INDUSTRIJSKI FORUM IRT 2022

VIR ZNANJA IN IZKUŠENJ ZA STROKO

Portorož, 6. in 7. junij 2022

13. INDUSTRIJSKI FORUM IRT

VIR ZNANJA IN IZKUŠENJ ZA STROKO

Zbornik foruma

Urednik
Darko Švetak

Portorož, 6. in 7. junij 2022

Naslov:	**13. 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. Hoffmann Group d. o. o.
Pokrovitelji:	ABC maziva, d.o.o. BOHLER International GmbH BTS Company, d. o. o. MARSI group, d.o.o. METTLER TOLEDO, d. o. o. SCHUNK GmbH & Co. KG SIJ Ravne Systems, d. o. o. TOPOMATIKA, d. o. o. voestalpine AG YASKAWA SLOVENIJA, d. o. o.
Medijski partnerji:	Revija IRT3000 Revija OBRTNIK-PODJETNIK Revija VENTIL Revija Računalniške novice
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 Inovacije, razvoj, tehnologije (13 ; 2022 ; Portorož)
13. industrijski forum IRT : Vir znanja in izkušenj za stroko : zbornik foruma : Portorož, 6. in 7. junij 2022 / urednik Darko Švetak ; [organizator Profidtp]. - Škofljica : Profidtp, 2022

ISBN 978-961-95800-0-4
COBISS.SI-ID 108030979

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

Okrevanje in odpornost

Leta, ki so za nami, so vsekakor dober pokazatelj, kako se vse okoli nas spreminja. Gospodarsko rast in razcvet lahko mimogrede zaustavi kakšna naravna ali človeška katastrofa. Celo tako majhen virus, ki ga ne moremo videti s prostim očesom. Ali pa nemara že zgolj namig o jedrski vojni/katastrofi. Pandemija koronavirusa je pokazala, kako ranljivo je pravzaprav globalno poslovanje in tisto, kar ga omogoča – neskončne dobavne verige. Ali pa pomanjkanje določene surovine, ki lahko zaustavi cele industrije. Te in gospodinjstva pa tepejo hitro naraščajoče cene goriv in energentov. Elektrika verjetno nikoli več ne bo poceni, razen za tiste, ki bodo imeli lastne (pretežno sončne) elektrarne.

In prav tu se skriva del mojega sporočila. Ljudje smo prilagodljivi, sicer ne bi preživeli na tem planetu več tisoč let. Vsaki spremembi se prej ali slej prilagodimo. Še bolje je, če spremembe vsaj delno predvidimo in se nanje pripravimo, ne pa da nas presenetijo. Posel se mora zato osredotočiti na gradnjo odpornosti na zunanje dejavnike, saj je ta bistveno manj stresna in pod črto tudi bistveno cenejša od samega okrevanja, če gre kaj (močno) narobe.

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 tudi slovenska industrija že dela v smeri pametnih tovarn. Podjetja vse bolj zajemajo, pridobivajo in obdelujejo podatke, na osnovi katerih sprejemajo (boljše) poslovne odločitve. Tudi stroji in roboti komunicirajo med seboj v jeziku ničel in enic. Vse to je dober obet, da v t. i. verigi vrednosti splezamo vsaj stopničko više in tako vsem inovacijam in razvoju dodamo vrednost, ki si ju zaslužita. Majhnost Slovenije ni in ne sme biti ovira na poti do uspeha, še manj izgovor. Štejejo znanja, ideje in izvedbe, ki jih je

mogoče udejanjiti in spremeniti v izdelke ali storitve, za katere je kdorkoli na svetu pripravljen plačati.

Industrijski forum IRT je nekakšen svetilnik domače industrije in hkrati njeno ogledalo. Če 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 načrt za odpornost.

Portorož, junij 2022

Darko ŠVETAK

PROFIDTP, d. o. o.
Škofljica

Na povezavi ali preko črtne kode, lahko dostopate do mape, kjer se nahaja zbornik letošnjega Industrijskega foruma IRT 2022

https://eforum-irt.si/wp-content/uploads/2022/05/zbornik-if-irt-2022.pdf

QR koda:

VSEBINA

Strokovni prispevki foruma

DAN 1 - DVORANA 1

DOPRINOS INDUSTRIJSKE METROLOGIJE K RAZVOJU STRATEGIJE PAMETNE TOVARNE
Simon SMOLNIKAR
RLS Merilna oprema d.o.o. 3

UPRAVLJANJE S PODATKI O IZDELKU IN PROCESU – OSNOVNI GRADNIK DIGITALNE PREOBRAZBE
Miha TRČEK
CADCAM Lab d.o.o. 9

SOTER: SLOVENSKI VIRTUALNI ASISTENT ZA VARNO DELOVANJE PODJETJA
Simon KRAJNIK, Denis FAJERTAG
PRECIZ d.o.o. 15

DAN 2 - DVORANA 1

UPORABA KOLABORATIVNEGA ROBOTA IN STROJNEGA VIDA OMRON V APLIKACIJAH FINALIZIRANJA IN PAKIRANJA IZDELKOV
Andrej ROTOVNIK, Rok TOSTOVRŠNIK, Matjaž KOVAČIČ
MIEL, d.o.o 17

ABB FlexLoaderTM ROBOTSKE CELICE
Robert LOGAR, Peter KEREC, Tomaž LASIČ
ABB d.o.o. 21

PREDSTAVITEV NAJNOVEJŠIH FANUC ROBOTOV CRX-20iA IN M-1000iA
Franc ŽABERL
FANUC Adria d.o.o. 25

MOBILNA KOLABORATIVNA ROBOTSKA CELICA
Rok DOLINAR, Matej KUZMAN
BTS Company d.o.o. 29

VPELJAVA STROJNEGA UČENJA V PROCES CNC SITOTISKA
Žiga KLJUN[1], David STARINA[1], Ana VARLEC[2]
[1]Kyndryl Ljubljana, storitve informacijske tehnologije, d.o.o.
[2]Steklarna Hrastnik d.o.o. 33

ROBOTSKA CELICA ZA ADAPTIVNO BRUŠENJE IZDELKOV IZ KRISTALA
Matej MERKAČ[1], Peter ARKO[2], Hubert KOSLER[1], Aljoša ZUPANC[1]
[1]Yaskawa Slovenija d.o.o.
[2]Yaskawa Ristro d.o.o 39

IZAZOVI I RJEŠAVANJE PROBLEMA U PROIZVODNJI ALATA POMOĆU AUTOMATIZIRANOG 3D OPTIČKOG MJERNOG SUSTAVA
Josip KOS, Luka LUKAČIĆ, Nenad DRVAR, Tomislav HERCIGONJA 43
Topomatika d.o.o.

CT SKENIRANJE ZA MJERENJE I ANALIZU DEFEKATA PLASTIČNIH PROIZVODA
Josip KOS, Luka KURTALJ, Nenad DRVAR, Tomislav HERCIGONJA
Topomatika d.o.o. 49

IDEJNI PROJEKT ZASNOVE OGREVALNIH JAM ZA SLABE
Matic BOBNAR[1,2], Bojan RAJAKOVIĆ[2], Borut KOSEC[1,3]
[1]UL, Naravoslovnotehniška fakulteta
[2]SIJ Acroni d.o.o.
[3]UL, Fakulteta za strojništvo 55

NOVI TRENDI PRI IZDELAVI NAVOJEV V ORODJARSTVU
Branko UŠAJ
BTS Company d.o.o. 59

CONFORMAL COOLING MADE BY CONTURA® - THE SOLUTION OF COST SAVING AND INCREASING OF THE PRODUCTIVITY
Cem Baris ÖZGÜVEN, Jörn SENGELAUB
CONTURA-MTC GmbH 65

DEBURRING AND CLEANING WITH HIGH PRESSURE
Günther ZIPPEL
Piller Entgrattechnik GmbH 71

DAN 2 - DVORANA 2 (SLOTRIB)

PREPOZNAVANJE PROSTORSKE OBRABE REZALNIH ORODIJ S 3D SKENIRANJEM
Jernej GRČAR, Franci PUŠAVEC
UL, FS, Laboratorij za odrezavanje LABOD 75

KARAKTERIZACIJA POLIMERNIH MATERIALOV
Miroslav HUSKIĆ, Silvester BOLKA, Blaž NARDIN
Fakulteta za tehnologijo polimerov 79

RAZVOJ FLEKSIBILNIH ŠTANČNIH ORODIJ Z INTEGRIRANIM NADZOROM MAZANJA
Tomaž PEPELNJAK[1], Uroš ŠTUKLEK[2], Dejan ROŽIČ[2], Jan KUDLAČEK[3]
[1]UL, Fakulteta za strojništvo
[2]DAFRA kontakt tehnologija d.o.o.
[3]TechTest, s.r.o., Češka Republika 85

DAN 2 - DVORANA 3

VPLIV TRENDOV AVTOMOBILSKE INDUSTRIJE NA PROIZVODNE TEHNOLOGIJE
Pavel OBLAK, Aleš ADAMLJE
Hella Saturnus Slovenija d.o.o. 89

TRENDI PRI RAZVOJU PANELOV ELEKTRIČNIH AVTOMOBILOV
Aleš ADAMLJE, Pavel OBLAK
Hella Saturnus Slovenija d.o.o. 93

SISTEM ZA NADZOR PROCESA BRIZGANJA PLASTIČNIH MATERIALOV
Kristjan RIJAVEC, Domen ROVŠČEK, Aljaž PODOBNIK
Hidria d.o.o. 97

PRIMERJAVA KOVINSKIH IN POLIMERNIH ORODNIH VLOŽKOV
Blaž NARDIN, Silvester BOLKA, Teja PEŠL, Rebeka LORBER, Tamara ROZMAN, Rajko BOBOVNIK,
Fakulteta za tehnologijo polimerov 101

ZELENE TEHNOLOGIJE NA PODROČJU BRIZGANJA PLASTIKE
Matija OBOLNAR, David ŠENICA
Hella Saturnus Slovenija d.o.o. 107

RAZVOJ KOMPOSTABILNE NAGROBNE SVEČE
Martin JURKOVIČ[1], David JURKOVIČ[1], Gašper GANTAR[2,3]
[1]Svečarstvo Jurkovič, d. o. o.
[2]Visoka šola za proizvodno inženirstvo
[3]Fakulteta za varstvo okolja 111

RECIKLIRANJE DUROPLASTIČNIH KOMPOZITOV
Silvester BOLKA, Teja PEŠL, Rebeka LORBER, Tamara ROZMAN, Rajko BOBOVNIK, Blaž NARDIN
Fakulteta za tehnologijo polimerov 115

PA6 KOMPOZITI KOT ALTERNATIVA ZA PA66
Rebeka LORBER, Silvester BOLKA, Miroslav HUSKIĆ, Blaž NARDIN
Fakulteta za tehnologijo polimerov 121

MODIFIKACIJA ŽILAVOSTI BIOKOMPOZITOV NA OSNOVI PLA
Teja PEŠL, Silvester BOLKA, Rebeka LORBER, Tamara ROZMAN, Rajko BOBOVNIK, Blaž NARDIN 125
Fakulteta za tehnologijo polimerov

MODIFIKACIJA ŽILAVOSTI TERMOPLASTIČNE MEŠANICE NA OSNOVI PLA Z NANOKRISTALINIČNO CELULOZO
Silvester BOLKA, Teja PEŠL, Rebeka LORBER, Tamara ROZMAN, Rajko BOBOVNIK, Blaž NARDIN 131
Fakulteta za tehnologijo polimerov

VPLIV KOLIČINE KOMPATIBILIZATORJA NA ADHEZIJO IN LASTNOSTI KOMPOZITOV NA OSNOVI PE
Tamara ROZMAN, Silvester BOLKA, Teja PEŠL, Rebeka LORBER, Rajko BOBOVNIK, Blaž NARDIN 139
Fakulteta za tehnologijo polimerov

DAN 2 - DVORANA 4

ODABIR ADITIVNE TEHNOLOGIJE ZA IZRADU POLIMERNIH DIJELOVA
Amir ŠEĆERKADIĆ, dipl. ing. 145
IZIT d.o.o.

RAZVOJ IZDELKA Z INTEGRIRANIM SENZORJEM S TEHNOLOGIJO 3D TISKA
Matic VOGRIN, Simon ERBAN
MARSi Group d.o.o. 153

INTEGRACIJA VENTILSKIH OTOKOV Z INTEGRIRANO BREZŽIČNO POVEZAVO
Nejc ZALOKAR, Matjaž VELUNŠEK, Marko MIRNIK, Aleš PLEŠNIK
TURNA d.o.o. 157

VARNOST STROJEV – POSTOPEK OCENJEVANJA TVEGANJA
Neja ROKAVEC
LTH Castings, d. o. o. 161

RAZVOJ IN IMPLEMENTACIJA DIGITALNE PLATFORME ZA VZDRŽEVANJE V REALNEM ČASU IN DIAGNOSTIKO
dr. Jelena TOPIČ BOŽIČ, Peter KORENČAN, dr. Andraž ŽERTEK , Dr. Dušan BOŽIČ
Inden, d. o. o. 165

MODERNIZACIJA NADZORNIH SISTEMOV V SODOBNI INDUSTRIJSKI PROIZVODNJI
Jože PERKO, Peter SKOPEC
ControlTech d.o.o. 171

OPC KOMUNIKACIJA – SEDANJOST IN PRIHODNOST
Andrej VRBANČIČ
INEA RBT – oprema za avtomatizacijo, d.o.o. 175

PRIMER UPORABE TEHNOLOGIJE VERIŽENJA BLOKOV V INDUSTRIJI 4.0
Gal GANTAR[1], Gašper GANTAR[2,3]
[1]Fakulteta za računalništvo in informatiko, Univerza v Ljubljani
[2]Visoka šola za proizvodno inženirstvo
[3]Fakulteta za varstvo okolja 181

KOMERCIALNI OGLASI PODJETJI 185

13. INDUSTRIJSKI FORUM IRT

STROKOVNI PRISPEVKI

Portorož, 6. in 7. junij 2022

DOPRINOS INDUSTRIJSKE METROLOGIJE K RAZVOJU STRATEGIJE PAMETNE TOVARNE

Simon SMOLNIKAR
RLS, d. o. o.

IZVLEČEK

Sodobna proizvodna podjetja se srečujejo z velikimi pritiski trga glede zagotavljanja visokih standardov na področju kakovosti in hkrati s pritiski na optimizacijo stroškov izdelkov. Strategija podjetij je zato vlaganje v razvoj in tehnološko nadgradnjo procesov ter tehnologij s ciljem optimizacije proizvodnih procesov. Pospešenemu razvoju procesov sledijo tudi tehnološka podjetja, ki v partnerskih povezavah s proizvodnimi podjetji dosegajo izvrstne razvojne rezultate. Eno izmed področij avtomatizacije procesov je metrologija, ki zadnje čase zelo napreduje in sledi smernicam uresničevanja ciljev pametne tovarne.

1 UVOD

Nenehne spremembe na globalnih trgih so industrijska podjetja postavila pred izzive, kako optimirati proizvodne procese s ciljem povečati svojo fleksibilnost ter hkrati ostati visokoproduktivna. Ob visoki produktivnosti se podjetja srečujejo z izzivi, kako zagotavljati raven kakovosti na visoki ravni oziroma jo celo izboljšati. Vse več procesov ima zahteve po 100-odstotni kontroli kakovosti izdelave proizvodov. Tukaj se podjetja srečujejo z novim faktorjem, ki se je pojavil v zadnjem obdobju, in sicer, kako zagotoviti zadostno število zaposlenih, da bi lahko izvajali samo kontrolo proizvodov že v okviru samega proizvodnega procesa.
Dolgoletne izkušnje in sodelovanje tehnoloških podjetij z industrijo omogočajo, da se razvijajo in umeščajo v proizvodne procese tehnologije, ki proizvodnim podjetjem omogočajo celovit nadzor nad kakovostjo proizvodov v celotnem proizvodnem procesu v podjetju. Nadzor in avtomatizacija procesov ter planiranje aktivnosti na podlagi pridobljenih podatkov iz proizvodnje je eden izmed ključnih stebrov pri uresničevanju strategije pametne tovarne.

Prav cilji proizvodnih podjetij, da bi izkoristila obstoječe resurse, ter dvignila raven prilagodljivosti novim zahtevam, je pripeljal tehnološka podjetja, da so svoj razvoj usmerila v čim večjo povezljivost in enostavno integracijo rešitev v že obstoječe stanje v proizvodnji.

V nadaljevanju prispevka je opisan vpliv industrijske metrologije na skupno učinkovitost (OEE). Pri vseh investicijah je treba poleg tehnološke ustreznosti zagotoviti tudi finančno upravičenost. Pri tehnologijah s področja metrologije je kalkulacija povračila investicije težje merljiva, ker gre za posredni vpliv na proizvodno ceno proizvoda. Vendar je vpliv teh tehnologij na skupno učinkovitost proizvodnje izjemno pomemben, kar bo na kratko opisano v nadaljevanju.
Poleg učinkov tehnologij na skupno učinkovitost so na kratko opisani tudi primeri iz praks, ki še dodatno podkrepijo smiselnost vpeljave novih tehnologij in njihov učinek na optimizacijo in zagotavljanje kakovosti proizvodnih procesov v industriji.

2 INDUSTRIJSKA METROLOGIJA V PROCESIH

2.1 Namen

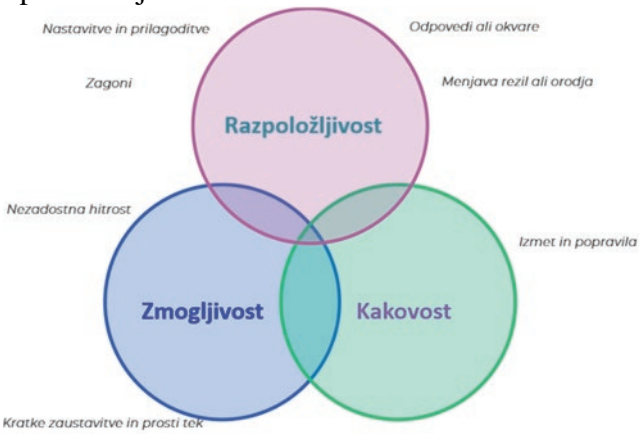
Tehnološka podjetja se ob vse večji dinamiki na trgu in posledično v proizvodnji zavedajo, da bodo morala za doseganje svoje učinkovitosti in konkurenčnosti še nadgraditi svoje procese. Naprednejša proizvodna podjetja se zavedajo, da morajo velik del svojih naporov usmeriti v

zagotavljanje uresničevanja in doseganja kvalitativnih in kvantitativnih kazalnikov v podjetju. Le tako bodo lahko uspešno konkurirala na svetovnem trgu in si ustvarila dodano vrednost, ki jim bo omogočila razvoj in napredek. Tehnološka podjetja tako natančno spremljajo razvoj in potrebe proizvodnih podjetij, s ciljem usmeriti razvojne zmogljivosti v razvoj tehnologij, ki bodo pripomogle k zagotavljanju optimizacije in avtomatizacije obvladovanja kakovosti v celotnem proizvodno-obdelovalnem procesu.

2.2 Doprinos metrologije k skupni učinkovitosti proizvodnje (OEE)

Pri načrtovanju proizvodnih procesov se v podjetjih velik poudarek daje tudi kazalnikom, kako učinkovit bo nov proces. Prav zaradi te potrebe je ta izračun v šestdesetih letih 20. stoletja oblikoval Seiichi Nakajima, da bi ocenil, kako učinkovito se izkorišča proizvodna oprema in dokazal učinke metode TPM – Total Productive Maintenance.
Danes je skupna učinkovitost (OEE – Overall Equipment Effectiveness) globalno sprejet standard za merjenje proizvodne produktivnosti.

V zadnjem obdobju se velik poudarek daje tudi raziskovanju vpliva merilnih tehnologij na skupno učinkovitost. Na podlagi pridobljenih informacij iz procesov in izkušenj je bila izdelana osnovna shema, ki prikazuje Skupno učinkovitost in glavne vplive nanjo.



Slika 1: Shema skupne učinkovitosti – OEE

Idealen ali 100 % OEE pomeni, da so v podjetju izdelali le dobre izdelke, najhitreje, kar je možno, brez časov zaustavitve.

Skupna učinkovitost proizvodnje je zmnožek treh faktorjev, pri katerih lahko ustrezni merilni postopki doprinesejo ključne aktivnosti, ki imajo velik vpliv na visoko vrednost kazalnika.
Prvi izmed faktorjev je razpoložljivost, ki nam pove, za koliko ur kapacitet imamo na voljo v proizvodnji. Pri tem faktorju se ob ustrezni vpeljavi metrologije v proizvodnji lahko nadejajo povečanja izkoristka ter posledično povečanja razpoložljivosti proizvodnih kapacitet. Povečanje razpoložljivosti je doseženo z zmanjšanjem intervencij na proizvodnjih linijah kot posledica manjšega števila neplaniranih zaustavitev in posegov v sam proces.
Drugi izmed faktorjev je zmogljivost, ki nam pove, kakšen je aktualni čas obdelave v primerjavi s pričakovanim. Optimizacija merilnih postopkov ima velik doprinos pri zmanjševanju naknadnih popravil na obdelovancih, nastavitvenih časih procesov ter neskladnosti na samem procesu. Rezultat ustrezno vpeljanih aktivnosti in tehnologij se rezultira v večjem številu kvalitetno izdelanih kosov v proizvodnji.
Tretji izmed faktorjev je kakovost. Vprašanje, ki si ga podjetja zastavljajo tukaj, je, koliko dobrih kosov so sposobna proizvesti. Ustrezno izbrane in vpeljane tehnologije lahko zelo omejijo ali popolnoma odpravijo vpliv človeškega faktorja na spremljanje kakovosti. S tem se zagotovijo ponovljive in natančne meritve ter razbremenijo tehnologi, da se posvečajo tehnološkim izboljšavam in optimizacijam. S tem se podjetja izognejo morebitnim odstopanjem procesov že v začetni fazi, ko se nastavlja procese. Kot rezultati zgoraj zapisanih dejstev so povečanje zmogljivosti procesov ter zaupanje v procese in obdelovance v vseh fazah obdelave.
V nadaljevanju so navedeni konkretni vplivi ustrezno vpeljanih novih merilnih tehnologij, ki se v podjetjih vpeljujejo v različnih fazah proizvodnega procesa. Da se lahko proizvodnja ustrezno planira, je treba zagotoviti ustrezno stabilnost osnovnih proizvodnih procesov (angl. *Process foundation*), v katerih lahko delujejo stroji. Ta raven je povsem preventivna in podjetjem omogoča, da z dobro kontrolo čim manj procesnih napak prenašajo v proizvodni proces in s tem omejijo zagonske stroške v proizvodnji.

Tukaj ima najsodobnejša merilna oprema naslednje doprinose pri doseganju optimalne ravni kazalnika OEE:
Razpoložljivost:

- Doslednost pri načrtovanih aktivnostih vzdrževanja, s tem se zmanjša število nenačrtovanih dogodkov.

Zmogljivost:

- Večje zaupanje v proces in s tem zmanjšanje nenačrtovanih inženirskih posegov v proces optimizacije.

Kakovost:

- Zmanjšanje stroškov zaradi neskladnosti procesov, dodatne obdelave in izmeta.

Slika 2: Merilna oprema za oceno ustreznosti in zmogljivosti strojev

Ko v podjetju ustvarijo stabilno okolje, lahko na naslednji ravni, pri nastavitvi procesa (angl. *Process setting*), že posvetijo pozornost proizvodu, na katerem se bodo izvajale operacije.
V konkretnem primeru proizvodnega procesa to pomeni pozicioniranje kosov v prostoru, pripravo in kontrolo orodij. S sodobnimi tehnologijami lahko obdelovalni stroji že sami v sklopu zagona izvedejo avtomatske operacije in pripravijo stroj za začetek proizvodnega procesa.
Tukaj ima najsodobnejša merilna oprema naslednje doprinose pri doseganju optimalne ravni kazalnika OEE:
Razpoložljivost:

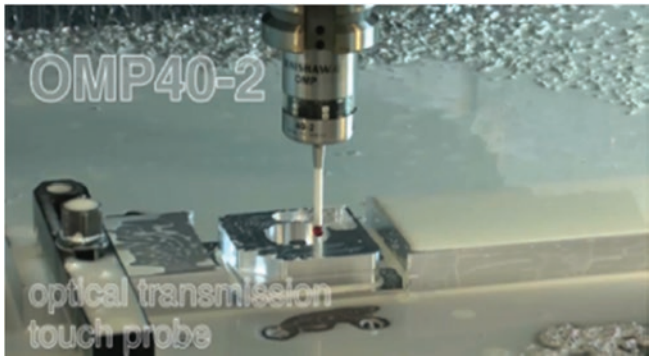
- Povečanje nadzora nad obdelovalnim procesom z avtomatizacijo merilnega procesa – zmanjšanje jalovih časov v procesu obdelave.

Zmogljivost:

- Zmanjšanje ročnih posegov na stroju, hitrejša nastavitev procesa, zmanjšanje jalovih časov.

Kakovost:

- Visoka natančnost, sledljivost procesa in izničenje vpliva človeškega faktorja. Doseganje stabilnosti procesa in manj izmeta.



Slika 3: Merilna oprema za nastavitev CNC-procesov

Ko je stroj pripravljen za serijsko proizvodnjo, je treba zagotoviti tudi spremljanje kakovosti izdelave med procesom (angl. *In-process control*). Z ustrezno izbiro tehnologij se lahko zagotovi sprotna kontrola in s tem ustrezno avtomatsko ukrepanje ob odstopanju od zahtevanih toleranc. Merilni sistemi se lahko ustrezno avtomatizirajo, kar omogoča avtomatske korekcije na stroju in s tem zanesljivejše in hitrejše upravljanje procesov.

Tukaj ima najsodobnejša merilna oprema naslednje doprinose pri doseganju optimalne ravni kazalnika OEE:
Razpoložljivost:

- Odprava neželenih procesnih napak v sklopu obdelave in s tem povečanje razpoložljivosti strojev v času.

Zmogljivost:

- Odprava/zmanjšanje vpliva ročnega posega v procese, hitre povratne informacije iz procesa ter s tem posledično skrajšanje jalovih časov.

Kakovost:

- Visoka natančnost procesov, povratne zanke za prilagoditve v realnem času – povečanje stabilnosti obdelave.
- Takojšnja kontrola procesa obdelave – zmanjšanje izmeta na minimum. Manjša obremenjenosti končne kontrole.

Slika 4: Merilna oprema za medprocesno kontrolo

Po končanem proizvodnem procesu se izvajajo še neodvisne meritve (angl. *Post-process monitoring*) na izbranih proizvodih, s čimer v podjetju zagotovijo končno in neodvisno kontrolo izven proizvodnje.

Tukaj ima najsodobnejša merilna oprema naslednje doprinose pri doseganju optimalne ravni kazalnika OEE:
Razpoložljivost:

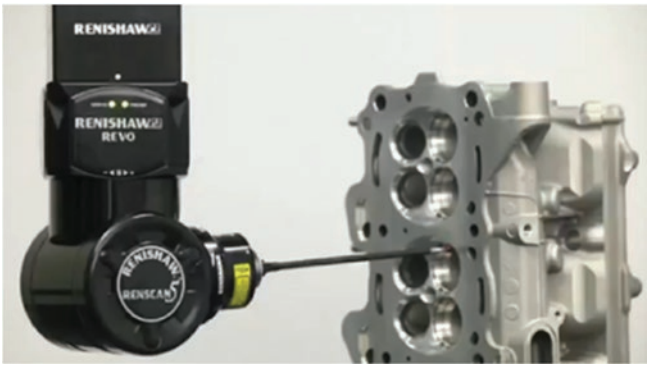
- Skrajšanje merilnih časov s ciljem povečanja razpoložljivosti merilne opreme.

Zmogljivost:

- Zmanjšanje zaostankov v merilnicah.
- Povečanje fleksibilnosti merilnih strojev.
- Možnost povečanja števila posameznih meritev iz naslova skrajšanja merilnih časov.

Kakovost:

- Možnost merjenja vseh zahtev ne glede na njihovo postavitev v prostoru.
- Hitrejše merjenje = večje število meritev = zmanjšanje težav s kakovostjo.



Slika 5: Merilna oprema za končno kontrolo

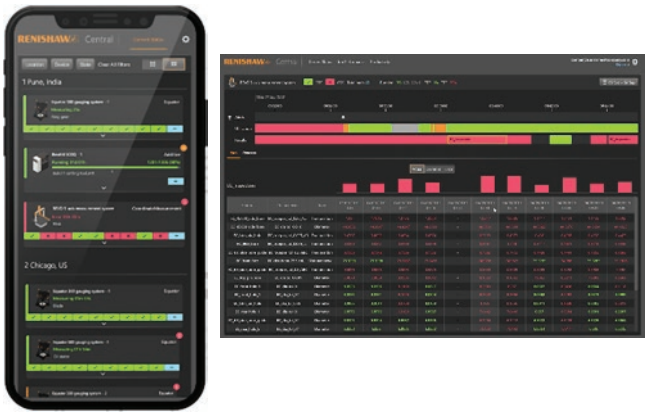
Ob upoštevanju vseh navedenih ravni in ob ustreznem vključevanju merilne opreme v same procese se celoten proces kontrole proizvoda, od vpeljave v proizvodnjo do odpreme iz proizvodnje, v celoti avtomatsko obvladuje. To se izraža v optimizaciji časovne komponente, pa tudi v kakovosti proizvodov in učinkovitosti proizvodnje.

2.3 Obvladovanje in obdelava podatkov za odločanje

V okviru strategije pametne tovarne je eno izmed ključnih področij obvladovanje podatkov in njihova ustrezna uporaba. S tem ciljem tudi tehnologije ustrezno komunicirajo s stroji in omogočajo prenos vseh potrebnih podatkov v mrežo ter s tem možnost, da se ustrezno obdelajo in omogočijo uporabnikom, da se ustrezno odzovejo in sprejmejo potrebne odločitve. Prednost sodobnih rešitev je, da ob ustrezni namestitvi na stroje oziroma poleg njih omogočajo komunikacijo med samim proizvodnim procesom, s čimer zagotovijo že sprotno korigiranje parametrov na strojih. Z vsem tem podjetja ne izgubljajo dragocenega časa in virov, ki so potrebni za izvajanje korektivnih ukrepov.

Slika 6: Primer vzpostavitve celovitega sistema za obdelavo podatkov za odločanje

Ob izjemni dinamiki v proizvodnih procesih je obdelava in prikaz podatkov izjemnega pomena, ker omogoča odločevalcem in planerjem, hitro in učinkovito možnost odločanja in planiranja aktivnosti, ki so pomembna za končno učinkovitost proizvodnega procesa.



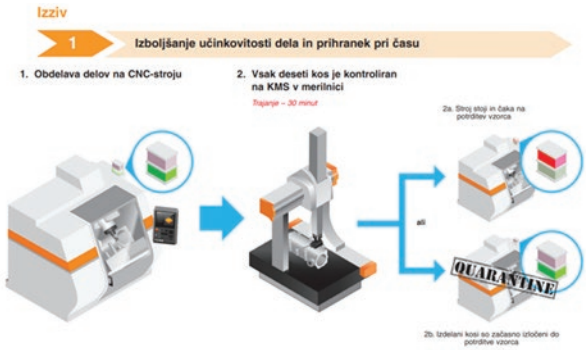
Slika 7: Primeri uporabniškega vmesnika na različnih napravah

2.4 Primeri iz prakse kot dokaz smiselnosti vpeljave novih tehnologij

V zadnjih letih na področju vpeljave novih tehnologij zaznavamo velike premike. Primeri dobre prakse nam kažejo, da se ob ustrezno in profesionalno pripravljenem projektu lahko pokažejo rezultati takoj in da v zelo kratkem času upravičijo investicijo. Za dobro izvedenim projektom morajo stati projektne skupine, ki jih sestavljajo nosilci procesov na strani investitorja in nosilci tehnologij na strani ponudnika. Osnova dobro pripravljenega projekta je pregled stanja v proizvodnji in natančen popis procesov ter specifik, ki jih ima vsak proizvodni proces. Po popisu procesa je treba izvesti scenarij, kaj in kje nam nove tehnologije omogočajo, da optimiramo proces in tako izboljšamo kvalitativno in kvantitativno shemo procesa.

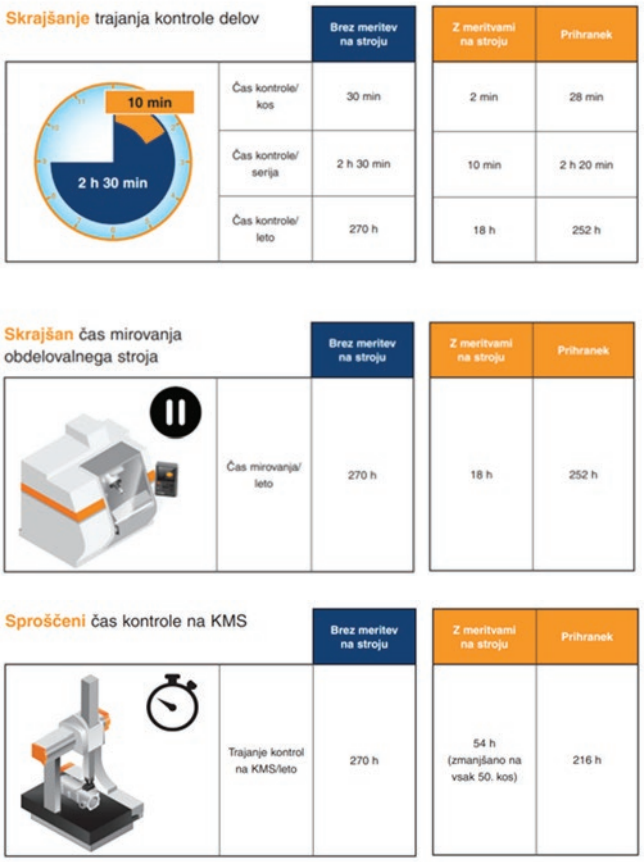
V nadaljevanju je prikazano nekaj rezultatov uspešne vpeljave najnovejših tehnologij in njihov učinek na skupno učinkovitost proizvodnih procesov.

Podjetje se je pred uporabo naprednih tehnologij na obdelovalnih strojih posluževalo klasičnega postopka potrjevanja obdelovancev na 3koordinatnem merilnem stroju. Ker je bilo treba ob vsakemu merjenju zaustaviti proces obdelave, ter čakati na potrjene rezultate s strani merilca, so bili v podjetju priča izjemno velikim zakasnitvenim časom in nizkemu izkoristku proizvodnje. Po vpeljavi ustrezne tehnologije in postopkov že v fazi obdelave na CNC-strojih so se časi za izdelavo in potrjevanje ustreznosti obdelovancev konkretno znižali. Hkrati pa je vse skupaj vplivalo na izjemno povečanje učinkovitosti proizvodnih procesov in razbremenitev končne kontrole v podjetju.



Slika 8: Obstoječe stanje proizvodnega procesa

Slika 9: Vpeljava avtomatskega merjenja na CNC-obdelovalnem stroju



Slika 10: Učinki vpeljave sodobnega sistema merjenja v samem procesu obdelave

Po celovitem posnetku stanja v proizvodnji in postavitvi projektnih ciljev se je vpeljava sodobnih tehnologij izkazala za izjemno pametno odločitev. Vpeljava avtomatskega merilnega sistema na obdelovalnem stroju je prinesla v celotnem procesu obdelave in kontrole več kot 80-odstotne prihranke na času in s tem pripomogla k izjemni učinkovitosti proizvodnje ter razbremenitvi merilnice.

3 SKLEP

Proizvodna podjetja po vsem svetu se soočajo s pritiski kupcev, da poleg najkonkurenčnejših cen zagotavljajo še najboljšo kakovost izdelkov. Vse te cilje je mogoče dosegati tudi ob vpeljavi tehnologij za kontrolo kakovosti v sami proizvodnji.

Glavni doprinosi vpeljave industrijske metrologije k strategiji pametne tovarne so tako na področjih:

- Visoke avtomatizacije
- Nizkih stroškov dela
- Direktnega nadzora procesov
- Inteligentne proizvodnje
- Nizkih stroškov kakovosti
- Visoke produktivnost

Viri:

[1] Spletna stran: http://www.renishaw.com

[2] Interni dokumenti podjetja Renishaw

[3] Bledowski, K.: The Internet of Things: Industrie 4.0 vs. the Industrial Internet, 2015.

[4] Spletna stran: http://www.plattform-i40.de

[5] Spletna stran: www.foodengineeringmag.com

[6] Spletna stran: www.oee.com

UPRAVLJANJE S PODATKI O IZDELKU IN PROCESU V TOVARNI PRIHODNOSTI

Miha TRČEK[1], Vili MALNARIČ[2]
[1]CADCAM Lab d.o.o.
[2]TPV Automotive d.o.o.

IZVLEČEK

V svetu avtomobilske dobaviteljske industrijskem poteka ostra tekma na globalnem trgu zato podjetja iščejo vedno nove načine kako pridobiti zaupanje avtomobilskih proizvajalcev s svojimi inovativnimi proizvodi. V skladu s trendi v industriji, poleg osnovnih konstrukcijskih zahtev v ospredje vstopajo nove in nove zahteve, o katerih se še v bližnji preteklosti nihče ni oziral. Današnji izdelki morajo biti boljši in lažji kot v preteklosti, uporabljajo se novi materiali in ne nazadnje morajo izdelki biti načrtovani trajnostno. Pritisk na proizvodno ceno izdelka pa ne popušča ampak se vse bolj zaostruje.

1 UVOD

V celotnem procesu načrtovanja izdelka je zelo pomemben razvojni del, saj ima največji vpliv na končni proces izdelave in potek proizvodnje. Naloga v razvojnem delu je zahtevna in brez uporabe sodobnih orodij za načrtovanje izdelkov je težko pričakovati nove in nove inovacije, ki so potrebne za doseganje ciljev. Razvojni cikli pa so dodatno oteženi še s spremembami, ki se pojavljajo v fazi načrtovanja in optimizacije končnega izdelka.

2 PLM rešitve

2.1 Trenutna situacija

Podjetja že desetletja uporabljajo programska orodja za 3D načrtovanje in konstruiranje izdelkov. Prav tako se že dalj časa uporabljajo programi za različne simulacije in analize kar v veliki meri pripomore k temu da so izdelki načrtovani v skladu z zahtevami naročnikov. V uporabi je veliko različnih programskih orodij za različne vidike preverjanja skladnosti izdelkov. Za shranjevanje podatkov, ki nastajajo v fazi razvoja se večinoma uporablja Windows datotečna struktura, kjer se ročno skrbi za pristope do podatkov članom projekta in vzporedno v Excel datotekah se pišejo kosovnice in spremni podatki, ki so pomembni za spremljanje razvoja izdelka. Z izkušeno ekipo in veliko splošnega znanja uporabe teh orodij so procesi v razvoju tehnično podprti, vendar so podatki ves čas izpostavljeni zunanjim vplivom in podvrženi napakam. Hkrati je potrebno vzdrževati več kopij podatkov, da se kaj ne prepiše in s tem izgubi že opravljeno delo.

2.2 Rešitve, ki so na trgu

Za boljše upravljanje podatkov je na tržišču nekaj rešitev, ki učinkovito odpravljajo pomanjkljivosti, ki se pojavljajo v primeru načrtovanja izdelkov z uporabo sodobnih tehnologij za urejanje podatkov skozi celoten proces načrtovanja izdelkov in hkrati te rešitve v večini omogočajo tudi vodenje sprememb, ki nastajajo v vseh fazah načrtovanja izdelka od prvotnih zahtev do končne serijske proizvodnje izdelkov. Te programske rešitve se združuje pod kratico PLM – Product Lifecycle Management, ali programska oprema za vodenje življenjskega cikla izdelka.

2.3 Glavni izzivi pri vodenju podatkov

V poplavi informacij in podatkov, ki nastajajo v procesu razvoja izdelkov je več izzivov s katerimi se mora spopadati PLM sistem:

- kako zagotoviti zaščito podatkov pred nenamernim spreminjanjem,
- kako zagotoviti sočasno delo več inženirjem na istem izdelku

- kako zagotoviti sledljivost sprememb
- na kakšen način se lahko informacije, ki jih imajo v delu inženirji, ki izdelke načrtujejo, deli širšemu naboru ekipe, ki ima interes za dostop do teh podatkov
- kako povezati projektne aktivnosti z rezultati nalog, ki so del posameznih projektnih faz

3 3DEXPERIENCE PLM informacijski sistem

PLM (Product Lifecycle Management) postaja vse bolj nujen in neobhoden informacijski sistem v podjetjih. Pod svojim okriljem združuje različne discipline, ki vplivajo na definicijo, dinamiko in časovni potek razvoja izdelka. V nadaljevanju bomo opisali, kateri so najpomembnejši segmenti informacijskega sistema, ki mu rečemo PLM.

Najpomembnejši segmenti PLM informacijskega sistema so:

a. **Vodenje kosovnic** (BOM – Bill Of Material) je ena od osnovnih funkcionalnosti, ki združuje tehnični in komercialni del podjetja. Prodaja in nabava imata svoj pogled na kosovnico, med tem ko konstrukcija in tehnologija kreirata podatke. Svoje interese imata tudi kakovost in seveda vodstvo podjetja. Prodaja je tista, ki v podjetje prinese zahteve trga in posledično vpliva na kosovnico izdelka, nabavo zanima končna oblika kosovnice za nabavo ustreznih količin materiala, medtem ko razvojni inženirji kreirajo kosovnico (vključno z risbami) preko svojih orodij za načrtovanje in oblikovanje izdelkov in tehnologi pripravijo operacije, vire in surovi material za izdelavo izdelkov. Pomembno je da so vsa orodja integrirana v skupno okolje in da imajo vsi pogled na isto kosovnico. Vsaka sprememba s strani tistih, ki kreirajo podatke je zapisana in vidna v trenutku ko se shrani. Poznamo več oblik kosovnice, kot so inženirska kosovnica (EBOM – Engineering Bill Of Material), proizvodna kosovnica (MBOM – Manufacturing Bill Of Material) in storitvena kosovnica (SBOM – Service Bill Of Material).

b. **Upravljanje življenjskega cikla izdelka**. Pomembno je da ima dostop do podatkov vsak, ki potrebuje določene informacije v točno določenem času. Z upravljanjem življenjskega cikla podatkov PLM sistem poskrbi, da se v različnih obdobjih življenjskega cikla dinamično spreminja pravica kreiranja in spreminjanja določenih informacij oz. podatkov. Različna stanja so »Privatno« – podatke vidi samo lastnik, »V delu« - podatke vidijo vsi, ki so vključeni v določen projekt, »Zamrznjeno« - podatkov se ne more več spreminjati, ker so namenjeni za pregled oz. potrditev, ampak imajo še vedno možnost vrnitve v stanje »V delu«, »Odobreno« - podatki so zaklenjeni oz.potrjeni in se jih v tej obliki ne more več spreminjati, torej so primerni za nabavo, ali prehod v naslednji korak obdelave, »Zastarelo« - tega podatka se v podjetju ne uporablja več.

c. **Upravljanje revizij podatka**. S tem, ko sistem omogoča vodenje več revizij posameznega podatka se doseže potrebna dinamika dela v podjetju. V nekem trenutku je aktualna in skozi življenjski cikel potrjena določena revizija kosovnice ali posameznega sestavnega dela izdelka in ta revizija je primerna za proizvodnjo, nabavo, marketing itd. V zgodnejših fazah razvoja izdelka pa nastajajo že nove revizije izdelka, ki ne vplivajo na prej omenjene oddelke, saj še nimajo ustrezne

potrditve. V trenutku, ko je nova revizija izdelka potrjena, vsi deležniki vidijo aktualne podatke in s tem lahko svoje delo opravljajo z veliko večjo zanesljivostjo. Poleg tega imajo na razpolago tudi orodja, kot so 3D vizualizacija, primerjava med starim in novim, ker hitro vidijo v katerem delu se je izdelek spremenil in kaj je enako kot prej.

d. **Upravljanje dokumentov** (Document Management). PLM sistem ni samo vodenje 3D CAD podatkov o izdelku ampak poleg tega lahko spremlja tudi življenjski cikel vse spremne dokumentacije, ki nastaja v celotnem procesu razvoja izdelka (vhodne zahteve, spremna tehnična dokumentacija, delovna navodila, navodila za uporabo, certifikati, itd.).

življenjskega cikla in revizij podatkov. Upravljanje sprememb je večplasten proces, kjer bolj izkušeni zaposleni znajo oceniti razsežnosti spremembe. V procesu sprememb gre lahko za manjše popravke na izdelku, ki nimajo širšega vpliva. Če je sprememba malo večja, lahko vpliva na tehnologijo izdelka ali na orodje, ki je potrebno za izdelavo določenega kosa. Lahko pa sprememba vpliva širše in je v to vpleteno celotno podjetje, ker je potrebna investicija, da se sprememba lahko realizira. To je samo grob oris možnih sprememb, sistem za vodenje mora omogočati transparenten vpogled v celoten proces z enostavnim dostopom do potrebnih podatkov, ki imajo vpliv in z enostavnim določanjem deležnikov, ki morajo odločati o realizaciji spremembe.

e. **Upravljanje sprememb** (Change Management) je zagotovo eden najpomembnejših segmentov PLM sistema. Upravljanje sprememb je zelo tesno povezano z vsemi prej opisanimi segmenti, kot so upravljanje kosovnic,

f. **Upravljanje različnih CAD-sistemov** (Multi-CAD Management) vključuje možnost upravljanja različnih MCAD in ECAD-sistemov, saj so CAD sistemi postali vse bolj kompleksni. Različna MCAD/ECAD orodja imajo prednosti in

slabosti pri določenih operacijah, zato mora sodoben PLM sistem poskrbeti, da uporaba različnih programov na tok podatkov in proces nima vpliva. Gradnja skupne kosovnice, uporaba enakih procesov in življenjskega cikla za vse ekipe v podjetju pomeni da je manj možnosti za napake.

g. **Upravljanje projektov /programov / portfeljev** (Project/Program/Portfolio Management) združuje spremljanje razvoja izdelkov od povpraševanja do »upokojitve« prek vnaprej določenih procesov in je logična smer razvoja PLM-a. Vodenje projektov v sklopu načrtovanja izdelka daje celotnemu procesu časovno in finančno komponento, ki sta potrebni za vpogled v trenutno stanje, pri ponavljanju podobnih razvojnih aktivnosti pa možnost bolj dolgoročnega načrtovanja in boljši nadzor nad viri in stroški.

h. **Upravljanje zahtev izdelka** (Requirements Management) pomeni upravljanje vseh zahtev, ki jih prejmemo od kupca/naročitelja v celotnem življenjskem ciklu izdelka. V razvojnem ciklu se pogosto zgodi, da se zahteve po izdelku dopolnjujejo. Končni izdelek mora izpolnjevati vse dogovorjene zahteve in če so te zahteve kupca vidne vsem, ki so vpleteni v izdelavo načrtov za izdelek, je veliko bolj verjetno da bo izpolnitev vhodnih zahtev točna. Zahteve so povezane z ostalo dokumentacijo in imajo svoj življenjski cikel, saj je potrjevanje vhodnih zahtev ključno za čim bolj natančno definicijo izdelka.

i. **Upravljanje konfiguracij izdelka** (Product Configuration Management). To je logična nadgradnja razvoja vse bolj zapletenih izdelkov. Današnje izdelke lahko (skoraj vse) izdelujemo v različnih variantah in/ali konfiguracijah. V inženirskem svetu se govori o 150 odstotni kosovnici, ki vsebuje vse različice/konfiguracije izdelkov. Vnaprej določeni filtri lahko enostavno ustvarijo posamezne različice in/ali konfiguracije.

4 Uvajanje 3DEXPERIENCE v podjetju TPV AUTOMOTIVE d.o.o.

PLM platforma se v podjetju TPV AUTOMOTIVE d.o.o. uvaja v okviru projekta TPV4Light, katerega glavni namen je razvoj in uspešna demonstracija inovativnih procesov za tovarne prihodnosti, ki vključujejo napredne robotizirane tehnološke linije za oblikovanje in sestavo lahkih komponent podvozja iz visokotrdnostnega jekla za avtomobilsko industrijo. Pomemben pogoj za uspešno izvajanje razvojnih aktivnosti je zagotavljanje sledljivosti podatkov od začetnega koncipiranja proizvoda preko razvojnih aktivnosti do končnega proizvoda, zato je del projekta namenjen uvajanju rešitve, ki zagotavlja potrebne funkcionalnosti. Skozi več faz projekta smo v okviru postopkov uvajanja ugotovili, katere segmente načrtovanja izdelkov lahko poenostavimo z uporabo PLM informacijskega sistema in zapisali postopke, ki jih postopoma prenašamo v vsakdanjo prakso.

