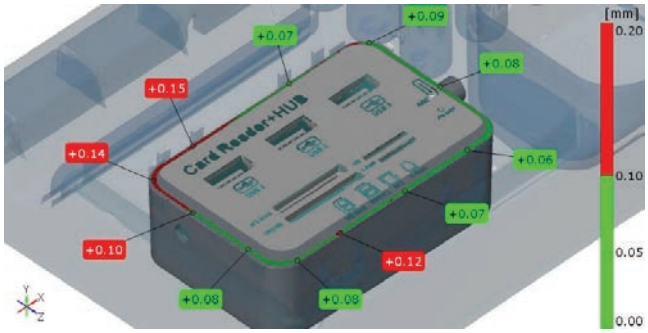


Slika 19: Analiza oddaljenosti površine v barvi

Digitalno sestavljanje izboljša vaš postopek montaže na trajnostni način, izzivi ali morebitne težave pa postanejo vidni že v zgodnji fazi. Montažo lahko prav tako optimiziramo na podlagi izmerjenih dimenzij oddaljenosti ali razdalje kontaktnih površin (slika 19).

Ko imamo v projektu digitalizirane vse sestavne dele, ne glede na to, da gre za digitalne kopije realnih delov, mu lahko naknadno dodamo dimenzije brez ponovnega merjenja.

Analiza oddaljenosti površine deluje tako, da izračuna razdaljo med dvema nasprotnima ali dotikajočima se površinama na barvnem zemljevidu (slika 20).

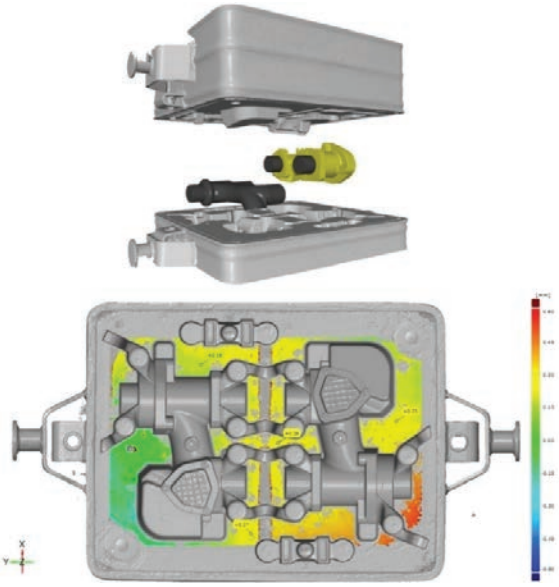


Slika 20: Oddaljenost površin GO-NOGO

Zgornja slika s pomočjo barvne karte prikazuje rezultat merjenja razdalje dotičnih površin med čitalnikom kartic in ohišjem, v katerega je vgrajen. Barvna karta je nastavljena na mejo 0,10 mm. Če je razdalja med dotičnimi površinami večja od definirane meje, programska oprema prikaže rdečo barvo.

Prikazano metodo in rezultate analize je mogoče uporabiti tudi pri sestavnih orodjih za injekcijsko brizganje plastike, visokotlačno litje ali orodjih za preoblikovanje pločevine, kjer lahko preverimo, ali je tesnjenje orodja pravilno, oziroma ali je posamezni del orodja na ustreznem mestu (slika 21).

Matic VOGRIN[1], Aljaž ŠUMLAJ[1], Mario ŠINKO[1], Luka LUKAČIĆ[2], Josip KOS[2], Nenad DRVAR[2], Tomislav HERCIGONJA[2]
[1]MARSi GROUP d.o.o.,
[2]TOPOMATIKA d.o.o.



Slika 21: Analiza tesnjenja orodja za litje

4 SKLEP

Ena najnaprednejših rešitev optimizacije hlajenja oblikovnih delov orodja so t. i. konformni hladilni sistemi, ki nam v kombinaciji s tehnologijo L-PBF omogočajo izdelavo izjemno kompleksnih trodimenzionalnih konformnih kanalov, katerih s konvencionalnimi tehnologijami ni možno izdelati. Tovrstni kanali se najpogosteje uporabljajo za optimizacijo oblikovnih delov orodij za brizganje ter litje lahkih kovin, pri katerih optimalna izdelava hladilnih kanalov s klasično tehnologijo vrtanja zaradi oblike ni možna.

Po testiranju orodja in izdelavi izdelkov s procesom brizganja se je izvedla validacija izdelka v realnem okolju pametnega mehatronskega orodja. Po testiranju orodja in izdelavi ustreznega izdelka je razvojno-raziskovalna skupina izvedla validacijo po vnaprej pripravljenem protokolu za končno validacijo orodij za brizganje plastike. Glavni procesi, ki so bili podvrženi postopku validacije za orodje, so bili:

- delovanje orodja na stroju,
- kontrola parametrov brizganja za izdelek,
- kontrola izdelka po brizganju,
- kontrola senzorskih sistemov,
- kontrola zajemanja podatkov.

Po postopku skeniranja smo ugotovili, da izdelek odstopa od modela CAD, tj. razvitega izdelka v okviru projekta. Primerjana je bila razdalja od prijemališča normale na površini modela CAD do presečišča normale z mrežo. Medtem ko negativna vrednost pomeni, da je mreža, ki opisuje površino merjenega kosa, nižja, pozitivna vrednost kaže, da je mreža višja od teoretičnega modela CAD. Iz slike 22 je razvidno, da se teoretični model CAD in dejanska mreža ne ujemata popolnoma, kar je za pričakovati, saj je v praksi nemogoče izdelati kos, ki bi bil popolnoma identičen teoretičnemu modelu CAD.

Slika 22: GOM ScanCobot – sistem za avtomatizirano 3D skeniranje v podjetju MARSI Group

Ne glede na omenjeno odstopanje je bil izdelek izdelan v zahtevanem tolerančnem polju in popolnoma funkcionalen. Za doseganje dimenzijsko ustreznih izdelkov je ključen optimalni nadzor temperature orodja. Pri ciklu brizganja je najpomembnejši čas hlajenja, saj zajema približno 2/3 celotnega cikla. Po našem mnenju prikazanega izdelka brez uporabe konformno hlajenih oblikovnih delov v želeni kvaliteti ne bi mogli izdelati.

Oblikovna meritev in primerjava, ki omogočata natančno ocenitev vseh bistvenih odstopanj od želene oblike, sta zelo uporabni metodi, s pomočjo katerih lahko učinkovito predlagamo spremembe orodja in omogočimo izdelavo dobrih kosov.

Viri:

[1] EOS GmbH – Electro Optical Systems [splet]. Dosegljivo: https://www.eos.info/en. [24. 4. 2023].
[2] S. Mayer. (2009). *Optimized mould temperature control procedure using DMLS*. EOS Whitepaper.
[3] GOM Metrology [splet]. Dosegljivo: www.gom.com. [02.05.2023].
[4] Topomatika [splet]. Dosegljivo: www.topomatika.hr. [02.05.2023].

PROCES INOVIRANJA IN RAZISKAV V PROIZVODNEM PODJETJU AVTOMOBILSKE INDUSTRIJE

Andrej WAGNER
HELLA SATURNUS SLOVENIJA d.o.o.

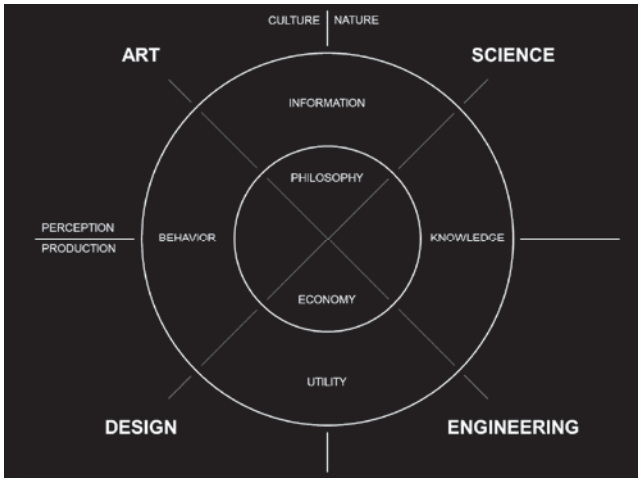
IZVLEČEK

V članku je predstavljen proces inovacij in raziskav v proizvodnem podjetju avtomobilske industrije. Predstavljen bo holističen proces inovacij in način prenosa znanja v serijski razvoj oziroma v serijski proizvodnji proces. Prikazan bo postopek zajema kupčevih zahtev (stilistične zahteve, sistemske zahteve ter funkcijske zahteve) ter vključevanje raziskovane sfere. Predstavljen bo tudi proces odločanja med posameznimi inovacijskimi fazami, ter vključevanje ostalih deležnikov v proces inovacij.

1 UVOD

V podjetju, ki se ukvarja z razvojem in proizvodnjo svetlobne opreme je ves čas prisoten pritisk s strani avtomobilskih proizvajalcev na razvoj in proizvodnjo čim lažjih in inovativnih izdelkov. Na strani proizvajalca pa je strmenje v smeri stabilne proizvodnje in izdelkov, ki so narejeni po avtomobilskih standardih. Za zagotavljanje zrelosti novih izdelkov in tehnologij je v deluje v podjetju HELLA Saturnus Slovenija d.o.o. oddelek za predrazvoj in raziskave. Oddelek mora delovati dolgoročno z vizijami in tehnologijami, ki se bodo uvajale v proizvodnjo čez 5 do 10 let. Tak način dela omogoča konstanto iskanje novih tehnologij in izdelkov ter njihovo testiranje za primernost proizvodnje. Na drugi strani omogoča interni predrazvoj zgodnejše sodelavanje z avtomobilskimi proizvajalci pri njihovih inernih raziskovanlih projektih, ker rezultira v zgodnejši "pripravi" dobavitelja na prihajajoče zahteve kupcev.
V Forviji se delo na predrazvojnih temah izvaja v zato določenih oddelkih. Le-ti delajo po definiranem procesu, kar omogoča sistematičen pristop in postavitev dolgoročnih ciljev in s tem tudi strategije podjetja.

Pri iskanju tehničnih rešitev, ki so večinoma pogojene z obliko in stilističnim podpisom vozila, zato je potrebno v procesu iskanja inovacij posvetiti tudi razumevanju funkcije in oblike izdelka (Slika 1).



Slika 1: Krog kreativnosti

2 PROCES RAZISKAV

Proces raziskav obsega dve področji dela (Slika 2):

- »Forsight« - dolgoročno spremljanje novih tehnologij
- Predrazvoj izdelka/tehnologije

Prvo področje (forsight) omogoča generiranje velikega števila idej na začetku, s področjem predrazvoja izdelka/tehnologije raste zrelost izdelka in se zmanjšuje število primernih idej za vpeljavo v serijo. Skozi projekt raste zrelost izdelka s ciljem, da dobimo zanesljive izdelke/tehnologije in s tem zmanjšujemo tveganje pri vpeljavi novih izdelkov/tehnologij v serijo.

2.1 Forsight faza

Dolgoročno gledanje na prihajajoče tehnologije omogoča pravočasno zaznavanje sprememb oziroma premikov k novi tehnologijam. Faza ima dve področji:

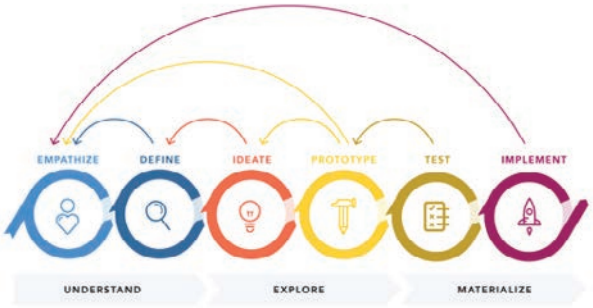
1. Generiranje idej
2. Izvedba mini projektov- »Scoutting« projektov

Slika 2: Proces predrazvoja in raziskav

Z namenom generiranje idej s področja tehnologije je del časa inženirjev posvečen iskanju tehnologij na področju akademske sfere, industrijskih partnerjev, zagonskih podjetij ter spremljanju njihovega razvoja.

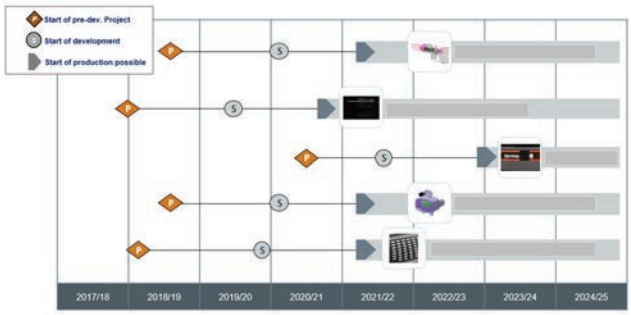
V primeru zanimive tehnologije zaprosijo za sredstva za »scoutting« projekt. S takim majhnim projektom, ki traja od 2-6 mesecev ugotovimo primernost tehnologije za uporabo na področju svetlobne opreme. Ta faza se zaključi z oceno primernosti izdelka/tehnologije za uporabo v avtomobilski svetlobni opremi.

Poleg napredka v tehnologiji je pomemben del tudi vpeljava uporabniških izkušenj oziroma potreb po novih izdelkih ter potreb avtomobilskih proizvajalcev. V ta namen organiziramo delavnice za generiranje idej. Delavnice niso omejene samo na oddelke predrazvoja, ampak vključujejo tudi ostale deležnike v podjetju. S tem želimo zajeti potrebe različnih uporabnikov (tako po spolu, izobrazbi, interesih,…) V delavnicah uporabljamo različne metode za generiranje idej (Design Thinking [1], Method 635, TRIZ, Latheral thinking,...). Delavnice vodijo industrijski oblikovalci, ki pripravijo potrebne vhodne podatke in moderirajo delavnice.



Slika 3: Proces design thinking [1]

Ustreznost idej se ovrednoti in se jih glede na pričakovano zrelost tehnologije [2] uvrsti na tako imenovani »road map« (Slika 4). Določi se začetek izvajanja predrazvojne faze, oceni stroške.



Slika 4: Primer »Rad mapa«

2.2 Predrazvojna faza izdelka/tehnologije

Prva faza (Forsight) nam omogoča kreiranje velikega števila idejo, ki jih predrazvojni team ovrednoti s simulacijami, testi na manjših demonstratorjih. Rezultati teh vrednotenj so osnova za predrazvojno fazo. Ta faza ima dve področji:

1. Konceptualno fazo
2. Fazo izvedljivosti na izdelku

V konceptualni fazi nov izdelek/tehnologijo razvijemo, do stanja, ki omogoča uporabo tehnologije v izdelku. To pomeni, da posamezne nove tehnologije razvijemo in testiramo na nivoju komponente.

Sledi faza izvedljivosti nove tehnologije na izdelku z zahtevami celotnega izdelka (v realnih obremenitvenih pogojih). V tej fazi industrijski oblikovalec tudi določi obliko, ki bo najbolje prikazala prednosti nove tehnologije in hkrati upoštevala oblikovalske smernice avtomobilskih proizvajalcev.

Sledi ovrednotenje rezultatov predrazvoja in odločitev za prenos znanja v serijski razvoj oziroma implementacija tehnologije v serijsko proizvodnjo.

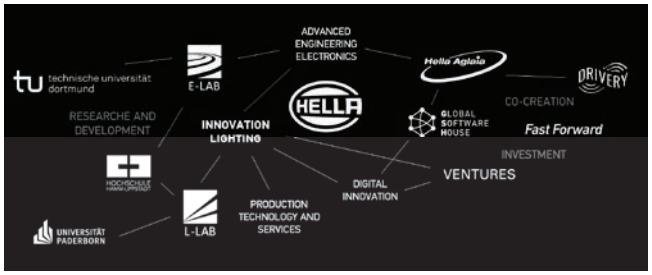
2.3 Faza prenosa znanja

Po končanem predrazvoju izdelka, predrazvojna skupina pripravi navodila, simulacijske postopke, tehnološke postopke za izvedbo izdelka z novo tehnologijo. Določi se tudi pilotni projekt v serijskem razvoju, kjer bo nova tehnologija uporabljena. Določijo se tudi člani predrazvojne skupine, ki podpirajo razvojni tim pri pripravi prve ponudbe. Člani predrazvoja sodelujejo do faze odobritve koncepta.

Ko je prvi izdelek ovrednoten se zberejo vse dodatne izkušnje pri implementaciji tehnologije v prvem serijskem projektu. Skupaj z njim se tehnologija sprosti za razvoj po vseh razvojnih lokacijah podjetja.

3 SODELAVA Z RAZISKOVALNO SFERO

Za uspešnost predrazvojnega dela je poleg usposobljenih in raziskovano usmerjenih ljudi, tudi vpetost v različne raziskovalne sfere oziroma inovativna okolja (Slika 5). HELLA strmi k ustvarjanju kreativnega okolja v samem podjetju, kot tudi s sodelovanje z zunanjimi inštitucijami znanja.



Slika 5: Raziskovalno okolje

3.1 Interno sodelovanje

Predrazvojni oddelki svetlobne opreme so tesno povezani z ostalimi divizijami, kar omogoča izdelavo izdelkov z večjo vertikalno integracijo znanj in bolj inovativne izdelke. Pomemben gradnik inovativnega okolja je tudi sofverska divizija. V okviru te divizije deluje tudi Drivery, ki v Berlinu združuje pod eno strah več zagonskih podjetij (»start-up« podjetij) in jim s svojo infrastrukturo omogoča delo na inovativnih rešitvah avtomobilske industrije.

Podjetje ima tudi oddelek, ki se ukvarja z vlaganjem v start-upe. Za predrazvojne oddelke leta predstavlja dragocen vir informacij o tehnologijah, ki so v začetni fazi raziskav in razvoja.

3.2 Zunanji partnerji

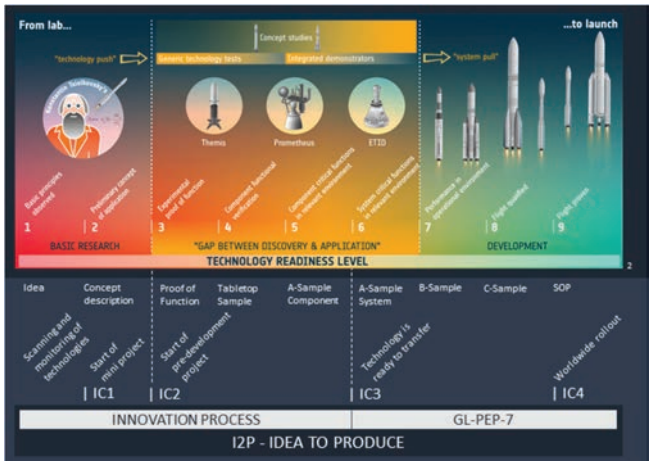
Podjetje dela s široko mrežo raziskovalnih inštitucij tako na raziskovalnih projektih kot na področju podiplomskih tem. Prav tako je aktiven partner pri sofinanciranih projektih s strani držav EU in Evropskih projektih. Poleg dela na projektih, pa sta z dvema univerzama vzpostavljena laboratorija, kjer podiplomski študentje delajo na doktorskih nalogah s področja svetlobe - optike, psihologije (L-LAB) ter elektronike (E-LAB).

4 ODOLČITVENA MATRIKA

V prejšnjih poglavjih je večkrat omenjeno vrednotenje zrelosti izdelka/tehnologije ter odločitvene mejnike za nadaljevanje v naslednjo fazo. Predrazvoj ima štiri mejnike IC1 do IC4 (glej Slika 6).

Slika 6: Mejniki v predrazvojnem procesu

V Forviji poteka vrednotenje zrelosti inovacij izdelka/tehnologije po TRL (Technology readiness Level) lestvici. Zrelost poteka od raziskovalne faze, preko testov novih idej na demonstratorju, do razvoja in testiranja komponente, ki ji sledi testiranje na nivoju sistema. Povezava posameznih faz predrazvoja z TRL lestvico je prikazana na spodnji sliki (Slika 7).



Slika 7: Zrelost tehnologije [1]

Vsako fazo ocenjuje inovacijska komisija (IC Innovation Comittee), ki je sestavljena iz različnih deležnikov. Število Članov se z zrelostjo izdelka/tehnologije veča, ker je potrebno z zrelostjo le-to oceniti z različnih vidikov (tehnični, poslovni, projektni in nabavni vidik).

Inovacijsko komisijo IC1 sestavljata vodji predrazvoja izdelkov in vodja predrazvoja tehnologije. Inovacijska komisija IC2 je sestavljena iz vodij predrazvoja izdelka in tehnologije, vodje program managementa, razvoja in proizvodnje. V tej fazi se namreč ocenjuje tudi zanimanje kupcev za novo tehnologijo in predvidena aplikacija pri kupcih. Oceni se tudi potreba po dodatnih znanjih v razvoju ter morebitna proizvodnja oprema za nove izdelke/tehnologije.

Po končani predrazvojni fazi inovacijska komisija IC3 odloča o prenosu izdelka/tehnologije v serijski razvoj in kasnejšo proizvodnjo. Poleg prej omenjenih članov komisije pridržijo še vodja kakovosti ter nabave. Pri tem mejniku se poleg določitve o ustrezni zrelosti izdelka se sprejme odločitev o samostojni izdelavi izdelka oziroma njegovi nabavi pri parterjih. Predlaga se tudi pilotni projekt s kupcem, ki se ga skozi razvoj spremlja. Določi se transferni projektni tim, ki pilotni projekt spelje v serijskem razvoju. Po koncu serijskega pilotnega projekta inovacijska komisija IC4 sprejme odločitev distribuciji znanja po celotnem koncernu in predpiše standardne metode proizvodnje novega izdelka.

6 SKLEP

Predstavljen proces inovacij v Forviji omogoča povezavo inovativnosti s sistematičnim pristopom projektnega vodenja. S sistematiko pri odločanju je omogočeno sledenje, priorizacija inovacij v podjetju. S tem dosežemo tudi večleten pregled inovacij ter njihove finančne potrebe. Z vključitvijo več deležnikov v proces predrazvoja, se celotna organizacija (nabava, proizvodnja) pripravi na prihajajoče nove izdelke in tehnologije.

Viri:

[1] Cross, Nigel (2011). Design Thinking: Understanding how designers think and work. Bloomsbury/Berg. ISBN 9781847886361.
[2] Mihaly, Heder (September 2017). "From NASA to EU: the evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation" (PDF). The Innovation Journal. 22: 1–23.

NAPREDNI PRISTOPI K NAČRTOVANJU, TESTIRANJU IN ZAGONU PROIZVODNIH LINIJ Z UPORABO DIGITALNEGA DVOJČKA

Jože PERKO, Peter SKOPEC
ControlTech d.o.o.

IZVLEČEK

Proizvajalci strojev in integratorji proizvodnih in pakirnih linij so soočeni z izzivi načrtovanja in testiranja linij v čim krajšem času in s čim manjšim tveganjem. Z uporabo digitalnega dvojčka in primernega orodja lahko brez fizično prisotne opreme preverijo delovanje linije in maksimalno pretočnost pri različnih pogojih delovanja. Na ta način že v fazi načrtovanja odpravijo morebitne napake in zagotovijo zahtevano učinkovitost in pretočnost linije.

Predstavljeno je orodje za emulacijo proizvodnih linij Emulate3D, ki omogoča izdelavo dinamičnega digitalnega dvojčka. Digitalni dvojček lahko upravlja krmilnik (PLC) v fizični ali simulirani obliki, na katerega je lahko priključen operaterski panel, prav tako v fizični ali simulirani obliki. Poleg navedenega je Emulate3D odlično orodje za uvajanje novih operaterjev na liniji, t.i. »Operator Training« brez tveganja za poškodbe delavca, stroja ali proizvodne linije.

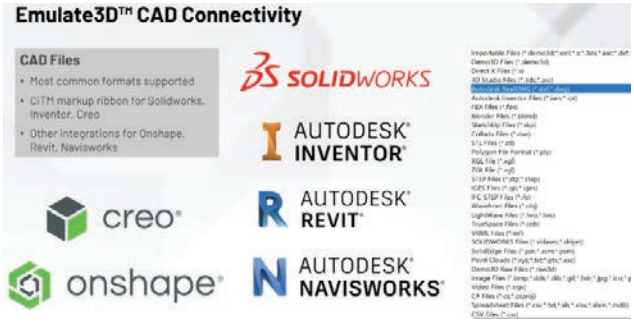
1 UVOD

Kaj digitalni dvojček pravzaprav je, ni potrebno več na dolgo in na široko razlagati, saj se v industriji vse pogosteje uporablja za analizo pretočnosti linije, potrditev koncepta, virtualni zagon linije ali uvajanje operaterjev na virtualni liniji.

Govorimo pravzaprav o združevanju virtualnih modelov posameznih sklopov (produktov), s pomočjo katerih lahko izdelamo zelo zanesljive modele celotnih avtomatiziranih naprav ali linij.

Slika 1: Primer izvedbe digitalnega dvojčka

Predstavljeno je orodje Emulate3D, ki je namenjeno simulaciji in emulaciji industrijskih sistemov. S tem orodjem lahko ustvarite natančno virtualno kopijo vaše avtomatizirane proizvodne linije ali stroja.

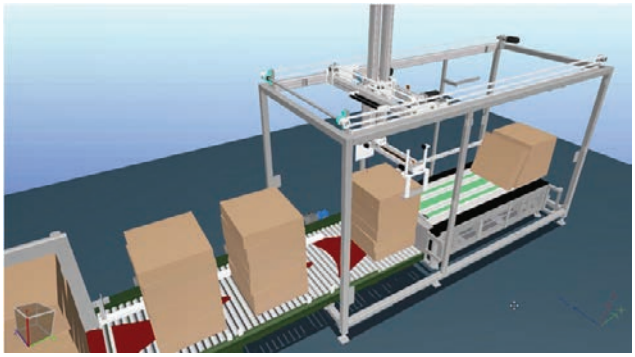


Slika 2: Podprti CAD formati

2 ORODJE EMULATE3D

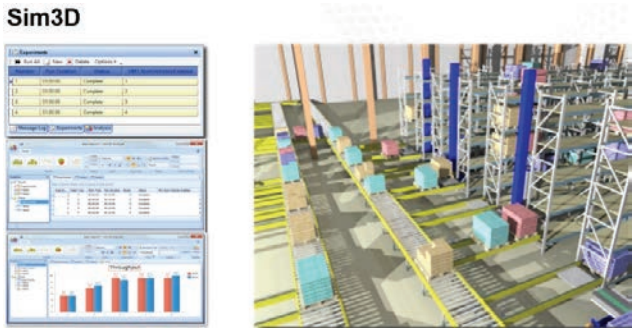
Orodje Emulate3D vsebuje obširno bazo standardnih elementov za izvedbo modela vaše linije, poleg tega pa orodje omogoča uvoz 3D CAD modelov iz praktično vseh svetovno znanih CAD orodij (SolidWorks, Inventor, Creo,…). Te modele s funkcijo CiTM (»CAD Is The Model«) spremenite v gibljive elemente vaše proizvodne linije.

Z orodjem Emulate3D lahko na primer zgradite natančno kopijo avtomatske pakirne linije, dodate material, ki se bo premikal po tekočih trakovih, nastavite robote ter preizkusite zmogljivost in funkcionalnost vaše opreme. Tako izdelan virtualni model omogoča v prvi fazi predstavitev sistema (v paketu Demo3D),



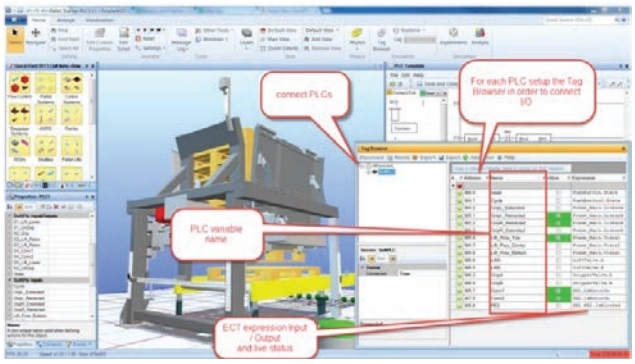
Slika 3: Programski paket Demo3D

z nadgradnjo lahko model simulirate ter na tak način potrdite prototip (paket Sim3D).



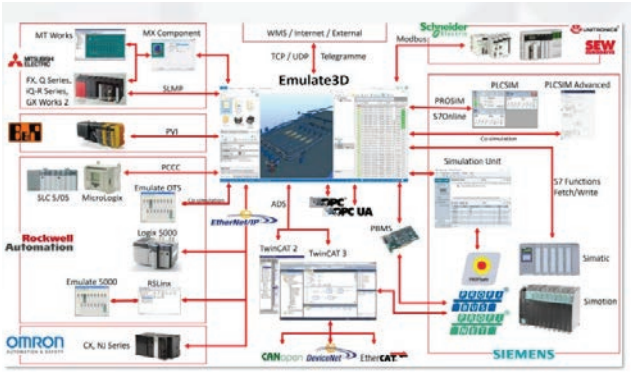
Slika 4: Programski paket Sim3D

S povezavo na fizični ali navidezni krmilni sistem lahko model v celoti posnemamo, model postane dinamični digitalni dvojček s katerim preverimo medsebojno komunikacijo, vplive in odzive na različne okoliščine. Ta funkcionalnost je na voljo v paketu Emulate3D Controls Testing.



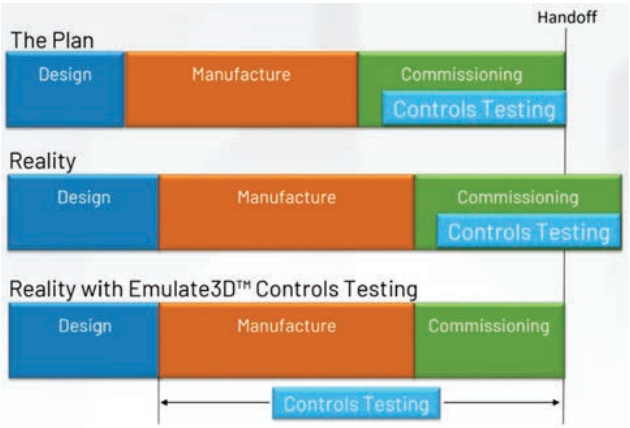
Slika 5: Programski paket Emulate3D

Pri orodju Emulate3D je potrebno poudariti povezljivost s praktično vsemi krmilnimi platformami svetovno, ki so trenutno na trgu, in preko različnih komunikacijskih protokolov (med drugimi: Profinet, Ethernet/IP, OPC UA, TwinCAT, CANopen…)



Slika 6: Povezovanje z emuliranimi (SIL) ali fizičnimi krmilnimi sistemi, aktuatorji (HIL)

Digitalni dvojček je mogoče uporabiti na različne načine, za vse pa velja, da je bistvena vrednost digitalnega dvojčka inženirska učinkovitost v procesu izgradnje in zagona proizvodne linije ali stroja. V kolikor primerjamo načrtovano in dejansko izvedbo delovnega procesa strojegradnje, lahko ugotovimo, da se v večini primerov dejanska izvedba nekoliko razlikuje od načrtovane, saj običajno pride do zamud.



Slika 7: Primerjava običajnega in modernega pristopa

Z uporabo digitalnega dvojčka je izvedba v predvidenem roku tudi dejansko izvedljiva, saj se določena testiranja opreme in programske kode lahko izvajajo sočasno s proizvodnim procesom. Na ta način je mogoče z uporabo digitalnega dvojčka zaznati in popraviti konstrukcijsko napako še preden pride do faze izdelave, montaže in testiranja. Poleg tega je možno na podlagi testiranja digitalnega dvojčka predvideti strojno okvaro, preden nam le-ta na fizični napravi povzroči nepričakovane zastoje.

Digitalni dvojček se pogosto uporablja tudi v fazi virtualnega zagona, saj lahko na ta način bistveno skrajšamo proces zagona na končni lokaciji.

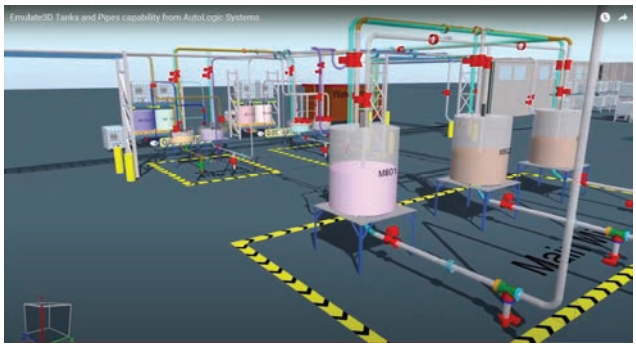
Slika 8: Primer uporabe virtualnega dvojčka v fazi virtualnega zagona

Vse več podjetij pa digitalni dvojček uporablja tudi v postopku uvajanja novih operaterjev – t.i. Operator Training. Tako lahko brez tveganja za kakršnekoli poškodbe delavca, stroja ali proizvodne linije novega operaterja opremijo z znanjem za upravljanje proizvodnje linije.

Slika 9: Primer uporabe virtualnega dvojčka v fazi uvajanja operaterja

Dodatne prednosti tovrstne uporabe so lahko usposabljanje zaposlenih brez potrebe po fizični opremi, določanje življenjske dobe stroja in testiranje sprememb v virtualnem okolju, preden jih uvedemo v fizični sistem, možnost primerjave simuliranega in realnega delovanja stroja ter nenazadnje, zmožnost ustvarjanja in testiranja opreme v virtualnem prostoru, kar nam zniža stroške izdelave fizičnih prototipov.

Na voljo je tudi napreden modul za simuliranje in testiranje fluidnih sistemov. Simuliramo lahko vzdrževanje prostornine tekočin, definiramo lahko točni tip tekočine, preverimo možnost mešanja in izračunamo pretok.



Slika 10: Uporaba modula za simuliranje in testiranje fluidnih sistemov.

3 SKLEP

Z uporabo orodja Emulate3D in številnih naprednih pristopov lahko vaš proces nadgradite, izboljšate in pocenite v vseh razvojnih fazah. Izboljšave so možne vse od faze načrtovanja, potrjevanja prototipa, testiranja, zagona, primerjave realnega z navideznim sistemom do faze uvajanja operaterjev za upravljanje vaših strojev oz. proizvodnih linij.

Viri:

[1] https://www.emulate3d.com/
[2] https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/software/factorytalk/designsuite/emulate.html
[3] https://controltech.si/si/media-centrum/novice/669-digitalni-dvojcek-in-emulate-3d

LabTOP: INOVATIVEN MODEL SODELOVANJA MED INDUSTRIJO IN RAZISKOVALNIM INŠTITUTOM

Nika BRILI, Krištof DEBELJAK
Rudolfovo – Znanstveno in tehnološko središče Novo mesto

IZVLEČEK

Vse več projektov je usmerjenih v povezovanje industrije in raziskovalnih institucij. Kako doseči dobro razvojno partnerstvo? Uveljavljena in vsem poznana praksa je prijava skupnih projektov, kar omogoča sodelovanje pri reševanju praktičnih problemov in hkrati vključuje tako strokovno znanje znanstvenikov kot izkušnje iz industrijskega okolja. Druga možnost, ki jo predstavljamo v tem članku, je sodelovanje v sklopu laboratorijev, kjer se združijo znanje, oprema in finančna sredstva. Znanstveno okolje je praviloma nosilec najnovejših dognanj na določenem področju. Kljub dobremu kadru z veliko znanja pa se javni zavodi pogosto srečujejo z omejitvami predvsem na področju financiranja opreme, ki je podvržena daljnoročnemu načrtovanju nabave, postopkom javnega naročanja in drugim omejitvam. V okviru Laboratorija za tovarne prihodnosti (LabTOP) smo po predstavljenem modelu opremili vzorčno tovarno z najnovejšo opremo, ki so jo v različnih oblikah prispevala sodelujoča podjetja. LabTOP je postal učni industrijski laboratorij za poučevanje, aplikativno raziskovanje in testiranje. Vgrajena oprema je osnova za izvajanje raziskav in aplikativnih raziskovalnih projektov na področju industrije 4.0 (avtomatizacija, robotika, digitalizacija, umetna inteligenca). Vsi deležniki prek takšnega laboratorija pridejo do bolj izurjenega kadra in predvsem novih naprednih metod uporabe opreme.

Predstavljena simbioza med industrijo in javnim raziskovalnim zavodom se je pokazala kot zelo učinkovit pristop za tehnološki napredek vseh vključenih deležnikov.

1 UVOD

Sodobni svet se hitro razvija in tehnologija napreduje z neverjetno hitrostjo. Industrija se sooča s številnimi izzivi, ki jih je mogoče rešiti le s povezovanjem različnih deležnikov [1]. Vse več projektov je usmerjenih v vzpostavljanje sodelovanja med industrijo in raziskovalnimi institucijami, ki lahko skupaj rešujejo praktične probleme in prinašajo napredek na različnih področjih. Sodelovanje prinaša številne koristi, kot so novi pristopi in metode, ki jih lahko uporabijo v praksi, izmenjava znanja in izkušenj ter pridobivanje novih kadrov s specializiranimi znanji. V tem kontekstu so raziskovalni laboratoriji postali ključni dejavnik pri spodbujanju sodelovanja med industrijskimi in akademskimi partnerji.

LabTOP (Laboratorij za tovarne prihodnosti) deluje v okviru Javnega raziskovalnega zavoda Rudolfovo in je plod uspešnega sodelovanja med uspešnimi slovenskimi podjetji in javnim zavodom. Predstavljamo ga kot primer dobre prakse, pri katerem imajo lahko vsi deležniki koristi.

2 PREGLED LITERATURE

Javni raziskovalni inštituti igrajo ključno vlogo pri spodbujanju razvoja znanosti in tehnologije v sistemu inovacij [2]. Ostala dva pomembna deležnika so **univerze** in **industrija**. Čeprav so tako na univerzah kot inštitutih zaposleni znanstveniki oz. raziskovalci, se raziskovalni inštituti navadno posvečajo najsodobnejšim raziskavam na svojem področju, primarna naloga univerz pa je izobraževanje in usposabljanje. Industrijski sektor na drugi strani zagotavlja sistemu inovacij storitve in izdelke za znanost ter tehnologijo.

Za raziskovalne inštitute je pomembno, da se neposredno povezujejo z drugimi deležniki. Raziskave kažejo, da je znanstvena uspešnost inštitutov premo sorazmerna s količino povezav, ki jih ima inštitut z drugimi organizacijami iz industrije oz. gospodarstva [3].

Kako poteka sodelovanje med znanostjo in industrijo na različnih koncih sveta?

Pomembni področji, ki prispevata k inovacijam v industrializiranih državah, sta model odprtih inovacij ter povezovanje med univerzo in industrijo [4]. Sistem inovacij, ki vključuje univerze, inštitute in industrijo, je že poznan na Finskem. Ugotovili so, da je povezovanje pomembno za podjetja, saj se velike inovacije praviloma ne izvajajo v izoliranem okolju niti v največjih podjetjih. Ključni dejavnik uspeha vidijo v intraorganizacijskih in medorganizacijskih učnih omrežjih [5]. Tudi na Kitajskem ugotavljajo, da je trenutno nizka učinkovitost inovacij pri sodelovanju industrije, univerze in raziskovalcev. Prav tako so slabe povezave med procesi raziskav in razvoja ter procesom industrializacije, prenos znanja med njimi je nezadosten, kar se kaže v nizki stopnji transformacije znanstvenih in tehnoloških dosežkov. Čeprav so univerze in raziskovalne institucije izjemno uspešne na področju raziskav, gre po večini za temeljne raziskave. Industrializacija teh raziskav bi lahko imela pozitiven vpliv na spodbujanje tehnološkega razvoja na Kitajskem [6]. Raziskovalci v Indiji ugotavljajo, da industrija in akademski svet ne moreta obstajati eden brez drugega, kot povezavo med njima pa predlagajo alumni klube. Ko študenti diplomirajo in začnejo svojo kariero, je mreža alumnov edina organizacija, ki lahko ostane v stiku z njimi. Alumni mreža tako služi kot komunikacijski kanal med univerzo in njenimi diplomanti [7]. Ugotovitve kažejo, da bi mednarodno sodelovanje univerz lahko prispevalo k mednarodnemu sodelovanju industrije in s tem k vzpostavitvi mednarodne mreže univerzitetno-industrijskega koinovacijskega sodelovanja med Evropsko unijo in Kitajsko [8].

3 PRAKTIČNI PRIMER – LabTOP

Javni raziskovalni zavod Rudolfovo – znanstveno in tehnološko središče Novo mesto je bil ustanovljen leta 2022 kot plod in nadgradnja večletnega dela novomeškega Centra razvoja, raziskav in inovacij, ki deluje pod okriljem Razvojnega centra Novo mesto. Temeljno poslanstvo Rudolfovega je povezati znanstvene, tehnološke in razvojne potenciale v regiji in širše.

Pod Rudolfovo spada leta 2021 ustanovljeni Laboratorij za tovarne prihodnosti, katerega vizija je postati agilna in simbiotska platforma, na kateri se srečujejo učenci, dijaki in študentje ter raziskovalci in industrijski deležniki. Cilj LabTOP-a je razviti in prenašati znanje ter nadgrajevati kompetence na področju pametne proizvodnje ob upoštevanju najvišjih družbenih, okoljskih in kakovostnih standardov.

Slika 1: Učni model pametne tovarne (LabTOP)

V okviru LabTOP-a je bil postavljen **učni model tovarne prihodnosti**, ki deluje kot učni industrijski laboratorij za motiviranje, poučevanje, aplikativno raziskovanje in testiranje. Laboratorij predstavlja najsodobnejše tehnologije, koncepte in rešitve za pametne tovarne z integracijo poslovnega sistema kot vezni člen v celotnem proizvodnem procesu. Ob odprtju je bil LabTOP eden prvih sodobnih centrov znanja v Sloveniji, v katerem si je na enem mestu mogoče ogledati demonstracijo pametne tovarne, ki deluje po principu industrije 4.0 in je krmiljena neposredno iz poslovnega (ERP) sistema.

Ob ustanovitvi laboratorija smo k sodelovanju privabili različna podjetja, od proizvajalcev opreme do ponudnikov različnih poslovnih storitev. Ti skozi različne instrumente sodelovanja zagotavljajo tehnološko in programsko opremo laboratorija.

Slika 2: Sodelujoče organizacije in podjetja v okviru LabTOP-a

Zavedamo se, da je tehnološki napredek izredno hiter in je danes najnovejša oprema lahko kmalu že zastarela, zato smo se z vključenimi podjetji dogovorili za daljnoročna sodelovanja, ki vključujejo redne posodobitve opreme.

Pametna tovarna prinaša koristi vsem vključenim deležnikom: raziskovalcem, industriji in šolam ter fakultetam.

Slika 3: Simbiotska platforma za pametno industrijo

3.1 Podjetja oz. industrija

V sklopu aktivnega sodelovanja z industrijo smo osredotočeni na reševanje konkretnih »nišnih« izzivov, ki se pojavljajo v procesu proizvodnje. S podjetji sodelujemo pri razvoju in implementaciji novih rešitev ter tehnologij.

LabTOP je namenjen industriji, ki se odloča za posodobitev proizvodnje ali si želi pridobiti informacije s področja pametne industrije. Prek številnih seminarjev, tečajev in usposabljanj, ki jih ponuja laboratorij, lahko podjetja bolje pripravijo svoje zaposlene za izzive industrije 4.0.

Učni model pametne tovarne ima namensko eno nezasedeno delovno postajo, na kateri lahko podjetja testirajo svoje rešitve pred samo integracijo v realno industrijsko okolje.

3.2 Raziskovanje

Raziskovalci v laboratoriju izvajajo aplikativne raziskave s področja tehnologij industrije 4.0: robotika, avtomatizacija, umetna inteligenca, digitalizacija industrijskih procesov in kreativna proizvodnja oz. personalizacija. V sodelovanju z ustreznimi industrijskimi deležniki se industrijske zahteve neposredno prenesejo v aplikativne raziskovalne projekte, znanje pa prek raziskovalnih projektov in študentskega dela na bodočo delovno silo.

3.3 Izobraževanje

LabTOP je raziskovalno okolje, ki motivira in usposablja učence, dijake in študente z izvajanjem praktičnih vaj, študijskih projektov in zaključnih nalog v laboratoriju z najsodobnejšo opremo na področju pametne industrije in avtomatizacije.
Mlade vključujemo tudi v industrijske projekte.

Slika 4: Na sliki so prikazane 4 delovne postaje

4 SKLEP

V prispevku je predstavljen inovativen model sodelovanja industrije in javnega raziskovalnega zavoda. Predstavili smo Laboratorij za tovarne prihodnosti (LabTOP), ki je bil ustanovljen kot agilna in simbiotska platforma za srečevanje učencev, dijakov, študentov, raziskovalcev in industrijskih deležnikov. LabTOP je postal učni industrijski laboratorij za motiviranje, poučevanje, aplikativno raziskovanje in testiranje, ki vključuje najnovejše tehnologije, koncepte in rešitve za pametne tovarne. Skozi sodelovanje z različnimi podjetji in instrumenti sodelovanja zagotavlja LabTOP različne priložnosti za izmenjavo znanja, nadgrajevanje kompetenc in razvoj novih produktov ter storitev.

Predstavljeni primer kaže, da je simbioza med industrijo in javnim raziskovalnim zavodom lahko zelo učinkovit pristop za tehnološki napredek vseh vključenih deležnikov.

Viri:

[1] A. F. Barbosa, G. T. G. Neto, M. Lencastre, R. A. A. Fagundes, in W. B. Santos, „Fostering Industry-Academia Collaboration in Software Engineering using Action Research: A Case Study“, v *Proceedings of the XIX Brazilian Symposium on Software Quality*, v SBQS '20. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, mar. 2021, str. 1–9. doi: 10.1145/3439961.3440005.

[2] Y. Zhang, K. Chen, G. Zhu, R. C. M. Yam, in J. Guan, „Inter-organizational scientific collaborations and policy effects: an ego-network evolutionary perspective of the Chinese Academy of Sciences“, *Scientometrics*, let. 108, št. 3, str. 1383–1415, sep. 2016, doi: 10.1007/s11192-016-2022-2.

[3] K. Chen, Y. Zhang, G. Zhu, in R. Mu, „Do research institutes benefit from their network positions in research collaboration networks with industries or/and universities?“, *Technovation*, let. 94–95, str. 102002, jun. 2020, doi: 10.1016/j.technovation.2017.10.005.

[4] R. Osorno-Hinojosa, M. Koria, in D. del C. Ramírez-Vázquez, „Open Innovation with Value Co-Creation from University–Industry Collaboration“, *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, let. 8, št. 1, str. 32, mar. 2022, doi: 10.3390/joitmc8010032.

[5] P. Kettunen, J. Järvinen, T. Mikkonen, in T. Männistö, „Energizing collaborative industry-academia learning: a present case and future visions“, *European Journal of Futures Research*, let. 10, št. 1, str. 8, apr. 2022, doi: 10.1186/s40309-022-00196-5.

[6] X.-J. Bai, Z.-Y. Li, in J. Zeng, „Performance evaluation of China's innovation during the industry-university-research collaboration process—an analysis basis on the dynamic network slacks-based measurement model“, *Technology in Society*, let. 62, str. 101310, avg. 2020, doi: 10.1016/j.techsoc.2020.101310.

[7] R. Malhotra, M. Massoudi, in R. Jindal, „An alumni-based collaborative model to strengthen academia and industry partnership: The current challenges and strengths“, *Educ Inf Technol*, let. 28, št. 2, str. 2263–2289, feb. 2023, doi: 10.1007/s10639-022-11276-1.