Naložbo TPV4Light sofinancirata Republika Slovenija in Evropska unija iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.

4.1 Začetno stanje

TPV AUTOMOTIVE d.o.o. kot razvojni dobavitelj za avtomobilsko industrijo se zaveda, da je za zagotavljanje sledljivosti sprememb in dinamike razvoja potrebno zagotoviti sodobnejši informacijski sitem, ki bo povezal oddelke na učinkovitejši način. Projekt TPV4Light se je izkazal kot odlična priložnost.

4.2 Pričakovanja

Glavna pričakovanja, ki jih ima podjetje TPV AUTOMOTIVE d.o.o. so, da se vsa razvojna dokumentacija shranjuje na skupnem strežniku, da so orodja za 3D načrtovanje izdelka CATIA

V5 povezana in integrirana v skupno okolje in da so podatki zaščiteni.

Funkcionalnost, ki jo mora zagotavljati sistem je, da inženirjem omogoča lažje vsakdanje delo, da preprečuje nenamerne napake pri timskem delu in da vodjem olajša odločitve pri razvojnih aktivnostih, ker se odločajo na pravih podatkih in ker lahko uporabljajo orodja vizualne primerjave in so sigurni v to da so podatki, ki jih gledajo aktualni in v zadnji verziji.

4.3 Implementacija sistema

Pri implementaciji sistema sta sodelovali ekipa inženirjev podjetja TPV AUTOMOTIVE d.o.o. in ekipa iz podjetja CADCAM Lab, ki uvaja rešitev. Ob začetku projekta smo določili implementacijsko skupino, ki je skozi vse faze izvajala ustrezne postopke, za zagotovitev rezultata. Vse aktivnosti so potekale v skladu s pričakovanjem podjetja. Implementacijska skupina je bila sestavljena iz operativnega dela, nadzornih članov in podpornega dela. Vsebinski del nastavitev sistema, določanje tipov podatkov, pisanje procesa dela testiranje delovanja je najbolj ključen del implementacijskega procesa. Pomembno je da so bili v ta del procesa vključeni najbolj izkušeni inženirji, ki imajo poleg strokovnega znanja tudi druge veščine in uživajo tudi določen ugled v podjetju, da se na koncu tudi upoštevajo njihovi predlogi in odločitve. Nadzorni del skupine je reševal dileme in odobraval dokumentacijo in potrjeval odstopanja od začetno načrtovanih aktivnosti in funkcionalnosti.

Podporni del ekipe predstavlja IT oddelek, ki je poskrbel za inštalacijo programske opreme, integracijo med sistemi, delovanje oddaljenih dostopov, delovanje ostalih spremnih komunikacijskih kanalov, kot so avtomatsko obveščanje preko e-mailov ipd.

Uvajanje sistema je potekalo v treh fazah:

- V prvem delu smo naredili raziskavo obstoječega stanja v podjetju, na kašen način potekajo razvojni postopki in analizirali metodologijo dela pri načrtovanju izdelkov. Na podlagi ugotovitev smo definirali področja, ki so že dobro urejena in področja v katerih bodo potrebne spremembe, ki bodo pripomogle k zagotovitvi celovitega obvladovanja življenjskega cikla izdelka. Pregledali smo obstoječe funkcionalnosti PLM sistema in naredili načrt uvajanja po korakih. Glede na širok nabor vseh možnih funkcionalnosti ni mogoče predvidevati uvajanja vseh modulov hkrati ali pa uvajanje nekaterih modulov ni smiselno, ker so že pokriti v drugih sistemih v podjetju.
- Na podlagi ugotovitev v prvem delu smo postavili testno okolje in vključili ključne inženirje v testno okolje, ker smo v praksi preizkusili določene nastavitve, integracije med programi in delovanje procesov. Skozi testno fazo smo ugotovili katere so ključne prednosti uporabe sistema, saj se teorija in praksa dostikrat ne pokrivata povsem, ali pa so pričakovanja lahko drugačna od dejanskega stanja. Testno okolje je namenjeno temu, da se preizkusi različne variante delovanja, da se gradi podatkovni model, ki je najbolj primeren za kasnejši prenos v produkcijski sistem v katerega se vključi celotna razvojna ekipa.
- Postavitev produkcijskega okolja predstavlja zaključni korak celotnega projekta. V končnem okolju se upošteva vse nastavitve, ki so bile zaznane skozi testno okolje. Nastavi se način številčenja izdelkov, zapiše vse dodatne atribute, ki so potrebni za spremljanje izdelka, postavi se integracija v 3D okolje CATIA V5 za doseganje avtomatizma in se nastavi predloge za hitrejše kreiranje modelov in kosovnic.

Poleg podatkovnega modela je v sistemu potrebno določiti organizacijsko strukturo inženirjev, ki morajo v digitalnem okolju imeti ustrezno določene vloge za opravljanje svojega dela. Vloge so pomembne za sodelovanje v življenjskem ciklu saj je odgovornost tistega, ki potrdi ustreznost dokumentacije zapisana digitalno in zato je potrebno predhodno določiti, kdo ima pravico potrjevanja in kdo ne.

4.4 Izobraževanje in podpora

Izobraževanje uporabe programske opreme se izvaja na testnem okolju, kjer se lahko preveri določen dogovorjene funkcionalnosti. Izobraževanje poteka na način da ponudnik sistema podjetje CADCAM Lab d.o.o. nudi vsa izobraževanja ključnim uporabnikom v TPV AUTOMOTIVE d.o.o., ključni uporabniki pa

potem izvajajo prilagojena izobraževanja znotraj podjetja. Ta cikle izobraževanj se potem ponavlja ob vsakih nadaljnjih spremembah in možnih razširitvah funkcionalnosti PLM informacijskega sistema.

Podpora je namenjena reševanju morebitnih napak, ki se v fazi implementacije niso pokazale in se v kasnejših uporabi v produkcijskem okolju zaznajo.

5 ZAKLJUČEK

Uvajanje PLM sistema v podjetje ni enostavno saj se mnogokrat zgodi, da ni zaupanja v delovanje sistema ali pa določeni zaposleni niso pripravljeni spreminjati načina svojega dela, ker se ne zavedajo širšega vpliva sprememb, ki se uvajajo. Prav zato je v začetku potrebno vložiti veliko truda v interni marketing. Končni cilj je dosežen takrat ko je nov način dela sprejet interno od vseh zaposlenih kot nov način dela in takrat se lahko pričakuje pozitivne učinke, ki jih ima sodoben PLM informacijski sitem za podjetje.

SOTER: SLOVENSKI VIRTUALNI ASISTENT ZA VARNO DELOVANJE PODJETJA

Simon KRAJNIK, Denis FAJERTAG
PRECIZ d.o.o.

IZVLEČEK

Ustvarjanje in vzdrževanje varnega delovnega okolja je prednostna naloga vsakega podjetja. Kako se spopadajo s tem podjetja? Katera orodja uporabljajo za doseganje željenih varnostnih standardov in kako istočasno poskrbijo za zakonsko skladnost njihovih praks? Podjetja morajo vse leto aktivno spodbujati močno kulturo varnosti, kar zajema tako zaposlene kot tudi opremo oziroma naprave. Ni dovolj le, da je identiteta del DNK ali vizije podjetja, s čimer se številni radi pohvalijo, ampak je za zagotavljanje varnosti in sledenje zakonodaji potrebno sprejemati konkretne ukrepe in poskrbeti za komunikacijo v podjetju.

1 UVOD

Slovensko družinsko podjetje Preciz s 30-letno tradicijo se je varnosti lotilo digitalno oziroma so to nalogo prepustili njihovemu spletnemu virtualnemu asistentu. Soter, kot so ga poimenovali pri podjetju, je domislica njihovih inovatorjev, torej gre za popolnoma slovenski produkt, s katerim so želeli poenostaviti in pohitriti celoten proces digitalizacije delovanja podjetja, od varnosti do preglednosti dokumentacije.

Virtualni asistent je že navdušil slovenska in tuja podjetja. Na 53. sejmu MOS v Celju je prejel bronasto sejemsko priznanje, kar priča o njegovi inovativnosti in uporabnosti.

2 SOTER MISLI NAMESTO VAS

Sprememba je bila do pred kratkim edina konstanta na svetu. Za podjetja pa obstaja še ena, in sicer dokumentacija. Število naprav se povečuje, njihova digitalizacija pa poteka prepočasi. Vsako podjetje ima svoj način spremljanja dokumentov. Kljub tehnološkemu napredku se mnoga podjetja še vedno zanašajo na zastarele metode, kot je fizična shramba ali shramba na računalnikih in strežnikih podjetja, kar omejuje dostopnost in preglednost podatkov.

Virtualni asistent Soter zagotavlja enoten spletni sistem, ki omogoča evidenco vseh naprav, inventarja in osebja na enem mestu, vodenje in organiziranje dogodkov in možnost vpogleda v naprave, vključno z vsemi podatki (dokumenti, postopki, certifikati, status vzdrževanja …). Preprosto povedano, gre za oblačni sistem z virtualnim asistentom, ki skrbi za varno delovanje podjetja.

3 KAJ OMOGOČA SOTER?

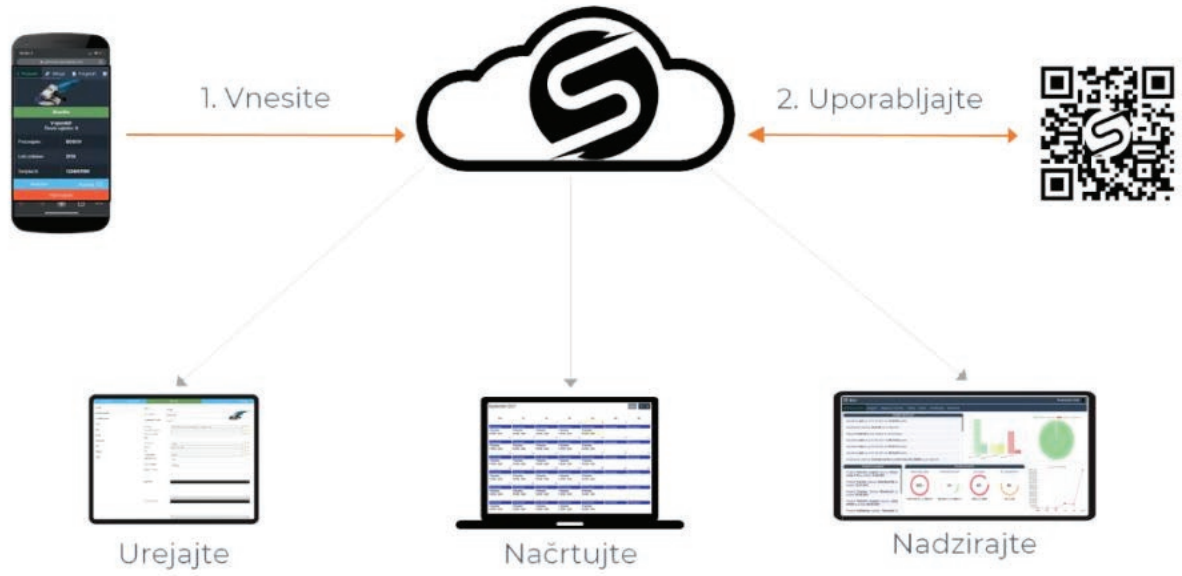
Takoj ko v delovanje svojega podjetja vključite napravo ali osebje, morate poskrbeti za varno uporabo, ki mora biti obenem hkrati skladno z vedno spreminjajočo zakonodajo. Ni podjetja, ki za delovanje ne potrebuje naprav ali osebja, zato je potencial virtualnega asistenta Sotra neskončen. Zasnovan je za sleherno podjetje, saj ga lahko prilagodite po svoji meri.

Njegova glavna funkcija je, kot že rečeno, ustvarjanje inventarja podjetja, zagotavljanje varnosti in organizacija dogodkov. Kako mu to uspeva? Inovativen uporabniški vmesnik za delovanje potrebuje le napravo s spletno povezavo in brskalnikom. Uporabniški vmesnik Sotra je razdeljen na različna orodja, ki opravljajo določeno funkcijo. Na nadzorni plošči vas čaka pregled najnujnejših opravil (pretečeni pregledi, napake ali okvare …) in najpomembnejših podatkov (graf števila napak, prikaz aktivnosti in zastojev …).

V rubriki osebje lahko dodajate zaposlene in urejate njihove podatke, na primer preglede, usposabljanja, dovoljenja in podobno. Soter pa poskrbi za dejansko izvedbo načrtovanih aktivnosti, na katere vas tudi pravočasno opozori. Medtem ko se vi posvečate poslu, Soter skrbi, da vaše podjetje posluje v skladu z vašimi in državnimi smernicami.

4 MODULARNOST IN VEČSTORILNOST VIRTUALNEGA ASISTENTA JE NESKONČNA

Ko želite dodati novo napravo, jo slikate in Soter samodejno ustvari QR kodo, preko katere imajo zaposleni dostop do vseh podatkov. Pred začetkom uporabe ali vzdrževanja se lahko uporabniki najprej posvetujejo s Sotrom.



Ta jim prikaže obvezno varnostno opremo, opravljene in načrtovane preglede, opozorila in morebitne napake, popise in ostale dokumente, potrebne za zagotovitev varne uporabe.

Soter ima integriran TPM sistem za prijavo in odpravo napak. S QR kodo uporabnik prijavi morebitno napako na napravi, Soter pa samodejno obvesti ustrezno podporno službo, bodisi notranjega ali zunanjega izvajalca. To je najhitrejši način za odpravljanje napak, ki zagotavlja najkrajši čas izpada dela. Istočasno obvesti vse uporabnike, da je naprava v vzdrževanju. V ozadju pa beleži vso statistiko – odzivni čas vzdrževalca, trajanje in pogostost napak, analizo napak in stroške vzdrževanja – s katero se lahko lotite sistematske prenove poslovanja in tako povečate produktivnost in zanesljivost vašega podjetja.

UPORABA KOLABORATIVNEGA ROBOTA IN STROJNEGA VIDA OMRON V APLIKACIJAH FINALIZIRANJA IN PAKIRANJA IZDELKOV

mag. Andrej ROTOVNIK, Rok TOSTOVRŠNIK, Matjaž KOVAČIČ
MIEL, d.o.o.

IZVLEČEK

Prispevek obravnava rešitev, ki smo jo razvili v podjetju MIEL in omogoča preprosto avtomatizacijo delovnih procesov, ki jih običajno opravlja človek – operater, ki na svojem delovnem mestu izvaja določena opravila, kot so ročne manipulacije, vizualna oz. očna kontrolo izdelka ter vnašanje izvedenih opravil v nadzorni sistem.

Rešitev je zasnovana na Omron kolaborativnih robotih različnih nosilnosti in dometov, sistemih strojnega vida različnih zmogljivostih glede na proizvodne potrebe in zahteve vizualne kontrole ter lastnim uporabniškim vmesnikom, ki omogoča intuitivno upravljanje s sistemom, arhiviranje in izdelavo statističnih podatkov ter pripravo le-teh za povezljivost z višjimi informacijskimi nivoji.

Rešitev je uporabna v različnih delovnih procesih v proizvodnji, je fleksibilna, prilagodljiva in povezljiva preko različnih komunikacijskih standardov in protokolov z ostalimi napravami v proizvodnji.

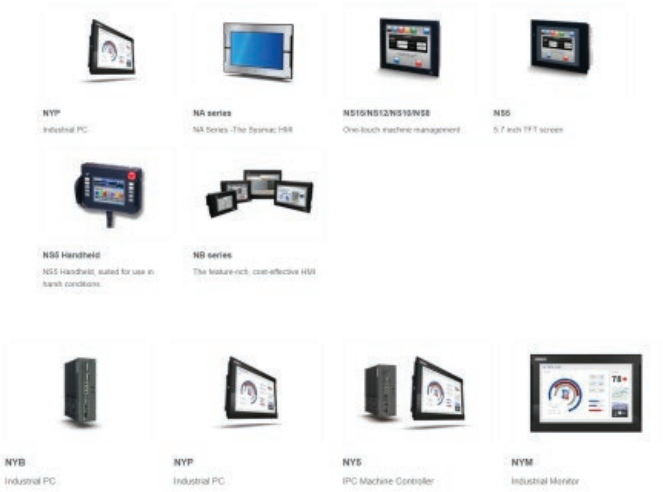
V prispevku obravnavamo aplikacije finaliziranja proizvodnega procesa s končno kontrolo strojnega vida ter prepoznavanje različno orientiranih kosov na proizvodni liniji z zlaganjem v palete.

MIEL
OMRON
Nabor sodelujočih robotov Omron
TM 5 – 700
• Reach (mm): 700
• Maximum payload (kg): 6
• Maximum speed (m/s): 1.1
TM 5 – 900
• Reach (mm): 900
• Maximum payload (kg): 4
• Maximum speed (m/s): 1.4
TM 12
• Reach (mm): 1300
• Maximum payload (kg): 12
• Maximum speed (m/s): 1.3
TM 14
• Reach (mm): 1100
• Maximum payload (kg): 14
• Maximum speed (m/s): 1.1
MIEL, d.o.o. Industrijski forum IRT 2022
A. Rotovnik

MIEL
OMRON
Sistemi strojnega vida Omron
FHV7
High-speed, high-accuracy inspection and measurement
FH/FZ Cameras
FH vision camera portfolio – the right camera to meet every application
FH/FZ5 Vision Controller
Faster machine operation, cameras for every application
FQ2
The new standard in image inspection and code verification
FQ-M
Vision sensors for pick and place applications
F320-F
MicroHAWK F320-F Smart Camera
F330-F
MicroHAWK F330-F Smart Camera
F420-F
MicroHAWK F420-F Smart Camera
F430-F
MicroHAWK F430-F Smart Camera
HAWK MV4000
HAWK MV-4000 Smart Camera
MIEL, d.o.o. Industrijski forum IRT 2022
A. Rotovnik

MIEL OMRON

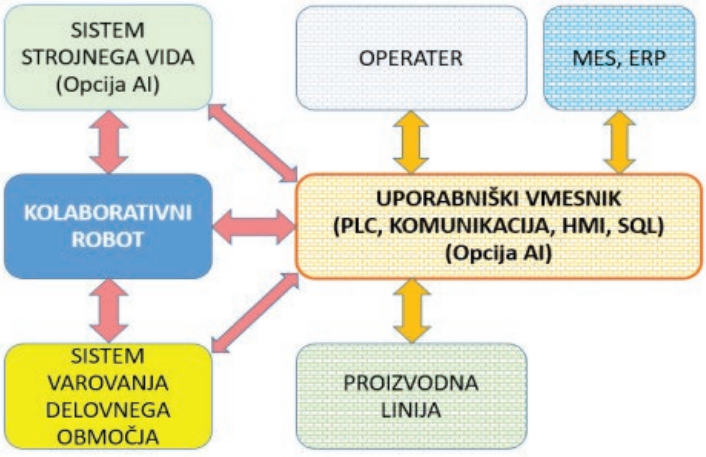
Nadzorni (HMI, IPC) sistemi Omron



MIEL, d.o.o. Industrijski forum IRT 2022 A. Rotovnik

MIEL OMRON

Blokovna shema sistema za učinkovito kolaborativno manilupacijo v proizvodnji



MIEL, d.o.o. Industrijski forum IRT 2022 A. Rotovnik

MIEL OMRON

Kolaborativni robot, strojni vid, sistem varovanja ter nadzorni sistem, kot celovita rešitev v industrijskih aplikacijah

Kolaborativni robot serije TM 12 z integriranim strojnim vidom, opcija dodatni strojni vid serije FH (AI)	Krmilna avtomatika za integracijo v proizvodni proces zasnovana na kompaktnem krmilniku serije NX1P	Varnostni sistem zasnovan na varnostnem laserskem senzorju serije OS23C in pripadajočimi varnostnimi moduli	Nadzorni sistem zasnovan na NYP industrijskem računalniku, na katerem teče sinhronizirana .NET aplikacija, opcijsko CX-Supervisor

MIEL, d.o.o. Industrijski forum IRT 2022 A. Rotovnik

MIEL OMRON

Vprašanja?

Za višjo produktivnost. Industrijska avtomatizacija, robotizacija, digitalizacija.

andrej.rotovnik@miel.si

MIEL, d.o.o. Industrijski forum IRT 2022 A. Rotovnik

ABB FLEXLOADERTM ROBOTSKE CELICE

Peter KEREC, Tomaž LASIČ, Robert LOGAR
ABB d.o.o.

IZVLEČEK

ABB je predstavil novo serijo standardiziranih robotskih celic za strego strojem, ki smo jih poimenovali ABB FlexloaderTM.

Na voljo so številne možne konfiguracije in postavitve, ki jih bomo v prispevku natančneje predstavili.

FlexLoader™ M

Paleta izdelkov

ABB

Zakaj FlexLoader M?

Prednosti za uporabnika

- Dobra prilagodljivost zahvaljujoč standardizaciji
- Tehnologija za prihodnost
- Kakovostno zgrajeno na preverjeni tehnologiji
- Enostavno za premikanje, namestitev in prilagajanje novim zahtevam proizvodnje
- Dolga življenska doba

FlexLoader™ M

Ključni podatki

Fleksibilno & Modularno

Združite rešitev za svoje potrebe. Spremenite modul kasneje, ko se spremenijo vaše potrebe.

Enostavno za uporabo

Izjemno enostavna programska oprema za učenje novih obdelovancev in ravnanja s celico.

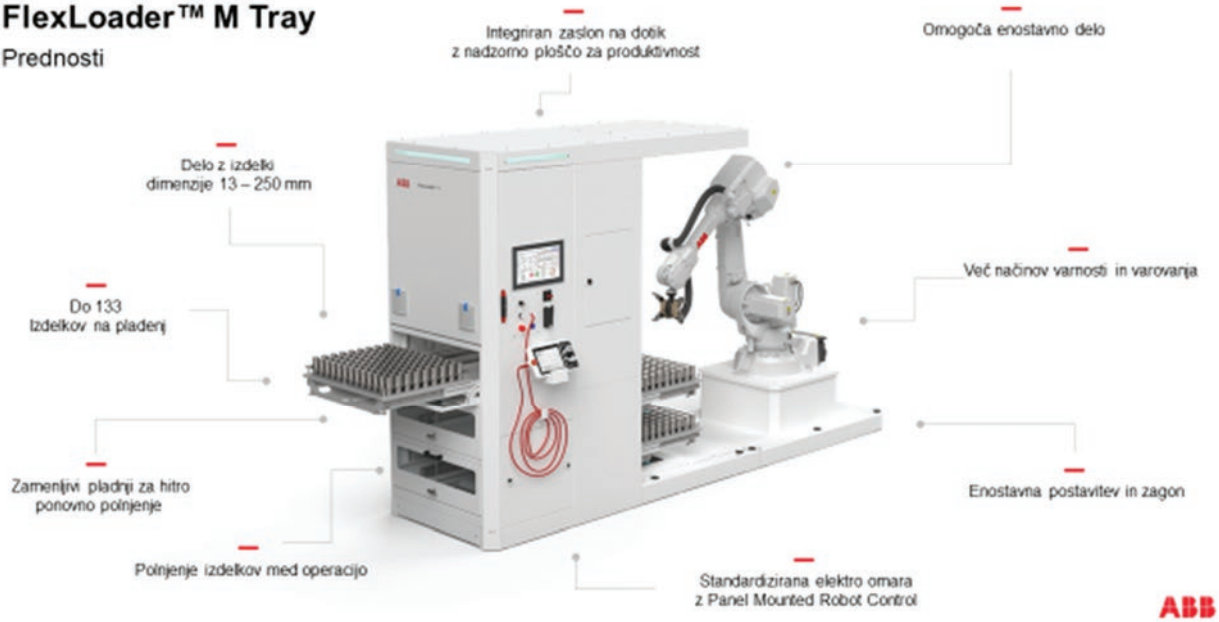
Digitalizacija & Povezljivost

Upravljanje strojnega parka, upravljanje naročil v oblaku, OEE-moduli.

ABB

FlexLoader™ M Tray

Prednosti



ABB

Različne postavitve

©ABB
May 16, 2022 | Slide 6

ABB

FlexLoader™ M Conveyor

Open front | One door | Twin door | Customized layout with accessories

ABB

PREDSTAVITEV NAJNOVEJŠIH FANUC ROBOTOV CRX-20IA IN M-1000IA

Franc ŽABERL
FANUC Adria d.o.o.

IZVLEČEK

FANUC-ova nova linija kobotov CRX je varna, enostavna za uporabo, zanesljiva in vsestranska rešitev za široko paleto aplikacij, vključno s pregledovanjem, nalaganjem/razkladanjem strojev, pakiranjem, paletizacijo, brušenjem, varjenjem in še več. Uvedba novih kobotov CRX-5iA, CRX-20iA/L in CRX-25iA, ki zagotavljajo nosilnost 5 kg, 20 kg in 25 kg ter največji doseg 994 mm, 1418 mm oziroma 1889 mm, sledi modeloma CRX-10iA in CRX-10iA/L. Pet modelov CRX v kombinaciji s FANUC-ovo serijo zelenih kobotov CR razširja sposobnost FANUC-a, da pomaga več podjetjem, ki želijo avtomatizirati proizvodnjo s koboti.

FANUC je pred kratkim predstavil tudi novega velikega robota za upravljanje, M-1000iA, z nosilnostjo zapestja 1000 kg in največjim dosegom 3253 mm. Posebej je treba omeniti, da je M-1000iA največji robot, ki ima mehanizem serijske povezave in ne mehanizem vzporedne povezave, ki je značilen za težke robote.

FANUC povsod okoli nas
LETALSTVO
GRADNJA
STEKLO
ENERGIJA
KOVINE
MODELI & KALUPI
HRANA
AVTOMOBILIZEM
PLOČEVINA
ZDRAVSTVO & FARMACIJA
TEKSTIL
KMETIJSTVO
ELEKTRONIKA
URE
LES
PLASTIKA
PIJAČA
PAPIR

Sami uporabljamo avtomatizacijo
Na tisoče robotov, ki delajo dan in noč v najbolj avtomatiziranem proizvodnem obratu v industriji.

FANUC Izdelki
FANUC AI
FANUC IoT
CNC KRMILNIKI
SERVO MOTORJI
SERVO OJAČEVALNIKI
LASERJI
INDUSTRIJSKI ROBOTI
KOBOTI
DODATKI
PROGRAMSKA OPREMA
ŽIČNA EROZIJA - EDM
STROJI ZA BRIZGANJE PLASTIKE
VERTIKALNI OBDELOVALNI CENTRI
FIELD SISTEM

FANUC Osnovna Tehnologija
in globalna namestitvena baza
one FANUC
FANUC IoT
FIELD sistem
24 mio servomotorjev
21,000 laser sistemov
5 mio CNC-jev
810,000 robotov
FANUC
Vodilni dobavitelj obdelovalnih centrov, električnih strojev za brizganje plastike, žičnih erozij – EDM strojev
FANUC AI
Status 10/2021

Lokalni kontakt, ki vedno govori vaš jezik
Naša obsežna mreža Poslovalnic v Evropi zagotavlja prodajno, tehnično, logistično in servisno podporo po vsej celini. Naša odprta in strastna ekipa razume vaše potrebe – vas vodi skozi vaše prve korake v avtomatizaciji in nudi podporo skozi celotno življenjsko dobo vašega stroja.
99.96%
Razpoložljivost rezervnih delov
24/7
Rezervni deli – dobava zagotovljena
FANUC ACADEMY
Service First

Zanesljivo.Predvidljivo.
Enostavno za popravilo.
KONTAKT:
FANUC Adria d.o.o.
Ipavčeva 21, 3000 Celje
info@fanuc.si I www.fanuc.si

MOBILNA KOLABORATIVNA ROBOTSKA CELICA

Rok DOLINAR, Matej KUZMAN
BTS Company d.o.o.

IZVLEČEK

Proizvodna podjetja zaradi znižanja stroškov in povečanja fleksibilnosti in učinkovitosti v proces proizvodnje vse pogosteje vpeljujejo sodelujoče oz. kolaborativne robote. S tem pridobijo vse prednosti, ki jih prinaša avtomatizacija strege in logistike. BTS Company je v ta namen razvil mobilni celici MC100 in MC200.

1. UVOD

Mobilna celica s kolaborativnim robotom povečuje učinkovitost in fleksibilnost v proizvodnji ter omogoča, da robotizirana strega avtonomno izvaja proizvodnjo manjših serij. Kompaktna in mobilna zasnova robotskih celic ponuja veliko prilagodljivost v proizvodnji in lahek dostop do strojev. V ta namen smo razvili lastni mobilni celici za vpetje kolaborativnega robota v dveh dimenzijskih izpeljankah MC100 in MC200, ki sta namenjeni za manipulacijo z vozički in AMR roboti MIR. Obstaja tudi izvedba ekonomične fiksne platforme. Slika 1 prikazuje vzorčno postavitev mobilne kolaborativne celice za strego CNC stružnice.

Slika 1: Prikaz vzorčne postavitve mobilne kolaborativne celice za strego CNC stružnice.

2. POSTAJA

Kolaborativna mobilna celica je razvita v dveh velikostih. Manjša kompaktna verzija MC100 ter nekoliko širša verzija MC200. Slika 2 prikazuje dimenzije obeh izvedb Mobilne celice.

Velikost postaje:	X	Y	Z
MC 100	715 cm	1335 cm	915 cm
MC 200	935 cm	1335 cm	915 cm

Slika 2: Dimenzije postaje mobilne celice brez kobota.

Na obe celici je možna montaža vseh velikosti HANWHA kobotov: HCR3A, HCR5A in HCR12A. Obe celice lahko opremimo s fiksnim zalogovnikom ali pa zalogovnikom na vozičku. Postaja MC200 je prilagojena, da lahko manipulacijo vozičkov avtomatiziramo z AMR avtonomni industrijskimi roboti oz. vozički MiR100. Slika 3 nam prikazuje kombinacijo vozička MC200 z AMR robotom MiR100.

Slika 3: Prikaz kombinacije vozička MC200 z AMR robotom MiR100.

2.1 SIDRANJE POSTAJE

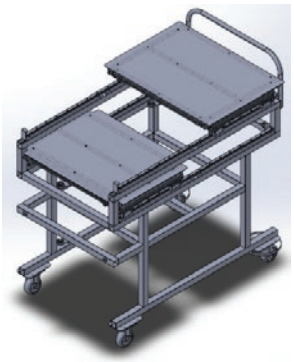
Mobilna celica je zasnovana tako, da jo lahko z ročnim viličarjem prestavimo na željeno mesto. Ko se mobilno celico postavi na mesto se v tla namesti centrirne puše, katere služijo kot »nulti sistem« pozicijoniranja. Ta sistem nam omogoča, da ob prestavljanju celice med delovnimi mesti ne izgubimo pozicije. To omogoča, da med ponovitvenimi aplikacijami lahko celico zaženemo prej kot v eni uri.

3. VOZIČKI

Vozičke lahko opcijsko nadgradimo s številnimi komponentami in tako prilagodimo zahtevam delovne naloge. Modularna zasnova omogoči hitro prilagoditev na novo aplikacijo npr, strego novega tipa obdelovancev. S tem skrajšamo zastojni čas zaradi nastavitev. Slika 4 nam prikazuje primer nadgradnje vozička z zalogovnimi površinami.

Slika 4: Prikaz nadgradnje zalogovnih površin na vozičku.

Možna je tudi opcija vozičkov s predali. Predali nam zagotovijo več zalogovnih površin in s tem podaljšajo čas avtonomnega delovanja celice.



Slika 5: Voziček z predali.

4. KOLABORATIVNI ROBOT

Obe velikosti Mobilne celice MC100 ter MC200 sta prilagojeni za montažo HANWHA kolaborativnih robotov.

HANWHA ima razvite tri velikosti kobotov, katerih značilnosti vidimo na sliki 6.

Oznaka kobota	Nosilnost	Doseg
HCR3A	3 kg	630 mm
HCR5A	5 kg	915 mm
HCR12A	12 kg	1300mm

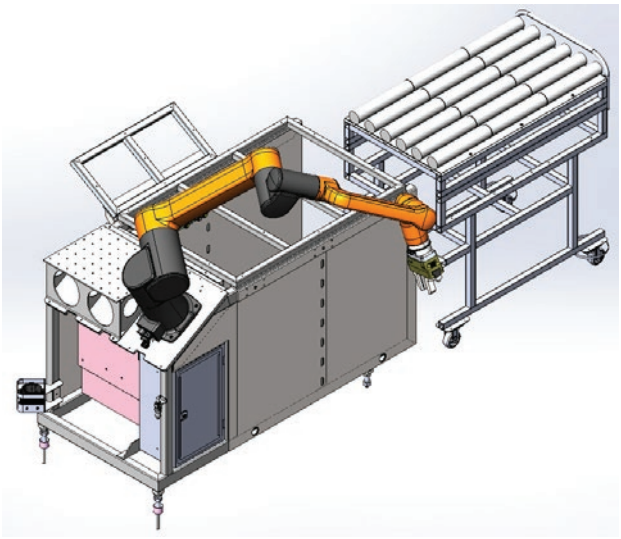
Slika 6: Karakteristike kobotov HANWHA

4.1 PRIJEMALA

Na vse vrste kobotov je možna montaža vseh vrst prijemal. Od električnih, pnevmatskih do vakumskih. Na Mobilno celico je možna montaža potrebne opreme za prijemala, kot na primer elektro omara, pripravne skupine za zrak, ventilov itd..

5. DODATNE ZALOGOVNE POVRŠINE

Na Mobilno celico je možna montaža različnih dodatnih zalogovnih površin. Namesti se jih lahko okrog celice, odvisno od delovne naloge. Prav tako se lahko namesto vozička v celico namesti tekoči trak, na katerega kobot odlaga obdelovance.



Slika 7: Prikaz različnih odlagalnih površin.

6. DODATNA OPREMA MOBILNE CELICE

Kot dodatno opremo Mobilne celice ponujamo tudi lovilne posode za emulzijo, banje za splakovanje ali razmaščevanje obdelovancev in izpihovalne postaje za obdelovance.

Vse te elemente se izdela po naročilu in so dimenzijsko prilagojeni delovnemu mestu. Slika 8 nam prikazuje primer banje z izpihovalno postajo.

Slika 8: Primer banje za splakovanje v kombinaciji z izpihovalno komoro.

7. DODATNA ZAŠČITA

Kolaborativni roboti zaradi svoje tehnologije delovanja načeloma ne potrebujejo nobene dodatne zaščite. Zaradi različnih okoliščin aplikacij pa je včasih potrebno implementirati v proces določene zaščitne elemente kot so:

- Laserski skenerji (Slika 10)
- Avtomatska vrata CNC stroja
- Zaščitne ograje (Slika 9)
- Talni varnostni element (Slika 11)

Slika 9: Zaščitna ograja

Zaščitne ograje se lahko montiramo na mobilno celico ali pa se jo namesti kot samostojni element okrog celice.

Slika 10: Laserski scenerji

Laserski skenerji delujejo kot samostojno varovalo ali pa delujejo v kombinaciji s zaščitnimi ograjami.

Slika 11: Talni varnostni element

Ker je Mobilna celica običajno postavljena blizu raznih transportih poti, je smiselno celico zaščititi pred raznimi trki viličarjev in podobnimi transportnimi enotami. Celico lahko zaščitimo z raznimi talni varnostni elementi, kot so stebrički, kotni elementi, ograje, ipd.

8. SPECIFIKACIJE

1. IP rang zaščita kobota
   - HCR 3A: IP 64
   - HCR 5A: IP 54
   - HCR 12D: IP 54
2. Priklop kobota:
   - 100-240 VAC, 50-60 Hz
   - 1 kW
3. Komunikacija s strojem:
   - Fanuc Focas
   - Modbus TCP
   - Fizični I/O, na voljo 16 DI In 16 DO
4. Kontrolna enota
   - Teach panel z Rodi X programskim vmesnikom

9. SKLEP

Avtomatizacija procesov je v proizvodnih podjetjih vedno bolj iskana. S tem enostavna in ponavljajoča dela prenesemo na robota in delavcu omogočimo sprostitev delovnega časa, ki ga lahko uporabi za dela z večjo dodano vrednostjo. S tem se razbremeni pritisk na vir delovne sile, ki je v zadnjih časih zaradi pomanjkanja kadrov zelo prisoten. Se pa pri avtomatizaciji procesov hitro srečamo s togostjo avtomatiziranih sistemov. Običajno je avtomatiziran sistem, ki je enkrat nameščen težko premikati in spreminjati ali je to povezano s prevelikimi stroški. Zato smo v BTS Company razvili mobilno kolaborativno celico, s katero smo povečali fleksibilnost in avtomatizaciji dodali mobilnost kot dodatno vrednost. Z novimi rešitvami želimo strankam omogočiti povečanje konkurenčne prednosti na trgu, ki jo avtomatizacija nesporno prinaša.

VPELJAVA STROJNEGA UČENJA V PROCES CNC SITOTISKA

Žiga KLJUN[1], David STARINA[1], dr. Ana VARLEC[2]
[1]Kyndryl Ljubljana, storitve informacijske tehnologije, d.o.o.
[2]Steklarna Hrastnik d.o.o.

IZVLEČEK

Zagotavljanje kontrole kakovosti v podjetju je ključnega pomena tako za zniževanje stroškov podjetja, kot za zagotavljanje zadovoljstva strank. Tradicionalno je kontrola kakovosti ročen postopek, ki zahteva za ljudi naporno, a monotono delo, ki pogosto pripelje tudi do človeških napak v procesu. S pomočjo sodobnih tehnologij računalniškega vida, kot so zaznavanje objektov s pomočjo konvolucijskih nevronskih mrež ter metode prenesenega učenja, je mogoče velik del kontrole kakovosti v podjetju avtomatizirati, kar lahko tako razbremeni človeške vire v podjetju, kot tudi pripomore k večji natančnosti in posledično višji kakovosti izdelkov. V članku opišemo praktični primer avtomatizacije procesa kalibracije obstoječih naprav za računalniški vid in pokažemo, kako je mogoče s sodobnimi tehnologijami reševati probleme, ki so bili še pred nekaj leti nerešljivi.

1 UVOD

Zagotavljanje kakovosti ali QA (ang. quality assurance) v kontekstu proizvodnje se nanaša na postopke, ki jih proizvajalci uporabljajo kot del sistema vodenja kakovosti za vzdrževanje dosledne, pričakovane ravni kakovosti izdelkov, ki jih ti proizvajajo. Zagotavljanje kakovosti se pogosto uporablja v kombinaciji s kontrolo kakovosti ali QC (and. quality control), ki strankam zagotavlja, da ta prejme kakovostne izdelke brez nepričakovanih napak. Že od samih začetkov proizvodnih procesov tako zagotavljanje kakovosti kot kontrola kakovosti igrata pomembno vlogo v proizvodni industriji, za nekatere proizvajalce pa procesa predstavljata ključno dejavnost, saj neupoštevanje določenih standardov lahko privede celo do poškodbe ali smrti. Najpogostejši razlogi za zagotavljanje kakovosti in kontrolo kakovosti pa so sicer prihranki pri stroških, povečanje učinkovitosti ter povečanje zadovoljstva strank.

Na današnjem, zelo konkurenčnem trgu, je za uspeh potrebna skoraj popolna kakovost, saj je intenzivna konkurenčnost podjetij pripeljala organizacije do nižjih stopenj dobička kot nekoč – posledično bi že garancijska popravila lahko naredila razliko med dobičkom in izgubo. Poleg tega se v današnjem času, zaradi razširjenosti interneta (predvsem) slabe izkušnje z izdelki širijo zelo hitro, kar pomeni, da potencialna napaka na izdelku za podjetje pomeni izgubo dobrega slovesa.

Nadzor nad kontrolo pa ni trivialen proces – tradicionalno ta zahteva veliko ročnega dela, kar ne predstavlja težave samo z vidika visokega stroška delovne sile, pač pa tudi večjo nagnjenost k človeškim napakam. V tej situaciji podjetjem lahko v veliki meri pomaga tudi digitalizacija in umetna inteligenca. V zadnjih letih je bil narejen impresiven napredek, ki ga poganjajo eksponentno povečevanje računalniške moči, nove tehnike obdelav podatkov, algoritmi strojnega učenja in optimizacije obdelav velikih količin podatkov.

V tem prispevku se bomo osredotočili na implementacijo in uporabo strojnega vida, ki lahko ključno pripomore k avtomatizaciji procesa nadzora kakovosti. Gre za podzvrst strojnega učenja, ki z uporabo globokih nevronskih mrež v trenutku prepozna objekte – proces, ki je bil predhodno pogosto rezerviran za učeno oko. Rešitve strojnega vida je mogoče učinkovito aplicirati tudi na druge segmente proizvodnje. Del tega prispevka bo tudi predstavitev implementacije strojnega vida na realnem primeru, kjer bodo poleg tehnik uporabe zajeti tudi izzivi, s katerimi smo se tekom projekta srečevali.

2 TEHNOLOGIJA

2.1 Računalniški vid

Računalniški vid je področje umetne inteligence, ki omogoča računalnikom in sistemov, da iz digitalnih slik, videoposnetkov in drugih vizualnih vhodov pridobijo pomembne informacije, s katerimi obogatijo obstoječe podatke ali pa celo dajejo priporočila. Če umetna inteligenca omogoča računalnikom razmišljanje, jim računalniški vid omogoča, da vidijo. Računalniški vid deluje podobno kot človeški, s to razliko, da imajo ljudje prednost vseživljenskega učenja. Računalniški vid ima na voljo manj časa, pri tem pa uporablja digitalne podatke iz kamer in algoritme, namesto mrežnice, optičnih živcev in vidne skorje. Kljub temu lahko računalniški vid v določenih pogledih prekaša človeka, saj je zmožen obdelati na tisoče izdelkov na minuto, pri čemer opazi tudi človeku nevidne napake.

Računalniški vid se lahko uporablja v številnih panogah, od energetike in javnih služb, do proizvodnje in avtomobilske industrije – do konca 2022 se pričakuje, da bo trg dosegel vrednost 49 milijard dolarjev.

Predpogoj za razvoj računalniškega vida je velik nabor relevantnih podatkov. Stroj nad temi podatki izvaja analize, dokler ne zazna razlik in na koncu prepozna konteksta slike. Če na primer želimo doseči model računalniškega vida, ki bo prepoznal vsebino, natisnjeno na steklenico, moramo računalniku podati veliko število slik steklenic z natisnjeno vsebino. Pri tem se uporabljata dve ključni tehnologiji – globoko učenje ter konvolucijske nevronske mreže.

Globoko učenje, ki je sicer vrsta strojnega učenja, uporablja algoritme, ki računalniku omogočajo, da se ob pregledu ogromnih količin podatkov nauči prepoznavati razlike med različnimi slikami – brez da bi to človeški programer ročno sprogramiral. Konvolucijske nevronske mreže na drugi strani pomagajo modelu globokega učenja slike razčleniti na slikovne točke. Na podlagi oznak na teh slikah model izvaja konvolucije (matematična operacija med dvema funkcijama – Slika 1), na podlagi katerih se odloči, kaj na sliki »vidi«. Nevronska mreža izvaja konvolucije in preverja natančnost toliko časa, dokler se njene napovedi ne začnejo uresničevati.

$$f(x) * g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(x-t)\,dt$$

Slika 1: Konvolucija

Podobno kot človek, konvolucijske nevronske mreže najprej zaznajo trde robove ter preproste oblike, kasneje pa izpolnijo bolj podrobne informacije.

Kot smo že zapisali na začetku, je za dober model računalniškega vida in uspešno konvolucijsko nevronsko mrežo ključnega pomena, da imamo na voljo zelo veliko količino vhodnih slik, na katerih se računalnik lahko uči. V resničnem življenju pa se pogosto zgodi, da podjetja nimajo zbranih dovolj relevantnih podatkov, da bi iz njih naredila natančno nevronsko mrežo. V tem primeru se lahko uporabi dve tehniki – umetno obogatitev podatkov ter preneseno učenje.

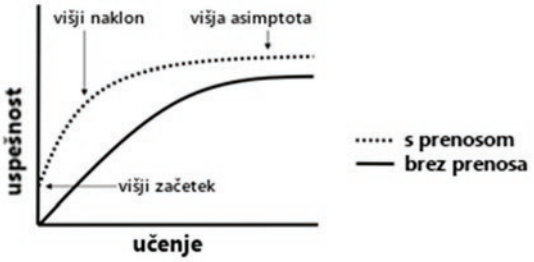
2.2 Umetna obogatitev podatkov

Umetna obogatitev podatkov predstavlja niz tehnik za umetno povečanje količine podatkov z ustvarjanjem novih podatkovnih točk iz obstoječih podatkov. Proces zajema majhne spremembe podatkov ali pa uporabo modelov globokega učenja za ustvarjanje novih podatkovnih točk. Namen umetne obogatitve podatkov je primarno zagotoviti večji in bolj raznolik nabor učnih podatkov, ki računalniku omogočajo, da se bolj natančno nauči reševati določen problem. Pri učenju mu namreč ponudi primere, s katerimi bi se lahko srečal v realnem življenju, v učnem naboru podatkov pa ta kljub temu ne obstaja. Umetna obogatitev najpogosteje zajema preprostejše spremembe vizualnih podatkov, kot so: oblazinjanje (ang. padding), naključno vrtenje, skaliranje, navpično in vodoravno obračanje, translacije (slika se premika v x oz. y smeri), obrezovanje, povečevanje, posvetlitev in zatemnitev, sivina, spreminjanje kontrasta, dodajanje šuma, naključno brisanje ipd.

Umetna obogatitev podatkov je lahko zelo koristna tehnika pri izboljševanju modelov strojnega učenja, saj računalniku zagotavlja dostop do bolj raznolikega nabora učnih podatkov. Vseeno pa se je pri umetni obogatitvi podatkov potrebno zavedati njenih omejitev – iz omejenega nabora podatkov je možno narediti samo omejeno število umetnih podatkov, ki bodo še pomagali izboljšati model. Čeprav ti podatki načeloma izboljšajo natančnost modela, pa so kljub temu osnovani na že prej znanih podatkih in pomagajo pri prepoznavanju podobnih situacij, ne morejo pa naučiti računalnika na situacije, ki so drugačne od našega nabora učnih podatkov. Neprevidna ali nepremišljena izbira metode obogatitve podatkov lahko privede tudi do napačne interpretacije rezultatov in s tem celo poslabšanja modela strojnega učenja.

2.3 Preneseno učenje

Preneseno učenje je metoda strojnega učenja, pri katerem se model, ki je bil razvit za eno nalogo, ponovno uporabi kot izhodiščna točka za model za drugo nalogo. Gre za pogost pristop pri globokem učenju, kjer se predhodno naučeni modeli uporabljajo kot izhodišče za naloge računalniškega vida in obdelave naravnega jezika, saj te po navadi zahtevajo ogromne količine podatkov za učenje, veliko časa, računalniških zmogljivosti ter znanja, da bi se zgradila rešitev od začetka. Z namenom izogiba dodatnim stroškom, pohitritve razvoja in izboljšanja natančnosti se zato uporablja recikliranje obstoječega modela strojnega učenja. Preneseno učenje ni omejeno samo na globoko učenje, vseeno pa je najpogosteje uporabljeno na tem področju. Predpogoj, da preneseno učenje dobro deluje pri globokem učenju je sicer ta, da je bil začetni model, ki ga uporabljamo za našo drugo nalogo, predhodno naučen na sorodnem, a bolj splošnem problemu. V kolikor za izhodiščni model vzamemo model z zelo specifičnim znanjem, bodo praviloma rezultati novega modela relativno slabi. Vrsta prenesenega učenja pri globokem učenju se imenuje induktivni prenos (ang. inductive transfer). Zanj je značilno, da je nabor možnih modelov omejen na področje inicialnega modela.



Slika 2: Primerjava globokega učenja s prenosom ter brez prenosa

Pri prenesenem učenju poznamo dva pristopa – pristop z razvojem modela ter pristop s predhodno naučenim modelom. Prvi pristop je sestavljen iz štirih glavnih korakov – izbor začetne naloge, razvoj začetnega modela za začetno nalogo, recikliranje oz. ponovna uporaba začetnega modela in optimizacija oz. prilagoditev modela. V realnem svetu in uporabi prenesenega učenja v kombinaciji z globokim učenjem je drugi način bolj pogost, saj zahteva manj podatkov in časa za razvoj. Sestavljajo ga trije koraki – izbor obstoječega začetnega modela (obstajajo številni močni odprtokodni modeli), uporaba tega modela ter optimizacija in prilagoditev le-tega.

3 PRIMER UPORABE V RESNIČNEM ŽIVLJENJU

V tem delu prispevka, bomo predstavili implementacijo računalniškega vida in prenesenega učenja v podjetju Steklarna Hrastnik. Projekt smo izvedli v podjetju Kyndryl Ljubljana. Cilj našega projekta je bil dopolnitev oz. izboljšanje njihovega obstoječega sistema za prepoznavanje napak pri tiskanju na steklo z uporabo strojnega učenja. Našo rešitev je na slikah optičnih zajemov steklenic prepoznala različna območja tiskanja ter pomembnost vsakega od njih.

3.1 Ozadje

Steklarna Hrastnik je z namenom širitve proizvodnih zmogljivosti ter širitve portfelja svojih storitev izvedla nakup naprave Kammann za nanos barvnega dekorja na steklene izdelke s pomočjo sitotiska. Kammann naprava vsebuje tudi napredni sistem za samodejno izvajanje kontrole kakovosti Spectro proizvajalca DecoSystem. Sistem izvede optični zajem steklenice, preveri območja tiskanja ter s svojimi algoritmi preveri pravilnost tiska vsakega od območij tiskanja.

Naloga uporabnika je, da pred vsako serijo steklenic pregleda inicialno steklenico ter v programu izvede ročno kalibracijo sistema – nastavi vsa območja tiskanja (npr. območje teksta, območje slike/logotipa) ter za vsako območje nastavi nivo natančnosti zaznavanja napak. V primeru tiska velikih serij je ročno nastavljanje možnih napak sicer zamudno, a sprejemljivo opravilo. Ker se Steklarna Hrastnik osredotoča na majhne serije izdelkov visokega cenovnega razreda, pa je lahko takšna natančna ročna kalibracija časovno potratna oz. jo je potrebno izvajati zelo pogosto, zaradi česar so se pri podjetju odločili za avtomatizacijo procesa kalibracije sistema.

Da bi pomagali Steklarni Hrastnik optimizirati proces in prihraniti tako čas pri kalibraciji naprave kot tudi povečati natančnost kalibracije, smo s pomočjo specifičnega domenskega znanja njihovih strokovnjakov na področju dekorja razvili model strojnega učenja, ki bo avtomatsko prepoznal območja tiska ter apliciral ustrezen nivo pomembnosti. Model mora biti preko programskega vmesnika povezan z obstoječim strankinim strojem. Na ta način lahko Steklarna doseže popolno avtomatizacijo procesa nadzora kontrole, rezultat česar je avtomatska prepoznava napak, zmanjšanje človeškega dela, pohitritev procesa ter zmanjšanje ogljičnega odtisa zaradi manjšega izmeta.

3.2 Obseg projekta

Projekt smo razdelili na štiri glavne dele – analiza obstoječega procesa, uvoz in obdelava podatkov, razvoj modela računalniškega vida na podlagi strojnega učenja ter razvoj vmesnika uporabniškega programa (ang. API – application programming interface), ki skrbi za komunikacijo med modelom in zunanjimi orodji.

V fazi analize obstoječega procesa smo ocenjevali in preučevali trenutno (oziroma preteklo) situacijo in procese, ki se uporabljajo pri kontroli kakovosti v Steklarni Hrastnik. Gre za fazo, ki igra ključno vlogo pri uspešnosti projekta, saj razumevanje poslovnega problema kritično vpliva na pravilnost nadaljnjih odločitev. Da bi situacijo čim bolje razumeli, smo organizirali več delavnic – tako s stranko in njenimi delavci, kot zunanjim ponudnikom stroja, ki ga stranka uporablja. S strankinimi delavci naredili temeljit popis celotnega procesa tiska na steklene izdelke in procesa nadzora kakovosti v tovarnah in na ta način spoznali njihove izkušnje, izzive ter pričakovanja od naše rešitve.

Po fazi analize je sledila faza zbiranja, uvoza in obdelave podatkov. Šlo je za fazo, kjer smo imeli največ izzivov. Prvotno smo bili s stranko dogovorjeni, da nam ta posreduje njihove pretekle optične zajeme steklenic, na podlagi katerih bomo kasneje lahko naučili model strojnega vida. Tekom projekta se je izkazalo, da zbrana količina vhodnih podatkov v obliki optičnih zajemov steklenic ne bo zadostovala, da bi samo na njihovi podlagi zgradili uspešno nevronsko mrežo. Dobili smo približno 50 slik unikatnih izdelkov oz. približno 100 optičnih zajemov izdelkov, pri katerih so se nekateri izdelki podvajali. Odločili smo se, da bomo uporabili kombinacijo pristopa umetne obogatitve podatkov s pristopom prenesenega učenja. Za umetno obogatitev podatkov smo uporabili tehnike, kot so rotacije, spreminjanje nasičenosti barv in spreminjanje velikosti, s katerimi smo umetno povečali nabor podatkov. Po umetni obogatitvi podatkov smo imeli na voljo še vedno majhen, a širši nabor učnih podatkov, s katerimi je bilo možno zgraditi relativno dober model ob uporabi prenesenega učenja. S pomočjo umetne obogatitve smo pridobili približno 200 dodatnih slik. Umetno narejenih 200 slik sicer nima enakega vpliva kot inicialnih 100, vendar vseeno pripomorejo k boljšemu učenju modela. Kasneje se je izkazalo, da je že sam proces rotacij močno vplival na uspešnost modela. Celoten proces je potekal zelo iterativno in smo v resnici med nekaterimi dejanji obdelave podatkov že nadaljevali z naslednjo fazo modeliranja in se na podlagi rezultatov v tisti fazi vračali nazaj. V procesu obdelave podatkov smo analizirali in vključili v model tudi načrte dekorjev. Ti sicer niso enako relevantni kot optični zajemi, saj načrti ne zajemajo odsevov na steklu in zamegljenih robov. Vseeno smo z njimi uspeli modelu posredovati učne podatke o tem, kako prepoznavati različne tipe objektov tiskanja – npr. kako ločiti logotip od ostalih tipov grafik.

Tretja faza je bila namenjena razvoju modela računalniškega vida. Kot smo zapisali že v prejšnji fazi, je bil postopek zelo iterativen, zato smo se iz faze modeliranja pogosto vračali v fazo zbiranja in obdelave podatkov in nato nazaj. Ker nismo imeli na voljo zadostne količine podatkov, da bi samo iz naših podatkov zgradili celotno nevronsko mrežo, smo se odločili za uporabo prenesenega učenja. Pri razvoju modela smo uporabili tri različne pristope oziroma orodja – cilj je bil primerjati vse tri med seboj in izbrati najboljšega. Pri prvem pristopu smo uporabili Microsoftovo oblačno storitev Custom Vision. Gre za storitev, ki omogoča relativno hiter razvoj inicialnega modela z uporabo prenesenega učenja in nam na ta način omogoča hitro oceno pričakovane končne uspešnosti. Slabost te rešitve je sicer, da je relativno nefleksibilna, v kolikor ne želimo gostiti modela v Microsoftovemu oblaku. Želja naše stranke je bila lokalna rešitev. Podobna rešitev Microsoftovemu Custom Vision-u je bila Roboflow – uporabili smo jo pri našem drugem pristopu. Gre za rešitev, ki ima integrirano storitev za umetno obogatitev podatkov, vseeno pa je samo gostovanje nefleksibilno. Kot tretji pristop smo razvili svojo lastno rešitev s pomočjo odprtokodnih knjižnic za strojno učenje v programskem jeziku Python. Ker smo bili sami lastniki kode, smo imeli nad rešitvijo modela računalniškega vida največ nadzora in je bila rešitev s tem tudi najbolj fleksibilna. Ko smo pri vsakem od pristopov naredili več iteracij (število učnih korakov, obogatitve podatkov, različne uteži modela) smo modele ocenili na podlagi F1 rezultata.

F1 rezultat se izračuna na podlagi dveh parametrov – natančnost in priklic. Natančnost predstavlja razmerje med pravilnimi napovedmi in vsemi napovedmi, preklic pa razmerje med pravimi napovedmi in vsemi napovedmi.

$$Natančnost = \frac{pravi\ pozitivni\ primeri}{pravi\ pozitivni\ primeri + napačni\ pozitivni\ primeri}$$

Slika 3: Natančnost modela

$$Priklic = \frac{pravi\ pozitivni\ primeri}{pravi\ pozitivni\ primeri + napačni\ negativni\ primeri}$$

Slika 4: Priklic modela

F1 rezultat dobimo, če podvojimo zmnožek natančnosti ter priklica ter ga delimo s vsoto istih dveh spremenljivk.

$$F_1 = \frac{2}{priklic^{-1} + natančnost^{-1}} = 2 \cdot \frac{natančnost \cdot priklic}{natančnost + priklic} = \frac{rpp}{rpp + \frac{1}{2}(npp + nnp)}$$

Slika 5: Rezultat F1

Po izračunu F1 rezultata smo ugotovili, da naš model, razvit v Pythonu, daje najboljše rezultate (F1 rezultat 0.89[1]). Poleg sicer objektivnega rezultata F1 nismo zanemarili niti empirične primerjave rezultatov na testni množici, ki dajejo izkušenemu opazovalcu dobro subjektivno oceno uspešnosti modela. Ker je poleg dobrih rezultatov Pythonov model tudi najbolj fleksibilen in imamo nad njim največ nadzora, smo se odločili, da ga bomo uporabili v produkcijskem okolju.

V zadnji fazi smo razvili tudi programski vmesnik API. Podobno kot v prejšnjih dveh fazah, je bil tudi v tej proces zelo iterativen, kar pomeni, da smo se v fazi razvoja vmesnika pogosto vračali v prejšnje faze. Vmesnik smo tako kot model, razvili v programskem jeziku Python. Vmesnik deluje tako, da kot parameter dobi sliko optičnega zajema steklenega izdelka oziroma pot do le-te, ta pa jo nato posreduje modelu in nam vrne rezultat v JSON obliki – gre za odprt standardni format datotek za izmenjavo podatkov, ki uporablja človeku berljivo besedilo za shranjevanje in prenos podatkovnih objektov. Strukturo JSON rezultata smo oblikovali po zahtevah ponudnika stroja za avtomatsko odkrivanje napak, ki ga uporablja stranka – našo rešitev so nato vključili v svoj sistem.

3.3 Končna rešitev

Končna rešitev je bila po željah stranke postavljena na lokaciji – brez povezave do

[1] Zaradi različnih možnosti interpretacije zaznanih območij napak, ki jih tudi človeški označevalec težko nedvoumno označi, bi empirični rezultat ob ustrezni korekciji lahko bil celo boljši o izračunanega

zunanjega interneta. Model se nahaja na virtualnem strežniku, ki je povezan v isto računalniško omrežje kot stroj za avtomatsko zaznavanje napak. Uporaba modela je vključena v proces definicije napak pri sitotisku na seriji steklenih izdelkov – ko stranka v programski opremi stroja za detekcijo napak definira novo serijo steklenega izdelka z novim dekorjem, ji v koraku, kjer bi predhodno morala ročno označiti območja tiskanja, ta pokliče programski vmesnik, ki komunicira z modelom strojnega učenja in programski opremi stroja pošlje podatke o območjih tiskanja in njihovi pomembnosti. Ta jih nato avtomatsko izriše na sliki optičnega zajema. V tem trenutku lahko uporabnik, v kolikor so predlagana območja ustrezna, nastavitve potrdi, v nasprotnem primeru pa lahko oznake poljubno popravi.

3.4 Financiranje projekta

Operacijo DEKORA, v okviru katere je bil izveden projekt »Vpeljava strojnega učenja v proces CNC sitotiska« sofinancirata Republika Slovenija in Evropska unija iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.

4 SKLEP

V zadnjih nekaj letih je tehnologija strojnega vida nepredstavljivo napredovala. S pomočjo sodobnih modelov konvolucijskih nevronskih mrež in pristopa prenesenega učenja smo se lotili problema, ki bi bil še pred nekaj leti nerešljiv. Z zelo majhnim številom vhodnih podatkov za učenje (slike 50 unikatnih izdelkov) nam je uspelo uspešno naučiti model za strojno učenje, ki na optičnih zajemih steklenih izdelkov uspešno prepoznava različna območja in tipe grafik. Ob tem ima zaznavanje grafike na steklu specifičen izziv – presevanje slike z zadnje strani steklenega izdelka. S pomočjo sodobnih metod zaznavanja objektov smo uspešno rešiti tudi ta problem in naučili model, ki uspešno razločuje med grafiko na sprednji strani zajetega steklenega izdelka in grafiko, ki preseva iz zadnje strani izdelka.

Uporabljene metode strojnega učenja imajo široko uporabnost na najrazličnejših področjih strojnega vida v različnih industrijah. Največja ovira pri uspešnem sprejemanju in uporabi tehnologije je nepoznavanje uporabljenih tehnologij, ki je posledica svetlobne hitrosti inovacij na tem področji, ki ji osebe, ki se ne ukvarjajo s tem specifičnim področjem, težko sledijo. Rešitev je v angažmaju specializiranih strokovnjakov s področja umetne inteligence in strojnega učenja, ki lahko v sodelovanju s strokovnjaki z domenskim znanjem iz specifičnega področja zelo hitro razvijajo rešitve, ki si jih še pred nekaj leti ni bilo mogoče zamisliti.

5 VIRI

1. Bengio, Y. (2012). Deep Learning of Representations for Unsupervised and Transfer Learning. Proceedings of ICML Workshop on Unsupervised and Transfer Learning v Proceedings of Machine Learning Research, 27:17-36

2. David, A., V. & Xiao-Li, M. (2001). The Art of Data Augmentation, Journal of Computational and Graphical Statistics, 10:1, 1-50

3. David, F., Jean P. (2011). Computer Vision: A Modern Approach. (Second edition). Prentice Hall

4. Jiuxiang, G., Zhenhua, W., Jason, K., Lianyang, M., Amir, S., Bing S., Ting L., Xingxing, W., Gang, W., Jianfei, C., Tsuhan C. (2018). Recent advances in convolutional neural networks, Pattern Recognition, 77:354-377

5. Lipton, Z.C., Elkan, C., Naryanaswamy, B. (2014). Optimal Thresholding of Classifiers to Maximize F1 Measure. Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. ECML PKDD 2014. Lecture Notes in Computer Science, 8725

6. Woodhouse, D. (1999). Quality and quality assurance. Quality and internationalisation in higher education.

ROBOTSKA CELICA ZA ADAPTIVNO BRUŠENJE IZDELKOV IZ KRISTALA

Hubert KOSLER[1], Aljoša ZUPANC[1], Peter ARKO[2], Matej MERKAČ[1]
[1]Yaskawa Slovenija d. o. o.
[2]Yaskawa Ristro d. o. o.

IZVLEČEK

Brušenje izdelkov iz kristala z uporabo industrijskih robotov Motoman nadomešča ročno delo in zastarele CNC obdelovalne stroje. Izdelki istega tipa se v obliki med seboj razlikujejo. Za uspešno brušenje vzorcev se vsak posamezen izdelek obravnava kot unikat. CAD/CAM izdelane robotske trajektorije se avtomatsko prilagodijo glede na odstopanja oblike vsakega posameznega izdelka.

Obvladovanje in nadzor vseh procesnih parametrov zagotavlja kvalitetno in ponovljivo obliko brušenja. Robotizacija proizvodnje omogoča izdelavo velike količine izdelkov z enako kvaliteto, kot izdelavo manjšega števila personaliziranih unikatnih vzorcev.

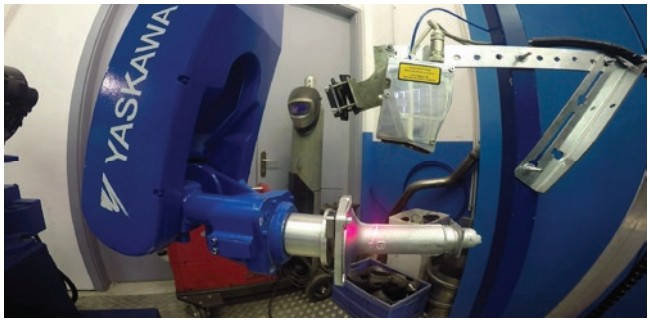
1 UVOD

Robotizacija industrijskih procesov je pojem, ki ga po navadi povezujemo z uporabo robotov za nadomestitvijo ročnega dela. Robotizirani so ergonomsko zahtevni procesi, zdravju škodljiva delovna mesta, precizno in ponavljajoče delo in nenazadnje nekreativna fizično zahtevna delovna mesta. Industrijski roboti so zasnovani kot manipulatorji za izvajanje ponovljivih in natančnih trajektorij in tako idealni za uporabo v ponovljivih procesih s konstantnimi delovnimi pogoji.

Adaptivna obdelava izdelkov pomeni avtomatska prilagoditev na neponovljivo obliko izdelka ali spreminjanje oblike izdelka med procesom obdelave. Za vsak posamezen obdelovanec se izvede avtomatska korakcija in prilagoditev izdelanih robotskih trajektorij glede na pozicijo izdelka v robotskem prijemalu in glede na odstopanje oblike izdelka v primerjavi na idealen 3D model oziroma vzorec.

2 TEHNIČNO TEHNOLOŠKE ZAHTEVE

Tehnologija obdelave izdelkov pogojuje izbiro optimalnega robota glede na nosilnost, na doseg, na robustnost in ponovljivo natančnost. Zasnova robotske celice je prilagojena tehnologiji obdelave (rezkanje, vrtanje, brušenje,…) in izdelku (teža, dimenzija, material,….). Oboje ključno vpliva na odločitev, ali bo robot med obdelavo prenašal obdelovalno orodje ali izdelek.



Slika 1: Primer uporabe Motosense Vision sistema za nadzor nad brušenjem

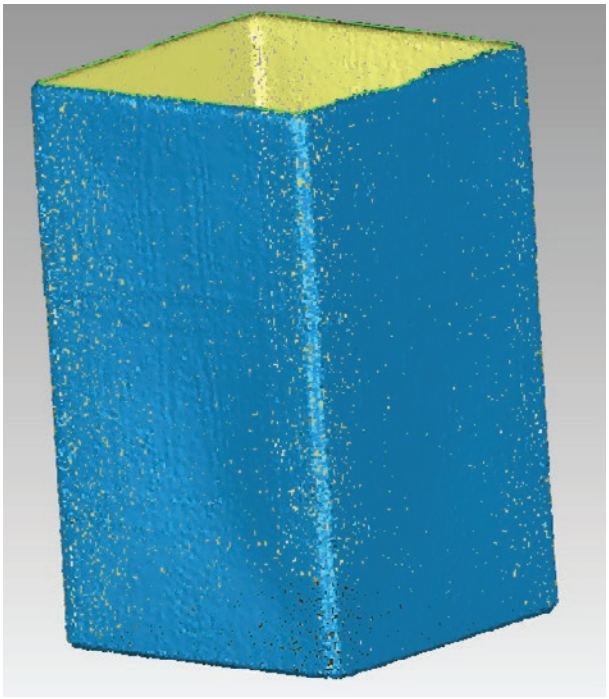
Robotsko programiranje se izvede v Offline programu Motosim VRC (ali drugi CAD/CAM programski opremi), kjer se na osnovi 3D modela izdelajo robotski programi. Prilagoditev le-teh za vsak posamezen izdelek razdelimo v skupine:

- Izdelek je dimenzijsko ustrezen, njegova pozicija v prostoru ni ponovljiva. Z uporabo Search funkcije in senzorja na robotu, ali zunanjega Vision sistem se določi natančna pozicija izdelka.
- Izdelek je dimenzijsko ustrezen; robot ni dovolj precizen za tip obdelave (tipičen primer je brušenje izdelkov iz kompozitnih

materialov). Robotizacija obdelave takšnih izdelkov vključuje uporabo aktivnega kontaktnega element, ki zagotavlja konstanto silo na stiku z obdelovalnim orodjem.

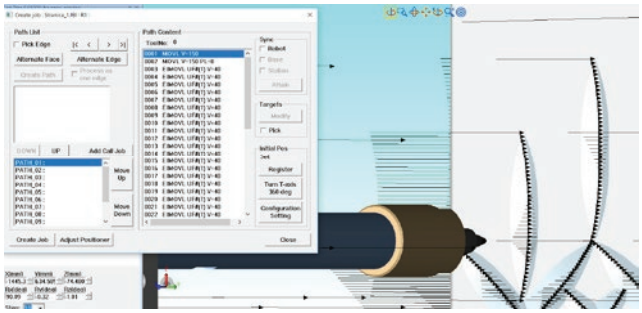
- Izdelek nima ponovljive oblike; robot je dovolj natančen za precizno obdelavo. Programiranje poteka v naslednjem zaporedju:

  1. Meritev izdelka (rezultat oblak točk)
  2. Skaliranje in globalna registracija prostorskih točk na referenčni 3D model
  3. Analiza odstopanja in izdelava matrike za poravnavo robotskih točk
  4. Prilagoditev robotskih točk v smeri normale površine izdelka (nelinearno lepljenje točk na dejansko površino izdelka)



Slika 2: Meritev izdelka – oblak točk

Vhodna tehnološka zahteva, da so izdelki neponovljive oblike, vpliva na ključne elemente robotske celice in upoštevana so največja možna odstopanja izdelka od podanega 3D modela. Na končni izgled in zasnovo robotske celice vplivajo tudi ostale tehnološke zahteve in želje kupca: taktni časi obdelave, menjava in vzdrževanje obdelovalnega orodja, ambientalni pogoji, način posluževanja (ročno, avtomatsko, avtonomno delovanje robotske celice,…).



Slika 2: Izdelava robotskih celic CAD / CAM

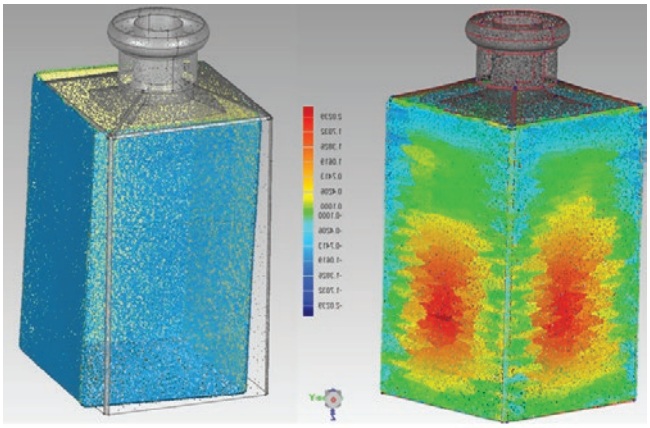
3 PROGRAMIRANJE

Off-line izdelave robotskih programov se pripravi glede na 3D model. Sledi avtomatska korekcija in prilagoditev izdelanih robotskih trajektorij glede na pozicijo izdelka v robotskem prijemalu in glede na deformacijo izdelka v primerjavi na idealen 3D model.

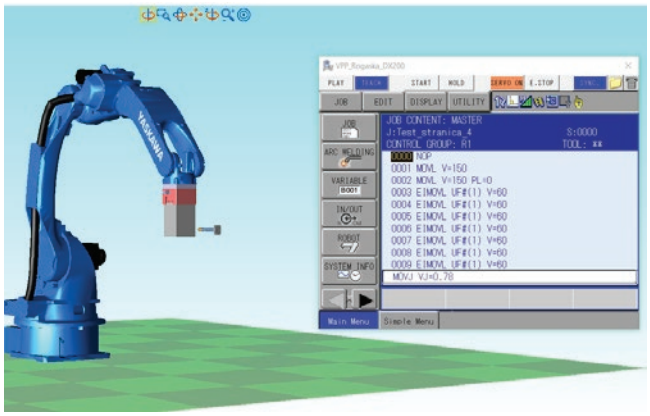
Uporaba programske opreme Motosense za zajem podatkov in korekcijo robotskih programov temelji na naslednjih korakih:

- Uvoz referenčnega 3D modela izdelka za potrebe primerjave z izmerjenim kosom.

- Nastavitev parametrov za fino poravnavo pozicije robotskih trajektorij: korekcija pozicije izdelka in korekcija glede na deformacijo oblike.



Slika 3: Motosense in primerjava izdelka glede na 3D model



Slika 4: Motosim VRC – Program za Offline programiranje robotov Motoman

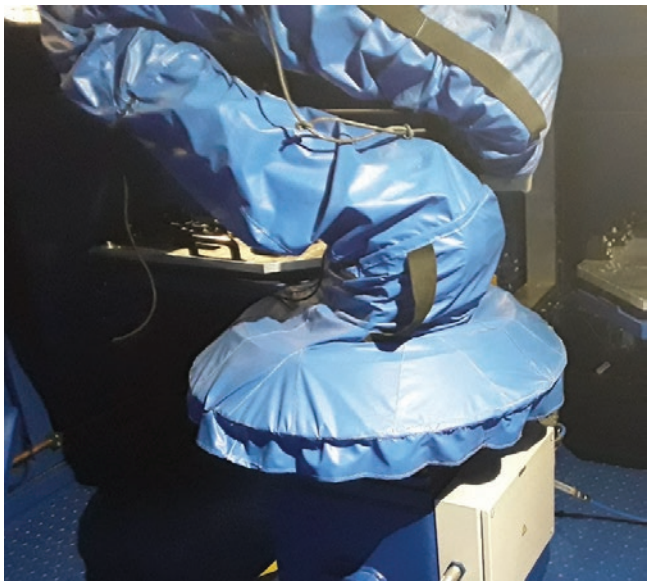
4 ROBOTIZACIJA BRUŠENJA

Primer uporabe adaptivnih robotskih programov v industriji je robotska celica za brušenje kristala. Izdelki so neponovljive oblike izdelkov in odstopajo od 3D modela tudi do več milimetrov. Oblika obedlovalnih brusnih diskov se zaradi obrabe spremeni v premeru in širini. Vsak posamezen izdelek je potrebno obravnavati kot unikat in nadzirati potek brušenja.

Slika 5: Robotsko brušenje z brusnimi diski

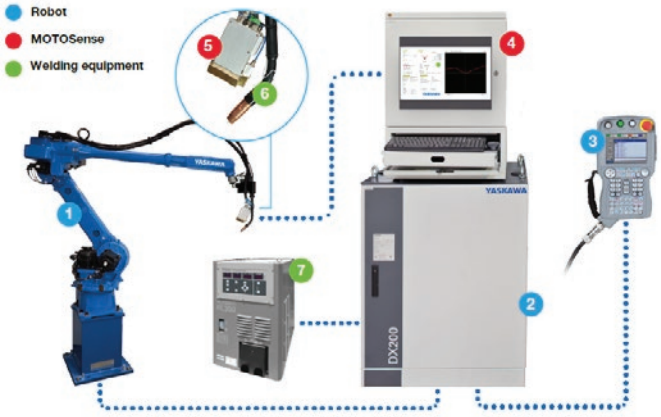
Robotska celica je zasnovana z dvemi industrijskimi 6-osnimi roboti Motoman tip GP25. Prvi robot je opremljen z vamuum prijemalom za manipulacijo z izdelki in brušenje. Prijemalo je zasnovano za ročno menjavo oblike vpenjalnega naslona za izdelek. Drugi robot GP25 je opremljen z optičnim senzorjem za kontrolo obrabljenosti brusnih diskov: debelina ter oblika brusnega diska. Robot je opremljen še s pnevmatskim dvoprstnim prijemalom, s katerim vpenja kamen za oživljanje brusnih diskov.

Robotska celica je zasnovana za delo v mokrem okolju. Robota sta dodatno zaščitena s pralnim jacketom, ki ščiti pred nalaganjem in lepljenjem obrušenega materiala na robota. Kameri sta zaščiteni v ohišju z avtomatskim odpiranjem ob zajemu slike.



Slika 6: Zaščitni jacket za robota GP25

Vision sistema Motosense je montiran na lasten nosilec, zajem slike pa se izvede z več prehodi, ki jih opravlja robot s premikanjem pod kamero. Motosense je osnovan na zajemu oblike izdelkov s projiciranjem laser črte. Izdelke iz kristala je potrebno ustrezno matirati (obarvati), da se preprečijo odboji in lom projicirane laser črte. Vsak izdelek se predhodno obarva, snov pa se med procesom mokrega brušenja iz izdelka spere.



Slika 7: Senzor Motosense

4.1 Prilagoditev na posamezen izdelek

Vision sistem Motosense se uporablja za naslednje operacije:

- Meritev izdelka (oblak točk)
- Skaliranje in globalna registracija točk na referenčni 3D model
- Transformacija in prilagoditev robotskih trajektorij v smeri normale površine izdelka in nelinearno lepljenje točk na dejansko površino izdelka (kompenzacija odstopanja oblike izdelka od idealnega 3D modela)

Slika 8: Predali vhod/izhod za izdelke

Posluževanju robotske celice sta prigrajena dva ročna predala s pozicionirno paleto dimenzije 800x800mm, preko katerih poteka podajanje in odvzem kosov na robotski celici Prisotnost izdelkov v gnezdih palete ni senzorirana. Višina izdelkov na paleti je omejena in kontrolirana z ročno nastavljivo ročko in merilno letvojo. Kontrola višine preprečuje človeške napake: odlaganje napačnega in višjega izdelka na paleto bi povzročilo nalet robota ob odvzemu iz palete. Nižje izdelke kot izdelki, ki so trenutno v obdelavi, pa robot ne bo odvzel.

4.2 Posluževanje z robotsko celico

Med prehodom obdelave enega tipa na drugi tip, opravi operater robotske celice naslednje operacija:

- Menjava program na posluževalnem panelu robotske celice (parametri za Motosense merilni sistem se pokličejo iz robota samodejno)
- Ročno zamenja pozicionirne palete na predalih
- Menjava robotskega prijemala

Slika 9: Motosense zajem slike

V avtomatskem režimu (stacionarno stanje) operater:

- Odvzema pobrušene kose iz predala in odlaga nepobrušene izdelke na predal,
- Po potrebi zamenja kamne za oživljanje
- Po potrebi doda tekočino (tekoča kreda) za označevanje izdelkov
- Kontrola izdelkov in možnost ročne korekcije parametra globine reza

Proces dela z robotsko celico je zasnovan tako, da je enostavno in da operater ki dela z robotsko celico, ne potrebuje popravljati ali spreminjati robotskega programa, ko je bil le-ta že enkrat izdelan in optimiran na robotski celici.

5 SKLEP

Moderne proizvodnje stremijo k malim serijam, personaliziranim izdelkom in hitrim prilagoditvam proizvodnih procesov. Zahteve po čim krajših taktnih časih izdelave pa v proizvodnjo vpeljuje vedno več avtomatiziranih in robotiziranih procesov. Izdelki so lahko neponovljivi oziroma odstopajo od zasnovanih 3D modelov. Vse naštete zahteve pa za robotizacijo predstavlja izziv in nove pristope in način programiranja robotov.

Viri:

[1] http://yaskawa.eu.com/

IZAZOVI I RJEŠAVANJE PROBLEMA U PROIZVODNJI ALATA POMOĆU AUTOMATIZIRANOG 3D OPTIČKOG MJERNOG SUSTAVA

Luka LUKAČIĆ, Josip KOS, Nenad DRVAR, Tomislav HERCIGONJA
TOPOMATIKA d. o. o.

SAŽETAK

Za proizvođače i dobavljače u svim industrijama ključni zahtjev je skratiti vrijeme od razvoja do prodaje proizvoda. Jedan od načina za postizanje skraćenja vremena proizvodnog ciklusa je sveobuhvatno 3D mjerenje predmeta za poboljšanje kontrole kvalitete u proizvodnji. U tu svrhu sve više tvrtki koristi automatizirane mjerne ćelije za brza mjerenja alata i komponenata u svim fazama proizvodnog procesa. Jako je važno da osim što skraćuju vrijeme mjerenja, efektivno umanjuju i ljudske greške.

Rad donosi pregled mogućnosti i benefita automatiziranih mjernih ćelija ATOS ScanBox i GOM Inspect programskog paketa za uspješne industrijske primjene iz područja alatničarstva.

1 UVOD

ATOS ScanBox je "plug-and-play" mjerna ćelija za potpuno automatiziranu 3D digitalizaciju i kontrolu kvalitete. ATOS ScanBox povezuje optimizirane industrijske komponente, mobilnost i maksimalnu sigurnost u 3D standardizirani mjerni uređaj.

Visina ulaganja usporediva je s tradicionalnim trokoordinatnim mjernim uređajima. Međutim, ATOS ScanBox omogućuje potpuno mjerenje površina objekata svih dimenzija, lako razumljivu vizualizaciju rezultata, jednostavno pronalaženje problema i potpuno izvještavanje.

Slika 1: ATOS ScanBox u proizvodnji [1]

2 ATOS ScanBox

Brza, automatizirana mjerenja s najvećom preciznošću: ATOS ScanBox je kompletno rješenje za učinkovitu kontrolu kvalitete proizvoda i proizvodnih procesa.

Dostupan u 11 različitih varijanti za različite primjene i veličine dijelova - od malih polimernih proizvoda do kompletnih karoserija automobila.

Standardizirane mjerne ćelije nude sveobuhvatno rješenje za:

- programiranje
- automatizirana digitalizacija
- inspekcija
- izvještavanje

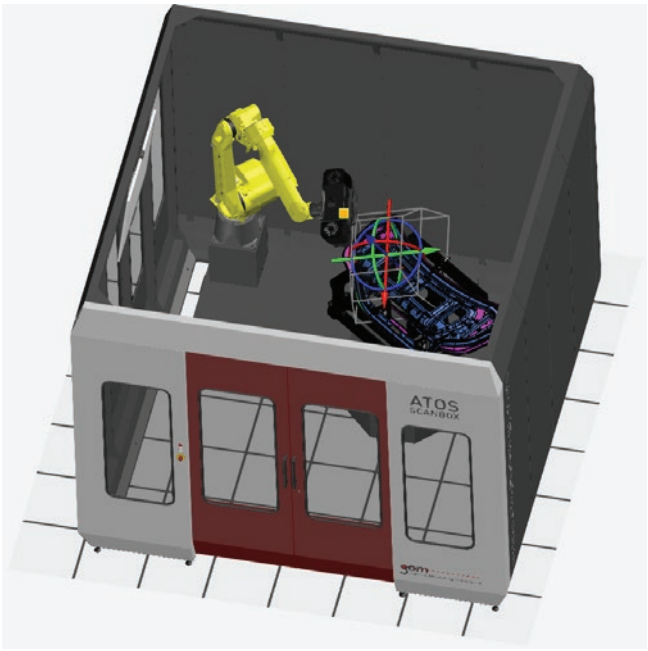
Zahvaljujući intuitivnom korisničkom sučelju i virtualnoj mjernoj sobi (VMR) kao središnjem softveru za upravljanje i planiranje mjerenja, mjerne ćelije su jednostavne za korištenje.

ATOS ScanBox pruža potpuno automatizirana mjerenja odstupanja cijelog polja između stvarnih 3D koordinata i CAD podataka u kratkom vremenu. Dodatno, moćni mjeriteljski softver GOM Inspect Pro pruža informacije o GD&T-u, obrezivanju, položaju rupa, provrta i sl. [1]

2.1 Programiranje mjerne ćelije

Programiranje mjernih ćelija radi se u virtualnoj mjernoj sobi (VMS). VMS je centralni kontrolni software za kreiranje predložaka za mjerenje.

Kada govorimo o programiranju, tu ne govorimo o klasičnom unošenju koda kao na CNC strojevima nego interaktivnom sučelju. VMS je digitalna kopija stvarne ćelije koja se sastoji od ATOS 3D skenera, robota i rotacije. U VMS je moguće *drag and drop* funkcijom ubacivati CAD modele proizvoda, CAD modele naprave pa čak i prethodno generirane mjerne protokole u GOM Inspect programskom paketu.



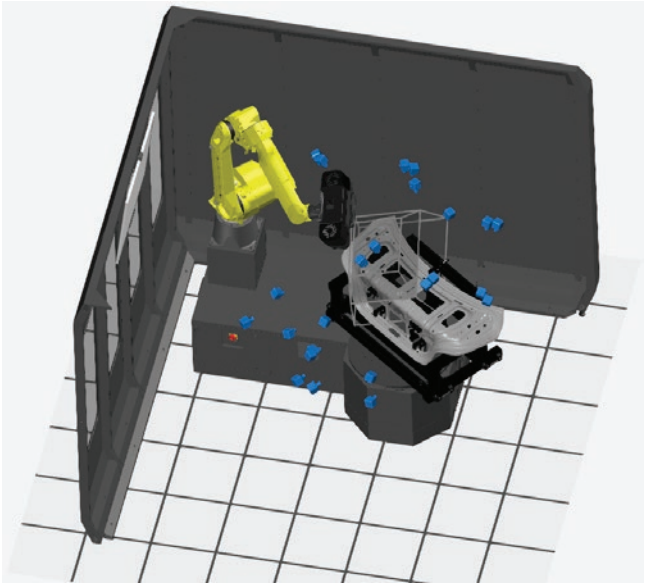
Slika 2: VMR ATOS ScanBox 5120 + ATOS 5

Nadalje, programiranje mjernih pozicija može se napraviti automatski. Za automatizirano programiranje mjerne ćelije potreban je CAD model te na njemu kreirani elementi koje je potrebno izmjeriti.

Funkcija Smart Teach prema kreiranim elementima automatski određuje i optimira poglede iz kojih je potrebno skenirati proizvod kako bi se mogla izvršiti inspekcija kompletnog proizvoda.

2.2 Automatizirana digitalizacija

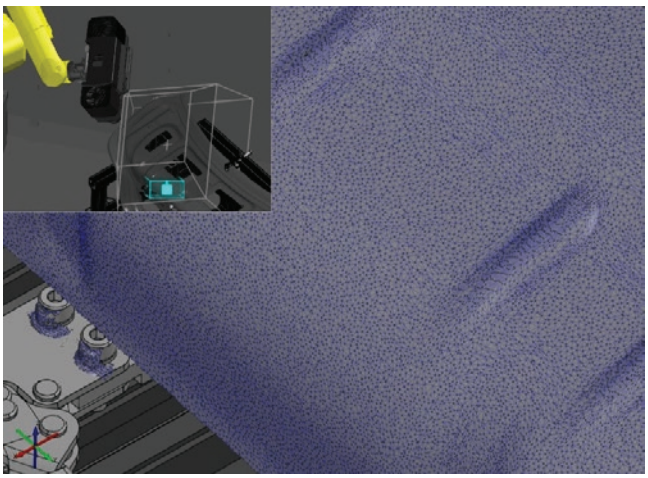
Nakon automatskog generiranja pozicija, pokretanjem mjerne serije (Slika 3), 3D skener ATOS 5 počinje s digitalizacijom. Prilikom postupka 3D skeniranja, sustav izračunava 3D koordinate svakog od 12 milijuna piksela u kameri.



Slika 3: Pozicije kreirane Smart Teach funkcijom

Dobivene točke postupkom poligonizacije spajaju se u trokute minimalne površine te na taj način vrlo detaljno opisuju geometriju mjerenog proizvoda (Slika 4). Geometrija lima prtljažnika automobila opisana je pomoću 980 000 točaka.

U usporedbi s tradicionalnim koordinatnim mjernim uređajima, ova tehnologija daje puno veću količinu informacija u kraćem vremenu.



Slika 4: Prikaz detalja 3D skeniranja lima

2.3 Inspekcija i izvještaji

GOM Inspect je mjeriteljski software za detaljnu evaluaciju 3D podataka. Može se koristiti za jednostavne kao i za vrlo kompleksne mjerne zadatke (Slika 5).

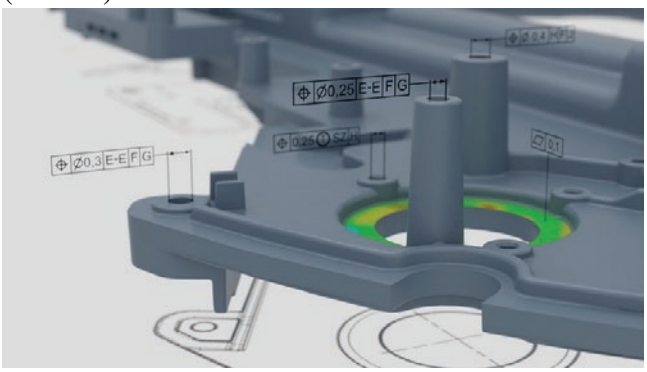
U software-u su implementirane funkcije za:

- 3D skeniranje
- uređivanje 3D podataka
- uvoz CAD modela
- usporedbu Nominal-Actual
- dimenzionalnu analiza
- kalkulaciju GD&T
- trend analizu
- virtualnu montažu, itd.

Slika 5: GOM Inspect Software [2]

GOM Inspect je parametriziran software pa nije potrebno ponavljati iste korake za svaki mjereni proizvod. Za to nam služe mjerni predlošci.

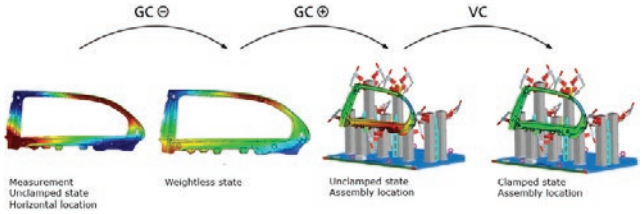
Mjerni predložak pamti sve prethodno napravljene korake te za novo izmjereni proizvod automatski izračunava osnovno i glavno poravnanje, sve dimenzionalne i GD&T mjere, tablice s vrijednostima te generira mjerni izvještaj (Slika 6).



Slika 6: Detalj mjernog izvještaja [1]

2.4 Virtualno stezanje proizvoda

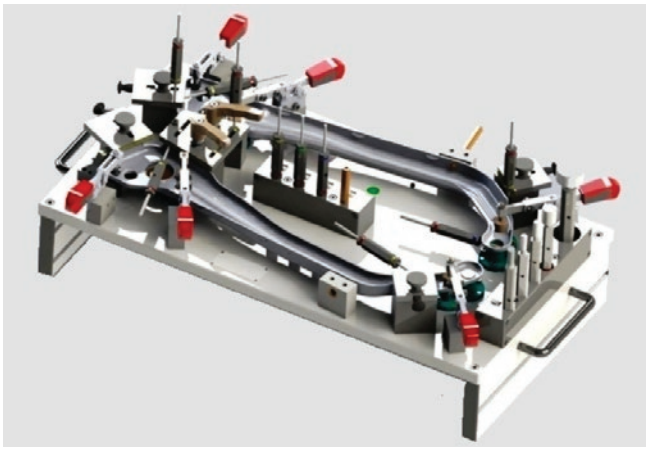
2019. godine GOM je predstavio inovativan način mjerenja proizvoda nazvan *Virtual Clamping* (Slika 7).



Slika 7: Virtual Clamping [1]

Korištenjem FEM simulacija, moguće je virtualno eliminirati *springback* efekt prilikom štancanja limova ili vitoperenja (engl. warpage) kod injekcijskog brizganja polimernih proizvoda.

Na taj način iz mjernog protokola uklonjeni su kontrolnici (Slika 8) čiji nedostaci produžuju *try-out* fazu proizvodnje alata. Samim time povećava se trošak izrade alata.



Slika 8: Prikaz kontrolnika [1]

Nedostaci kontrolnika:

Visoki troškovi:

- konstrukcije
- proizvodnje
- kalibracije i skladištenja

Kompleksne promjene prilikom:

- promjene steznih točaka
- promjene CAD modela

Limitirana ponovljivost:

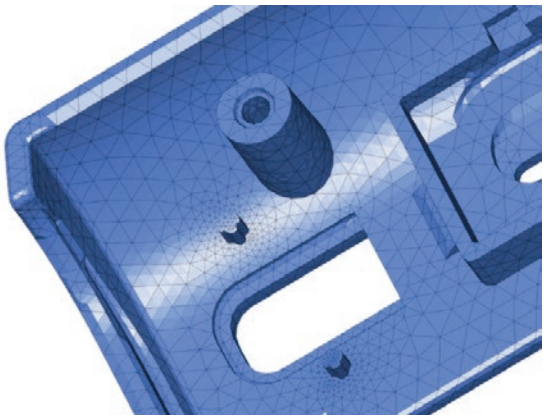
- utjecaj operatera
- redoslijed stezanja
- nedefinirano trenje na steznim točkama

Limitirana dostupnost:

- skrivene površine
- mjerenje steznih točaka nije moguće

Za virtualno stezanje potreban je simulacijski model (Slika 9). Simulacijski model je diskretizirana geometrija CAD modela koja sadrži informacije o materijalu:

- Youngov modul elastičnosti
- Poissonov koeficjent
- Gustoća

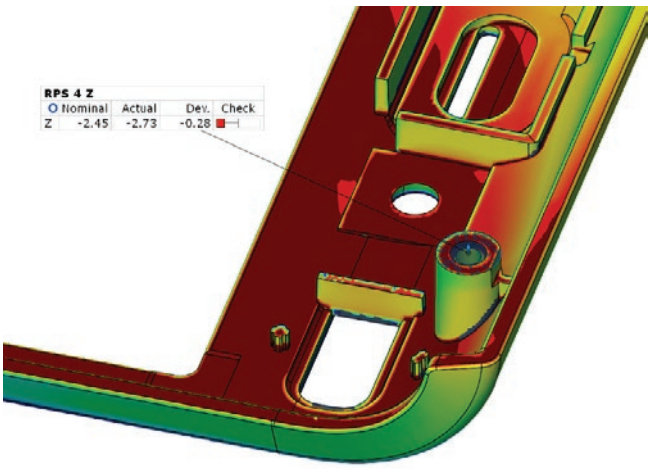


Slika 9: Simulacijski model [1]

Postupak Virtualnog stezanja započinje digitalizacijom i inspekcijom proizvoda. Definira se glavno RPS poravnanje te nam ono služi kao baza za definiranje rubnih uvjeta simulacije.

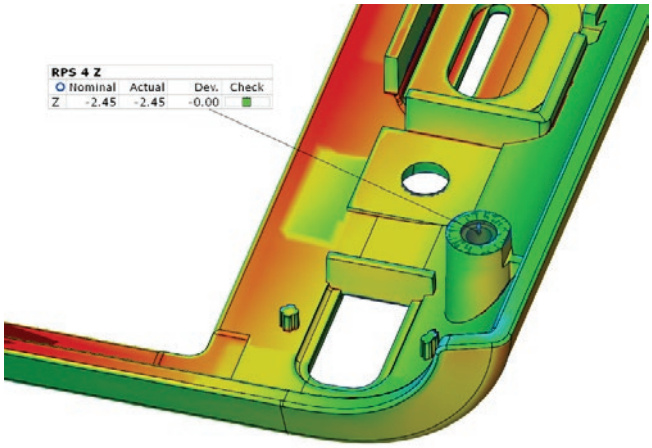
Uzmimo na primjer kućište mobilnog telefona (Slika 10). Digitalizacijom i inspekcijom proizvoda ustanovljeno je da točka RPS 4 odstupa u odnosu na nominalno stanje. Ovaj rezultat prikazuje distorziju proizvoda.

Kao takav, može se koristiti za optimizaciju proizvodnog procesa ili kao informacija za alatničare prilikom popravka ili verifikacije alata.



Slika 10: Odstupanje geometrije proizvoda prikazano u mapi boja

U dijalogu Virtualnog stezanja u GOM Inspectu, kao rubni uvjeti simulacije odabiru se RPS točke. Zatim se odabire stezna točka ili više njih čije odstupanje želimo smanjiti unutar propisane tolerancije. Software iterativnim postupkom eliminira devijacije te prikazuje odstupanje mjerenog proizvoda (Slika 11).



Slika 11: Odstupanje geometrije proizvoda nakon virtualnog stezanja

Ovim postupkom eliminirali smo potrebu za kontrolnikom te možemo provjeriti hoće li finalna montaža biti moguća.

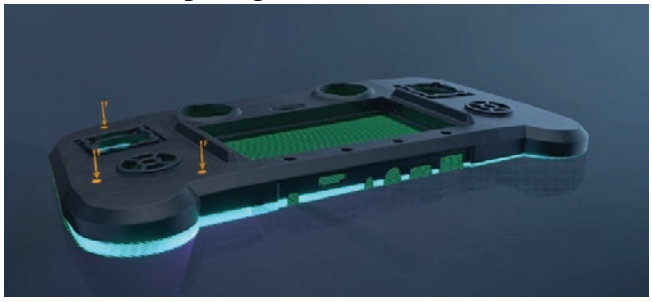
Postupkom Virtualnog stezanja moguće je mjeriti proizvode:

- Od jednog materijala
- Pojedinačni proizvod
- Ponašanje u elastičnom području
- Dimenzija do 2 metra (Slika 12)

Slika 12: Primjer podržanih proizvoda za *Virtual Clamping*

2.5 De-Warp

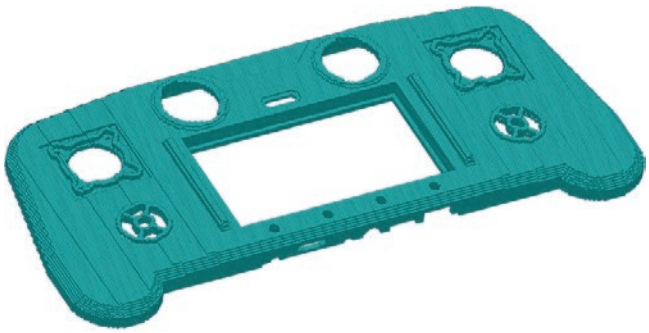
Alatničari nastoje proizvesti dijelove prema specifikacijama i geometriji CAD modela. U realnosti, proizvodni procesi nikada nisu savršeni pa se na proizvodima javljaju distorzije geometrije poput vitoperenja za polimerne proizvode (Slika 13). Vitoperenja mogu biti uzrok neispunjavanja funkcije proizvoda. No ukoliko je distorzija proizvoda u dozvoljenim granicama, ona može biti eliminirana u postupku montaže.