[8] Y. Cai, „Towards a new model of EU-China innovation cooperation: Bridging missing links between international university collaboration and international industry collaboration“, *Technovation*, let. 119, str. 102553, jan. 2023, doi: 10.1016/j.technovation.2022.102553.

INDUSTRIJA 5.0: NOVA INDUSTRIJSKA PARADIGMA ZA TRAJNOSTNO IN ODPORNO PROIZVODNJO

Urška BUTOLEN[1], Iztok PALČIČ[2]
[1]Gorenje, d.o.o.,
[2]Fakulteta za strojništvo Univerza v Mariboru

IZVLEČEK

Trajnostni razvoj pomeni razvoj, ki zadovolji trenutne potrebe, ne da bi pri tem ogrožal potrebe prihodnjih generacij. Trajnostni razvoj vključuje tri stebre in sicer okoljski, ekonomski in družbeni in temelji na ideji, da je potrebno uravnotežiti in integrirati gospodarske in okoljsko družbene cilje za doseganje dolgoročnega ustvarjanja vrednosti za vse deležnike. Doseganje trajnostnega razvoja je ključno za okrevanje po pandemiji Covid-19 in za doseganje odpornosti v prihajajočih krizah, vključujoč klimatske spremembe in propadanje biodiverzitete. Zagotoviti je potrebno odporne gospodarske modele, ki bodo temeljili na rasti, usmerjeni v človeški napredek in blaginjo na podlagi zmanjšanja in preusmeritve potrošnje v nove proizvode za zmanjšanje odvisnosti proizvodnje in potrošnje od porabe virov. Industrija 5.0 je nova industrijska paradigma, ki izkorišča tehnologije industrije 4.0 in gradi nove, hiper-povezane in na podatkih temelječe proizvodne sisteme, ki cenijo vrednote trajnostnega razvoja. Ključno vprašanje je, na kakšen način je z vpeljavo paradigme Industrije 5.0 mogoče doseči cilje trajnostnega razvoja. Z uporabo kolaborativnih robotov, naprednih simulacij, interneta stvari, sistemov za komunikacijo v realnem času, umetne inteligence in sistemov za zbiranje in obdelavo velepodatkov prispeva k izboljšanjem delovnih razmer v proizvodnem okolju, izboljšanju kakovosti in učinkovitosti proizvodnje in boljšemu zadovoljevanju potreb kupcev.

1 UVOD

V luči tveganj, ki izhajajo iz klimatskih sprememb, želje po ohranjanju dobrih razmer za prihodnje generacije ob sočasnem ohranjanju visokega življenjskega standarda trenutnih generacij in interesov podjetij za dolgoročni obstanek, se pojavlja težnja k trajnostnemu razvoju. Sočasno se v akademskih in industrijskih krogih razvija paradigma industrije 5.0, katere cilji so skladni s cilji trajnostnega razvoja. Ključno vprašanje je, na kakšnem način je mogoče cilje trajnostnega razvoja z vpeljavo paradigme industrije 5.0 doseči.

Industrija 5.0 gradi na tehnologijah industrije 4.0, kot so kolaborativni roboti, napredne simulacije, internet stvari, sistemi za komunikacijo v realnem času, umetna inteligenca in sistemi za zbiranje in obdelavo velepodatkov in njihovo uporabo razširja za doseganje koristi za širši krog deležnikov, za podjetja, njihove zaposlene, družbo in okolje. Vpeljava teh tehnologij lahko podjetjem prinese številne koristi na področju družbenega stebra trajnostnega razvoja, in sicer izboljšanje delovnih mest za zaposlene, boljšo varnost, zdravje in dobro počutje, izboljšanje procesov izobraževanja in razvoja zaposlenih ter boljše razumevanje potrebe kupcev in posledično tudi bolj učinkovito zadovoljevanje teh potreb. Koristi za podjetja so tudi na področju okoljskega in ekonomskega stebra trajnostnega razvoja, gre predvsem za povečanje učinkovitosti in kakovosti proizvodnega procesa, zagotavljanje razpoložljivosti in odpornosti.

V nadaljevanju bomo pojasnili, kaj je trajnostni razvoj, zakaj bo za podjetja njegovo doseganje nujno in kako ga lahko dosežejo z vpeljavo ključnih tehnologij industrije 5.0.

2 TRAJNOSTNI RAZVOJ IN INDUSTRIJA 5.0

Evropa se sooča s tremi velikimi krizami – okrevanjem po najhujši pandemiji v zadnjem stoletju, klimatskimi spremembami in propadanjem biodiverzitete. Pred nami je ogromen izziv – kako dovolj hitro spremeniti način življenja in gospodarskih aktivnosti, da bi 8 milijardam ljudi

omogočili živeti trajnostno in mirno s spoštovanjem planetarnih meja? [1] V luči naraščanja števila prebivalstva in vse večje potrošnje številne organizacije, kot so Evropska unija, Organizacija za gospodarsko sodelovanje in razvoj (OECD) in Organizacija združenih narodov, pozivajo k spremembi gospodarskega sistema z upoštevanjem planetarnih mej, k trajnostnemu razvoju.

Svetovna komisija za okolje in razvoj (WCED) trajnostni razvoj opisuje kot razvoj, ki zadovolji trenutne potrebe, ne da bi pri tem ogrožal potrebe prihodnjih generacij. [2] Trajnostni razvoj vključuje tri stebre – okoljskega, ekonomskega in družbenega in temelji na ideji, da je potrebno uravnotežiti in integrirati gospodarske in okoljsko družbene cilje za doseganje dolgoročnega ustvarjanja vrednosti za vse deležnike. [3] Bistvo trajnostnega razvoja je sočasno in celostno naslavljanje družbenih, gospodarskih in okoljskih problemov tekom razvojnega procesa, pri čemer je potrebno uravnotežiti in integrirati gospodarske in okoljsko-družbene cilje. [3]

Industrija je ključna gonilna sila za doseganje gospodarskega in družbenega razvoja. Pristop, temelječ zgolj na dobičku, postaja vse manj vzdržen, saj ne upošteva koristi in škode za okolje in družbo. Industrija kot nosilec blaginje mora poleg finančne vzdržnosti zagotavljati tudi vzdržnost iz socialnega in okoljskega vidika, kar je možno doseči z odgovornimi inovacijami, ki niso namenjene zgolj ali predvsem povečanju stroškovne učinkovitosti in dobička, temveč povečevanju blaginje za vse deležnike, tako vlagatelje kot tudi delavce, potrošnike, družbo in okolje. [1], [4]

Gospodarski razvoj v zadnjem desetletju je temeljil na paradigmi industrije 4.0, ki je bila osredotočena na povečevanje učinkovitosti z vpeljavo digitalizacije in umetne inteligence. [1] Koncept industrije 4.0 je bil prvotno usmerjen v izboljševanje učinkovitosti gospodarstva, z upoštevanjem okoljskih zahtev za doseganje ogljično nevtralne in energetsko učinkovite industrije. S časom pa se je industrija 4.0 začela osredotočati predvsem in samo na izboljševanje učinkovitosti in digitalizacijo proizvodnega procesa in zanemarila vidike socialne in okoljske trajnosti. [4]

Trenutna paradigma industrije 4.0 tako ni primerna za naslavljanje podnebne krize in družbenih napetosti. Industriji 4.0 manjkajo ključni elementi, ki bodo nujni za preobrazbo in zagotavljanje ločitve porabe virov in materialov in negativnih vplivov na področju okolja, podnebja in družbenih aspektov. [1] Iz tega razloga se je vzporedno začel razvijati koncept industrije 5.0, ki poudarja pomen raziskav in inovacij za podporo industriji v dolgoročnem prispevku k razvoju znotraj planetarnih oziroma okoljskih meja. [4]

Vizija Industrije 5.0, kot jo predlaga Evropska komisija, presega ozko usmerjeno in tradicionalno usmerjenost v doseganje gospodarske rasti z gospodarskim modelom, usmerjenim v povečevanje proizvodnje in potrošnje. Predlaga bolj trajnosten gospodarski model, ki temelji na rasti, ki je usmerjena na človeški napredek in blaginjo na podlagi zmanjšanja in preusmeritve potrošnje v nove oblike trajnostnega in krožnega ustvarjanja vrednosti in na doseganje splošne blaginje. Industrija 5.0 tako ni nova industrijska revolucija, temveč evolucija, ki se je razvila vzporedno s konceptov industrije 5.0, saj ne predstavlja tehnološkega preskoka, temveč razširja tehnološki razvoj industrije 4.0 na širše področje in tako ne temelji na ustvarjanju vrednosti zgolj za lastnike, temveč vseh deležnikov, vključujoč vse ljudi in naravo. [1]

Evropska komisija opisuje tri stebre industrije 5.0, osredotočenost na človeka, trajnostnost in odpornost. Prvi steber, trajnostnost se osredotoča na oblikovanje procesov na način, da bodo zadovoljevali potrebe današnjih generacij, brez ogrožanja potreb prihodnjih generacij. Pomeni preoblikovanje procesov z upoštevanjem širšega kroga deležnikov za doseganje okoljskih, družbenih in gospodarskih koristi. Drugi steber, osredotočenost na človeka, pomeni, da je ključen poudarek industrije 5.0 uporaba tehnologije v podporo in pomoč človeku. V preteklosti je bilo ključno vprašanje, kaj lahko naredimo s tehnologijo, v sklopu industrije 5.0 je vprašanje obratno, kaj lahko tehnologija stori za nas. V nadaljevanju smo osredotočenost na človeka upoštevali kot del družbene trajnostnosti. Tretji steber, odpornost, predstavlja sposobnost hitrega in učinkovitega odzivanja sistemov na spremembe, pri čemer je še posebej pomembno

zagotavljanje odpornosti kritične infrastrukture v kriznih časih. [4]

2 PRISPEVEK INDUSTRIJE 5.0 K DOSEGANJU TRAJNOSTNE IN ODPORNE PROIZVODNJE

Odpornost in trajnostnost, dva glavna cilja, industrija 5.0 dosega z nadgradnjo tehnologij industrije 4.0 in njihovo razširitvijo za zagotavljanje širše koristi kot je zgolj povečevanje dobička lastnikov. [5] Temelji na principih hiper-povezanega, na podatkih temelječega sistema, ki ceni vrednote trajnostnega razvoja. [6] Zagotavlja vračanje delovne sile v proizvodni proces ter sodelovanje ljudi in tehnologij za doseganje odpornosti, kakovosti in učinkovitosti proizvodnjega procesa. Eden izmed ključnih konceptov in koristi uvedbe industrije 5.0 je tudi doseganje masovne prilagodljivosti, torej stroškovno in časovno ugodne proizvodnje prilagojenih izdelkov, ki bolje zadovoljujejo potrebe kupcev. Cilj industrije 5.0 tako ni zadovoljevanje potreb samo enega deležnika, lastnika, temveč vključevanje in zadovoljevanje potreb širšega kroga deležnikov, zaposlenih, kupcev in širše družbe. [7] Ključne nove tehnologije, ki to omogočajo so kolaborativni roboti, napredne simulacije, internet stvari, sistemi za komunikacijo v realnem času, umetna inteligenca in sistemi za zbiranje in obdelavo velepodatkov. V naslednjih podpoglavjih razlagamo, kako tehnologije izboljšujejo delo ljudi, učinkovitost in kakovost proizvodnje, omogočajo hitrejše prilagajanje na spremembe in boljše razumevanje in zadovoljevanje potreb kupcev.

2.1 Tehnična podpora zaposlenim: Izboljšanje učinkovitosti in dobrega počutja na delovnem mestu

Tehnologije, ki omogočajo sodelovanje med stroji in ljudmi, združujejo sposobnosti ljudi in strojev. Stroji so sposobni visoko učinkovitega opravljanja ponavljajočih nalog, niso pa zmožni tako kreativnega dela kot ljudje. Ključni cilj vpeljave tehnologij za tehnično podporo zaposlenim je izkoristiti prednosti ljudi in tehnologije za doseganje boljšega delovnega procesa. [8] Uporaba kolaborativnih robotov in digitalnih pomočnikov namesto zamenjave ljudi z avtonomnimi roboti omogoča v človeka usmerjen pristop k oblikovanju delovnih mest. Tehnična podpora zaposlenim omogoča avtomatizacijo neergonomičnih, ponavljajočih se in fizično zahtevnih del, [6] saj so kolaborativni roboti zelo učinkoviti pri opravljanju predvidenih nalog [8] kar olajša človeško delo in zagotovi nemoteno izvajanje ponavljajočih se procesov. [9] . Sodelovanje človek-stroj na proizvodni liniji pomeni izvajanje nalog v sodelovalnem delu med človekom in strojem v realnem času [9] pri čemer se ljudi usmeri v opravljanje fizično manj zahtevnih nalog z večjo dodano vrednostjo. [8]

Vpeljava tehničnih rešitev, kot so digitalizacija upravljanja procesov, avtomatizacija procesov in internet stvari omogočata zagotavljanje informacij za sprejemanje odločitev v realnem času. Z vpeljavo umetne inteligence je mogoče narediti še en korak naprej, avtomatizirati in racionalizirati same procese odločanja. [6] Sisteme, temelječe na umetni inteligenci, je namreč mogoče naučiti tudi obdelave zahtevkov in povpraševanj s strani kupcev in v vsakodnevnih situacijah podajati predloge rešitev. Te ponavljajoče naloge izvajajo hitro in učinkovito, kar zmanjšuje možnost človeške napake in skrajšuje čas obdelave zahtevkov, kar izboljšuje odzivnost sistemov.[9]

Tehnična podpora zaposlenim prispeva tudi k izobraževanju in izboljševanju kompetenc zaposlenih. Uporaba navidezne ali obogatene resničnosti omogoča izboljšanje načina in učinkovitosti učenja zaposlenih, umetna inteligenca pa lahko pomaga pri optimizaciji karierne poti zaposlenih. [6]

Uporaba tehnične podpore zaposlenim tako prispeva k doseganju ciljev trajnostnega razvoja na različne načine. Poenostavlja procese, povečuje učinkovitost zaposlenih, izboljšuje sposobnost učinkovitega in hitrega odločanja ter izboljšuje varnost, zdravje in dobro počutje na delovnem mestu. [6] Direktno naslavlja tudi pomisleke o izginjanju delovnih mest, ki so se pojavili z razvojem tehnologij digitalizacije in avtomatizacije v sklopu industrije 4.0 [10] saj se oddaljuje od nadomeščanja ljudi z stroji. Nasprotno, ustvarja alternativna delovna mesta z večjo dodano vrednostjo in hkrati tudi uspešno

naslavlja izziv prekvalificiranja zaposlenih za delo na novih delovnih mestih. [6]

2.2 Napredne simulacije in digitalni dvojčki: izboljšanje kakovosti proizvodnje in hitrejše odzivanje na spremembe

Naslednje ključne tehnologije, ki omogočajo velik prispevek k doseganju ciljev trajnostnega razvoja so napredne simulacije in digitalni dvojčki.

Napredne simulacije in digitalne dvojčke je za doseganje ciljev trajnostnega razvoja mogoče uporabiti na dveh področjih – za zagotavljanje kakovosti in učinkovitosti proizvodnih procesov in za učinkovito izdelavo digitalnih prototipov izdelkov. [6] [8]

Digitalni dvojčki omogočajo simulacije realnih proizvodnih sistemov v realnem času. [8] Gre za simulacije, ki omogočajo upoštevanje vseh spremenljivk proizvodnega procesa, s čimer dosežejo boljši približek realnosti, s tem pa boljše rezultate samih simulacij in večjo aplikativnost v realno okolje.[9] Omogočajo spremljanje in preprečevanje napak pred nastopom v resničnem svetu [8] kar prispeva k izboljšanju kakovosti in odpornosti proizvodnje. [9]

Druga prednost uporabe naprednih simulacij in digitalnih dvojčkov je hitro, cenovno ugodno in učinkovito ustvarjanje digitalnih prototipov novih izdelkov in rešitev, ki so plod sodelovanja deležnikov [6], s čimer omogočajo hitrejše odzivanje na spremembe in s tem večjo odpornost. Primer takšnega sodelovanja je na primer oblikovanje izdelkov po naročilu kupcev. Podjetja lahko z uporabo naprednih simulacij in digitalnih dvojčkov enostavno in stroškovno učinkovito predstavijo model izdelka kupcem in ga v primeru, ko kupci zahtevajo dodatne spremembe lahko tudi hitreje in ceneje prilagodijo kot bi bilo to možno v primeru priprave fizičnih prototipov. [8]

Prispevek k trajnostnemu razvoju je izboljšanje kakovosti in učinkovitosti proizvodnih procesov, manjša poraba energije in virov, hitrejše prilagajanje spremembam ter zadovoljevanje potreb kupcev in drugih deležnikov. [8]

2.3 Koboti, umetna inteligenca in internet stvari: nove tehnologije za doseganje masovnega prilagajanja

Kupci vse bolj zahtevajo in pričakujejo možnost prilagajanja izdelkov in storitev svojim potrebam. Nove tehnologije industrije 5.0, kot so koboti, internet stvari, umetna inteligenca, pridobivanje in obdelava podatkov v realnem času in njihova integracija z inovativnostjo ljudi lahko industriji pomaga pri zadovoljevanju potreb in hitremu dostavljanju prilagojenih izdelkov in storitev. [9]

Industrija 5.0 se ne vrača k cenovno in časovno potratni proizvodnji prilagojenih izdelkov, temveč z uporabo tehnologij, ki dopolnjujejo človeško znanje in inovativnost z hitrostjo in natančnostjo, omogoča stroškovno in časovno učinkovito proizvodnjo prilagojenih izdelkov. [11] Stroškovna in časovna učinkovitost je ključna za omogočanje vpeljave t.i. masovne prilagoditve, enega izmed ključnih konceptov industrije 5.0. Prvi korak na poti do masovnega prilagajanja je razumevanje kupcev. Uporaba interneta stvari omogoča učinkovito zbiranje podatkov o potrebah in načinu življenja uporabnikov, ki jih je mogoče z uporabo tehnologij, ki temeljijo na sistemih umetne inteligence, učinkovito analizirati in uporabiti za oblikovanje in proizvodnjo visoko prilagojenih izdelkov. Nekoč je vsaka prilagoditev zahtevala ročno delo ljudi, kar je rezultiralo v neučinkoviti in časovno in stroškovno potratni proizvodnji. Stroji so namreč sicer omogočali visoko učinkovitost, a niso zmogli zagotavljati prilagodljivosti, zato je vsaka prilagoditev zahtevala ročno izdelavo. Uporaba kolaborativnih robotov in avtomatiziranih naprav pa v sodelovanju z človekom omogoča tudi prilagajanje. Prispevek človeka v tem sodelovanju je tako kreativnost in prilagajanje spremembam, medtem ko stroji zagotovijo učinkovitost. Tako je masovna proizvodnja prilagojenih izdelkov omogočena z združevanjem prednosti ljudi in strojev. [9]

Premik k masovni proizvodnji prilagojenih izdelkov k ciljem trajnostnega razvoja prispeva z zmanjšanjem porabe virov, boljšim izpolnjevanjem zahtev strak, večanjem zvestobe strank in na splošno izboljševanjem zadovoljstva strank. Ključni prispevek proizvodnje prilagojenih izdelkov je tudi ta, da uporabniki tak izdelek uporabljajo dlje časa, saj zelo dobro ustreza njihovim potrebam, zato se redkeje odločajo za zamenjavo še delujočih izdelkov. [11]

2.4 Velepodatki: Ključ do boljšega razumevanja potrošnikov in izboljšanja proizvodnih procesov

Z vpeljavo digitalizacije in integracije vzdolž vrednostne verige je mogoče zbrati velike količine podatkov, t.i. velepodatke. Na eni strani gre za podatke o kupcih, na drugi strani za podatke o samem proizvodnem procesu. [9]

Velika količina zbranih podatkov o kupcih omogoča bolj poglobljeno razumevanje načina življenja kupcev, kar omogoča boljše razumevanje njihovih potreb, boljše in hitrejše odločanje, in posledično tudi boljše zadovoljevanje potreb kupcev. [9][8] Velepodatki omogočajo podjetjem tudi bolj poglobljeno razumevanje življenjskega sloga in potreb potrošnikov, kar je mogoče uporabiti za izboljšanje in prilagajanje uporabniške izkušnje. [9] Integracija velepodatkov in interneta stvari omogoča učinkovito integracijo zahtev kupcev in drugih deležnikov v proizvodne procese.[6]

Druga možnost učinkovite uporabe velepodatkov je njihova uporaba za izboljševanje kakovosti in učinkovitosti proizvodnih procesov. Velepodatke se lahko uporabi kot vir za učenje umetne inteligence, kar pomembno izboljša delovanje umetne inteligence in posledično tudi proizvodnega procesa, v katerega je vključena. Uporabijo pa se lahko tudi za simulacije in izboljševanje avtonomnih procesov, kar prav tako prispeva k povečanju učinkovitosti in kakovosti proizvodnih procesov. [9]

2.5 Internet stvari in komunikacija v realnem času: integracija sistemov za zagotavljanje razpoložljivosti in odpornosti

Uporaba tehnologij interneta stvari in računalništva v oblaku omogoča integracijo sistemov znotraj organizacije in po celotni verigi vrednosti, kar pripomore k boljši razpoložljivosti in odpornosti storitev. [9] Integracija sistemov znotraj interneta stvari z uporabo umetne inteligence in analize velepodatkov omogoča komunikacijo v realnem času, ki je ključna za razvoj in transparentnost izmenjave podatkov, saj omogoča zagotavljanje pravočasnih in zanesljivih podatkov. Pri zagotavljanju podatkov je pomembna varna in zanesljiva izmenjava podatkov, ki omogoča, da so podatki vedno dostopni, preverljivi in da se zagotovi nadzor nad lastništvom nad podatki, kar je mogoče zagotoviti z uporabo tehnologij veriženja blokov. [6]

Uporaba interneta stvari omogoča prispevek k ciljem trajnostnega razvoja na področju obvladovanja sistemov celotne verige, od nabavne verige do proizvodnje in distribucije [6], prav tako pa lahko omogoči velik prispevek na področju zagotavlja storitev končnim kupcem. [9]

Komunikacija v realnem času omogoča analizo vseh procesov vrednostne verige v realnem času, s čimer lahko zagotovimo ugotavljanje in preprečevanje kritičnih težav v procesih. [6] Z uporabo interneta stvari in oblačnih storitev je mogoče storitve, ki jih podjetja ponujajo svojim uporabnikom, narediti bolj dostopne ter zagotoviti popolno izkoriščenost in kroženje informacij ter visoko storilnost sistemov podjetja oziroma organizacije za doseganje varnih, zanesljivih, visokokakovostnih in poceni storitev za celoten življenjski cikel izdelka. [9]

Uporaba tehnologij za integracijo in komunikacijo v realnem času tako k ciljem trajnostnega razvoja prispeva z povečevanjem odpornosti, zmanjševanjem stroškov, izboljšanjem zanesljivosti proizvodnje, izboljšanjem procesov odločanja, boljšim obvladovanjem tveganj, povečanjem transparentnosti, zagotavljanjem izboljšane uporabniške izkušnje in vključevanjem deležnikom znotraj in izven organizacije. [6] [9]

3 SKLEP

Zagotavljanje trajnostnega in odpornega delovanja je ključno za dolgotrajni obstanek in rast podjetij in za prispevek podjetij k dobrobiti okolja in družbe. Paradigma industrije 5.0 doseganje trajnostnosti in odpornosti omogoča z novimi načini uporabe tehnologij, ki so bile razvite v sklopu industrije 4.0. Pri tem so ključne tehnologije kolaborativni roboti, napredne simulacije, internet stvari, sistemi za komunikacijo v realnem času, umetna inteligenca in sistemi za zbiranje in obdelavo velepodatkov. Implementacija teh tehnologij prispeva k doseganju ciljev trajnostnega razvoja na vseh treh stebrih trajnostnosti. V družbenem stebru je ključen prispevek vračanje delovne sile v proizvodnjo, zagotavljanje boljših delovnih

razmer, vključevanje deležnikov in boljše razumevanje zahtev kupcev. Prispevek vpeljave omenjenih tehnologij k doseganju ciljev okoljskega in ekonomskega stebra je na področju izboljšanja kakovosti in učinkovitosti proizvodnih procesov ter hitrejšega odzivanja na spremembe.

Industrija 5.0 tako ni nova industrijska revolucija, temveč evolucija, ki uporablja tehnologije industrije 4.0 in z njihovo uporabo dosega vrednost za širok krog deležnikov, za družbo in okolje.

Viri:

[1] Andrea. Renda *et al.*, *Industry 5.0, a transformative vision for Europe : governing systemic transformations towards a sustainable industry.*

[2] W. Commission on Environment, "Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future Towards Sustainable Development 2. Part II. Common Challenges Population and Human Resources 4."

[3] M. A. Rosen and H. A. Kishawy, "Sustainable manufacturing and design: Concepts, practices and needs," *Sustainability*, vol. 4, no. 2. MDPI, pp. 154–174, 2012. doi: 10.3390/su4020154.

[4] Maija. Breque, Lars. De Nul, Athanasios. Petridis, and European Commission. Directorate-General for Research and Innovation., *Industry 5.0 : towards a sustainable, human-centric and resilient European industry.*

[5] D. Ivanov, "The Industry 5.0 framework: viability-based integration of the resilience, sustainability, and human-centricity perspectives," *Int J Prod Res*, 2022, doi: 10.1080/00207543.2022.2118892.

[6] M. Ghobakhloo, M. Iranmanesh, M. F. Mubarak, M. Mubarik, A. Rejeb, and M. Nilashi, "Identifying industry 5.0 contributions to sustainable development: A strategy roadmap for delivering sustainability values," *Sustain Prod Consum*, vol. 33, pp. 716–737, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.spc.2022.08.003.

[7] S. Saniuk, S. Grabowska, and M. Straka, "Identification of Social and Economic Expectations: Contextual Reasons for the Transformation Process of Industry 4.0 into the Industry 5.0 Concept," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 3, Feb. 2022, doi: 10.3390/su14031391.

[8] D. Mourtzis, J. Angelopoulos, and N. Panopoulos, "A Literature Review of the Challenges and Opportunities of the Transition from Industry 4.0 to Society 5.0," *Energies*, vol. 15, no. 17. MDPI, Sep. 01, 2022. doi: 10.3390/en15176276.

[9] R. Sindhwani, S. Afridi, A. Kumar, A. Banaitis, S. Luthra, and P. L. Singh, "Can industry 5.0 revolutionize the wave of resilience and social value creation? A multi-criteria framework to analyze enablers," *Technol Soc*, vol. 68, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.techsoc.2022.101887.

[10] S. Grabowska, S. Saniuk, and B. Gajdzik, "Industry 5.0: improving humanization and sustainability of Industry 4.0," *Scientometrics*, vol. 127, no. 6, pp. 3117–3144, Jun. 2022, doi: 10.1007/s11192-022-04370-1.

[11] S. Aheleroff, H. Huang, X. Xu, and R. Y. Zhong, "Toward sustainability and resilience with Industry 4.0 and Industry 5.0," *Frontiers in Manufacturing Technology*, vol. 2, Oct. 2022, doi: 10.3389/fmtec.2022.951643.

IZRAČUN OGLJIČNEGA ODTISA PODJETJA ADRIA MOBIL D. O. O. IN UPORABA REZULTATOV V RAZVOJU NOVIH IZDELKOV

Polona MOŽE[1], Gašper GANTAR[2,3]
[1]Adria Mobil d. o. o.
[2]Visoka šola za proizvodno inženirstvo
[3]Fakulteta za varstvo okolja

IZVLEČEK

V podjetju Adria Mobil smo izračunali organizacijski ogljični odtis po standardu ISO 14064 (obseg 1-3). V članku je predstavljena metodologija, način zbiranja podatkov in najpomembnejše ugotovitve. Po skupnem organizacijskem ogljičnem odtisu celotnega podjetja Adria Mobil d. o. o. smo izračunali še ločene ogljične odtise počitniških prikolic, vanov in avtodomov. Te rezultate je mogoče uporabiti pri izbiranju in vrednotenju idej, kako izboljšati (okoljske) lastnosti vsakega izmed naštetih izdelkov ter za določanje ciljev za zmanjševanje ogljičnega odtisa celotnega podjetja. Pri zbiranju podatkov za izračun ogljičnega odtisa so sodelovali sodelavci iz vseh oddelkov v podjetju (nabava, vzdrževanje, okolje, prodaja, računovodstvo, tehnologija, logistika, razvoj, IT…).

1 UVOD

Podnebne spremembe, ki izhajajo iz antropogenih dejavnosti, so opredeljene kot eden največjih izzivov, s katerimi se sooča svet, in bodo v prihodnjih desetletjih močno vplivale na podjetja in državljane. Glavni toplogredni plini (TGP) so: ogljikov dioksid (CO_2), metan (CH_4), dušikov oksid (N_2O), hladilni plini (različni perfluoroogljikovodiki PFC ali fluoroogljikovodiki HFC), žveplov heksafluorid (SF_6) in fluorirani ogljikovodiki (CFC).

V prispevku so naprej podana osnova pojasnila glede izračuna ogljičnega odtisa. V nadaljevanju pa je predstavljen izračun ogljičnega odtisa podjetja Adria Mobil d. o. o. in njihovega značilnega avtodoma tipa MATRIX.

2 ORGANIZACIJSKI IN IZDELČNI OGLJIČNI ODTIS

Ogljični odtis organizacije predstavlja skupne emisije TGP, povezanih z dejavnostmi organizacije. Izračun ogljičnega odtisa je priznan kot pomemben merljiv kazalec okoljske uspešnosti vsakega podjetja. Pri izračunu organizacijskega ogljičnega odtisa so emisije TGP razdeljene v tri obsege: neposredne emisije so v korelaciji z "obsegom 1", posredne energetske emisije z "obsegom 2" in druge posredne emisije z "obsegom 3", kot je opredeljeno v standardih [1,2]. Ogljični odtis lahko izračunamo tudi za posamezni izdelek ali skupino izdelkov.

3 IZRAČUN OGLJIČNEGA ODTISA PODJETJA ADRIA MOBIL D. O. O.

Podjetje Adria Mobil d.o.o. je eno vodilnih evropskih proizvajalcev počitniških prikolic, vanov in avtodomov. Je hčerinsko podjetje skupine TRIGANO. Podjetje Adria Mobil d. o. o. želi biti vzorčen model organizacije, ki v skladu s svojimi načeli zmanjšuje vplive na okolje.

3.1 Namen izračuna

Glavni nameni izračuna ogljičnega odtisa podjetja Adria Mobil d. o. o. so bili:

- dokazati družbeno odgovornost,
- identificirati najpomembnejše vire emisij TGP,
- načrtovati ukrepe za zmanjšanje vplivov na okolje brez povečanja operativnih stroškov

Polona MOŽE[1], Gašper GANTAR[2,3]
[1]Adria Mobil d. o. o.
[2]Visoka šola za proizvodno inženirstvo
[3]Fakulteta za varstvo okolja

(izračuni ogljičnega odtisa se bodo v prihodnje uporabljali tudi kot mehanizem za spremljanje napredka),
- podpora optimizaciji storitev in razvojnih projektov (oblikovanje okolju prijaznih izdelkov, storitev in procesov),
- obveščanje deležnikov o trendih,
- motiviranje zaposlenih - ozaveščanje vseh zaposlenih o prispevku vsakega posameznika k zmanjševanju negativnih vplivov na okolje.

3.2 Potek izračuna

Ustanovili smo projektno skupino, ki je bila sestavljena iz zaposlenih podjetja Adria Mobil d. o. o. in zaposlenih pri zunanjem izvajalcu Visoke šole za proizvodno inženirstvo. V skladu z zahtevami standardov [1,2] je bil izračunan ogljični odtis celotnega podjetja Adria Mobil d. o. o.

Kot obdobje poročanja je bilo določeno obdobje od 1. 9. 2019 do 31. 8. 2020, saj je to obdobje poslovnega leta, za katerega se pripravijo tudi računovodski izkazi.

Obravnavane so bile emisije iz obsegov 1, 2 in 3. Pri izračunu so bile torej upoštevane emisije TGP, ki nastanejo v podjetju Adria Mobil d. o. o., vključno s prevozi na delo in poslovnimi potmi ter emisijami zaradi odpadkov, povzročenih v podjetju, emisije zaradi porabe električne in ostale energije v podjetju, transportov, izdelave vgrajenih materialov in komponent, uporabljenih storitev, uporabe izdelkov ter ravnanja z njimi po koncu življenjske dobe.

Iz izračuna so bile izključene emisije, ki so posledica uporabe zemljišča, spremembe namembnosti rabe zemljišča in gozdarstva. Podjetje Adria Mobil d. o. o. je proizvodna družba, kjer v opazovanem obdobju ni bilo pomembnejše rabe ali spremembe rabe zemljišč, razen manjšega urejanja okolice.

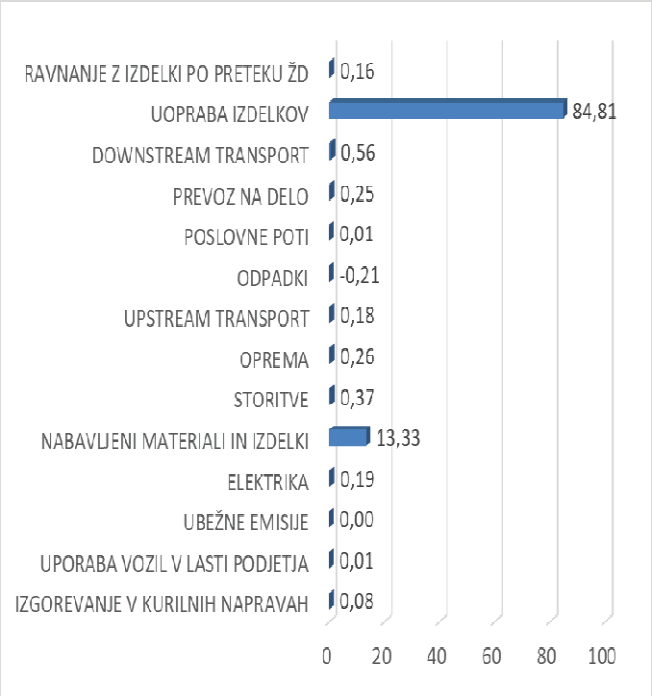
Izveden je bil ogled podjetja in zbiranje podatkov s pogovori z zaposlenimi iz različnih oddelkov (nabava, vzdrževanje, razvoj, okolje, prodaja, računovodstvo, tehnologija, logistika, razvoj, IT…).

Sledila je obdelava podatkov in izračuni. Izračuni so bili narejeni na podlagi emisijskih faktorjev, podanih v Environmental Panel on Climate Changes IPCC in v sorodnih dokumentih. Časovni razpon potenciala globalnega segrevanja (GWP), uporabljen v izračunih, je 100 let.

4 REZULTATI

4. 1. Organizacijski ogljični odtis

Skupni ogljični odtis podjetja Adria Mobil d. o. o. znaša 860.000 ton CO_2-eq. Prispevek posameznih kategorij k skupnemu ogljičnemu odtisu je grafično predstavljen na sliki 1.



Slika 1: Prispevek posameznih kategorij k skupnemu ogljičnemu odtisu podjetja Adria Mobil d. o. o. (v %)

Iz slike 1 je razvidno, da k skupnem ogljičnem odtisu največ prispevata uporaba izdelkov ter vanje vgrajeni materiali in vgradne komponente (oboje sodi v obseg 3).

4.2 Izdelčni ogljični odtis

Po skupnem organizacijskem ogljičnem odtisu podjetja Adria Mobil d.o.o. smo izračunali še ločene ogljične odtise počitniških prikolic, vanov in avtodomov. Ti rezultati so bolj uporabni v razvoju pri zbiranju in vrednotenju idej, kako izboljšati (okoljske) lastnosti vsakega izmed

Polona MOŽE[1], Gašper GANTAR[2,3]
[1]Adria Mobil d. o. o.
[2]Visoka šola za proizvodno inženirstvo
[3]Fakulteta za varstvo okolja

proizvajanih izdelkov. V nadaljevanju poglavja so kot primer predstavljeni rezultati za najbolje značilen avtodom tipa MATRIX, ki je prikazan na sliki 2.

Slika 2: Avtodom MATRIX

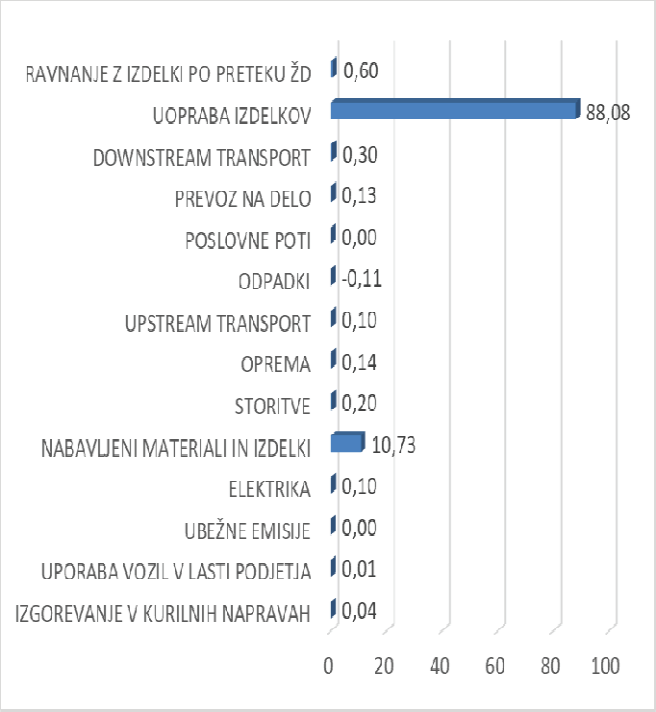
Predpostavke, s katerimi je bil izračuna ogljični odtis avtodoma MATRIX, so predstavljene v tabeli 1.

Tabela 1: Predpostavke glede uporabe avtodoma MATRIX

Vhodni podatek	Vrednost	Enota
		Osnovni podatki
Povprečna življenjska doba	25	let
Letna prevožena razdalja	11.250	km/leto
Povprečna uporaba	60	dni / leto
Povprečno število uporabnikov	4	oseb
Poraba goriva	12,5	litrov/100km
		Poraba energije
Električna energija iz zunanjega vira	6.750	kWh
Elektrika iz nameščenih FV panelov	750	kWh
Propan plin za kuhanje in ogrevanje	1.500	kg
Poraba vode in povzročeni odpadki med uporabo		
Voda iz zunanjega vira	60.000	litrov
Povzročeni odpadki	1.200	kg
		Poraba goriva
Dizelsko gorivo	35.156	litrov
		Vzdrževanje
Motorno olje	112	litrov
Olje v menjalniku	25	litrov
Pnevmatike	80	pnevmatik
Zamenjani leseni deli	35	kg
Zamenjani plastični deli	140	kg
Zamenjani kovinski deli	105	kg
Zamenjane elektronske komponente	17,5	kg
Zamenjane luči	7	kg
Zamenjani tekstilni deli	35	kg
Ostali zamenjani deli	10,5	kg

Predpostavke, predstavljene v tabeli 1, so temeljile na izkušnjah članov projektantskega oddelka in podatkih iz strokovne revije, ki obravnava problematiko kampiranja [3].

Kategorije, ki prispevajo k ogljičnem odtisu avtodoma MATRIX v celotni življenjski dobi so grafično predstavljen na sliki 3.

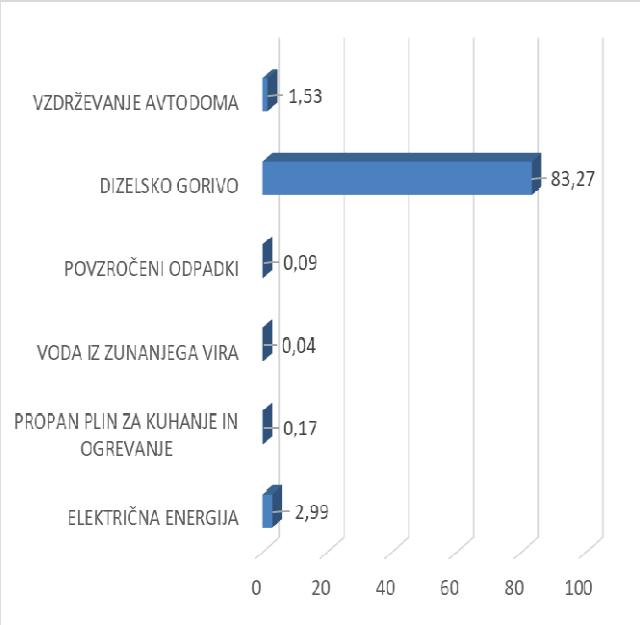


Slika 3: Prispevek posameznih kategorij k skupnemu ogljičnemu odtisu avtodoma MATRIX (v %)

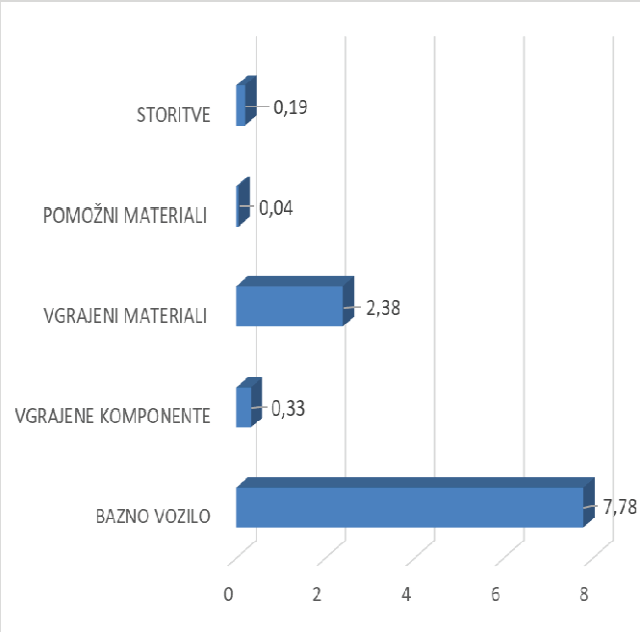
Iz slike 3 je razvidno, da so rezultati podobni kot pri analizi celotnega podjetja. K skupnem ogljičnem odtisu največ prispevata uporaba avtodomov MATRIX ter vanje vgrajeni materiali

Polona MOŽE[1], Gašper GANTAR[2,3]
[1]Adria Mobil d. o. o.
[2]Visoka šola za proizvodno inženirstvo
[3]Fakulteta za varstvo okolja

in vgradne komponente (oboje sodi v obseg 3), ki so podrobneje razčlenjeni na slikah 4 in 5.



Slika 4: Vplivni parametri na ogljični odtis avtodoma MATRIX v fazi uporabe (v %).



Slika 5: Vplivni parametri na ogljični odtis avtodoma MATRIX zaradi vgrajenih materialov in komponent ter storitev za njegovo izdelavo (v %).

5 ZAKLJUČKI

Opravljeni ogljični odtis je omogočil identifikacijo ključnih kategorij izpustov TGP. Predstavljeni izračun je osnova, da lahko podjetje Adria Mobil d. o. o. prepozna ključne priložnosti, kjer so možna največja zmanjšanja izpustov TGP.

Vzpostavljen pristop za učinkovito zbiranje podatkov je mogoče ponovno uporabiti za izračun ogljičnega odtisa za naslednje poročevalsko obdobje. Projekt je posredno omogočil tudi vzpostavitev boljše baze podatkov o nabavljenih materialih, ki se lahko uporabijo tudi za druge projekte znotraj podjetja (na primer za projekte na področju zmanjšanja teže).

Rezultati so bili predstavljeni zaposlenim in vodstvu podjetja. Na podlagi izračunov je bil pripravljen akcijski načrt z aktivnostmi in zastavljenimi cilji tako glede znižanja ogljičnega odtisa podjetja Adria Mobil d. o. o. kot tudi ključnih izdelkov podjetja.

Identificirani so bili sledeči predlogi za nadaljnje delo: priprava primerjalne analize s podjetji v panogi, analiza vplivov na okolje na podlagi natančnejših primarnih podatkov ter priprava poročila o trajnostnem razvoju, katerega sestavni del je pričujoči izračun.

Prepričani smo tudi, da smo z izvedbo projekta ozavestili zaposlene, da lahko sodelujejo pri zmanjševanju negativnih vplivov na okolje.

Na koncu je smiselno dodati nekaj splošnih opomb glede izračunov in rezultatov ogljičnega odtisa. Pri primerjavi ogljičnih odtisov različnih organizacij je potrebno biti pozoren na meje študije, vsaka organizacija mora predvsem stremeti k lastnemu izboljšanju skozi čas. Glavni cilj izračunanega ogljičnega odtisa ni ugotoviti, kdo je odgovoren za emisije, ampak kdo jih je sposoben najbolj zmanjšati. Rezultati so torej smernice, ki ponujajo nov pogled na sistem in nov kazalnik - vplivi na okolje zaradi TGP.

Viri:

[1] Standard ISO 14064
[2] GHG protocol - Corporate Standard
[3] Interni dokumenti podjetja Adria Mobil d. o. o.

NADZOR OBRABE REZALNEGA ORODJA S SISTEMOM STROJNEGA VIDA

Uroš ŽUPERL, Goran MUNĐAR
Laboratorij za Mehatroniko, Univerza v Mariboru Fakulteta za strojništvo.

IZVLEČEK

Pri načrtovanju obdelovalnega procesa z odrezavanjem je eden ključnih vplivnih dejavnikov obraba orodja, ki nastane kot posledica delovanja različnih sil med obdelovalnim procesom. V skladu z avtomatizacijo sodobne proizvodnje obsega naše delo razvoj optične merilne celice za nadzor in meritve rezilnih orodij. Ta zajema načrtovanje, zasnovo in izdelavo merilne celice, ki omogoča pritrditev kamere in njeno premikanje v x in y smeri ter ustrezno vpenjanje orodja. Vključuje tudi implementacijo algoritma za zajem slike iz kamere in njeno obdelavo z zaznavo robov, pretvorbo koordinatnega sistema kamere v koordinatni sistem orodja ter pretvorbo pikslov v milimetre. Končni izhodni parameter meritve so dejanske dimenzije rezila orodja.

1 UVOD

Posodobitev sodobne proizvodnje narekuje vlaganja v nove nadgradnje in vključevanje naprednih tehnologij v proizvodne procese ter uvajanje ukrepov s čim manjšimi posegi človeka. Pri načrtovanju obdelovalnega procesa z odrezavanjem je eden ključnih vplivnih dejavnikov obraba orodja, ki nastane kot posledica delovanja različnih sil med odrezavanjem. Glavni posledici obrabe orodja sta zmanjšana kvaliteta obdelanih površin in manjša natančnost doseganja želenih dimenzij obdelovanca [1]. Da bi zagotovili kakovostno obdelavo in s tem večjo konkurenčnost, želimo, da je vpliv obrabe orodja čim manjši. Dandanes se problem rešuje tako, da CNC operater vsake toliko odstrani določeno orodje iz obdelovalnega stroja, orodje odnese do merilne naprave, kjer se izmerijo dejanske dimenzije orodja. Operater nato posodobi podatkovno bazo orodij s popravki in te popravke orodja nato upošteva pri nadaljnji obdelavi [2].

Ena najbolj inovativnih aplikacij za spremljanje stanja orodja je »Tool Condition Monitoring« (TCM) [3]. Z ustreznimi tehnikami TCM se lahko hitrosti rezanja povečajo za 10-50 %.