Slika 13: Virtualno uklanjanje vitoperenja

Nakon uspješnog razvoja funkcije virtualnog stezanja, GOM je na tržište plasirao i besplatan *add-on* za GOM Inspect nazvan De-Warp. Proizvode mjerene u slobodnom stanju, moguće je virtualno dovesti u montažno stanje te ispitivati funkcionalnost finalnog proizvoda.

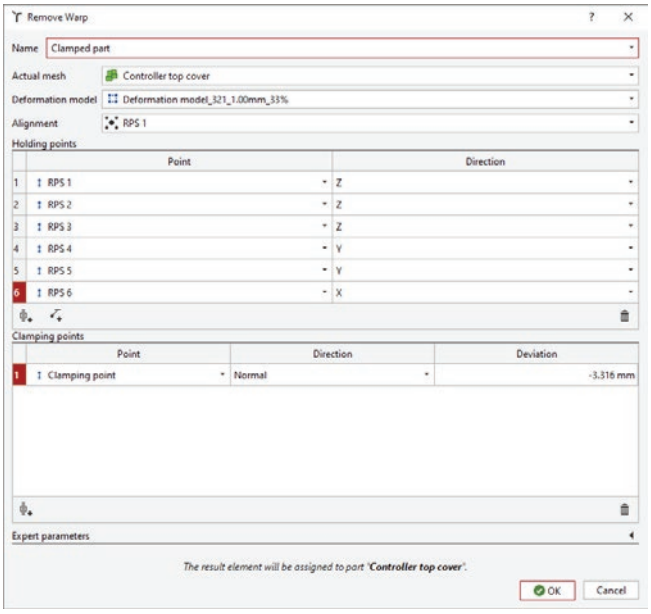
De-Warp *add-on* sadrži dvije programske skripte. Voxelizer skripta (Slika 14) služi za izradu volumetrijskih simulacijskih modela na osnovi CAD modela ili direktno na vodonepropusnoj Mesh strukturi.



Slika 14: Volumetrijski simulacijski model

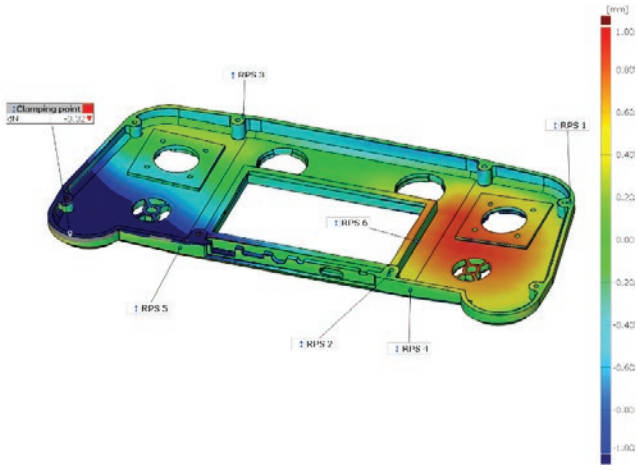
Volumetrijski simulacijski model sadrži podatke o materijalu te nam omogućuje izradu simulacija kojima nastojimo ukloniti vitoperenja proizvoda. Volumetrijski simulacijski modeli mogu se koristit i za rezultate dobivene CT uređajem, odnosno računalnom tomografijom.

Druga programska skripta De-Warpa, Remove Warpage (Slika 15), sastoji se od dijaloga u kojem se definiraju rubni uvjeti simulacije i stezna točka čiju devijaciju želimo smanjiti unutar određene tolerancije.



Slika 15: Remove Warpage dijalog simulacije

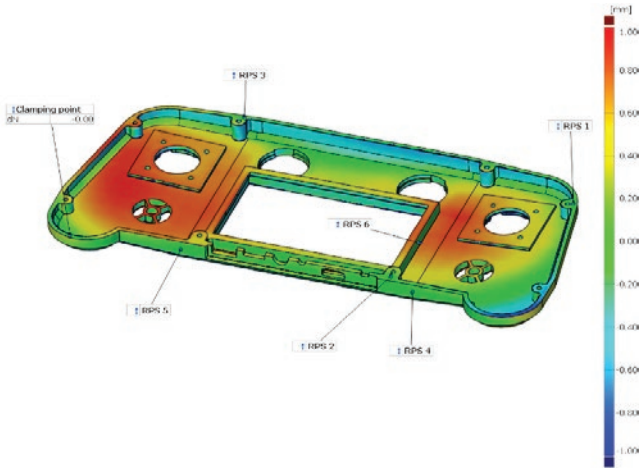
Elementi RPS poravnanja služe nam kao prihvatne točke u dijalogu *Remove warpage* skripte. U RPS poravnanju, zbog vitoperenja u procesu proizvodnje, u mapi boja (Slika 16) je jasno vidljivo koji dio proizvoda može uzrokovati probleme u montaži.



Slika 16: RPS poravnanje-odstupanje u mapi boja

Pokretanjem dijaloga *Remove Warpage* skripte, software započinje simulaciju te iterativno smanjuje devijaciju prethodno definirane stezne točke unutar definirane iteracijske tolerancije.

Nakon završetka simulacije, u GOM Inspect softwareu, prikazuju se odstupanja u mapi boja te sve prethodno izmjerene dimenzije proizvoda u montažnom stanju (Slika 17).

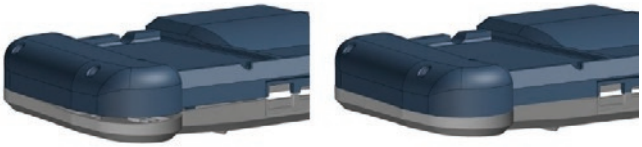


Slika 17: Rezultat simulacije

U GOM Inspectu je uvijek moguće vidjeti rezultate mjerenja u slobodnom stanju kao i rezultate simulacije.

Rezultat mjerenja u slobodnom stanju mogu koristit alatničari kako bi optimizirali parametre proizvodnog procesa.

Rezultat simulacije omogućava nam da bez korištenja stezne naprave provjerimo je li montaža moguća (Slika 18).



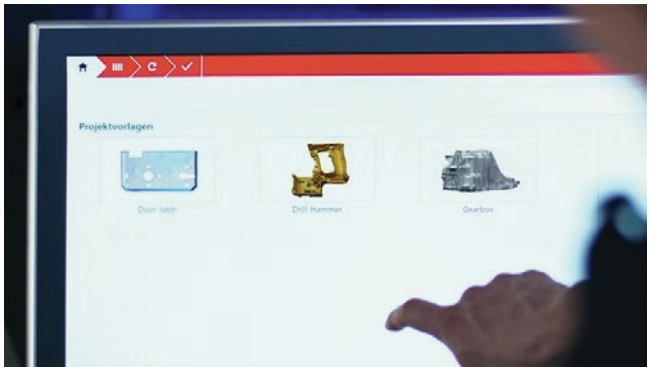
Slika 18: Paralelni prikaz rezultata u slobodnom i steznutom stanju

Rezultati simulacije i mjerenja u slobodnom stanju mogu se vrlo jednostavno prikazati pomoću mjernog izvještaja u pdf formatu. Nadalje, moguć je izvoz podataka u formate programa za statističko praćenje poput Excela, QDAS, PiWeb ili DMIS.

Virtualno stezanje i De-Warp mogu se implementirati u ranije spomenute mjerne predloške.

U kombinaciji sa ATOS ScanBox mjernom ćelijom operater ne mora znati programirati ćeliju, kompleksne inspekcije ili izradu simulacija.

KIOSK sučelje za operatere (Slika 19) omogućava jednostavan upis osnovnih podataka o proizvodu i pokretanje mjernih predložaka za pojedine ili grupu proizvoda.



Slika 19: Touch screen KIOSK sučelje

Viri:

[1] www.gom.com, 02.05.2022.
[2] www.topomatika.hr, 02.05.2022.

CT SKENIRANJE ZA MJERENJE I ANALIZU DEFEKATA PLASTIČNIH PROIZVODA

Luka KURTALJ, Josip KOS, Nenad DRVAR, Tomislav HERCIGONJA
Topomatika d.o.o

SAŽETAK

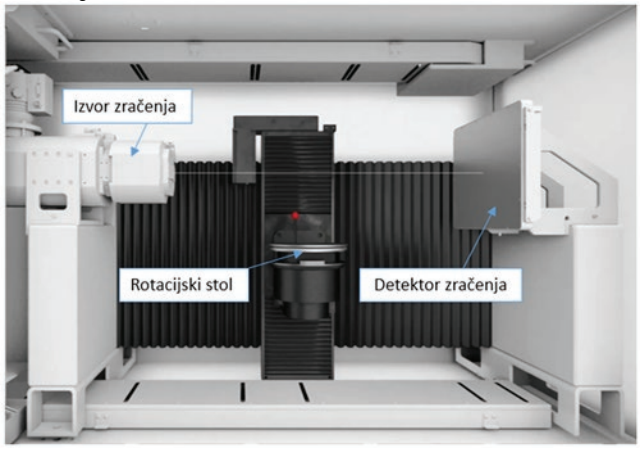
Rad donosi pregled mogućnosti i benefita upotrebe industrijske kompjuterizirane tomografije (CT) za 3D mjerenja u u proizvodnji plastičnih proizvoda. Suvremenim zahtjevima proizvodnje, povećavaju su se i zahtjevi za mjerenjem geometrije proizvoda kao i mjerenjem unutarnjih struktura bez rezanja uzorka. Odgovor na ove suvremene zahtjeve mjerenja kompleksnih geometrija je metoda kompjuterske tomografije koja jedina daje cjelovitu oku vidljivu i nevidljivu 3D geometriju stvarnog uzorka za npr. GD&T analize ili analizu defekata u unutrašnjosti proizvoda. U radu će biti prikazani rezultati 3D mjerenja sa ZEISS Metrotom CT sustavom, a obrada sa GOM Volume Inspect programskim paketom za sveobuhvatnu analizu rezultata.

1 UVOD

Razvojem novih materijala i tehnologija povećavaju se i zahtjevi u kontroli kvalitete polimernih proizvoda. S obzirom na činjenicu da se polimerni proizvodi najčešće proizvode u velikim serijama i sa kompleksnim unutarnjim geometrijama koje nije jednostavno kontrolirati konvencionalnim metodama, kao rješenje se nameće kompjuterizirana tomografija, koja brzo i efikasno može analizirati oku vidljive i nevidljive elemente proizvoda.

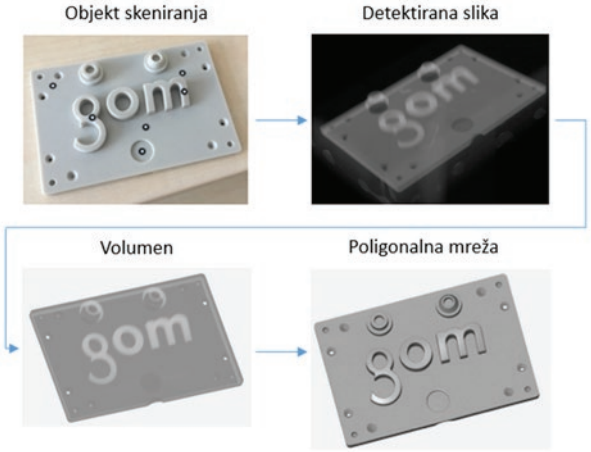
2 KOMPJUTERIZIRANA TOMOGRAFIJA

Svaki CT sustav na tržištu sastoji se od 3 ključna elementa: izvora zračenja, rotacijskog stolića za postav uzorka, i na poslijetku detektora zračenja. (*Slika 1*)



Slika 1: Glavni elementi CT uređaja

Izvor zračenja generira rendgenske zrake, koje prozračuju objekt skeniranja i zatim se zaustavljaju na detektoru. Prigušenost rendgenskih zraka koje završe na detektoru ovisi o gustoći materijala od kojeg je objekt skeniranja proizveden i o njegovoj debljini. Svaki piksel na detektoru »broji« rendgenske zrake, i stvara se digitalna slika, u kojoj svjetlija područja odgovaraju manjem broju detektiranih zraka. Objekt se zatim okreće automatiziranim rotacijskim stolićem, a proces se ponavlja sve dok se objekt skeniranja nije okrenuo za 360°, nakon čega softver rekonstrukcijskim algoritmom spaja sve dobivene slike i automatski generira volumen, koji se na poslijetku poligonizira. Krajnji rezultat je poligonalna mreža trokuta (*Slika 2*).



Slika 2: Proces dobivanja poligonalne mreže CT tehnologijom

2.1 Vrste CT sustava

CT sustavi imaju nekoliko primjena, a mogu se podijeliti u tri glavne skupine: CT uređaji za inspekciju, CT uređaji za analizu materijala i mjeriteljski CT uređaji.

CT uređaji za inspekciju idealan su odabir ukoliko je potrebna vizualna kontrola proizvoda kako bi se detektirale eventualne pogreške u sklapanju ili defekti u volumenu – oku nevidljivi. Pružaju uvid u unutrašnjost proizvoda, te su dovoljno precizni za vizualnu inspekciju. Ovi sustavi su primarno namjenjeni za proizvode velikih dimenzija, i proizvode koji su napravljeni od materijala velike gustoće, jer njih nije moguće skenirati drugim vrstama CT uređaja.

Primjena iduće skupine, CT uređaja za analizu materijala, može se isčitati već iz njenog naziva. Ovim uređajima može se analizirati hrapavost površine, morfologija materijala i ponašanje materijala u vremenu.

Posljednja skupina su CT uređaji za mjerenje. Ovi uređaji omogućavaju usporedbu skeniranog uzorka sa referentnim modelom i kompletnu 3D digitalizaciju proizvoda kompleksnih geometrija s vrlo visokom preciznošću rezultata. (*Slika 3*)

Slika 3: ZEISS METROTOM 6 scout u Topomatika laboratoriju

Svi navedeni uređaji su sigurni za rad u mjeriteljskim laboratorijima, jer se zaštita od zračenja nalazi u kućištu sustava.

U nastavku ovog rada, CT skeniranje odnosit će se primarno na digitalizaciju proizvoda CT uređajima za mjerenje.

2.2 Prednosti CT skeniranja

Glavna prednost CT skeniranja nad konvencionalnim metodama mjerenja je činjenica da se može nerazorno analizirati unutrašnjost proizvoda.

Često su zbog proizvodnog postupka polimernih proizvoda u unutrašnjosti materijala prisutni volumenski defekti koji negativno utječu na njegova mehanička i vizualna svojstva, pa je stoga potrebno provjeriti ukupni volumen defekata, njihovu raspodjelu u proizvodu, veličinu ili udaljenost do vanjske površine. Metoda kojom se radila volumenska analiza prije mjeriteljske CT tehnologije uključivala je struganje tankih slojeva materijala i analizu svakog od tih presjeka. Taj je proces dugotrajan i podrazumijeva uništavanje uzorka, dok se s CT-om može analizirati više uzoraka od jednom, analiza se može u potpunosti automatizirati, te je moguće isporučiti točno taj proizvod na kojem je napravljena analiza.

Osim navedenog, na rezultatima dobivenim CT skeniranjem uz pomoć GOM Volume Inspect softvera moguće je provesti:

- usporedbu stvarnog proizvoda s nominalnim modelom,
- analizu sklopa više komponenti,
- analizu presjeka sklopa,
- dimenzijsku i GD&T analizu,
- analizu na presjecima proizvoda,
- analizu debljine stijenki,
- izradu mjernog izvještaja.

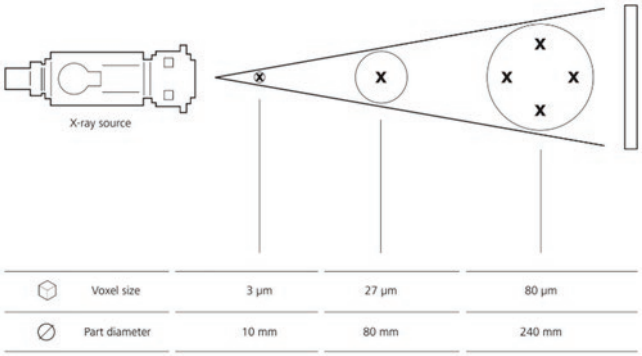
Dakle, kompletna kontrola kvalitete polimernih proizvoda može se provesti samo jednim sustavom.

2.3 ZEISS Metrotom 6 Scout CT sustav

ZEISS Metrotom 6 Scout (*Slika 3*) je mjeriteljski i inspekcijski CT uređaj koji je

pogodan za analizu polimernih, aluminijskih i titanovih proizvoda. Opremljen je detektorom zračenja 3k rezolucije, rotacijskim stolom koji se može pomicati u 5 osi, te izvorom zračenja snage 50 W i napona do 225 kV.

Uređaj ima promjenjivu rezoluciju od 3 µm do 80 µm (*Slika 4*), ovisno o udaljenosti objekta skeniranja od izvora zračenja. Ukoliko je potrebna najveća moguća rezolucija, potrebno je objekt skeniranja primaknuti najbliže moguće izvoru. Ukoliko je pak potrebno skenirati veći proizvod, potrebno je objekt skeniranja primaknuti detektoru zračenja. Maksimalni mjerni volumen sustava je Φ240 mm x 400 mm.



Slika 4: Promjenjiva rezolucija ZEISS Metrotom 6 scout CT uređaja

Nadalje, upravljanje sustavom je u potpunosti integrirano u GOM Volume Inspect, što znači da je moguće i upravljati CT-om i analizirati rezultate u jednom softveru.

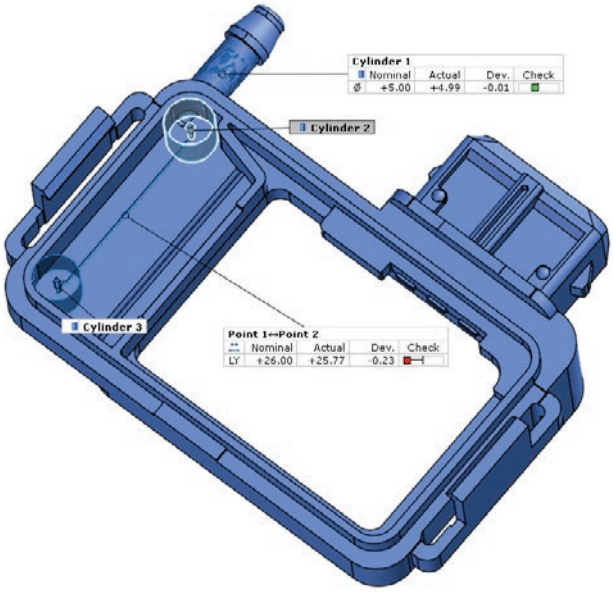
3 MJERENJE UZ POMOĆ CT SUSTAVA

Kao što je već spomenuto u poglavlju 2.2, CT-om je moguće napraviti kompletnu kontrolu kvalitete proizvoda. U nastavku se mogu vidjeti detaljnija objašnjenja spomenutih funkcija.

Slika 5. Primjer plastičnih proizvoda karakterističnih za CT skeniranje i mjerenje [1]

3.1 Dimenzijska analiza

CT skeniranje pruža izvrsnu točnost i ponovljivost rezultata, u potpunosti eliminira potrebu za matiranjem površine, a pruža i mogućnost mjerenja oku nevidljivih dimenzija, što ga čini idealnom tehnologijom za dimenzijsku analizu polimernih proizvoda.



Slika 6. Analiza dimenzija

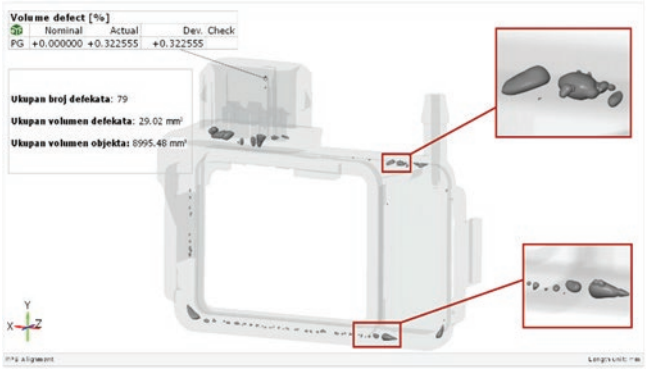
3.2 Volumenska analiza

Nehomogenost materijala izrazito loše utječe na mehanička svojstva materijala, stoga je bitno napraviti analizu volumena polimernih proizvoda.

3.2.1 Ukupni volumen defekata

Ukupni volumen defekata jedna je od najbitnijih stavki volumenske analize, jer pokazuje koliko je proizvod ustvari nehomogen.

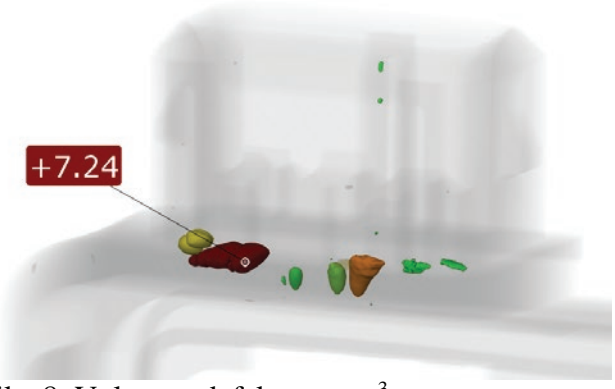
Ukoliko je ukupni volumen defekata van tolerancija, sva mehanička ispitivanja koja su vršena nad uzorcima materijala više ne vrijede, te se svojstva proizvoda ne mogu garantirati. CT skeniranjem Metrotom 6 Scout uređajem mogu se detektirati defekti do 3 µm pri maksimalnoj rezoluciji, što garantira vrlo preciznu analizu ukupnog volumena defekata (*Slika 7*)



Slika 7. Ukupan volumen i broj defekata

3.2.2 Veličine pojedinog defekta

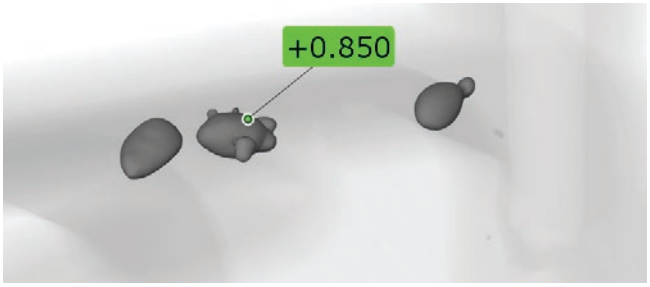
Ponekad nije dovoljno samo znati ukupni volumen defekata, već postoje i ograničenja dimenzija svakog pojedinog defekta. Pomoću GOM Volume Inspecta se na defektima može izmjeriti volumen, maksimalna dijagonala, promjer, površina, te dimenzije u smjeru x, y i z osi.



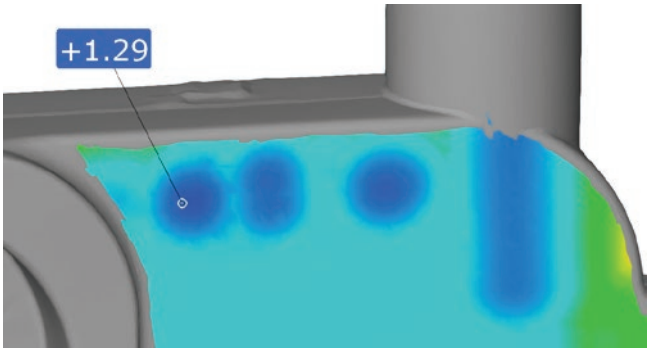
Slika 8. Volumen defekta u mm^3

3.2.3 Udaljenost defekata do vanjske površine

Ukoliko se radi o proizvodu koji je nosivi element u sklopu, također je bitno da eventualni volumenski defekti nisu preblizu površine, kako ne bi došlo do pucanja stijenke i narušavanja integriteta sklopa. (*Slika 9*)



Slika 9. Udaljenost defekta do najbliže površine u mm



Slika 10. Utjecaj defekta na debljinu stijenke plastičnog prizuvoda (defekti umanjuju debljinu stijenke), vrijednost u mm

3.2.5 Ostale analize

Osim gore navedenih analiza koje imaju naučestaliju primjenu na polimernim proizvodima, postoje i analize oblika defekata, te se tako defektima može izmjeriti kompaktnost i cilindričnost.

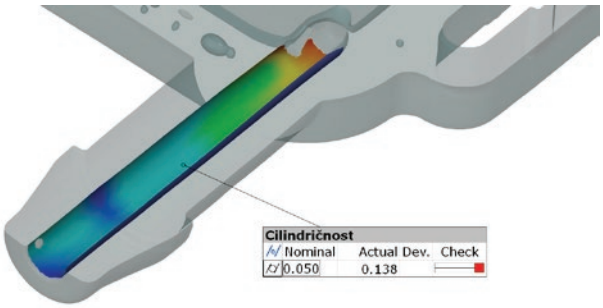
Također, ukoliko je potrebno analizirati nešto što nije pokriveno gore navedenim funkcijama, može se izabrati »*user-defined check*«, kod kojeg korisnik definira točno što i kako želi kontrolirati.

Primjer upotrebe ove funkcije bi bio morfološka analiza polimernih pjena, gdje bi se gledala raspodjela poroziteta po volumenu.

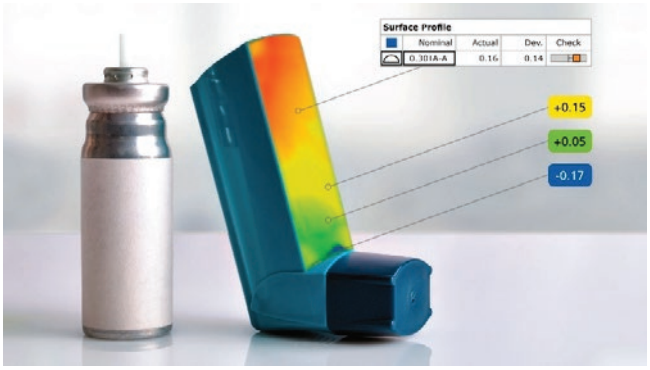
3.3 GD&T analiza

S obzirom na činjenicu da je CT-om moguće skenirati kompletnu geometriju proizvoda, moguće je provesti GD&T analizu i na oku nevidljivim površinama.

U programskom paketu GOM Volume Inspect moguće je evaluirati Toleracije oblika u skladu s međunardnim standardima ISO 1101 i ASME Y14.5M kao što je plošnost (engl. *Flatness*) ili kružnost (engl. *Roundness*). (*Slika 11)*



Slika11. Cilindričnost optički nedostupne površine dobivene CT skeniranjem



Slika 12. Primjer mjerenja profila površine medicinskog inhalatora [2]

5 SKLEP

Zbog jednostavnosti upotrebe i preglednosti rezultata mjerenja, zaključujemo da je mjerenje CT uređajima moguće sigurno i jednostavno uvesti u mjeriteljske laboratorije, a rezultate koristiti za više faza proizvodnog procesa. Time se osigurava puno kraće vrijeme do izrade potpuno ispravnog proizvoda.

Velike prednosti pred ostalim mjernim tehnologijama su u tome što je:

- mjerenje moguće bez destrukcije konačnih proizvoda, čime se zadržava njihova potpuna funkcionalnost i vrijednost
- mjerenje moguće bez potrebe za sprejanjem transparetnih i jako sjajnih površina
- mjerenje više uzoraka odjednom ako stanu u mjerni volumen

Slika 12. Mjeriteljski CT, ZEISS METROTOM 6 scout

Viri:

[1] www.zeiss.com, 2.5.2022.
[2] www.gom.com, 15.4.2022Perme, T, Švetak, D.: Naslov izmišljenega članka v reviji ali zborniku, *IRT3000* 5(2009)2, str. 12–16.
[3] J. Kos, N. Drvar, P. Oković: RAČUNALNA TOMOGRAFIJA (CT) ZA NEDESTRUKTIVNO DIMENZIONALNO ISPITIVANJE PROIZVODA, IRT Forum 2021

IDEJNI PROJEKT ZASNOVE OGREVALNIH JAM ZA SLABE

Matic BOBNAR[1,2], Bojan RAJAKOVIĆ[2], Borut KOSEC[1,3]

[1] Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta

[2] SIJ Acroni d.o.o.

[3] Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

IZVLEČEK

Jeklene slabe moramo pred procesom vročega valjanja ogreti v potisni peči na temperaturo preoblikovanja, kar je drag in energetsko potraten proces. Z idejo, da bi privarčevali z zemeljskim plinom ter naredili vročo valjarno bolj učinkovito, smo zasnovali ogrevalne jame, v katerih bi slabe ogreli z dimnimi plini iz potisne peči in lastnimi gorilniki za približno 100 °C, kar bi občutno zmanjšalo porabo zemeljskega plina. V okviru dela smo izbrali gradnike jam ter gradnike cevovoda. Izračunali smo izgube toplote skozi stene in pokrove jam, izgube toplote dimnih plinov v cevovodu ter porabo zemeljskega plina, ki bi ohranjal zadostno temperaturo v jamah ter obenem istočasno ogreval slabe. Določili smo potreben čas za ogrevanje slabov v jamah ter dimenzionirali dimnik za odvod dimnih plinov.

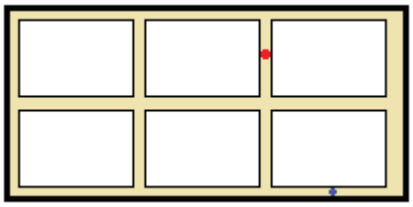
1 UVOD

Vroče preoblikovanje je proces pri katerem preoblikujemo material pri temperaturi nad temperaturo rekristalizacije. Za doseganje te temperature, se v podjetju SIJ Acroni d.o.o. uporablja potisno peč, ki segreje jeklene slabe na temperaturo približno 1250 °C, kar je drag in energetsko potraten proces. Ker je potisna peč največji porabnik zemeljskega plina v podjetju, smo toplotno tehnično preračunali idejne ogrevalne jame, ki bi slabe ogrele za približno 100 °C, ogrevane bi pa bile z lastnimi grelci in odpadnimi dimnimi plini iz potisne peči. Ker bi reciklirali toploto odpadnih dimnih plinov in bi v potisno peč zalagali slabe približno 100 °C toplejše, bi občutno zmanjšali porabo zemeljskega plina. Idejne ogrevalne jame bi bile velike 9 x 6 x 2,5 m, grajene iz štiri plastne stene in tri plastnega pokrova, grele bi pa slabe naložene v kup dimenzij 8 x 4,12 x 2 m. Iz potisne peči do jam, bi dimne pline vodil cevovod s tri plastno steno, dolžine 50,5 m in premera 2 m. Za vse stene in cevovod, smo izračunali izgube toplot in posledično določili količino zemeljskega plina, ki bi ga porabili grelci v jamah. Na koncu pa smo določili čas ogrevanja in dimenzionirali dimnik, ki bi odvajal dimne pline iz jam.

2 PREVOD TOPLOTE SKOZI STENE IN POKROVE JAM

Za notranjo temperaturo jam bomo vzeli 300 °C, saj bomo na to temperaturo segrevali vložek. Ker je na zunanji strani sten jam temperatura približno 40 °C, bo skozi stene jam tekel toplotni tok preko prevoda. Zaradi postavitve jam (slika 1), so stene jam lahko v stiku s steno druge jame, ali pa z okolico, torej bo temperatura med stenama dveh jam višja kot temperatura na zunanji strani stene, ki je v stiku z okolico. Vrednost te temperature smo ocenili na 100 °C.

Matic BOBNAR[1,2], Bojan RAJAKOVIĆ[2], 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: Idejni načrt postavitve jam.

Na sliki 1 je prikazana idejni načrt postavitve šestih jam. Rdeča pika ponazarja stik med dvema stenama jam, kjer je temperatura 100 °C. V modri točki, kjer je stena jame v stiku z okolico, pa je temperatura 40 °C.

Preko enačbe za izračun prevoda toplote skozi štiri plastno ravno steno, smo določili količino toplotnega toka, ki steče skozi stene jam [1].

Vsi potrebni podatki za izračun toplotnega toka skozi stene in pokrov so predstavljeni v tabeli 1 in 2.

Tabela 1: Debelina in toplotna prevodnost plasti sten

Material	Debelina [mm]	Toplotna prevodnost [$Wm^{-1}K^{-1}$]
JEKLO 1.0050	20	53
STEKLENA VOLNA	80	0,043
ŠAMOT	250	0,84
BETON	100	1,1

Tabela 2: Debelina in toplotna prevodnost plasti pokrova ter cevovoda

Material	Debelina [mm]	Toplotna prevodnost [$Wm^{-1}K^{-1}$]
JEKLO 1.0050	10	53
STEKLENA VOLNA	250	0,043
JEKLO 1.0050	10	53

Ko vstavimo potrebne podatke v enačbo za prevod toplote, dobimo koliko toplotnega toka steče skozi zunanje štiri jame in notranji dve. Skozi notranji dve jami steče manj toplotnega toka, saj imata manj zunanjih sten kolikor jame na vogalih. Skozi zunanje štiri jame teče tok 16,94 kW, skozi notranji dve pa 16,54 kW.

3 TOPLOTNE IZGUBE SKOZI STENE CEVOVODA

Toplotne izgube skozi stene cevovoda smo izračunali, saj nas zanima za koliko se ohladijo dimni plini od potisne peči do jam. Za notranjost cevovoda smo potrebovali kriterijske enačbe za prestop toplote za neomejen prostor (enačba 1) [1]. Ker toplota prestopi na tri plastne stene cevovoda, po stenah se pa prevaja navzven, smo potrebovali tudi izračun za prevod toplote skozi tri plastno cilindrično steno (enačba 2) [1].

$$\Phi = \rho \cdot \omega \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta \qquad (1)$$

kjer je:
ρ- gostota dimnih plinov [kgm^{-3}]
ω- hitrost dimnih plinov [ms^{-1}]
d- premer cevovoda [m]
c_p- specifična toplota dimnega plina [$Jkg^{-1}K^{-1}$]
Δϑ- padec temperature dimnih plinov v cevovodu [°C]

$$\Phi = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_{n+1})}{\sum_{i=1}^{i=n}(\frac{1}{\lambda_i} \cdot ln(\frac{r_i}{r_{n+1}}))} \qquad (2)$$

Ko enačimo enačbi 1 in 2, izrazimo dolžino cevovoda, odštejemo dejansko dolžino cevovoda, da dobimo ničlo funkcije in naša neznanka je Δϑ. Neznanko smo izračunali preko tangentne metode za iskanje ničle funkcije [4]. Predpostavili smo, da je gostota dimnih plinov 0,513 kgm^{-3}, hitrost 1,48 ms^{-1} [5] ter specifična toplota 1,08 $kJkg^{-1}K^{-1}$. Ko smo jih vstavili v našo enačbo, smo dobili da temperatura dimnih plinov pade za 8,44 °C.

Torej znaša temperatura dimnih plinov na koncu cevovoda približno 406,55 °C.

4 PORABA ZEMELJSKEGA PLINA GRELCEV V JAMI

Poraba lastnih grelcev v jamah je sestavljena iz dveh delov. En del nadomešča izgubo zaradi toplotnega prevoda skozi stene, drug del pa ogreva prostor jam za približno 100 °C, saj smo ocenili, da bodo dimni plini za rekuperatorjem pred jamami imeli 200 °C, željena temperatura jam pa je 300 °C.

Za nadomestitev izgub toplotni tok pomnožimo s 3600 sekund, saj potrebujemo koliko energije jame izgubijo v eni uri. Nato energijo delimo s kurilnostjo zemeljskega plina in dobimo porabo zemeljskega plina. Rezultati so predstavljeni v tabeli 3.

Tabela 3: Izračun porabe zemeljskega plina grelcev v jami

Toplotni tok zunanje štiri jame [kW]	16,94
Toplotni tok notranji dve jami [kW]	16,54
Čas [s]	3600
Energija potrebna za zunanje štiri jame [kJ]	6097,81
Energija potrebna za notranji dve jami [kJ]	5953,66
Kurilnost ZP [Jm^{-3}]	3393,40
Poraba ZP zunanjih štirih jam [m^3h^{-1}]	7,19
Poraba ZP notranjih dveh jam [m^3h^{-1}]	3,51

Za izračun porabe za ogrevanje prostora jam potrebujemo gostoto in specifično toploto zraka pri začetni in končni temperaturi. V našem primeru ti dve temperaturi znašata 200 in 300 °C. Preko gostote in volumna šestih jam izračunamo maso zraka v jamah. Nato preko mase in specifičnih toplot zraka izračunamo energijo potrebno za ogrevanje jam, delimo s kurilnostjo plina in tako dobimo porabo zemeljskega plina za ogrevanje prostora. Podatki za izračun in rezultati so predstavljeni v tabeli 4.

Tabela 4: Izračun porabe zemeljskega plina za ogrevanje prostora

Začetna temperatura [˚C]	200
Končna temperatura [˚C]	300
Temperaturna sprememba [˚C]	100
Toplotna kapaciteta pri 200 ˚C [$kJkg^{-1}K^{-1}$]	1,026
Toplotna kapaciteta pri 300 ˚C [$kJkg^{-1}K^{-1}$]	1,046
Gostota zraka [kgm^{-3}]	0,6653
Masa zraka v vseh jamah [kg]	538,89
Potreben vnos toplote [kJ]	6146,61
Kurilnost zemeljskega plina [kJm^{-3}]	3393,40
Poraba zemeljskega plina [m^3h^{-1}]	1,81

Ko seštejemo obe porabi, dobimo skupno porabo gorilnikov v jami, ki znaša 12,51 m^3h^{-1}.

5 IZRAČUN ČASA, DA SE VLOŽEK V JAMAH OGREJE ZA PRIBLIŽNO 100 °C

Izračun časa ogrevanja vložka smo izračunali po W. Heiligensteadt-u [6]. Podatki in rezultati so predstavljeni v tabeli 4.

Tabela 5: Rezultati časa ogrevanja vložka

Volumen bloka [m^3]	65,92
Višina vložka [m]	2
Širina vložka [m]	4,12
Dolžina vložka [m]	8
Toplotna prevodnost vložka [$Wm^{-1}K^{-1}$]	40
Specifična toplota vložka [$Jkg^{-1}K^{-1}$]	500
Začetna temperatura [˚C]	200
Končna temperatura [˚C]	300
Temperatura dimnih plinov [˚C]	350
Debelina plinske plasti [m]	0,5
Debelina pregrevanja [m]	2,06
Površina vložka/površina jame [m^2]	0,63
Ogrevna površina ogrevanca [m^2]	32
Teža ogrevanca [kg]	517472
Teža ogrevanca / ogrevna povšina [kgm^{-3}]	16171
Srednja temperatura ogrevanca [˚C]	300

Matic BOBNAR[1,2], Bojan RAJAKOVIĆ[2], Borut KOSEC[1,3]
[1]Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta
[2]SIJ Acroni d.o.o.
[3]Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo.

Toplotna prestopnost [$Wm^{-2}K^{-1}$]	26
Nusseltovo število	1,34
Koeficient τ	0,65
Čas ogrevanja [s]	525611,2
Čas ogrevanja [h]	146,0
Max. temp. diferenca v vložku [°C]	26,25

6 ODVOD DIMNIH PLINOV

Za odvod dimnih plinov smo dimenzionirali dimnik. Za izračun količine dimnih plinov potrebujemo sestavo in porabo zemeljskega plina, ki smo jo izračunali v Poglavju 4, sestava pa je podana v tabeli 6.

Tabela 6: Sestava zemeljskega plina [5]

Plin	Vol. %
Metan	96,43
Etan	1,75
Propan	0,56
Iso-butan	0,08
N-butan	0,09
Iso-pentan	0,02
N-pentan	0,01
Heksan	0,01
CO_2	0,25
N_2	0,8

Glede na sestavo zemeljskega plina in razmernik zraka, ki znaša 1,02 smo določili sestavo dimnih plinov, ki znaša 10,65% CO_2, 16,82% H_2O, 72,19 % N_2 in 0,34% O_2.

Ko poznamo sestavo dimnih plinov, lahko izračunamo njihovo gostoto in volumski pretok. Za vsoto volumskih pretokov dimnih plinov jam in dimnih plinov potisne peči, smo izračunali, da bo dimnik visok 30,1 m, okroglega preseka s premerom tuljave 1,4 m.

7 ZAKLJUČEK

S toplotnotehničnimi izračuni, smo podkrepili idejo o ogrevalnih jamah za slabe.

Glede na nizko porabo zemeljskega plina jam in dobro reciklažo odpadnih dimnih plinov iz potisne peči lahko sklepamo, da bomo v procesu ogrevanja slabov na temperaturo preoblikovanja, privarčevali pomembne količine zemeljskega plina.

Poleg manjše porabe, bo imela vroča valjarna večjo zalogo ogretih slabov in bodo lahko naredili bolj optimalen plan valjanja.

Viri:

[1] BERGMAN, T., LAVINE, A., INCROPERA, F., DEWITT, D. Fundamentals of heat and mass transfer seventh edition. Jefferson city: John Wiley & Sons, 2011, 1048 str.

[2] Make it from [online].EN 1.0050 properties. [citirano 2.4.2022]. Dostopno na svetovnem spletu: https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.0050-E295-Non-Alloy-Steel

[3] KRAUT, B. Krautov strojniški priročnik, Ljubljana: Buča d.o.o., 2017, 817 str.

[4] BOHTE, Z. Numerične metode, Ljubljana: Državna založba Slovenije, 1973.

[5] JERAJ, Š. Optimiranje toplotnotehničnih karakteristik izmenjevalca toplote : diplomsko delo. Ljubljana, 2015, 36 str.

[6] HEILIGENSTEADT, W. Waermetechnische rechnungen fuer industrieoefen, Stahleisen Verlag, Duesseldorf, 1969

[7] Science direct [online]. Thermal conductivity coefficient. [citirano 2.4.2022]. Dostopno na svetovnem spletu: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/thermal-conductivity-coefficient .

NOVI TRENDI PRI IZDELAVI NAVOJEV V ORODJARSTVU

Branko UŠAJ, dipl.inž.str.
BTS Company d.o.o.

POVZETEK

Pri izdelavi orodja se pogosto pojavijo zahteve po spremembah, ki v zadnjih fazah procesa lahko predstavljajo tehnološki izziv. Tak primer je izdelava navoja v termično obdelan obdelovanec. Klasični postopki so zamudni in dragi, zato nenehno iščemo nove rešitve. Če hočemo čas za izdelavo navojnih izvrtin in navojev skrajšati, potem potrebujemo tudi primerno rezilno orodje. Pri izdelavi navojev postajajo navojni rezkarji zaradi svojih prednosti vse bolj priljubljeni. Za rezkanje navoja je potreben bistveno manjši navor na vretenu stroja, tvorijo se kratki odrezki, ki jih enostavneje odvajamo iz izvrtine, zato ne prihaja do pogostega loma orodja in zastojev. Navoj lahko vrežemo do dna izvrtine, površina navoja pa je bolj gladka in brez sledi, ki jo povzroči menjava smeri rotacije. Pri konvencionalnem navojnem rezkanju moramo pred izdelavo navoja izvrtati izvrtino. OSG je razvil nov navojni rezkar s katerim izdelamo navoj z rezkanjem brez vrtanja predhodne izvrtine. Patentirani navojni rezkar je namenjen za izdelavo navoja v kaljena jekla do 65 HRc, sive in nodularne litine ter Ti- in Ni-zlitine. Posebno zanimiv je za uporabo v orodjarstvu, kjer med zadnjimi operacijami odrezovanja nastopi izdelava navoja. Pri obdelavi v trdo se namreč pogosto srečamo z lomom svedra ali navojnega svedra.

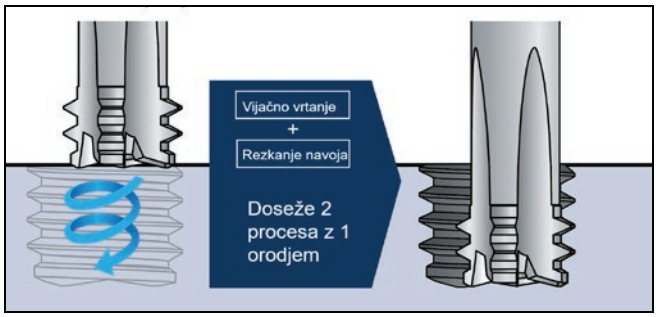
UVOD

Pri izdelavi orodij se podjetja srečujejo z vedno krajšimi roki izdelave ter zahtevami kupcev po spremembah, ki predstavljajo težavo, ko je potrebno izdelati navoje v termično obdelana orodja. Klasični postopki kot so npr. izdelava navoja v kaljeno jeklo z erodiranjem so zelo zamudni in dragi, zato nenehno iščemo nove rešitve. Japonski proizvajalec rezilnih orodij OSG je razvil dva tipa svedrov za vrtanje izvrtin v toplotno obdelana jekla. Prvi tip ima oznako WH55 in WHO55 kar pomeni, da je namenjen izdelavi izvrtin do trdote 55 HRc, drugi pa ima oznako WH70-DRL in je namenjen vrtanju izvrtin do 70 HRc ter navojne svedre WH55-OT za vrezovanje navojev v toplotno obdelane materiale. Pri izdelavi navojev v obdelovance manjših debelin se srečamo s problemom globine navoja, ki ne sega do dna izvrtine.

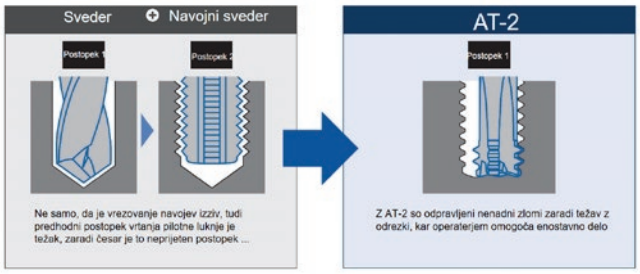
OSG je razvil navojni rezkar AT, ki predstavlja zelo velik napredek pri rezkanju navojev saj lahko istočasno izvajamo spiralno vrtanje, vrezovanje navojev in posnemanje z enim orodjem. (3 procesi).

PREDNOSTI NAVOJNIH REZKARJEV AT

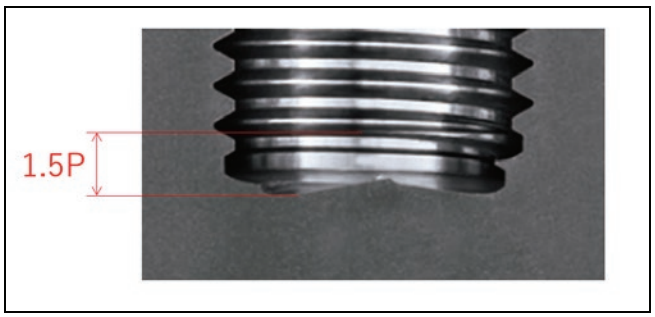
Tveganje nenadnega zloma orodja je mogoče zmanjšati na najmanjšo možno mero, če odrezke razbijemo na majhne in obvladljive delce, ki jih lahko učinkovito odvajamo. Ker navojni rezkar istočasno izdeluje izvrtino in navoj dosežemo združitev dveh procesov v enega.



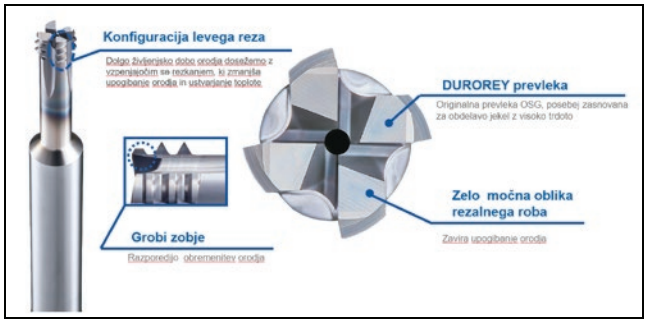
Pri konvencionalnem postopku izdelave navoja sta vrtanje izvrtine v kaljeno jeklo in nato vrezovanje navoja zahtevna postopka in se oba lahko končata z lomom orodja. Pri izdelavi predhodne izvrtine za navoj moramo upoštevati konico svedra in dolžino nepopolnega navoja. To lahko predstavlja težavo, ko in imamo predpisano globino navoja in smo omejeni z debelino obdelovanca.



Pri uporabi navojnih rezkarjev OSG AT pa imamo na dnu samo 1,5P nepopolnega navoja kar pomeni, da lahko na materialu enake debeline izdelamo bistveno globlji navoj.



Zanj sta značilni geometrija levega reza in zelo močna konfiguracija rezilnega robu, ki zmanjšuje upogibanje rezkarja. Dolgo življenjsko dobo orodja dosežemo z vzpenjajočim se rezkanjem, ki zmanjša upogibanje orodja in ustvarjanje toplote. Originalna prevleka **DUROREY** je posebej zasnovana za obdelavo jekel z visoko trdoto.

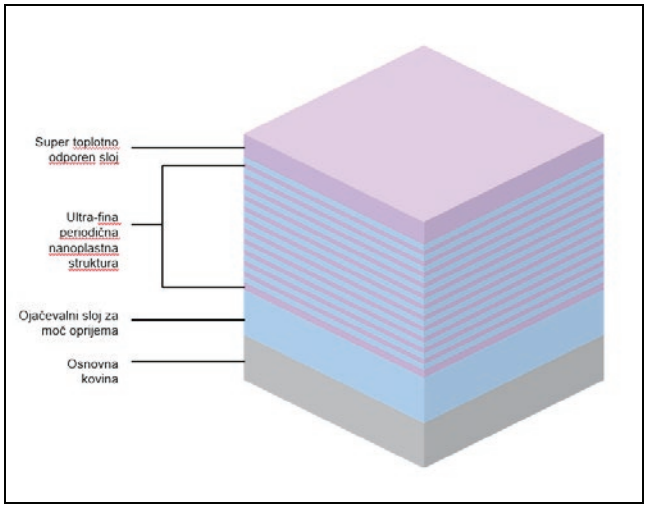


DUROREY PREVLEKA

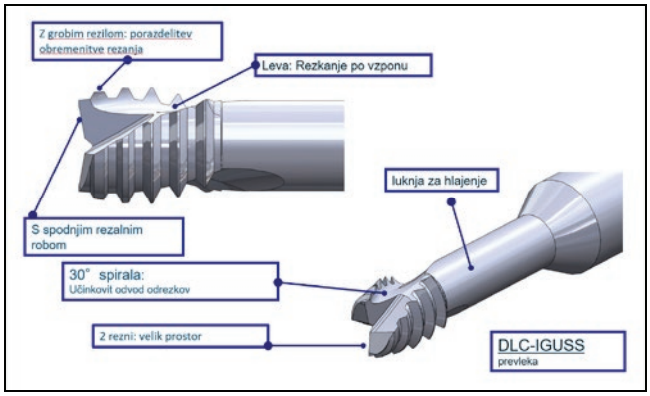
Trde prevleke omogočijo razširitev varne cone delovanja orodja. Trde prevleke znižajo temperaturo rezilnega roba, ker zmanjšajo trenje in ker zmanjšajo prenos toplote na površino orodja (zaradi manjšega koeficienta toplotne prevodnosti). Večina toplote gre zato v odrezek.

Prevleka zmanjša trenje, poveča obrabno odpornost orodnega materiala in zmanjša in prepreči sprijemanje z materialom obdelovanca.

Prevleko s takimi lastnostni je razvil OSG in jo poimenoval OSG. Prevleka ima super toplotno odporno plast in ultra-fino periodično nano-plastno strukturo. Ta zagotavlja vrhunsko žilavost in ohranja visoko toplotno in obrabno odpornost pri rezkanju jekel visoke trdote.



Za aplikacije kjer obdelujemo aluminij pa so razvili navojne rezkarje AT-2 R-SPEC. Ti imajo prevleko DLC-IGUSS, ki omogoča obdelavo v težkih pogojih.



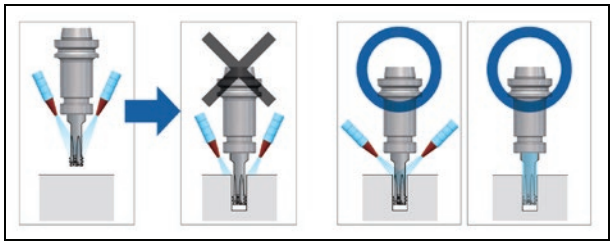
UPORABA HLADILNI SREDSTEV

Pri rezkanju navojev je potrebno nameniti posebno pozornost pravilni izbiri hladilnega sredstva. Za jekla visoke trdote je najbolj priporočena uporaba oljne megle medtem, ko uporaba hladilne tekočine skrajša življenjsko dobo orodje. Pri splošnih jeklih pa se priporoča uporabo hladilne tekočine, odsvetujejo pa uporabo oljne megle.

Obdelovalni material	AT-2	
	Oljna megla	Hladilne tekočine
Jeklo visoke trdote	◎	△
Splošna jekla	×	◎

◎ : Najboljše
△ : Skrajšanje življenjske dobe orodja
× : Ni priporočljivo

Ob uporabi navojnih rezkarjev brez hlajenja skozi center je potrebno pravilno usmeriti dovod hladilnega sredstva.



6 PODPORNA ORODJA ZA NASTAVITEV NAVOJNIH REZKARJEV

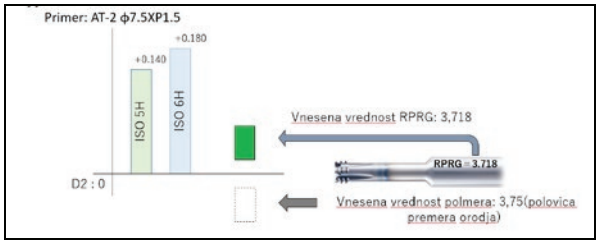
Za pomoč pri nastavitvi navojnega rezkarja so nam na voljo tri podporna orodja in sicer:

- RPRG
- DCT
- ThreadPro

RPRG

Navojni rezkar potrebuje veliko korekcij programa preden lahko pričnemo s proizvodnjo. Z zmanjšanjem števila popravkov pri lahko skrajšate čas nastavitve orodja. Kaj je RPRG? Običajno nas programska oprema CAM vpraša za premer orodja. Tukaj moramo vnesti RPRG. Za veliko navojnih rezkarjev se RPRG razlikuje od polovice premera. Podatek RPRG je podan na embalaži navojnega rezkarja in na samem steblu .

V primeru, da podamo polovico premera navojnega rezkarja navoj ne bo izdelan v predpisani toleranci, zato je potrebno namesto polovice premera navojnega rezkarja podati vrednost RPRG.

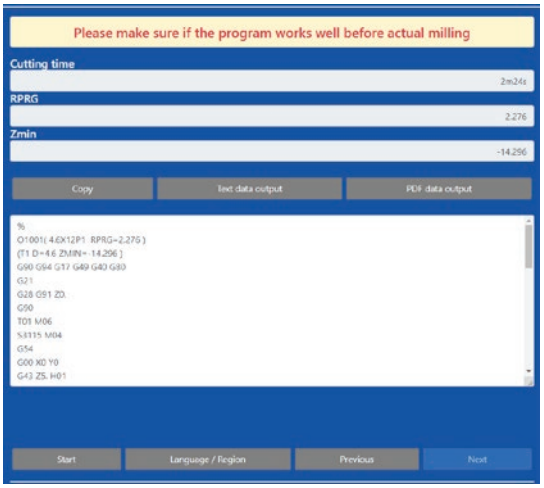


Izdelan navoj preizkusimo in izmerimo premer koraka s kontrolnikom navoja DCT ter po potrebi prilagodimo premer tega programa za odmik. DCT je orodje, ki lahko izmeri premer koraka na vhodu notranjega navoja.

KAKO IZDELATI PROGRAM ZA REZKANJE NAVOJEV?

S programom ThreadPro lahko zelo preprosto izdelate obdelovalni program za navojne rezkarje OSG.

Delo s programom je enostavno in nam omogoča, da v nekaj korakih izdelamo program.



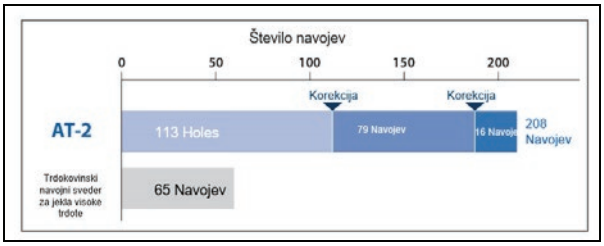
APLIKACIJE

Z navojnimi rezkarji AT-2 je odpravljen nenadnen zlom orodja zaradi slabega odvajanja odrezkov, kar operaterjem omogoča enostavno delo. Z združevanjem vrtanja in vrezovanja navojev v en sam postopek se izboljša učinkovitost obdelave, hkrati pa se zmanjšajo tudi stroški orodja. AT-2 je primeren za široko paleto materialov, kot so jeklo visoke trdote, nerjaveče jeklo, neželezne kovine in toplotno odporne zlitine.

PRIMERI UPORABE NAVOJNIH REZKARJEV

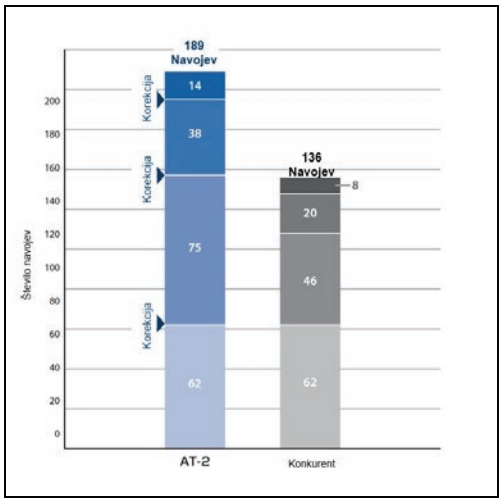
Uporaba navojnih rezkarjev pri jeklu 1,2379 (60 HRC) je zelo učinkovita. Pri vrezovanju navojev je življenska doba navojnega rezkarja bistveno daljša od navojnega svedra.

Orodje	AT-2 Dia. 6.2 x 16 P1.25	Trdokovinski navojni sveder za jekla visoke trdote M8 x 1.25 3D
Material	1.2379 (60 HRC)	
Rezilna hitrost	45 m/min (2,310 min⁻¹)	2 m/min (80 min⁻¹)
Pomik	83 mm/min (0.04 mm/vrt)	100 mm/min
Dimenzija izvrtine	brez	Premer 6.8 x 23.5 mm (slepa)
Notranji navoj	M8 x 1.25	
Globina navoja	16 mm (2D)	
Hlajenje	Oljna megla	Emulzija
Stroj	Horizontalni center (BT40)	Vertikalni center(BT40)



V primerjavi s konkurenčnim navojnim rezkarjem, kjer je potrebno izdelati predhodne izvrtine, je ob enakem številu korekcij orodja življenjska doba bistveno daljša in posledično uporaba bolj ekonomična.

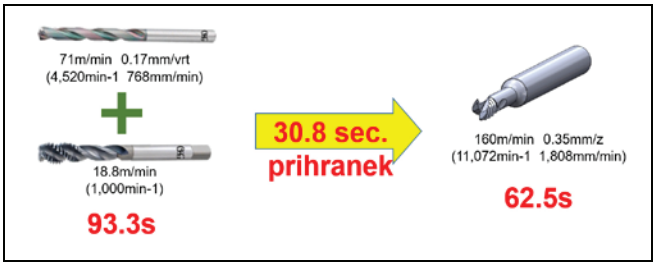
Velikost	AT-2 Dia. 7.5 x 25 P1.5
Material	1.2379 (60 HRC)
Rezilna hitrost	35 m/min (1,485 min⁻¹)
Pomik	56 mm/min (0.038 mm/t)
Notranji navoj	M10 x 1.5
Globina navoja	22.5 mm
Hlajenej	Oljna megla
Stroj	Vertikalni obdelovalni center (HSK63)



Pri obdelavi odlitkov se pogosto srečujemo s problematiko toleranc. Livarji v veliki večini primerov predhodno odlijejo luknje za navoje. Zaradi napak in odstopanj pri odlitkih v veliki večini primerov prihaja do težav s tolerancami navojev, saj se navojni sveder prilagodi predodliti luknji. Navojni rezkar AT-2 R-SPEC pa zaradi svoje geometrije in lastnosti izdela navoj točno po zahtevah, saj nepravilno in nekakovostno predodlita luknja nima nobenega vpliva nanj. V navedenih primerih je razviden tudi prihranek pri izdelavi navoja.

Primer: Vrtanje luknje in vrezovanja navoja

- Notranji navoj : M6X1
- Globina navoja : 12mm
- Luknja : Φ5
- Stroj : BT40 horizontalni obdelovalni center
- Hlajenje : emulzija
- Material : AlSi11Cu3 Aluminijeva zlitina
- Št. navojev : 13



Primer: Izdelava navoja v predodlite luknje

- Navoj : M6X1
- Globina navoja : 12mm
- Izvrtina : Φ5
- Stroj : HSK50 vertikalni center
- Hlajenje : Emulzija
- Material : A6061-T6 Valjan aluminij

ZAKLJUČEK

Navojni rezkarji proizvajalca OSG poleg visoke učinkovitosti ne zahtevajo vnaprej izdelanih izvrtin in omogočajo obdelavo v težkih pogojih. Z navojnimi rezkarji AT-2 lahko obdelujemo material do 65 HRC s tem, da lahko izvajamo spiralno vrtanje in vrezovanje navojev z enim orodjem. (2 procesa). Z navojnimi rezkarji WH-EM-PNC lahko obdelujemo material do 55 HRC ter istočasno izvajamo spiralno vrtanje, vrezovanje navojev in posnemanje robu z enim orodjem. (3 procesi).

Podobno tudi navojni rezkarji AT-2 R-SPEC ne zahtevajo vnaprej izvrtanih lukenj. Razvili so jih za vrezovanje navojev v lite luknje. Z njimi lahko obdelujemo aluminij z zračnim hlajenjem in nam omogočajo obdelavo v težavnejših pogojih, kjer olja ni mogoče uporabiti (kot so elektronski deli itd.)

Programska oprema **Thread Pro** nam omogoča enostavno izdelavo programa, s pomočjo podatka **RPRG** zmanjšamo število popravkov programa in posledično skrajšamo čas nastavitve orodja, **DCT** pa nam pomaga skrajšati čas nastavitve in vizualizira premer koraka AT-2.

www.bts-company.com
www.osgeurope.com

CONFORMAL COOLING MADE BY CONTURA® - THE SOLUTION OF COST SAVING AND INCREASING OF THE PRODUCTIVITY

Cem Baris ÖZGÜVEN, Jörn SENGELAUB
CONTURA-MTC GmbH

EXTRACT

Injection moulding process still has huge potential for being more productive. The most important point to have better productivity is to focus on cooling/heating system on the injection molds which is forgetting by most of people. Even the improvement is possible with current running molds. Conformal cooling is the key for topic of productivity. Perfect mold in productivity side means best managed temperature mold which gives cooling time reduction as well as better part quality. Conformal cooling also gives permission to use Varitoherm in an energy efficient way. Using this both technology (conformal cooling separately or together) could reduce the needed energy and carbon footprint in injection molding process. The proven technology made by CONTURA® deserves to implement more or less all mold to be able to start reducing carbon footprint. The topic of carbon footprint reduction must be topic of today not only in the future.

1 INTRODUCTION

Nowadays, the expectations from plastic parts are increasing on the other hand, the demand is cost reduction for more predictable part production. Besides this kind of pressures on all sectors, entire world is facing some more difficulties. Even inflation rate is getting higher for all over the world however yearly cost reduction requests are still topic on the desk more or less for all plastic parts.

Due to all of these reasons, injection molding process need to have perfect temperature management. From beginning till the end of production which starts from the material handling until the end where we have the final product.

As known, plastic injection process is based on putting energy into the polymer granulate to liquefy the granulate. Under pressure, we can inject his liquefied polymers, the melt, into the mold. To give the part the needed shape, the energy, which we brought in, must be taken out again, to solidify the melt.

In a stable and sustainable process, this energy flows should be balanced. In order to balance the energy flows, injection molds need to have an optimised temperature management. Input energy source of the system is the barrel and the hotrunner. For getting the energy out of the process, we have three factors (Fig.1), the influence of these factors is really limited. That's why the main source of getting energy out of the process is done by the coolant channels of the mold. This shows us that the mold works has a 3-dimensional heat exchanger. As shown in (Fig.1) the mold coolant is the only factor, which can take energy out of the process, or bringing energy into the process. The mold cooling/heating system is the balancing factor to have a stable and sustainable process.

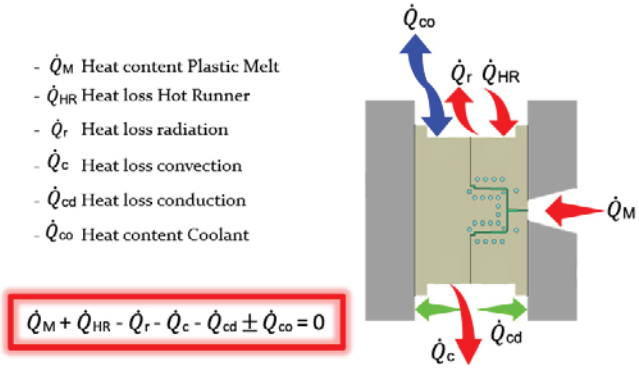


Fig. 1: Heat balance room injection molds

2 THE DRIVEN FACTORS OF PRODUCTIVITY IN INJECTION MOLDING

Productivity of the injection molding process is that quite related with the heat exchange performance of the mold. The design of the Cooling/Heating channels defined the efficiency of the mold regarding better heat exchangeand a more homogenous heat distribution. Homogenous mold surface temperature is crucial factor for production, because mold surface temperature differences have a major impact on several part characteristics like:

- Differential shrinkage
- Dimensional stability
- Warpage
- Surface quality
- Mechanical properties (Crystallinity)
- Process stability
- Life time of the part and mold
- Maintenance requirement
- Productivity

The mold temperature management shows a big impact on part quality as well as process stability. Furthermore, the optimized thermal household, have also a big influence on the efficiency. Therefore, the thermal optimization shows a huge improving potential for injection molds.

One of the most interesting points for all part producer is reducing the per piece price for the production. The cycle time structure for producing a plastic part is divided 5 different steps which are:

1. Mold closing
2. Injection phase
3. Holding phase
4. Residual cooling phase
5. Mold opening and part ejection

Total cooling time is the biggest portion of process. The holding time is also part of the total cooling time. In this step we implement pressure to the cavity, and the mold continues to cool down the plastic part.

Total cooling time is defined according to the following equation.

Total Cooling Time*(sec.)* = Residual Cooling Time*(sec.)* + Holding Time*(sec.)*

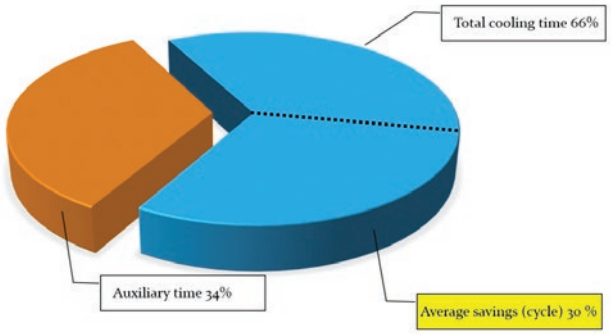


Fig. 2: Cycle Time structure with possible savings

Therefore, the main focus to increase the productivity should be reducing the cooling time. Cooling/heating channel design of the mold should be at the top of the To-Do list during the mold design, instead being last thing done after the everything is designed.

Using improved coolant channels in the mold isn't limited to cooling time reduction it gives also a big advantage on the part quality and reduction of scrap rates. In fact, scrap rate means pure wasting of resources, like raw material as well as energy. This also increase the carbon footprint of the product, and nowadays it should be the main target of all, to reduce the carbon footprint of the produced products.

Especially for painted or secondary processed parts, like coated plastic parts, scrap is more critical, because such parts are mostly not recyclable.

That shows that the mold temperature management is a crucial factor for the stability of the processes, the quality of the produced parts as well as the impact on the environment. Optimized mold temperature management should be considered to reach the most sustainable process.

2.1 Cooling/Heating Channels

The main duty of the coolant channels is to keep the mold in a stable thermal condition all over the molding cycle. Before the injection, the coolant channels ensure a stable temperature on the mold surface. When we inject the plastic melt, the temperature on the mold surface will increase, due to the heat content of the plastic melt. The coolant channels should transfer the heat out of the process. As mentioned before this transfer ensures that the plastic melt change the physical state from liquid to solid, which allows us to eject the part. Driving force for the energy transfer is the ΔT between coolant temperature and melt temperature. As an example, if we are using a high heat plastic material with a melt temperature of 320°C, even 130°C coolant temperature means that we are cooling the melt actively.

This is the standard procedure for isothermal processing. In some special processes we have a different working principle. For example, Variotherm (Rapid Heat&Cool) process. On the Variotherm process, we are changing from a stable mold temperature to a variable mold temperature (Variotherm). For the most polymers, the mold is heated up before injecting the plastic melt. After the volumetric filling of the part, the mold temperature is switch to cool the mold. Using for example Variotherm molding for ABS/PC, we are heating the mold surface to approximately 140°C, a temperature over the glass transition temperature, by using 160°C feeding water temperature. To be able to eject the part, we have to cool down the mold to around 80°C, for this, we are using 60°C feeding water.

Consequently, channels work on both direction for heating and for cooling.

Most of injection molds on production still have standard coolant channels. In this case, standard doesn't mean using a different technique as standard drilled holes, it means that we don't have an optimized solution in regards to the thermal household of the mold. Even drilled conventional coolant channels can be easily improved by using engineering knowledge based on thermal dynamics and fluid dynamics. The focus should be the thermal needs of the plastic parts based on the part design.

To eliminate another factor which has a bad influence on the thermal household of the mold, we have to minimize the influence of the thermal conductivity of the mold steel. To ensure this our focus is on reducing the thermal active mass in the mold. In simpler terms we have to reduce the distance between coolant channels and the mold surface. The one level better solution is called conformal cooling.

2.2 Conformal Cooling

When cooling channels follows the part geometry we are calling this Conformal Cooling. But this is not meaning of only following the part design completely. But it is more then just following the part geometry in always the same distance. There are influencing factors which should be considered during the design of the conformal cooling layout. Two of them are the thermal conductivity of the plastic material as well as differences in wall thickness.

As the CONTURA®-MTC GmbH we are a engineering solution company which provides best possible mold temperature management improvements, if wanted also as a turnkey solution. The solution could include mold inserts done with special technic like vacuum brazing or with drilled design solution. We are also using FEM Analysis tools, thermographic analysis as well as technical support on the machine, with or service technicians.

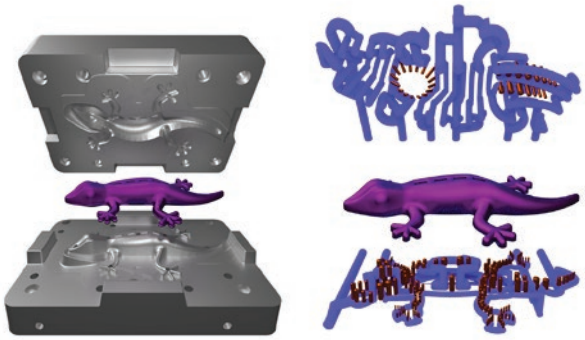


Fig. 3: Conformal Cooling Channels Design

The complexity of the plastic part is not the only factor that is crucial for an optimized solution. More less every mold has some thermal bottlenecks. These thermal bottlenecks are in the areas that are hard to reach with water channels under the mold surface. In such a situation, some special heat transfer elements, with a higher heat conductivity, can create big opportunity. In our solution we can use brazing technology to braze the heat transfer elements firmly into the steel skeleton. (Fig.4) Together with the steel, the average heat conductivity is higher than CuBe alloys. On the other hand, there are huge advantages, because the heat transfer elements are inside of the hardened tool steel. The surface, which is in contact with the plastic material, is pure hardened steel, with all the advantages that we know from this mold material.

Fig. 4: CONTURA®-MTC Cooling Solution

With CONTURA®-MTC Cooling Solutions create a lot of possibilities.

These are:

- Cooling Time Reduction
- Best Dimensional Performance on Part
- Longer Life Time of Plastic Part
- Better Mechanical Properties
- Less Mold Correction Loop Requirement
- More Robust Process Stability

Last but not least, CONTURA®-MTC Solutions give an opportunity to use Variotherm (Rapid Heat & Cool) Process, with an acceptable input of energy.

2.3 Variotherm (Rapid Heat & Cool)

As explained before Variothermal processing means, that we changing the mold surface temperature during one injection molding cycle from hot to cold and back to hot. To be able to switch the temperature of the feeding water, during the process, we need to implement a special Variothermal Thermoregulator. This device should be the leading device for the process. Using a temperature sensor in the mold, the device sending a signal to the injection molding machine to start the process, after reaching the needed temperature for injection. (Fig.5) As explained before we are switching the temperature after the volumetric filling of the part. After we eject the plastic part we start the heating for the next shot. Obviously, the driven factor for this process is the amount of steel, which have to be heated and cooled from shot to shot. We can calculate the needed power consumption for changing the temperature of a certain amount of steel in a given time by a defined ΔT. To lower this needed heating power, we have two opportunities. The first one is to increase the heating time, this would mean that we also increase the cycle time. The second chance is to decrease the amount of steel, which is heated from shot to shot. This is the aim of CONTURA®, using your technology to ensure a Rapid Heat&Cool process with less energy consumption as possible.

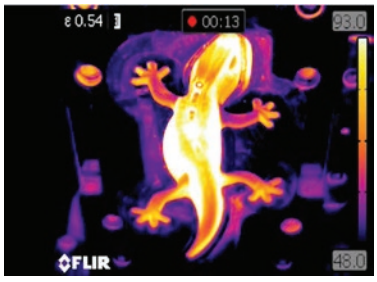


Fig. 5: Variotherm Process Thermal Photo

The influencing factors of the reaction of the mold, by changing the temperature of the coolant, are shown in the following equation. (Fig.6)

$$\tau_m = \frac{\rho_m c_m l_m^2}{K_m}\left(1 + \frac{2WK_m}{h\pi D l_m}\right)$$

ρ_m is the mold density c_m is the mold specific heat
l_m is the vertical distance from conformal channels to mold wall
K_m is the mold thermal conductivity

Fig. 6: Mold Insert Reaction Constant

The equation shows that the vertical distance of the conformal channels has the biggest impact on the thermal reaction of the mold. The influence of the vertical distance is a squared factor in this equation. Comparing the influence of the heat conductivity of the tool material and the vertical distance of the conformal cooling channels, we see directly that the heat conductivity is a linear factor and the vertical distance a squared factor. If we could double the heat conductivity the influence would be factor 2, if we could halve the distance of the conformal channels influence would be factor 4. Being able to reduce the heating power, in the same cycle time means that we have a big potential of energy saving, which has a big influence on reducing the carbon footprint of the plastic part.

An example for optimized Thermal mass is shown below. Using FEM Analysis tools, we are also able to show how effective this reduction is during the process. The heating zone is limited to the area of the contour of the mold inserts. (Fig.7)

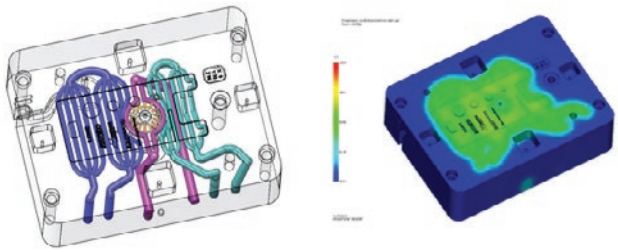


Fig. 7: Variotherm Thermal Mass Amount

Variotherm processing is mostly used for:

- Weldline, Flow Mark or Silver Streaks Elimination
- Painting Process Elimination
- Secondary Process Scrap Rate Reduction
- Better Optical Results for Lens Part
- Better and More Homogenous Mechanical Properties
- Gloss adjustment on the molding process directly

Fig. 8: Variotherm vs. Conventional Molding

Biggest usage, of the technology, in the industry, is still paint elimination, which has quite good arguments. Firstly, painted parts are mostly unrecyclable. Furthermore, secondary processes always create some a higher scrap rate that means for having requested part we need to produce more part from molding process. As mentioned before if the parts cannot be recycled, they have to be disposed as hazardous waste. Last but not least a secondary process will increase the price of the plastic part dramatically, due all give fact above, as well as cost for the secondary process and the special handling after this process.

Due to these reasons, Variotherm is a solution for single process control and reduce scrap rate. There are some more benefits to use Variotherm like less pressure requirement on filling phase.

Fig. 9: Variotherm Part Example

This technology gives the opportunity to have a much better surface texture on the plastic part. (Fig.9) Even forming of microstructures is much easier due to the higher mold surface temperature during the filling. It is also possible to adjust the gloss of the parts, in the process by changing the temperature of the mold surface during injection and holding phase.

This show, the reason for selecting Variothermal processing should not be limited to high gloss applications like piano black parts.

Variothermal processing might open a new dimension of injection molding, which gives us the possibility to produce parts that are more complex, in regards to the shape, the structure or the appearance.

3 CONCLUSIONS

There is huge potential under the contour of the mold insert. This hidden potential can be used by optimized coolant channels. This means every single project deserves to investigate the hidden potential on the temperature management of mold. Cooling time reduction also reduce energy consumption of each produced part beside that means having less lead time of each delivery. On the other hand, reducing scrap rate is crucial for reducing material usage as well as energy saving. Based on more than 20 years experienced in mold temperature management optimization, we found an average saving potential of %30 cycle time in injection molding processes. This improvement could be implementable for current running molds as well as for new molds. For both we are able to calculate the possible savings upfront, which means that we are able to make a ROI calculation during the first analysis to see the value of the optimization

Furthermore, using improved coolant channels, maybe together with Variothermal processing allows us to eliminate secondary process like painting. This can be another point that reduces the carbon footprint.

In conclusion, that productivity and sustainability are the biggest topics to save the environment, the thermal household of injection mold should be more focused in the industry.

Conformal cooling, based on engineering knowledge, is a proven state of the art technology, which ensures a higher productivity, by reducing the cycle time, reducing mold start up times, reducing scrap rates. Combined with integrated technologies like Variothermal molding we are also able to reduce secondary processes. This will have a big impact on the environment by reducing the carbon footprint of produced parts.

References:

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

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

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

[4] „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

[5] Optimised Mould Temperature Control, Replaces, Olaf Zöllner - ATI 1104 d,e dated 30.11.97 – Bayer Application Technology Information

DEBURRING AND CLEANING WITH HIGH PRESSURE

Günther ZIPPEL
Piller Entgrattechnik GmbH

EXTRACT

Piller's deburring technology for industrial parts cleaning using patented processes: the water or cutting oil jet is targeted with a pressure of up to 2000 bar directly at the workpieces requiring treatment, in order to remove burrs, chips and other impurities.

1 INTRODUCTION

Intelligent, energy-optimised, future orientated; that‘s the basis of the technology used for part cleaning in Piller deburring technology.

Since its founding in 1995, Piller Entgrattechnik GmbH has been a leading provider in the field of industrial high-pressure jet cleaning using water, cutting oil and coolant, with state-of-the-art machinery solutions that are optimally tuned to the respective customers ‘needs.

2 TECHNOLOGY

With pressure levels up to 2000 bar (high pressure), patented procedures enable the water or cutting oil jet to be precisely aimed at the workpiece being machined, to remove burrs, chips and other contaminations.

From the company headquarters in Ditzingen/Baden-Württemberg in Germany, we deliver our machines for industrial part HP-deburring and cleaning all around the world to a wide range of industries – such as the automobile, hydraulic industries, and pneumatic or medical technologies.

Creating new technological innovations, redefining the boundaries of feasibility in HP-deburring, industrial cleaning technology, and reaching beyond them; that‘s our daily inspiration.

With a continually expanding team, we develop efficient solutions for our customers and also for the demands and requirements of the future

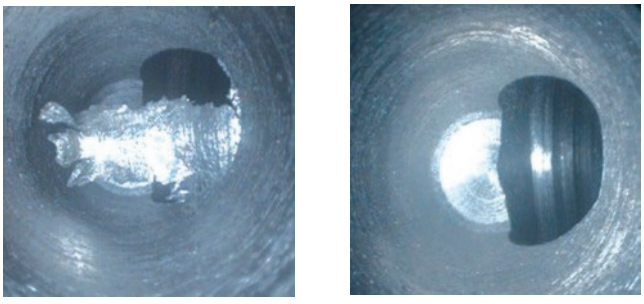
With patented high-pressure jet techniques, our systems achieve the best results on process-safe cleanliness and meet the most demanding requirements for residual contamination removal.

Our full service includes consultation and planning assistance provided by our expert engineers and project managers.

With a solid foundation of knowledge about the industry and process, customised processing strategies are created based on specific demands.

We use this knowledge to adapt one of our standard machines or we construct and produce a customer-specific system.

Our service spectrum includes installation and complete Life-Cycle-Management with maintenance and repair service. Adaptations and expansions of existing systems are possible at all times.



Picture 1: Before and after burr-removal

With a comprehensive range of standard machines and virtually unlimited production possibilities for customer-specific systems, we cover a wide range of the most diverse and demanding industrial HP-deburring and cleaning requirements in the technical industry.

The most complex component shapes, smallest possible undercut boreholes/inlets and highly inaccessible regions are achiervable for our deburring procedures.

We establish not only sub-processes such as deburring and cleaning, but can also efficiently map out the entire process including controlling and handling the component, covering the span from pre-cleaning, deburring, fine cleaning, to drying or cooling.

We design the fixtures and water tools ourselves – because this way we can implement the individual processing strategies and achieve the best results in reproducible quality.

So even the strict residual contamination requirements in VDA (Association of the German Automotive Industry) norm 19 for the automotive industry and suppliers are achievable with our innovative cleaning systems, even with short cycle times.

Picture 2: Example Vectorjet III

No chance for chips and burrs

Highly innovative high-pressure jet cleaning system with water, cutting oil and cooling lubricant Patented, unique high-pressure water jet techniques

- For all levels of impurities and highly complex shapes
- Flexibly applicable system concepts specific and variable nozzle equipment
- For parts ranging from small to large, heavy components
- For manual or automated loading
- For moderate to high production quantities and broad product ranges
- For very fast loading processes in parallel to process time
- Adaptable to any space requirements
- Optimised solutions in terms of operational costs and process

The advantages of Piller`s CNC HP-deburring- and cleaning process for all customer`s demands

Best-in-class cycle times

- CNC axes with high positioning feed
- Vectorjet III: due to 3x Z-axis tool change 0,3s
- Optional dual spindle version for shorter cycletime
- Due to swivel table parts exchange 2,5s
- Multijet: rotary indexing system
- Robojet Twin: double chamber principle,
- parts exchange < 0,1s (switchover time of chambers)

Lowest TCO-Cost

- Low temperature HP-cleaning concept
- CNC pre-drying: spinning & Impulse blowing
- Pressure drop optimized media routing
- Longlife components
- Low space requirement
- Cost-optimal service
- Accessibility and robust design
- Own developed HP-valves: low-wear and regenerable

Full process integration

- Plus Family: pre-washing, high-pressure, fine-washing, DI-water rinsing, vacuum-drying
- HP-prozess remains decisive for the cycle time
- All advanteges of Piller`s CNC concept are provided in the overall process chain

Advantages due to flexibility

- 6 side operations available by 5-axis approach in one clamping position
- Quickly convertible (also available in automated set-ups)
- Very economical even with small batches
- High reconfigurability
- Standard CNC-programming instead of complexe teaching

Highest available process quality

- CNC HP-deburring, -cleaning and CNC pre-drying
- Own experience as user: 24/7 inhouse subcontracting
- Optimized filter cascade unit
- Top notch pump technology and own developed HP-valves with very low pressure drop
- Self-cleaning small chambers to avoid re-contamination
- Carry-over optimized (spinning)
- Ergonomic and intuitive operation
- Highest level of work safety

3. CONCLUSIONS

Customer Advantages choosing a Piller machine:

- Reduced investment
- Output increase
- Reduced energy consumption
- Reduction of foot print
- Reduced control / automation installation
- High-Flexibility of the complete System
- High variety of Variants possible
- High Reuseability
- TCO-reduction due to our modular system
- Mature and durable Technology
- Ease of spare parts supply
- High Reuseability
- Reduced amount of Training

PREPOZNAVANJE PROSTORSKE OBRABE REZALNIH ORODIJ S 3D SKENIRANJEM

Jernej GRČAR, Franci PUŠAVEC
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo.

IZVLEČEK

Spremljanje obrabe rezalnega orodja pri procesu struženja, je ključnega pomena za zagotavljaje učinkovitosti obdelave, željene kvalitete površine obdelovanca in mehanske integritete rezalnega dela orodja. V laboratoriju LABOD na fakulteti za strojništvo v Ljubljani, smo za doseganje večje stopnje avtomatizacije pri merjenju obrabe rezalnega dela orodja, razvili sistem merjenja, ki obrabo meri v obdelovalnem prostoru samega stroja. Sistem temelji na metodi vzvratnega inženirstva, ki predstavlja rekonstrukcijo v realnosti obstoječe 3D oblike v digitalno okolje in njeno analizo.

1 UVOD

Učinkovitost obdelave, željena kvaliteta površine obdelovanca in mehanska integriteta rezalnega dela orodja, so značilnosti, ki so povezane s produktivnostjo procesa in njegovo ekonomsko upravičenostjo. V ta namen so bile razvite številne metode za prepoznavo obrabe, kjer pa je pod vprašaj mnogokrat postavljena stopnja avtomatizacije, zanesljivost meritev in njihova relevantnost. Slednja se kaže predvsem pri tako imenovanih posrednih metodah merjenja obrabe, med katere spada spremljanje rezalnih sil, vibracij, akustične emisije, itd., saj podajajo oceno obrabe in ne dejanskih meritev le-te. Nezanesljivost lahko zaradi subjektivnosti pri izvajanju meritev pripišemo sicer najbolj razširjeni metodi za prepoznavo obrabe, ki se izvaja z orodjarskim mikroskopom. Uvrščamo jo med neposredne metode merjenja, pri katerih gre za merjenje geometrije rezalnega orodja pretežno v dveh (redko v treh) dimenzijah. Mednje uvrščamo tudi optično merjenje s CCD kamerami in elektronskim mikroskopom (SEM), interferometrijo, variacijo fokusa, projekcijo strukturiranih svetlobnih vzorcev s stereo vidom, itd. Naštete metode podajajo dejanske parametre obrabe, vendar princip merjenja in velikost večine takšnih sistemov ne omogoča merjenja direktno na stroju ter merjenja volumske obrabe. Rezalni del orodja je potrebno iz obdelovalnega stroja izpenjati in prenesti na lokacijo merjenja. Skupaj z izvajanjem meritev je tak pristop dolgotrajen in predstavlja zaviranje avtomatizacije [1, 2].

2 METODOLOGIJA MERJENJA

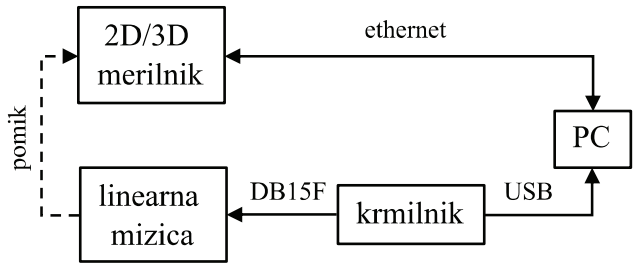
2.1 Sistem in komponente

Za večjo stopnjo avtomatizacije, bolj zanesljive meritve in relevantne rezultate, smo zato razvili merilni sistem, ki omogoča merjenje obrabe rezalnega dela orodja med menjavo obdelovanca, ko orodje miruje. Sistem je tako postavljen v obdelovalnem prostoru stroja, znotraj katerega izvaja rekonstrukcijo oblike obrabljenega orodja v digitalnem okolju. Z volumsko primerjavo modelov, lahko sistem izkoriščamo za prepoznavo obrabe na vitalnih površinah orodja (prosti ploskvi (*VB*), cepilni ploskvi, itd.). Gre za parametre, ki predstavljajo kriterij obstojnosti in odločitev, kdaj je potrebno rezalno orodje menjati ali naostriti.

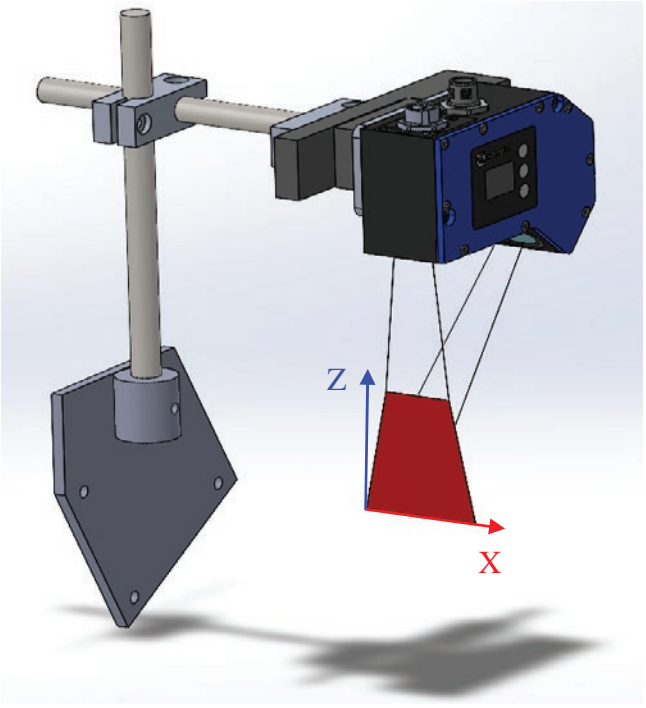
Slika 1 prikazuje shemo sistema, ki sestoji iz računalnika, 2D/3D profilnega merilnika, linearne mizice in krmilnika. Komunikacija med merilnikom in računalnikom poteka preko ethernet povezave. Pri komunikaciji med linearno mizico in računalnikom pa posreduje še krmilnik, ki je z linearno mizico povezan preko DB15F kabla in z računalnikom preko USB kabla. Fizična povezava med linearno mizico in merilnikom omogoča tudi pomik slednjega.

Merilnik je 2D/3D laserski profilomer z oznako MLWL131 podjetja Wenglor. Merilnik s projekcijo laserske linije na objekt in eno kamero, ki deformacijo projicirane laserske linije spremlja pod znanim triangulacijskim kotom, tvori višinski

točkovni profil. Po višini profila je resolucija merilnika med 2 in 4.9 µm (*Z* koordinata) in vzdolž profila 17 do 26 µm (*X* koordinata). Delovno območje merilnika v *Z* smeri je med 70 in 130 mm ter v *X* smeri 30 do 52 mm. Da lahko na podlagi profilov tvorimo 3D oblak točk, moramo zagotoviti že omenjeni pomik v prostoru. To dosegamo z motorizirano linearno mizico z oznako 8MT173-DCE podjetja Standa, ki ima vgrajen tudi enkoder. Območje pomika linearne mizice znaša 30 mm in resolucija enkoderja 0.058 µm. Merilni sistem prikazuje slika 2. Z nje je razvidna še konstrukcija, ki omogoča povezavo omenjenih elementov in postavitev ter fiksacijo v obdelovalni prostor stroja. Na sliki 2 pa ni razvidnega računalnika, katerega funkcija je upravljanje sistema, s posebej za to razvitim uporabniškim vmesnikom.



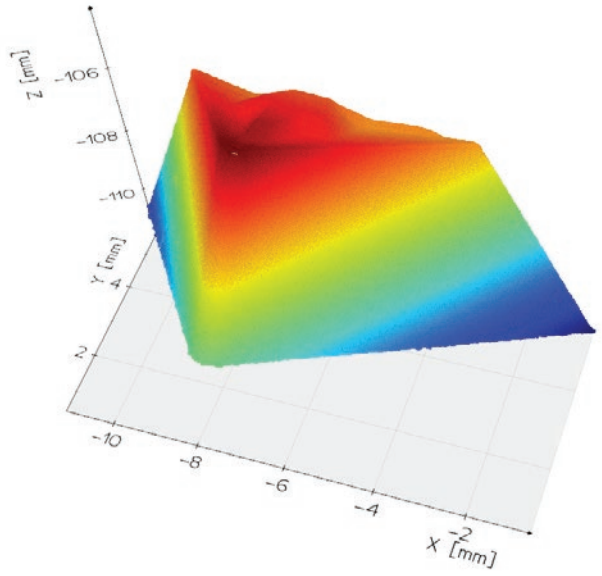
Slika 1: Shema merilnega sistema



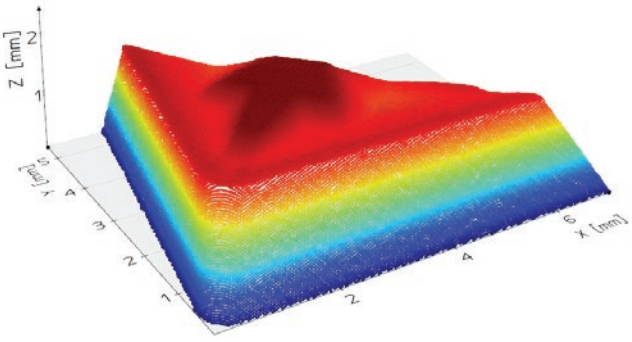
Slika 2: Merilni sistem

2.2 Algoritem prepoznave obrabe

Ideja za prepoznavo obrabe proste ploskve (*VB*) je ta, da z zajemom posameznih profilov vzdolž rezalnega dela orodja oziroma rezalne ploščice, tvorimo prostorski oblak točk (sekvenco vzporednih profilov). Z namenom primerjave je potrebno tvoriti oblak točk referenčnega neobrabljenega in obrabljenega orodja. V prvi fazi izvedemo globalno poravnavo in prilagoditev oblaka točk na željen obseg. To dosegamo z avtomatsko prepoznavo značilnih ploskev rezalnega orodja, rotacijo, translacijo in rezanjem oblaka točk (slika 3 in 4). Za referenco to fazo izvedemo enkrat in nato oblak točk ročno dodamo v bazo, medtem ko za obrabljeno orodje ta faza poteka ob vsakem zajemu.

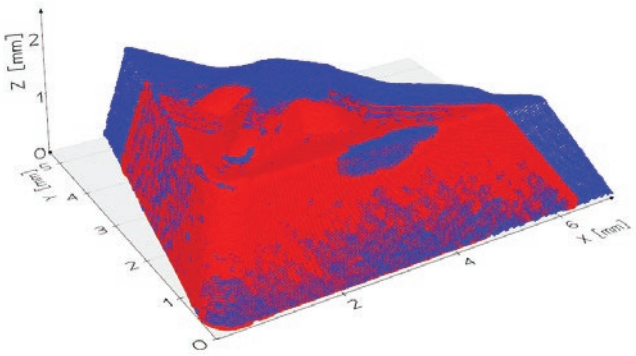


Slika 3: Zajet referenčni oblak točk



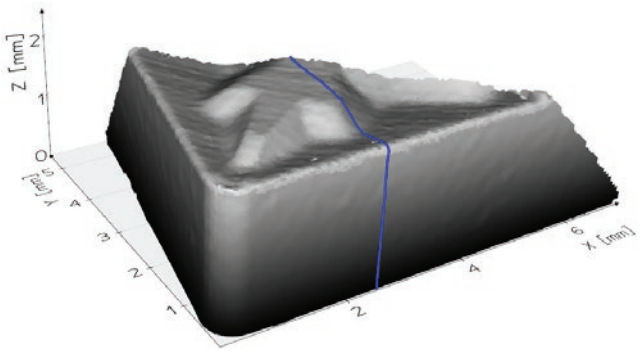
Slika 4: Globalno poravnan in prilagojen referenčni oblak točk

Referenca v drugi fazi služi za lokalno poravnavo oblaka točk obrabljenega orodja, v skupnem koordinatnem sistemu, kar dosegamo z ICP algoritmom (*ang.* Iterative Closest Point). Poravnavo prikazuje slika 5.