Skladno s posodabljanjem in avtomatizacijo sodobne proizvodnje se poraja ideja, da bi lahko obrabo orodij merili neposredno med samo obdelavo. Orodje bi bilo nameščeno v predelu znotraj obdelovalnega stroja, kjer se nahaja sistem strojnega vida, avtomatska meritev in korekcija orodja pa bi se izvajala brez posredovanja človeka. S tem bi prihranili čas, dosegli višjo stopnjo avtomatizacije, zmanjšali morebiten vpliv človeškega faktorja in zagotovili natančno obdelavo. Na podlagi statističnih podatkov in umetne inteligence bi bilo možno tudi vnaprej predvideti, kdaj bo rezalno orodje tako obrabljeno, da ga je potrebno zamenjati [4].

V osnovi lahko sisteme TCM razdelimo v dve skupini: neposredne in posredne [5]. Pri neposrednih TCM se dimenzije in obrabljenost orodja merijo neposredno z uporabo off-line metod (obdelovalni proces je treba med meritvijo ustaviti) z uporabo 3D površinskega profilerja oz. elektronskega ali optičnega mikroskopa. Prej omenjena stanja orodja je mogoče izmeriti tudi z on-line metodami (ne zahtevajo prekinitve obdelovalnega procesa) z uporabo CCD kamer. Pri posrednih TCM se med obdelavo merijo signali kot so sila, tok, moč, hrapavost obdelane površine, akustična emisija itd. Merjenje teh signalov omogoča sklepanje o stopnji obrabe orodja z uporabo on-line metod. Ti sistemi TCM običajno temeljijo na primerjavi referenčnega signala iz optimiziranega postopka rezanja z dejanskim procesnim signalom [6]. Neposredne tehnike TCM imajo nekatere zelo resne omejitve. Za premagovanje teh omejitev se trenutno izvaja

veliko raziskav za določitev stopnje obrabe orodja z analizo različnih slik, pridobljenih z uporabo različnih optičnih senzorjev, kot so laserji, kamere CCD in CMOS ter termalne IR kamere. Obstaja širok nabor aplikacij, ki združujejo optične senzorje z digitalno obdelavo slik in strojnim vidom, ki se uporabljajo za nadzor kakovosti, merjenje obrabe orodij, merjenje površine obdelovanca itd. [7].

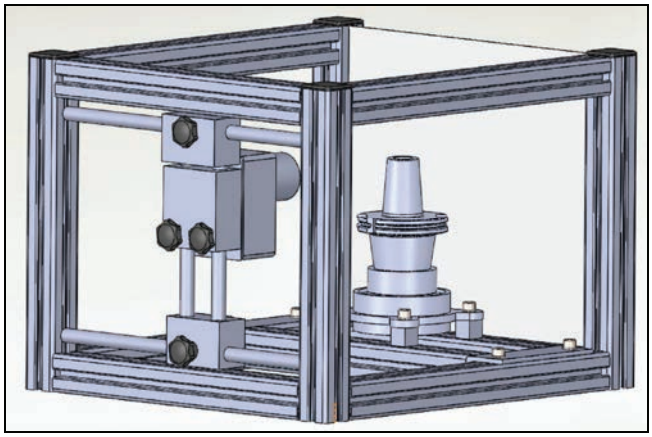
V okviru dela smo razvili optični sistem za nadzor obrabe rezilnih orodij v programskem paketu Sick AppStudio in ga implementirali v prototipni merilni model, ki omogoča zanesljive meritve dimenzij rotacijsko-simetričnih rezilnih orodij. Merilna celica, sestavljena iz aluminijastih profilov omogoča vpetje in fiksiranje orodja na želeno mesto, obenem pa omogoča vrtenje orodja okoli svoje osi, tako da lahko vsako rezalno ploščico na orodju izmerimo z vrtenjem orodja. Razvoj in delovanje izdelanega sistema bo prikazano v naslednjih poglavjih.

2 MERILNA CELICA

V okviru našega dela smo izdelati merilno celico, ki omogoča pritrditev in premikanje kamere v smeri x in y. S tem smo lahko pokrili celotno merilno območje in izmerili različna orodja ne glede na njihovo velikost. Potrebno je bilo najti tudi rešitev za vpetje orodja, ki bo zagotovilo, da bo le-to vedno pritrjeno na isto, točno določeno mesto, ki smo ga določili glede na goriščno razdaljo kamere. Hkrati je bilo potrebno orodju omogočiti vrtenje okoli svoje osi, da bi lahko izmerili vsako posamezno rezilo na orodju. Ker na merjenje obrabe orodja s pomočjo kamere pomembno vplivajo tudi svetlobne motnje iz okolice, je bilo treba zagotoviti stalno osvetlitev in preprečiti prodiranje zunanje svetlobe v merilno celico.

2.1 Mehanski del

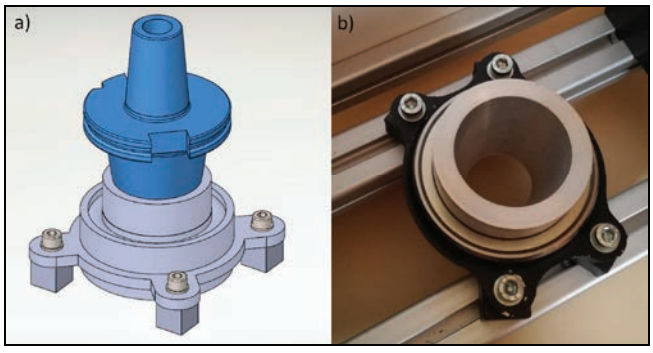
3D model merilne celice je bil zasnovan v programskem orodju Solidworks na podlagi zahtev, ki jih narekuje aplikacija in so opisane v prejšnjem odstavku. Orodje je bilo treba vpeti in fiksirati v želenem položaju, hkrati pa mu omogočiti vrtenje okoli svoje osi. Na orodje je bilo treba pravokotno pritrditi kamero, za orodjem pa namestiti osvetlitev ozadja. Morali smo najti rešitev za premikanje kamere v smereh x in y. 3D model razvite merilne celice je prikazan na Sliki 1.



Slika 1: 3D model merilne celice

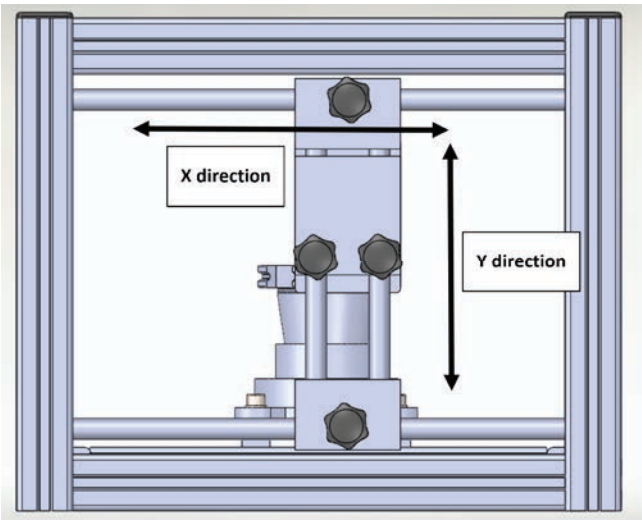
Za lažjo obdelavo je bilo držalo orodja izdelano iz aluminija in je bilo nato vstavljeno v radialni ležaj z ohišjem. Držalo orodja je stožčasto za konus SK 50, kar omogoča stabilno pozicioniranje in vpenjanje orodja. Držalo orodja sestavlja tudi radialni ležaj, ki omogoča prosto vrtenje orodja.

Gibanje držala orodja je možno v smeri x preko štirih vijakov, s katerimi je ohišje ležaja pritrjeno na aluminijaste profile, ali v smeri y s premikanjem dveh aluminijastih profilov po T-utoru. Načeloma ni bilo potrebe po premikanju orodja, saj lahko ta položaj nastavimo s premikanjem kamere, kjer lahko položaj nastavimo bolj natančno in zvezno. Na začetku smo določili položaj orodja v smeri z in ga blokirali. 3D model držala orodja je prikazan na sliki 2a, dejanska izvedba pa na sliki 2b.



Slika 2: a) 3D model, b) Dejanska implementacija

Linearno gibanje kamere v vertikalni in horizontalni smeri je bilo izvedeno preko okroglih vodil, ki so bila pritrjena na aluminijasto ohišje. Položaj kamere določamo s pomočjo vozičkov, ki smo jih iz PETG materiala izdelali s 3D tiskalnikom. Sprostitev in fiksiranje položaja kamere se nastavlja preko štirih navojnih gumbov, ki jih privijemo na vodilo v položaju, v katerem želimo fiksirati položaj kamere. S tem smo zagotovili natančne in dosledne spremembe položaja kamere. Zaradi zagotavljanja konstantne razdalje med kamero in orodjem je premik v smeri z onemogočen. Model pritrditve kamere je prikazan na sliki 3, kjer sta prikazani dve možni smeri premikanja kamere.



Slika 3: Model pritrditve kamere

2.2 Kalibracijska mreža

Glavni namen uporabe kalibracijske mreže je bila pretvorba koordinatnega sistema kamere v koordinatni sistem orodja. Namestiti smo morali kalibracijsko mrežo in preprečiti premikanje v smeri x in y ter njeno vrtenje. Prav tako je bilo potrebno koordinatno izhodišče kalibracijske mreže uskladiti s koordinatnim izhodiščem orodja. Natančne meritve in njihovo ponovljivost smo lahko zagotovili le s kakovostnim vpenjanjem.

2.3 Sistem strojnega vida

Za izdelavo sistema strojnega vida smo uporabili strojno in programsko opremo.

Zgrajen sistem je sestavljen iz naslednje strojne opreme:

- Kamera SICK picoCam304x,
- Stroj za integracijo senzorjev SICK SIMx4000,
- 24 V napajalnik,
- LED osvetlitev ozadja in
- Telecentrični objektiv.

Sliko orodja bo zajemala kamera SICK, ki ima ločljivost 2048 px x 2048 px in omogoča zajem slik s hitrostjo 19 fps. Kamera bo opremljena s telecentrično lečo, ki omogoča zajem slike velikosti 27 mm x 27 mm.

S programskim orodjem SICK AppStudio je bila izdelana aplikacija za določanje obrabe rezalnih robov. V okviru raziskave smo izdelali aplikacijo, ki je poskrbela za zajem slike preko kamere, obdelavo slike, izračun premera orodja in pošiljanje podatkov v oblak. Hkrati smo v okviru razvoja aplikacije izdelali tudi uporabniški vmesnik, ki uporabnikom omogoča enostavnejše izvajanje meritev v merilni celici. Razvita aplikacija bo podrobneje opisana v naslednjem poglavju.

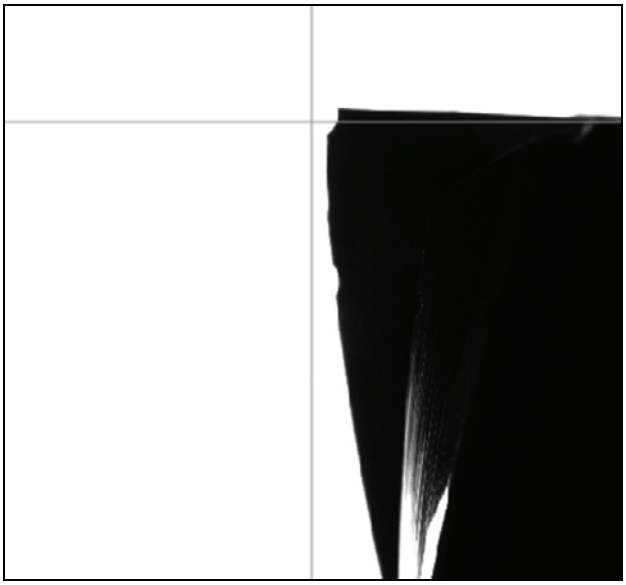
3 APLIKACIJA ZA UGOTAVLJANJE OBRABE ORODJA

Merjenje obrabe orodja spremlja kamera, ki zajeto sliko preko ethernet povezave posreduje stroju za integracijo senzorjev.

Program in uporabniški vmesnik smo razdelili na tri sklope, ki jih izvajamo korak za korakom. Vsak od teh korakov bo predstavljen v naslednjih podpoglavjih.

3.1 Pozicioniranje kamere

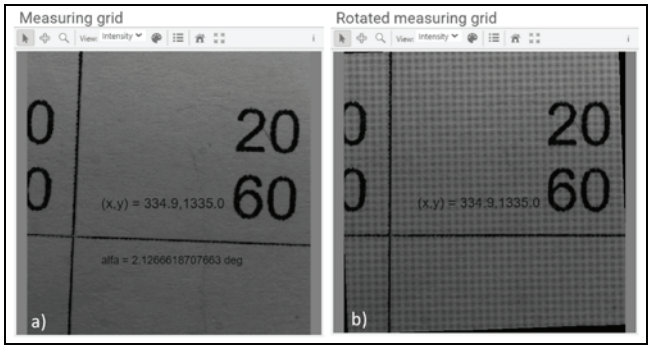
V prvem koraku je potrebno določiti območje, v katerem naj bo zajeta slika. To smo storili z uporabo navpične in vodoravne črte, kot je prikazano na sliki 4. Nato je potrebno orodje fizično postaviti v 4. kvadrant slike, tako da se konica orodja nahaja v okolici presečišča obeh črt. Za risanje črte v vodoravni in navpični smeri je bilo potrebno določiti začetno in končno točko, ki sta določeni v številu slikovnih pik. Tukaj prva komponenta predstavlja število slikovnih pik v smeri x, druga pa v smeri y.



Slika 4: Prvi korak postopka merjenja orodja

3.2 Pretvarjanje koordinatnega sistema

V drugem koraku delovanja aplikacije se izvede povezava koordinatnih sistemov kamere in orodja ter rotacija slike. Za pretvorbo koordinatnega sistema kamere v koordinatni sistem orodja smo uporabili kalibracijsko mrežo z 20 mm rastersko mrežo. Najprej je bilo potrebno orodje odstraniti iz merilne celice in vanjo namestiti omenjeno kalibracijsko mrežo. Po pritisku na gumb "Find measuring grid" aplikacija zajame sliko kalibracijske mreže in poišče presečišče navpične in vodoravne črte na sliki. Aplikacija nato poišče kot zasuka med vodoravno črto na sliki in spodnjim robom slike. Na zaslonu se izpišejo koordinate presečišča najdenih črt in kot zasuka, kot je prikazano na sliki 5a. Aplikacija nato poišče številke, ki so zapisane na kalibracijski mreži. Te številke predstavljajo razdalje x in y presečišča na kalibracijski mreži. Zgornja številka predstavlja x in spodnja y razdaljo presečišča na podlagi izhodišča koordinatnega sistema orodja. Aplikacija na podlagi najdenih številk poveže koordinatni sistem presečišča na sliki s koordinatnim sistemom na kalibracijski mreži. Na koncu drugega koraka aplikacija zasuka sliko tako, da je najdena vodoravna črta vzporedna s spodnjim in zgornjim robom slike, kot je prikazano na sliki 5b.



Slika 5: Drugi korak postopka merjenja orodja

3.3 Merjenje rezalnih robov

Glavni cilj tretjega koraka je najti rezalni rob orodja in konico z največjim premerom. Najprej je bilo potrebno iz celice odstraniti kalibracijsko mrežo in vanjo ponovno namestiti orodje. Orodje je potrebno zasukati tako, da je na sliki jasno viden prvi rezalni rob orodja. Po pritisku na gumb "Measure diameter" aplikacija izmeri premer orodja. Ob pritisku na gumb se slika zasuka za kot, izračunan v drugem koraku, opisanem v poglavju 3.2. Aplikacija nato na sliko nariše majhen pravokotnik, ki ga lahko vidimo na sliki 6. Znotraj tega pravokotnika aplikacija poišče vse točke rezalnega roba orodja. Zaradi uporabe osvetlitve ozadja, ki zagotavlja intenziven kontrast med ozadjem in opazovanim objektom, je mogoče enostavno določiti rezilo orodja, ki je na sliki črne barve, od ozadja, ki je na sliki bele barve. Po uspešnem iskanju rezalnih točk aplikacija določi točko na orodju z najmanjšo x koordinato. To je točka, ki predstavlja največji premer orodja. Premer orodja se izračuna preko enačbe (1).

$$D = 2(r_0 \pm k|x_1 - x_0|) \quad (1)$$

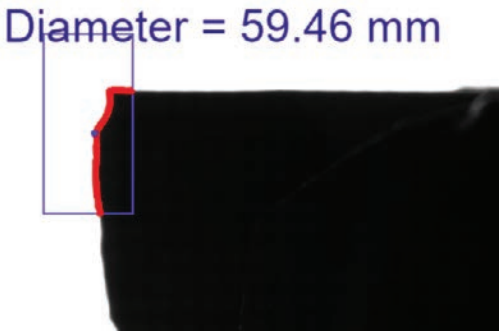
kjer je D največji premer (izražen v mm) rezalnega roba orodja, r_0 je razdalja v smeri x med navpično črto iz koraka 2 in središčem držala orodja (izraženo v mm), k je ločljivost merilnega sistema, x_0 je koordinata x (izražena v px) presečišča črt iz koraka 2 in x_1 je koordinata x (izražena v px) točke na orodju z največjim premerom.
Ločljivost merilnega sistema je mogoče izračunati iz ločljivosti kamere in vidnega polja objektiva. Ločljivost kamere, ki smo jo uporabili

v sistemu je znašala 2048px x 2048px. Vidno polje leče telecentričnega objektiva je 27 mm x 27 mm. Enačba 2 prikazuje izračun ločljivosti uporabljenega merilnega sistema.

$$D = FOV_x / r_c = 27\ mm/2048\ px = 13{,}2\ \mu m/px \quad (2)$$

kjer je FOV_x vidno polje leče v smeri x in r_c ločljivost kamere v smeri x. Vidimo lahko, da je ločljivost razvitega sistema znašala 13,18 µm/px.

S pomočjo enačb 1 in 2 aplikacija izračuna premer orodja. Nato aplikacija na zaslon izriše najdene točke rezalnega roba ter točko z največjim premerom, kot je prikazano na sliki 6.



Slika 6: Tretji korak postopka merjenja orodja

3.4 Uporabniški vmesnik aplikacije

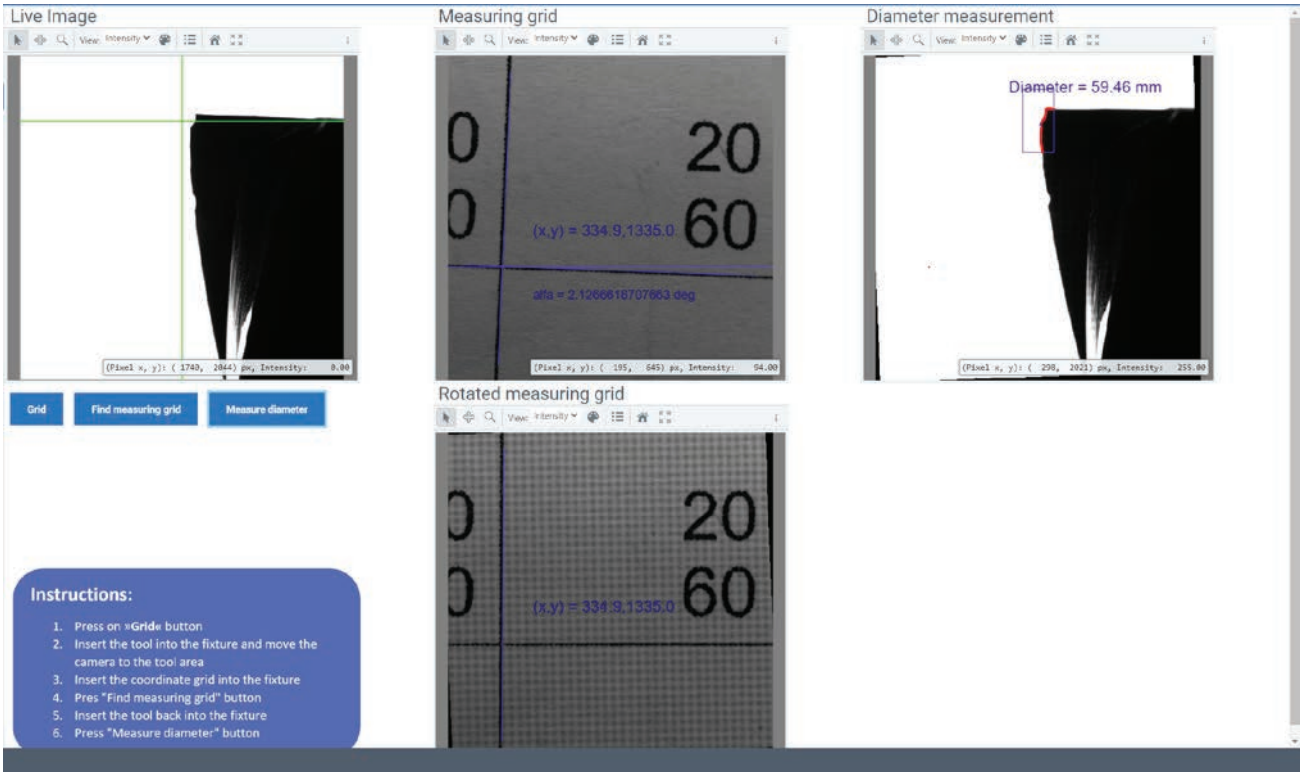
Uporabniški vmesnik aplikacije je izdelan v programskem jeziku html. Uporabniški vmesnik omogoča komunikacijo med uporabnikom in merilnim sistemom.

Uporabniški vmesnik je prikazan na sliki 7. Sestavljen je iz štirih slik, treh tipk in navodil za izvajanje meritev.

Leva slika z imenom "Live image" prikazuje sliko v živo, ki jo pošilja kamera.

Zgornja sredinska slika z imenom "Measuring grid" prikazuje sliko kalibracijske mreže, ki jo dobimo s pritiskom na tipko "Find measuring grid" po namestitvi kalibracijske mreže v merilno celico. Na sliki se prikažejo koordinate najdenega presečišča in kot zasuka slike. Na spodnji sredinski sliki z imenom "Rotated measuring grid" je prikazana zasukana slika kalibracijske mreže in koordinate najdenega presečišča.

Desna slika z imenom "Diameter measurement" prikazuje sliko orodja, ki jo dobimo ob pritisku na gumb "Measure diameter", potem ko je bila v prejšnjem koraku uspešno najdena kalibracijska mreža in je bilo orodje postavljeno nazaj v merilno celico. Slika prikazuje tudi izračunan premer v mm.



Slika 7: Uporabniški vmesnik aplikacije

4 REZULTATI

Rezultate meritev z razvitim merilnim sistemom smo primerjali z meritvami s pomičnim merilom in z meritvami na optičnem merilnem sistemu Zoller smile 420 [8].

Primerjali smo rezultate meritev štirih rezalnih robov orodja z uporabo treh različnih merilnih sistemov. Kot referenco smo uporabili merilni sistem Zoller, ki omogoča natančnejše meritve kot pomično merilo. Rezultati meritev so prikazani v tabeli 1.

Tabela 1: Rezultati meritev

Merilni sistem	Zoller smile 420	Pomično merilo	Naš sistem
Meritve premera [mm]	59,580	59,45	59,552
	59,576	59,40	59,522
	59,572	59,53	59,542
	59,550	59,38	59,467
Povprečje [mm]	59,570	59,44	59,521
Napaka	Referenca	0,219 %	0,082 %

Iz rezultatov je razvidno, da smo z razvitim merilnim sistemom dosegli boljše rezultate kot z uporabo pomičnega merila. Relativna merilna napaka izdelanega sistema v primerjavi z merilnim sistemom Zoller je bila 0,082 %. Relativna napaka pri uporabi merilnika je bila 0,219 %, kar je 2,6-krat več od napake našega razvitega sistema.

5 SKLEP

Ko govorimo o posodobitvi proizvodnje in izpolnjevanju zahtev, ki jih narekujeta industrija 4.0 in industrija 5.0, so potrebe po doseganju višje produktivnosti, zmanjšanju obrabe in poškodb na orodju ključne za zagotavljanje konkurenčnosti na trgu.

Testna optična merilna celica za nadzor obrabe orodij, ki smo jo razvili, izpolnjuje vse potrebe po nadzoru obrabe orodij, na podlagi katere lahko izvajamo korekcijo orodij na CNC stroju. Ne glede na to ima določene pomanjkljivosti in omogoča dodatne razširitve in nadgradnje. Na podlagi izračuna merilne ločljivosti, ki smo ga opravili v poglavju 3.3, smo ugotovili, da naš sistem ne daje zadovoljivih rezultatov glede merilne natančnosti za resne meritve obrabe orodja. Je pa ločljivost kamere povsem zadostna za potrebe testiranja stanja orodja s pomočjo strojnega vida.

Razvit sistem za nadzor obrabe orodja ponuja nekaj možnosti za nadgradnjo obstoječe merilne celice. Uporaba motornega pogona za premikanje kamere v smereh x in y ter uporaba končnih stikal bi poenostavila določanje koordinatnega sistema orodja in pretvorbo koordinatnega sistema kamere v koordinatni sistem orodja. V tem primeru ne bi bilo potrebe po uporabi kalibracijske mreže, kot smo to storili zdaj. Z vsakim premikom kamere bi sistem natančno vedel, kje se nahaja. Z motornim pogonom vrtenja orodja bi bila merilna celica popolnoma avtomatizirana in ne bi bilo potrebe po posegu človeka v merilno celico pri vsaki posamezni meritvi.

Viri:

[1] Teti, R., Jemielniak, K., O'Donnell, G., & Dornfeld, D. (2010). Advanced monitoring of machining operations. *CIRP annals*, 59(2), 717-739.

[2] Mohanraj, T., Shankar, S., Rajasekar, R., Sakthivel, N. R., & Pramanik, A. (2020). Tool condition monitoring techniques in milling process—a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 1032-1042.

[3] Denkena, B., Bluemel, P., Roebbing, J., & Kroening, S. (2009). CONDITION-BASED MAINTENANCE OF MACHINE TOOLS. *Annals of DAAAM & Proceedings*.

[4] Dutta, S., Pal, S. K., Mukhopadhyay, S., & Sen, R. (2013). Application of digital image processing in tool condition monitoring: A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 6(3), 212-232.

[5] Li, D., & Tian, J. (2013). An accurate calibration method for a camera with telecentric lenses. *Optics and Lasers in Engineering*, 51(5), 538-541.

[6] Wang, L., & Gao, R. X. (Eds.). (2006). Condition monitoring and control for intelligent manufacturing. *Springer Science & Business Media*

[7] Župerl, U., Stepien, K., Munđar, G., & Kovačič, M. (2022). A Cloud-Based System for the Optical Monitoring of Tool Conditions during Milling through the Detection of Chip Surface Size and Identification of Cutting Force Trends. *Processes*, 10(4), 671.

[8] ZOLLER Inc., Presetting and Measuring Machine »smile«: The Entry-Level for the Professional Presetting and Measurement of Standard Tools

CELOVIT PRISTOP K VISOKO-UČINKOVITI OBDELAVI

Branko UŠAJ
BTS Company d.o.o. Ljubljana

IZVLEČEK

Vse veča konkurenca in zahteve naročnikov spodbujajo neprestan razvoj tudi na področju visoko hitrostnih obdelav. Podjetja se vse bolj zavedajo kako pomembna je visoko-učinkovita obdelava zahtevnih izdelkov. Za celovit pristop moramo v procesu upoštevati več dejavnikov kot so orodje, priprava orodja, vpetje, stroj…V visoko-učinkovitih odrezovalnih postopkih, zasledujemo bodisi velike odvzeme materiala obdelovanca, najdaljšo obstojnost orodja ali npr. krajši čas obdelave. Na to vplivajo različni dejavniki katerih vpliv na to moramo poznati in upoštevati za vsak posamezen primer obdelave posebej. Ti dejavnik so lahko: visoka rezalna hitrost, velika podajalna gibanja orodja, zapletena geometrija oblike konice orodja, spremenjene stabilnostne razmere obdelovalnega stroja, pravilno in togo vpenjanje orodja….. S pravilno izbiro tehnologije izdelave, izbiro optimalnega rezilnega orodja, kakovostnih in togih vpenjal, merjenjem geometrije orodja in balansiranjem dosežemo zelo kvalitetno obdelavo in nižjo ceno na izdelan kos. Zmanjšamo tudi vpliv obdelav na vreteno stroja in s tem bistveno povečano življenjsko dobo vretena stroja.

1 UVOD

Pri proizvodnji izdelkov in orodij se podjetja srečujejo z vedno krajšimi roki izdelave ter zahtevami kupcev po čim cenejšem in kvalitetnem proizvodu in s tem proizvodnji. Podjetja zato veliko pozornosti namenjajo učinkoviti proizvodnji in izboljšanju produktivnosti. Tehnologija obdelav in nenehen razvoj orodij omogočata obdelave z vedno višjimi obdelovalnimi režimi. Da lahko učinkovito izkoristimo možnosti katere nam omogoča rezilno orodje in stroj potrebujemo tudi primerno vpenjalno orodje katero moramo tudi ustrezno pripraviti. Velik problem pri obdelavah je neustrezna priprava orodja, katera lahko povzroča oplet orodja kateri lahko povzroči prevelike vibracije, preobremenitev določenih rezilnih robov, slabšo obdelavo, delo z manjšimi režimi ter povečano obremenitev ležajev v vretenu in posledično življenjsko dobo vretena ter večje stroške vzdrževanja in življenjske dobe opreme.
S pravilnim pristopom lahko bistveno zmanjšamo stroške rezilnega orodja, izboljšamo učinkovitost, kakovost obdelav, skrajšamo cikle obdelav ter zmanjšamo stroške vzdrževanja opreme. Pravilen pristop in rešitve za pripravo orodja zagotavljajo natančnost, vzdržljivost in zanesljivost, kar ne pomeni le podaljšanja življenjske dobe rezalnega orodja, temveč lahko zaradi učinkovitejše obdelave zaradi izboljšanega oprijema in iztekanja zagotovi tudi zmanjšanje porabe energije. Daljša življenjska doba orodja pomeni, da je mogoče z istim orodjem izvesti več operacij in procesov, kar zmanjša stroške zalog in potrošnega materiala ter omogočata večjo produktivnost in trajnost ter varčujeta z energijo in prispevata k večji donosnosti proizvodnje.

2 PRAVILNA IZBIRA VPENJALNEGA TRNA

Pomembno vlogo pri obdelavah ima pravilna izbira vpenjalnega trna. V sodobnih proizvodnih procesih je potrebno uporabljati držala katera zagotavljajo:

- Dober kontakt trna z vretenom
- Run-out centričnost
- Togost - togost
- Dušenej vibracij
- Moč vpenjanja
- vzdržljivost

3 ČIŠČENJE TRNOV

Pravilna izbira ustreznega vpenjalnega trna igra zelo pomembno vlogo pri stabilnosti procesa, kvaliteti obdelav, življenjski dobi orodja. S kvalitetnimi vpenjalnimi trni prihaja tudi do manj poškodb na stroju in vretenu stroja. Zelo pomembno vlogo pri tem ima visoka togost med vretenom in trnom katera zmanjša obrabo vpenjalne površine. Čista stožčasta držala orodja so bistvena za natančno izdelavo z ustreznimi orodji. Čista držala zagotavljajo natančnost na rezalni površini:

- Zmanjšajte količino izmeta
- Povečajo življenjsko dobo orodja
- Manjši vpliv na vreteno stroja
- Zagotavlja visoko natančnost in zanesljivost procesa
- Ohranja natančnost celotnega orodnega sistema

Tudi minimalni ostanki umazanije lahko povzročijo težave pri doseganju kvalitetnih obdelav in bistveno vplivajo na stanje vretena.

Samo čiščenje stožcev vpenjalnih trnov je bilo včasih zamudno in zahtevno opravilo. Spoznanje kako pomembno je čiščenje trnov je vodilo v razvoj naprav. Modularna čistilna naprava za čiščenje podjetja KELCH RoWi2 nam tako nudi vse, kar potrebujemo za kvalitetno in učinkovito čiščenje.

Samo modularno napravo odlikuje robustno ohišje z integriranim časovnim stikalom, ki preprečuje neprekinjeno delovanje naprave, ergonomska oblika za varno in enostavno uporabo, odporna je na rjo in hladilna maziva in zagotavlja hitro, nežno in zanesljivo čiščenje zelo umazanih ali smolnih držal orodja. Z uporabniku preprosto nastavitvijo omogoča čiščenje različnih trnov.

4 MERJENJE ORODJA

Preden pričnemo z obdelavo moramo nastaviti orodje ter vnesti meritve v stroj. To opravilo je zelo zamudno in med opravljanjem postopka stroj ne deluje in s tem nam ne prinaša denarja. Sama nastavitev orodja je proces ugotavljanja podatkov o geometriji, npr. dolžine, polmera oz. premera rezalnega orodja, s pomočjo naprave za nastavljanje orodij in namenske programske opreme. Pogosto je lahko iskanje orodja v zbirki podatkov stroja za prednastavitev naporno in dolgotrajno opravilo, ki po nepotrebnem izgublja čas. Zahvaljujoč novemu sistemu za samodejno prepoznavanje orodja, postane identifikacija enostavna in hitra. Povezava edinstvene kode podatkovne matrike z vsakim fizičnim orodjem omogoča njegovo identifikacijo v tabelah orodij, shranjenih v stroju za prednastavitev. S to edinstveno kodo je mogoče poiskati eno samo orodje v vseh shranjenih podatkovnih zapisih. Nekatere tehnologije nastavljanja orodij so zmožne tudi ugotavljanja podatkov o radialnem/linearnem profilu in o stanju rezalnega roba. Brezkontaktni sistemi proizvajalca

NIKKEN HATHOR SIX A za nastavljanje orodij zaznavajo prisotnost orodja in s pomočjo optike in s funkcijo SAMODEJNO IZOSTRENJE, ročno posredovanje operaterja ni potrebno. Prav tako lahko nastavite prednost merjenja za os X ali Z. Ravno tako ni potrebno vnašati podatkov saj programska oprema samodejno prepozna število rezalnih robov in glede na velikost orodja poveča ali zmanjša hitrost vrtenja za boljši zajem meritev. Novo razvita funkcija samodejnega merjenja na Hathor SIX Presetter uvaja funkcijo, ki je edinstvena na tej vrsti stroja. Ko se izvede "samodejno merjenje", se vreteno vrti s hitrostjo, ki se izračuna na podlagi obrobnega premera orodja, da se zagotovi, da je rezni rob zajet z najvišjo stopnjo natančnosti. Poleg tega, ker se približuje najvišja točka vsakega posameznega reznega roba, programska oprema izračuna pojemek in pospešek vretena, da se zagotovi absolutno natančno merjenje vsakega reznega roba. To je za razliko od drugih strojev na trgu, ki uporabljajo eno stalno vrtilna hitrost, ki temelji na nastavljenem premeru orodja, namesto tega pa povezujejo funkcijo samodejnega merjenja presetterja s premerom orodja, ki se meri. Uporaba naravnega granite za podnožje in steber zagotavlja toplotno in dimenzijsko stabilnost, zaradi česar je ta stroj natančen in zanesljiv. Struktura je izdelana tudi iz visoko mehansko odpornega nerjavečega jekla, zaradi česar je izjemno robustna. Stroj, ki dobesedno zdrži preizkus časa. Hathor SIX A je opremljen z merilnim območjem premera 400 mm in višine 600 mm, zamenljivo rotacijsko vreteno je opremljeno s pnevmo-mehansko zavoro vrtenja, premikanje osi pa je ročno (sprostitev poteka preko enega pnevmatskega nadzor). Prav tako lahko uporabljajo zamenljiva vretena za vse vrste strojnih konusov (ISO, BT, DIN, HSK ali poligonalni konus). Hathor SIX A je lahko opremljen z novim sistemom za samodejno prepoznavanje orodja. Uporabniški vmesnik prikazuje vse glavne funkcije prednastavitve na enem samem zaslonu. Ker je izjemno uporabniško prijazen, vsakemu operaterju z osnovno izobrazbo omogoča merjenje X, Z, kotov in radijev. Te različice imajo tudi možnost naknadne obdelave in pošiljanja korektorjev orodja neposredno v najpogostejše numerične kontrole. Hitro gibanje je združeno s fino nastavitvijo, kar vam omogoča enostavno zaznavanje rezalnega roba. Poleg tega lahko z uporabo programske opreme TD SIX, ki jo je razvil Elbo Controlli NIKKEN, pridobite meritve orodja, jih nato vstavite v preglednico orodij in ustvarite datoteko, ki vsebuje odmike orodja. Programska oprema TD SIX obdeluje podatke v več kot 50 CNC postprocesorskih formatih.

Z uporabo naprave bistveno skrajšamo čas menjave orodij na stroju. Po izvedenem merjenju orodja je potrebno orodje še balansirati.

.

5 BALANSIRANJE

Dobro in gladko delovanje orodij in drugih rotacijskih teles je nepogrešljivo. Nepogrešljivi so tudi inteligentni sistemi za uravnoteženje.

Balansiranje je kompenziranje neenakomerno razporejene mase na vrtečem kosu. Pri vrtenju (v našem primeru večinoma okroglih kosov) se zaradi toleranc pri izdelav, ali pa zaradi potrebe po takem izdelku (primer pritrdilni vijak na weldon trnu) v praksi vedno povzroči debalans.

Debalans je, ko gravitaciski center kosa (S), zaradi debalansirane mase (Mu) ni na osi vrtenja kosa. Večja kot je razdalaja med osjo vrtenja in S, večji je debalans (razdaljo predstavlja količina e).

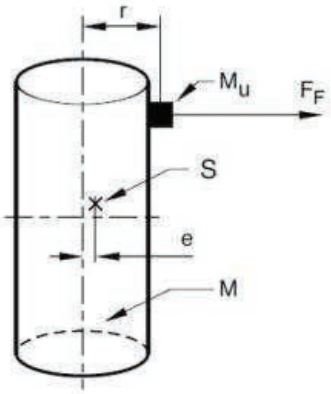
Mu = debalansirna masa (v g)

r= razdalja od osi vrtenja do središča debalansirne mase (v mm)

M= masa kosa

e= razdalja med osjo vrtenja in gravitacijskim centrom kosa

S = garavitaciski center kosa



Balansirati je potrebno vedno ko se pojavi ena od teh situacij:

- Pri delovnih hitrostih nad 8000min $^{-1}$
- Za nesimetrične rotorje
- Pri uporabi trdih rezalnih ploščic (npr. keramika, CBN, PCD)
- Za stroje s keramičnimi ali hibridnimi ležaji

5.1 Kje se pojavi debalans?

➢ Vreteno stroja

Balasiranje vretena CNC stroja je zapleten postopek, ki ga lahko opravi samo za to usposobljen serviser. Običajno se balasiranje vretena opravlja na daljše časovno obdobje ali v primeru, da je prišlo do preobremenitve ali naleta pri obdelavi. Balansiranje vretena vam lahko ponudimo v okviru BTS servisa.

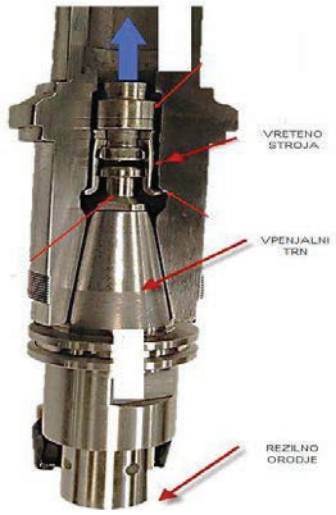
➢ Vpenjalni trn

Debalans vpenjalnih trnov varira glede na proizvajalca in način vpenjanja. Imajo standardiziran dovoljen debalans. Običajno, proizvajalec navede ta podatek v opisu trna. Število sestavnih delov v samem trnu lahko vpliva na končno točnost trna, tako na primer veljajo nakrčni, trni na SK puše proizvajalca NIKKEN in hidravlični trni za najbolj precizna vpetja na tržišču.

➢ Rezilno orodje

Standardna rezilna orodja, kot so svedri, rezkarji, povrtala so običajno simetričnih oblik in sorazmerno majhnih mas, glede na vpenjalne trne, tako, da samo orodje pred obdelavo ni potrebno balansirati.

Na balansirnih napravah balansiramo sestav vpenjalnih trnov (z vlečnimi vijaki) in rezilnega orodja.



5.2 Vpliv debalansa

Debalans povzroča centrifugalno slio, ta pa upliva na:

- Življenjsko dobo vretena (povečana obremenitev ležajev)
- Oplet orodja, kar pomeni preobremenitev določenih rezalnih robov. Na primer pri precizni obdelavi obdelava z predpisanim pomikom 0,02 mm/vrt in z debalansom 0,01mm lahko povzroči dvojni pomik na rezilnem robu.
- Oplet orodja, kar pomeni slabšo obdelavo
- Zmanjševanje predpisanih parametrov

5.2 Načini balansiranja

Statično balansiranje

St atično balnsiranje lahko smatramo kot osnovno balansiranje. Statični debalans je možno meriti z rotacijskim merilnim strojem ali z balansirnim tehtnicami, kjer se merjenec ne vrti. Pri rotaciji merjenca se pojavljavljajo centrifugalne sile pravokotno na os vrtenja.

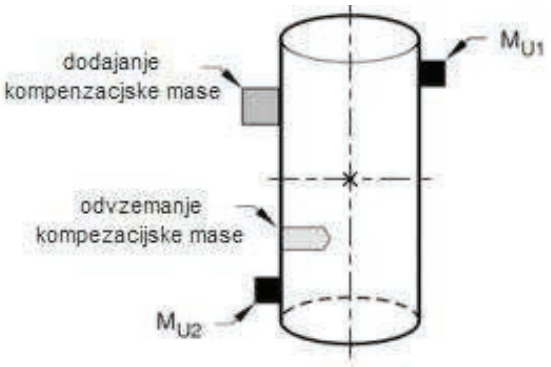
Večravninsko oziroma dinamično balansiranje

Pri merjencu, kjer je center gravitacije na osi vrtenja so debalansirne mase na različnih ravninah, zato lahko pride do vibracij. Dinamični debalans je možno odpraviti samo na vrtečih balansirnih napravah. Tak debalans odpravimo z balansiranjem v več ravninah.

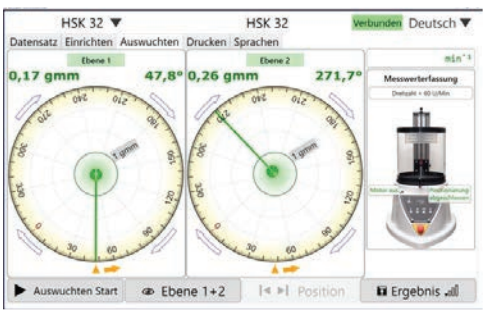
Dinamično balasiranje je potrebno pri dolgih merjencih (naprimer trni za dolga izpetja rezilnega orodja)

Balansiranje lahko izvajamo na več načinov:

- z dodajanjem materiala
- z odvzemanjem materiala
- s spreminjanjem težišča (balansirni obroči)

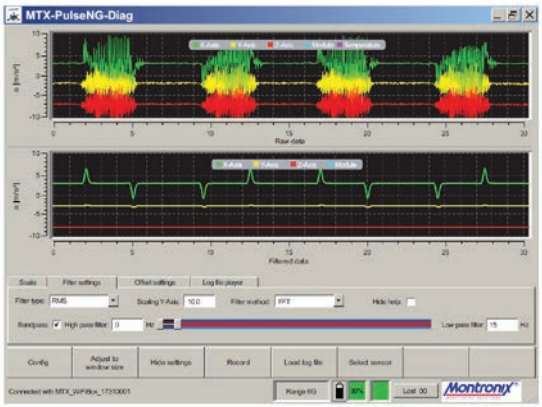


- MPM Micro Praezision Marx je naprava s katero lahko najenostavneje izvedemo postopek balansiranja in zazna že ravnovesja manjša od 0,1 grama. Omogoča 1 in 2 ravninsko uravnoteženje in lahko uporabljamo metode izravnav: gram, stopnja, kot širjenja, fiksna lokacija, radialno + aksialno vrtanje, rezkanje. Sama naprava ima HDMI vmesnik za dodatno vizualizacijo na zunanjem monitorju



6. DIAGNOSTIKA MOBILNIH STROJEV

Na samem stroju lahko za optimalno obdelavo izvajamo meritve s pomočjo opreme proizvajalca MONTRONIX. Mobilno diagnostično orodje WiFi BoxNG nam pomaga prepoznati težave kot so težave strojnih komponent, vibracije...



S pomočjo tako pridobljenih podatkov lahko opravimo analizo stanja in pravočasno ukrepamo in s tem zmanjšamo stroške proizvodnje in vzdrževanja.

7. ZAKLJUČEK

Pravilen pristop in rešitve za pripravo orodja zagotavljajo natančnost, vzdržljivost in zanesljivost, kar ne pomeni le podaljšanja življenjske dobe rezalnega orodja, temveč lahko zaradi učinkovitejše obdelave zaradi izboljšanega oprijema in iztekanja zagotovi tudi zmanjšanje porabe energije. Daljša življenjska doba orodja pomeni, da je mogoče z istim orodjem izvesti več operacij in procesov, kar zmanjša stroške zalog in potrošnega materiala ter omogočata večjo produktivnost in trajnost ter varčujeta z energijo in prispevata k večji donosnosti proizvodnje, zmanjšajo se tudi vpliv orodja na stroj in vreteno. Zavedati se moramo da lahko nepravilna uporaba vpenjalnega in rezilnega orodja poškoduje vreteno in s tem povzroči strošek popravila oziroma zamenjave od 15.000 EUR za enostavnejša ter celo preko 50.000 EUR za zahtevnejša vretena.

PRIMERJAVA KONČNIH ELEMENTOV PRI SIMULACIJAH PREOBLIKOVANJA PLOČEVINE

Mitja VIDMAR[1], Marko VRH[1,2]
[1]Univerza v Novem mestu Fakulteta za strojništvo
[2]CADCAM Lab d.o.o.

IZVLEČEK

Vse kompleksnejše geometrije izdelkov in uvajanje novih materialov pločevine postavljajo orodjarstvu nove izzive. Ti zahtevajo vse bolj natančne podatke o materialu in vse bolj zanesljive metode za simulacije preoblikovanja pločevin, ki lahko ob neustrezni uporabi pripeljejo do napačnih rezultatov. Zato smo v prispevku z izvedbo simulacij preoblikovanja pločevine med seboj primerjali lupinske in volumske elemente pri geometriji osnosimetričnega izdelka. Simulacije so pokazale, da se na območjih lokaliziranega stanjšanja le v primeru uporabe volumskih elementov rezultati ujemajo z eksperimentalnimi podatki. S tem znanjem lahko bolj zanesljivo simuliramo postopke preoblikovanja pločevine.

1 UVOD

Na področju preoblikovanja pločevine obstajajo številni programi za numerične simulacije, s katerimi lahko predvidimo obnašanje materiala med preoblikovanjem, kar zmanjša drage preizkuse na prešah in popravljanje orodij. Predvidimo lahko lokacijo in velikost stanjšanja, odebelitve, gubanja in porušitve materiala. Ti programi uporabljajo različne tipe elementov, eni izmed njih so lupinski in volumski. Če ne poznamo delovanja in pravilne uporabe teh elementov, nam lahko simulacije pokažejo nerealne rezultate.