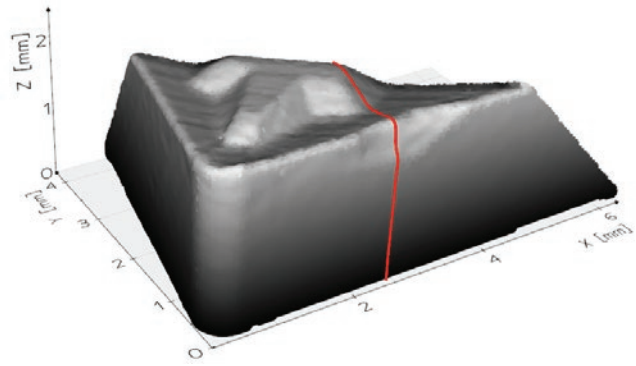
Slika 5: Poravnana oblaka točk (modro - referenčni in rdeče - obrabljen)

V tretji fazi na podlagi poravnanih oblakov točk formiramo površinska modela. Enako kot za referenčne oblake točk, referenčne površinske modele generiramo ročno samo enkrat in jih shranimo v bazo. V četrti fazi na podlagi prereza združenih površin pravokotno na primarno prosto ploskev rezalnega dela orodja, prepoznamo omenjeni parameter obrabe (avtomatsko). Prepoznava temelji na generiranih 2D profilih referenčnega in obrabljenega orodja, ki nastopata v skupnem koordinatnem sistemu (slika 6 in 7). Prerez referenčnega površinskega modela predstavlja moder profil na sliki 6 in prerez obrabljenega rdeč na sliki 7.



Slika 6: Površinski model neobrabljene konice rezalne ploščice (x = 2.5 mm)

Glavne pri tem uporabljene knjižnice, ki omogočajo delo s prostorskimi meritvami, so: Open3D [3], Trimesh [4] in Vedo [5]. Prav tako je s programskim jezikom Python realizirana komunikacija med komponentami merilnega sistema in njegovo upravljanje. V ta namen je bila v programskem okolju Qt za Python [6], razvita tudi aplikacija oziroma uporabniški vmesnik predstavljen v nadaljevanju.



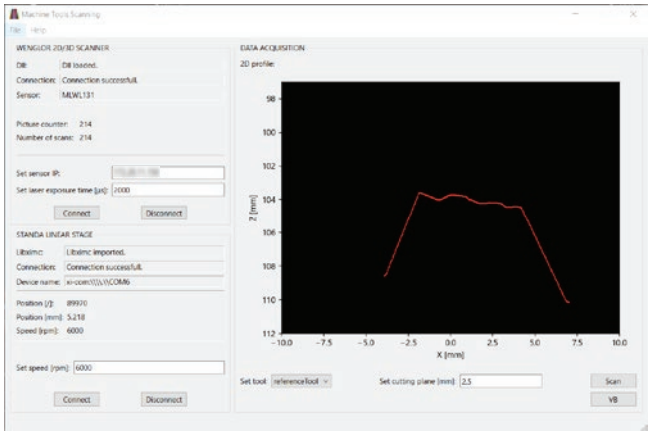
Slika 7: Površinski model obrabljene konice rezalne ploščice (x = 2.5 mm)

2.4 Uporabniški vmesnik

Uporabniški vmesnik na sliki 8, v prvi vrsti omogoča povezavo z merilnikom preko vnosa IP naslova in povezavo z linearno mizico. Ob vzpostavitvi komunikacije in kasneje zagonu meritve prikazuje tudi osnovne informacije, kot je na primer pozicija enkoderja, število zajetih profilov, itd. Dopušča pa še vpis ali urejanje ključnih parametrov za izvedbo meritve, kot so: svetlost laserske linije, hitrost pomika linearne mizice in ravnino s katero prerežemo površinska modela.

Ob uspešno vzpostavljeni povezavi lahko z uporabniškim vmesnikom s pritiskom na gumb Scan, zaženemo meritev, pri čemer je potrebno izbrati eno izmed rezalnih ploščic, shranjeno v bazi in vpisati vrednost/pozicijo rezalne ravnine. Posamezni profili, ki jih tekom meritve zajemamo in s katerimi tvorimo oblak točk, se v uporabniškem vmesniku tudi prikazujejo na grafu.

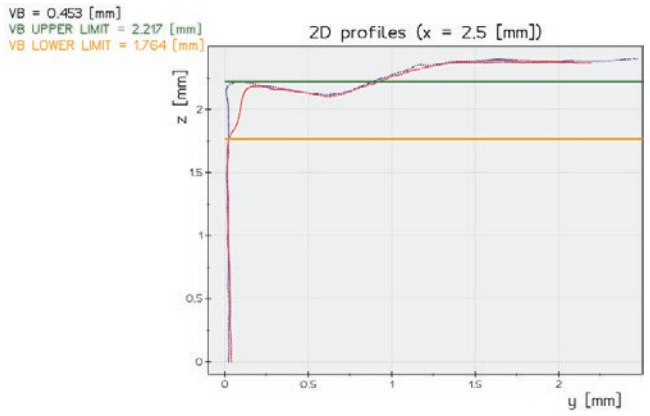
Ob končani izvedbi meritve, se s klikom na gumb VB zažene še izračun obrabe. Končni rezultat je grafični prikaz in številska vrednost parametra obrabe (slika 9).



Slika 8: Uporabniški vmesnik

3 REZULTAT

Rezultat meritve je grafično podan z 2D profiloma obrabljenega in neobrabljenega orodja, ki smo ju pridobili s prerezom v skupnem koordinatnem sistemu poravnanih površinskih modelov. Ker je prerez izveden pravokotno na primarno rezalno ploskev, lahko na podlagi profilov določimo parameter *VB*, kot prikazuje slika 9. Moder profil predstavlja referenco in rdeči obrabo.



Slika 9: Rezultat meritve

Zgornja zelena meja parametra *VB* je določena kot višina rezalnega robu reference, torej najvišjega dela na prosti rezalni ploskvi. Spodnja rumena meja pa je določena kot začetek obrabe in jo prepoznamo kot odstopanja od reference. Številski rezultat je razlika med mejama.

Ob pridobitvi obeh profilov je določitev zgornje in spodnje meje izvedena avtomatsko. Zgornjo mejo predstavlja lokalni maksimum, medtem ko prepoznava spodnje meje temelji na interpolaciji profilov prereza, ki točke po višini razporedi ekvidistančno. Na ta način je spodnja meja mesto, kjer razlika med profiloma presega določeno mejno vrednost. Celoten postopek meritve traja manj kot pol minute.

Na sliki 9 izmerjena vrednost parametra *VB* znaša 0.453 mm. Rezultat spada v območje od 0.4 do 0.5 mm, ki še dovoljuje nadaljnjo obdelavo s takšnim orodjem, pri čemer bo dosežena površina groba.

4 SKLEP

Razvit sistem omogoča merjenje ključnega kriterija obrabe orodja in sicer v času menjave obdelovanca direktno na stroju. Poleg tega je meritev, z izjemo potrebnega ročnega zagona in dodajanja referenčnih meritev v bazo, avtomatizirana, hitra in objektivna. S tem je prihranek časa, povečanje produktivnosti in zmanjšanje stroškov obdelave ter zanesljivost meritve znatna. Rezultat meritve, ki je vrednost obrabe na prosti ploskvi in način merjenja na stroju, v prihodnosti odpirata tudi nove možnosti za višjo stopnjo avtomatizacije. Podatki meritev lahko postanejo del interneta stvari (IoT), kar bi omogočalo hiter in pregleden vpogled v proces obdelave ter obrabo orodja, porabo orodja, itd. Prav tako bi podatek o obrabi v povratni zanki stroju lahko služil za odločanje o nadaljnjem obdelovanju oz. zahtevi za menjavo orodja, optimizaciji parametrov, itd. Vse to bi bil še en korak v smeri popolne avtomatizacije, ki je nepogrešljiv del industrije 4.0.

Viri:

[1] Čerče, L., Pušavec, F. in Kopač, J.: 3D cutting tool-wear monitoring in the process. *Journal of Mechanical Science and Technology*, *29*(9), 3885-3895, 2015.
[2] Rotar, V.: 3D merjenje obrabe vijačnih svedrov in krogelnih frezal - magistrsko delo magistrskega študijskega programa II. stopnje Strojništvo, 2016.
[3] Zhou, Q.-Y., Park, J. in Koltun, V.: A Modern Library for 3D Data Processing, *arXiv:1801.09847*, 2018.
[4] Trimesh (https://github.com/mikedh/trimesh)
[5] Musy, M., et al.: Vedo, a Python module for scientific analysis and visualization of 3D objects and point clouds, *Zenodo*, 2022.
[6] Qt for Python (https://doc.qt.io/qtforpython/)

KARAKTERIZACIJA POLIMERNIH MATERIALOV

Miroslav HUSKIĆ, Silvester BOLKA, Blaž NARDIN
Fakulteta za tehnologijo polimerov

IZVLEČEK

Pri nakupu polimernih materialov se običajno zanašamo na lastnosti, ki so zapisane v tehničnih listih. Pogosto pa opazimo, da se material ali izdelek ne obnašata v skladu s pričakovanji. Razlogov za to je več, lahko smo dobili material, katerega lastnosti ne ustrezajo zapisanim, uporabili neustrezen material za določeno aplikacijo, pri predelavi uporabili napačne procesne parametre, itd. Ustrezna karakterizacija materiala nam lahko pove, ali je napaka na naši strani, ali pa lahko reklamiramo material. V prispevku so na kratko predstavljene nekatere tehnike karakterizacije (infrardeča spektroskopija, diferenčna dinamična kalorimetrija, indeks tečenja, elektronska mikroskopija, termična gravimetrična analiza, dinamična mehanska analiza…) ter primeri njihove uporabe pri reševanju težav v proizvodnji in reklamacij.

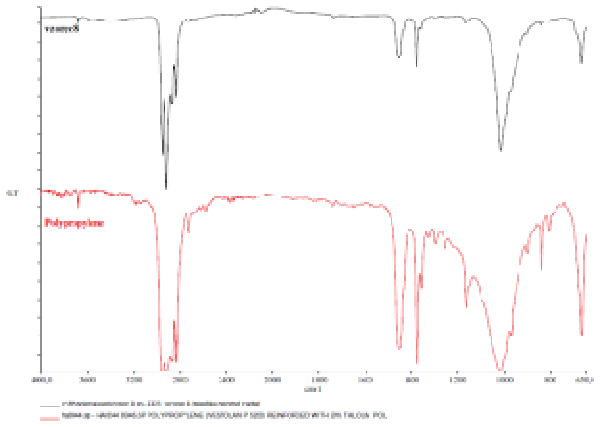
1 UVOD

Lastnosti polimernih izdelkov so odvisne tako od kemijske sestave polimera, količine in vrste dodatkov, ter postopkov predelave, oziroma procesnih pogojev. Z ustrezno vhodno kontrolo materialov ter končnih izdelkov lahko zagotovimo ustrezno in konstantno kvaliteto. Pri tem pa je pomembno, da poznamo različne tehnike karakterizacije, njihove zmožnosti in omejitve. Tehnike, ki jih največkrat uporabljamo, so spektroskopske (jedrska magnetna resonanca (NMR) infrardeča spektroskopija (FTIR)…), kromatografske (izključitvena kromatografija (SEC oziroma GPC), termične (diferenčna dinamična kalorimetrija (DSC), termična gravimetrija (TGA) dinamična mehanska analiza (DMA), indeks tečenja (MFI)), mikroskopske (vrstična elektronska mikroskopija (SEM), mikroskopija na atomsko silo (AFM)) reologija in mehanska analiza (natezni test, DMA,…). Nekatere od naštetih tehnik so primerne za uporabo tudi v manjših podjetjih, za druge pa se moramo poslužiti uslug raziskovalnih inštitutov in fakultet.

V prispevku so večinoma predstavljeni primeri uporabe nekaterih od naštetih tehnik, s katerimi so se reševale težave v podjetjih ali pa smo izvedli primerjalno analizo s konkurenčnimi izdelki.

2 KARAKTERIZACIJA POLIMERNIH MATERIALOV

Prva analizna tehnika, ki je relativno preprosta in hitra, je FTIR spektroskopija. To uporabimo, ko želimo izvedeti iz katerega polimera je narejen nek izdelek. Neznani vzorec posnamemo in ga primerjamo s spektri v bazi podatkov. Program nam ponudi več možnih zadetkov, ki jih primerjamo z našim spektrom (Slika 1)



Slika 1: Primerjava FTIR spektra neznanega materiala s spektrom iz baze podatkov, ki ima najboljše ujemanje.

Širok trak pri ≈1010 cm^{-1} običajno pripada mineralnim polnilom, v tem primeru je to talk. Vrsto polnila lahko določimo tako, da odštejemo spekter polimera od spektra našega vzorca, ali pa naredimo TGA analizo in posnamemo FTIR

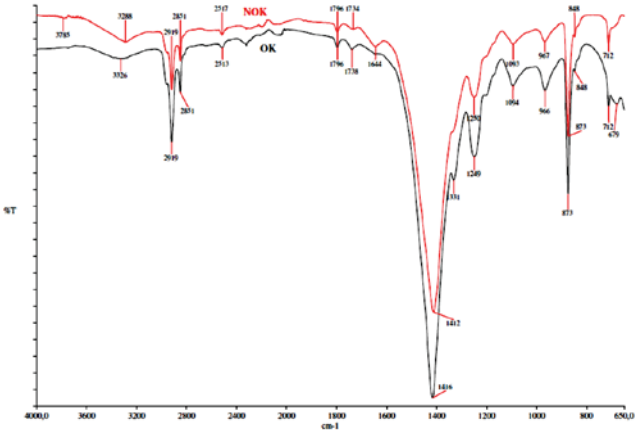
spekter ostanka. V tem primeru je potrebno upoštevati, da se mineral, pri visokih temperaturah, lahko tudi spremeni.

Iskanje napak v materialu ali izdelku je pogosto zelo težavno in zahteva uporabo več tehnik in določene izkušnje. Primerjava FTIR spektrov dobrega in slabega materiala nam včasih pokaže razlike v kemijski sestavi. Vendar, če so razlike v kemijski sestavi komponent majhne, dobimo lahko praktično enake spektre. Naslednji tehniki sta običajno termična karakterizacija z DSC, ali določevanje molskih mas s SEC.

DSC je kratica za diferenčno dinamično kalorimetrijo. Pri tej tehniki vzorec, velikosti nekaj miligramov, običajno segrevamo in/ali ohlajamo z določeno hitrostjo ter merimo energijo, ki se pri tem porabi ali sprosti. Določene meritve lahko izvajamo tudi izotermno, npr. določevanje hitrosti kristalizacije ali potek kemijske reakcije. Z DSC največkrat določamo temperaturo steklastega prehoda ter območje in temperaturo taljenja in kristalizacije.

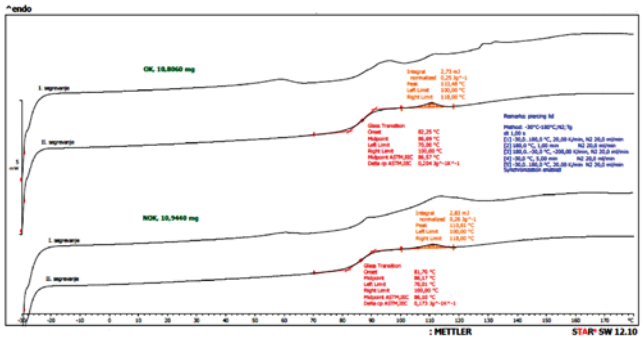
2.1 Analiza dobrega in slabega PVC

Slika 2 prikazuje FTIR spektra dobrega (OK) in slabega PVC (NOK), ki vsebuje polnilo ($CaCO_3$). Na spektrih praktično ni omembe vrednih razlik. Majhna razlika je opazna le pri 1640 cm^{-1} in 700 cm^{-1}. Razlika je lahko posledica dodatka, ki je v dobrem vzorcu prisoten v majhni količini.



Slika 2: FTIR spektra dobrega in slabega PVC.

DSC analiza (Slika 3) prav tako ni pokazala bistvene razlike med vzorcema. Razlika je sicer vidna pri prvem segrevanju, kar pa je lahko posledica različne termične zgodovine vzorcev.



Slika 3: Primerjava DSC analize dobrega in slabega materiala.

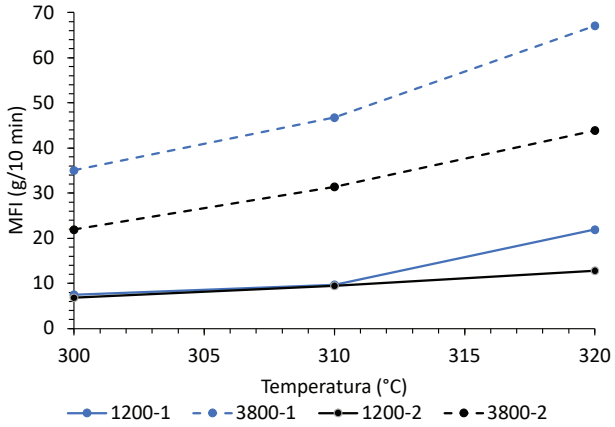
Dober vzorec je bil namreč bistveno starejši od slabega. Pri drugem segrevanju smo opazili le steklasti prehod pri 86-87 °C in majhen relaksacijski vrh. Razlika se je pokazala tehtanju vzorcev po DSC analizi. V slabem vzorcu je bila degradacija večja, kar pomeni, da je proizvajalec ali pozabil dodati termični stabilizator, ali pa je uporabil slabšega.

2.2 Pomen indeksa tečenja (MFI)

MFI je tehnika s katero določamo tečenje materiala in je povezana z viskoznostjo. Material pri določeni temperaturi stalimo in ga nato z določeno silo potiskamo skozi šobo predpisanih dimenzij. Merimo maso, ki izteče v določenem času, rezultat podajamo v g/10 min. Polimerne materiale z višjim MFI običajno uporabljamo za brizganje, z nižjim pa za ekstrudiranje, vendar je odločitev o izbiri materiala odvisna tudi od drugih dejavnikov, npr od velikosti želenega izdelka. Problem, na katerega lahko naletimo je, ko želimo zamenjati material z drugim, ki ima enak MFI, in pričakujemo, da bo predelava potekala pod enakimi pogoji. MFI je mera za viskoznost, ki je določena pod standardiziranimi pogoji (temperatura, strižna napetost). Pri predelavi imamo običajno bistveno drugačne pogoje od standardnih. Poleg tega se viskoznost različnim polimerom različno spreminja s spreminjanjem temperature ali pogojev tečenja (enim bolj drugim manj).

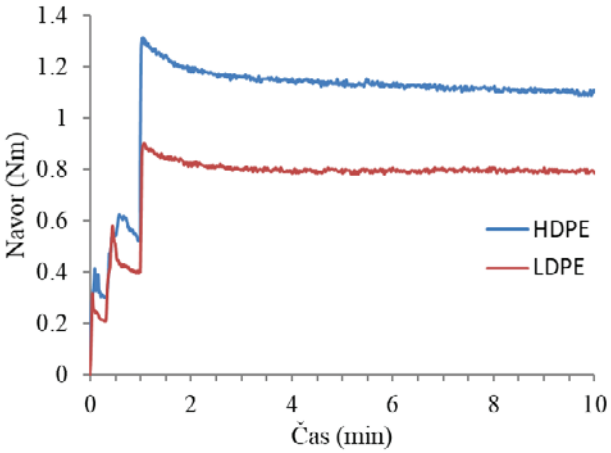
Slika 4 prikazuje odvisnost vrednosti MFI dveh polimerov, merjenih pri različnih temperaturah in z dvema masama uteži (1200 g in 3800 g). Vidimo, da sta vrednosti pri 300 °C in masi 1200 g praktično enaki. Če pa uporabimo

višjo maso pa se že precej razlikujeta, razlika pa se povečuje z višanjem temperature.



Slika 4: MFI dveh polimerov, merjen pri različnih pogojih.

Slika 5 prikazuje navor na osi dvopolžnega mikroekstruderja pri ekstrudiranju dveh polietilenov LDPE (DOW LDPE 780 E NATURAL, Dow Chemicals Company, ZDA) in HDPE (HDI2061 NATURAL, Braskem IDESA, Mexico), ki imata enak MFI (20 g/10 min).

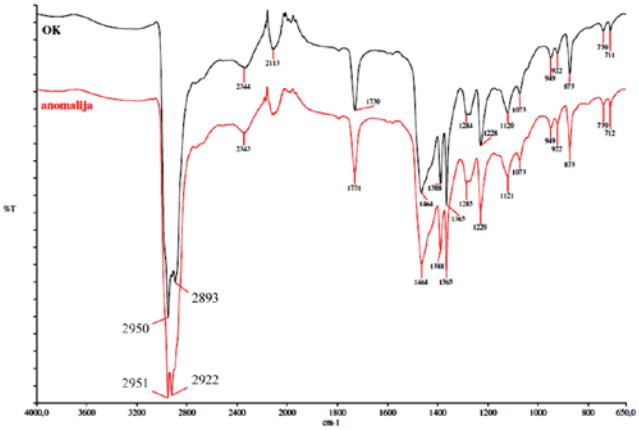


Slika 5: Navor v odvisnost od časa ekstrudiranja dveh polietilenov z MFI=20 g/10 min.

Navor je pri HDPE skoraj 40 % višji, tlak pa celo 48 % višji, kot pri LDPE, kar kaže na veliko razliko v viskoznosti pri določenih pogojih ekstrudiranja in s tem povezanim pretokom materiala in kapaciteto.

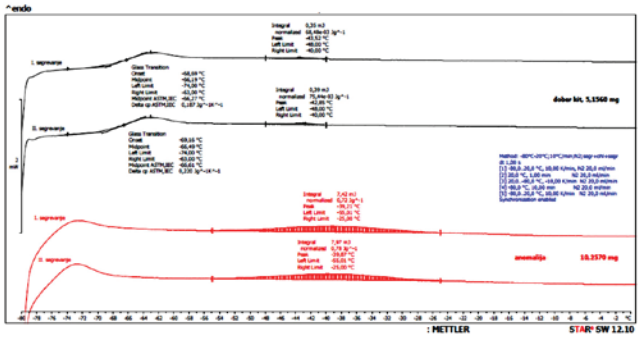
2.3 Napaka v tesnilu

Uporabnik gumenega tesnila je dobil reklamacijo svojega izdelka zaradi vidnega iztekanja le-tega, kar je ne le kazilo izgled, pač pa tudi poslabšalo lastnosti njihovega izdelka. FTIR analiza je pokazala razliko le v območju 2800-3000 cm^{-1}. Pri dobrem kitu sta dva trakova pri 2893 in 2950 cm^{-1}, pri slabem pa sta trakova pri 2922 in 2951 cm^{-1} (Slika 6).



Slika 6: FTIR spekter dobrega (črn) in slabega (rdeč) butilnega tesnila.

Trak pri 2893 cm^{-1} je značilen za CH skupine, trak pri 2920 je značilen za CH_2 skupine, trak pri 2950 pa za CH_3 skupine. V butilnem kitu dobrega okna je torej več CH skupin in manj CH_2 skupin. Ker je butilni kavčuk kopolimer izobutena in izoprena lahko sklepamo, da je v dobrem tesnilu več izoprena, ki ima CH skupine, kot v slabem. DSC analiza je pokazala tudi veliko razliko v temperaturi steklastega prehoda. Dober butilni kit ima temperaturo steklastega prehoda pri -66 °C, medtem ko je pri slabem kitu nismo uspeli določiti, ker je pod spodnjo mejo zmogljivosti instrumenta, to je pri manj kot -75 °C (Slika 7).



Slika 7: DSC termogrami dobrega (črn) in slabega (rdeč) butilnega kavčuka.

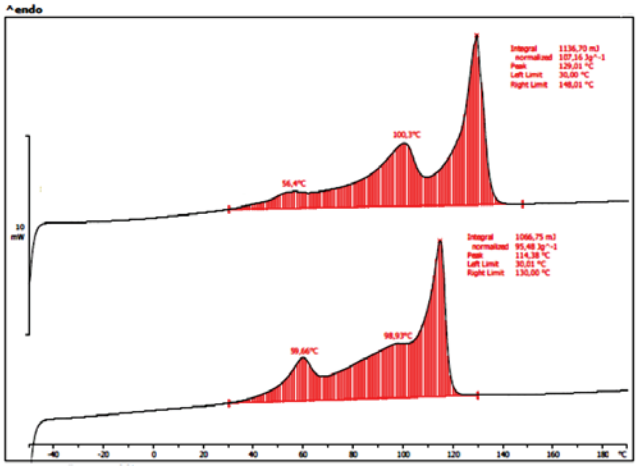
Na koncu smo preizkusili še topnost obeh kavčukov v kloroformu in ugotovili, da je slab popolnoma topen, pri dobrem pa smo dobili

plavajoče delce, ki so bili le nabreknjeni. Razlika je torej ne le v sami kemijski sestavi kavčuka, pač pa tudi v stopnji zamreženja. Dober kavčuk je delno zamrežen, medtem ko je slab nezamrežen. Razlika se pokaže v temperaturi steklastega prehoda, ki v tem primeru niti ni tako pomembna. Bolj pomembno je, da je zamrežen polimer bolj odporen na lezenje ob dolgotrajni obremenitvi in zato ne izteka iz reže.

2.4 Kompatibilnost in mehanske lastnosti

V analizo smo dobili dve tanki plastični cevki, od katerih je ena ustrezala zahtevam glede mehanskih lastnosti, druga pa ne. Cevki naj bi bili narejeni iz treh plasti, v vsaki je drug polimer na osnovi polietilena. Naročnik je želel ugotoviti, zakaj je njegov izdelek slabši od konkurenčnega. Poleg cevk nam je dostavil tudi vzorce polimerov, ki se običajno uporabljajo za izdelavo.

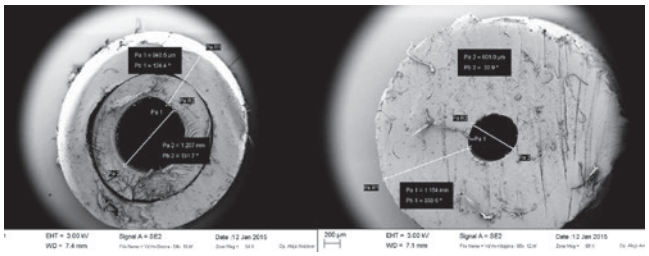
DSC analiza vzorcev, ki smo jih vzeli iz prečnega premera, je pokazala, da vsebujeta oba izdelka tri polimere, od katerih sta dva, gledano s termičnega stališča, praktično enaka, tretji pa ima, pri boljši vrvici, bistveno višjo temperaturo tališča in talilno entalpijo (Slika 8).



Slika 8: DSC termograma konkurenčne (zgoraj) in naročnikove (spodaj) cevke.

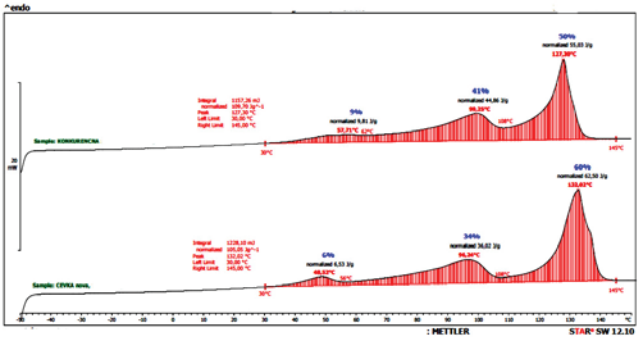
Višja talilna entalpija pomeni, da je kristaliničnost vzorca višja, kar ima lahko že velik vpliv na mehanske lastnosti. Še večji vpliv pa je verjetno imela slaba kompatibilnost med temi polimeri, zaradi česar je prišlo do delaminacije.

Z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM) smo pregledali prečni prerez cevk (Slika 9, posneto na Kemijskem inštitutu v Ljubljani, dr. A. Anžlovar). Pri dobri cevki le s težavo opazimo tri plasti, medtem ko je pri slabi zelo lepo vidno, da sta dve cevki praktično ločeni ena v drugi. Plasti nista kompatibilni, zato je prišlo do delaminacije.



Slika 9: Prerez slabe (levo) in dobre (desno) cevke pod vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM).

Na podlagi analiz je proizvajalec spremenil recepturo in pripravil cevko, ki je imela kompatibilne plasti in podobne termične lastnosti kot konkurenčni izdelek (Slika 10).



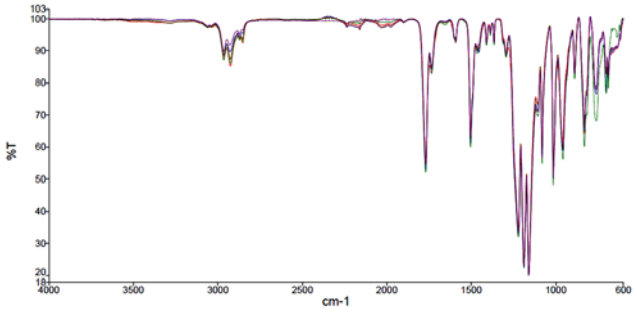
Slika 10: DSC termogram konkurenčne (zgoraj) in nove cevke (spodaj).

2.5 Kompatibilnost in mehanske lastnosti (2)

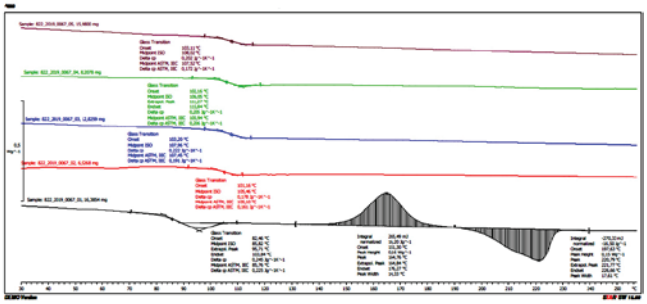
Izdelki, ki jih je naročnik že leta kvalitetno izdeloval iz istega materiala so, pri novi šarži dobavljenega materiala, s časom postali izredno krhki. Praktično so razpadli že pod zelo majhno silo. V analizo smo dobili vzorec nove šarže in štiri vzorce prejšnjih. Najprej smo naredili FTIR analizo, ki pa ni kazala bistvenih razlik med slabo in dobrimi šaržami (Slika **11**).

DSC analiza je pri prvem segrevanju pokazala, da ima slab vzorec T_g pri 86 °C, dobri pa 105-108 °C. Slab vzorec vsebuje kristaliničen polimer, poli(butilen tereftalat) (PBT), ki je delno kompatibilen z matrico, pri večjih koncentracijah pa pride do fazne separacije. Pri segrevanju nad

temperaturo 130 °C pride do hladne kristalizacije PBT, ki doseže vrh pri 172 °C, nato pa se tali, z vrhom (T_m) pri 221 °C (Slika 12). Entalpiji hladne kristalizacije in taljenja sta bili enaki (16,5 J/g), kar pomeni, da je bil ves PBT amorfen.



Slika 11: FTIR spektri slabega in štirih dobrih materialov.



Slika 12: DSC termogrami prvega segrevanja slabega vzorca (črn) in štirih dobrih vzorcev.

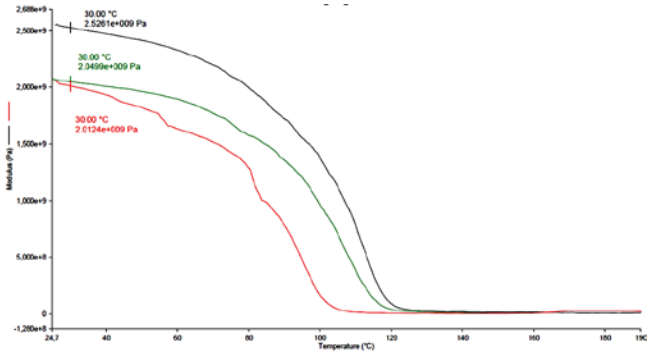
Pri drugem segrevanju slabega vzorca sta tako entalpija kristalizacije, kot taljenja, za tretjino nižji, T_g pa je za 5 °C višji (90 °C), kot pri prvem segrevanju.

Razlike med vzorci se pokažejo tudi pri merjenju viskoelastičnih lastnosti, ki jih določamo z dinamično mehansko analizo (DMA). Pri tej tehniki vzorec segrevamo in ga istočasno sinusno mehansko obremenjujemo ter gledamo njegov odziv. Rezultat dobimo v obliki treh krivulj in sicer modul akumulacije energije, ali dinamični modul elastičnosti (E'), modul izgub (E'') in tanδ, ali faktor dušenja, ki predstavlja razmerje obeh modulov (E''/E'). Slab material ima najnižji dinamični elastični modul (E'), ki se, zaradi nižjega T_g, tudi hitreje znižuje s temperaturo (Tabela 1 in Slika 13).

T_g, ki ga določimo iz položaja vrha signala tanδ, ima običajno bistveno višjo vrednost, kot jo dobimo pri DSC. Slab vzorec ima T_g pri 105 °C, ostali 118-120 °C.

Tabela 1: Rezultati dinamične mehanske analize za slab in dva dobra vzorca.

Vzorec	T_g tan δ (°C)	Tan δ (-)	E' pri 30 °C (GPa)
01 - slab	105,02	1,276	2,01
02 - dober	117,97	1,245	2,05
05 - dober	120,60	1,219	2,53



Slika 13: Spreminjanje E' v odvisnosti pod temperature za slab vzorec in dva dobra.

Na podlagi analize smo ugotovili, da ima nova polimerna mešanica višjo vsebnost PBT, kar povzroči fazno separacijo mešanice in krhkost pri staranju ter zniža T_g in mehanske lastnosti na splošno.

2.6 Pokanje izdelka zaradi zaostalih napetosti

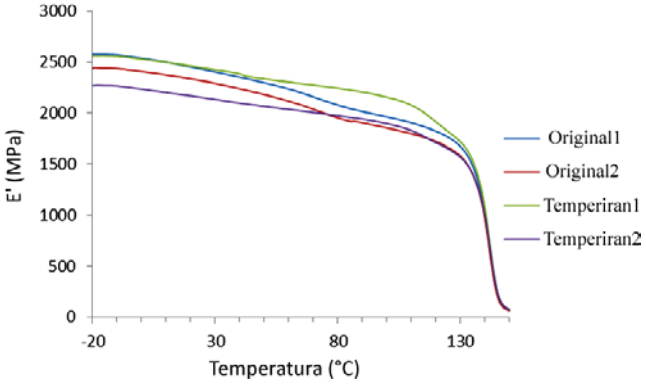
Brizganje je najpogostejša oblika predelave polimerov, saj je postopek relativno enostaven in omogoča masovno proizvodnjo. Slaba stran brizganja pa je, da v materialu ostajajo napetosti, ki lahko vodijo v napake, ki se pokažejo šele po določenem času. To je še posebej opazno pri prozornih amorfnih materialih, kot so PMMA, ABS in polikarbonat (PC), v katerih se s časom, ali pod vplivom delovanja čistilnih sredstev ali topil, pojavijo vidne mikrorazpoke.

V analizo smo dobili manjše kontejnerje iz PC, ki so bili polnjeni z vodno raztopino neke snovi in v katerih so se, po določenem času, pojavile mikrorazpoke.

Zaostale napetosti lahko ugotavljamo z dinamično mehansko analizo. Za ugotavljanje zaostalih napetosti uporabimo lahko modul izgub ali tanδ. V tem primeru smo se odločili za uporabo tanδ, ki se izračuna iz razmerja E''/E' in

je zato neodvisen od natančnosti določitve dimenzije vzorca.

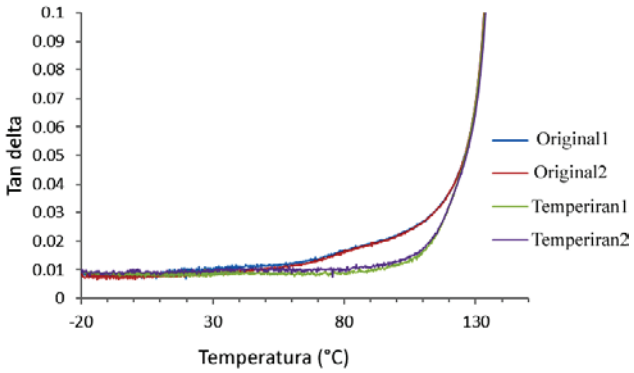
Kontejnerje smo na najbolj ravnem delu razrezali na primerne dimenzije. Vzorce smo s hitrostjo 2 °C/min segrevali v območju -20 °C do 180 °C in jih obremenjevali z amplitudo 10 µm ter frekvenco 1 Hz. Dva vzorca smo testirali takoj, druga dva pa smo predhodno eno uro temperirali na 90 °C.



Slika 14: Spreminjanje modula akumulacije energije v odvisnost od temperature za originalen in temperiran vzorec (2 paralelki).

Slika 14 prikazuje spreminjanje E' s temperaturo. (Kljub temu, da smo vzorce izrezali iz najbolj ravnega dela, moramo povedati, da so te številke okvirne, saj vzorci niso bili popolnoma enaki in pravokotne oblike). Pri originalnih vzorcih opazimo manjši prehod (hitrejše zmanjšanje modula), v območju 60-80 °C. Pri vzorcih, ki smo jih segreli na 90 °C tega ni opaziti, zato ta prehod ni neka materialna lastnost, pač pa kaže na sproščanje zaostali napetosti. Le-to se bolje vidi na grafu odvisnosti tanδ od temperature (Slika 15). Tanδ originalnih in temperiranih vzorcev je praktično enak v temperaturnem območju do 50 °C in nad 125 °C. V vmesnem območju pa je vrednost tanδ temperiranih vzorcev bistveno nižja, ker so se sprostile zaostale napetosti.

Naročnik je pokanje odpravil s spremembo pogojev brizganja.



Slika 15: Spreminjanje faktorja dušenja v odvisnosti od temperature za originalen in temperiran vzorec (2 paralelki).

3 SKLEP

Namen prispevka je na kratko predstaviti nekaj osnovnih tehnik, ki jih uporabljamo za karakterizacijo polimernih materialov in zmožnosti, ki jih ponujajo. Predstavljenih je nekaj primerov uspešnih raziskav, ki so jih avtorji izvedli za industrijske partnerje, s katerimi so le-ti reševali svoje probleme v proizvodnji ali uveljavili reklamacije za slab material.

RAZVOJ FLEKSIBILNIH ŠTANČNIH ORODIJ Z INTEGRIRANIM NADZOROM MAZANJA

Tomaž PEPELNJAK[1], Uroš ŠTUKLEK[2], Dejan ROŽIČ[2], Jan KUDLAČEK[3]
[1]Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani
[2]DAFRA kontakt tehnologija d.o.o.
[3]TechTest, s.r.o., Češka Republika

IZVLEČEK

Štancanje majhnih elektronskih komponent zahteva ozke proizvodne tolerance in visoko produktivnost proizvodnje. Pri razvoju orodij za štancanje se je spremljala obraba orodja in optimizirala kontura aktivnih delov orodja z namenom podaljšanja življenjske dobe orodja. Razvoj mehatronskih orodij za preoblikovanje z optimiziranim sistemom mazanja ter nadzorom poteka procesa omogoča ekološke koncepte mazanja. Hkrati z optimizacijo mazanja je bila v okviru projekta Eureka E! 12193 AMSOL drastično povečana tudi produktivnost proizvodnje. Za koncept prilagodljivega orodja je bil skupaj z nadzorom mazalnega filma razvit tudi nov sistem Recognoil®, namenjen zmanjšanju porabe mazalne tekočine. Obe nalogi sta bili vključeni v neposreden proizvoden proces izbrane elektronske komponente, ki jo podjetje izdeluje v serijah več milijonov letno.

1 UVOD

Industrija majhnih elektronskih komponent, kot so vtiči, zatiči, komponente relejev, stikala, varnostna stikala, hladilna telesa, zahteva visoko natančnost njihove izdelave in dobro nadzorovan postopek preoblikovanja. Nadaljnje obrizgavanje s polimeri zahteva še manjše tolerance štancanih delov. Ker ta vrsta proizvodnje predstavlja množično proizvodnjo v velikih količinah od 0,5 do 5 milijonov delov, imata produktivnost in ustrezna izbira parametrov postopka velik vpliv na dodano vrednost štancanih komponent. Nenazadnje je pomembno tudi to, da je zaradi majhne mase proizvedenih delov z maso od 0,05 g do 10 g - slika 1 - njihova dodana vrednost visoko nad povprečjem ravni industrije predelave pločevin s postopki štancanja.

Glavni del dodane vrednosti izdelka predstavljajo stroški storitev, zato se z dvigom produktivnosti in kakovosti delov dosežena dodana vrednost še pomnoži.

2 VPLIVI ORODJA NA ŠTANCANJE

Geometrije elektronskih komponent so običajno zelo zapletene. Geometrija dela je rezultat več zaporednih faz preoblikovanja, od katerih vsak vpliva na končno toleranco izdelka. Poleg tega so predpisane dimenzijske tolerance štancanih delov zelo ozke in pogosto znašajo le 20 µm, v nekaterih primerih pa so celo pod to vrednostjo. Več teh delov, izdelanih iz pločevine debeline od 0,1 do 0,8 mm, je v mini ali celo mikro merilu z značilnimi dimenzijami od 3 do 40 mm z detajli velikosti do 0,2 mm ter koti upogibanja s tolerancami 1 stopinje ali manj. Na sliki 2 so prikazane štancane komponente analizirane v okviru projekta Eureka E!12193 AMSOL.

Slika 1: Štancane elektronske komponente (Dafra d.o.o.) [1]

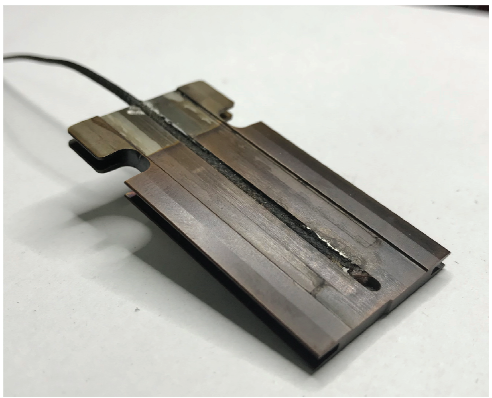
Tomaž PEPELNJAK[1], Uroš ŠTUKLEK[2], Dejan ROŽIČ[2], Jan KUDLAČEK[3]
[1]Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani
[2]DAFRA kontakt tehnologija d.o.o.
[3]TechTest, s.r.o., Češka Republika

Za analizirani štancani del imenovan »zatik« so proizvodne tolerance kritičnih detajlov ± 0,05 mm, pri čemer mora biti debelina komponente zaradi kasnejše montaže na proizvodni liniji v toleranci ± 0,03 mm.

Natančna izdelava je zato kompleksen problem, ki je odvisen od lastnosti materiala in preoblikovanja uporabljene pločevine, debeline pločevine, hitrosti štancanja, tribooloških pogojev in obrabe orodja na kontaktni površini, vrste in količine mazanja pločevine in delov orodja ter od generacije toplote v strižni coni procesa rezanja.

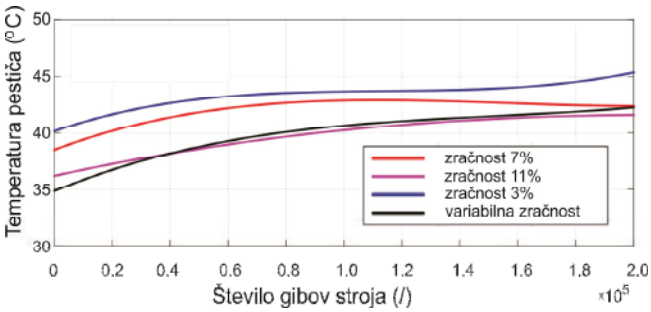
Slika 2: Štancani kontakti, analizirani v okviru projekta AMSOL

Za analizo temperature na rezalnem robu se je v rezalne pestiče vgradilo termočlene neposredno za rezalni rob, kot je prikazano na sliki 3. Pri tem vgrajeno zaznavalo ni smelo vplivati na trdnost samega orodnega dela niti motiti gibanja pestiča med delovanjem orodja.



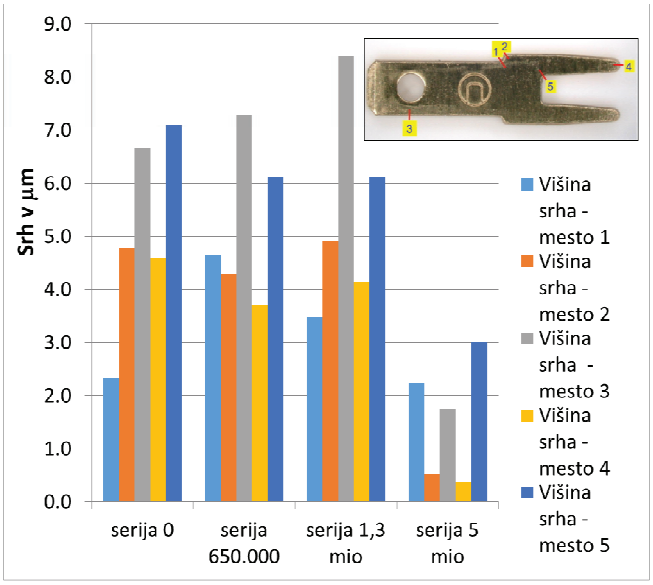
Slika 3: Rezilni pestič z vgrajenim termočlenom.

Slika 4 prikazuje izmerjeno temperaturo orodja, pridobljeno neposredno na površini rezalnega pestiča med postopkom štancanja od zagona stroja do izdelave 200.000 delov. Analize različnih geometrij rezalnih orodij kažejo, da je povišanje temperature odvisno tudi od zračnosti med rezalnim pestičem in matrico.



Slika 4: Spremembe temperature pestiča pri različnih zračnostih orodja.

Poleg tega so bile analize obrabe orodja opravljene za enako velikost serije z zgoraj navedenimi zračnostmi orodja. Ko je bila določena optimalna zračnost orodja, je bil izdelan nov komplet orodij, ki je bil uporabljen za oceno obrabe orodja med proizvodnjo velikih serij, ki so obsegale do 5 milijonov delov. S slike 5 je razvidno, da se na opazovanih kritičnih položajih oblike štancanega dela zaradi obrabe orodja zmanjšuje višina srha. Kljub temu lahko pričakujemo, da se bo ta ob bistveno večjih serijah ponovno pričela povečevati.



Slika 5: Meritve višine srha in oznake mest merjenja [2].

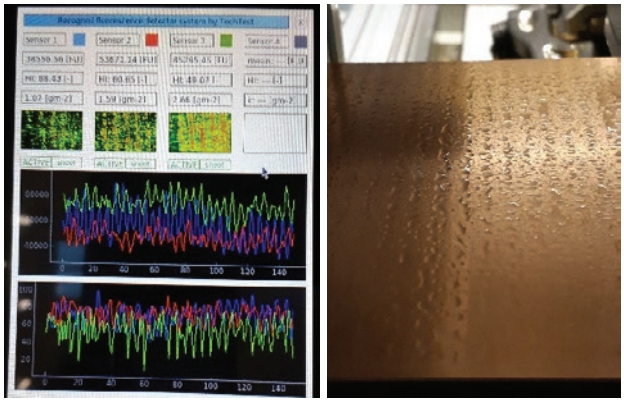
Tomaž PEPELNJAK[1], Uroš ŠTUKLEK[2], Dejan ROŽIČ[2], Jan KUDLAČEK[3]
[1]Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani
[2]DAFRA kontakt tehnologija d.o.o.
[3]TechTest, s.r.o., Češka Republika

3 FLEKSIBILNI ORODNI SISTEM Z INTEGRIRANIM NADZOROM MAZANJA

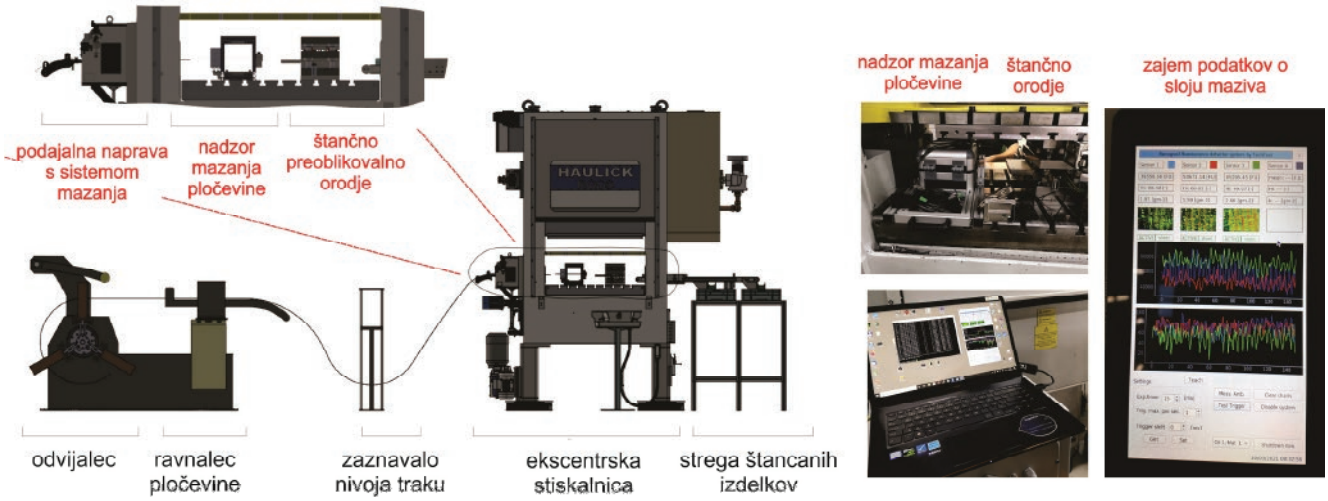
V projektu AMSOL je bilo razvito pilotno mehatronsko orodje za štancanje z implementiranim nadzorom mazanja. V ta namen so bile analizirane značilnosti procesa preoblikovanja, zanesljivo tolerančno območje in ukrepi za njegovo izboljšanje. Analizirani so bili interakcija med obdelovancem in orodjem, elastičnost in temperaturno odvisno obnašanje orodja ter vpliv ekscentrske stiskalnice, na kateri se je izvajal proces štancanja. Glavni cilj tega dela projekta je bil izboljšati proizvodne tolerance in povečati produktivnost proizvodnje, ki je omejena s pogosto nezadostno opredeljenimi in nadzorovanimi parametri preoblikovalnega sistema.