Preoblikovanje pločevine je proces, kjer iz pločevine s postopki rezanja, upogibanja in preoblikovanja dobimo izdelek. Pločevino pridobimo z vročim in hladnim valjanjem surovcev iz različnih materialov, kot so jeklo, aluminij, baker, medenina in titan. Nato orodje preizkusimo na preši, kjer zatem sledi včasih dolgotrajen postopek popravljanja geometrije orodja in preizkušanja, dokler ne dobimo željenega rezultata.

Da skrajšamo razvojni čas orodja si z numeričnimi simulacijami pomagamo pri načrtovanju orodij za preoblikovanje pločevine. Tako preizkusimo proces v virtualnem okolju, kjer lahko s hitrimi iteracijami ugotovimo tako prve večje napake, ki bi pomenile spremembo koncepta samega orodja, kot tudi lokalne pojave gubanj in tanjšanja pločevine.

Pri simulacijah preoblikovanja pločevine tako obravnavamo trdnine, kjer nas zanimajo razmerja med pomiki, specifičnimi deformacijami in napetostmi ter velikost zunanje obremenitve. Za izdelke z zahtevno geometrijo in veliko stopnjo preoblikovanja je nujno, da pri tem upoštevamo lastnosti materiala, kontakt med orodjem in pločevino, hitrost preoblikovanja in druge specifike. Prav tako pa je pomembno, da izberemo ustrezen tip končnega elementa.

2 MKE IN IZBIRA KONČNEGA ELEMENTA

Metoda končnih elementov ali MKE omogoča iskanje približne rešitve parcialnih diferencialnih enačbe za problem robnih vrednosti. Pri obravnavanju trdnin na nivoju končnih elementov, ki predstavljajo dele celotne obravnavane geometrije, aproksimiramo polja pomikov. Z uporabo šibke oblike enačb mehanike trdnin dobimo algebraične enačbe, ki jih na nivoju celega telesa zapišemo v enačbo:

$$\mathbf{K} \cdot \boldsymbol{u} = \boldsymbol{F} \qquad (1)$$

kjer je $\mathbf{K}$ globalna togostna matrika celotnega obravnavanega telesa, $\boldsymbol{u}$ je globalni vektor vseh

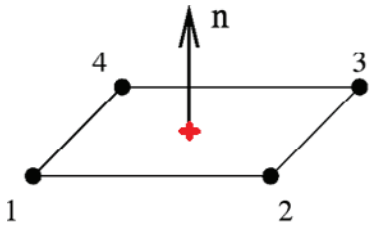
Mitja VIDMAR1, Marko VRH1,2
[1]Univerza v Novem mestu Fakulteta za strojništvo
[2]CADCAM Lab d.o.o.

pomikov v vseh vozliščih celotnega obravnavanega telesa in ***F*** globalni vektor vseh delujočih vozliščnih sil.

Izbiramo lahko med številnimi tipi končnih elementov, mi bomo predstavili in v nadaljevanju uporabili dva tipa iz Abaqus knjižnice končnih elementov, in sicer lupinski S4R in volumski C3D8R.

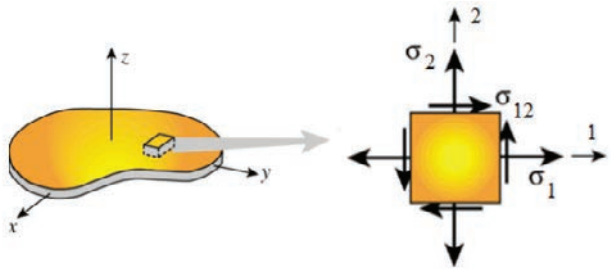
2.1 Lupinski element S4R

Končni element S4R spada v družino lupinskih elementov, prikazan je na sliki 1. S4R je okrajšava za lupinski 4-vozliščni element z reducirano integracijo.



Slika 1: Končni element S4R

Na splošno imajo lupine debelino bistveno manjšo od drugih dveh razsežnosti. Za opis tega stanja uporabljamo tako imenovano ravninsko napetostno stanje (RNS) prikazano na sliki 2, ki velja tudi za element S4R.



Slika 2: Ravninsko napetostno stanje

Pri tem so vse napetosti, ki delujejo na materialno točko v isti ravnini. Tako lahko predpostavimo, da so prečne napetosti pravokotno na ravnino zanemarljivo majhne. Posledično lahko zato modeliramo le srednjo površino pločevine z lupinskimi elementi. Za splošen opis napetostnega stanja moramo uporabiti 6 med seboj različnih komponent, pri RNS pa le tri, in sicer σ_{11}, σ_{22} in τ_{12}. Če izpišemo napetostni tenzor za RNS dobimo:

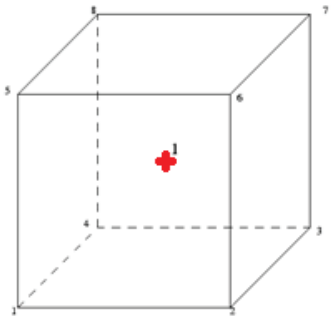
$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & 0 \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Kljub upoštevanju ravninskega napetostnega stanja pa se zaradi Poissonovega razmerja (oz. ohranitve volumna v plastičnem) v lupinah pojavijo prečne specifične deformacije v smeri pravokotno na ravnino. Pločevini se namreč ob nategu zaradi deformacije debelina zmanjša, ob tlaku pa poveča.

Pomembno je, da se zavedamo, da je RNS posplošitev dejanskega napetostnega stanja, do katerega pride pri preoblikovanju pločevine in v nekaterih primerih ne zadostuje za dosego točnih rezultatov s simulacijami.

2.2 Volumski element C3D8R

Končni element C3D8R spada v družino volumskih elementov, prikazan na sliki 3. C3D8R je okrajšava za volumski, 8-vozliščni končni element z reducirano integracijo.

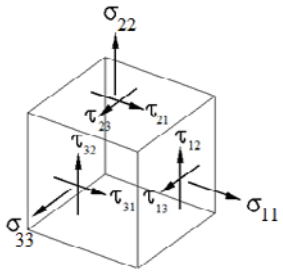


Slika 3: Končni element C3D8R

C3D8R ima 8 vozlišč, kjer ima vsako vozlišče 3 prostostne stopnje in sicer pomike v vseh treh smereh koordinatnega sistema. Pri uporabi tega elementa upoštevamo splošno napetostno stanje:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Mitja VIDMAR1, Marko VRH1,2
[1]Univerza v Novem mestu Fakulteta za strojništvo
[2]CADCAM Lab d.o.o.



Slika 4: Prikaz napetosti v 3D stanju

S tem končnim elementom dejansko modeliramo debelino pločevine z večimi končnimi elementi po debelini in lahko tako bolj natančno popišemo dogajanje in napetosti do katerih pride pri preoblikovanju pločevine.

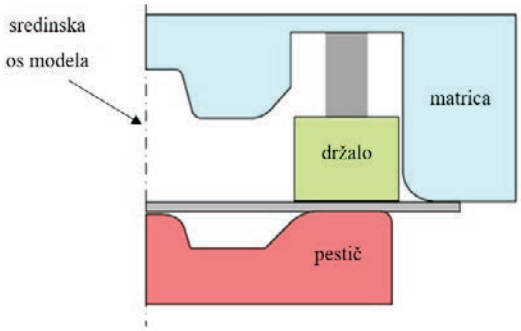
3 UPORABA PROGRAMA ABAQUS PRI SIMULACIJAH PREOBLIKOVANJA PLOČEVINE

3.1 O programski opremi Abaqus

Abaqus je programska rešitev za simulacije in reševanje fizikalnih problemov z metodo končnih elementov. Še posebej se izkaže pri reševanju težav povezanih s kontakti, nelinearnosti materiala in pri simulacijah na kompozitnih materialih. Vgrajene ima implicitne in eksplicitne solverje, omogočena pa je tudi možnost širitve funkcionalnosti s skriptami in uporabo podpogramov. Abaqus je splošno sprejet tako v akademski sferi kot v praksi kot eden najzaneslivejših in natančnejših programov v kategoriji strukturnih simulacij. Uporabljajo ga v številnih industrijskih panogah, še posebej je razširjen v avtomobilski in letalski industriji. V tem članku smo ga uporabili za simulacije preoblikovanja pločevine.

3.2 Primer osnosimetričnega izdelka

Za primerjavo končnih elementov, smo vzeli primer preoblikovanja iz konference Numisheet 2018, kjer je bil kot vzorčni primer predstavljen primer preoblikovalnosti osnosimetričnega izdelka debeline 2,8 mm, prikazanega na sliki 5. Začetna pločevina je imela okroglo obliko premera 246 mm.



Slika 5: Prerez osnosimetričnega primera

Eden izmed namenov na konferenci je bil jasno določiti lokacijo in velikost tanjšanja na različnih višinah pestiča (torej na različnih globinah globokega vleka). Podani so bili podatki eno in dvoosnih testov, poleg tega pa so podali tudi dejanske eksperimentalne podatke debeline pločevine s preoblikovanjem. Podatki o materialu z oznako SAPH 440 so podani v tabeli 1.

Tabela 1: Podatki o materialu

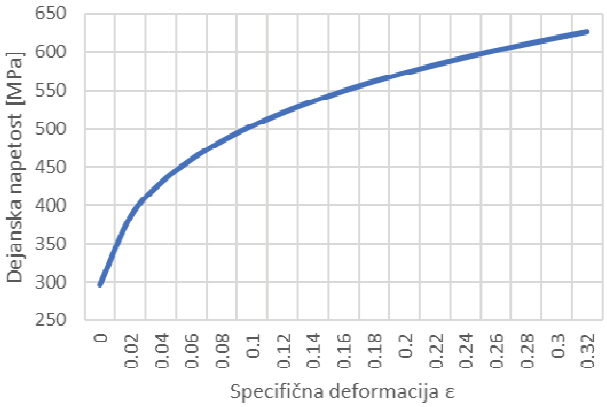
Naziv materiala	SAPH 440 - JIS
Gostota [kg/m3]	7800
Modul elastičnosti [GPa]	206
Meja plastičnosti [MPa]	275–305
Natezna trdnost [MPa]	440
Poissonov količnik	0,3
Koeficient trenja	0,15

Za zakon utrjevanja je bil upoštevan Swiftov zakon utrjevanja materiala, in sicer po enačbi:

$$\sigma_y = 779.1(0.007 + \varepsilon^p)^{0.195} \quad (2)$$

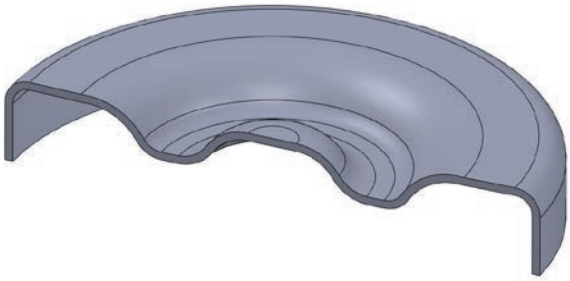
Na sliki 6 je prikazan še graf dejanske napetosti v odvisnosti od specifične deformacije.

Mitja VIDMAR1, Marko VRH1,2
[1]Univerza v Novem mestu Fakulteta za strojništvo
[2]CADCAM Lab d.o.o.



Slika 6: Graf dejanske napetosti v odvisnosti od specifične deformacije (*ang.* true stress strain curve)

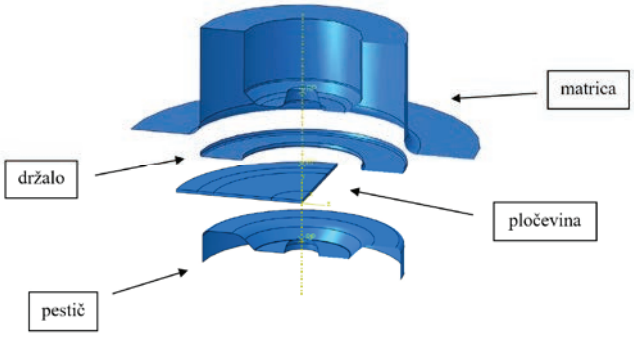
Preoblikovanje je razdeljeno v dve fazi: v prvi z držalom ustvarimo pridrževalno silo 50 kN na pločevino. S tem se izognemo gubanju pločevine med preoblikovanjem. V drugi fazi se zaradi oblike pestiča najprej oblikuje zunanja stena izdelka. Nato se izvede še globoki vlek osrednjega dela izdelka. V začetku druge faze izdelana navpična stena prisili pločevino, da se stanjša na osrednjem delu pločevine. V končni poziciji čezmerno stanjšanje povzroči tudi porušitev materiala.



Slika 7: Prerez končne oblike osnosimetričnega izdelka

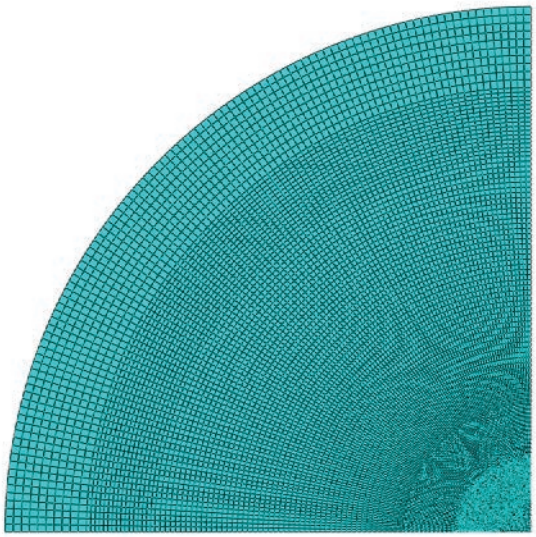
3.3 Priprava modela v Abaqus-u

V programski opremi Abaqus smo zmodelirali pločevino ter površine pestiča, matrice in držala. Obravnavali smo le četrtino celotne pločevine ter upoštevali ustrezne simetrijske robne pogoje. Na sliki 8 je prikazan prerez sestava za analizo.



Slika 8: Priprava analize v Abaqus

Za pločevino smo izbrali dva tipa končnih elementov, in sicer za analizo z lupinskimi končnimi elementi element S4R, za volumske pa C3D8R. Izbrano število končnih elementov pri pločevini je zagotavljalo neodvisnost rezultatov od gostote mreže. Spremljali smo končno debelino izdelka na predelu največjega stanjšanja in tako prišli na skupno število 34 482 lupinskih in 163 789 volumskih elementov. Pri slednjih je imela mreža 5 elementov po debelini pločevine. Na sliki 9 je prikazana mreža elementov S4R za obravnavan primer.



Slika 9: Mreženje pločevine

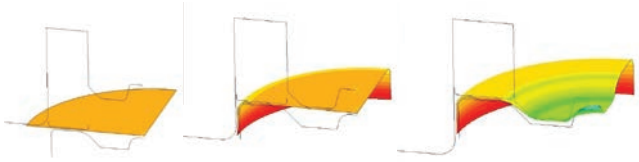
Analizo smo izvedli z uporabo Abaqus Explicit računskega paketa. Za lupinske elemente smo rezultate debeline izpisali iz same programske opreme Abaqus, ki v modulu za postprocesiranje omogoča izpis t.i. lastnosti STH oz. »section thickness«. Pri volumskih elementih pa prikaz debeline pločevine v Abaqusu ni možen, zato smo preoblikovano pločevino po

Mitja VIDMAR[1], Marko VRH[1,2]
[1]Univerza v Novem mestu Fakulteta za strojništvo
[2]CADCAM Lab d.o.o.

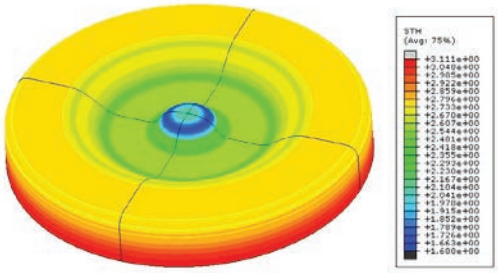
koncu analize uvozili v CAD programsko opremo Solidworks, kjer smo s funkcijo »Thickness analysis« analizirali debelino pločevine. Rezultate smo izpisali v Excelovo tabelo ter izrisali grafe.

3.4 Pregled rezultatov

Na sliki 10 je razviden potek preoblikovanja pločevine, kjer je z barvno lestvico shematsko prikazana tudi debelina pločevine. Rdeči in oranžni odtenki nakazujejo večjo, zeleni in modri odtenki pa manjšo debelino pločevine. Sprva se oblikuje navpična stena, ki pločevino prisili, da se v naslednji fazi preoblikovanja stanjša v osrednjem območju.



Slika 10: Prikaz preoblikovanja v fazah

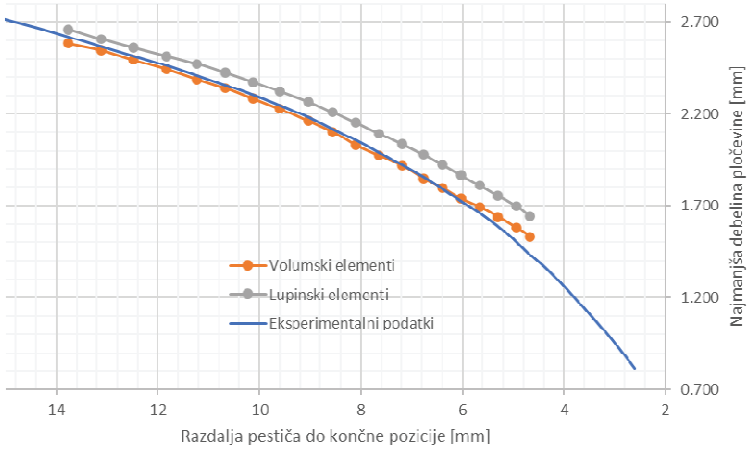


Slika 11: Prikaz končne debeline pri S4R elementu

Najprej smo primerjali debelino med volumskimi in lupinskimi elementi na območju največjega stanjšanja. V tabelo smo izpisali rezultate najmanjše debeline pločevine v odvisnosti od razdalje do končne pozicije (zaprtja orodja) za oba tipa končnih elementov in rezultate prikazali na sliki 12.

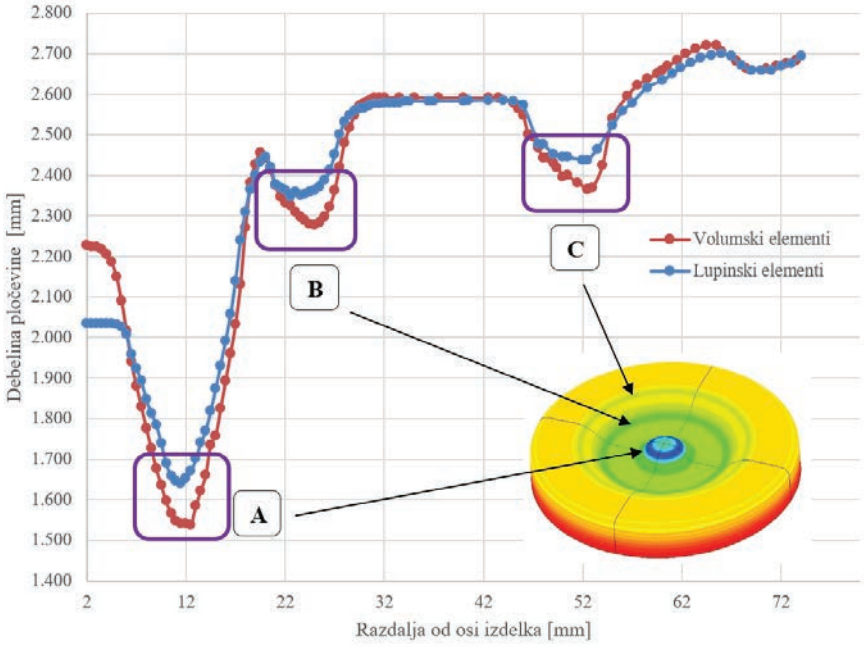
Očitno je, da v območju velikega stanjšanja volumski elementi mnogo bolje popišejo tanjšanje pločevine, medtem ko tanjšanje pri lupinskih elementih zaostaja za eksperimentalnimi rezultati. Če na sliki 13primerjamo še meritve med elementi pri prerezu izdelka na razdalji pestiča 4,67 mm od končne pozicije pestiča opazimo, da na območju z veliko stopnjo preoblikovanja – na primer okoli radijev – z volumskimi elementi dobimo manjše vrednosti debeline pločevine kot z lupinskimi elementi. To opazimo kar na treh mestih na izdelku, kot je vidno na sliki. Opazimo tudi, da so rezultati obeh elementov na območju z manjšo stopnjo preoblikovanja precej skladni. Se pravi, lahko lupinski elementi na teh območjih prav tako natančno opišejo preoblikovanje kot volumski.

Na sredini izdelka oz. na najmanjši razdalji od osi pa je opazno ravno nasprotno razmerje med elementi, kjer volumski pokažejo debelejšo pločevino od lupinskih. Razlog za to je ravno nezmožnost lupinskih elementov, da ti točno popišejo dogajanje v predelu, označenem s črko A. Zaradi tega se stanjšanje preseli na sredinski predel, kar vodi v razliko med rezultati elementov.



Slika 12: Najmanjša debelina pločevine v odvisnosti od zaprtja orodja

Mitja VIDMAR1, Marko VRH1,2
[1]Univerza v Novem mestu Fakulteta za strojništvo
[2]CADCAM Lab d.o.o.



Slika 13: Debelina pločevine

3 SKLEP

V prispevku smo s pomočjo programske opreme Abaqus med sabo primerjali dva različna tipa končnih elementov, in sicer lupinske S4R in volumske C3D8R pri simulaciji preoblikovanja pločevine. Ugotovili smo, da volumski elementi bolje popišejo lokalizirano stanjšanje, torej ko pride do nenadne spremembe stanjšanja na prehodih geometrije in radijih. Tam, kjer je stanjšanje enakomerno porazdeljeno po prostoru, pa oba elementa pokažeta podobne rezultate.

Isti primer preoblikovanja so preučevali tudi V. Gal idr. [1], kjer so prišli do izredno podobnih rezultatov. Rezultate lupinskih elementov so pridobili s pomočjo Autoform programa, rezultate volumskih pa z DEFORM programskim paketom. Ugotovili so, da lupinski elementi niso možni popisati kompleksnega preoblikovanja pločevine, še posebej na območju, kjer pride do lokalnega stanjšanja. Za dosego najboljših rezultatov predlagajo uporabo volumskih elementov, kjer so bile fizične meritve debeline pločevine na izdelku v celoti v skladnosti z dobljenimi rezultati simulacij. Prav tako so izredno podobne rezultate dobili Oliviera M. idr. [2], kjer so volumski elementi pokazali točno skladnost s fizičnimi meritvami debeline pločevine. Iz tega lahko tudi sklepamo, da rezultati niso vezani le na programsko opremo Abaqus, ampak na tip elementa, saj se podobne razlike med tipom elementa pojavlja ne glede na izbiro programske opreme.

Viri:

[1] GÁL, V. in Zs LUKÁCS. Numerical modelling of the thinning behaviour of sheet metal parts. V: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020.

[2] OLIVEIRA, Marta Cristina idr. Forming defects prediction in cup drawing and embossing of a thick steel sheet. V: *ESAFORM 2021 - 24th International Conference on Material Forming*. 2021.

VPLIV KVALITETE POVRŠINE IN PODMERE NA ČAS ERODIRANJA

Rudi PINTAR
Domel d.o.o.

IZVLEČEK

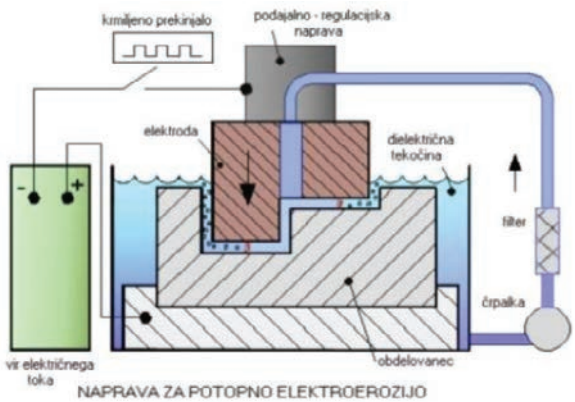
Raziskava je bila zasnovana na želji, da bi pri dotičnem stroju ugotovili povezavo med nastavitvenimi parametri na stroju in izhodnimi veličinami procesa. Ta povezava ni točno poznana, zato se je tehnolog na potopni elektroeroziji o vrednostih nastavitvenih parametrov, odločal na podlagi tehnoloških tabel in priporočil proizvajalca stroja. Metodologija, ki omogoča analizo vplivov, je metoda Taguchi. Metoda ponudi nize parametrov, na podlagi katerih izvedemo testne obdelave in analiziramo rezultate izhodnih veličin. Ugotovimo, da nastavljena hrapavost najbolj vpliva na vse izhodne veličine.

1 UVOD

Orodjarna podjetja Domel izdeluje orodja za obrizgavanje z termoplasti, brizganje duroplastov, ter rezilna orodja za štancanje elektro pločevine. Eden izmed pomembnejših obdelovalnih procesov izdelave orodij je tudi oblikovna erozija. Oblikovna erozija se uporablja predvsem takrat, ko z ostalimi obdelovalnimi procesi ne moremo doseči določenih zahtev (ozka in globoka rebra, zahtevnost oblike…).

2 PRINCIP DELOVANJA POTOPNE ELEKTROEROZIJE

Princip delovanja potopne elektroerozije je enostaven, saj sta obdelovanec in orodje pozicionirana tako, da se ne dotikata, tako kot prikazuje slika 1. Loči ju namreč reža, napolnjena z električno neprevodno tekočino - dielektrikom. Proces se izvaja v namenskem bazenu, obdelovanec in orodje pa sta priključena na vir enosmernega toka. Ko je tokokrog sklenjen in generator pošlje električni impulz, se med njima vzpostavi električno polje. Na začetku tok ne teče, ker dielektrik opravlja nalogo izolatorja. Koncentracija električnega polja povzroči preskok iskre, vzpostavi se električno prevoden kanal plazme in zgodi se razelektritev. Tok se pretvori v toploto. Površina orodja in obdelovanca se na mestu razelektritve močno segreje in material se prične uparjati. Prekinitev toka zniža temperaturo v reži in sesede plinast mehurček plazme. Dielektrik odplakne sparjenimaterial, pri čemer nastane majhen krater. Proces se ciklično ponavlja in z nastajanjem kraterjev oblikujemo površino po obliki elektrode [1].



Slika 1 Shema naprave za elektroerozijo [2]

2.1 Osnovni parametri

Za popolno razumevanje odnašanja materiala z elektroerozijskim postopkom je ključno razumevanje osnovnih parametrov procesa. Med osnovne parametre štejemo tok in časrazelektritve ter dolžino pavze.

Tok razelektritve je vpliven faktor na kvaliteto površine. Z večanjem toka se v material obdelovanca vnese večjo količino toplote, posledično nastane večji erozijski krater in s tem nastane bolj groba površina in obratno.

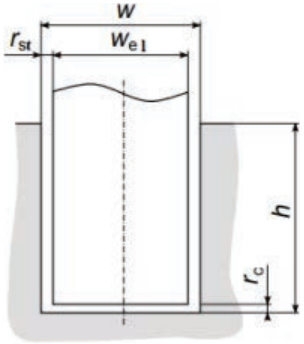
Č**as razelektritve** je ključni parameter potopne elektroerozijske obdelave, saj vpliva na trajanje procesa, obrabo elektrode in kvaliteto površine. Čas razelektritve traja enako časovno enoto, kot traja tok razelektritve. Vse opravljeno delo se izvrši v času razelektritve.

Dolžina pavze je parameter, ki vpliva na trajanje in stabilnost procesa. Čeprav se v času pavze ne dogaja odnašanje materiala, je ta parameter ključnega pomena za doseganje ustrezne kvalitete površine in stabilnosti procesa. Z dovolj dolgim časom pavze se zaključi proces deionizacije dielektrika, reža postane homogena in tozagotavlja naključno pojavljanje razelektritev vreži.

Za natančnost izdelave erodiranega izdelka sta pomembni čelna in stranska reža med elektrodo in obdelovancem, saj je izdelana oblika večja oziroma manjša od elektrode ravno za režo. (Slika 2)

Podmera elektrode se v tem primeru izračuna po enačbi (1).

$$w_e = w - 2 * r_{st} \quad (1)$$



Slika 2 Reža in podmera elektrode

V primeru obdelave na CNC-krmiljenem elektroerozijskem stroju stranska reža nima tako pomembne vloge, saj je elektroda manjša od izdelane oblike za več, kot je stranska reža. V krmilnik je potrebno vnesti podatek o podmeri elektrode, katero krmilnik upošteva pri določitvi trajektorije orbitiranja elektrode.

3 ANALITIČNA METODA TAGUCHI

Metoda Taguchi je statistična metoda, katero je v sredini 20. stoletja razvil japonski inženir in statistik Genichi Taguchi.

Cilj metode je ugotoviti, kateri vhodni faktorji imajo visok statističen vpliv na izhodno veličino opazovanega procesa in katera je optimalna vrednost posameznega faktorja za doseganje željenega rezultata oziroma cilja.

Metoda s pomočjo ortogonalne matrike, določi nize ponovitev testnih obdelav, v katerih so zajete vse možne kombinacije vhodnih faktorjev [3].

3.1 Interpretacija rezultatov metode

Rezultati metode Taguchi so v različnih oblikah, katere je potrebno pravilno razbrati. Sestavljajo jih vrednosti različnih koeficientov in grafov, ki kažejo najbolj vplivne vhodne faktorje in najboljše vrednosti posameznega faktorja za doseganje želenega cilja. Za pravilnointerpretacijo rezultatov je potrebno sleditinaslednjim korakom.

1 korak: Določitev vhodnih faktorjev, ki imajo visok statistični vpliv

Parameter, ki odloča o tem, ali ima vhodni faktor vpliv na izhodno veličino, se imenuje stopnja značilnosti (p-vrednost). P-vrednost predstavlja verjetnost sprejetja rezultata, ki je bolj ekstremen napram ostalim meritvam [4].

Pomemben kazalnik je interval zaupanja, ki ga določata njegova zgornja in spodnja meja. Po navadi se poslužuje interval zaupanja s 95-odstotno gotovostjo. Pri 95-odstotni gotovosti ostaja 5-odstotna stopnja značilnosti oz. stopnja tveganja (α). To stopnjo predstavlja tudi p-vrednost. Pri odločanju, ali ima vhodni faktor visok statističen vpliv na izhodno veličino, je treba slediti naslednjim pogojem: p-vrednost ≤ α: Povezava je statistično pomembna. p-vrednost > α: Povezava ni statistično pomembna.

2. korak: Prepoznava najboljše vrednosti za posamezni kontrolni faktor

Metoda Taguchi išče idealno vrednost vhodnih faktorjev v proces s pomočjo razmerja S/N (angl. S/N ratio). Indeks S/N predstavlja razmerje med močjo signala vhodnega faktorja in močjo signala šuma v procesu. Šum v procesu predstavlja vse pojave, procese ali veličine, na katere nimamo vpliva in jih je težko izmeriti. Višja kot je vrednost razmerja S/N, večjo moč ima signal vhodnega faktorja na izhodno veličino. Optimalna vrednost vhodnega faktorja je torej tista, ki ima največje razmerje S/N [4].

3. korak: Grafična analiza vplivnih faktorjev

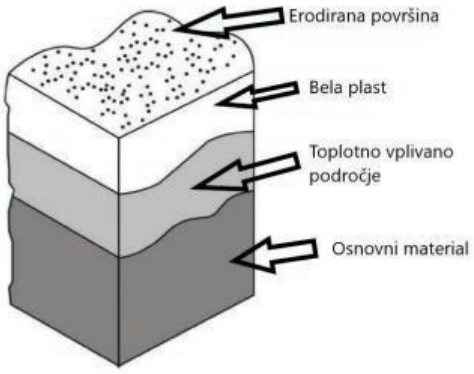
Programsko okolje Minitab omogoča med drugimi tudi grafičen prikaz rezultatov analize.

Grafi predstavljajo vpliv posameznega vhodnega faktorja na izhodno opazovano veličino.

4 BELA PLAST

Pri elektroerozijski obdelavi se toplota generira zaradi pojava razelektritve, ki lokalno segreje obdelovanec do te mere, da se material zmehča in celo upari. Celoten delež izparjenega in del

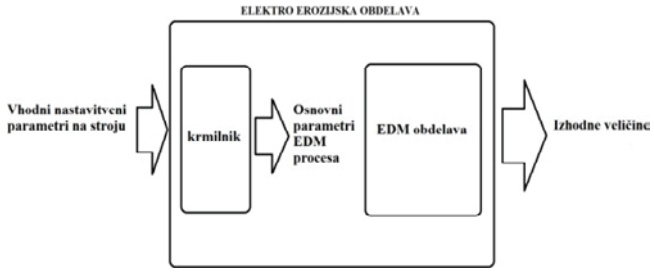
pretaljenega materiala iz reže odnese dielektrik. Del pretaljenega materiala, ki ga dielektrik ne odnese iz reže, ostane na površini. Material, ki ostane na površini, imenujemo bela plast. Podbelo plastjo se formira toplotno vplivano področje, katerega globina je odvisna od toplotne prevodnosti osnovnega materiala. Opisan potek plasti v obdelovancu prikazuje slika 3.



Slika 3 Potek plasti obdelovanca v globino

5 PREDSTAVITEV PROBLEMA

V raziskavi se posvetimo povezavi med nastavitvenimi parametri na stroju in izhodnimi veličinami procesa, kot prikazuje slika 4.

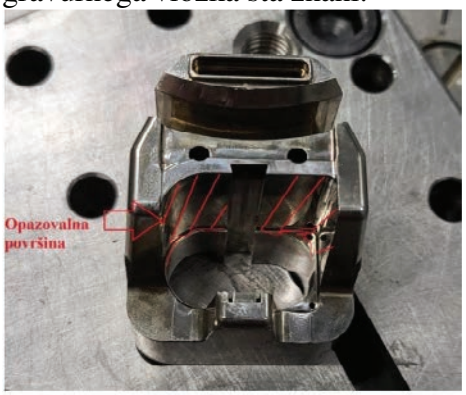


Slika 4 Princip elektroerozijske obdelave

5.1 Osnovna zasnova testa

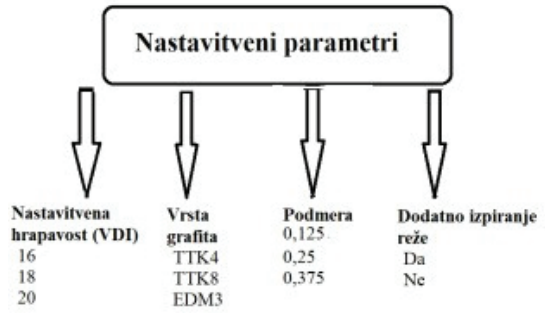
Za izvedbo testnih obdelav smo za osnovo vzeli obliko gravurnega vložka, ki je prikazan na sliki 5. Gravurni vložek je izdelan s pomočjo konvencionalnih obdelovalnih postopkov, kot so rezkanje, brušenje in vrtanje, ter z nekonvencionalnim obdelovalnim postopkom potopne elektroerozijske obdelave.

Za potrebe te raziskave bodo nastavitveni parametri naslednji: vrsta grafita, podmera, izpiranje in VDI (nastavitvena hrapavost). Vrednosti vsakega parametra so prikazane na sliki 6. Naloga bo raziskala vpliv nastavitvenih parametrov na izhodne veličine. Opazovane izhodne veličine so: hrapavost erodirane površine, obraba elektrode, čas obdelave in debelina bele plasti. Oblika in geometrija gravurnega vložka sta znani.



Slika 5 Gravurni vložek z opazovalno površino

Naloga za analizo podatkov uporablja metodo Taguchi, ki nam na podlagi števila nastavitvenih parametrov ponudi število ponovitev testnih obdelav. Ker bo test vseboval večje število testnih obdelav, je smiselno narediti testni obdelovanec, ki bo vseboval večje število gravurnih vložkov

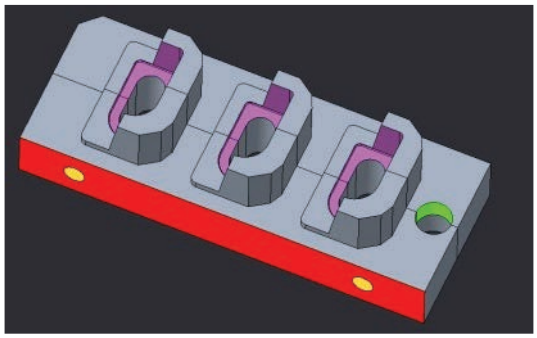


Slika 6 Nastavitveni parametri

Testni obdelovanec je potrebno konstruirati in izdelati, da bo izpolnjeval naslednje pogoje: - zagotavlja enotno centrirno izhodišče za vse strojne obdelave pri izdelavi obdelovanca; - je ustreznih dimenzij, ki omogočajo merjenje hrapavosti (omejitev z dolžino tipala in držala); - je sestavljen iz dveh delov, kar omogoča analizo bele plasti. Z upoštevanjem danih pogojev smo konstruirali testni obdelovanec, ki vsebuje tri gravurne vložke in je prikazan na sliki 7.

5.2 Uporabljeni materiali

V raziskavi smo želeli pridobiti čim bolj realne rezultate, zato smo uporabili materiale, ki se v proizvodnji tudi dejansko uporabljajo. Za gravurni vložek smo uporabili material W360, ki je kaljen na 57 HRc. Za materiale elektrod smo uporabili naslednje materiale: TTK4, TTK8 in EDM3. Fizikalne lastnosti omenjenih grafitov so prikazane v preglednicah 1, 2 in 3.



Slika 7 Testni obdelovanec

Preglednica 1 Fizikalne lastnosti grafita TTK4 [5]

Povprečna velikost zrn [µm]	4
Gostota [g/cm3]	1,78
Električna upornost [µΩ-cm]	1,4
Toplotna prevodnost [W/mK]	89,9
Natezna trdnost [N/mm2]	49
Tlačna trdnost [N/mm2]	135
Trdota [Shore]	72

Preglednica 2 Fizikalne lastnosti grafita TTK8 [5]

Povprečna velikost zrn [µm]	2
Gostota [g/cm3]	1,77
Električna upornost [µΩ-cm]	1,5
Toplotna prevodnost [W/mK]	80
Natezna trdnost [N/mm2]	80
Tlačna trdnost [N/mm2]	155
Trdota [Shore]	78

Preglednica 3 Fizikalne lastnosti grafita EDM3 [6]

Povprečna velikost zrn [µm]	4,88
Gostota [g/cm3]	/
Električna upornost [µΩ-cm]	1,562
Toplotna prevodnost [W/mK]	89,9
Natezna trdnost [N/mm2]	57
Tlačna trdnost [N/mm2]	124,8
Trdota [Shore]	73

5.3 Izvedba preizkusov

V preglednici 4 so prikazani nizi kombinacij nastavitvenih parametrov, ki jih ponudi metoda Taguchi, po katerih se bo izdelalo testne obdelave. Test bo torej vseboval osemnajst ponovitev, pri katerih je osemnajst finih elektrod, vsaka elektroda ima svojo pozicijo s svojimi nastavitvami. Polovico vseh nizov se bo izvedlo z dodatnim izpiranjem reže.

Preglednica 4 Nizi parametrov

Izpiranje	VDI	Grafit	Podmera
Da	16	TTK4	0.125
Da	16	TTK8	0.25
Da	16	EDM3	0.375
Da	18	TTK4	0.125
Da	18	TTK8	0.25
Da	18	EDM3	0.375
Da	20	TTK4	0.25
Da	20	TTK8	0.375
Da	20	EDM3	0.125
Ne	16	TTK4	0.375
Ne	16	TTK8	0.125
Ne	16	EDM3	0.25
Ne	18	TTK4	0.25
Ne	18	TTK8	0.375
Ne	18	EDM3	0.125
Ne	20	TTK4	0.375
Ne	20	TTK8	0.125
Ne	20	EDM3	0.25

6 REZULTATI

Za pridobitev slednjih rezultatov je bilo treba testne obdelave tudi fizično izvesti. Testne obdelave so se izvedle na stroju za potopno elektroerozijo Ingersoll Gantry Eagle G5. Po končani obdelavi je bilo treba gravurne vložke in elektrode pomeriti v primernih laboratorijih s primerno opremo.

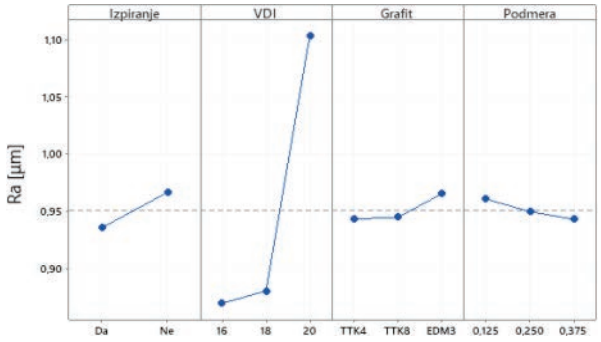
6.1 Hrapavost erodirane površine

Hrapavost erodirane površine je ena izmed najbolj pomembnih izhodnih veličin praktično pri vseh obdelovalnih procesih. . V preglednici 5 so prikazane p-vrednosti nastavitvenih parametrov glede na hrapavost površine. Hitro ugotovimo, da je statistično pomemben vhodni faktor le nastavitvena hrapavost. S pomočjo slike ugotovimo, da najmanjšo vrednost hrapavosti dosežemo z najnižjo nastavitveno hrapavostjo. Vse ostale nastavitve vhodnih faktorjev imajo previsoko p-vrednost, da bi bile statistično pomembne. S pomočjo preglednice 5 ugotovimo, da grafit nima visokega
statističnega vpliva na hrapavost erodirane površine.

Preglednica 5 P - vrednosti nastavitvenih parametrov glede na hrapavost površine

Nastavitveni parameter	P
Izpiranje	0,069
VDI	0,000
Grafit	0,476
Podmera	0,696

Vendar se iz praktičnih primerov v proizvodnji pokaže, da z grafiti, ki imajo manjše osnovnedelce, dosegamo boljše hrapavosti površin kakor z grafiti, ki imajo večje osnovne delce. V testnih obdelavah smo najboljšo hrapavost površine dosegli z grafitom TTK8, ki ima tudi najmanjše osnovne delce.



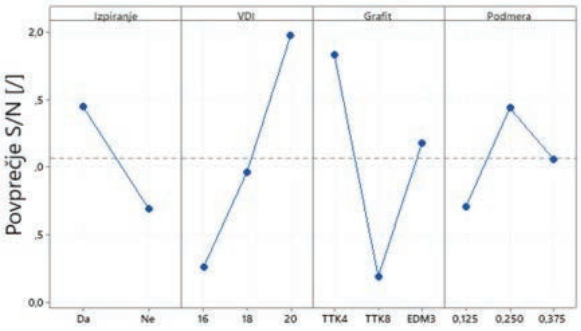
Slika 8 Meritve hrapavosti

S pomočjo slike 8 ugotovimo, da z nastavitveno hrapavostjo VDI 16 dosežemo kvaliteto površine, ki zadošča razredu VDI 19.

Če bi želeli doseči kvaliteto erodirane površine VDI 16, bi bilo treba v programskem okolju Power Spark Editor, ki ga uporablja stroj, sestaviti tehnologijo, ki bi vsebovala manjše vrednosti toka razelektritve, krajši čas razelektritve in daljši čas pavze. S primerjavo vrednosti meritev hrapavosti pri nastavitvah VDI 16 in VDI 18 s slike 8 ugotovimo, da med tema dvema nivojema ni bistvene razlike v kvalitetierodirane površine.

6.2 Čas obdelave

V proizvodnem procesu je čas obdelave velikokrat glavni faktor pri načrtovanju obdelav. V preglednici 6 so prikazane p-vrednosti nastavitvenih parametrov glede na čas obdelave. S pomočjo p-vrednosti lahko naredimo zaključek, da na čas obdelave vplivata nastavitvenahrapavost in vrsta grafita. Najkrajši obdelovalni čas dobimo, če erodiramo z grafitom TTK4. Stem grafitom dosežemo najhitrejši čas obdelave zato, ker ima ta grafit največjo toplotno prevodnost napram ostalima dvema grafitoma, ki smo ju uporabili v testu. (Slika 9).



Slika 9 Vpliv vhodnih veličin na čas obdelave

Višja toplotna prevodnost grafita zagotavlja boljši odvod toplote z mesta razelektritve, kar povzroča nižjo toplotno obremenitev, posledično prihaja do manjše obrabe elektrode in hitrost procesa je višja

Preglednica 6 P-vrednosti nastavitvenih parametrov glede na čas obdelave

Nastavitveni parameter	P
Izpiranje	0,079
VDI	0,015
Grafit	0,019
Podmera	0,347

Na podlagi meritev časa obdelave ugotovimo, da z nastavitvijo VDI 18 dosežemo krajši čas obdelave kakor z nastavitvijo VDI 16. Ker smo v poglavju 6.1 ugotovili, da ni bistvene razlike v hrapavosti obdelane površine med nivojema VDI 16 in VDI 18, ugotovimo, da je uporaba nivoja VDI 16 nesmiselna.

Vse ostale nastavitve vhodnih faktorjev imajo previsoko p-vrednost, da bi bile statistično pomembne.

6.3 Relativna obraba elektrode

Relativna obraba elektrode je izhodna veličina, ki predstavlja pomemben spekter pri načrtovanju števila elektrod. Pri analizi p-vrednosti, prikazanih v preglednici 7, ugotovimo, da noben vhodni faktor nima visokega statističnega vpliva na obrabo elektrode. Do obrabe v realnosti še vseeno pride, saj pri procesu razelektritve prihaja do zelo visokih temperatur, ki talijo in uparjajo material elektrode. Nadaljnje analize o vplivu vhodnih faktorjev na obrabo elektrode bi bile tukaj brezpredmetne.

Preglednica 7 P-vrednosti nastavitvenih parametrov glede na obrabo elektrode

Nastavitveni parameter	P
Izpiranje	0,978
VDI	0,552
Grafit	0,509
Podmera	0,760

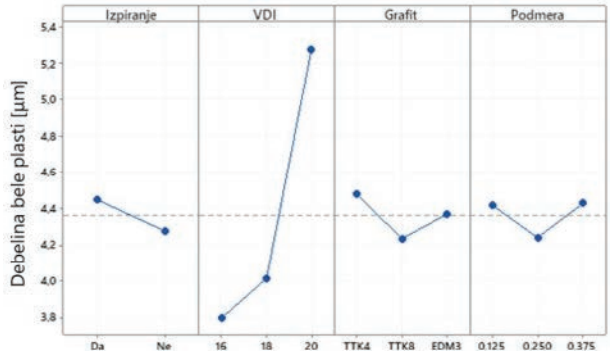
6.4 Debelina bele plasti

Debelina bele plasti je predvsem pomembna v ročni delavnici, kjer je treba to plast ročno odpolirati z obdelovanca. V preglednici 8 so prikazane p-vrednosti nastavitvenih parametrov glede na debelino bele plasti. S pomočjo p-vrednosti lahko naredimo zaključek, da na debelino bele plasti ponovno vpliva le nastavitvena hrapavost. P-vrednosti ostalih vhodnih faktorjev so previsoke, da bi bile statistično pomembne.

Preglednica 8 P-vrednosti nastavitvenih parametrov glede na debelino bele plasti

Nastavitveni parameter	P
Izpiranje	0,165
VDI	0,000
Grafit	0,258
Podmera	0,364

Ugotovimo, da najmanjšo debelino bele plasti dobimo z najbolj fino nastavitvijo.



Slika 10 Meritve debeline bele plasti

Pri fini obdelavi se uporablja najmanjši tok razelektritve, kar pomeni najmanjši vnos toplotne energije v obdelovanec. Ravno obratno se dogaja pri grobi nastavitvi. S slike 10 ugotovimo, da najmanjša debelina bele plasti znaša približno 3,8 µm pri nastavitveni hrapavosti VDI 16, pri nastavitveni hrapavosti VDI 18 pa ta debelina bele plasti znaša 4 µm. Ponovno ugotovimo, da ni bistvene razlike v debelini bele plasti med nastavitvenima hrapavostma VDI 16 in VDI 18.

7 ZAKLJUČKI

Glavni zaključki raziskave so:

- nastavitvena hrapavost VDI je najbolj vpliven nastavitveni parameter.

-Med nastavitvama VDI 16 in VDI 18 ni bistvene razlike v kvaliteti erodirane površine in v debelini bele plasti.

- hrapavost erodirane površine ne ustreza nastavljeni hrapavosti.

-Z grafitom TTK4 dosežemo najkrajši čas obdelave zaradi njegove visoke toplotne prevodnosti.

-Z grafitom TTK8 smo dosegli najboljšo hrapavost površine. Ta grafit vsebuje najmanjše osnovne delce napram ostalima grafitoma, uporabljenima v testu

-Velikost podmere nima nikakršnega statističnega vpliva na katero koli izhodno veličino.

-Noben nastavitveni parameter nima visokega statističnega vpliva na obrabo elektrode.

Opravljena raziskava je pokazala vpliv nastavitvenih parametrov na izhodne veličine. Ugotovitve kažejo, da tehnolog na celoten proces najbolj vpliva z nastavitveno hrapavostjo VDI, ki ima v vseh aspektih glavni vpliv.

8 LITERATURA

[1] J. Valentinčič, Alternativne tehnologije, Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 2012

[2] „Wikipedia,“ [Elektronski]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_discharge_machining.

[3] K. W. Wiliams, Tagucji's quality engineering, New Jersey, 2005.

[4] S. Haldar, „Statistical and geostatistical applications in Geology,“ *ScienceDirect,* Izv. drugi, št. Statistika, p. 19, 2013.

[5] „Toyo Tanso - High performance graphites for EDM,“ [Elektronski]. Available: https://www.toyotansofrance.com/wa_files/EMD_UK.pdf. [Poskus dostopa 14 April 2023].

[6] „Ohio carbon bank - graphite and edm accessories,“ [Elektronski]. Available: https://www.ohiocarbonblank.com/index.php?file=graphitematerial_detail&url=edm-3. [Poskus dostopa 14 April 2023].

ROBOTSKA CELICA ZA MANIPULACIJO Z MEHKIMI IZDELKI

Hubert KOSLER, Aljoša ZUPANC, Matej MERKAČ
Yaskawa Slovenija d. o. o.

IZVLEČEK

V današnjem hitro spreminjajočem se svetu, kjer se tehnologija neprestano razvija, so robotske celice postale ključni element v industrijskih procesih. Manipulacija z dimenzijsko velikimi izdelki iz mehkih materialov vedno predstavlja izziv za tradicionalne robotske sisteme. Članek predstavlja dva projekta, kjer sta uporabljena 6-osna industrijska robota tipa "shelf type". Ključni elementi obeh robotskih celic sta bila razvoj in implementacija inovativnega robotskega prijemala ter zasnova robotske celice za manipulacijo teh zahtevnih izdelkov.

1 UVOD

V današnjem hitro spreminjajočem se svetu, kjer se tehnologija neprestano razvija, so robotske celice postale ključni element v industrijskih procesih. Vendar pa je manipulacija z velikimi izdelki iz mehkih materialov vedno predstavljala izziv za tradicionalne robotske sisteme. Kljub temu pa že obstajajo nekatere rešitve, ki so se izkazale za učinkovite pri manipulaciji trdih kosov. Takšen primer so odlitki. Podjetja letno integrirajo veliko število robotov v različne industrijske panoge, pri čemer se uporabljajo tudi 6-osni roboti za manipulacijo trdih kosov.

Za večino standardnih sklopov je že na voljo prijemalo iz standardnih sklopov, ki je primerno za manipulacijo. Težave se pojavijo, kadar gre za posebne tipe materialov ali velike dimenzije. V takšnih primerih je potrebno razviti posebna prijemala, saj trenutno še ne obstajajo ustrezne standardne rešitve za tovrstne izzive. Industrija ima vedno nove zahteve po robotizaciji in s tem povezane nove izzive, kar spodbuja nadaljnji razvoj in inovacije na tem področju.

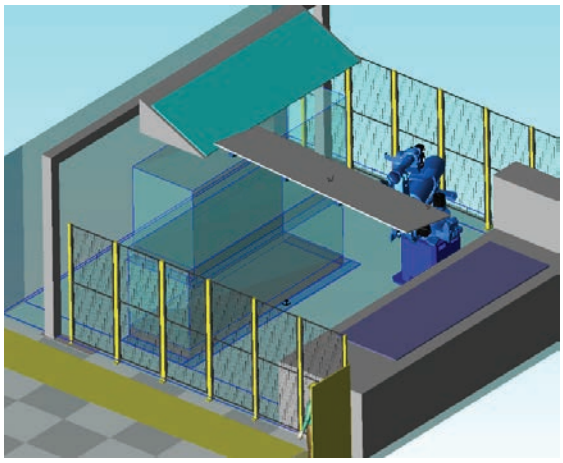
2 ZASNOVA ROBOTSKIH CELIC – DIGITALNI DVOJČEK

Offline simulacije in razvoj virtualnih robotskih celic v programski opremi Motosim-VRC -to je ključno orodje, tako za razvoj konceptov, kot tudi za nadaljnje faze projekta, saj le-ta omogoča preverjanje taktnih časov delovanja, kontrolo kolizij robota z ostalo opremo robotske celice, analizo dosega robota ter programiranje optimalnih robotskih trajektorij. S tem orodjem razvijalci pridobijo celovit vpogled in zaupanje v delovanje koncepta robotske celice, kar omogoča boljšo in enostavnejšo komunikacijo s strankami.

Izdelana offline časovna analiza predvideva čas cikla za predvidene premike robota (robotske trajektorije), na katerega ključno vpliva teža prijemala in center težišča prijemala glede na mesto montaže na robota. Ta čas je zelo natančno ocenjen v Offline simulaciji. Na skupen čas cikla pa vplivajo tudi drugi procesi: čas komunikacije s PLC ali drugimi enotami, čas proženja robotskega prijemala,… ki ga je potrebno oceniti in upoštevati. V vseh točkah robotske trajektorije, kjer robot odvzema ali odlaga izdelke, se robot ne premika. Dejansko potreben čas za spuščanje in prijemanje pa je mogoče določiti šele ob zagonu robotske celice.
V Offline simulaciji je upoštevan najhitrejši čas premikanja, ki ga robot lahko doseže. Dejanske hitrosti, ki jih bo omogočalo prijemalo in izdelki, pa se lahko določi zgolj s testi ali pa poda ob zagonu robotske celice, ob programiranju robota.

Za potrditev delovanja robotskega prijemala je nujno potrebno izvesti teste delovanja in potrditi

zasnovo prijemanja in prenašanja na dejanskih izdelkih.



Slika 1: Strega stroja za brušenje

3 ROBOTSKA CELICA ZA STREGO STROJA ZA BRUŠENJE

3.1 Tehnološke zahteve za robotizacijo

Robotizacija strege stroja za brušenje EPS izdelkov vključuje odlaganje plošč iz vhodne palete na stroj za brušenje. Plošča se brusi ali na obeh straneh ali samo na eni strani. Pobrušene plošče se odlagajo na izhodno paleto. Robot izvede obračanje izdelka.

Ostale tehnološke zahteve projekta:

- Višina polne palete 1700mm (paleta + plošče EPS)
- Višina obdelovalne mize (od tal) znaša 1.280 mm.
- Dimenzija plošč: 4000 x 1300 mm, različne debeline od 10mm do 50mm
- Plošča se brusi ali na obeh straneh ali samo na eni strani
- Zunanje mere robotske celice znašajo 7700 x 8000 mm
- Izvedba komunikacijske povezave s strojem za brušenje. Stroj ni opremljen z komunikacijskim vmesnikom.

3.2 Robotska celica in namensko prijemalo

Robotsko celico smo zasnovali s 6-osnim industrijskim robotom Motoman tip GP165R (nosilnosti 165kg in polmer dosega R=3143mm). Robot je opremljen z vakuum robotskim prijemalom, zasnovanim za prijemanje plošč največje dimenzije 4000 x 1300mm. Pozicije vakuum seskov so optimirane za eno dimenzijo izdelka in sovpadajo z odlagalnim gnezdom na preprijemalni enoti. Vakuum seski imajo več reber in s tem se kompenzira odvzem plošče, ki ni popolno poravnana. Ukrivljenost plošče na vhodni paleti je lahko največ 10mm (±5mm). Za zagotovitev vakuum-a na prijemalnih seskih je predviden venturi element na osnovi komprimiranega zraka.
Robotsko prijemalo je opremljeno z dvema odbojnima laser senzorjema, ki se uporabita za grobo določitev pozicije plošče. Prvi senzor za določitev X in Y pozicije ter drugi senzor za določitev višine plošče. Višina plošče se meri zgolj v eni točki, ostali deli plošče na paleti po višini ne smejo odstopati za več kot ±5mm.

4 ROBOTSKA CELICA ZA STREGO STROJA ZA VZDOLŽNO REZANJE

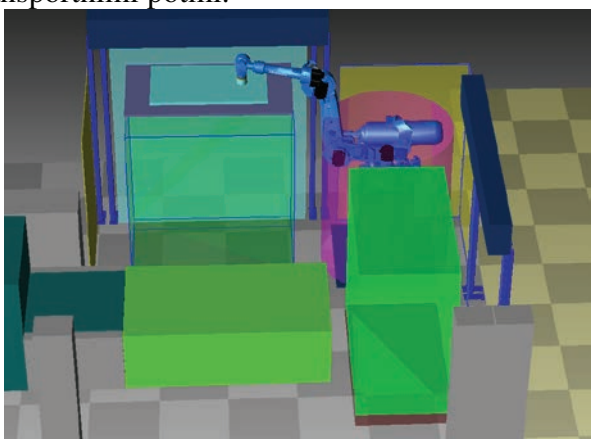
Robotizacija zajema depaletiranje plošč kamene volne in odlaganje na linijo za razrez plošč. Robotska celica je zasnovana za največjo dimenzijo plošč: 2500x1400mm, ki so odložene na paleto do največje višine 2800mm. Na liniji poteka razrez treh tipov plošč: navadna kamena volna, kašírana kamena volna (vodotesni sloj) in volna s filcem. Največja debelina plošč znaša 150mm.

4.1 Tehnološke zahteve za robotizacijo

Zasnova robotske celice omogoča depaletiranje volne iz kupov do največje višine vhodne palete = 2800mm; debelina izdelka: od 26mm do 150mm. Največja teža izdelka znaša 50kg (1 izdelek največje dimenzije oziroma skupna teža izdelkov enega nivoja). Na paleti je lahko več zložajev volne in možna je tudi razlika v višini med posameznimi kupi – vendar ne več kot 10mm od najvišjega kupa do najnižjega kupa. Možne izvedbe: prerezano po dolgem 1 x ali prerezano počez 1x, 2x, 3x.

Na odlagalnem traku morajo biti odložene plošče posameznih odlaganj brez vmesnega praznega

prostora. Layout robotske celice je omejen s transportnimi potmi.



Slika 2: Strega linije za razrez

Pri zasnovi robotske celice in njenih sestavnih delov smo upoštevali naslednje robne pogoje:

- Plošče kamene volne so na palete odležene v kup/-e, vendar robovi plošč niso poravnani. Pri zasnovi robotskih prijemal smo upoštevali, da posamezna plošča ne bo odstopala več kot:
  ±25mm (petindvajset) v X smeri
  ±25mm (petindvajset) v Y smeri.
  ±5mm (pet) v Z smeri.

Robot pred odvzemom NE uporablja dodatne senzorike za detekcijo

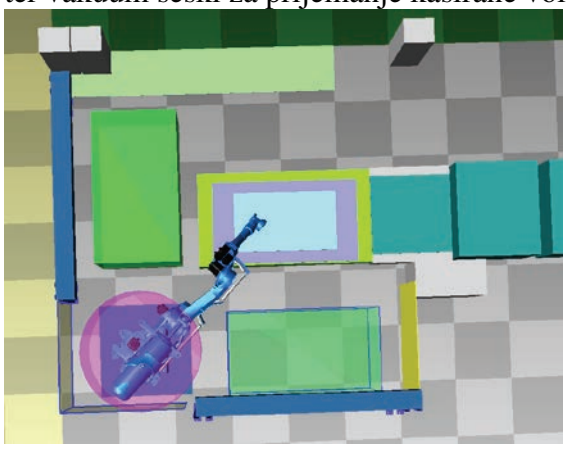
REZULTAT

- Plošče so na vhodni paleti poravnane vertikalno in največje odstopanje, ki še omogoča odvzem z zasnovanimi robotskimi prijemali, znaša 10mm. V primeru večjega odstopanja v Z smeri na posameznem nivoju, pa bo potrebna sprememba zasnove robotskih prijemal.
- Za zagotovitev odlaganja izdelkov brez vmesnega praznega prostora predlagamo, da se del traku na mestu robotskega odlaganja premika hitreje in pospeši odložen izdelek do predhodnjega. Podaljšanje traku proizvodnje linije s hitrejšim pomikanjem zagotovi kupec sam.

REZULTAT:

4.2 Potrditev delovanja robotskega prijemala s testi

Za testiranje se je izdelalo robotsko prijemalo ½ dimenzije največjega izdelka: 1250x1400 (dolžina x širina), ki je opremljeno z zasučnimi letvami z iglicami za mehansko prijemanje volne, ter vakuum seski za prijemanje kaširane volne.



Testi prijemanja in prenašanja so se izvajali z robotom nosilnosti 88kg. Testi so vključevali naslednje točke:

TEST: Prijemanje različnih debelin volne od 26mm do 150mm z eno obliko iglic.
REZULTAT: Potrditev oblike iglic in potrditev samo enega prijemala in oblike iglic za različne debeline in teže izdelkov.

TEST: Premikanje z max hitrostmi robota z izdelki v prijemalu (iglice in vakuum).
REZULTAT: Potrditev možnosti max pospeškov in pojemkov brez deformacije izdelka, kot je iztrgana volna ali delaminacija kaširane volne
Potrditev časovne analize, ki predvideva max hitrosti robota.

TEST: Prijemanje zamaknjenih kupov volne dimenzije (600x1400 mm)
REZULTAT: določitev max zamika med posameznimi kupi: X,Y in Z smer, ki še vedno omogoča prijemanje in prenos z robotskim prijemalom.

TEST: Prijemanje navadne nekaširane volne z vakuum seski.
REZULTAT: Potrditev možnosti enostavnega prijemala zgolj z vakuum seski. Deformacije, ki nastanejo na volni pri uporabi vakuum seskov.

TEST: Prijemanje večjih dimenzij (1250 x 1400mm) z manjšim število iglic.

REZULTAT: Določitev optimalnega števila iglic in pozicije letev z iglicami.
Testi so ključno vplivali na zasnovo robotskega prijemala in posledično na uspešnost projekta. Zasnovano prijemalo pred testi in dejansko uporabljeno prijemalo se zelo razlikujeta. Za prijemanje izdelkov so ne uporablja vakuum elementov, mehanski sklopi in prijemalne igle pa so se spremenile in optimirale za različne tipe izdelkov.

2.1 Robotska celica in namensko prijemalo

Robotsko celico smo zasnovali s 6-osnim industrijskim robotom Motoman tip GP200R (nosilnosti 200kg in polmer dosega R=3140mm) z robotskim krmilnikom YRC1000. Robot je opremljen z univerzalnim robotskim prijemalom.

Prijemalo je opremljeno z zasučnimi letvami, na katerega so pritrjene iglice za prijemanje z vbadanjem odzgoraj, ter s pnevmatskimi elementi in močnejšimi iglami za prijemanje iz strani za kaširane izdelke.

Robotska celica je obdana z zaščitno ograjo višine 2700mm, v kateri se nahajajo tri servisna vrata (dva krilna in ena drsna). Vrata so opremljena z ročno ključavnico na elektromagnetni zaklep. Dostop do paletnih mest je zasnovan preko hitro tekočih avtomatskih rolo vrat dimenzije 3000x3500 mm.

V kabini se nahajata dve mesti za vhodne palete. Posamezno mesto za vhodno paleto je zasnovano za največje palete dimenzije izdelkov 2500x1400mm, ki so odloženi do višine največ 2800mm. Med menjavo palete je premični del stene v zgornjem položaju in tako omogoča menjavo palete med avtomatskim delovanjem robotske celice.

Zasnova robotske celice omogoča ročno delo na enem paletnem mestu (ki ima dostop preko drsnih vrat). Prehod na ročno strego se izvede tako, da se ta način dela izbere na komandnem pultu robotske celice in da se ročno odklopi ter odmakne del kabine na notranji strani robotske celice.

Nadzor nad robotskim delovnim prostorom nadzira in omejuje FSU enota – Functional Safety Unit. Varnostni krmilnik omejuje robotski delovni prostor in ne dovoljuje robotu vstop v prostor paletnega mesta, ko so odprta dvojna vrata za posluževanje (menjava palete).
Ob glavnih servisnih vratih se nahaja komandni pult s tipkami, stikalom za izklop v sili in ključavnico. Robotska celica je opremljena tudi s svetlobnimi semaforji, ki so vidni na daljavo in sporočajo režim delovanja robotske celice, kakor tudi motnje oz. zastoje delovanja celice. Prav tako smo, skladno z evropskim direktivami, v naši ponudbi upoštevali vse varnostne elemente in zaščite delovnega mesta, ki so obvezni, sestavni del vsake robotske aplikacije.

5 SKLEP

Uspešen zagon obeh robotskih celic za manipulacijo velikih izdelkov iz mehkih materialov je nedvomno potrdil pravilnost odločitve podjetij za uvajanje robotizacije. Ti dosežki so postavili trden temelj za nadaljnji razvoj in implementacijo robotskih sistemov v pri njih. Implementacija robotskih celic je odprla vrata za nove projekte in perspektive v industriji. Ključne lastnosti robotov, kot so natančnost, zanesljivost in učinkovitost, so prinesle številne prednosti, ki se kažejo kot izboljšanje produktivnosti, optimizacija proizvodnih procesov ter zmanjšanje napak in stroškov.

Poleg tega je razvoj specialnih rešitev za prijemala odprl nove možnosti v industriji. S tem je podjetje lahko premagalo izzive pri manipulaciji posebnih tipov materialov in velikih dimenzij ter omogočilo avtomatizacijo na področjih, kjer to doslej ni bilo mogoče.

Viri:
[1] http://yaskawa.eu.com/

CENTRALNI SISTEM IZVAJANJA MEDALBORATORIJSKIH PRIMERJAV V NACIONALNEM MEROSLOVNEM SISTEMU RS

Bojan AČKO[1], Rok KLOBUČAR[1], Urška TURNŠEK[2], Rado LAPUH[2]
[1] Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo
[2] MGTŠ, Urad RS za meroslovje

IZVLEČEK

Kakovosten nadzor proizvodnih procesov temelji med drugim tudi na kakovostnih merilnih instrumentih, ki jih moramo redno vzdrževati, nadzorovati in kalibrirati. Kalibracijo v urejenih nacionalnih meroslovnih sistemih izvajajo predvsem akreditirani kalibracijski laboratoriji, ki morajo kontinuirano dokazovati sovjo tehnično usposobljenost. V Sloveniji upravlja nacionalni meroslovni sistem Urad RS za meroslovje z nosilci nacionalnih etalonov, akreditirane laboratorije pa nadzoruje Slovenska akreditacija.

S ciljem vzpostavitve centralnega nadzora nad kakovostjo meroslovnih zmogljivosti kalibracijskih laboratorijev v RS je Urad RS za meroslovje predlagal razpis ciljnega razvojnega projekta z naslovom »Vzpostavitev centralnega izvajanja nacionalnih medlaboratorijskih primerjav v nacionalnem meroslovnem sistemu«. Projekt, ki ga je razpisala ARRS, je pridobila Fakulteta za strojništvo Univerze v Mariboru. V prispevku so predstavljene vse aktivnosti ter rezultati izvedenega projekta. Končni rezultat je spletna aplikacija za pridobivanje potreb in izvedbo medlaboratorijskih primerjav, ki vključuje obsežne podatkovne baze o potrebah, izvedbi in rezultatih izvedenih primerjav, udeležencih ter merilnih instrumentih in meroslovnih veličinah.

1 UVOD

Najpomembnejši merljiv pogoj za konkurenčnost proizvodnih in storitvenih podjetij na globalnem trgu je kakovost, zato so vse strateške usmeritve EU in Slovenije na področju industrije usmerjene k doseganju odlične kakovosti, ki temelji na kakovosti proizvodnih procesov. Za nadzor kakovosti proizvodnih procesov potrebujemo točne in zanesljive meritve. Eden od najpomembnejših pogojev za doseganje ustrezne točnosti meritev je zagotavljanje meroslovne sledljivosti na definicijo enote meroslovne veličine, ki jo zagotovimo s kalibracijami merilnih instrumentov, ki morajo imeti definirano merilno negotovost. Za dokazovanje ustrezne ravni merilne negotovosti se mora kalibracijski laboratorij vključevati v nacionalne ali mednarodne sheme medlaboratorijskih primerjav (v nadaljevanju ILC – angl. »Inter–Laboratory Comparisons) [1].

V državah, ki so vključene v globalni meroslovni sistem, imajo pri zagotavljanju meroslovne sledljivosti ključno vlogo nacionalni meroslovni inštituti in akreditirani laboratoriji. V Sloveniji predstavlja nacionalni meroslovni inštitut Urad RS za meroslovje z nosilci nacionalnih etalonov, akreditirane laboratorije pa nadzoruje Slovenska akreditacija. Obe instituciji imata interes in odgovornost za zagotavljanje in nadziranje meroslovne usposobljenosti kalibracijskih laboratorijev, soočata pa se s pomanjkanjem razpoložljivih ILC na ravni dokazovanja kalibracijskih in merilnih zmogljivosti (CMC) akreditiranih in nekaterih naprednih industrijskih laboratorijev. Pomanjkanje ponudbe teh primerjav je delno tudi posledica pomanjkanja interesa nosilcev nacionalnih laboratorijev zaradi finančnega stanja, pomanjkanja časa, preobremenjenosti in podobnih razlogov. Dodaten problem je v tem, da v Sloveniji nimamo vzpostavljene enotne centralne sheme za izvedbo ILC in zato omenjeni instituciji tudi nimata konkretnega vpogleda v izvajanje primerjav in v zmožnost nacionalnih laboratorijev za pokrivanje potreb slovenskih kalibracijskih laboratorijev.

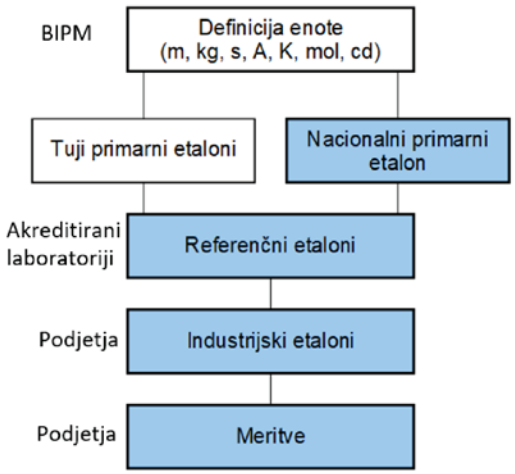
Iz naštetih razlogov se je Urad RS za meroslovje odločil za razpis ciljnega razvojnega

Bojan AČKO[1], Rok KLOBUČAR[1], Urška TURNŠEK[2], Rado LAPUH[2]
[1] Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo
[2] MGTŠ, Urad RS za meroslovje

projekta za vzpostavitev centralnega sistema izvajanja nacionalnih ILC.

2 POMEN MEROSLOVNE SLEDLJIVOSTI ZA PROIZVODNA PODJETJA

Meroslovna sledljivost, ki pomeni navezavo merilnega rezultata (v industriji, zdravstvu, prometu, …) na definicijo enote fizikalne veličine skozi neprekinjeno verigo kalibracij [2], je osnovna zahteva vseh standardov kakovosti ISO 9001, ISO 14001, IATF 16949, serija standardov ISO/IEC 17000, … v povezavi s kakovostjo meritev in posledično z nadzorom kakovosti procesov in izdelkov. Veriga kalibracij se običajno začne v proizvodnem procesu (interne kalibracije merilnih instrumentov z delovnimi etaloni) in se nadaljuje v akreditiranih laboratorijih (kalibracija delovnih in referenčnih etalonov iz industrije, …) ter kasneje v nacionalnih meroslovnih laboratorijih, ki zagotavljajo sledljivost na mednarodno raven.



Slika 1: Shema meroslovne sledljivosti

Vsi kalibracijski laboratoriji, ki so vključeni v sledljivostne verige, morajo izpolnjevati mednarodne kriterije, ki jih predpisuje serija standardov ISO IEC 17000 ter Mednarodni urad za uteži in mere BIPM, nacionalni meroslovni inštituti in akreditacijski organi. Vsak meroslovni laboratorij mora imeti vzpostavljen delujoč sistem vodenja kakovosti ter ustrezno raven tehničnih kompetenc. Le-te zagotavljajo z usposobljenim in izkušenim osebjem, ustrezno opremo, prostori, metodami in postopki, zapisi ter sistemom poročanja o rezultatih. Konkretno kakovost kalibracij, ki jih izvajajo, deklarirajo z merilno negotovostjo. To je parameter merilnega rezultata, ki karakterizira kakovost meritve in ga določimo z analizo vplivov na pogreške pri merjenju. Zaupanje naročnika kalibracije v podano meroslovno zmogljivost kalibracijskega laboratorija bazira na formalno priznanih konceptih dokazovanja usposobljenosti kot sta akreditacija in dodelitev statusa nacionalnega laboratorija.

3 CILJI PROJEKTA

V okviru raziskovalnega projekta »Vzpostavitev centralnega izvajanja nacionalnih medlaboratorijskih primerjav v nacionalnem meroslovnem sistemu« smo razvili model sistema centralnega vodenja ILC za potrjevanje meroslovnih zmogljivosti akreditiranih in industrijskih laboratorijev, ki delujejo kot kalibracijski laboratoriji v nacionalnem sistemu zagotavljanja sledljivosti meritev v industriji in ostalih gospodarskih panogah. S takšnim sistemom želimo zagotoviti sistematično izvajanje ustreznega preverjanja usposobljenosti meroslovnih laboratorijev. Zelo pomembno je zagotoviti sistem, ki bo centralen, anonimen in neprofiten in bo deloval na najvišji nacionalni ravni. Slovenski prostor je namreč majhen gospodarski prostor, ki je zelo občutljiv na konflikte zaradi konkurenčnih informacij. Projekt je bil zasnovan kot pilotni projekt na veličini "dolžina", ki ga bo kasneje mogoče nadgraditi tudi na ostale meroslovne veličine.

Cilji projekta so bili predvsem naslednji:

- raziskati potrebe po ILC na področju veličine dolžina v Sloveniji (akreditirani kalibracijski laboratoriji in laboratoriji v podjetjih, ki izvajajo ILC),
- na osnovi znanja in izkušenj na področju organizacije ILC izdelati univerzalne predloge za vso potrebno tehnično dokumentacijo (tehnični protokoli, obdelava rezultatov, poročila),
- definirati potrebne organizacijske aktivnosti za centralizirano organizacijo ILC (Urad RS za meroslovje – pilotni laboratoriji – udeleženci),
- izdelati shemo centraliziranega izvajanj ILC,
- izdelati univerzalni model vrednotenja

rezultatov primerjav za različne vrste merilnih instrumentov in opredmetenih mer,
- digitalizirati vse pripravljene dokumente,
- izdelati spletno aplikacijo za centralizirano vodenje ILC, ki bo omogočala transparentno in anonimno vodenje primerjav in poročanje o rezultatih.

3 ZGODOVINA IZVAJANJA ILC NA PODROČJU DIMENZIJSKIH VELIČIN

V Laboratoriju za tehnološke meritve Fakultete za strojništvo Univerze v Mariboru smo kot nosilec nacionalnega etalona že pred več kot 15 leti pričeli z aktivno izvedbo ILC na področju dimenzijskih veličin. Pred časom, ko je nacionalno financiranje nacionalnih laboratorijev omogočalo tudi razvojno in raziskovalno delo, smo te primerjave izvajali brezplačno (v sklopu razvojnega dela), zadnjih nekaj let pa zaračunavamo udeležencem le osnovne materialne stroške in neposredno delo (delamo na neprofitni osnovi). Vsako leto razpišemo primerjavo, na katero povabimo vse akreditirane laboratorije na področju dimenzijskih veličin. Glede na potrebe oz. izražen interes laboratorijev organiziramo tudi dodatne bilateralne primerjave, ki jih je bilo že tudi do 5 v enem letu. Letno se primerjav udeleži tudi do 8 laboratorijev, največje število veličin v enem letu pa je bilo 16. Industrijski laboratoriji zaenkrat interese še niso izkazali. Pri izvedbi sledimo pravilom BIPM in EURAMET [3][4]. Pokrivamo približno 80 % vseh potreb (omejitve glede naših zmogljivosti in organizacijskih ovir – stacionarni instrumenti).

Organizator in udeleženci imamo naslednje pozitivne izkušnje:
- zmanjšana potreba po iskanju dragih in dolgotrajnih ILC v tujini,
- višja kakovost kalibracij v akreditiranih laboratorijih na področju dimenzionalnih meritev,
- kakovostno definiranje in razumevanje merilnih veličin v dimenzionalnem meroslovju ter posledično dobro poenotenje veličin v obsegih akreditacije,
- povečano strokovno sodelovanje med akreditiranimi laboratoriji (izmenjava izkušenj, bilateralne primerjave, …).

Na osnovi izkušenj lahko trdimo, da je možno sistem ILC v Sloveniji znatno izboljšati.

3 CENTRALNI SISTEM IZVAJANJA ILC

3.1 Osnovne predpostavke

Že v uvodu je bilo povedano, da je ideja za vzpostavitev centralnega vodenja ILC v Sloveniji nastala na Uradu RS za meroslovje na osnovi ugotovitve, da je pokrivanje potreb deležnikov v slovenskem meroslovnem sistemu po dokazovanju usposobljenosti za kalibracijsko dejavnost nepopolno. Vse potrebe niso jasno identificirane, vsa področja iz različnih razlogov niso enako pokrita.

Sprejeta je bila odločitev, da se sistem postavi v obliki spletne platforme, ki omogoča komunikacijo med udeleženci in organizatorjem ter povezave do baz podatkov. Sistem mora omogočati varno in anonimno komuniciranje, kar lahko dosežemo s kodiranimi imeni udeležencev ter ustreznim varovanjem spletnih podatkov. Do baz podatkov lahko dostopa izključno skrbnik sistema. Celoten sistem upravlja Urad za meroslovje, v organizacijo pa vključi tudi pilotne laboratorije, ki so praviloma nosilci nacionalnih etalonov.

3.2 Omejitve strukture sistema

V uvodni fazi ciljnega raziskovalnega projekta so bila zaradi formalnih in organizacijskih omejitev sprejete naslednje odločitve:

Sistem v prvi fazi upravlja Laboratorij za tehnološke meritve UM FS (v nadaljevanju: LTM), platforma je nameščena na strežniku FS oz. na najetem strežniku.

Vse primerjave vodi LTM, celovit pogled v baze podatkov o primerjavah pa ima poleg upravitelja sistema še Urad RS za meroslovje.

Prijavitelji v sistem (potencialni udeleženci primerjav in pilotni laboratoriji) imajo na razpolago le podatke, ki jih nujno potrebujejo za izvedbo lastnega dela primerjav.

Sistem je postavljen tako, da je mogoča nadgraditev za dodatne meroslovne veličine; upravitelj razširjenega sistema bo Urad RS za meroslovje.

Bojan AČKO[1], Rok KLOBUČAR[1], Urška TURNŠEK[2], Rado LAPUH[2]
[1] Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo
[2] MGTŠ, Urad RS za meroslovje

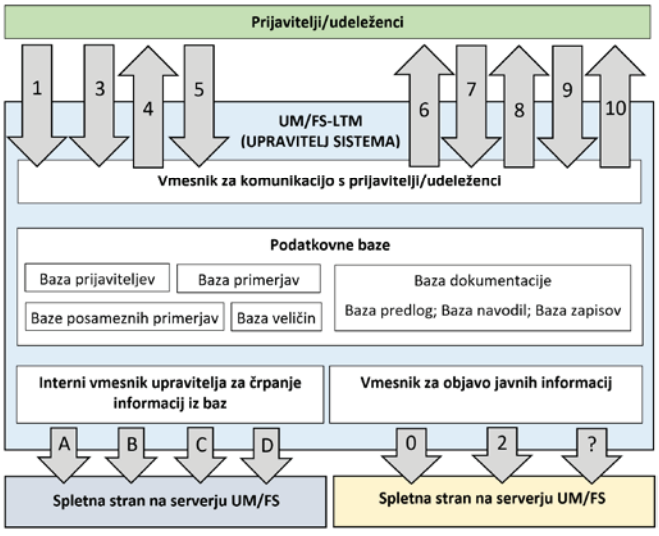
3.3 Struktura sistema v projektni fazi

Centralni sistem za vodenje medlaboratorijskih primerjav je zgrajen iz treh delov:

- uporabniški vmesnik je statično grajena spletna aplikacija, zgrajena v jezikih *HTML/CSS/JS* s pomočjo ogrodja *nuxt.js* in *vue.js*;
- za interakcijo s podatki uporablja uporabniški vmesnik strežniško spletno aplikacijo, ki deluje po principu programskega vmesnika REST, napisanega v jeziku *javascript*. Izvaja se v strežniškem okolju *node.js*;
- za hrambo podatkov skrbi podatkovna baza *MongoDB*.

Vsak od treh delov sistema je izdelan tako, da lahko teče znotraj vsebnika, kar pomeni, da so posamični deli aplikacije lahko nameščeni centralno na enem strežniku, ali porazdeljeno v oblaku. Omogočena je tudi širitev storitev ob povečanih potrebah (večje število uporabnikov ali večja količina podatkov).

Struktura sistema je predstavljena na sliki 2. Sistem je sestavljen iz podatkovnih baz in vmesnikov za komunikacijo med organizatorjem (LTM) ter prijavitelji/potencialnimi udeleženci in javnostjo. Organizator ima neposredni vpogled v podatkovne baze, omogočena pa mu je tudi enostavna komunikacija z ostalimi deležniki preko vzpostavljene spletne strani.



Slika 2: Struktura sistema

V strukturi je predviden pretok podatkov označen s številkami, predvidene vsebine posameznih podatkov pa so naslednje:

0 javno obvestilo o sistemu, poziv za vpis v bazo potencialnih udeležencev
1 prijava v sistem (vsi podatki o prijavitelju)
2 razpis primerjav (periodično, javno dosegljivo na spletni strani)
3 prijava interesa za primerjavo (izpolnjevanje kriterijev; anonimnost!)
4 obveščanje o organizaciji, poizvedba o možnosti donacije transfer etalonov, …
5 povratne informacije udeležencev (omejitve terminov, zagotavljanje transfer etalonov, …)
6 poziv za formalno prijavo (formular)
7 formalna prijava na primerjavo (veličine, strinjanje s pogoji, …); pošljejo tudi morebitne transfer etalone
8 tehnični protokoli vsem udeležencem + transfer etaloni vsem udeležencem; sledi zanka pošiljanja etalonov: LTM – U1 – LTM – U2 – …… – LTM
9 rezultati (vsi udeleženci)
10 končno poročilo o primerjavi
? javna objava o izvedeni primerjavi (po potrebi)
A podatki o vseh prijavljenih v sistem (seznam, podrobni kontaktni podatki, …)
B podatki o vseh izvedenih primerjavah (seznam udeležencev, veličine, termin izvedbe, ….)
C podatki o tekočih primerjavah (udeleženci, veličine, donacija transfer etalonov, status, …)
D predloge za navodila in zapise, arhiv vseh izdanih dokumentov (formalni, spletni, e-pošta).

3.4 Baze podatkov

Baze podatkov so prikazane na Sliki 2. Vsebine posameznih baz se polnijo ob registraciji potencialnih udeležencev (prijaviteljev) v sistem, ob razpisu ILC, ob prijavi na posamezno ILC, med organizacijo ILC ter po zaključkih ILC. Vsebine posameznih baz so predstavljene v nadaljevanju.

Baza prijaviteljev

Baza se tvori po vnosu podatkov posameznih (akreditiranih) laboratorijev preko spletnega portala. V bazi se zbirajo naslednji podatki o prijaviteljih (potencialnih udeležencih ILC):

- ime in naslov podjetja,

Bojan AČKO[1], Rok KLOBUČAR[1], Urška TURNŠEK[2], Rado LAPUH[2]
[1] Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo
[2] MGTŠ, Urad RS za meroslovje

- kontaktni podatki (oseba, ki bo dobila avtorizacijo za delo v portalu),
- področje kalibracij / veličina (osnovne veličine (ena ali več) iz priloge k akreditacijski listini,
- podatki za registracijo (ime, elektronski naslov).

Po prvi prijavi dobi prijavitelj geslo, s katerim se lahko kasneje prijavlja v portal, ali pa se prijavi z elektronskim podpisom.

Baza sestavljena iz dveh delov:
- baza prijaviteljev po veličinah in
- baza podatkov o prijaviteljih.

Baza podatkov o primerjavah

V tej bazi so podatki o že izvedenih primerjavah in o primerjavah v fazi izvedbe. Baza je sestavljena iz dveh delov:
- baza vseh primerjav in
- baze posameznih primerjav.

Baza vseh primerjav je pregledna baza, ki je z določenimi omejitvami dostopna tudi javnosti. Javno so vidni vsi podatki razen končnega poročila o primerjavi, ki ga vidi le skrbnik.

Baza posamezne primerjave črpa vse potrebne dokumente (formalna prijava, tehnični protokol, transportni dokumenti, morebitna komunikacija po e-pošti, poročila udeležencev, obdelava podatkov, končno poročilo, …) iz baze podatkov za vodenje dokumentacije.

Odločitev o umestitvi udeležencev v bazo sprejme pilotni laboratorij na osnovi pregleda njihovih prijav.

V sklopu projekta smo izdelali le bazo za dimenzijske veličine. Klasifikacija dimenzionalnih »podveličin« je narejena na osnovi raziskave obsegov akreditacij akreditiranih laboratorijev. Prijavitelj najprej izbere osnovno skupino instrumentov, potem izbere v tej skupini konkretni instrument oz. opredmeteno mero in potem h konkretnemu instrumentu ali opredmeteni meri še merilno veličino.

Baza dokumentov

Dokumentacija o ILC je sestavljena iz predlog, navodil in zapisov..

Predloge služijo za enostavno in enotno tvorbo navodil in zapisov različnih formatov (npr. dokumenti tipa »docx«, »xlsx«, spletna obvestila. Navodila vodijo udeležence primerjav skozi celoten postopek primerjave (npr. navodilo za prijavo v sistem, navodilo za transport etalonov, tehnični protokol primerjave, …). Zapisi služijo kot dokazi o izvedenih aktivnostih (npr. prijava v primerjavo, tehnični protokol, poročilo, …).

Večina navodil je kreiranih v obliki spletnih obrazcev na portalu. Vsa tehnična navodila za transport, pripravo in rokovanje z etaloni, za izvedbo meritev in za poročanje dobijo udeleženci primerjave v dokumentu »Tehnični protokol«. Dokument je v formatu »pdf« posredovan udeležencem preko portala in po elektronski pošti. Imena udeležencev so v dokumentu kodirana.

Zapise razdelimo v naslednje glavne kategorije:
- S: spletni zapisi (prijava v portal, prijava na ILC, …), ki so neposredno po nastanku hranjeni v spletni bazi posamezne ILC in bazi vseh tekočih in zaključenih ILC;
- E: e-poštni zapisi, ki se kreirajo delno avtomatsko (iz objav na spletni strani centralnega sistema za vodenje ILC), delno pa ročno (dopisi organizatorja udeležencem in obratno);
- F: formalni zapisi v obliki potrjenih pisnih ali »pdf« dokumentov;
- I: interni zapisi organizatorja (obdelava merilnih podatkov, interna komunikacija znotraj organizacije – UM-FS, MIRS).

Predloge se nahajajo v ločeni bazi. Baza ni vezana na posamezno ILC. Organizator ILC ima neomejen dostop do baze, uporabniki pa imajo dostop le do spletnih predlog, ki se jim ponudijo pri izpolnjevanju spletnih obrazcev. V določeni bazi izvedbe ILC se ponudijo organizatorju ustrezne predloge iz baze. Predloge za spletne obrazce so del komunikacijskega sistema in se aktivirajo avtomatsko pri izpolnjevanju spletnih obrazcev. Predloge za navodila ter spletne in formalne zapise pa lahko aktivira izključno organizator, ko kreira navodilo ali zapis.

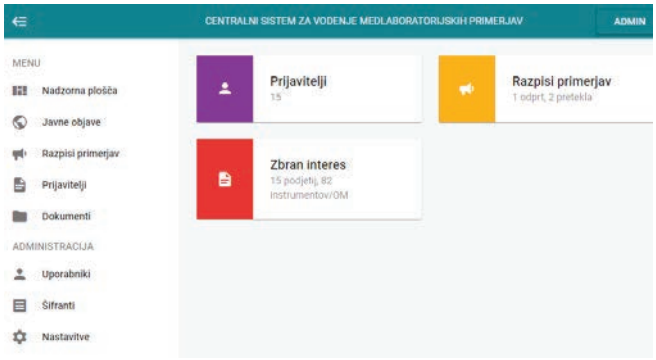
V bazi dokumentov se nahajajo vsa navodila in zapisi o ILC. Za vsako primerjavo se vodi ločena baza podatkov. Dostop do baze dokumentov ima izključno organizator ILC. Na željo udeležencev lahko upravljalec sistema pošlje določene formalne dokumente iz baze tudi posameznim udeležencem, vendar mora pri tem strogo upoštevati varovanje podatkov ostalih udeležencev.

Bojan AČKO[1], Rok KLOBUČAR[1], Urška TURNŠEK[2], Rado LAPUH[2]
[1] Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo
[2] MGTŠ, Urad RS za meroslovje

4 SPLETNA PLATFORMA

Spletna platforma za vodenje centralnega sistema vodenja ILC ima dva nivoja dostopa:
- nivo administatorja (organizator ILC) in
- nivo prijaviteljev.

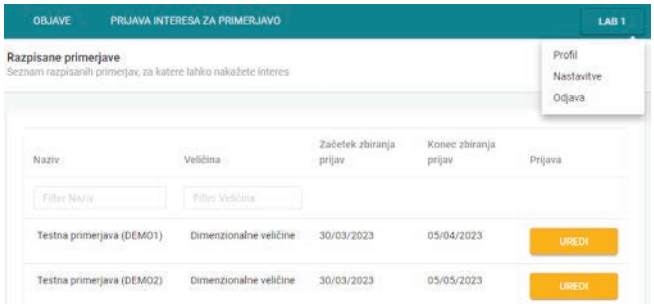
Administrator ima po prijavi v portal možnost upravljanja podatkov, ki so prikazani na Sliki 3.



Slika 3: Osnovni zaslon administratorja

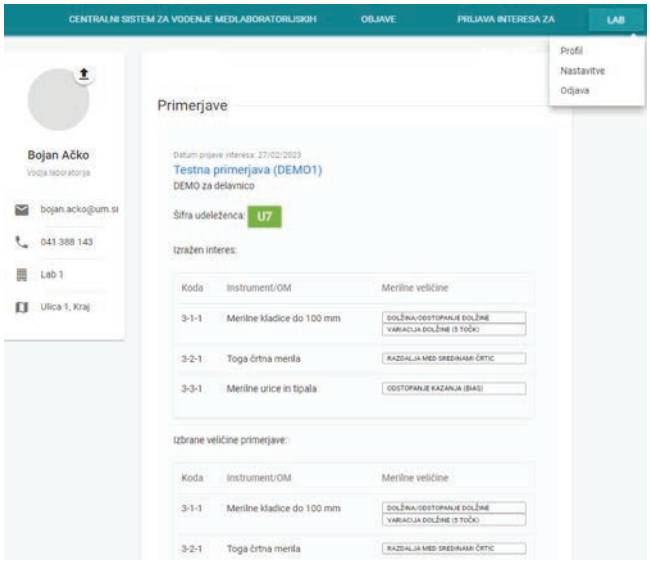
Dostopa lahko do baze vseh prijaviteljev in prijaviteljev v sistem, baze razpisanih primerjav in baze vseh dokumentov.

Prijavitelj se lahko po uspešni registraciji v sistem s prejetim geslom prijavi v nivo prijavitelja. Prva zaslonska slika (Slika 4) mu nudi vpogled v vse prijavljene primerjave. Svoj interes za posamezno primerjavo lahko do zaključka prijavne faze, ki ga določi organizator, ureja tako, da dodaja ali odvzema merilne veličine.



Slika 4: Osnovni zaslon prijavitelja

V zavihku »Profil« lahko vidi svoje podatke ter podatke o prijavah na primerjave (vključno s svojo kodo »UX« v posamezni primerjavi), v zavihku »Nastavitve« pa lahko svoje podatke ureja.



Slika 5: Izsek iz profila vzorčnega prijavitelja

Spletna platforma je v fazi testiranja na osnovi uporabe v pilotnih ILC. Ena ILC je že bila ustrezno zaključena.

5 SKLEP

Ciljni raziskovalni projekt ARRS »Vzpostavitev centralnega izvajanja nacionalnih medlaboratorijskih primerjav v nacionalnem meroslovnem sistemu« je bil uspešno zaključen v skladu z napovedjo ob upoštevanju določenih omejitev Urada RS za meroslovje ter časovnih omejitev in omejitev virov za projekt. Pilotna spletna platforma je bila vzpostavljena in preskušena na eni pilotni ILC. Zgrajena je tako, da jo lahko sami nadgrajujemo v smislu dodajanja novih meroslovnih veličin, dokumentov in uporabnikov. Nadgradnja projekta je odvisna od analize trga in zmožnosti znotraj sistema nacionalnih etalonov

Viri:

[1] OA 05: *Sodelovanje v medlaboratorijskih primerjavah*; Publikacija SA, Ljubljana 2022.
[2] Horwath, P., Redgrave, F.: *Metrology – in short*, EURAMET project 1011, Albertslund, 2008.
[3] CIPM MRA-G-11: *Measurement comparisons in the CIPM MRA*, BIPM, Pariz, 2021.
[4] Lewis, A., Coveney, T.: *Guide to preparation of Key Comparison Reports in Dimensional Metrology*, BIPM Guidance document GD-3(2021).

NAPREDNI VIBRACIJSKI PREIZKUSI NA APLIKACIJAH IZ INDUSTRIJSKEGA OKOLJA

Martin ČESNIK, Janko SLAVIČ, Miha BOLTEŽAR
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

IZVLEČEK

Mehanske komponente izdelkov morajo biti tekom celotne dobe trajanja odporne na vplive iz okolice ter zagotavljati funckcionalnost in varnost tudi ob prisotnosti vibracij. Vibracijsko ustreznost komponent je potrebno upoštevati že v fazi konstruiranja, dokončna potrditev komponente iz vidika vibracij pa se potrdi eksperimentalno na prototipih z izvedbo vibracijskega testiranja z elektrodinamskim stresalnikom.