Glede na pametne proizvodne procese je treba zbirati podatke o postopku štancanja in jih on-line sproti vrednotiti. Ker se v postopku štancanja barvnih kovin uporabljajo posebna maziva, je treba dele po izdelavi očistiti za nadaljnjo obdelavo spajkanja in varjenja zatičev, galvanskega nanašanja srebra in kositra, čistega sestavljanja in brizganja. In končno, kar je posebej pomembno, čiščenje zaprtih linij za razmaščevanje štancanih delov zahteva veliko porabo energije, saj je drago in dolgotrajno. Potrebna je dodatna kontrola kakovosti čiščenja in ne nazadnje v primeru nezadostnega čiščenja se v embaliranih škatlah z izdelkih olje odcedi na dno, zaradi česar so izdelki na dnu škatel precej bolj mastni kot ostali. V najslabšem primeru se lahko z izdelkov odcedi toliko olja, da so mastne celo embalažne škatle. Zmanjšanje mazanja in stalnost porazdelitve maziva po površini štancane pločevine je bila analizirana s posebno nadgradnjo sistema Recognoil® [3], ki deluje na podlagi fluorescence oljnih in mastnih slojev.

Na sliki 6 je prikazan celoten preoblikovalni sistem z integriranim mehatronskim orodjem, nadzorom količine maziva in povratno zanko za uravnavanje nivoja mazanja z mazalnimi valji. On-line zaznavanje in ocenjevanje debeline olja - slika 6 - na površini pločevine v kombinaciji z nadzorom mazalnega sistema, ki se uporablja na stiskalnici, je zagotovilo znatno zmanjšanje porabljenega olja. V fazi testiranja smo analizirali različne količine olja na površini pločevine. Na sliki 7 se vidi testiranje prekomerno mazane pločevine, ki se pogosto pojavlja pri ročnem nastavljanju mazalnih naprav.



Slika 7: Testiranje prekomerno mazane pločevine z napravo Recognoil® [4]



Slika 6: Mehatronski preoblikovalni orodni sistem z Recognoil® nadzorom mazanja

Tomaž PEPELNJAK[1], Uroš ŠTUKLEK[2], Dejan ROŽIČ[2], Jan KUDLAČEK[3]
[1]Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani
[2]DAFRA kontakt tehnologija d.o.o.
[3]TechTest, s.r.o., Češka Republika

Samo-nastavljiv sistem mazanja orodij deluje v segmentu optimizacije mazanja glede na izmerjene parametre v primerjavi z njihovo začetno nastavitvijo, procesa štancanja in same ekscentrske stiskalnice. Pri tem je treba sistem Recognoil® za vsako kombinacijo vrste pločevine in mazalnega medija kalibrirati in vrednosti vnesti v krmilje sistema za on-line vrednotenje mazanja. Sistem Recognoil® je osnova za minimiranje porabe olja in optimizacijo debeline mazalnega sloja, ta pa neposredno vpliva na kakovost procesa štancanja. Cilj integracije sistema Recognoil® v preoblikovalni sistem štancanja geometrijsko zahtevnih komponent za elektronsko industrijo je zmanjšanje porabe mazalnih sredstev, zagotavljanje optimalnih pogojev faze rezanja pločevine in podaljševanje življenjske dobe orodij ob sočasnem dvigovanju produktivnosti z zviševanjem taktov preoblikovalnega stroja.

Pametni nadzor procesa štancanja lahko prilagodi nastavljive dele orodja v izbranem območju prileganja in s tem omogoča izdelavo ključnih dimenzij v zahtevanih izdelovalnih tolerancah. Pri tem se orodje geometrijsko med delovanjem prilagaja potrebam preoblikovalnega procesa, saj med delovanjem orodja merimo geometrije izdelkov in jim z ustrezno povratno zanko neposredno v orodju tudi korigiramo geometrijo v eni od meritvi sledečih preoblikovalnih operacij.

V nadaljevanju razvoja bo mehatronska štančna orodja treba vključiti v koncept Industrije 4.0, izdelati ustrezne digitalne dvojčke za prilagodljivo delovanje sistema in integrirati pridobljena znanja v kompleksnejše orodne sisteme, ki bodo omogočali izdelavo geometrijsko različnih komponent z istim preoblikovalnim sistemom.

4 SKLEP

V okviru projekta AMSOL smo sledili dvema glavnima ciljema:

- analizi obrabe orodja z namenom iskanja optimalne zračnosti za izbrani kontakt, ki se izdeluje v serijah preko 1 milijon kosov letno ter povečanjem produktivnosti pri izdelavi tega produkta
- razvoju popolnoma novega fleksibilnega štančnega orodja s sprotnim nadzorom mazanja.

Z analizo obrabe orodja smo uspeli takt delovanja orodja za izdelavo »zatika« dvigniti z 250 udarcev/min na 800 udarcev/min in s tem bistveno povečati produktivnost proizvodnje. Razvito je bilo mehatronsko preoblikovalno orodje za proces štancanja, ki nadzoruje preoblikovalni proces in prilagaja zaznane parametre procesa referenčnim vrednostim. Za nadzor mazanja je bila razvita nova naprava Recognoil® za on-line nadzor mazalnih pogojev na površini pločevine, ki predstavlja svetovno noviteto na področju nadzora porabe količine mazalnega olja. Njena integracija v delovanje preoblikovalnega stroja omogoča tudi optimizacijo in ustrezno doziranje olja za proces štancanja.

ZAHVALA

Avtorji se zahvaljujejo za finančno podporo Ministrstva za gospodarski razvoj in tehnologijo Republike Slovenije (MGRT) in Ministrstva za izobraževanje, mladino in šport Republike Češke v okviru projekta Advanced Mechatronic Stamping System with Controlled Lubrication (AMSOL) (podprogram EUREKA) - projekt št. E!12193.

Viri:

[1] Štuklek, U. et al.: E! 12193 AMSOL projektno poročilo, Žalec 2018, 40 str.
[2] Pepelnjak T., Sevšek L.: Analiza štancanih komponent. Ljubljana 2019, 18 str.
[3] Recognoil ® system, https://recognoil.com/ (5.5.2022)
[4] Štuklek, U. et al.: E! 12193 AMSOL zaključno projektno poročilo, Žalec 2021, 24 str.

VPLIV TRENDOV AVTOMOBILSKE INDUSTRIJE NA PROIZVODNE TEHNOLOGIJE

Pavel OBLAK, Aleš ADAMLJE
Hella Saturnus Slovenija d.o.o.

IZVLEČEK

Trendi v avtomobilski industriji se močno odražajo tudi na celotni zunanjosti avtomobilov. Poleg funkcionalnosti, elementi pridobivajo vse večjo pomembnost dekorativnega aspekta. Slediti zahtevam kupcev pomeni razvoj in proizvodnjo vse bolj kompleksnih produktov, ti postajajo veliki, imajo nove funkcionalnosti ter imajo zelo velik poudarek na dekorativnih detajlih. Tako morajo dobavitelji v svojo proizvodnjo vpeljevati tehnologije, ki do sedaj niso bile klasične v tovrstni industriji, to so na primer injekcijsko kompresijsko brizganje, tehnologije vezane na brizganje s folijami kot na primer tiskanje in preoblikovanje, v zadnjih mesecih pa je zaznati tudi velik porast zahtev po tehnologiji "lakiranja" v orodju.

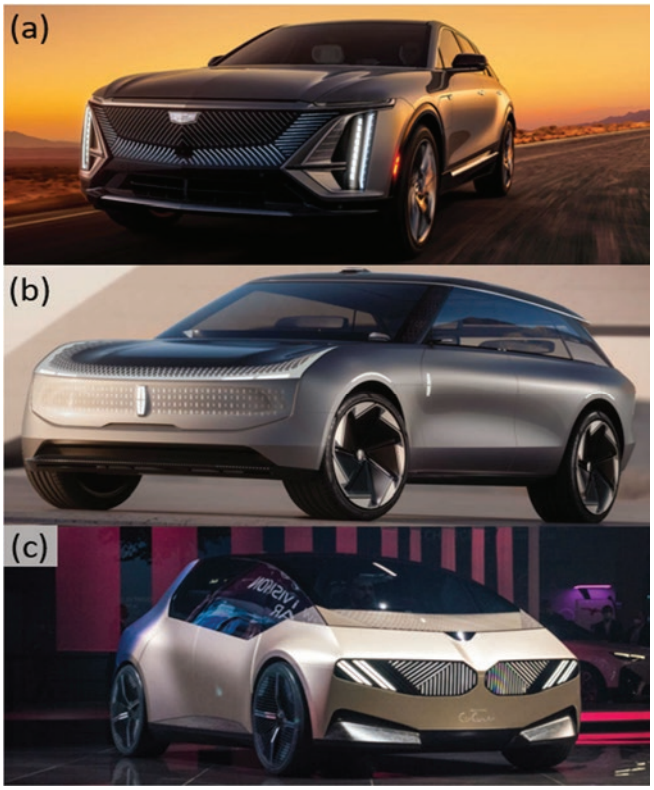
1 UVOD

Sodobna vozila postajajo varnejša, vozniku nudijo veliko podporo in pomoč pri vožnji, njihova notranjost in zunanjost pa postajata vedno bolj atraktivnega izgleda. Komponente vozil so izpopolnjene bolj kot so kadarkoli bile, pri tistih vezanih na varnost sicer nikoli ni bilo odstopanj, se pa močno višajo zahteve glede komponent dekorativnega značaja.

Vse omenjeno pa odpira mnoge izzive, s katerimi se soočajo dobavitelji komponent v avtomobilski industriji. Mnogokaterim zahtevam kupcev ni mogoče ugoditi samo z uporabo proizvodnih tehnologij, ki so do sedaj veljale kot klasične v tovrstni panogi, zato je vpeljava novih postala nuja.

2 TRENDI V AVTOMOBILSKI INDUSTRIJI

Generalno gledano lahko sodobne trende h katerim stremi avtomobilska industrija opišemo z avtonomno vozečimi vozili, elektrifikacijo in povezljivostjo [1]. Očem opazovalca skriti trendi gredo v smeri nižanja teže produktov in povečevanja uporabe recikliranih materialov, k slednjemu seveda pripomorejo tudi razne regulative. Če pa pozornost usmerimo na izgled vozila in se osredotočimo na elemente nameščene na sprednjem delu, na te se namreč nanašajo kasneje opisane tehnologije, vidimo da produkti postajajo veliki, polni dekorativnih detajlov, pogosto pa je prisotna tudi osvetlitev (*Slika 1*).



Slika 1: Primeri sodobnih vozil oz. njihovi koncepti: (a) Cadillac Lyriq [2], (b) koncept Lincoln Star [3] in (c) koncept BMW I Vision Circular [4].

Torej trend gre v smeri večanja elementov na sprednjem delu vozila, saj se pogosto široko raztezajo ali pa celo segajo od enega do drugega

boka. Zelo pogosti so osvetljeni detajli, ti lahko opravljajo kakšno od že vpeljanih funkcij kot na primer parkirne ali smerne svetilke. Lahko pa opravljajo nove funkcije kot na primer predajanje raznih sporočil mimoidočim ali okolici, kot na primer namero premika ali ustavitve vozila, opozarjanje nase ali celo pozdrav lastniku. Zelo pogosto so prisotni tudi osvetljeni detajli, ki nimajo funkcionalnosti oz. imajo samo dekorativni namen. Dekorativni vidik močno pridobiva na pomembnosti, poleg osvetlitev so prisotne tudi barve, vzorci in oblikovni detajli. Poleg vsega naštetega trend narekuje tudi integracijo raznih senzorjev vezanih na varnost potnikov in okolice ter na pomoč vozniku pri upravljanju vozila.

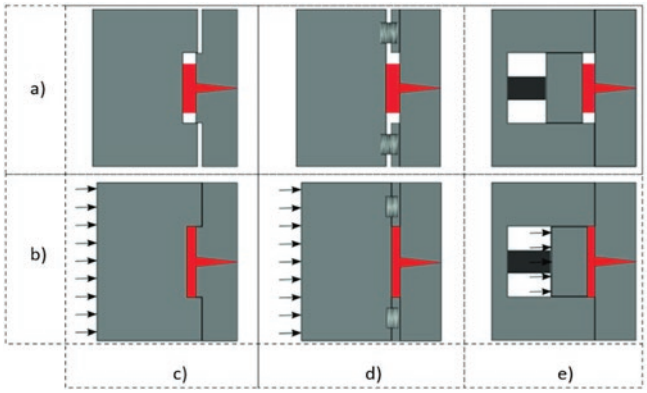
3 PRIMERI TEHNOLOGIJ KATERIH VPELJAVO POSREDNO ZAHTEVA TREND V AVTOMOBILSKI INDUSTRIJI

3.1 Injekcijsko kompresijsko brizganje

Injekcijsko kompresijsko brizganje je tehnologija, katere implementacija je nujno potrebna pri proizvodnji produktov večjih dimenzij kot na primer panelov na prednjem delu avtomobilov. Uporaba te tehnologije je še toliko pomembnejša, če govorimo o produktih s tanko steno ali celo steno spremenljive debeline. Velik doprinos ima tudi pri brizganju s folijami ali v primerih izdelave optičnih elementov. Sam proces je v osnovi podoben klasičnemu injekcijskemu brizganju, prva razlika je ta, da je pri kompresijskemu injekcijskemu brizganju brizg vršen v delno "odprto" kaviteto (*Slika 2-a*). To pomeni, da je talini omogočena pot skozi večji presek kot je končna debelina stene kosa. Druga razlika je v naslednji fazi, kjer je klasična vzpostavitev naknadnega tlaka nadomeščena s fazo kompresije (*Slika 2-b*). V tej fazi se orodje zapira in tako ustvari tlak v kaviteti.

Poleg nižjih strižnih sil v toku taline in nižjih potrebnih zapiralnih sil orodja, pa ta tehnologija omogoča tlak, ki je po kaviteti bolj homogen kot pri klasičnemu injekcijskemu brizganju. To vpliva na homogenost strukture in posledično na samo zvijanje produkta pri ohlajanju, pomembno pa je tudi, ko govorimo o optičnih elementih.

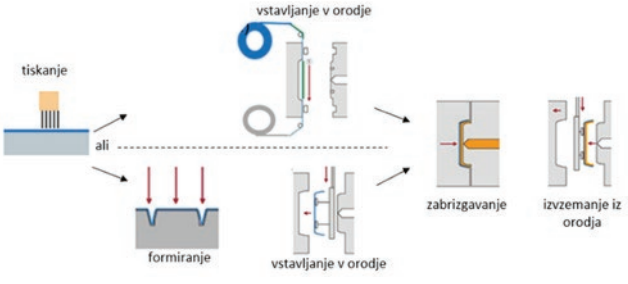
Omeniti je potrebno, da tehnologija zahteva prirejeno konstrukcijo izdelka, ustrezno opremljen brizgalni stroj in, kar je izrednega pomena, ustrezno konstruirano in izdelano brizgalno orodje. Le-to je lahko izdelano v različnih konceptih (*Slika 2- c, d in e*).



Slika 2: Shema principa kompresijskega injekcijskega brizganja: (a) faza brizga, (b) faza kompresije, in različnih konceptov orodja (c, d in e), povzeto po [5].

3.2 Tehnologije povezane z brizganjem s folijami

Zahteve po dekorativnih površinah postajajo vse kompleksnejše in vse pogosteje željenih izgledov produktov ni več možno doseči z več-komponentnim brizganjem ali drugimi tehnologijami, ki so klasično uporabljane v tej panogi. V teh primerih je ena od potencialnih možnosti uporaba tehnologije brizganja s folijami [6]. V tem primeru se uporabi folija, ki se v prvem koraku potiska po željah kupca, nato pa se pred-oblikovano ali ne, odvisno od oblike izdelka, vstavi v orodje ter se preko nje nabrizga plastično maso (*Slika 3*).



Slika 3: Shematični prikaz postopka brizganja s folijami, povzeto po [7].

Tehnologija brizganja s folijami je že nekaj časa stalnica pri proizvodnji komponent notranjosti vozil, z naraščajočimi zahtevami in visokimi pričakovanji glede dekorativnega aspekta zunanjih elementov pa se ta tehnologija vpeljuje tudi v izdelovanje zunanjih komponent. Čeprav tehnologija ni nova, pa na zunanjih elementih predstavlja velik izziv, saj so ti elementi po navadi večji, lahko tudi kompleksnejši, predvsem ko govorimo o panelih nameščenih na sprednjih delih vozil. Poleg velikosti in kompleksnosti pa je ob omembi razlike med notranjimi in zunanjimi aplikacijami potrebno omeniti še okoliške pogoje, katerim so ti elementi izpostavljeni in posledične obremenitve na komponento.

V grobem bi lahko rekli, da lahko folije opravljajo dve funkciji, najbolj očitno in že prej omenjeno, ima lahko folija dekorativno funkcijo, lahko pa ima tudi funkcijo nosilca drugega funkcionalnega elementa kot je na primer grelno ali drugo vezje.

Ko govorimo o dekorativni funkciji, je ustrezen izgled dosežen z nanosom črnila. Sam tip črnila, kot tudi njegovo nanašanje oz. tiskanje, ima izredno velik vpliv na obnašanje folije med brizganjem, in tudi na končni vizualni izgled, (torej po brizganju). Pomemben vpliv ima lahko tudi na dogajanje znotraj življenjske dobe izdelka, na primer na potencialno razslojevanje. Torej s širjenjem uporabe te tehnologije bo sam tisk lahko postal področje, na katerem bodo dobavitelji morali razvijati svoje znanje in izkušnje. Podobno kot nanos dekorativnega sloja, izziv predstavlja tudi implementacija grelnega ali drugega vezja oz. drugih funkcionalnih elementov.

Ustrezno predpripravljeno folijo se v sledečem koraku lahko vstavi v orodje in preko nje brizga plastično maso, če pa je oblika izdelka kompleksnejša, pa mora biti folija pred brizganjem tudi primerno predoblikovana oz. formirana. Predoblikovanje folije se lahko izvede s tehnologijo termo-formiranja, ki je sicer že široko razširjena, alternativno pa tudi s tehnologijo formiranja pod visokim tlakom. Če so zahteve kupcev po natančnosti visoke, se morajo dobavitelji posluževati formiranja pod visokim tlakom, saj ta tehnologija dosega višje natančnosti predoblikovanja. Primerjava formiranja pod visokim tlakom in termo-formiranja je prikazana v Tabeli 1.

Tabela 1: Primerjava formiranja pod visokim tlakom in termo-formiranja, povzeto po [8]

	Formiranje pod visokim tlakom	Vakuum-/ Termo-formiranje
Temperatura material	Temp. steklastega prehoda	Taljenje
Deformacija materiala	Nizka	Visoka
Natančnost (3D)	Zelo visoka	Nizka
Natančnost (pozicioniranje simbolov)	Visoka	Nizka
Ponovljivost	Visoka	Nizka

Tako predpripravljena folija se vstavi v brizgalno orodje in s sprednje, zadnje ali obeh strani nabrizga s plastičnim materialom.

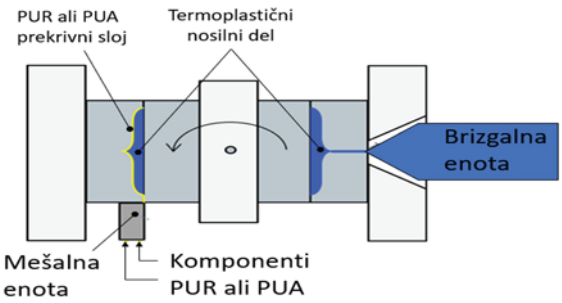
Kombinacija vseh faz, torej tiska, formiranja in brizganja, je visoko kompleksna, saj že samo črnilo vpliva na obnašanje folije med procesom formiranja in procesom brizganja, v obeh korakih se folija namreč razteguje. To je potrebno upoštevati in na končnem izdelku doseči, da vsak posamezen tiskan detajl pristane na predvidenem mestu. Vsekakor pa je v veliko pomoč, če se pri brizganju uporablja prej opisano injekcijsko kompresijsko brizganje.

3.3 "Lakiranje" v orodju

"Lakiranje" v orodju ali ang. "in-mould coating" je tehnologija, ki združuje procesa injekcijskega brizganja in reakcijskega injekcijskega brizganja. Tehnologija je že nekaj časa poznana in uveljavljena pri proizvodnji elementov notranjosti vozila, zaslediti pa je možno tudi nekaj zunanjih aplikacij kot na primer pokrovi stebričkov ali spojlerjev. Visok porast povpraševanja po tej tehnologiji pa je nedavno povzročil prihod prvega serijskega sprednjega panela, kjer je uporabljeno "lakiranje" v orodju (*Slika 3*).

Slika 4: Avtomobil s serijskim sprednjim panelom, "lakiranim" v orodju, vir slike [9].

Pri tehnologiji "lakiranja" v orodju se v prvem koraku, enako kot pri klasičnemu injekcijskemu brizganju, nabrizga termoplastična komponenta, ki je lahko eno-komponentna ali več-komponentna in predstavlja nosilni del izdelka. V drugem koraku se preko termoplastičnega dela nabrizga poliuretan (PUR) ali poliurea (PUA), katerih sestavni komponenti sta združeni v mešalni glavi, nameščeni na samem brizgalnem orodju (*Slika 5*). Seveda je za izvedbo tega potrebna posebna dozirna enota.



Slika 5: Shema principa lakiranja v orodju

Po vbrizgu se PUR/PUA prične zamreževati in v okviru časa ohlajanja termoplasta tudi zamreži do nivoja, kjer se kos lahko izvrže iz orodja. Nanos PUR/PUA plasti nadomešča sloj laka, ki se klasično uporablja za zaščito kosa.

Ima pa tovrstna tehnologija tudi omejitve, kot prvo lahko izpostavimo večje konstrukcijske omejitve na izdelkih, kot jih imajo izdelki, ki so izdelani s klasičnim injekcijskim brizganjem in nato klasično lakirani na lakirni liniji. Več je tudi omejitev pri konstrukciji brizgalnih orodij, poleg tega pa morajo ti imeti izdelane določene detajle, ki niso implementirani pri klasičnih brizgalnih orodjih. In nenazadnje je ta tehnologija pogojena tudi z ustrezno opremo za doziranje PUR/PUA sistemov.

3 SKLEP

Sodobni trendi v avtomobilski industriji močno vplivajo na vse vgrajene komponente. Vedno več je funkcionalnosti, tisto, kar pa je vidno očem lastnika avtomobila in vsem mimoidočih pa postaja vse bolj atraktivnega videza. Povedano z drugimi besedami, želje in zahteve kupcev so vse višje in sledenje tem postavlja dobavitelje pred visoke izzive.

Premagovanje izzivov, ki jih predstavljajo zahteve kupcev, sili dobavitelje k novim pristopom, k nenehnemu razvoju in k posluževanju (za to panogo) manj značilnih tehnologij. Vsekakor pa je le vprašanje časa, kdaj bodo tehnologije, ki jih danes opisujemo kot manj značilne, postale stalnica v tovrstni industriji.

Viri:

[1] Five trends transforming automotive industry, dostop 24.04.2022, (https://www.pwc.com/gx/en/industries/automotive/assets/pwcfive-trends-transforming-the-automotive-industry.pdf).
[2] Introducing Cadillac LYRIQ: An All-Electric Future, dostop 24.04.2022, (https://www.cadillac.com/electric/lyriq).
[3] Lincoln Star concept, dostop 24.04.2022, (https://cdn.motor1.com/images/mgl/koooWn/s1/lincoln-star-concept-exterior.jpg).
[4] BMWs i vision circular concept, dostop 24.04.2022, (https://thebytenews.com/bmws-i-vision-circular-concept-thinks-about-sustainable-car-making/).
[5] Dario Loaldi et al., Manufacturing Signatures of Injection Molding and Injection Compression Molding for Micro-Structured Polymer Fresnel Lens Production, *Micromachines* 2018, 9, 653.
[6] Prashant Gajendragadkar, Film Insert Molding (FIM) – Economic alternative for Plastic Decoration, *Quanzen*, May 27, 2021.
[7] Decoration process line-up, dostop 24.04.2022, (https://www.nissha.com/english/products/allproducts/process.html).
[8] Comparison of HPF with traditional Vacuum- / Thermoforming, dostop 24.04.2022, (https://www.niebling-form.com/en/technology/)
[9] BMW iNext revealed as ix electric suv with 500 horsepower 300 mile range, dostop 24.04.2022, (https://www.motorauthority.com/news/1118577_bmw-inext-revealed-as-ix-electric-suv-with-500-horsepower-300-mile-range).

TRENDI PRI RAZVOJU PANELOV ELEKTRIČNIH AVTOMOBILOV

Aleš ADAMLJE, Pavel OBLAK
HELLA SATURNUS SLOVENIJA d.o.o.
.

IZVLEČEK

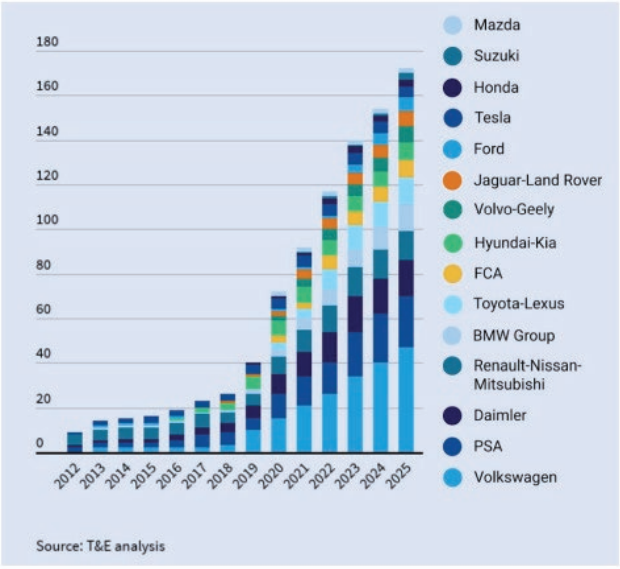
Z razvojem električnih vozil se odpirajo nove možnosti pri oblikovanju prednjih delov avtomobilov. Doslej so motorji z notranjim izgorevanjem na sprednjem delu avtomobila zahtevali prezračevalne reže. Ker pri električnih avtomobilih prezračevalne reže niso potrebne, imajo oblikovalci odprte možnosti pri oblikovanju prednjih panelov. Oblike panelov postajajo vse bolj nekonvencionalne in drzne. Paneli niso več le funkcionalni deli avtomobila, ampak določajo predvsem obliko avtomobila ter njegovo prepoznavnost, hkrati pa pridobivajo nove funkcionalnosti. Z novimi možnostmi oblikovanja, novimi funkcionalnostmi in zahtevami po avtonomni vožnji se tudi kompleksnost panelov povečuje, zato se pri izdelavi zahteva uporaba nekonvencionalnim materialov in tehnologij.

V članku bodo predstavljeni trendi pri oblikovanju prednjih panelov za električna vozila danes in v prihodnosti, primer osvetljenega prednjega panela, razvitega v podjetju HSS, ter tehnološki izzivi, s katerimi se srečujemo pri razvoju in izdelavi prednjih panelov za električne avtomobile.

1 UVOD

S prihodom električnih vozil so oblikovalci pridobili nove možnosti oblikovanja prednjega dela avtomobila. Odsotnost konvencionalnih motorjev in prihod avtonomnih vozil zahteva snovanje več funkcionalnih panelov. Vzporedno s prihodom električnih avtomobilov poteka intenziven razvoj vozil, ki omogočajo različne stopnje avtonomne vožnje. Eden ključnih sestavnih delov avtonomnih in električnih vozil postaja prednji panel, ki oblikovalcem omogoča ustvariti unikatne oblike panelov. Hkrati zahteve po trajnostnem oblikovanju izdelkov oblikovalce in proizvajalce avtomobilov omejujejo pri oblikovanju in izdelavi panelov ter zahtevajo izbiro trajnostnih materialov. Z namenom ohranjanja konkurenčnosti in trajnostnega razvoja z zniževanjem emisij CO2, na področju oblikovanja prednjih delov avtomobilov prihaja do velikih sprememb.

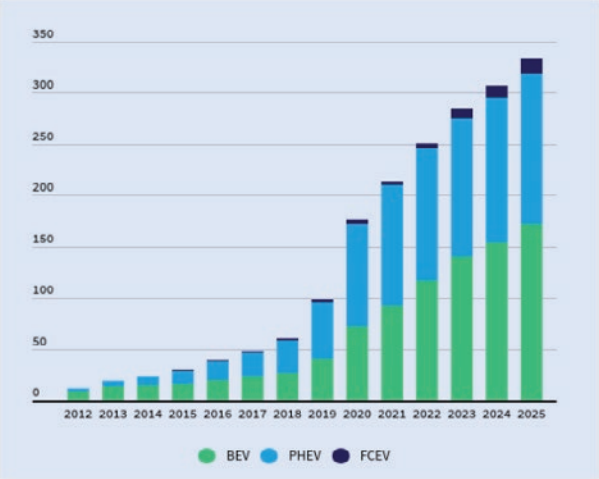
Na sliki 1 je predstavljeno število modelov povsem električnih avtomobilov, ki kot vir energije uporabljajo baterijo (BEV). Število modelov BEV vozil se v zadnjih letih naglo povečuje, hkrati pa se iz leta v leto število proizvajalcev, ki imajo v svojem portfelju BEV vozil povečuje.



Slika 1: Skupno število modelov povsem električnih avtomobilov v Evropi po letih [1]

Poleg BEV vozil se naglo povečuje število priključnih hibridov (PHEV), pri katerih je design panelov omejen zaradi zahteve po prezračevalnih režah v maski/panelu avtomobila. Poleg BEV in PHEV, na trg prihajajo tudi avtomobili s

pogonom na vodik (FCEV). Na sliki 2 vidimo, da bo skupno število modelov vozil z različnimi izvedbami električnih pogonov v Evropi do leta 2025 doseglo številko 350 [1].



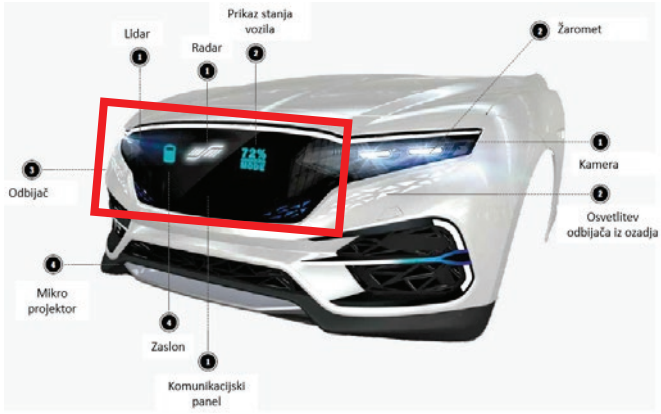
Slika 2: Število modelov električnih vozil v Evropi glede na izvedbo elektro pogona [1]

2 TRENDI PRI RAZVOJU PREDNJIH PANELOV

Z razvojem električnih vozil se na trgu pojavlja vedno več različnih izvedb panelov. Prvi električni modeli vozil so bili opremljeni z zaprtimi paneli brez prezračevalnih rež in le v nekaterih primerih z dodatnimi funkcijami. Danes se na trgu pojavljajo paneli z integriranimi svetlobnimi funkcijami, senzorji, kamerami in radarskimi sistemi, predstavljeni pa so bili tudi že koncepti panelov s hologrami. Novim trendom pri oblikovanju prednjih panelov sledijo tudi tehnologije, saj nove zahteve oblikovalcev zahtevajo inovativni pristop pri izdelavi le-teh.
BMW iX (slika 3) je eden prvih serijskih avtomobilov s pametnim panelom, ki omogoča vgradnjo senzorjev, kamer in radarskih sistemov za dekorativno zunanjo površino panela in je izdelan na nekonvencionalen način [2].
Za izdelavo panela so bile uporabljene nove tehnologije lakiranja v orodju (IMC), vakumskega naparevanja, ki je transparentno za radarske valove, laserskega graviranja in tehnologija zabrizgavanja grelne folije [3]. Zunanja površina ima lastnost samo popravljivosti, ki pri manjših praskah omogoča, da le-te pri segrevanju panela na temperature višje od 50°C izginejo.

Slika 3: BMW iX panel [2]

V naslednjih letih bo kompleksnost panelov naraščala, poudarek bo na povečanem številu funkcij panela, prilagajanju panelov željam posameznika in prepoznavnosti znamke. Poleg dekorativnih zahtev, bo v panele vgrajeno več naprednih funkcij. Podjetje Plastic- Omnium je v sodelovanju s podjetjem Hella razvilo prototip pametnega panela z integriranim radomom, lidarjem, zaslonom za prikaz stanja vozila, komunikacijskim paketom, ki omogoča komunikacijo z okolico in integriranim emblemom (slika 4). Panel je integriran v celotni prednji del avtomobila [4].



Slika 4: Koncept pametnega panela integriran v sprednji del avtomobila Plastic Omnium [4]

Proizvajalec Audi je predstavil koncept urbanega avtomobila za velemesta, ki je oblikovan kot dnevna soba na kolesih ali mobilna pisarna. Avtomobil bo ponujal povsem unikatno notranjost in zunanjost avtomobila. V sklopu prednjega panela je vgrajena svetlobna oprema, ki

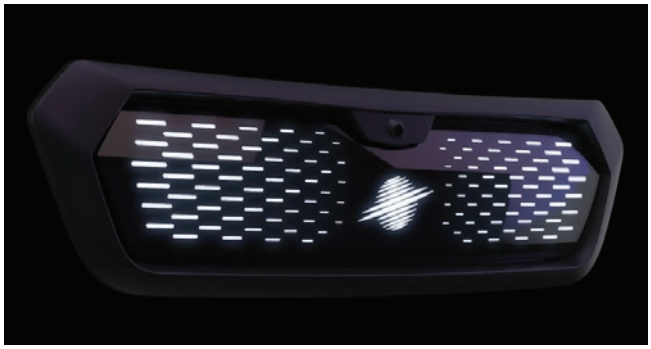
bo poleg običajnih funkcij omogočala tudi posebne dinamične svetlobne efekte. Ti bodo odvisni od okolice, situacije v prometu ali razpoloženja potnikov v avtomobilu (slika 5). [5]

Slika 5: Novi koncept Audijevega avtomobila za velemesta z osvetljenim panelom [5]

Nov koncept prednjega panela prikazanega na sliki 6 smo razvili tudi v podjetju HSS.

Slika 6: HSS koncept osvetljenega panela prihodnosti za električne avtomobile [6]

Multifunkcionalni koncept osvetljenega panela za električne avtomobile je zasnovan tako, da omogoča modulno gradnjo in individualnost. Panel omogoča vgradnjo različnih svetlobnih funkcij, radoma, različnih senzorjev, kamere za pomoč pri avtonomni vožnji in funkcije Lidar. Zasnova zunanje površine omogoča hitro spremembo designa, individualizacijo in integracijo dodatnih funkcij (slika 7).



Slika 7: Osvetljena površina Hella panela [6]

N trgu se pojavljajo tudi prvi koncepti panelov s hologramskimi zasloni. Podjetje VW je že leta 2018 predstavilo prvi koncept pametnega panela z zaslonom, ki projicira slike in ikone. Te omogočajo interaktivno komunikacijo med avtomobilom in pešcem (slika 8).

Slika 8: Prednji panel s hologramom VW [7]

Trendi oblikovanja prednjih delov avtomobilov prihodnosti kažejo, da postaja sprednji panel eden ključnih delov avtomobila in hkrati zaščitni znak posameznega modela avtomobila.

3 PRIMER IZDELKA

V razvoj in proizvodnjo prednjih panelov avtomobilov je aktivno vključeno tudi naše podjetje. V sodelovanju s proizvajalcem Škoda smo razvili sprednji osvetljeni panel "Crystal Face" za model Enyaq (slika 9). Izvor svetlobe predstavlja 131 LED-ic, osnovni optični element pa predstavlja debelostenska optika.
Na področju tehnologije smo se zaradi designa panela in zahtev kupca po ozkih geometrijskih tolerancah, homogenosti svetlobe in usklajenosti barve svetlobe z glavnimi svetili srečali z več izzivi.

Slika 9: Osvetljen Panel Skoda Enyaq [8]

Izdelek ima vgrajen debelostenski optični element v obliki ribje kosti z dolžino preko 1000 mm. Ena od zahtev za njegov design je bilo razmerje med najmanjšo in največjo debelino 1:3, minimalna debelina elementa pa je bila 2x večja, kot je običajna debelina notranjih leč. To pa je z vidika izbire materiala, tehnološkega postopka in koncepta orodja zahtevalo tudi nov pristop.
Zaradi zahteve po homogenosti in usklajenosti barve z barvo svetlobe žarometov, je poseben izziv predstavljala tudi izbira materiala optičnega elementa in LED izvorov.
Dodatna zahteva po optičnih elementih z minimalnimi radiji na funkcionalnih optičnih površinah, globina posameznih optičnih elementov in razdalja med posameznimi optičnimi elementi je zahtevala prilagoditev koncepta orodja z vidika sistema hlajenja in izvedbe dolivnega sistema.
Pri dolivnem sistemu so se zaradi dekorativnih in funkcionalnih zahtev izdelka pojavile dodatne omejitve. S partnerskim sodelovanjem orodjarja, konstrukcije in tehnologije v HSS ter kupca se je koncept prototipnega orodja izkazal kot optimalen in ga za potrebe serijskega orodja ni bilo potrebno spreminjati. Dodaten izziv je predstavljala industrializacija, saj je industrializacija prototipov izvedla v Sloveniji, industrializacija serijskega izdelka pa v matičnem podjetju v Nemčiji, kar je zahtevalo intenzivno sodelovanje timov obeh sestrskih podjetij.

4 SKLEP

Hiter razvoj električnih in avtonomnih vozil prinaša nove izzive. Dodatne zahteve po digitalizaciji, trajnostnem razvoju in zasnovi namenskih vozil od dobaviteljev zahtevajo nenehno izobraževanje in osvajanje novih znanj, ki jim omogočajo razvoj in izdelavo vedno kompleksnejših produktov. Vedno večji poudarek je tudi na individualnem designu, ki omogoča prilagoditev sestavnih delov individualnim željam kupca ali harmonizacijo le-teh s karoserijo avtomobila. Razvojni dobavitelji postajajo enakovredni razvojni partnerji proizvajalcem avtomobilov in le z inovativnostjo ter sodelovanjem dobavitelja s kupcem je možen razvoj kvalitetnih izdelkov ter ohranjanje konkurenčnosti na trgu.
Partnersko sodelovanje vseh vpletenih v proces razvoja, industrializacije in proizvodnje izdelkov, zgodnje vključevanje vseh dobaviteljev v proces razvoja izdelka, usmerjenost k skupnemu cilju ter uvajanje novih tehnoloških postopkov v proces izdelave izdelkov so postali pogoj za preživetje vseh udeležencev na globalnem trgu.

Viri:

[1] 2019_07_TE_electric_cars_report_final.pdf (2022, 28, april) Pridobljeno na: https://www.transportenvironm ent.org/wp-content/uploads/2021/07/2019_07_TE_electric_cars_report_final.pdf
[2] BMW grille gets smart to take home SPE award Plastics News (2022, 28, april) Pridobljeno na https://www.plasticsnews.com/news/bmw-grille-gets-smart-take-home-spe-sward?msclkid=7e68224dcf1411eca90f0b6c9e52374c
[3] BMW setzt Beschichtungsanlagen von Oerlikon Balzers ein (2022, 28, april) Pridobljeno na https://www.kunststoff-magazin.de/ formenbaubmw-setzt-beschichtungsanlagen-von-oerlikon-balzers-ein.htm
[4] Plastic Omnium: Let's shape the future of mobility (2021, 23. april). Pridobljeno na: https://www.plasticomnium.com/wp-content/uploads/2021/01/ plastic-omnium-annual-report-2019-en.pdf
[5] Audi's Urbansphere Concept for Megacities - DVN (drivingvisionnews.com) (2022, 28, april) Pridobljeno na https://www.drivingvisionnews.com/news /2022/04/26 /audis-urbansphere-concept-for-megacities/
[6] Panel technology: HELLA develops new design concepts for the vehicle front end (2022, 28, april) Pridobljeno na: https://www.hella.com/soe/en/News/Panel-technology-HELLA-develops-new-design-concepts-for-the-vehicle-front-end-5022/
[7] Volkswagen previews interactive holographic headlights for future cars (2022, 28, april) Pridobljeno na: https://www.autonomousvehicleinternational.com/news/adas/volkswagen -previews-interactive-holographic-headlights-for-future-cars.html
[8] HELLA sets the scene for the Skoda Enyaq iV with an illuminated radiator grille (2022, 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

SISTEM ZA NADZOR PROCESA BRIZGANJA PLASTIČNIH MATERIALOV

Kristjan RIJAVEC, Domen ROVŠČEK, Aljaž PODOBNIK
Hidria d.o.o.

IZVLEČEK

V družbi se pojavljajo vsesplošna prizadevanja za revolucijo v industriji plastike. Iniciative za uporabo trajnostnih alternativ predstavljajo velike izzive za obstoječe postopke predelave polimerov serijske proizvodnje. Podjetja, ki se ukvarjajo s predelavo polimerov bodo zato na preizkušnji, da se soočijo z novimi okoliščinami. Kupci pričakujejo hitro sprejetje novih, trajnostnih alternativ materialov, kot so reciklirana plastika, biokompoziti in polimeri na biološki osnovi, z vedno višjimi standardi kakovosti in ob ohranjanju cen na enaki ravni.

Pobude za recikliranje, ki so sicer upravičeno sprejete v industriji, še povečajo vrzel med spremenljivim materialom (vhodom) in končnim izdelkom (izhodom). Poleg tega vse več podjetij poroča o izzivih pri iskanju delovne sile za opravljanje proizvodnih procesov. Ker so obstoječe rešitve drage in zahtevne za uporabo, predlagamo rešitev, ki ponuja ravno nasprotno – cenovno dostopnost in enostavnost uporabe.

Trenutni projekt obsega razvoj, optimizacijo in implementacijo rešitve za pametno brizganje plastike. Sistem temelji na piezo-kristalnem senzorju, ojačevalniku naboja, FPGA gnani DAQ napravi in oblačni rešitvi za analizo in vizualizacijo podatkov. Predlagana rešitev bo podjetjem za predelavo polimerov pomagala premostiti vrzel med novo generacijo trajnostnih industrijskih standardov in kakovostjo, hkrati pa bo tudi sam proces postal bolj trajnosten.

1 OD SENZORJA DO SISTEMA

Razvoj senzorja tlaka za brizganje plastike je bil v zadnjih letih poln preobratov. Začetno zanimanje potencialnih kupcev je dalo projektni skupini velik zanos. Znanje, ki je bilo akumulirano med razvojem žarilne svečke s senzorjem tlaka (PSG) [1] [2] [3] [4], je bilo uporabljeno za razvoj podobnega piezoelektričnega tlačnega senzorja z vgrajeno elektroniko. Vse je že kazalo, da je naslednji korak industrializacija in nato proizvodnja senzorja. Šele tekom bolj obsežnih validacij v različnih orodjih so se pokazale dejanske omejitve razvite rešitve. Tako se je izkazalo, da je senzor preveč občutljiv na temperaturna nihanja v orodju. Poleg tega je bilo skozi pogovore z različnimi strokovnjaki in potencialnimi kupci ugotovljeno, da sam senzor ne bo dovolj za končnega uporabnika, saj ne omogoča celovitega nadzora nad procesom brizganja plastike, ampak »le« merjenje tlaka. Vse je kazalo, da so novi izzivi morebiti previsoka ovira. Kljub temu razvojna ekipa Hidrie ni obupala in je naprej iskala boljšo rešitev. Tako sta bila v zadnjem letu storjena dva ključna koraka, ki sta ponudila odgovor na nove izzive.

Razvit je bil poseben zunanji nabojni ojačevalnik, kar je omogočilo uporabo drugačnega piezoelektričnega elementa kot pri predhodni različici senzorja. Namesto piezo keramike je zdaj uporabljen piezo kristal. Posledično je senzor bistveno manj občutljiv na temperaturne spremembe, z umikom elektronike izven orodja pa je po novem dopustna tudi uporaba senzorja pri višjih temperaturah in možna vgradnja v manjša orodja zaradi precej pomanjšanih dimenzij. Senzor z vgrajeno elektroniko ni dopuščal dolžine manjše od 40mm, medtem ko zadnji dizajn meri le 25mm. Jedro senzorja ne sme preseči temperature 200°C, sama konica, torej edini del, ki je v stiku z talino, pa z lahkoto prenese tudi bistveno večje temperature.

Senzorju se je dodalo še zajemno napravo (angl. *data acquisition device,* krajše DAQ), katerega osnovna funkcija je ojačitev signala tlaka in pretvorba v primerno obliko za pošiljanje v brizgalni stroj ali druge naprave. FPGA gnani zajemni sistem bo montiran na orodje in bo omogočal tudi dodatne funkcionalnosti, ki bodo še povečale praktično vrednost rešitve. Omogočal bo priklop do osem tlačnih senzorjev in zdržal 85°C, pri čemer je potrebno poudariti, da je modul toplotno izoliran in se nanj prenese le manjši del temperature orodja.

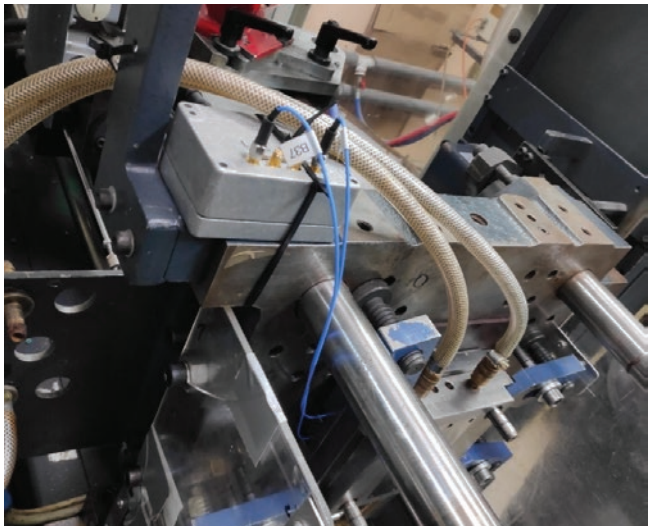
2 PREDNOSTI UPORABE HIDRIINEGA SISTEMA

2.1 Proizvodnja brez reklamacij

Sistem ponuja prednosti na različnih ravneh. V prvi vrsti je sistem namenjen nadzoru kakovosti, kar je izjemno pomembno v vse bolj negotovih časih plastične industrije. Neposredna korelacija med tlakom v kaviteti in kakovostjo izdelka omogoča zmanjšanje števila reklamacij. Proizvodnji je omogočena višja stopnja avtonomnosti in predvsem izboljšana skupna učinkovitost opreme (angl. *OEE*). Glede na statistiko procesa bodo avtomatsko sproženi alarmi za vzdrževanje orodij. Hidriina rešitev se od konkurenčnih rešitev razlikuje tudi v tem, da bo cenovno dostopna tudi za manj zahtevne produkte in bo čas poplačila investicije bistveno krajši.