Pri testiranju dobe trajanja komponente obstoječi industrijski standardi definirajo tipe in nivoje vibracijskih obremenitev; vibracijski preizkus posamične komponente pa je potrebno individualno zasnovati s konstrukcijo vpenjala ter izdelavo namenske merilne opreme in testne infrastrukture. Poleg določanja dobe trajanja se vibracijski preizkusi izvajajo tudi v fazi predrazvoja, kjer se preučuje funkcionalnost različnih konstrukcijskih rešitev pri vibracijskih obremenitvah ter vrednoti vpliv konstrukcijskih rešitev na skupno zvočno moč komponente in mirnost obratovanja. V prispevku je poleg osnovnih principov vibracijskega testiranja prikazanih več kompleksnejših vibracijskih preizkusov na aplikacijah iz industrijskega okolja..

1 UVOD

Moderni izdelki morajo biti trajnostno naravnani, uporabniku prijazni ter konkurenčni na globalnem trgu. Bistven delež k tem ciljem prispeva zniževanje mase izdelka, kar pa pogosto rezultira v povečanih vibracijah in hrupu izdelka med obratovanjem. Obenem zniževanje mase in posledično togosti izdelka lahko ob prisotnosti vibracij rezultira v krajši dobi trajanja izdelka zaradi utrujanja materiala in v zmanjšani funkcionalnost izdelka.

Dinamski odziv izdelka in njegovih komponent se v fazi razvoja izdelka vrednoti z uporabo numeričnih orodij, katerih rezultati pa lahko pri realnih izdelkih bistveno odstopajo od realnega stanja. Pri obravnavi dinamskega odziva izdelka se zato morajo numerični modeli validirati z ustreznimi eksperimentalnimi postopki, med katere prvenstveno spada vibracijsko preizkušanje z uporabo elektrodinamskega stresalnika, slika 1.

Glede na stopnjo razvoja izdelka ločimo 2 pristopa k vibracijskim preizkusom:

- končna faza razvoja: potrditev funkcionalnosti izdelka in zahtevane dobe trajanja
- zgodnja razvojna faza: določite dinamskega odziva izdelka/komponente

Slika 1: Elektrodinamski stresalnik z drsno mizo.

2 MOŽNOSTI VIBRACIJSKIH PREIZKUSOV

Pri načrtovanju in izvedbi naprednih vibracijskih preizkusov je potrebno poznati fizikalne principe delovanja elektrodinamskega stresalnika, različne tipe dinamskega vzbujanja, fizikalne omejitve

testne opreme ter razpoložljivost in delovanje dodatne merilne opreme.

2.1 Princip delovanja elektrodinamskega stresalnika

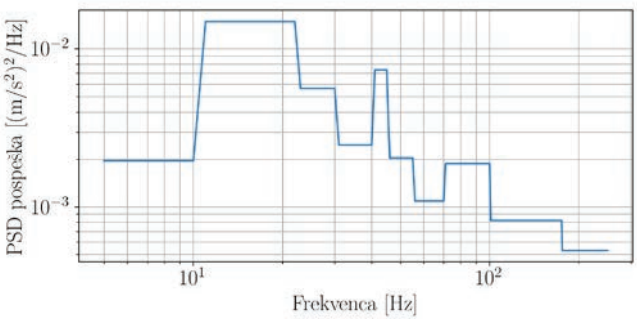
Gibanje pomičnega dela elektro-dinamskega stresalnika -armature- je posledica elektro-magnetnih sil, ki se pojavijo med dvema tuljavama. Zagotavljanje željenega gibanja armature je izvedeno preko kontrolnega pospeškomera, ki preko kontrolerja in ojačevalnika s stresalnikom tvori zaprto povratno zanko. Z optimiranimi algoritmi korekcije signalov se zahtevan pospešek armature izvaja v realnem času.

2.2 Tipi vibracijskih obremenitev

Z ustrezno programsko in kontrolno opremo je elektrodinamskim stresalnikom možno zagotavljati širok nabor dinamskih obremenitev:

- sinusni signal s konstantno frekvenco,
- sinusni prelet,
- impulz,
- sinusni signal s sledenjem resonančnemu vrhu,
- naključni signal - Gaussova porazdelitev (slika 2),
- superpozicija večih sinusnih preletov,
- superpozicija sinusnega preleta in naključnega signala,
- naključni signal (neGaussova porazdelitev),
- ...

Pri testih za potrditev funkcionalnosti in zahtevane dobe trajanja je natančna definicija dinamske obremenitve podana v obstoječih standardih ali namenskih specifikacijah[1].



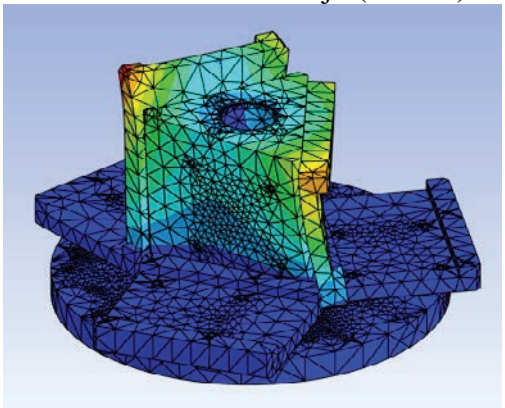
Slika 2: Primer definicije profila naključnega signala.

2.3 Omejitve pri vibracijskem testiranju

Pri načrtovanju vibracijskega preizusa se je potrebno zavedati omejitev stresalnika:

- potisna sila, ki zagotavlja pospešek gibajočih delov, ne sme presegati nazivne obremenitve stresalnika,
- frekvenčni razpon (tipično 5-2000 Hz, pri stresalnikih višjega ranga do 4500 Hz),
- prečne obremenitve v primeru ekscentričnih postavitev.

Posebnega pomena je pravilna konstrukcija vpenjala, ki povezuje stresalnik in testirane vzorce. Le-ta mora zagotavljati robne pogoje izdelka, ekvivalentne dejanskim robnim pogojem pri uporabi, obenem pa mora biti dinamsko ustrezna, tj. imeti prvo lastno frekvenco nad zgornjo mejo frekvenčnega področja vzbujevalnega signala. Napačna konstrukcija vpenjala lahko privede do povečanih obremenitev izdelka, zato je potrebno ustreznost vpenjala preveriti z numerično simulacijo (Slika 3).



Slika 3: Numerična analiza dinamskega odziva vpenjala.

2.4 Možnosti nadgradnje

Vibracijski preizkus, kjer zgolj zagotovimo ustrezno dinamsko obremenitev, podaja zelo omejeno informacijo o vibracijski ustreznosti izdelka in njegovi odpornosti na obremenitve iz okolja. Sodobni vibracijski preizkusi so zato vedno kompleksnejši in vključujejo uporabo klimatske komore, s katero izdelek sočasno izpostavimo temperaturnim obremenitvam in vlažnosti, ter širokega nabora merilne ter kontrolne opreme (hitrotekoča kamera, IR kamera, odzivni pospeškomeri, laserski vibrometri, mikrofoni, ...), s katero se pridobi

dodaten vpogled v stanje izdelka tekom vibracijskega preizkusa, kar predstavlja ključno informacijo iz vidika izboljšave izdelka tekom razvojnega postopka.

3 VIBRACIJSKI PREIZKUSI DOBE TRAJANJA IN ZAGOTAVLJANJA FUNKCIONALNOSTI

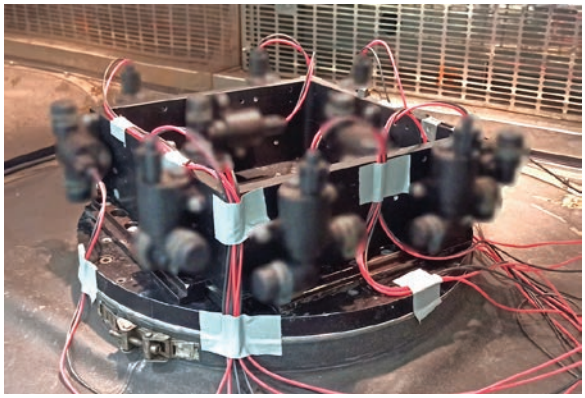
Iz vidika trajnosti je izdelek pri vibracijskem preizkusu izpostavljen večkratniku obremenitve, ki jo dejansko občuti tekom dobe trajanja. V tem poglavju je prikazanih nekaj eksperimentalnih postavitev in meritev, ki so bile izvedene tekom testiranja na življenjsko dobo.

Tipičen primer vibracijskega preizkusa s sočasno funkcionalnostjo izdelka je preizkus posode za tekočino za čiščenje vetrobranskega stekla, prikazanega na sliki 4. Tekom preizkusa je črpalka prečrpavala tekočino v 1 minutnih intervalih.

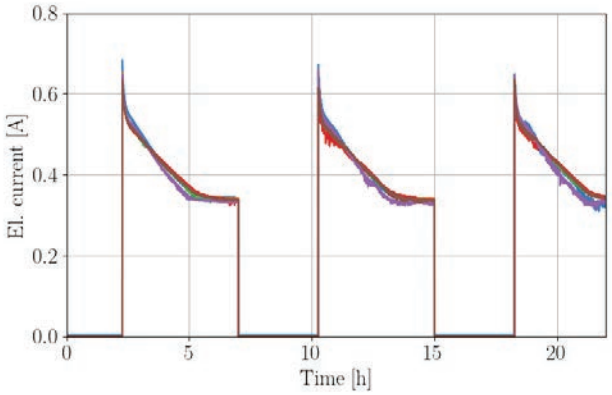
Slika 4: Vibracijski preizkus posode s sočasnim prečrpavanjem tekočine.

Pri vibracijskih preizkusih se lahko sočasno testira več izdelkov, obenem pa se izvaja tudi spremljanje funkcionalnosti. Na sliki 5 je vidna eksperimentalna postavitev dvanajstih vzorcev, ki so bili izpostavljeni sočasni vibracijski in temperaturni obremenitve, obenem pa se je izvajal vklop/izklop delovanja z monitoringom porabljenega električnega toka za vsak vzorec, slika 6.

Določen delež vibracijskih preizkusov na dobo trajanja rezultira v odpovedi/poškodbi izdelka. Slika 7 prikazuje dva primera poškodbe, nastale

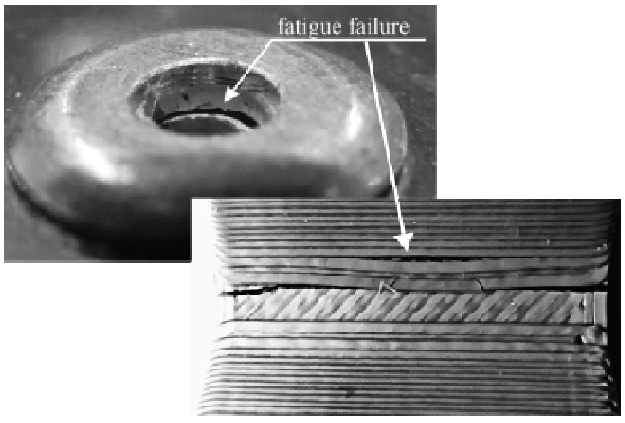


Slika 5: Sočasni preizkus 12 vzorcev pri vibracijskem in temperaturnem profilu.



Slika 6: Primer monitoringa el. toka.

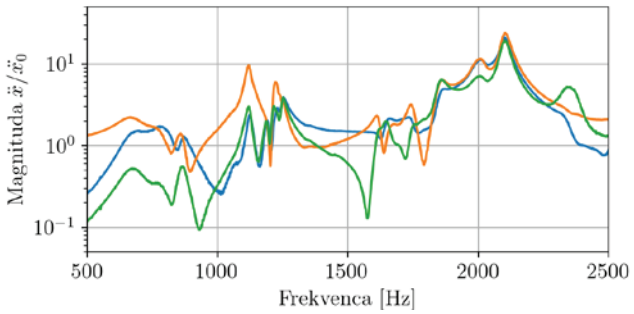
med vibracijskim preizkusom[2]. V takih primerih je iz vidika ponovne razvojne iteracije pomembno, da se razpoka prepozna čimprej ob nastanku ter da se jo natančno analizira. Poškodovanost izdelka je mogoče spremljati tudi posredno tekom vibracijskega preizkusa z meritvami prenosnosti.



Slika 7: Primer poškodbe izdelka pri vibracijskem preizkusu, kovičen spoj (zgoraj) in 3D natisnjen nosilec (spodaj).

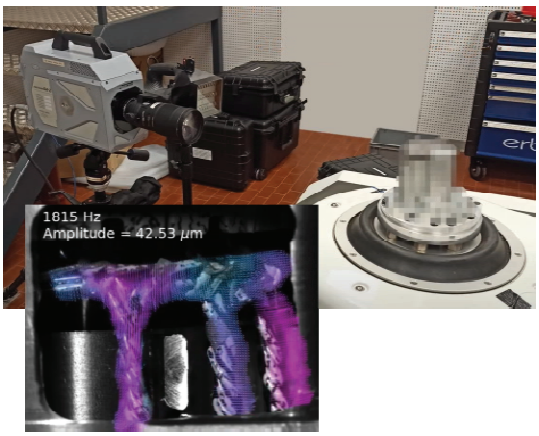
4 VIBRACIJSKI PREIZKUSI V ZGODNJI FAZI RAZVOJA IZDELKA

Za razvoj globalno konkurenčnih izdelkov je nujna vključitev vibracijskih preizkusov že v zgodnji fazi razvoja izdelka, s katerimi se preverja različne koncepte konstruckijskih rešitev. Na ta način dosežemo nižji nivo hrupa izdelka ter mirnejše in zanesljivejše delovanje ter doseganje zahtevane življenjske dobe. Dinamski odziv izdelka eksperimentalno vrednotimo z meritvami frekvenčnih prenosnih funkcij (FPF, slika 8) z uporabo pospeškomerov in laserskih vibrometrov. Na podlagi izmerjenih FPF se tudi izvede validacija numeričnega modela izdelka.



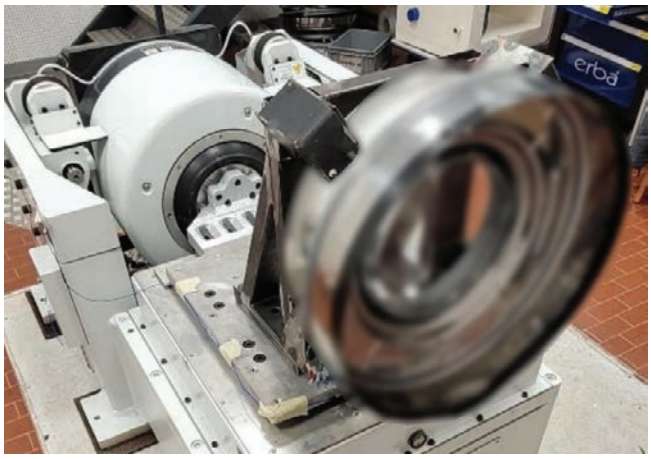
Slika 8: Primer izmerjenih frekvenčnih prenostnih funkcij izdelka.

V primerih, ko meritev odziva s pospeškomerom ali vibrometrom ni mogoča ali ko izdelek izkazuje izrazito nelinearnost, se za meritve odziva uporablja hitrotekoča kamera z ustrezno programsko opremo za procesiranje digitalnih posnetkov. Na sliki 9 je prikazana aplikacija hitre kamere pri izvedbi vibracijskega preizkusa skupaj z rezultati analize digitalnih slik.



Slika 9: Uporaba hitre kamere in identifikacija pomikov navitja žic.

Vibracijski preizkus je ključen korak tudi pri potrjevanju ustreznosti sestava, ki sestoji iz večih različnih izdelkov in iz dinamskega vidika predstavlja kompleksen sistem. Primer take eksperimentalne postavitve je vibracijski preizkus vrat pralnega stroja s tečaji, pokrovom, mehom in mehanizmom za zaklepanje, prikazan na sliki 10. Pri prikazanem preizkusu se je potrjevalo sestav vrat iz vidika tesnenja, hrupa in obremenitev tečajev.



Slika 10: Vibracijski test vrat pralnega stroja.

3 SKLEP

Razvoj konkurenčnih izdelkov, ki so tekom dobe trajanja izpostavljeni dinamskim obremenitvam, zahteva vedno kompleksnejše vibracijske preizkuse. Nadgradnja vibracijskega preizkusa z namensko merilno in kontrolno opremo, z nekaj primeri navedenimi v tem prispevku, razvojnim inženirjem poda ključne informacije, na podlagi katerih se izdelajo konstrukcijske rešitve za izdelke z boljšo funkcionalnostjo, zanesljivostjo in uporabniško izkušnjo.

Viri:

[1] Lalanne, C,: *Mechanical Environment Test Specification Development Method,* CEA/Cesta, 1997

[2] Slavič, J, Boltežar, M, Mršnik, Česnik, M, Javh, J,: *Vibration Fatigue by Spectral Methods*, Elsevier, 2020.

[3] Slavič, J, Zaletelj, K, Gorjup, D, Šonc, J,: *pyIDI*, https://github.com/ladisk/pyidi

VPLIV VIBRACIJ NA FUNKCIONALNOST OBLIKOVNO NAVARJENIH KOVINSKIH IZDELKOV

Mirza IMŠIROVIĆ, Uroš TRDAN*, Aljaž ŠČETINEC, Mohammad Reza GHAVI, Nejc AVBELJ, Damjan KLOBČAR
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

* Vodilni avtor: uros.trdan@fs.uni-lj.si

IZVLEČEK

V članku je raziskan vpliv medprocesnih vibracij z elektromagnetnim stresalnikom na funkcionalnost dodajalnih, oblikovno navarjenih kovinskih komponent iz Al zlitine 5356. Pri dodajalno izdelanih stenah pod vplivom vibracij se je povprečna stopnja poroznosti zmanjšala z 10,32 na 7,33 % . Prav tako so se zmanjšala kristalna zrna za 23 % (3654,39 ± 53 proti 4685,35 ± 549 μm^2) . V spodnjem delu stene vibracije popolnoma odpravijo značilno mikrostrukturno anizotropijo v vertikalni smeri gradnje. Hkrati stene izdelane pod vplivom vibracij izkazujejo bistveno boljše geometrijske lastnosti z 36 % manjšo valovitostjo (0,56 proti 0,36). Posledično se izboljša učinkovitost izgradnje sten za 7,5%. Analiza zaostalih napetosti z rentgensko difrakcijo (angl. XRD – X-Ray Diffraction) je pri aditivno izdelanih vzorcih z uporabo vibracij potrdila manjše razlike med nateznimi in tlačnimi zaostalimi napetostmi predvsem v vertikalni smeri izgradnje, kar bi lahko ugodno vplivalo na podaljšanje obratovalne dobe dinamično obremenjenih komponent.

1 UVOD

Oblikovno obločno navarjanje z žico (*angl. WAAM – Wire and Arc Additive Manufacturing*) je napreden postopek 3D izdelave kovinskih komponent, ki temelji na že obstoječih postopkih elektro obločnega varjenja [1]. Sistem za navarjanje je sestavljen iz manipulatorja in varilne opreme [2]. Prednost uporabe WAAM je predvsem v visoki hitrosti izgradnje izdelkov in doseganju skoraj končnih geometrijskih lastnosti Pri WAAM-u je mogoča uporaba vseh vrst materialov, ki se uporabljajo tudi pri konvencionalnih postopkih varjenja [3][4]. Zadnje čase so v uporabi predvsem aluminijeve zlitine serije 5xxx, ki imajo dobre mehanske lastnosti, dobro korozijsko obstojnost in dobro varivost. Prednost uporabe aluminijevih zlitin pri WAAM postopku je predvsem v visoki toplotni prevodnosti, kar bistveno skrajša čas izgradnje [5][6]. Izdelki so zaradi narave procesa, ki temelji na dodajanju materiala sloj po sloj, izpostavljeni visokim temperaturnim gradientom in nehomogenemu vnosu toplote. Posledično taki izdelki v končni obliki ne ustrezajo minimalnim kriterijem zaradi višje stopnje poroznosti, zaostalih napetosti velikega gradienta in mikrostrukturne anizotropije [3][7]. Poroznost predstavlja težavo predvsem pri navarjanju aluminija zaradi visoke topnosti vodika v talini. Visoke ohlajevalne hitrosti pri navarjanju aluminija preprečijo difuzijo vodika iz taline [8]. Druga težava je usmerjena kristalizacija, ki ima za posledico mikrostrukturno anizotropijo. Ta problem se najbolj pojavlja v spodnjem delu stene zaradi usmerjenega odvoda toplote proti substratu. Predgrevanje v določeni meri odpravi usmerjeno kristalizacijo, vendar so kristalna zrna zaradi višje medvarkovne temperature večja [6][8]. Visoke ohlajevalne hitrosti in konstantne variacije temperature čez celoten proces, neugodno vplivajo na razporeditev in stopnjo zaostalih napetosti. Posledično se poslabšajo mehanske lastnosti, predvsem odpornost proti utrujanju [9]. Za odpravo teh napak se uporabljajo površinske in toplotne poobdelave, ki pa so časovno in energijsko potratne [10][11]. Medprocesne »in situ« obdelave lahko vplivajo na proces izdelave komponent tako, da zmanjšajo ali v celoti odpravijo napake v izdelku. Ena izmed medprocesnih obdelav je uporaba vibracij [12]. Z vibracijami je mogoče vplivati na mešanje in homogenizacijo taline ter zmanjševanju deleža poroznosti pri oblikovnem navarjanju [13][14].

2 EKSPERIMENTALNO DELO

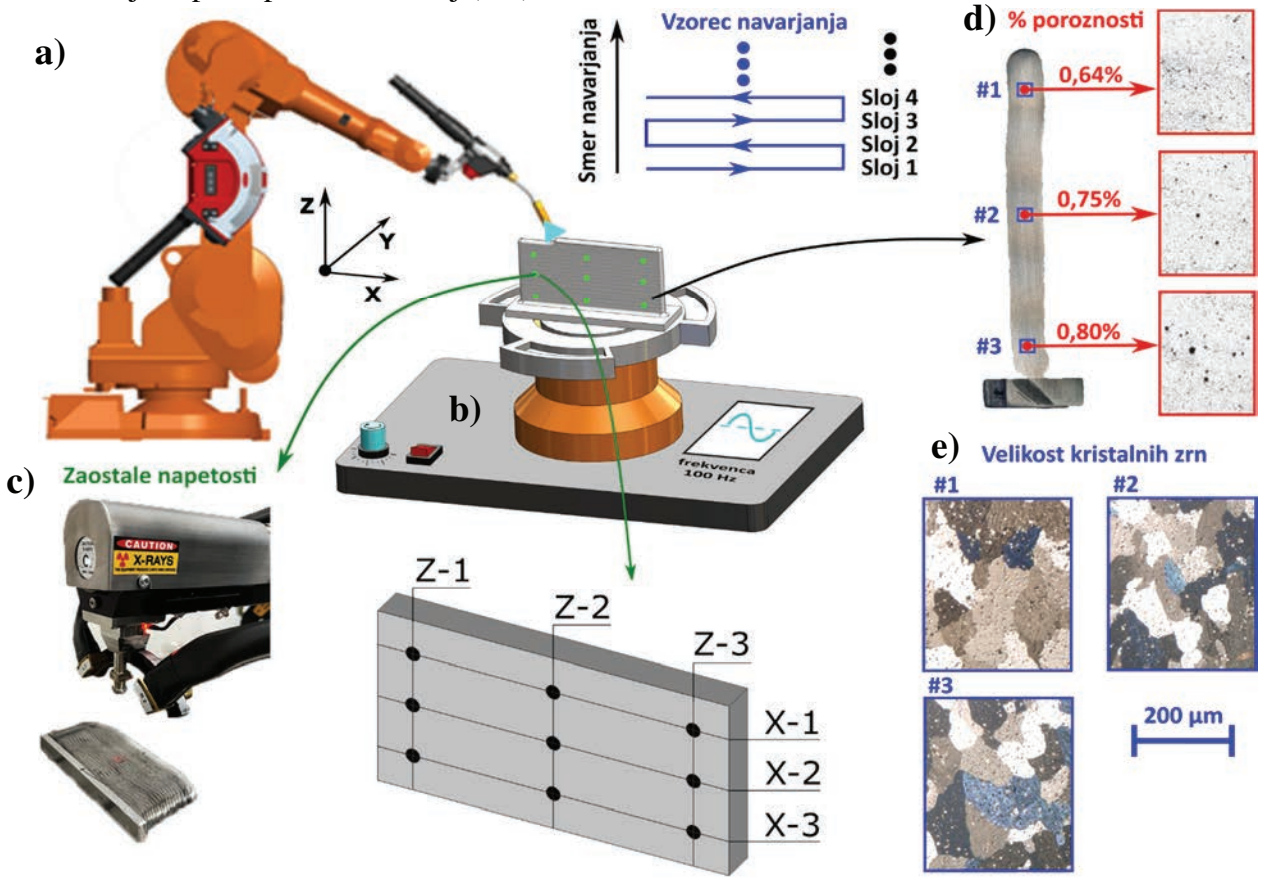
2.1 Postopek oblikovnega navarjanja

V laboratoriju za varjenje na Fakulteti za strojništvo smo uporabili namensko izdelan elektromagnetni stresalnik (slika 1b) prilagojen v sklopu sistema za navarjanje. Navarjanje je potekalo z ABB robotsko roko z nameščenim MIG/MAG gorilnikom (slika 1a). Dodajni material je bil ER5356 (AlMg5). Podlaga za navarjanje je bila hladno valjana aluminijeva plošča oznake AF12 (99% Al) in debeline 4 mm. Substrat ni bil predgrevan. Uporabljen je bil varilni postopek CMT+P z zaščitnim plinom argonom. Navarjanje slojev je potekalo izmenično. Po vsakem navarjenem sloju je vmesni čas ohlajanja znašal 45 sekund. Frekvenca vibracij je znašala 100 Hz in je bila konstantna čez celoten proces. Vibracije so bile inducirane v vzdolžni in prečni smeri na smer navarjanja. Izdelani sta bili dve steni, referenčna stena brez vpliva vibracij (BV) in stena navarjena pod vplivom vibracij (ZV).

Tabela 1: Varilni parametri in karakteristike WAAM postopka

Število navarjenih plasti [-]	40
Jakost varilnega toka [*I*]	49
Obločna napetost [*V*]	14
Čas ohlajanja slojev [*s*]	45
Hitrost varjenja [*mm/s*]	10
Premer žice [*mm*]	1,2
Hitrost podajanja žice [*m/min*]	2,5
Pretok plina [*l/min*]	12
Dolžina stene [*mm*]	100
Višina sloja [*mm*]	1,1

Na sliki 1 je shematsko prikazan postopek navarjanja in potek eksperimentalnega dela.



Slika 1: Shema poteka eksperimentalnega dela: a) ABB robot, b) elektromagnetni stresalnik, c) merjenje zaostalih napetosti, d) analiza poroznosti, e) analiza velikosti kristalnih zrn

2.2 Analiza poroznosti in geometrije

Analiza poroznosti je bila izvedena s programom ImageJ za vsak del stene (slika 1d). Na vsakem delu stene so bile izvedene tri meritve z variacijo kriterija za določevanje sferičnih oblik delcev. Pridobljeni podatki so ovrednoteni s statistično metodo povprečne vrednosti. Maksimalne (W_{max}) in minimalne (W_{min}) širine stene so bile prav tako izvedene z uporabo programa ImageJ.

2.3 Merjenje zaostalih napetosti

Merjenje zaostalih napetosti je bilo izvedeno z uporabo rentgenske difrakcije na napravi iXRD (slika 1c). Izbrana metoda za merjenje zaostalih napetosti je bila $\sin^2\psi$. Meritve so bile izvedene na devetih določenih točkah v x in z smeri glede na smer gradnje kot je to prikazano na sliki 1c. Za analizo je bilo vzeto povprečje treh vrednosti za posamezen del stene. Parametri merjenja zaostalih napetosti so podani v tabeli 2.

Tabela 2: Parametri merjenja zaostalih napetosti

Tip rentgenske glave	Cr K-α
Braggov kot (2θ) [°]	139
Čas sevanja [*s*]	2
Število intenzitetnih profilov	20
Kot β [°]	22
Število izbranih kotov β [-]	9
Kot oscilacije pri β [°]	±3
Valovna dolžina [A°]	2,291

2.4 Metalografska priprava vzorcev

Vzorci za analizo mikrostrukture in poroznosti so bili izrezani iz sredine stene (slika 1c). Metalografska priprava je zajemala brušenje vzorcev na brusnem papirju SiC #1000, #2000 in #2400 granulacije. Za razkritje mej zrn je bil uporabljen postopek anodiziranja z Barkerjevim reagentom pri napetosti 20 V in času 2 minut.

2.5 Izračun povprečne dolžine in površine kristalnih zrn

Slike mikrostruktur za analizo povprečne površine in povprečne dolžine kristalnih zrn so bile posnete z optičnim mikroskopom Keyence na 300x povečavi. Povprečna dolžina kristalnih zrn je bila izračunana z linijsko metodo po standardu ASTM - E1382 v z in y smeri glede na smer gradnje. Prav tako je bila po temu standardu s planimetrično metodo izračunana povprečna površina kristalnih zrn.

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

3.1 Geometrijske lastnosti

Na podlagi minimalne in maksimalne širine sten, ki so bile določene v programu ImageJ je bila valovitost stene preračunana po enačbi 1.

$$W = \frac{W_{max} - W_{min}}{2} \quad (1)$$

Učinkovitost izgradnje sten je bila preračunana po enačbi 2.

$$\eta = \frac{W_{max}}{W_{min}} \cdot 100\% \quad (2)$$

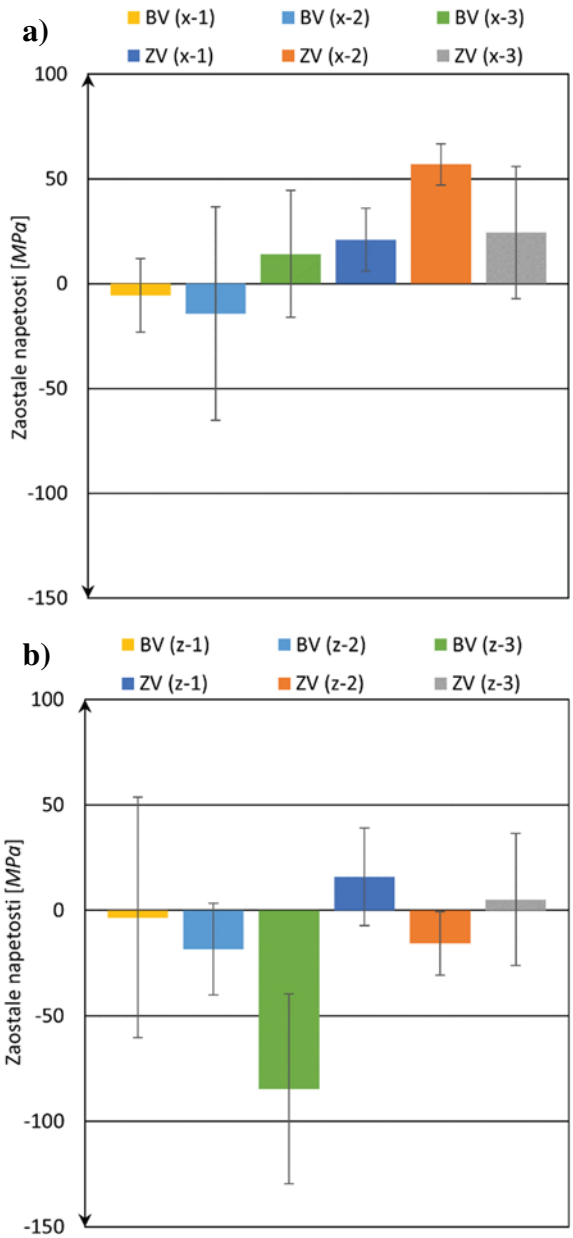
Tabela 3: Geometrijske lastnosti navarjenih sten

	W_{min} [*mm*]	W_{max} [*mm*]	W [*mm*]	η [%]
BV	3,91	5,03	0,56	77,73
ZV	4,16	4,88	0,36	85,24

Tabela 3 prikazuje geometrijske vrednosti sten navarjene brez in pod vplivom vibracij. Valovitost pri steni ZV je bila za 35,7 % manjša kot pri steni BV. Učinkovitost izgradnje se je pri steni ZV zaradi manjšega razmerja med minimalno in maksimalno širino stene povečala za približno 7,5 %.

3.2 Zaostale napetosti

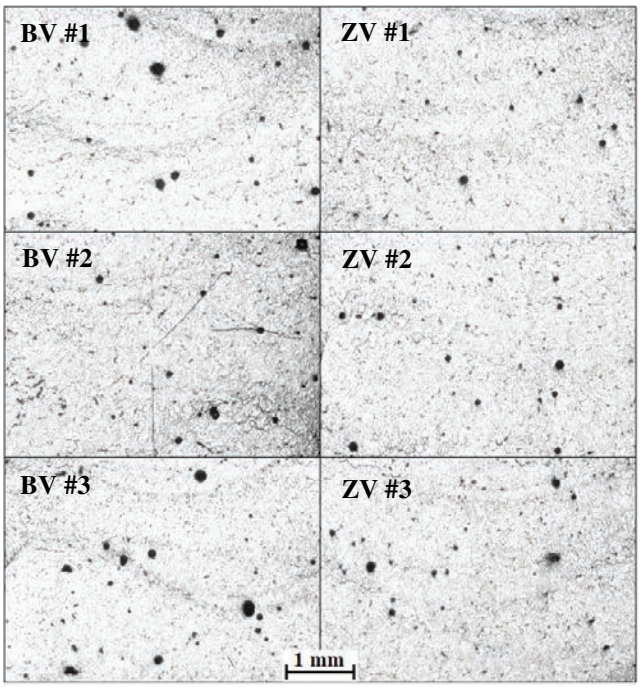
Na sliki 2a je prikazana povprečna vrednost zaostalih napetostih merjenih v x smeri (slika 1c) za spodnji, srednji in zgornji del glede na smer gradnje. Vidno je, da so bile pri steni ZV prisotne zaostale natezne napetosti, medtem ko so bile pri steni BV prisotne natezne in tlačne zaostale napetosti nižjega ranga. Na sliki 2b je prikaz zaostalih napetosti v z smeri gradnje. Vidno, je da so pri steni ZV prisotne izmenične zaostale napetosti nižjega ranga, medtem ko so pri steni BV prisotne tlačne zaostale napetosti do -80 MPa.



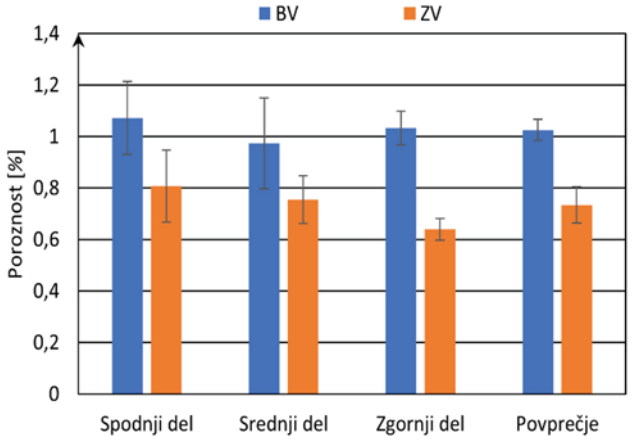
Slika 2: Zaostale napetosti: a) povprečje meritev v x smeri, b) povprečje meritev v z smeri

3.3 Poroznost

Analiza poroznosti je pokazala, da je bila stopnja poroznosti v vseh treh segmentih stene ZV manjša kot pri steni BV. Zanimivo je opažanje, da se je stopnja poroznosti pri steni ZV manjšala od substrata proti vrhu stene (slika 3, slika 4). Eden izmed možnih razlogov za to so manjše ohlajevalne hitrosti na vrhu stene zaradi manjšega temperaturnega gradienta kot pri spodnjih slojih. V daljšem časovnem okvirju imajo vibracije večji učinek na razplinjanje taline. Povprečna stopnja poroznosti se je zmanjšala z 1,02 % na 0,73 %.



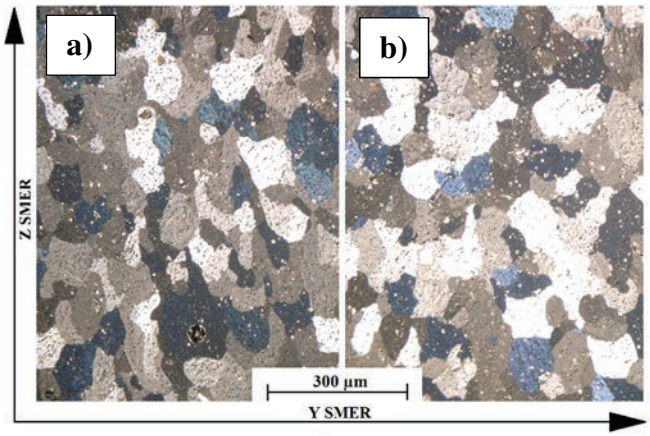
Slika 3: Makroskopska slika poroznosti po posameznih področjih (#1 - zgornji del, #2 - srednji del, #3 - spodnji del).



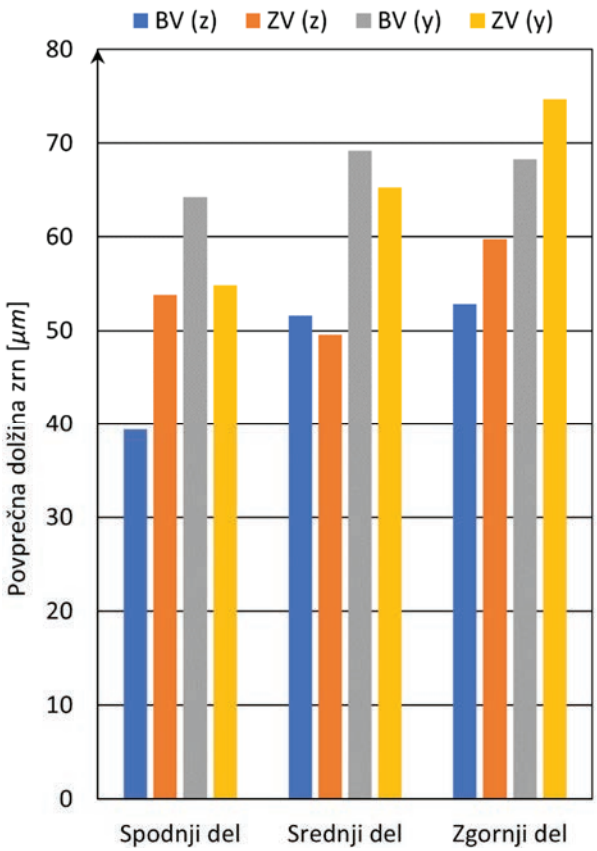
Slika 4: Stopnja poroznosti po posameznih delih sten ter povprečna stopnja poroznosti

3.4 Mikrostruktura

Mikrostruktura spodnjega dela stene BV (slika 5a) kaže mikrostrukturno anizotropijo v vertikalni smeri gradnje, ki je posledica usmerjenega odvoda toplote proti substratu. Kristalna zrna so pri stenah ZV (slika 5b) manj anizotropna. To nakazuje na odpravo usmerjene kristalizacije in posledično zmanjšanje mikrostrukturne anizotropije v spodnjem delu stene.

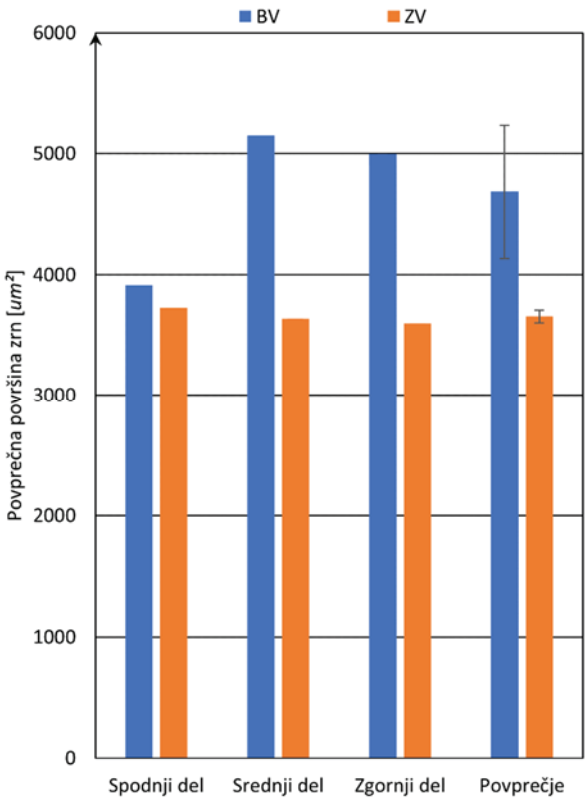


Slika 5: Mikrostruktura spodnjega dela stene na 300x povečavi: a) BV, b) ZV



Slika 6: Povprečna dolžina kristalnih zrn po posameznih področjih stene v z in y smer.

Linijska analiza povprečne dolžine kristalnih zrn v z in x smeri gradnje (slika 6) je pokazala, da so bila kristalna zrna pri BV in ZV manjša v spodnjem delu stene. To je posledica hitrejšega odvoda toplote proti substratu. Proti vrhu stene se je povprečna dolžina kristalnih zrn povečevala zaradi višje medvarkovne temperature. V spodnjem delu stene je bilo razvidno, da je bila razlika v dolžini kristalnih zrn v y in z smeri pri steni ZV manjša kot pri steni BV. To nakazuje na učinek vibracij na odpravo usmerjenega strjevanja.



Slika 7: Povprečna površina kristalnih zrn po posameznih področjih stene ter skupno povprečje

Planimetrična analiza površine kristalnih zrn (slika 7) je pokazala, da je povprečna površina kristalnih zrn v srednjem in zgornjem delu sten ZV manjša kot pri stenah BV. Vibracije imajo neposreden vpliv na valovanje taline, ki inducira upogibne napetosti na primarno izločene dendrite. Posledično se del dendritov poruši in tako nastanejo dodatne heterogene kali za nastanek in rast kristalnih zrn. Povprečna površina zrn je bila pri steni ZV manjša za 22 % (3654,39 ± 53 proti 4685,35 ± 549 µm^2).

4 SKLEPI

Na podlagi izvedenega eksperimentalnega dela in opravljenih analiz lahko potrdimo, da imajo medprocesne vibracije pri oblikovnem navarjanju nedvomno izreden vpliv na končno funkcionalnost izdelkov. Pri tem lahko glavne ugotovitve strnemo v naslednje zaključke:

- Stopnja poroznosti se v povprečju zmanjša z 1,02 % na 0,73 % pri steni ZV.
- Povprečna površina kristalnih zrn je pri steni ZV manjša za 22 % (3654,39 ± 53 proti 4685,35 ± 549 μm^2).
- Mikrostrukturna anizotropija je manjša pri stenah ZV, kar potrjuje manjša deviacija površine kristalnih zrn (53 proti 549 um^2).
- Učinkovitost izdelave se zaradi manjše stopnje valovitosti (0,56 proti 0,36) pri steni ZV poveča za 7,5 %.

ZAHVALA

Raziskava je bila podprta s strani Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (številka programa: P2-0270 in Bilateralnega projekta: BI-TR/22-24-08) in Evropske Unije s strani projekta *ERASMUS+ Strategic Partnership Key Action 2*, number: *2021-1-RO01-KA220-VET-000028028, DIGIGREEN*. Zahvala tudi Janu Testenu za pomoč pri izvedbi eksperimentalnega dela.

Viri:

[1] S. R. Singh in P. Khanna, „Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials“, *Mater Today Proc*, let. 44, str. 118–128, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.030.

[2] A. Ščetinec, D. Klobčar, in D. Bračun, „In-process path replanning and online layer height control through deposition arc current for gas metal arc based additive manufacturing“, *J Manuf Process*, let. 64, str. 1169–1179, apr. 2021, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2021.02.038.

[3] B. Tomar, S. Shiva, in T. Nath, „A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances“, *Mater Today Commun*, let. 31, str. 103739, jun. 2022, doi: 10.1016/J.MTCOMM.2022.103739.

[4] Z. Pan, D. Ding, B. Wu, D. Cuiuri, H. Li, in J. Norrish, „Arc Welding Processes for Additive Manufacturing: A Review“, *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*, št. 2, str. 3–24, 2018, doi: 10.1007/978-981-10-5355-9_1.

[5] U. Trdan, J. A. Porro, J. L. Ocaña, in J. Grum, „Laser shock peening without absorbent coating (LSPwC) effect on 3D surface topography and mechanical properties of 6082-T651 Al alloy“, *Surf Coat Technol*, let. 208, str. 109–116, sep. 2012, doi: 10.1016/J.SURFCOAT.2012.08.048.

[6] C. Zhang, M. Gao, in X. Zeng, „Workpiece vibration augmented wire arc additive manufacturing of high strength aluminum alloy“, *J Mater Process Technol*, let. 271, str. 85–92, sep. 2019, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2019.03.028.

[7] E. Maleki, S. Bagherifard, M. Bandini, in M. Guagliano, „Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities“, *Addit Manuf*, let. 37, št. May 2020, str. 101619, 2021, doi: 10.1016/j.addma.2020.101619.

[8] T. Hauser *idr.*, „Porosity in wire arc additive manufacturing of aluminium alloys“, *Addit Manuf*, let. 41, str. 101993, maj 2021, doi: 10.1016/J.ADDMA.2021.101993.

[9] J. Sun, J. Hensel, M. Köhler, in K. Dilger, „Residual stress in wire and arc additively manufactured aluminum components“, *J Manuf Process*, let. 65, str. 97–111, maj 2021, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2021.02.021.

[10] L. Hackel, J. R. Rankin, A. Rubenchik, W. E. King, in M. Matthews, „Laser peening: A tool for additive manufacturing post-processing“, *Addit Manuf*, let. 24, št. September, str. 67–75, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.09.013.

[11] Y. Zhang, F. Cheng, in S. Wu, „Improvement of pitting corrosion resistance of wire arc additive manufactured duplex stainless steel through post-manufacturing heat-treatment“, *Mater Charact*, let. 171, št. October 2020, str. 110743, 2021, doi: 10.1016/j.matchar.2020.110743.

[12] M. J. Jose, S. S. Kumar, in A. Sharma, „Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds“, *Science and Technology of Welding and Joining*, let. 21, št. 4, str. 243–258, 2016, doi: 10.1179/1362171815Y.0000000088.

[13] C. C. Hsieh, C. H. Lai, in W. Wu, „Effect of vibration on microstructures and mechanical properties of 304 stainless steel GTA welds“, *Metals and Materials International*, let. 19, št. 4, str. 835–844, 2013, doi: 10.1007/s12540-013-4026-2.

[14] F. Ji, X. Qin, Z. Hu, X. Xiong, M. Ni, in M. Wu, „Influence of ultrasonic vibration on molten pool behavior and deposition layer forming morphology for wire and arc additive manufacturing“, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, let. 130, str. 105789, jan. 2022, doi: 10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2021.10578

VELJAVNO MODELIRANJE HRUPA IN VIBRACIJ NA PODLAGI VISOKOLOČLJIVOSTNIH ANALIZ S HITRIMI KAMERAMI

Domen GORJUP, Klemen ZALETELJ, Janko SLAVIČ, Miha BOLTEŽAR
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

IZVLEČEK

Z razvojem tehnologije hitrih kamer v zadnjem obdobju te postajajo nepogrešljivo orodje pri vibracijskem testiranju. Uporabljajo se za vizualizacijo odziva testirane strukture, vibracijsko vzbujene pri visokih frekvencah, z razvojem metod analize slik pa se uveljavljajo tudi pri merjenju pomikov opazovane strukture s prostorsko ločljivostjo, nedostopno s klasičnimi metodami. Na podlagi zadnjih dognanj na področju strukturne dinamike se tovrstne meritve vse več uporabljajo tudi pri vzpostavitvi veljavnih dinamskih modelov v procesu modelnega posodabljanja, kjer je ključna prednost visoka prostorska ločljivost slikovnih meritev. Uveljavljene metode korelacije digitalnih slik so samo ena skupina pristopov k analizi slik. Tudi z učinkovitejšo metodo, ki temelji na gradientu intenzitete slike, lahko identificiramo nihajne oblike na nivoju 1/100000 slikovnega elementa, kar pomeni identifikacijo pomikov na nivoju mikrometra. V prispevku bo prikazana uporaba najhitrejše komercialne kamere na svetu (do 2.1 milijona slik na sekundo) za analize strukturne dinamike. Tak pristop odpira nove možnosti dinamskih analiz, modeliranja, monitoringa ter vibracijskih testiranj z mnogo potencialnimi industrijskimi aplikacijami.

1 UVOD

Slikovne merilne metode dandanes predstavljajo nepogrešljivo orodje v najrazličnejših aplikacijah eksperimentalne mehanike. Njihove glavne prednosti v primerjavi z uveljavljenimi, dotičnimi zaznavali so povezane z neinvazivnim, brezdotičnim načinom delovanja ter visoko prostorsko ločljivostjo sodobnih kamer. Slikovne metode tako omogočajo hitro izvedbo meritev pomikov velikega števila merilnih mest (»polno polje«) na površini merjenca, brez neposrednega vpliva na opazovani proces, z uporabo naprednih metod obdelave zajetih digitalnih slik. Z razvojem tehnologije hitrih kamer v zadnjem obdobju se tovrstne metode vse več uporabljajo tudi za dinamične meritve pri vibracijskih testih, za kar pa je potrebna najsodobnejša merilna oprema, ki omogoča zajem s hitrostjo več sto tisoč slik v sekundi – »fps« (npr. kamera Photron FASTCAM SA-Z z najvišjo hitrostjo $2{,}1 \cdot 10^6$ fps).

Taka tehnologija omogoča uporabo slikovnih metod za natančne meritve pomikov (amplitude na nivoju μm) za uporabo pri eksperimentalni modalni analizi, analizi kinematike mehanskih struktur in mehanizmov, ter tudi za vizualizacijo gibanja, ki je zaradi nizkih amplitud in visokih frekvenc s prostim očesom nezaznavno. Natančno merjenje odziva struktur pri visokih frekvencah z uporabo posnetkov hitrih kamer pa je ključnega pomena tudi na področju veljavnega modeliranja dinamskega odziva vibracijsko vzbujenih struktur, kjer z visokim številom merilnih točk pri meritvi polnega polja odziva strukture odpira nove razsežnosti prostorske lokalizacije v procesih modelnega posodabljanja [1].

2 OBDELAVA DIGITALNIH SLIK

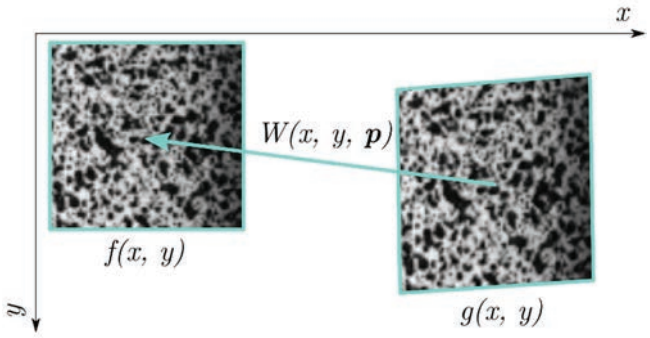
Z napredkom tehnologije digitalne fotografije v sedemdesetih letih dvajsetega stoletja se je pričel razvoj novih, računalniško podprtih metod optičnih meritev v eksperimentalni mehaniki. Prva algoritma identifikacije pomikov iz slik, na katerih slonijo tudi današnje napredne metode, sta bila razvita leta 1981 (Lucas-Kanade [2] in Horn-Schunck [3]) in temeljita na odvodih slikovnih podatkov. Leta 1985 so Sutton in sodelavci uporabili algoritem registracije digitalnih slik za identifikacijo pomikov in deformacij v mehanskih procesih na podlagi korelacije med slikami [4]. Z

imenom korelacija digitalnih slik, kot so razviti algoritem poimenovali, danes označujemo skupino mnogih optičnih metod merjenja pomikov in deformacij, ki temeljijo na optimizaciji podobnosti digitalnih slik v videu.

2.1 Korelacija digitalnih slik

Metoda korelacije digitalnih slik (ang. *Digital Image Correlation, DIC*), v preteklosti uporabljena za identifikacijo deformacij v kvazi-statičnih mehanskih procesih (natezni preizkus), se z razvojem hitrih kamer vse več uporablja tudi v analizah mehanskih vibracij. Z učinkovito implementacijo je sicer numerično zahteven optimizacijski algoritem primeren tudi za obdelavo velike količine podatkov posnetkov hitrih kamer.

Pri korelaciji digitalnih slik iščemo optimalne vrednosti parametrov $\boldsymbol{p}$ geometrijske preslikave $\boldsymbol{W}(x, y, \boldsymbol{p})$, s katero začetno sliko nedeformiranega objekta $f(x, y)$ čim bolj približamo stanju na novi sliki $g(x, y)$, po premiku le-tega v mehanskem procesu.



Slika 1: Geometrijska preslikava za optimizacijo.

Kot kriterij odstopanja med slikama lahko v najosnovnejšem primeru uporabimo vsoto kvadratov razlik sivinskih vrednosti, zapisano v enačbi (1) [5].

$$SSD = \sum_x [g(\boldsymbol{W}(x, y, \boldsymbol{p})) - f(x, y)]^2 \qquad (1)$$

Numerična zahtevnost rešitve je med drugim odvisna tudi od števila parametrov $\boldsymbol{p}$, katerih optimalne vrednosti iščemo. Problem lahko poenostavimo z izbiro toge geometrijske preslikave $\boldsymbol{W}(x, y, \boldsymbol{p})$ s tremi parametri, ki opredeljujejo translacijo in rotacijo merjenca v ravnini slike. Taka preslikava je v večini primerov dober približek dejanskega stanja pri analizi pomikov majhnih podobmočij slike pri merjenju vibracij, in omogoča hitro in natančno analizo pomikov v slikah hitrih kamer.

Funkcija geometrijske preslikave $\boldsymbol{W}(x, y, p)$ celoštevilskih koordinat slik $f(x, y)$ in $g(x, y)$ ne preslika nazaj na obstoječo koordinatno mrežo. Za izračun vrednosti v (1), ki operirajo nad transformiranimi slikami, je torej potrebna interpolacija sivinskih vrednosti v koordinatnih točkah, dobljenih z geometrijsko preslikavo. Na ta način dobljeni rezultati niso več omejeni z ločljivostjo prostorskega vzorčenja zajetih slik. Posledično lahko torej identificiramo pomike, ki so bistveno manjši od posameznega slikovnega elementa (prag šuma na nivoju 10^{-5} piksla [6]).

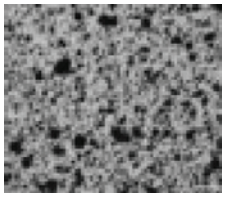
2.2 Metoda analize optičnega toka

Optični tok predstavlja spremembe v intenziteti slike zaradi pomikov snemanega objekta in tipično temelji na določanju pomikov iz slik preko gradienta (odvodov) slike [1]. Za majhne pomike se namreč izkaže, da se premik v sliki pozna kot sprememba intenzitete (barve), premosorazmerna velikosti gradienta slike $\nabla f(x, y)$ [6]:

$$\Delta s(x, y) = \frac{g(x,y) - f(x,y)}{\nabla f(x,y)} \qquad (2)$$

Na tak način lahko identificiramo pomik vsakega slikovnega elementa (»piksla«), vendar le v smeri gradienta slike in v kolikor je gradient zadosten, da pomik povzroči znatno spremembo intenzitete.

Za doseganje dobre občutljivosti identifikacije pomikov iz slik se priporoča uporaba visoko-intenzitetnih vzorcev, pogosto v obliki pack (Slika 2).



Slika 2: Primer visoko-intenzitetnega vzorca.

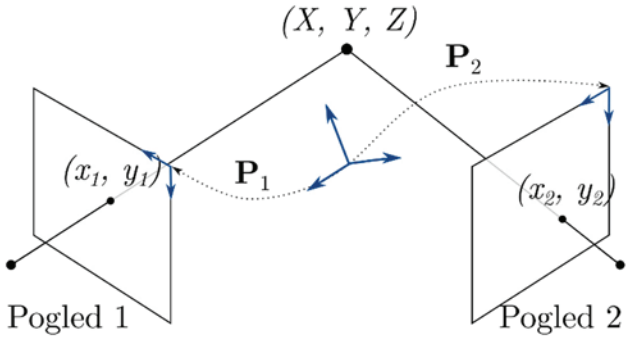
Metoda Lucas-Kanade identificira dvo-dimenzionalne pomike manjših podobmočij slike, tako da združi informacijo o pomikih slikovnih elementov podobmočja slike na podlagi najmanjše napake. Primerljiva je s korelacijskimi metodami

in celo enaka v primeru nekaterih poenostavitev, kot sta prvi red interpolacije in enostaven korelacijski kriterij [7]. Ker pri izračunu (2) iterativna optimizacija ni potrebna, pa je uporaba gradientnih metod analize optičnega toka računsko veliko učinkovitejša od korelacijskih pristopov, in tako posebej primerna za analizo posnetkov hitrih kamer pri mehanskih vibracijah.

2.3 Uporaba več pogledov za 3D meritve

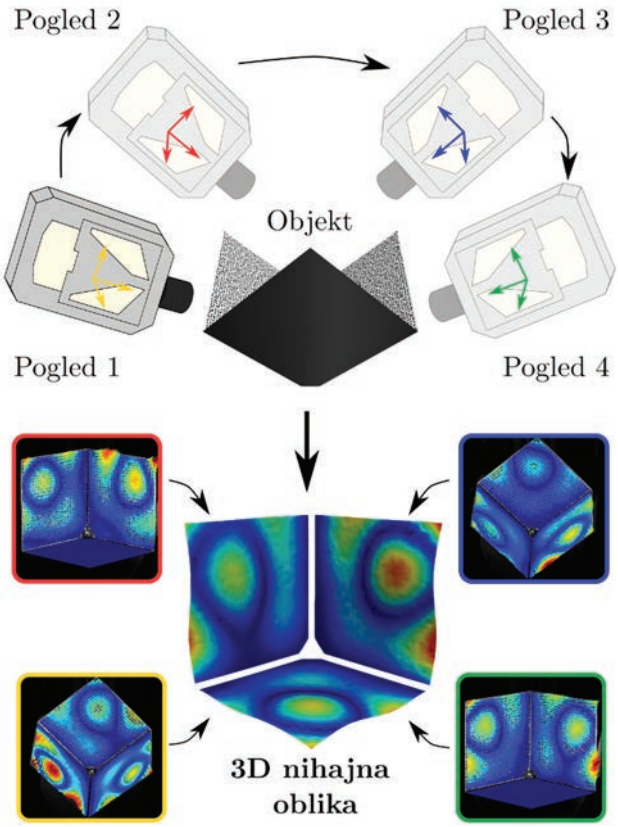
Postopek zajema posamezne slike matematično opišemo s t. i. centralno perspektivno preslikavo, ki točke iz 3D prostora preslika v 2D ravnino slike [8]. Pri tem se izgubi informacija o globini opazovanih točk, zato je taka preslikava ireverzibilna.

Izgubljeno prostorsko informacijo lahko rekonstruiramo na podlagi več (vsaj dveh) pogledov na vsako od opazovanih točk v postopku triangulacije (Slika 3).



Slika 3: 3D rekonstrukcija s triangulacijo.

Za rekonstrukcijo 3D geometrije in meritev na podlagi digitalnih slik torej potrebujemo več pogledov na isti merjenec, kar v praksi običajno pomeni uporabo več sočasno delujočih kamer. Alternativo triangulaciji z več slikami, sinhronimi v času, predstavlja nedavno predstavljeni postopek frekvenčne triangulacije [8]. Ta na podlagi predpostavk, značilnih za meritve mehanskih vibracij, omogoča meritve obratovalnih nihajnih oblik opazovane strukture na nivoju mikrometra z uporabo ene same, premikajoče kamere (Slika 4).



Slika 4: Triangulacija več pogledov za meritev 3D nihanja v frekvenčni domeni.

2.4 Posodabljanje modelov

Z uporabo numeričnih modelov lahko hitro in ponovljivo simuliramo robne in obratovalne pogoje ter enostavno izvedemo geometrijske in materialne spremembe. Numerični model omogoča boljše razumevanje strukture, vendar le v primeru, da je model reprezentativen za realno strukturo. Parametre numeričnega modela (materialni, geometrijski) pogosto identificiramo z uporabo postopka modelnega posodabljanja. Vrednosti parametrov identificiramo na podlagi primerjave med odzivi (lastne frekvence in lastne oblike) numeričnega modela in realne strukture. S hitro kamero lahko merimo lastne oblike polnega polja z visoko prostorsko ločljivostjo. Z visoko gostoto lokaliziranih informacij o odzivu strukture je mogoče identificirati veliko število lokaliziranih parametrov strukture [9]. Med ključnimi koraki v postopku posodabljanja je določitev parametrov, ki jih želimo identificirati. Ta korak je še posebej zahteven, ko imamo opravka z zveznimi strukturami. Ob uporabi hitre kamere za identifikacijo 3D odziva [8], je možno

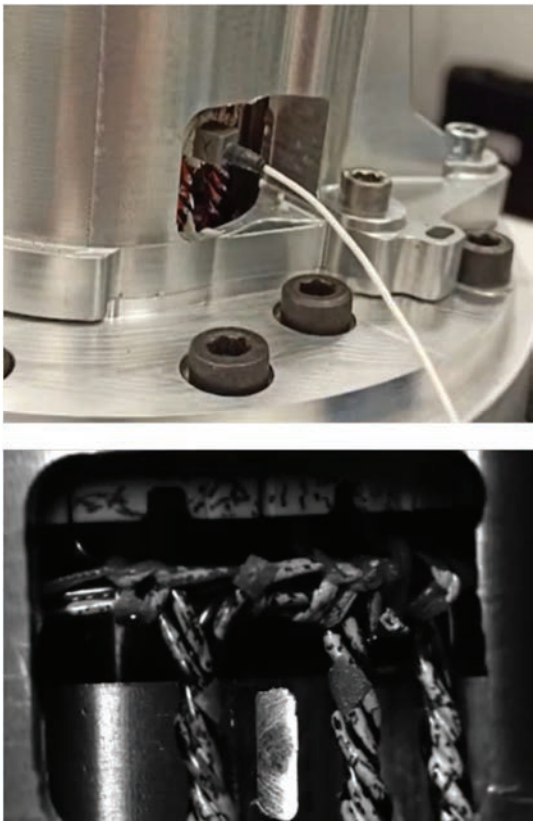
identificirati območja parametrov na podlagi ukrivljenosti posamezne lastne oblike za poljubno strukturo [1].

3 PRIMERI UPORABE

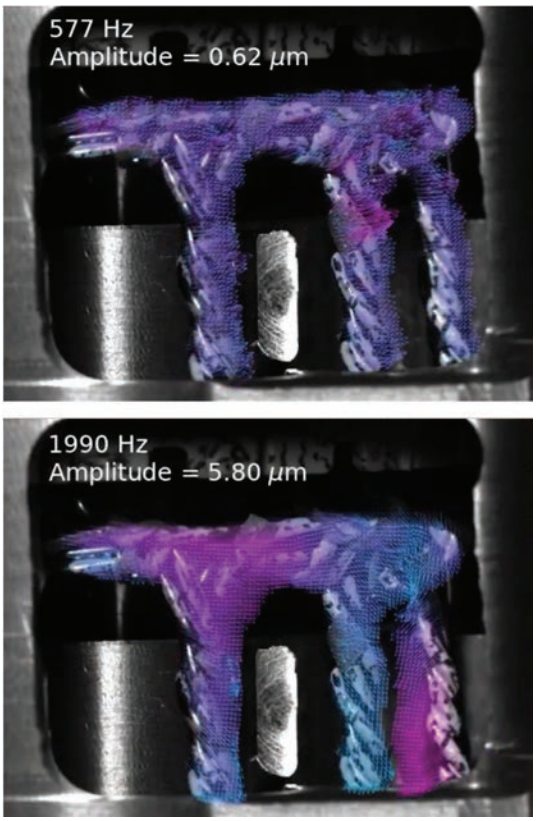
Primer 1: Kinematika električnih vodnikov

Brezdotične, neinvazivne optične metode z uporabo hitre kamere ponujajo nove možnosti analize strukturne dinamike. Kadar zaradi dimenzijskih omejitev opazovanega objekta, težje dostopnosti ali kratkotrajnosti opazovanega pojava bolj uveljavljena merilna orodja ne pridejo v poštev, lahko z uporabo slikovnih meritev iz enega samega posnetka ustrezno pripravljene površine s hitro kamero dobimo podatke o pomikih, zasukih in deformacijah merjenca v ravnini kamere med obratovanjem.

Implementirano metodo identifikacije pomikov na digitalnih slikah smo uporabili pri analizi kinematike električnih vodnikov, ki predstavljajo potencialno kritično točko odpovedi pri vibracijskem testu kompleksne mehanske komponente (Slika 5). Dostop do opazovane strukture med vibracijskim testom je omejen, prav tako zaradi dimenzijskih ter prostorskih omejitev vzpostavitev večjega števila merilnih mest s klasičnimi zaznavali (npr. pospeškomer) ni mogoča. Z uporabo hitre kamere in metod analize digitalnih slik smo izvedli meritev kinematike odziva med vibracijskim testom v ravnini zajetih slik. Z analizo v frekvenčni domeni smo identificirali različne nihajne oblike (dva primera prikazuje Slika 6) in tako določili kritične točke na strukturi, kjer lahko pričakujemo porušitev zaradi vibracijskega utrujanja pri dolgotrajnem obratovanju. Uporaba analize digitalnih slik z metodami DIC ter analizo optičnega toka predstavlja dobro alternativo konvencionalnim merilnim tehnikam, ki z uporabo najzmogljivejše dostopne merilne opreme omogoča visokofrekvenčne meritve (nekaj kHz) pomikov na mikrometrski skali. Slikovne metode so nepogrešljive, kadar imamo zaradi dimenzijskih omejitev ali obratovalnih pogojev naprave težave z uporabo točkovnih zaznaval ter pri meritvah, ki zahtevajo visoko gostoto merjenih točk.



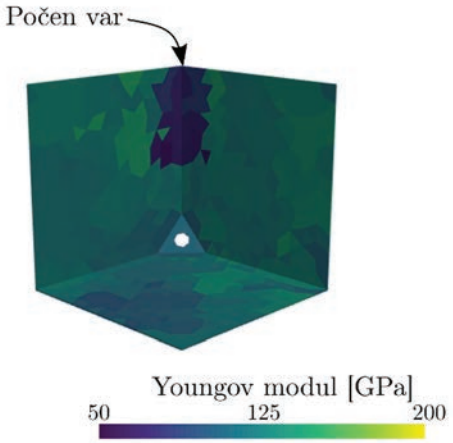
Slika 5: Postavitev eksperimenta in primer slike.



Slika 6: Primera nihajnih oblik, identificiranih pri meritvi s hitro kamero [10].

Primer 2: Modelno posodabljanje

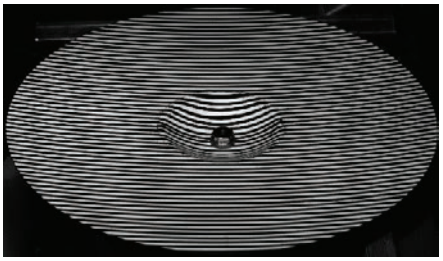
Slika 7 prikazuje varjeno strukturo iz pločevine. Določitev parametrov za posodabljanje numeričnega modela takšne strukture je zahtevno, saj ni očitnega konstrukcijskega elementa, katerega lastnosti bi želeli identificirati. Z uporabo določanja parametrov na podlagi ukrivljenosti posamezne lastne oblike [1] pa lahko posodabljamo polno polje parametrov in tako identificiramo lokalne lastnosti strukture. Na Slika 7 so prikazane vrednosti Youngovega modula za vsak končni element. Opazno je, da je bilo na mestu vara v postopku posodabljanja zaznano znižanje Youngovega modula, kar je posledica razpoke v varu.



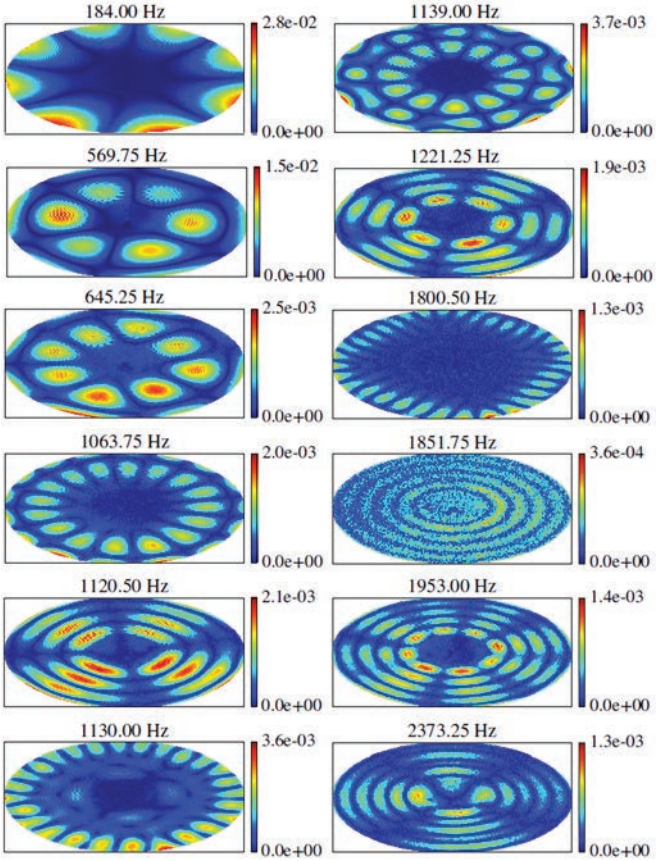
Slika 7: Posodobljeni parametri modela v polnem polju.

Primer 3: Ravninsko nihanje činele

Slika 8 prikazuje spodnjo stran činele, posneta s hitro kamero v stranskem pogledu, da so razvidni pomiki v smeri pravokotno na površino činele. Iz hitrega posnetka nihanja činele je moč razbrati pomike ranga tisočinke in celo deset-tisočinke slikovnega elementa, tudi pri relativno visokih frekvencah (2400 Hz) [6]. Z uporabo hitre kamere z visoko ločljivostjo je mogoče identificirati polno polje pomikov opazovane strukture, z metodami frekvenčne analize pa tako identificiramo nihajne oblike strukture pri različnih frekvencah (Slika 9).



Slika 8: Posnetek spodnje strani činele.



Slika 9: Identificirane nihajne oblike činele.

4 ZAKLJUČKI

V prispevku smo predstavili nekatere teoretične osnove obdelave digitalnih slik z namenom identifikacije in vizualizacije pomikov pri vibracijskih testih. Napredek na področju obdelave slik in tehnologije hitrih kamer v zadnjem času omogoča identifikacijo pomikov na nivoju 10^{-4} slikovnega elementa. Na ta način je mogoče identificirati nihajne oblike pri zelo visokih frekvencah nihanja (več kHz), ter prikazati pomike mehanskih sistemov, ki jih s prostim očesom ni mogoče zaznati, z obstoječimi, točkovnimi merilnimi metodami pa ne učinkovito opisati.

Viri:

[1] K. Zaletelj, D. Gorjup, J. Slavič, M. Boltežar, Multi-level curvature-based parametrization and model updating using a 3D full-field response, *Mechanical Systems and Signal Processing* 187 (2023), str. 109927.
[2] B.D. Lucas, T. Kanade, An iterative image registration technique with an application to stereo vision, *International Joint Conference on Artificial Intelligence* (1981) .
[3] B.K. Horn, B.G. Schunck, Determining optical flow. *1981 Technical Symposium East. International Society for Optics and Photonic*s (1981), str. 319-331.
[4] Chu, T. C., Ranson, W. F., Sutton, M. A., Peters, W. H.: Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental Mechanics* 25(1985), str. 232-244.
[5] Sutton, M. A., Orteu, J. J., Schreier, H.: *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*, Springer Science & Business Media, New York, 2009.
[6] J. Javh, J. Slavič, M. Boltežar, The subpixel resolution of optical-flow based modal analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing* 88 (2017) str. 89–99.
[7] Bing, P., Hui-min, X., Bo-qin, X., Fu-long, D., Performance of sub-pixel registration alghorithms in digital image correlation, *Measurement Science and Technology* (2006), str 1615-1621
[8] D. Gorjup, J. Slavič, M. Boltežar, Frequency domain triangulation for full-field 3D operating-deflection-shape identification, *Mechanical Systems and Signal Processing* 133 (2019) str. 106287.
[9] K. Zaletelj, J. Slavič, M. Boltežar, Full-field DIC-based model updating for localized parameter identification, *Mechanical Systems and Signal Processing* 164 (2022) str. 108287.
[10] LADISK: High speed camera vibration fatigue analysis (https://www.youtube.com/watch?v=RIjK8CuhOOM)

ANALIZA TOPLOTNOTEHNIČNIH KARAKTERISTIK IZMENJEVALCA TOPLOTE NA POTISNI PEČI

Matic BOBNAR[1,2], Špela JERAJ[1], Gašper KREK[1], Bojan RAJAKOVIĆ[2], Aleš NAGODE[1], Borut KOSEC[1,3]

[1] Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta
[2] SIJ Acroni d.o.o.
[3] Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

IZVLEČEK

V največjem slovenskem proizvajalcu jekla družbi SIJ ACRONI d.o.o. Jesenice uporabljajo za ogrevanje jeklenih slabov pred postopkom vročega valjanja potisno peč proizvajalca RUST. Proizvodnja jekla in posledično potisna peč RUST v SIJ ACRONI d.o.o. deluje kontinuirno praktično 365 dni v letu, 24 ur na dan, potisna peč je kurjena z zemeljskim plinom in je največji potrošnik zemeljskega plina v družbi.
Določena rešitev navedenih problemov je pred leti z nadgradnjo potisne peči s konvektivnim cevnim rekuperatorjem proizvajalca KEU GmbH bistveno povečala energetsko učinkovitost agregata in zmanjšala problem ekologije

Kot glavni del našega dela smo podrobno analizirali obstoječo potisno peč in rekupertor tako pridobili konkretno inženirsko potrditev, da zdajšen rekuperator ustreza pogojem dela.. Ugotovili smo, da se toploto dimnih plinov za rekuperatorjem da še dodatno izkoristiti z ogrevnimi jamami, ki bi slabom zvišale začetno temperaturo pred ogrevanjem v potisni peči.

1 UVOD

Vroče preoblikovanje je proces pri katerem preoblikujemo material pri temperaturi nad temperaturo rekristalizacije. Za doseganje te temperature, se v največjem slovenskem proizvajalcu jekla SIJ ACRONI d.o.o. uporablja potisno peč, ki segreje jeklene slabe na temperaturo približno 1250 °C, pri čemer se sprostijo visoko temperaturni dimni plini. Ker imajo ti plini veliko termične energije, se v industrijski praksi stremi, k čim večjemu izkoristku le-te, z različnimi izmenjevalci toplote rekuperatorji, regeneratorji, itd. [1].

V okviru našega dela, smo s toplotnotehničnimi preračuni preverili stanje rekuperatorja ter predlagali inženirsko rešitev, ki bi izboljšala trenuten izkoristek entalpije dimnih plinov, poleg tega pa bi toploto dimnih plinov za rekuperatorjem, še dodatno izkoristili z ogrevalnimi jamami, ki bi jeklene slabe predgrele, še preden pridejo v potisno peč.

2 CEVNI REKUPERATOR ZA PREDGREVANJE ZRAKA

Cevni rekuperator KEU GmbH, je bil na potisni peči RUST v podjetju SIJ Acroni d.o.o., instaliran sredi osemdesetih let, ko je bila potisna peč predelana z ogrevanja mazutom na zemeljski plin. Od takrat, na rekuperatorju, ni bilo narejenih večjih modifikacij oziroma izboljšav. Rekuperator je namenjen izkoriščanju toplote dimnih plinov industrijskih peči s predgrevanjem za gorilnike peči dovedenega zraka za zgorevanje. Namenjen je za t.i. vgradnjo v dimovodni kanal (Sliki 1, 2).

Matic BOBNAR[1,2], Špela JERAJ[1], Gašper KREK[1], Bojan RAJAKOVIĆ[2], Aleš NAGODE[1], Borut KOSEC[1,3]
[1] Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta
[2] SIJ Acroni d.o.o.
[3] Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

Slika 1: Cevni rekuperator proizvajalca KEU GmbH na potisni peči RUST.

Slika 2: Notranjost in cevi cevnega rekuperatorja [2].

Rekuperator dela na principu izmenjave toplote preko dveh tankostenskih sistemov. V enem sistemu se pretaka fluid (dimni plini) z višjo, v drugem sistemu pa fluid (zrak) z nižjo temperaturo. Po osnovah prenosa toplote, se pri temperaturnem gradientu vzpostavi nek toplotni tok, torej sistem z višjo temperaturo ogreva sistem z nižjo temperaturo.

Poleg geometrije rekuperatorja je izredno pomemben tudi sam material, iz katerega je izdelan. Obravnavani rekuperator je izdelan iz visokotemperaturno obstojnih jekel kvalitet 1.0305, 1.4720 in 1.4749. Navedena jekla odlikuje nizka toplotna prevodnost, ki je najbolj pomembna pri karakteristiki rekuperatorja. Za analizo rekuperatorja potrebujemo tudi meritve temperature, ki bodo predstavljene v nadaljevanju [2].

3 MERITVE TEMPERATUR NA POTISNI PEČI IN REKUPERATORJU

Meritve temperatur, tlakov, pretokov zraka in zemeljskega plina se kontinuirano izvajajo, med samim obratovanjem potisne peči.

Operater, lahko do on-line podatkov vedno dostopa, in tako uspešno nadzira procese, ter ukrepa v primeru napak ali nepredvidljivih dogodkih.

Za kontroli izračun obstoječega rekuperatorja, smo ročno merili temperaturo zgorevalnega zraka za rekuperatorjem (ϑ''_p) in temperaturo dimnih plinov pred in za rekuperatorjem (ϑ'_p in ϑ''_p). Merili smo 120 minut, pri čemer smo odčitali temperaturo vsakih 20 minut. Tako smo iz šestih meritev, izračunali srednjo vrednost, ki je podana v tabeli 1.

Tabela 1: Meritve temperatur

Meritev	**ϑ_z'' [°C]**	**ϑ'_p [°C]**	**ϑ''_p [°C]**
1	309	851	436
2	297	842	427
3	282	839	403
4	305	820	413
5	286	845	403
6	293	845	409
$T_{povp.}$	*295*	*840*	*415*

4 KONTROLNI PRERAČUN IN OCENA STANJA REKUPERATORJA

Za kontrolni preračun in oceno stanja rekuperatorja, smo uporabili algoritem preračuna rekuperatorja gladkih cevi, ki sta ga izvedla Popović in Raić. Algoritem se je v več desetletni

Matic BOBNAR[1,2], Špela JERAJ[1], Gašper KREK[1], Bojan RAJAKOVIĆ[2], Aleš NAGODE[1], Borut KOSEC[1,3]
[1] Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta
[2] SIJ Acroni d.o.o.
[3] Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

inženirski praksi izkazal kot zelo točen in zanesljiv [3].

Pri analizi so bili, poleg geometrije in dimenzij rekuperatorja in njegovih sestavnih delov ter lastnosti materialov in kurilnega plina, upoštevani parametri izračuna, podani v tabeli 2 (indeks z pomeni zrak, p pomeni dimni plin, ' na vstopni strani rekuperatorja, '' na izstopni strani rekuperatorja, zg pomeni zrak na gorilniku) [2],

Tabela 2: Osnovni parametri izračuna

V'_z [$m^3 \cdot s^{-1}$]	**1,25**
V'_p [$m^3 \cdot s^{-1}$]	1,92
ϑ_{zg} [°C]	265
ϑ'_p [°C]	840
ϑ'_z [°C]	20

Dimenzije (novih) izmenjevalcev določimo na podlagi izračunov. V danem, pa so dimenzije rekuperatorja oziroma njegova površina za izmenjavo toplote okvirno določene; lahko pa spremenimo določene parametre, kot so npr. material določenih cevi, pretok plina oziroma zraka, temperature,…

Površina za izmenjavo toplote (A) rekuperatorja, je določena z entalpijo zraka na koncu predgrevanja. Entalpijo zraka izračunamo preko toplotne kapacitete zraka C_p, ki v našem primeru znaša 1,35 $kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$, izmerjene temperature zraka na izhodu iz rekuperatorja, ki je podana v tabeli 1 in znaša 295 °C, ter temperatura zraka na gorilniku, ki po navadi znaša 10 % manj kot temperatura zraka na izhodu iz rekuperatorja, torej 265 °C. Preko teh podatkov smo izračunali, da znaša entalpija zraka na izhodu izmenjevalca (E''_z) 464063 W. Za kontrolni izračun, potrebujemo tudi srednjo logaritemsko temperaturno razliko v rekuperatorju. Ta razlika je pa predvsem odvisna od temperature zraka ter dimnega plina, pred oziroma za rekuperatorjem. Izračunali smo, da srednja logaritemska temperaturna razlika znaša 466 °C. Ko izračunamo logaritemsko temperaturno razliko v rekuperatorju, moramo izračunati še toplotno prestopnost v rekuperatorju (α). Toplotna prestopnost v gladkem cevnem rekuperatorju, je kar obratna vrednost toplotnih uporov dimnega plina in zraka. Preko standardnih tabel, smo določili toplotni upor dimnega plina in zraka, ter tako izračunali toplotno prestopnost, ki znaša 24 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Sedaj imamo vse potrebne podatke za izračun minimalne površine za izmenjavo toplote v rekuperatorju (enačba 1) [2].

$$A = \frac{E''_Z}{\alpha \cdot \vartheta_{SR}} = \frac{464063}{24 \cdot 466} = 41{,}5\ m^2 \qquad (1)$$

Ko poznamo minimalno potrebno površino, za uspešno delovanje rekuperatorja v naših pogojih, izračunamo kakšno površino ima naš rekuperator in tako vidimo, ali ustreza razmeram. Površino rekuperatorja izračunamo po spodnji enačbi.

$$A_{rek} = A_{cevi} \cdot \eta_{cevi} \qquad (2)$$

kjer je:
A_{rek}: površina vseh cevi v rekuperatorju [m^2]
A_{cevi}: površina plašča ene cevi [m^2]
η_{cevi}: število vseh cevi

Izračunali smo, da površina cevi v našem rekuperatorju znaša 64,6 m^2, kar pomeni, da rekuperator popolnoma dosega zahteve.

5 OGREVALNE JAME ZA SLABE

Ker je temperatura dimnih plinov, za rekuperatorjem, še vedno kar visoka, namreč znaša v povprečju 415 °C, bi lahko entalpijo še dodatno izkoristili, zato smo prišli na idejo ogrevalnih jam za slabe. Dimne pline za rekuperatorjem, bi preko cevovoda vodili do teh jam, kjer bi preko drugega rekuperatorja, segrevali te jame. V jame bi položili jeklene slabe, ki bi se kasneje vroče valjali. Ker imajo slabi pri vstopu v potisno peč približno 200 °C, bi lahko z ogrevalnimi jamami to temperaturo dvignili na približno 300 °C, in bi posledično privarčevali z zemeljskim plinom, saj bi potisna peč morala segreti jeklene slabe za 100 °C manj kot do sedaj. Po naših izračunih, bi privarčevali do 2,3 % zemeljskega plina letno, kar je pa ob veliki porabi le-tega velik prihranek [4].

6 ZAKLJUČKI

V našemu delu smo poizkušali ugotoviti, če je zdajšen rekuperator v dobrem stanju, in če je njegov izkoristek dovoljšen. Poleg preračuna stanja rekuperatorja, smo tudi predlagali ogrevalne jame za slabe, s katerimi bi lahko še dodatno povečali učinkovitost vroče valjarne.

S toplotnotehničnimi izračuni, pa smo podkrepili naslednje:

- Rekuperator je v dobrem stanju, in ima zadosti cevi, za učinkovit prenos toplote iz dimnih plinov na vhoden zrak.
- Rekuperator je izdelan iz toplotno obstojnega jekla, ki omogoča učinkovito delovanje.
- Z ogrevalnimi jamami, bi lahko še dodatno povečali izkoristek vroče valjarne, saj bi toploto dimnih plinov še dodatno izrabili.

Viri:

[1] Herr, H.: *Nauka o toploti,* Tehniška založba Slovenije, Ljubljana, 1997.
[2] Jeraj, Š. *Optimiranje toplotnotehničnih karakteristik izmenjevalca toplote : diplomsko delo. UL NTF,* Ljubljana, 2015.
[3] Popović, Z., Raić, K.*: Peći i projektovanje u metalurgiji, Naučna knjiga,* Univerzitet u Beogradu, Tehnilosko-metalurški fakultet, Beograd, 1988.
[4] Bobnar, M. *Idejni projekt ogrevalnih jam za slabe : diplomsko delo. UL NTF,* Ljubljana, 2022.

INDUSTRIJSKI
FORUM
IRT
2023

Sodelujoči na Industrijskem forumu IRT

INDUSTRIJSKI FORUM IRT 2023

GLAVNI POKROVITELJ

ABB

FANUC

RAZVOJNI PARTNER

ZDRUŽENJE MANAGER

DMS
DRUŠTVO ZA MARKETING SLOVENIJE

VSEBINSKI PARTNER

mediade

NACIONALNI PARTNERJI FORUMA

SPIRIT SLOVENIJA
Zelena. Ustvarjalna. Pametna.

REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA GOSPODARSTVO, TURIZEM IN ŠPORT

NOO | NAČRT ZA OKREVANJE IN ODPORNOST

Financira Evropska unija
NextGenerationEU

POKROVITELJI

abc MAZIVA

BTS COMPANY

MARSi group

METTLER TOLEDO

SCHUNK

TOPOMATIKA

YASKAWA

INDUSTRIJSKI FORUM IRT 2023

RAZSTAVLJAVCI

ORGANIZATOR DOGODKA

PROFIDTP, d.o.o.
Gradišče nad Pijavo Gorico 204
1291 Škofljica
www.profidtp.si

ORGANIZACIJSKI ODBOR

ŠVETAK Darko – vodja organizacijskega odbora, Profi dtp, d.o.o.
ROT Matjaž, Revija IRT3000
ŠENKINC Denis, PRO IKT, Denis Šenkinc, s.p.

PARTNERSKE ZBORNICE, ZDRUŽENJA IN GROZDI

ZDRUŽENJE MANAGER
IZS INŽENIRSKA ZBORNICA SLOVENIJE
Gospodarska zbornica Slovenije
OBRTNO-PODJETNIŠKA ZBORNICA SLOVENIJE
TECOS
SRIPACS+

PROGRAMSKI ODBOR

Dr. ČEKADA, Miha, *Institut Jožef Stefan*
DREV Vinko, *LTH Castings d.o.o.*
Dr. FLORJANIČ Blaž, *BSH Hišni aparati, d. o. o., in iMold, d. o. o.*
Dr. GANTAR Gašper, *Visoka šola za proizvodno inženirstvo, Visoka šola za varstvo okolja*
Dr. HOMAR David, *SolidWorld d.o.o.*
Dr. KARNER Timi, *UM, Fakulteta za strojništvo*
KLINC Marko, *Gorenje MDM Kragujevac Srbija*
Dr. KLOBČAR Damjan, *UL, Fakulteta za strojništvo.*
Dr. KOSEC Borut, *UL, Naravoslovnotehniška fakulteta*
Dr. KOSEC Gorazd, *Acroni, d. o. o.*
Dr. KOVAČ, Igor, *Institut Jožef Stefan*
KOVAČ Jernej, *UL, Fakulteta za strojništvo*
Dr. KRAMAR Davorin, *UL, Fakulteta za strojništvo*
LOTRIČ Marko, *OZS, predsedenik odbora za znanost in tehnologijo*
Dr. MAJDIČ Franc, *UL, Fakulteta za strojništvo*
MIRNIK Marko, *TURNA, d. o. o.*
Dr. MUHIČ Simon, *SIMUTEH s.p., Fakulteta za tehnologije in sisteme*
Dr. NARDIN Blaž, *Fakulteta za tehnologijo polimerov, Slovenj Gradec*
OBOLNAR Matija, *Hella Saturnus Slovenija d.o.o.*
Dr. PALČIČ Iztok, *UM, Fakulteta za strojništvo*
Dr. PEPELNJAK Tomaž, *UL, Fakulteta za strojništvo*
Dr. PERME Tomaž, *Vodja programskega odbora*
POJE Janez, *HTS – IC d.o.o. Ljubljana*
ROT Matjaž, *Strokovna revija IRT3000*
Dr. SAVŠEK Tomaž, *TIGUS d.o.o., Fakulteta za industrijski inženiring Novo mesto*
ŠENKINC Denis, *Strokovna revija IRT3000*
ŠKRLEC Janez, *Razvojno raziskovalna dejavnost Janez Škrlec s.p.*
ŠVETAK Darko, *Strokovna revija IRT3000*
ZIBELNIK Miha, *Steel d.o.o.*
Dr. ŽLAJPAH Leon, *Institut Jožef Stefan*
Dr. ŽNIDARŠIČ Matjaž, *CBS inštitut, celovite gradbene rešitve, d. o. o.*

MEDIJSKI PARTNERJI

IRT 3000 INOVACIJE • RAZVOJ • TEHNOLOGIJE WWW.IRT3000.COM
PODJETNIK Prvi medij podjetništva
strojnistvo.com križišče strojnikov
Računalniške novice www.racunalniske-novice.com
Finance
VENTIL

PARTNER REGISTRACIJE

KLEMEN SOLUTIONS

INDUSTRIJSKI FORUM IRT 2023

PARTNERJI ZNANJA IN TEHNOLOŠKI PARKI

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo

FS Fakulteta za strojništvo

Univerza v Mariboru
Fakulteta za strojništvo

IJS

VISOKA ŠOLA ZA PROIZVODNO INŽENIRSTVO

FTPO Fakulteta za tehnologijo polimerov

Fakulteta za strojništvo Univerza v Novem mestu

PARTNERJI IZ INDUSTRIJE

ACRONI

FORVIA HELLA

LITOSTROJ POWER

AKRAPOVIČ

SIBO group Clousers Plastics Tools

Hidria

B/S/H/

IM IskraMehanizmi

ENGINEERING TOMORROW Danfoss

TRIMO

KOLEKTOR 55 let / years

DOMEL

Tumna Nadaljujemo tradicijo. Ustvarjamo prihodnost.

KOVINOPLASTIKA LOŽ
ALVEUS | ARX | KOVINOtools

gorenje group
Gorenje Orodjarna, d.o.o.

UNIOR

INDUSTRIJSKI
FORUM
IRT
2023

Komercialni oglasi podjetij

INDUSTRIJSKI FORUM IRT 2023

IRB 1010

Visoka produktivnost na majhnem prostoru.

https://new.abb.com/products/robotics

Let’s write the future. Together.

ZNANJE ZA USTVARJANJE VREDNOSTI

S ponosom gledamo na raznolike izume naših prednikov, številne inovacije slovenskih strokovnjakov, ki so spremenile svet, visoko sposobnost industrijskega in tehničnega znanja zaposlenih, estetsko dovršenost in mojstrovino ustvarjanja končnih izdelkov ter globoko spoštovanje narave in uporabljenih materialov.

Na SPIRIT Slovenija s pomočjo finančnih spodbud in drugih podpornih storitev prispevamo h krepitvi inovacijske aktivnosti, ustvarjanju dodane vrednosti in mednarodne konkurenčnosti slovenskih podjetij. Ne spreglejte priložnosti. **Spremljajte nas!**

SPIRIT SLOVENIJA

REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA GOSPODARSTVO, TURIZEM IN ŠPORT

NOO | NAČRT ZA OKREVANJE IN ODPORNOST

Financira Evropska unija NextGenerationEU

SPIRIT Slovenija, javna agencija www.spiritslovenia.si.

THE FACTORY AUTOMATION COMPANY

FANUC

Prvi na svetu z najnižjimi stroški porabe

To je ROBOSHOT, popolnoma električni stroj za brizganje plastike.

19.2 h
POVPREČNI ODZIVNI ČAS

47 LETMTBF
(MEAN TIME BETWEEN FAILURE)
* za CNC serijo 0i-D/F

24.5 h
POVPREČNI ČAS IZPADA

ODLIČNOST
CENA IN VREDNOST NALOŽBE

ROBOSHOT AI
FUNKCIJA ZA IZBOLJŠANJE VAŠIH PROIZVODNIH STROŠKOV

STORITVE POPRAVIL

ROBOSHOT-LINKi2
ZA SPREMLJANJE STROJEV IN ZBIRANJE PODATKOV IN NADALJNJO ANALIZO

FAR
FANUC ASSISTED REALITY

ROBOSHOT
VISOKA ZANESLJIVOST IN DOLGOŽIVOST

555 €

ROBOSHOT POVPREČNI LETNI STROŠKI*

* Analize: iz različnih panog (medicina, avtomobilizem, potrošništvo) 11 podjetij, 98 Roboshot, 65 let delovanja, deli in stroški storitev.

ZDRUŽENJE MANAGER
Dobri rezultati, na pravi način

Združenje Manager je že **34 let**
največje združenje managerjev v Sloveniji.

Poslanstvo: Z odgovornim voditeljstvom in strokovnim managementom do skupnega napredka.

- **35 % celotnih prihodkov** slovenskega gospodarstva
- **45 % čistega dobička** slovenskega gospodarstva
- **28 % višjo dodano vrednost** na zaposlenega, kot je povprečje podjetij v Sloveniji

ter predstavljajo **37 % kapitala** slovenskega gospodarstva

ZDRUŽENJE MANAGER

www.zdruzenje-manager.si

BTS e POSLOVANJE

SISTEMI ZA UPRAVLJANJE Z ORODJEM

ZMANJŠAJO STROŠKE ZALOG / POVEČAJO PRODUKTIVNOST / AVTOMATIZIRAJO POSTOPEK NABAVE

AUTOCRIB
LISTA
BTS LINE

- SISTEM MINIMALNIH KOLIČIN
- ROČNO ALI SAMODEJNO NAROČANJE
- UPRAVLJANJE UPORABNIŠKIH NIVOJEV
- PRIHRANEK PRI TLORISU SKLADIŠČA
- KONSIGNACIJA
- DELOVANJE SISTEMA 24/7

B2B.bts-company.com

SAMO V B2B SPLETNI TRGOVINI

SUPER PROMOCIJE

- POVEZLJIVOST SISTEMOV B2B / ORODNE OMARE
- MOJA ORODNA OMARA
- PROJEKTNA KOŠARICA
- PRETEKLI NAKUPI / ODPRTE DOBAVE
- PODPORA UPORABNIKOM V ŽIVO
- HITREJŠI PROCES NABAVE
- ENOSTAVEN IZBOR ORODJA
- PODROBNI TEHNIČNI PODATKI O ORODJU
- 3D PRIKAZ .STP DATOTEKE
- HITRE DIREKTNE DOBAVE

BTS Company d.o.o.
info@bts-company.si
www.bts-company.com

LJUBLJANA
Bratislavska cesta 5
T. 01 5841 502

MARIBOR
Cesta k Tamu 16
T. 02 4600 300

BTS COMPANY

USTVARJAMO
POVEZAVE,
RAZVIJAMO
ZVEZDE.

Mednarodna tekma zahteva
prodoren marketing.

NAŠI PARTNERJI SO NA TRGIH ZVEZDE.

MARKETING. KOMUNIKACIJE. RAZVOJ.

Preverite, s kom sodelujemo na www. mediade.si.

mediade

Castrol

ALUSOL XBB

HYSOL XBB

XBB izdelki ne vsebujejo bora in biocidov.

VARNOST
UČINKOVITOST
DALJŠA ŽIVLJENJSKA DOBA

Inovativna tehnologija hladilno mazalnih sredstev, primerna za vse materiale in obdelave. Izkušnje uporabnikov dokazujejo visoko učinkovitost in stabilen delovni proces: brez dodajanja servisnih aditivov

abc MAZIVA

ABC maziva d.o.o.
Bravničarjeva 13, 1000 Ljubljana
tel: +386 1 5136 242
info@abcmaziva.com www.abcmaziva.com

Bodite **natančni.** Bodite **kakovostni.**
Bodite **prepričani.** Bodite **vidni.**

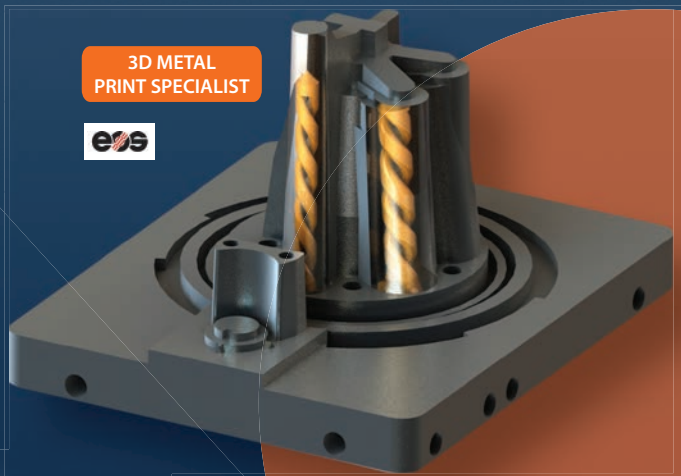
GOM
ScanCobot
3D-skener ATOS Q

ZEISS gom a ZEISS company

3D METROLOGY SPECIALIST

3D METAL PRINT SPECIALIST

eos



MARSi group

e-mail: info@marsi.at
telefon: +386 (08) 205 86 93
web: www.marsi.at

B2B konferenca

priložnosti za nadaljnji razvoj in rast podjetja

DMS
DRUŠTVO ZA MARKETING SLOVENIJE

Podjetja so najbolj uspešna takrat, ko skupaj sodelujejo prav vsi oddelki – od razvojnikov in inženirjev vse do marketinga.

Brez prvih ne bi bilo vrhunskih idej in izdelkov, brez slednjih pa bi bila pot teh izdelkov do uporabnikov bistveno težja. V Društvu za marketing Slovenije si prizadevamo za razvoj marketinške stroke, njen napredek in povezovanje z drugimi področji. Na svojih dogodkih člane izobražujemo o vseh aktualnih marketinških temah, kot so digitalizacija, marketinške platforme, produktni management, branding in tudi B2B marketing. Poleg osrednjega marketinškega dogodka leta, Slovenske marketinške konference, organiziramo tudi B2B konferenco, ki je namenjena predstavitvi primerov dobrih praks. **Na lanskoletni B2B konferenci smo spoznali, kako lahko inženirji in marketingaši sodelujejo z roko v roki za boljše rezultate podjetja.**

Inženirji, razvojniki in marketingaši z roko v roki

Matej Natlačen in **Samo Jenič** iz podjetja **MG Rohr** sta predstavila pet vrednot podjetja, ki so ključ do njihovega uspeha. To so ekipno delo, strast, drznost, zavezanost in odkritost. Informacije si tako delijo z vsemi zaposlenimi v podjetju, prav tako se projektov lotijo vsi oddelki hkrati in skupaj stremijo k uresničitvi ideje. **Andreja Susič** iz podjetja **Schwarzmann** je imela podobno izkušnjo. Ker si je v družinskem podjetju lahko od blizu ogledala potek dela v vsakem oddelku, je spoznala moč ekipnega dela in koristi, ki jih takšno sodelovanje lahko prinese.

Pridružite se nam na letošnji B2B konferenci v četrtek, 12. oktobra, v Klubu Cankarjevega doma v Ljubljani. Srečajte inženirje, razvojnike, marketingaše, prodajnike, dobavitelje, partnerje, direktorje in lastnike drugih podjetij, izmenjajte si izkušnje, spoznajte aktualne trende v B2B prostoru in poiščite priložnosti za nadaljnjo rast podjetja.

Več informacij:

USTVARJAMO USPEHE PRIHODNOSTI

DMS
DRUŠTVO ZA MARKETING SLOVENIJE

Izobražujemo: DMS organizira več kot 60 izobraževanj s področja marketinga (B2B marketing, produktni management, internacionalizacija, digitalizacija ...). Še posebej ponosni smo na Slovensko marketinško konferenco in B2B konferenco.

Povezujemo: Na dogodkih Društva za marketing Slovenije si izmenjujemo izkušnje ter sklepamo nova poslovna povezovanja.

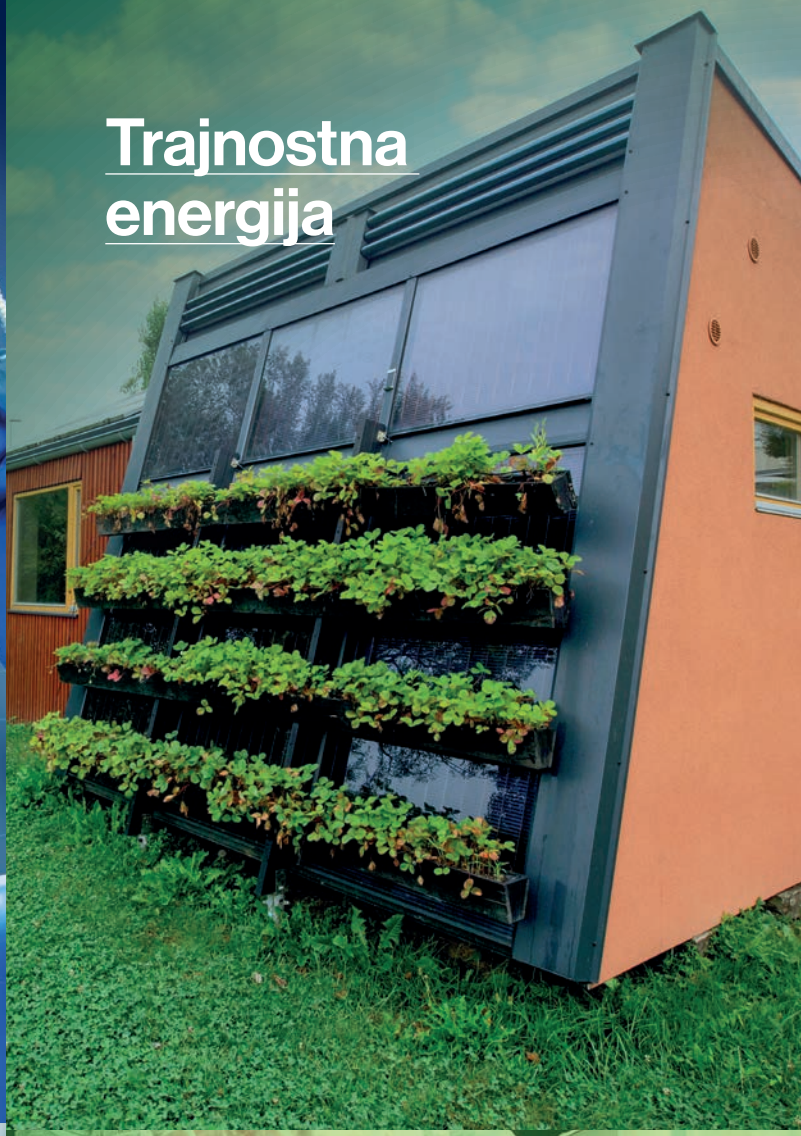
Navdihujemo: Na naših izobraževanjih ne manjka predstavitev dobrih praks, ki lahko pomagajo rešiti vaš poslovni izziv.

Udeleženci Industrijskega foruma lahko izkoristite **20 % popust** na članstvo.

KODA ZA POPUST: IRT20

Več na
www.dmslo.si/clanstvo

Tovarne prihodnosti



Trajnostna energija

Zelena in varna mobilnost

Zdravje

Rešimo vaše izzive skupaj!

www.fs.uni-lj.si rr@fs.uni-lj.si

Sledite nam

Univerza *v Ljubljani*
Fakulteta *za strojništvo*

Maximize Your Production Yield

Industrial Weighing Solutions for Any Application

METTLER TOLEDO Industrial Weighing Solutions do more than just weigh your products, they help to maximize your yield. Our equipment works to increase productivity, maximize uptime, ensure accuracy and quality – and increase visibility into operations.

Robust Scale Solutions
Durability for maximized uptime in harsh environments

Advanced Load Cell Technology
Accuracy and diagnostics to eliminate bad batches

User Friendly Software
Operator guidance to reduce error and boost efficiency

Global Services and Expertise
Expert services for ensured compliance and optimized processes

Explore Our Solutions:
www.mt.com/industrial

FS Fakulteta za strojništvo

Univerza v Mariboru

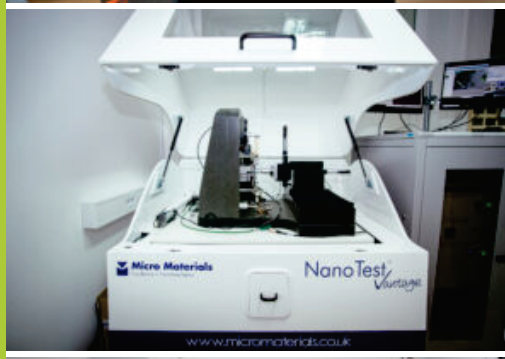
INŽENIRJI SOUSTVARJAMO BOLJŠO PRIHODNOST

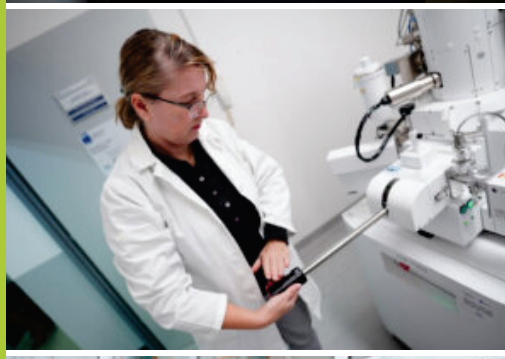
IZOBRAŽUJEMO IN RAZISKUJEMO NA PODROČJIH

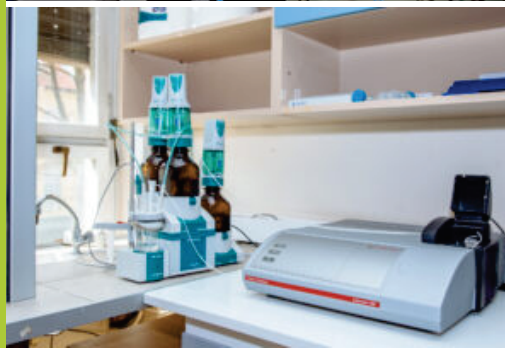
- Strojništva
- Gospodarskega inženirstva
- Mehatronike
- Tehnologij tekstilnega oblikovanja
- Okoljskega inženirstva

SODELUJEMO Z GOSPODARSTVOM

- Ponujamo znanje, storitve in opremo za izvajanje razvojno raziskovalnih projektov
- Nudimo krajša izobraževanja prilagojena potrebam gospodarstva







www.fs.um.si

NOO NAČRT ZA OKREVANJE IN ODPORNOST

Univerza v Mariboru

REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA VISOKO ŠOLSTVO, ZNANOST IN INOVACIJE

Financira Evropska unija
NextGenerationEU

EGAL

skupaj povezujemo

Primeri uporabe in rešitev za industrijsko-elektro infrastrukturo

PANDUIT™

Panduit ponuja celovito rešitev izdelkov – od kabelskih vezic do močnostnih konektorjev, od sponk do označevalnih izdelkov – Panduitovi proizvodi so zasnovani za vse vidike načrtovanja, inštalacije in vzdrževanja infrastruktur v zahtevnih industrijskih okoljih. Zaradi robustnega partnerskega ekosistema, osebja po vsem svetu ter neprimerljivih storitev in podpore je Panduit pomemben in zaupanja vreden partner.

Gradnja poslovnih stavb

Panduit ponuja široko paleto izdelkov, ki podpirajo zahteve izvajalcev najzahtevnejših električnih gradbenih aplikacij in okolij. Izdelki blagovne znamke Panduit so zasnovani z namenom zagotavljanja najboljše varnosti, zanesljivosti in produktivnosti za doseganje največje vrednosti za izvajalce. Z izdelki Panduit, od priključkov za napajanje in ozemljitev do električnega materila, predpripravljenih komponent in izdelkov za upravljanje kablov, je Panduit partner, ki ga izbirajo vodilni izvajalci elektroinštalacij.

Prehrambena industrija

Proizvajalci hrane in pijač se soočajo z neštetimi izzivi na področju varnosti, kakovosti in proizvodnje izdelkov. Za doseganje čim večje produktivnosti ob hkratnem zmanjševanju izpadov je potrebna robustna integrirana električna infrastruktura, ki lahko zagotavlja optimalno produktivnost, zanesljivost in dobičkonosnost.

Avtomobilska in transportna industrija

Električni konektorji in izdelki za upravljanje kablov so ključni sestavni deli prevoznih sredstev, ki prevažajo blago ali ljudi, od lahkih tirnih vozil do težkih tovornjakov in avtobusov za komercialno, vojaško in vesoljsko industrijo. Panduitove transportne rešitve vam pomagajo premagovati izzive, povezane z razvijajočimi se varnostnimi standardi in zahtevami za certificiranje, zapletenimi specifikacijami za načrtovanje in strogimi pogoji v zahtevnih okoljih. Ti izdelki so odporni na vibracije, udarce, obrabo in ekstremne temperature ter so preizkušeni in certificirani v skladu z globalnimi standardi.

Obnovljiva energija

Panduit ponuja preverjene rešitve za obnovljive vire energije, skupaj z globalno dobavno verigo in inženirskimi smernicami, ki jih potrebujete za načrtovanje in gradnjo najboljših sončnih in vetrnih sistemov. Naše rešitve za električno infrastrukturo za obnovljive vire energije opravljajo ključno vlogo v vodilnih svetovnih obratih za proizvodnjo energije iz obnovljivih virov. Panduit temeljito testira vso opremo za sončno in vetrno energijo, da bi zagotovil vrhunsko zmogljivost pri delovanju z močnim vetrom in visokimi vibracijami, pri intenzivni izpostavljenosti UV-žarkom, pri ekstremnih temperaturah in v prisotnosti korozivnih sredstev.

Varnost

Objekti postajajo bolj zahtevni kot kdaj koli prej, zato potrebujejo upravljavci rešitve, ki poenostavljajo delovanje in zmanjšujejo tveganje. Panduit predstavlja nove načine za zaščito sredstev, ljudi in krajev naročnikov z revolucionarnimi rešitvami, ki zagotavljajo učinkovitost in organizacijam omogočajo, da dosežejo več.

EGAL, d.o.o., Ljubljana
Flandrova ulica 19
SI - 1000 Ljubljana

T +386 (0)31 737 831
sales@egal-eu.com
www.egal-eu.com

Vodilni IKT medij

Računalniške novice

www.racunalniske-novice.com

Povečajte svojo prednost.

Postavite nova merila na področju tehnologije. Z orodji, ki bodo pri strojni obdelavi materialov presegla trenutni standard. V vsako inovacijo vlijemo vse naše izkušnje in inženirsko znanje – tako da boste lahko vi še naprej stalno povečevali svojo prednost.

walter-tools.com

WALTER
Engineering Kompetenz

FAST MOVING TECHNOLOGY

STÄUBLI

ZA VSE ROBOTE

End-of-Arm-Tooling rešitve, prilagojene za vaše potrebe

Stäubli ima v ponudbi nov program End-of-Arm-Tooling, vključno s svetovanjem za izbiro ustrezne rešitve. Skupaj z našim partnerjem FIPA lahko sedaj ponudimo širok portfelj rešitev EoAT. Stäubli tako omogoča prijemanje s kleščami ali vakuumskimi seski in rezanje za vse robote od enega dobavitelja – vključno z ročnimi ali avtomatskimi sistemi za menjavo robotskih orodij in prijemal.

Vedno na voljo prilagojena rešitev za vaše zahteve

Prilagodljivi in vzdržljivi sistemi za trajno produktivnost

Širok tehnološki portfelj EoAT od enega dobavitelja

Prisotni povsod po svetu z najvišjo kakovostjo svetovanja in servisiranja

Več o tem na www.staubli.com

| AT11-SI |

XPlanar®: Lebdeč, brezkontakten, inteligenten!

Prosto 2-dimenzionalno pomikanje izdelkov z do 6 prostostnih stopenj

- Lebdeče pomične enote
- Prilagodljiva obremenitev
- Rotacija 360°
- Nagib do 5°
- Dvig do 5 mm
- Hitrosti do 2 m/s

www.beckhoff.com/xplanar

Sistem XPlanar omogoča več svobode pri stregi izdelkov: pomične enote lebdijo nad sestavljenimi ploščami, po katerih se prosto določa pot gibanja.

- Individualni 2-dimenzionalni transport s hitrostjo do 2 m/s
- Obdelava izdelkov z do 6 prostostnimi stopnjami gibanja
- Transport in obdelava v enem sistemu
- Higienska izvedba, enostavna za čiščenje in brez obrabljanja
- Prosto razporejanje plošč za optimalno zasnovo stroja
- Istočasni nadzor nad več enotami omogoča vzporedno in strego posamičnih izdelkov
- Popolnoma integriran s konceptom Beckhoff PC krmiljenja (TwinCAT, PLC IEC 61131, Motion, Measurement, Machine Learning, Vision, Communication, HMI)

Beckhoff Avtomatizacija d.o.o.
Zbiljska cesta 4, 1215 Medvode
info@beckhoff.si
01 361 30 80

New Automation Technology **BECKHOFF**

PROFIDTP STROKOVNA LITERATURA

BIONIKA

Janez Škrlec

Bionika je osupljiva in vznemirljiva veda, ki skuša rešiti tehnične probleme in izzive z izkoriščanjem znanja narave in biologije. Bionika, znana tudi kot biomimikrija, biomimetika, se ukvarja s prenosom pojavov iz narave v tehnologijo.

24,90 €

MALA ŠOLA MAZANJA: VSE, KAR BI MORALI VEDETI O MAZIVIH

Milan Kambič

Knjiga zajema osnove s področja maziv in njihove uporabe, se pravi mazanja. Primerna je za vse, ki še nimajo znanja na tem področju, pa tudi za tiste, ki se s tem področjem ukvarjajo že dlje časa.

29,00 €

UMETNOST BRIZGANJA

Henrik Privšek
Urednik: **Matjaž Rot**

Na voljo tudi v **hrvaškem** in **srbskem** jeziku

Odličen priročnik za predelavo termoplastov, ki predstavlja številne praktične izkušnje in izpostavlja napake pri brizganju ter načine, kako se jim izogniti. Knjiga, s katero boste pomembno izboljšali obvladovanje proizvodnega procesa.

29,00 €

ANGLEŠKO-SLOVENSKI TERMINOLOŠKI SLOVAR PROIZVODNEGA STROJNIŠTVA

Borut Buchmeister

Nastanek terminološkega slovarja je rezultat tridesetletnega ukvarjanja in raziskovanja v okviru laboratorijev za načrtovanje proizvodnih sistemov in za simulacije diskretnih sistemov, nenehnega srečevanja s tujo literaturo, tvorbo prvih lastnih zabeležk o angleških pojmih, ki so sedaj v obsegu več kot 2400 pojmov ponujene širšemu krogu.

9,90 €

VARJENJE IN SORODNE TEHNIKE SPAJANJA MATERIALOV V NELOČLJIVO ZVEZO

Janez Tušek

Varjenje in sorodne tehnike spajanja materialov so izdelovalne tehnologije, pri katerih z energijo v trajno, trdno in neločljivo zvezo povežemo dva ali več kovinskih ali nekovinskih elementov. V knjigi je podrobneje obravnavano spajanje kovinskih materialov in delno tudi spajanje termoplastov.

40,00 €

VARIVOST KOVINSKIH MATERIALOV, 1. del

Janez Tušek

Knjiga proučuje vedenje materialov med varjenjem in lastnosti izdelanih zvarnih spojev po varjenju. Namenjena je zelo širokemu krogu varilskih strokovnjakov in vsem, ki se ukvarjajo z varjenjem z vidika tehnologije, metalurgije, konstruiranja in splošnega strojništva, vse do gradbeništva.

30,00 €

Patrick De Vos
in **Jan-Eric Ståhl**

1: UPORABNA FIZIKA ODREZAVANJA KOVIN – DOBRE PRAKSE

Knjiga predstavlja praktični vodnik »kaj delati« in »kako delati«, da bodo procesi obdelave kovin z odrezavanjem zanesljivi, produktivni in donosni.

Na voljo tudi v **hrvaškem** jeziku

25,00 €

2: SLABŠANJE ORODJA – PRAKTIČNI MODELI

Večino težav, ki se pojavijo pri postopku odrezovanja, je mogoče opredeliti kot dogodke povezane z obrabo orodij. Ta knjiga se posveča samo tej tematiki in podaja praktične smernice za reševanje s tem povezanih izzivov. Knjiga za najboljšo produktivnost v delavnici.

25,00 €

3: ODREZAVANJE KOVIN – TEORIJE V PRAKSI

Knjiga temelji na knjigi Odrezavanje kovin, teorije in modeli. Opisuje enake principe in modele, vendar z bolj praktičnega vidika. Bistvo te knjige je predstaviti modele odrezavanja v takšni obliki, da postanejo uporabni za praktično uporabo v oddelkih mehanske obdelave in sosednjih oddelkih.

29,00 €

PROFIDTP d.o.o.
- Gradišče VI 4, 1291 Škofljica
- +386 41 669 775
- info@profidtp.com

Naročila sprejemamo na e-poštni naslov: info@irt3000.si

Možen nakup na spletni strani **irt3000.si** v področju **knjige**

Spletni nakup:

EGAL

skupaj povezujemo

Preizkusite, testirajte, zaupajte

AEM

AEM je vodilno podjetje na področju rešitev za testiranje in merjenje ter ponuja vrsto nagrajenih testerjev s številnimi funkcijami in prednostmi, kot so certificiranje bakrenih in optičnih kablov, testiranje komponent, testiranje visokonapetostnih omrežij Power over Ethernet, testiranje žičnih in brezžičnih omrežij ter kvalificiranje hitrosti povezav Multi-Gig. Testerje je za uporabo odobrila večina vodilnih proizvajalcev kablov, na voljo pa so pri podjetju EGAL.

Certificiranje kablov

TestPro CV100 je priznan s strani vseh vodilnih garancijskih programov proizvajalcev sistemov strukturiranega omrežja in ponuja frekvenčno območje 3 GHz, kar zagotavlja, da bo vaša naložba zaščitena, ko bodo to zahtevali prihodnji standardi.

Certificiranje optičnih vlaken

TestPro CV100 zagotavlja, da oprema za optične kable v celoti izpolnjuje industrijske standarde.

Power Over Ethernet Validation

TestPro provides comprehensive test functionality for verifying PoE deployments.

Validacija Power Over Ethernet

TestPro CV100 zagotavlja celovito funkcijo testiranja za preverjanje zmogljivosti in delovanja PoE.

Testiranje žičnih in brezžičnih omrežij

TestPro CV100 podpira naslednje omrežne teste: odkrivanje omrežja, generator podatkov o prometu, Traceroute, Ping, odkrivanje SSID Wi-Fi, moč signala RSSI ter ostale funkcije diagnostike omrežja.

Preverjanje večgigabitnega omrežja

S TestPro CV100 lahko preverite skladnost z večgigabitnimi pasovnimi širinami – 2.5 Gb, 5 Gb in 10 Gb ter tako zagotovite učinkovit in nemoten pretok podatkov pri največjih hitrostih.

Testiranje kabelskih snopov

Določanje lastnosti kablov in komponent iz zvitih paric in koaksialnih kablov postaja vse bolj kritično, saj se povečuje visoka hitrost prenosa podatkov in zanesljiva komunikacija v sodobnih avtomobilih, zlasti z uporabo umetne inteligence.

Testiranje kablov in komponent

Naj gre za določanje lastnosti kablov ali samih konektorjev, podjetje AEM ponuja tovrstne rešitve za testiranje. Rešitev za testiranje konektorjev je zasnovana za uporabo v laboratorijih in proizvodnji na področju omrežne infrastrukture in avtomobilskih konektorjev.

EGAL, d.o.o., Ljubljana
Flandrova ulica 19
SI - 1000 Ljubljana

T +386 (0)31 737 831
sales@egal-eu.com
www.egal-eu.com

Mednarodna industrijska sejma

BIAM & VARJENJE

9.–12. april 2024

BIAM
27. mednarodni sejem orodnih strojev in orodij

ZAVARIVANJE
30. mednarodni sejem varjenja in antikorozivne zaščite

Spoštovani razstavljavci,

v veselje nam je, da Vas obvestimo o začetku priprav na mednarodna industrijska sejma orodij, orodnih strojev in strojev za obdelavo plastike in drva – **BIAM**, kot tudi varjenja in antikorozivne zaščite – **VARJENJE**, ki bosta v terminu **od 9. do 12. aprila leta 2024** organizirana na Zagrebškem velesejmu.

Tematska vsebina teh sejmov v razstavnem, strokovnem in edukacijskem segmentu vključuje tehnološke dosežke in novitete, kot tudi inovacije na področju računalniško upravljanih orodnih strojev, strojev za obdelavo plastike in drva, robotike in inovativnih informacijskih rešitev, inženiringa, orodij in delov, materialov za strojno obdelavo in procesne opreme na področju varjenja, kot tudi proizvodov, sredstev in načinov uporabe optimalne antikorozivne zaščite.

Razstavljavci Biama in Varjenja so svoje dosedanje sodelovanje na našim sejmih ocenili kot kakovostno poslovno in marketinško aktivnost z realnim in neposrednim vplivom na povečanje tržne učinkovitosti. Zato Vas vabimo na vključitev v razstavni segment teh sejemskih projektov.

Poleg zagotavljanja potrebnih prostornih in infrastrukturnih pogojev, odobravamo veliki količinski popust do **12 %** za večje razstavne površine.

Z zgodnjo prijavo razstavljanja lahko pridobite dodatni popust na ceno razstavnega prostora

-15 % za prijavo razstavljanja do 3. 7. 2023

Cene tehničnih storitev ostajajo na ravni iz leta 2018.

Ob predstavljanju tehnoloških novitet in inovacij, omogoča status razstavljavca strokovne in komercialne prezentacije, organiziranje poslovnih sestankov in srečanj, sodelovanje v kongresnih aktivnostih sejma, kot tudi vrsto prostornih, programskih in promocijskih ugodnosti v okolju velikega števila poslovnih obiskovalcev in medijev.

Projektni tim sejmov BIAM in VARJENJE 2024t

Damir Pavlek
Vodja projekta
+385 1 6503 429
+385 91 6306 405
damir.pavlek@zv.hr

Marina Surjan Brkić
Specialist za sejme
+385 1 6503 449
marina.surjanbrkic@zv.hr

zv.biam@zv.hr

Krešimir Erceg
Višji komercialist
+385 1 6503 396
+385 91 3119 925
kresimir.erceg@zv.hr

Zagrebački Velesajam
utemeljen 1909.

www.zv.hr

TOPOMATIKA

Zeiss METROTOM 6 Scout

- **Izjemno visoka ločljivost**
  zahvaljujoč 3k rentgenskemu detektorju (3008 x 2512 slikovnih točk)
- **Velika natančnost**
  z matematičnim modelom merilnega prostora
- **Samodejno pozicioniranje objektov**
  s 5-osno kinematiko in prikazom v živo v programski opremi
- **Programska oprema »vse v enem«**
  za hitro in dosledno delo

ZEISS

TOPOMATIKA d.o.o.
Industrijska ulica 3, Novaki, HR-10431 Sveta Nedelja
www.topomatika.si

IZBOLJŠAJTE VAŠ PROCES!

S pomočjo optimizacije procesa CONTURA®
skrajšajte čase ciklov in povečajte kakovost izdelkov.

Poleg tega lahko izkoristite potencial, da postane celoten proces bolj učinkovit in tako tudi bolj trajnosten.
Vaš CO_2 odtis se bo zmanjšal.

Še danes odkrijte potencial v vaši aplikaciji!

CONTURA® MOLD TEMPERATURE CONTROL

CONTURA® MTC GmbH · Hämmerstraße 6
D-58708 Menden · Tel.: +49 2373 39646-50
info@contura-mtc.de · CONTURA-MTC.DE

REVIJA ZA FLUIDNO TEHNIKO, AVTOMATIZACIJO IN MEHATRONIKO

VENTIL

ISSN 1318 - 7279 Letnik 29

- Strokovni in znanstveni prispevki
- Iz prakse za prakso
- Ventil na obisku
- Novice - zanimivosti
- Aktualno iz industrije
- Novosti na trgu
- Podjetja predstavljajo
- Ali ste vedeli
- Dogodki
- Intervju

revija Ventil

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana
Tel.: 01/ 4771 704, Faks: 01/ 4771 772
E-pošta: ventil@fs.uni-lj.si, Internet: www.revija-ventil.si

Spoštovani!

Ventil je znanstveno-strokovna revija in objavlja prispevke, ki obravnavajo razvojno in raziskovalno delo na Univerzi, inštitutih in v podjetjih s področja fluidne tehnike, avtomatizacije in mehatronike. Revija želi seznanjati strokovnjake z dosežki slovenskih podjetij, o njihovih izdelkih in dogodkih, ki so povezani z razvojem in s proizvodnjo na področjih, ki jih revija obravnava. Prav tako želi ustvariti povezavo med slovensko industrijo in razvojno in raziskovalno sfero ter med slovenskim in svetovnim proizvodnim, razvojnim in strokovnim prostorom. Naloga revije je tudi popularizacija področij fluidne tehnike, avtomatizacije in mehatronike še posebno med mladimi. Skrbi tudi za strokovno izrazoslovje na omenjenih področjih.

Revija Ventil objavlja prispevke avtorjev iz Slovenije in iz tujine, v slovenskem in angleškem jeziku. Prispevkom v slovenskem jeziku je dodan povzetek v angleščini, prispevki v angleščini pa so objavljeni z daljšim povzetkom v slovenskem jeziku. Člani znanstveno strokovnega sveta so znanstveniki in strokovnjaki iz Slovenije in tujine. Revijo pošiljamo na več naslovov v tujini in imamo izmenjavo z drugimi revijami v Evropi. Revija je vodena v podatkovni bazi INSPEC.

Devetindvajsetletno izhajanje revije Ventil pomeni, da je v prostoru neprecenljiva za razvoj stroke. Uredništvo si skupaj z znantveno strokovnim svetom prizadeva za visokokvalitetno raven in relevantnost objav, ki bosta v prihodnosti vse napore usmerila v to, da bo kvalitetna raven še višja. V ta namen vključuje v znantveno strokovni svet priznane znanstvenike, raziskovalce in strokovnjake, ki s svojim znanjem vspodbujajo vsak na svojem področju objavljanje rezultatov razvojnega in raziskovalnega dela. Uredništvo spremlja razvoj stroke in znanstveno raziskovalno delo doma in vtujini preko konferenc, delavnic in seminarjev ter z izmenjavo tuje periodike.

Revija je priznana v tujini, še posebno na področju fluidne tehnike, kar želimo doseči tudi na področju mehatronike in avtomatizacije. Preko objav v reviji se promovirajo dosežki slovenske znanosti in industrijske proizvodnje. Revija je in bo tudi v prihodnje prostor za predstavljanje kvalitetnih razvojnih in raziskovalnih dosežkov slovenske industrije in raziskovalne sfere na področju fluidne tehnike, avtomatizacije in mehatronike.

Uredništvo

YASKAWA

RAZVIT IN IZDELAN V SLOVENIJI

GP20

GLAVNE PREDNOSTI

- Vitka in robustna zasnova
- Uporaba v različnih robotskih aplikacijah
- 20 kg nosilnosti
- Velik polmer dosega: 1.802 mm
- Hiter / visoki pospeški in pojemki
- Enostaven zagon, uporaba in vzdrževanje

YASKAWA Slovenija d.o.o. www.yaskawa.si

SCHUNK

Robusten in prilagodljiv

Zaprta, električna
Univerzalno prijemalo EGU z velikim, prosto programabilno zvezdišče.

schunk.com/egu

Hand in hand for tomorrow

IRT 3000
INOVACIJE • RAZVOJ • TEHNOLOGIJE

SPLAČA SE BITI NAROČNIK

IRT 3000

ZA SAMO 70€ DOBITE:

- celoletno naročnino na revijo IRT3000 (10 številk)
- strokovne vsebine na več kot 140 straneh

IRT 3000 ADRIA

Revija v hrvaškem jeziku

ZA SAMO 28€ DOBITE:

- celoletno naročnino na revijo IRT3000 ADRIA (4 številke)
- strokovne vsebine na več kot 200 straneh

IRT 3000 АДРИА

Revija v srbskem jeziku

ZA SAMO 28€ DOBITE:

- celoletno naročnino na revijo IRT3000 АДРИА (4 številke)
- strokovne vsebine na več kot 200 straneh

- vsakih 14 dni e-novice IRT3000 na osebni elektronski naslov

DIGITALNA NAROČNINA

Na voljo je tudi digitalna različica revije, obogatena s povezavami in video vsebinami.

STROKOVNA LITERATURA

V naši spletni trgovini je na voljo širok nabor kakovostne strokovne literature.

Spletni nakup:

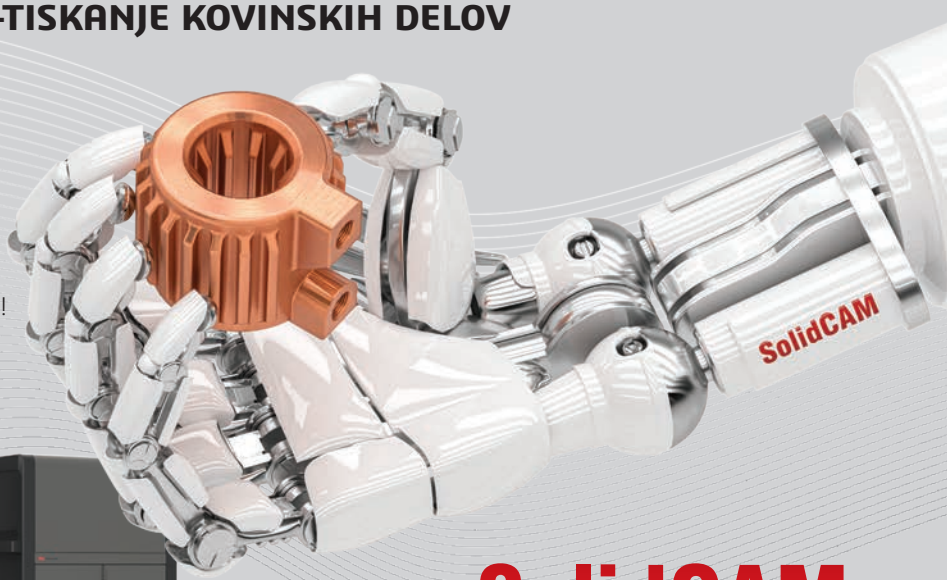
NAROČITE SE!

051 322 442
info@irt3000.si
www.irt3000.si/narocilo-revije

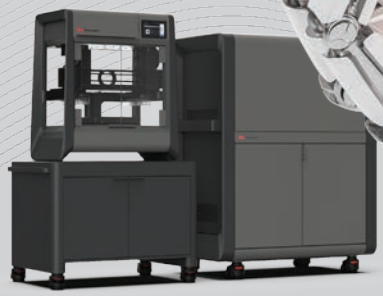
WWW.IRT3000.COM

STROŠKOVNO UČINKOVITO 3D-TISKANJE KOVINSKIH DELOV

3D tiskalniki Desktop Metal so odlična rešitev za izdelavo funkcionalnih prototipov in 3D tiskanje malih in srednjih serij. Zaradi čistega postopka delovanja so primerni tudi za postavitev v pisarniško okolje, njihova uporaba pa je povsem enostavna. Ne izgubljajte časa z dolgimi dobavnimi roki za prototipe in tako občutno skrajšajte čas za razvoj vašega izdelka!



Desktop Metal Shop System



Desktop Metal Studio System

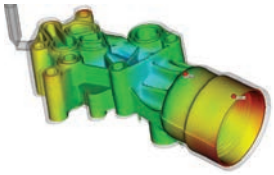
SolidCAM
Additive Manufacturing

powered by
Desktop Metal

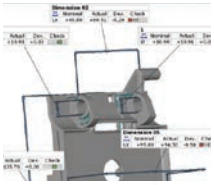
SolidWorld
3D advanced solutions
SLOVENIJA

Za več informacij pokličite 01 / 422 49 00
ali obiščite www.solidworld.si

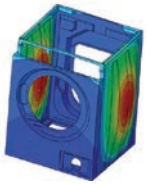
ZNIŽAJTE STROŠKE PROIZVODNJE
IN ZMANJŠAJTE TVEGANJA PRI RAZVOJU IZDELKOV



Odprava deformacij brizganega izdelka



Izsek iz merilnega protokola vzorca



Analiza vibracij ohišja pralnega stroja

- Razvoj izdelkov na ključ
- Napredni MKE-trdnostni preračuni
- Optimizacija proizvodnih procesov
- 3D-skeniranje in meritve
- Brizganje prototipov in malih serij
- Strokovno usposabljanje
- Raziskave in razvoj

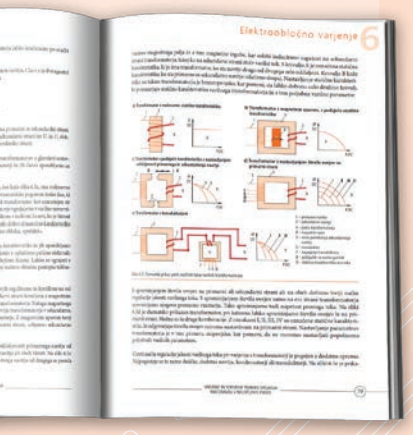
TECOS

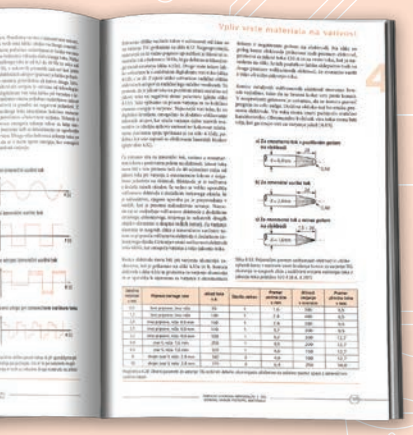
Kidričeva ulica 25, 3000 Celje,
T: 03 490 09 20, 041 646 386,
info@tecos.si
www.tecos.si

ZANESLJIV PARTNER PRI RAZVOJU IZDELKOV, ORODIJ IN TEHNOLOGIJ

Janez Tušek

Varjenje in sorodne tehnike spajanja materialov v neločljivo zvezo





Varjenje in sorodne tehnike spajanja materialov so izdelovalne tehnologije, pri katerih z energijo v trajno, trdno in neločljivo zvezo povežemo dva ali več kovinskih ali nekovinskih elementov. Spajamo najrazličnejše materiale z zelo različno vrsto energije. V pričujoči knjigi podrobneje obravnavamo spajanje kovinskih materialov in delno tudi spajanje termoplastov. Med tehnike spajanja materialov v trajno zvezo uvrščamo varjenje (zvarjanje in navarjanje), spajkanje, ki ga imenujemo tudi lotanje, lepljenje, mehansko spajanje in metalizacijo.
Knjiga je najprej namenjena študentom dodiplomskega in podiplomskega študija na fakultetah za strojništvo ter na vseh drugih fakultetah in višjih šolah, ki imajo v svojem izobraževalnem programu tudi področje spajanja materialov v trajno neločljivo zvezo. V veliko pomoč je lahko vsem udeležencem različnih tečajev, seminarjev in specializacij iz varilstva. Knjiga bo koristila tudi zaposlenim v industriji.

CENA KNJIGE
40 €

Varivost kovinskih materialov, 1. del

Knjiga Varivost kovinskih materialov – 1. del (osnove, varilni postopki, materiali) proučuje vedenje materialov med varjenjem in lastnosti izdelanih zvarnih spojev po varjenju. Vsebina knjige je v prvi vrsti namenjena zaposlenim v TKC-ju za pomoč pri razvojno raziskovalnem in drugem vsakodnevnem delu. Nadalje je namenjena zelo širokemu krogu varilskih strokovnjakov in vsem, ki se ukvarjajo z varjenjem z vidika tehnologije, metalurgije, konstruiranja in splošnega strojništva, vse do gradbeništva. Prav tako je knjiga primeren učbenik za študente dodiplomskega in podiplomskega študija strojništva, metalurgije, gradbeništva in sorodnih področij. Kot učbenik lahko koristi vsem udeležencem raznih varilskih specializacij po mednarodno veljavnih programih. Praktiki v industriji bodo v knjigi našli številne koristne nasvete za varjenje najrazličnejših materialov in sanacijo zlomljenih, razpokanih ali kako drugače poškodovanih kovinskih strojnih elementov.

CENA KNJIGE
30 €

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo

TKC
Tehnološki Konzultantski Center d.o.o.

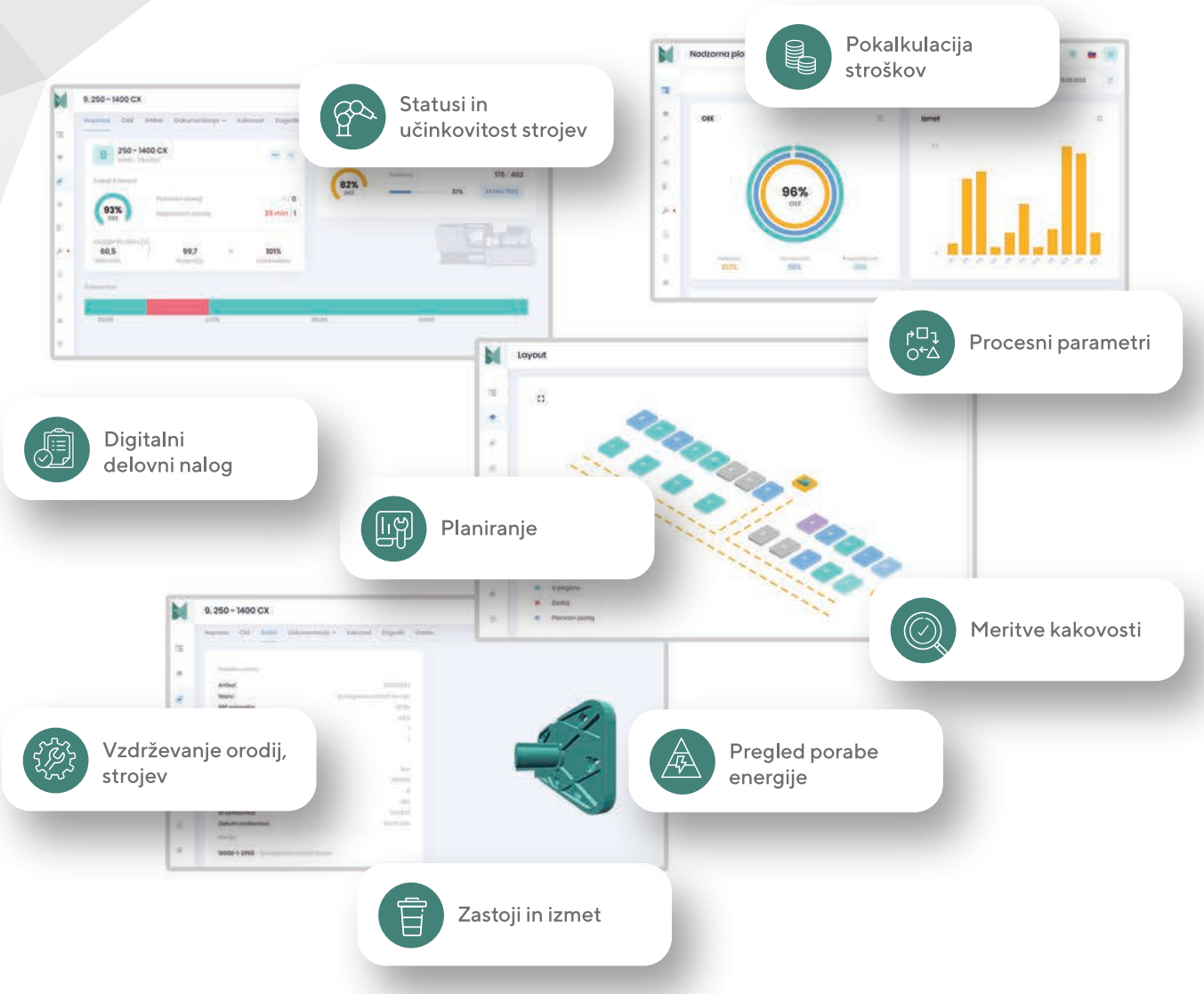
Naročila sprejemamo na e-poštni naslov: info@irt3000.si

Možen nakup na spletni strani **irt3000.si** v področju **knjige**

Spletni nakup:

WWW.PROFIDTP.COM

MESTRIC™ programska rešitev na ključ, ki proizvodno opremo, stroje in linije spremeni v PAMETNO PROIZVODNO OKOLJE



Ste pripravljeni svojo proizvodno dejavnost dvigniti na višjo raven?

IZBOLJŠAJTE KAKOVOST IN UČINKOVITOST TER ZMANJŠAJTE STROŠKE.

MESTRIC™
Hello, smart factory

MESTRIC.COM

Celjski sejem

13.–17. SEPTEMBER 2023

MOS 55 LET

MOS DOM, MOS TURIZEM, MOS B2B,
MOS TEHNIKA ENERGETIKA, MOS PLUS

INDUSTRIJSKI
FORUM
IRT
2023
forum-irt.si

ISBN 978-961-95800-3-5