2.2 Princip pametnega orodja

Analiza konkurenčnih rešitev je pokazala, da se praktično vsi poslužujejo podobnega tehničnega modela v smislu povezljivosti. Za dodajanje pametnih funkcionalnosti je potrebno dokupiti sistem, ki je vezan na stroj. Ta sistem ne potuje z orodjem, ampak ostaja vedno pri istem stroju, kar imenujemo centraliziran sistem. Hidriin sistem je decentraliziran – na nivoju koncepta je bolj vezan na orodje kot na stroj.

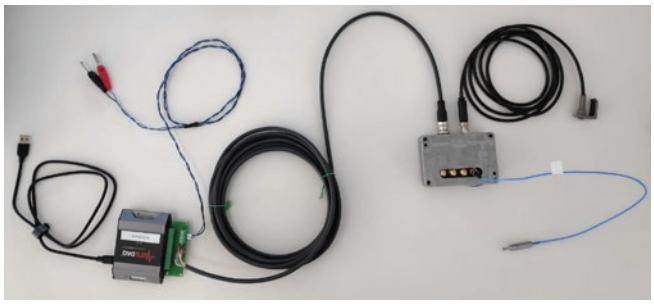


Slika 1: 'Pamet' sistema je montirana na orodje

Tak koncept odpira nove priložnosti funkcionalnosti. Možno je shranjevanje dokumentacije, ki je vezana na izdelek ali orodje (npr. risbe, PPAP ipd.) ter sledenje lokaciji, saj je predviden tudi GPS modul. Predvidena je tudi funkcija samodejnega nastavljanja parametrov stroja. Parametri so s klikom na gumb v poljubnem trenutku (npr. ob koncu proizvodne serije) shranjeni. Ob zagonu nove proizvodne serije so avtomatsko preneseni na stroj in proizvodnja se lahko začne. Tudi sledljivost skozi celotno verigo postaja vedno bolj pomembna tematika. S Hidriinem sistemom bo ta še bolj transparenta in bolj podrobna, saj bo vsak izdelek imel svoj podpis v smislu kavitetne tlačne krivulje in shranjenih procesnih parametrov.

3 ŠTUDIJA PRIMERA

V podjetju, ki se ukvarja z brizganjem plastike smo postavili pilotni sistem. Sistem je sestavljen iz dveh tlačnih senzorjev, komercialno dostopnega modula za zajem podatkov, induktivnega senzorja (potreben za proženje meritev), industrijskega računalnika (ni prikazan na sliki) in ostalih podpornih elementov (kabli, konektorji, ipd). Pilotni sistem je predstavljen na sliki 2. Zaradi omejenega prostora v orodju sta senzorja postavljena na hladnem dolivnem sistemu, simetrično glede na dolivek.



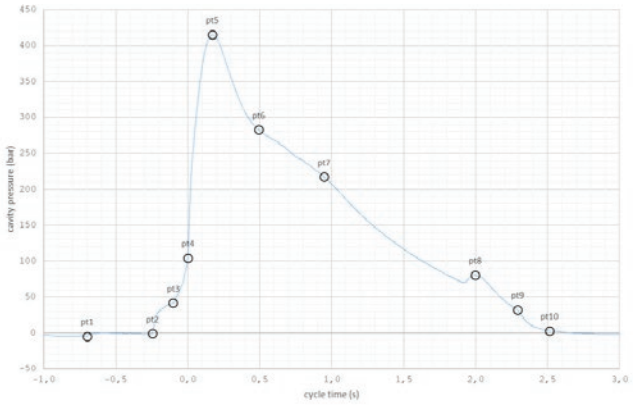
Slika 2: Pilotni sistem

3.1. Osnove – karakteristične točke

Na zajeti tlačni krivulji identificiramo več karakterističnih točk. Vsaka ima svoj fizikalni pomen. Na sliki je primer tlačne krivulje iz serijskega orodja kjer smo identificirali in spremljali deset karakterističnih točk.

Seveda ima lahko vsako orodje nekoliko drugačen potek krivulje tlaka, zato se lahko tako število kot pozicija karakterističnih točk razlikuje od orodja do orodja. Vseeno lahko izpostavimo nekaj pomembnejših točk, ki so tipično vedno prisotne:

- Pt2 – polnjenje kalupa, plastika doseže konico senzorja.
- Pt4 – stiskanje, kalup je napolnjen, tlak skokovito narase.
- Pt5 – točka maksimalnega tlaka.
- Pt10 – konec cikla, držanje naknadnega tlaka po tej točki nima več smisla saj je plastika v kalupu že ohlajena in strjena.



Slika 3: Karakteristične točke tlačne krivulje znotraj kavitete

Identifikacija karakterističnih točk tlačne krivulje znotraj kalupa s pomočjo senzorja tlaka nam omogoča spremljanje ponovljivosti procesa in zgodnje odkrivanje sprememb, ki bi lahko negativno vplivale na brizgane izdelke. Poleg dolgoročnega lezenja procesa lahko zaznamo tudi posamezne vzorce, katerih tlačna krivulja ne ustreza postavljenim kriterijem. To so lahko razni nedoliti ali slabo doliti izdelki.

Iz karakterističnih točk in tlačne krivulje lahko izpeljemo sekundarne parametre kot je na primer integral pod tlačno krivuljo. Ti parametri nam nudijo dodaten vpogled in informacije o procesu brizganja.

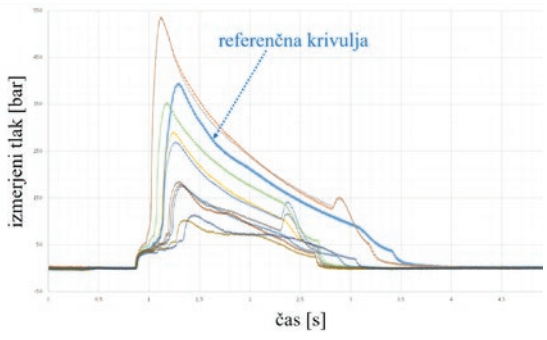
3.2 Nadzor nad dimenzijami izdelka

Na istem serijskem orodju smo opravili analizo izmerjenih krivulj tlaka in vzpostavili nadzor nad nedolitostjo brizganih kosov. Cilji testiranja so bili:

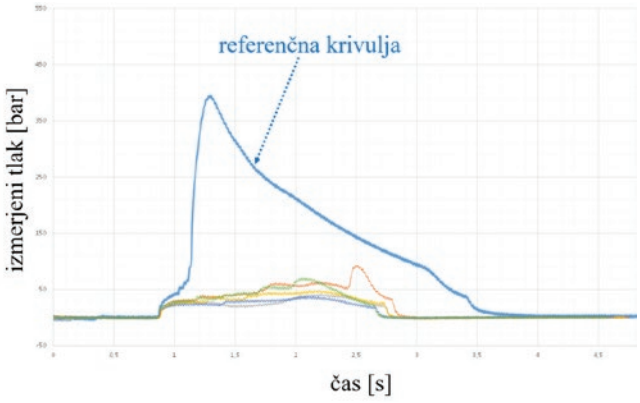
- določiti referenčno krivuljo tlaka v orodju pri optimalnih pogojih brizganja,
- pri različnih pogojih brizganja primerjati krivulje tlaka v orodju z referenčno krivuljo,
- z spreminjanjem parametrov brizganja namerno ustvariti neoptimalne pogoje, pri katerih se brizga nedolite kose,
- zagotoviti dolitost serijskih kosov z določanjem ustreznih limit krivulje tlaka v orodju.

Na slikah je vidna primerjava različnih izmerjenih krivulj z referenčno krivuljo. Kljub občutnemu spreminjanju parametrov brizganja (naknadni tlak, pomik polža, …) in posledično tudi velikim spremembam tlačne krivulje smo še vedno dobivali ustrezno dolite kose, saj se je brizgalo relativno majhne izdelke. Šele pri večji spremembi brizgalnih parametrov smo dosegli dovolj veliko spremembo tlaka v orodju, da so bili kosi nedoliti, zato lahko proces definiramo kot zelo robusten. Pri tem je potrebno dodati, da smo se fokusirali samo na nedolitost, tako da so vsa manjša geometrijska odstopanja, in npr. poroznost kosov, bila prepoznana kot sprejemljiva.

Meritve so podale rešitev za probleme z nedolitostjo kosov. Z dodajanjem zgornje in spodnje limite maksimalnega izmerjenega tlaka v posameznem ciklu brizganja bomo dosegli, da nas bo sistem opozarjal na nedolite kose in jih izločal. To bo uporabniku omogočilo, da se nedoliti kosi ne bodo več mešali z dolitimi in ne bo več potrebno prebiranje slabih kosov, kar bo občutno zmanjšalo možnosti za reklamacije in prihranilo vloženi čas.



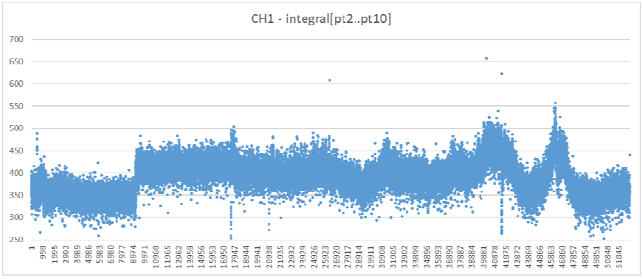
Slika 4: Krivulje dolitih izdelkov



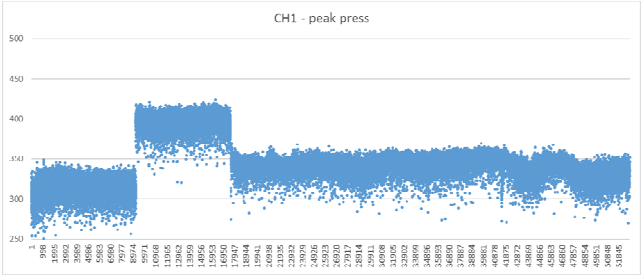
Slika 5: Krivulje nedolitih izdelkov

3.3 Nadzor nad procesom

Naslednja dva grafa prikazujeta statistiko integrala pod krivuljo in maksimalnega tlaka nekaj več kot 50.000 ciklov na serijskem orodju. Na obeh grafih lahko opazimo skokovite splošne premike celotne populacije kot tudi počasno lezenje proizvodnega procesa. Poleg tega lahko opazimo posamezne vzorce, ki odstopajo precej izven populacije. Vse te informacije lahko s pridom uporabimo za nadzor procesa brizganja, optimizacijo parametrov in izločanje izmetnih vzorcev.



Slika 6: Statistika - integral krivulje



Slika 7: Statistika - maksimalen tlak krivulje

4 SKLEP

Trenutno poteka faza testiranj in validacij senzorja, ki je osnova za graditev projekta naprej. Po uspešni prvi inštalaciji sistema predstavljeni v tem članku, je potrebno nameniti več časa za obdelavo podatkov in jih povezati s specifičnimi težavami v proizvodnji (npr. obraba polža ipd.). Ob koncu leta 2022 in v začetku leta 2023 želimo število pilotnih projektov povečati. Interes s strani potencialnih kupcev je velik, vseeno pa smo odprti za pogovore z novimi partnerji, ki jih Hidriin sistem zanima in si ga želijo preizkusiti tudi v lastni proizvodnji. Vsa taka podjetja pozivam, da stopijo v kontakt z nami (kristjan.rijavec@hidria.com) in skupaj začnemo graditi projekt, ki bo vaše podjetje dvignil iz povprečja od sicer zelo konkurenčne industrije brizganja plastike.

Slika 8: Senzor tlaka

Viri:

[1] Šuligoj A.: Glow plug breakthrough, *Engine Technology International* 9(2011), str. 76.
[2] Šuligoj A.: Eco-friendly Glow plug, *Engine Technology International* 9(2012), str. 97.
[3] Šuligoj A.: Pressure sensor advance, *Engine Technology International* 3(2014), str. 64.
[4] Spletna stran Hidrie: »Svečka s senzorjem tlaka« (http://si.hidria.com/si/o-nas/projekti-reference/7708/detail.html)

PRIMERJAVA KOVINSKIH IN POLIMERNIH ORODNIH VLOŽKOV

Blaž NARDIN, Silvester BOLKA, Teja PEŠL, Rebeka LORBER,
Tamara ROZMAN, Rajko BOBOVNIK,
Fakulteta za tehnologijo polimerov

IZVLEČEK

V industriji polimernih materialov je za določene aplikacije pomemben optični izgled izdelka. Nanj vpliva tudi izbira materiala za izdelavo orodja. Vemo, da so toplotne prevodnosti materialov različne, kar bistveno vpliva na temperaturo orodja med samim procesom brizganja. Temperatura orodja je eden izmed glavnih parametrov, ki vplivajo na površino samega izdelka. V prispevku smo raziskovali vpliv materiala orodnega vložka na hrapavost površine izdelka in na optični izgled izdelka. Za primerjavo smo uporabili orodni vložek iz aluminija ter orodna vložka iz polimernega materiala, enega iz transparentnega polikarbonata (PC) in drugega narejenega s postopkom SLA tehnologije in materiala Perform TH. Hrapavost smo merili z digitalnim mikroskopom Keyence VHX 700, ki nam omogoča do 2000x povečavo. Ugotovili smo, da je bila hrapavost površin brizganih kosov v primeru aluminijastega orodnega vložka večja, sam optični izgled izdelka pa je bil boljši v obeh primerih nekovinskih orodnih vložkov. Na splošno smo boljše rezultate dobili v primeru nekovinskih orodnih vložkov, saj so bili izdelki bolj gladki, torej so imeli nižjo hrapavost obenem pa tudi boljši optični izgled.

1 UVOD

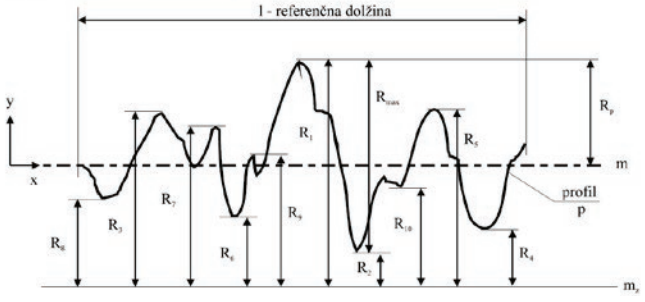
Zaradi hitrega razvoja izdelkov in vedno večje personalizacije izdelkov je potrebno slediti tem trendom tudi s postopki hitre izdelave orodij za potrebe brizganja plastičnih kosov v manjših količinah. Prototipne tehnologije ali dodajalne tehnologije na omogočajo po eni strani direktno izdelavo kosov, ki pa niso brizgani, po drugi strani pa nam omogočajo hitro izdelavo orodij, ki jih nato uporabimo kot prototipno orodje. Poleg dodajalnih tehnologij lahko za razvoj prototipnih izdelkov in orodij uporabimo tudi tehnologije z odvzemanjem materiala.

Tehnologije odvzemanja materiala so dolgo poznane tehnologije in se na široko uporabljajo v večini primerov za izdelavo orodij, v nekaterih primerih pa tudi za izdelavo končnih izdelkov, predvsem tam, kjer imajo izdelki naravo posamične proizvodnje. V teh primerih govorimo o tehnologijah, kot so frezanje, struženje, brušenje, vrtanje, itd.

Dodajalne tehnologije so trenutno ene najbolj hitro razvijajočih se tehnologij, saj smo priča konstantnem inoviranju postopkov izdelave, kakor tudi uporabljenih materialov. V večini primerov dodajalnih tehnologij gre za uporabo laserskega žarka, ki na enega izmed fizikalnih načinov utrdi material na izbrano obliko in dimenzijo. Na tem področju sta najbolj znani laserska stereolitografija (SLA) in selektivno lasersko sintranje (SLS).

Za potrebe raziskovalnega dela nas je zanimalo, kakšne bodo dosežene hrapavosti pri uporabi različnih materialov orodij (orodja iz aluminija, orodja iz polikarbonata in orodja iz Performa TH, ki se uporablja za lasersko stereolitografijo).

Fenomen hrapavosti bomo opazovali s sredno višino neravnin, ki se meri z R_z in srednjim odstopanjem profila R_a, ki ju določimo s spodnjima enačbama na sliki 2. Grafično so predstavljene na sliki 1.



Slika 1: Definicija R_z in R_a [1]

$$R_z = \frac{(R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9) - (R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10})}{5}$$

$$R_a = \frac{1}{l}\int_0^l |y| dx$$

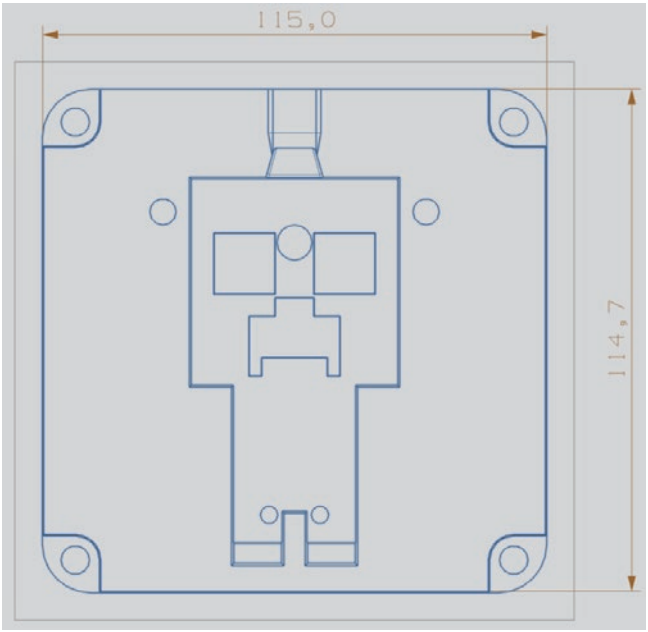
Slika 2: Enačbi za izračun R_z in R_a [1]

2 EKSPERIMENTALNI DEL

2.1 Orodni vložki

Za potrebe raziskave smo uporabili klasično brizgalno orodje, ki ga imamo na razpolago na fakulteti. Značilnost tega orodje je v tem, da ima izmenljive oblikovne vložke. Orodje je narejeno iz orodnega jekla 1.1730.

V sklopu projekta smo izdelali 3 različne orodne vložke, ki smo jih nato uporabili v procesu brizganja plastike. Vložke smo montirali v orodje in izvedli postopek brizganja. Vsi orodni vložki so bili enakih dimenzij in oblik, brez naknadne ročne dodelave, kar prikazuje slika 3.



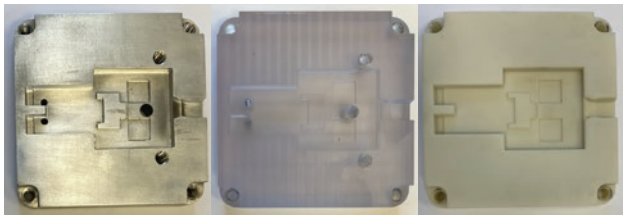
Slika 3: Dimenzije vložka (v mm)

Prvi vložek je narejen iz aluminijastega bloka po klasični metodi izdelave – frezanje orodja.

Drugi vložek je narejen s pomočjo lepljenja polikarbonatnih plošč debeline 20 mm, ki so bile nato frezane na zahtevano obliko.

Tretji vložek je narejen s postopkom laserske stereolitografije (SLA) iz polimeren smole Perform TH. To je material z vključki keramike. Omogoča izdelavo močnih in trdnih delov z visoko temperaturno odpornostjo. Značilna je vrhunska kakovost površine in natančnost detajlov. Z dodatnim temperiranjem izdelanih kosov iz tega materiala dvignemo temperaturno odpornost samega materiala in se s tem približamo lastnostim duroplastičnih materialov. [2]

Na sliki 4 so predstavljeni vsi trije orodni vložki.



(a) (b) (c)

Slika 4: Orodni vložki iz (a) aluminija, (b) polikarbonata in (c) Performa TH

Na sliki 5 je predstavljeno vpetje vložka v orodje.

Slika 5: Orodje z vgrajenim vložkom Perform TH

2.2 Priprava brizganih kosov

Kot je razvidno iz slike 5, so bili vsi vložki vgrajeni v orodje in nato testirani na stroju za brizganje plastike, Krauss Maffei 50-180 CX s premerom polža 30 mm.

Material, ki smo za uporabili za izdelavo vzorcev je PP s 15 % odpadnega papirja. V vseh primerih je bil material pripravljen identično. Z vsakim vložkom smo izdelali po 12 kosov.

2.2.1 Priprava vzorcev iz aluminijastega vložka

Temperaturni profil je naraščal od lijaka (175 °C) do šobe (190 °C). Temperatura orodja je bila nastavljena na 25 °C, čas hlajenja pa na 10 s. Naknadni tlak je znašal 1200 barov in je trajal 10 s. Protitlak je bil nastavljen na 150 barov, obrati polža pa na 100 vrtljajev na minuto. Hitrost brizganja je bila nastavljena na 55 mm/s, za zadnja 2 mm pa na 20 mm/s.

2.2.2 Priprava vzorcev iz polikarbonatnega vložka

Temperaturni profil je padal od šobe (185 °C) do lijaka (160 °C). Temperirne naprave nismo uporabili, čas hlajenja je znašal 120 s. Naknadni tlak je znašal 250 barov in je trajal 10 s. Protitlak je bil nastavljen na 25 barov, obrati polža pa na 100 vrtljajev na minuto. Hitrost brizganja je bila nastavljena na 55 mm/s, za zadnja 2 mm pa na 20 mm/s.

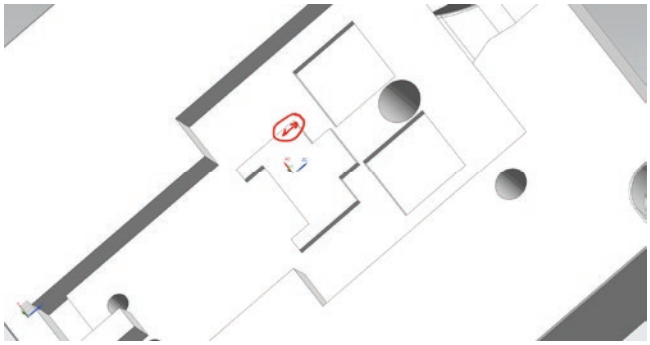
2.2.3 Priprava vzorcev iz Perform TH vložka

Temperaturni profil je padal od šobe (185 °C) do lijaka (160 °C). Temperirne naprave nismo uporabili, čas hlajenja je znašal 120 s. Naknadni tlak je znašal 250 barov in je trajal 10 s. Protitlak je bil nastavljen na 25 barov, obrati polža pa na 100 vrtljajev na minuto. Hitrost brizganja je bila nastavljena na 55 mm/s, za zadnja 2 mm pa na 20 mm/s.

2.3 Izvajanje meritev

Za izdelavo meritev smo uporabili digitalni mikroskop Keyence VHX 7000. Zaradi zagotavljanja ponovljivosti in primerljivosti meritev smo vse meritve izvajali z identično osvetlitvijo pri 1000 x povečavi. Z željo, da ugotovimo hrapavost na še manjšem področju, smo merili hrapavost na istem merjenem področju, kot je bilo merjena pri 1000 x povečavi ponovno pri povečavi 2000 x.

Meritve smo izvajali tako na orodnih vložkih, kakor tudi na brizganih kosih. Mesto meritve je označeno na sliki 6.



Slika 6: Pozicija meritve hrapavosti na orodju in brizganih kosih

V vseh primerih meritev orodnih vložkov smo merili hrapavost pri 1000 x povečavi v dolžini med 249,17 do 261,91 µm, medtem ko je dolžina meritve hrapavosti pri 2000 x povečavi znašala med 132,44 in 135,39 µm. Smer meritve je prav tako označena na sliki 6.

V vseh primerih meritev brizganih kosov smo merili hrapavost pri 1000 x povečavi v dolžini med 232,73 do 253,66 µm, medtem ko je dolžina meritve hrapavosti pri 2000 x povečavi znašala med 127,22 in 134,77 µm. Smer meritve je prav tako označena na sliki 6.

Toplotne lastnosti smo karakterizirali s Flash DSC 1. Vzorce smo vzeli iz površine brizganih kosov na delu, kjer smo merili tudi hrapavost. Meritve smo izvedli v dušikovi atmosferi s pretokom 20 mL/min. Pri meritvah smo hitrost ohlajanja spreminjali od 1 °C/s do 1.000 °C/s (1 °C/s, 2 °C/s, 5 °C/s, 10 °C/s, 20 °C/s, 50 °C/s, 100 °C/s, 200 °C/s, 500 °C/s in 1.000 °C/s). Hitrost segrevanja je bila konstantna 1.000 °C/s. Med dinamičnimi segmenti je bil vedno izotermni segment 0,1 s. Segrevali smo od 15 °C do 200 °C. Zatehte vzorcev so bile okoli 100 ng. Vrednotili smo talilno entalpijo in tališče za prvo segrevanje, ki je bilo normalizirano s talilno entalpijo za segrevanje s predhodnim ohlajanjem s hitrostjo ohlajanja 1 °C/s.

3 REZULTATI

Meritve hrapavosti, ki so bile izvedene na orodnih vložkih in brizganih kosih so predstavljene v tabelah 1, 2 in 3, ter predstavljajo rezultate hrapavosti na delu orodnega vložka in izdelka, ki je prikazan na sliki 4.

Pri preizkušanju orodnega vložka iz materiala Perform TH v orodje izmetači niso bili vgrajeni,

saj so na vložku manjkale izvrtine za izmetače. To na rezultate meritev ne vpliva.

Tabela 1: Zbrani rezultati meritev orodja in brizganih kosov pri aluminijastem vložku

	Aluminij			
	Orodje		Brizgan kos	
Povečava	1000 x	2000 x	1000 x	2000 x
R_a (µm)	0,65	0,69	11,14	8,48
R_z (µm)	3,6	3,59	35	21,43
Dolžina (µm)	261,91	133,55	253,66	134,77

Tabela 2: Zbrani rezultati meritev orodja in brizganih kosov pri polikarbonatnem vložku

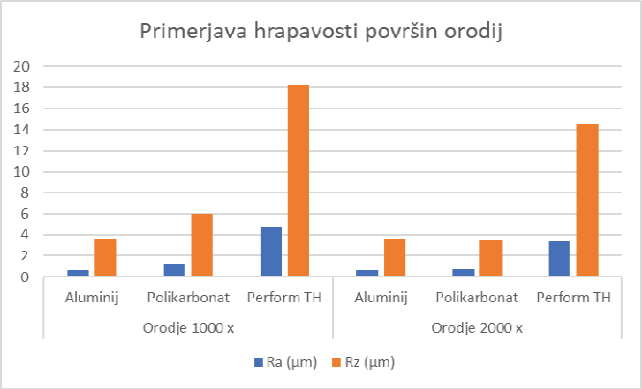
	Polikarbonat			
	Orodje		Brizgan kos	
Povečava	1000 x	2000 x	1000 x	2000 x
R_a (µm)	1,23	0,71	0,91	1,03
R_z (µm)	5,97	3,48	5,03	5,32
Dolžina (µm)	254,45	135,39	232,73	131

Tabela 3: Zbrani rezultati meritev orodja in brizganih kosov pri Perform TH vložku

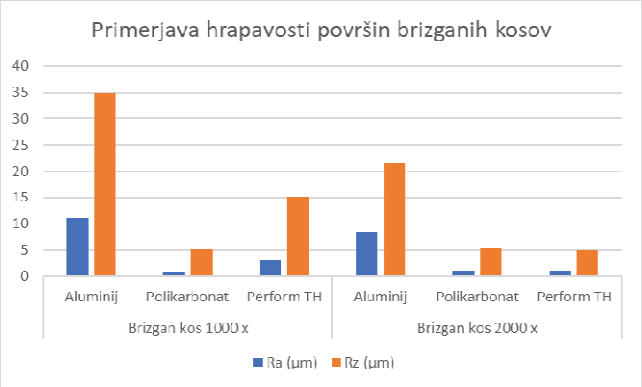
	Perform TH			
	Orodje		Brizgan kos	
Povečava	1000 x	2000 x	1000 x	2000 x
R_a (µm)	4,79	3,45	3,15	0,99
R_z (µm)	18,25	14,58	15,09	5,00
Dolžina (µm)	249,17	132,44	237,37	127,22

Izvedena je bila analiza hrapavosti površin orodij tako pri 1000 x, kot tudi pri 2000 x povečavi. Prikazana je na sliki 7, kjer lahko ugotovimo, da je bila najnižja hrapavost na orodju dosežena pri aluminijastem vložku, najvišja pa pri Perform TH pri obeh povečavah.

Prav tako je bila izvedena primerjava hrapavosti površin brizganih kosov, ki je prikazana na sliki 8. Iz slike je razvidno, da se je hrapavost brizganih kosov glede na hrapavost orodnega vložka pri aluminijevem orodnem vložku zvišala, pri polikarbonatnem in Perform TH orodnih vložkih se je znižala.



Slika 7: Primerjava hrapavosti orodnih vložkov



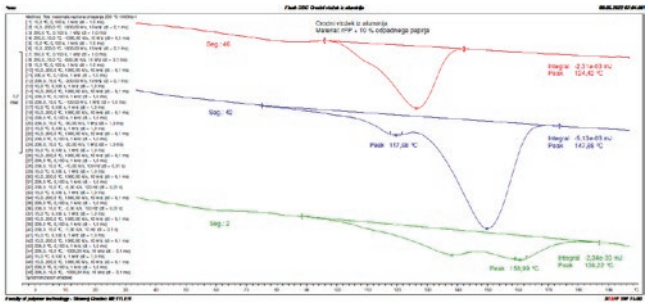
Slika 8: Primerjava hrapavosti brizganih kosov

(a) (b) (c)

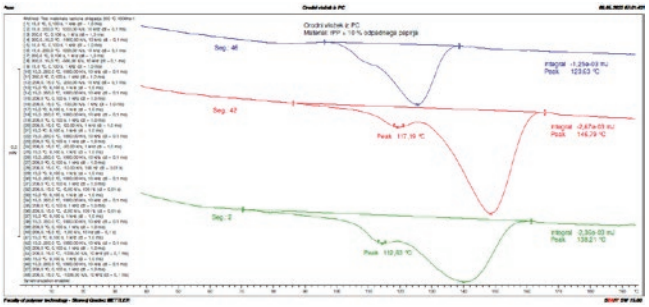
Slika 9: Primerjava brizganih kosov; materiali orodja so iz (a) aluminija, (b) polikarbonata in (c) Perfoma TH

Rezultati Flash DSC so prikazani na slikah 10-13.

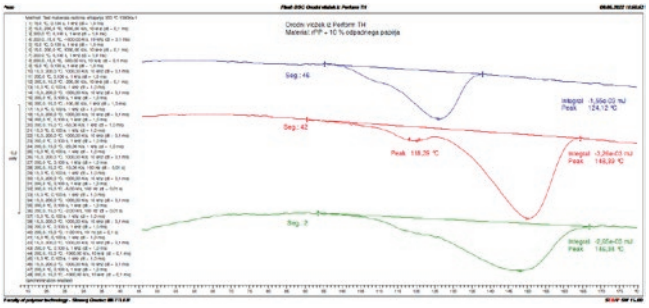
Talilna entalpija prvega segrevanja normalizirana s talilno entalpijo segrevanja s predhodnim ohlajanjem z 1 °C/s je najvišja pri orodnem vložku iz polikarbonata, nižja je pri orodnem vložku iz Performa TH, najnižja je pri orodnem vložku iz aluminija.



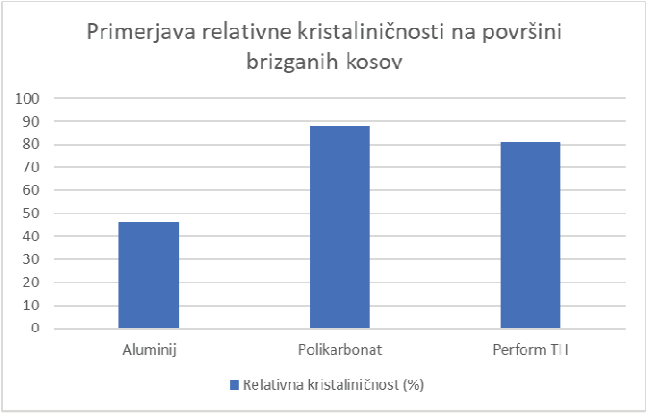
Slika 10: Flash DSC analiza površine brizganega kosa pri orodju iz aluminija



Slika 11: Flash DSC analiza površine brizganega kosa pri orodju iz polikarbonata



Slika 12: Flash DSC analiza površine brizganega kosa pri orodju iz Perform TH



Slika 13: Primerjava relativne kristaliničnosti na površini brizganih kosov iz orodij iz različnih materialov

Spremenjena morfologija površine brizganih kosov iz različnih materialov orodnih vložkov se kaže tudi v obliki tališča, različnih temperatur tališč in različnih jakostih temperatur tališč pri prvem segrevanju. Pri orodnem vložku iz aluminija se formira gama faza, kot posledica hitrega ohlajanja in visokih tlakov brizganja s tališčem pri 136 °C, ter monoklinska α faza s tališčem 159 °C. Obe fazi sta zastopani v primerljivem deležu, na površini je dosežena 46 % relativna kristaliničnost. Pri orodnem vložku iz polikarbonata je gama faza kot posledica brizgalnega tlaka veliko manj izrazita, bolj izrazita je monoklinska α faza, ki kristalizira pri višji temperaturi orodnega vložka in ima tališče pri 138 °C. Na površini je dosežena 88 % relativna kristaliničnost. Pri orodnem vložki iz Preform TH je gama faza kot posledica brizgalnega tlaka najmanj izrazita, monoklinska α faza ima tališče 146 °C. Na površini je dosežena 81 % relativna kristaliničnost. Zaključimo lahko, da je dosežena stopnja relativne kristaliničnosti na površini brizganih kosov v soodvisnosti od toplotne prevodnosti orodnega vložka in da lahko pri višji doseženi relativni kristaliničnosti na površini brizganega kosa pričakujemo najmanj naknadnega krčenja in notranjih napetosti kot posledica stabilizacije materiala po brizganju.

4 SKLEP

Iz dobljenih rezultatov lahko sklepamo, da so dobljeni rezultati pričakovani predvsem za kombinacije z aluminijastim vložkom, kjer sta R_a in R_z na izdelku nekoliko višja, kot na orodju.

Zelo zanimivi pa so rezultati primerjave brizganih kosov iz polikarbonatnega in Perform TH orodnega vložka, saj smo z meritvami ugotovili, da je dosežena hrapavost pri brizganem kosu celo nižja kot pri orodnem vložku. To je lahko posledica tudi pogojev predelave, saj smo imeli pri obeh vložkih iz nekovinskih materialov bistveno daljše čase cikla, ki so rezultirali nato tudi v zvitosti kosov. Velika razlika je bila tudi v optiki površine brizganih kosov. Pri kosu, brizganem v orodni vložek iz aluminija, so na površini lepo vidni deli dodanega odpadnega papirja, pri kosih, brizganih v nekovinska orodna vložka dodanega odpadnega papirja ni opaziti. Optični izgled je po vsej verjetnosti posledica

dolgega časa zelo nizke viskoznosti taline, kar je omogočilo, da je termoplast »izpodrinil« dodan odpadni papir na površini orodnih vložkov iz nekovinskih materialov. Relativna stopnja kristaliničnosti na površini je močno odvisna od materiala orodnega vložka in je v odvisnosti od, po vsej verjetnosti, od toplotne prevodnosti materiala orodnega vložka. Morfologija brizganih kosov se z orodnimi vložki iz polimerov močno spremeni, kar vpliva na toplotne in po vsej verjetnosti tudi na mehanske lastnosti.

V nadaljnjih raziskavah se bomo osredotočili na možnosti dodatnega hlajenja orodnih vložkov iz nekovinskih materialov in meritvam obstojnosti, ter testiranje optičnega izgleda površine pri termoplastičnih kompozitih z različnimi dodatki, s poudarkom na kovinskem izgledu površine kot nadgradnjo po optimizaciji. V povezavi z morfologijo brizganih kosov bomo v nadaljevanju raziskav popisali vpliv le te na mehanske lastnosti glede na uporabljen material orodnih vložkov.

Viri:

[1] Kraut, B.: Strojniški priročnik, Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani, 1987
[2] https://www.deproma.si/materiali/sla-perform/.
[3] Androsch, R., Di Lorenzo M. L., Schick, C., Wunderlich, B.: Mesophases in polyethylene, polypropylene, and poly(1-butene), *Polymer* (2010), 51(21), str. 4639-4662

ZELENE TEHNOLOGIJE NA PODROČJU BRIZGANJA PLASTIKE

Matija OBOLNAR, David ŠENICA
Hella Saturnus Slovenija d.o.o.

IZVLEČEK

V današnjih časih, ko je ozaveščanje o ohranjanju okolja na visokem nivoju, se celotna industrijska panoga sooča z novimi izzivi. V avtomobilski industriji se izzivi pojavljajo predvsem na področju optimizacije procesov, kot so zmanjševanje teže komponent, recikliranje izdelkov, boljša energetska učinkovitost procesov itd.. Strategija našega podjetja je izdelovati robustnejše produkte hitreje in z manjšo porabo energije ter materiala. Preko injekcijskega brizganja s tehnologijo penjenja materiala uspemo nekatere strateške rešitve realizirati, hkrati pa skušamo obstoječo tehnologijo v podjetju postaviti na višji nivo. Tehnologijo brizganja s penjenjem smo izvedli na serijskem orodju brez dodatnih optimizacij, končna analiza rezultatov pa nam je omogočila vpogled v okoljsko in ekonomsko prihodnost našega podjetja.

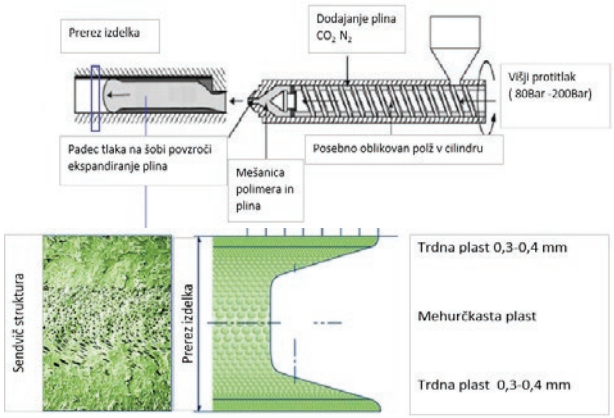
.

1 UVOD

Tehnologija penjenja je že znan proizvodni proces, ki pa do sedaj še ni bil uveljavljen v našem podjetju. Razlogi so bili predvsem v slabšem dekorativnem izgledu komponent ter stabilnem obvladovanju procesa brizganja s penjenem. Istočasno pa je bila investicija v to tehnologijo visoka in uporabnikom ni prinašala direktne koristi. Skozi leta se je tehnologija izboljšala, hkrati pa so okoljevarstvene in ekološke smernice bistveno prispevale k njeni uporabnosti. Proizvajalci avtomobilov stremijo k izpolnjevanju predpisanih smernic in zato so se pojavile dodatne zahteve po zniževanju mase izdelkov, uporabi regeneriranega materiala in čim manjši porabi energije na enoto. Prav zaradi tega se je tudi v našem podjetju pojavila potreba za testiranje tehnologije penjenja materiala na serijskem projektu.

2 BRIZGANJE PLASTIKE S TEHNOLOGIJO PENJENJA

Tehnologija penjenja je dodajanje penilnega elementa v standarden proces brizganja plastike. Za penilni element sta najbolj uveljavljena plina ogljikov dioksid (CO_2) in dušik (N_2). Plin dovajamo v cilinder, bodisi v obliki granulata (chemical foaming) ali direktno dodajanje v polimerno talino (direct foaming). Zmes taline in plina nato vbrizgamo v kalup. Ob nenadnem padcu tlaka prične plin v mešanici ekspandirati, kar rezultira v mehurčkasti strukturi osrednjega dela izdelka *(Slika 1)*. Končna struktura izdelka je sestavljena iz trdne stene brez mehurčkov, ter osrednjega dela z mehurčkasto strukturo.



Slika 1: Proces brizganja plastike s penjenjem [1]

2.1 Prednosti tehnologije penjenja

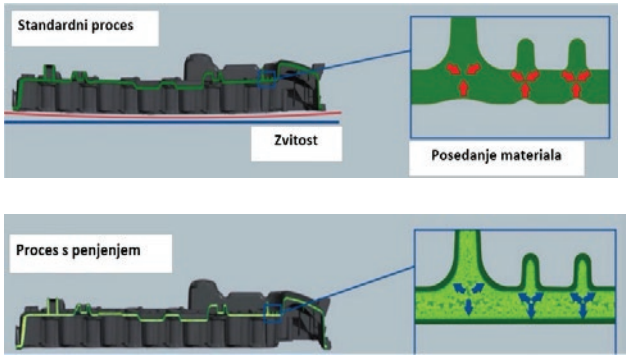
Tehnologija penjenja ima zaradi mehurčkaste strukture številne prednosti pred osnovnim procesom brizganja plastike. Največje prednosti so:

- Dimenzijska stabilnost izdelka
- Manjša teža izdelka

- Potrebna nižja zapiralna sila
- Krajši čas brizganja

Prednost mehurčkaste strukture se najbolj opazi v fazi hlajenja. Pri standardnem procesu prihaja do posedanja materiala v kritičnih predelih izdelka. Posedanje materiala pa posledično privede do zvijanja. V primeru uporabe mešanice taline in plina zagotovimo bolj homogeno sestavo v kritičnih predelih izdelka. Zaradi tega je dosežena boljša dimenzijska stabilnost, ter nižja masa izdelka. *(Slika 2)*

Vsebnost plina v talini nam v primerjavi s serijskem materialom poviša viskoznost, kar omogoči, da lahko mešanico hitreje vbrizgnemo v kalup. Hkrati se zniža brizgalni tlak, kar privede do potrebne nižje zapiralne sile brizgalnega orodja.



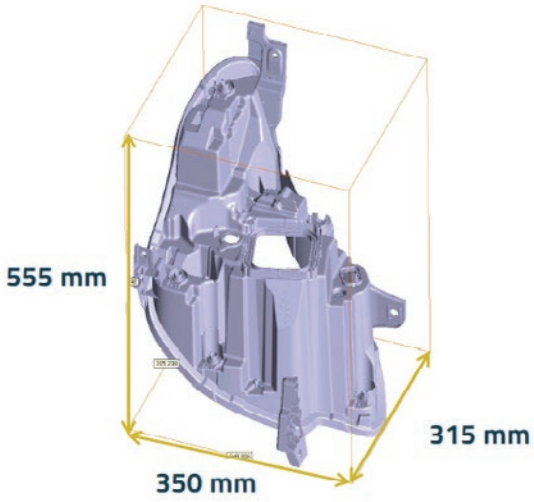
Slika 2: Primerjava standardnega procesa s procesom penjenja v kritičnih predelih izdelka [2]

3 TEST TEHNOLOGIJE PENJENJA

Prvi korak testiranja je bil vzpostaviti serijski proces brizganja s penjenjem materiala. Referenčna točka serijskih parametrov je bila serijska teža testnega izdelka, kateri smo se skušali čim bolj približati.

3.1 Izbira testnega izdelka

Izbira testnega izdelka ohišja žarometa je bila določena s strani kupca. Produkt je že v stabilni serijski proizvodnji, vendar je kupec izpostavil željo po optimizaciji parametrov procesa brizganja in dimenzijskih karakteristik ohišja, za prihodnje podobne projekte. Dimenzije ohišja so označene na *(Sliki 3)*. Serijski material ohišja je PP-T40, kar pomeni da je osnovnemu materialu dodano polnilo »talc« ali lojevec, ki izboljša trdnost in robustnost osnovnega materiala. Zaradi razgibane geometrije izdelka, kot so številni pritrdilni elementi, luknje, prehodi različnih debelin, je le-ta toliko bolj občutljiv na neenakomerno krčenje v fazi ohlajanja in s tem zvijanje. Teža serijskega ohišja je 790g, kar pomeni, da nam vsak odstotek zmanjšanja teže privede do velikih prihrankov materiala skozi celotno proizvodno dobo. Vse zgoraj naštete predpostavke in trditve so potrdile, da je ohišje izredno primeren produkt za testiranje tehnologije penjenja .



Slika 3: Testni izdelek - ohišje žarometa

3.2 Postavitev procesnega okna – določitev količine plina

Za vsak material je priporočena maksimalna vrednost plina N_2 s strani proizvajalca opreme. Maksimalna vrednost je določena na podlagi mehanskih testov izvedenih na materialu. Testni material PP-T40 ima priporočeno maksimalno vrednost vsebovanega plina 0,75% *(Slika 4)*, kar je bila tudi referenčna točka našega testiranja. Določili smo pet različnih koncentracij plina v mešanici materiala, z namenom, da nam bo omogočilo vpogled v celoten spekter območja od minimalne do maksimalne vrednosti plina v testnem izdelku.

Plastic Type	SCF Level N_2	MPP's
Polyolefine		
HDPE	1.0% to 2.0%	200 bar
PP no filled	1.0% to 2.0%	200 bar
PP Talc filled	0.5% to 0.75%	100 to 150 bar
PP Glass filled	0.5 %	100 to 150 bar
Amorphe Plastics		
PS, ABS & PC	0.4% to 0.6%	200 to 240 bar
HI-PS & IM-PC	0.6% to 0.8%	200 to 240 bar
Amorphe Plastics Glass filled	0.3% to 0.5%	170 to 200 bar
Semicristalline Plastics		
PA no filled	0.5% to 0.7%	150 bar
PA, PBT & PET Glass filled	0.2% to 0.4%	100 to 150 bar
Hightemperature Plastics		
PSU, PEEK, etc. no filled	0.5% to 0.7%	100 to 150 bar
PSU, PEEK, etc.- Glass filled	0.3% to 0.4%	100 to 150 bar

Slika 4: Pregled priporočenih vrednosti plina za različne polimerne materiale [3]

3.3 Izdelava vzorcev

V začetni fazi testiranja smo uporabili vrednost, ki je v območju maksimalne vrednosti in sicer 0,7% N_2. Višji odstotek plina v mešanici pomeni, da material mnogo lažje teče, kar se je odrazilo v času brizganja, ki se je zmanjšal s 3,5s na 1s. Težava se je pojavila pri doziranju mešanice granulata in plina. Ker je bil odstotek plina tako visok se je podaljšal čas doziranja za 20 s in sicer iz serijskih 23 s na 43 s, kar pa je za naš proizvodnji proces nesprejemljivo. Že po prvih zapolnjenih vzorcih smo ugotovili, da je kvaliteta površine zelo slaba v primerjavi s serijskim izdelkom *(Slika 5 (a)).* V predelu, kjer je na serijskem izdelku vidna rahla posedenost, je na istem mestu pri testu visoke vsebnosti plina prišlo do »postblow efekta«. To nam nakazuje, da je v tem predelu akumulacija materiala velika, ter ni primernega hlajenja v kritičnem predelu. To pa v primeru uporabe plina povzroči, da se ekspandirani mehurčki zaradi višje temperature materiala pod površino združujejo in posledično napihnejo površino. *(Slika 5 (b))*

Slika 5: (a) Prikaz kvalitete površine izdelka, (b) Prikaz efekta združevanja mehurčkov

Naslednji test smo izvedli z 0,3% N_2. Težava, ki se je pojavila pri doziranju z maksimalno vrednostjo plina je bila tukaj odpravljena. Proces brizganja je bil vidno stabilnejši, zaradi hitrejšega doziranja pa je bil skupni čas cikla krajši. Kvaliteta površine je bila primerljiva, kot pri 0,7% N_2. Napihnjenost površine pa ni bila tako izrazita kot pri prvem testu, pa vendar še vedno opazna. Izmerjena teža izdelka je znašala 742g.

Z naslednjim testom smo količino plina skoraj razpolovili na 0,175% N_2. Kvaliteta površine pa je bila tukaj mnogo boljša, kot pri 0,3% N_2, kar prikazuje *(Slika 6).* Sledovi plinov na površini izdelka so bili občutno manj vidni. Najbolj pa smo bili pri testu fokusirani na efekt napihovanja kritične površine. Izdelali smo 20 parov ohišij, pri katerih nismo zasledili deformacije površine. Teža izdelka se je zaradi zniževanja vsebnosti plina posledično dvignila. Pri tem testu je znašala 753 g.

V naslednjih testih smo naredili vzorce še pri 0,113% N_2 in pa pri 0,05% N_2. Analiza kvalitete površine ni pokazala bistvenih izboljšav. Pa tudi teža izdelka se ni konkretno spremenila. Primerjava vzorcev je predstavljena v (Tabeli 1).

Slika 6: Prikaz kvalitete površine 0,175% N_2

Tabela 1: Primerjava izdelanih testnih vzorcev

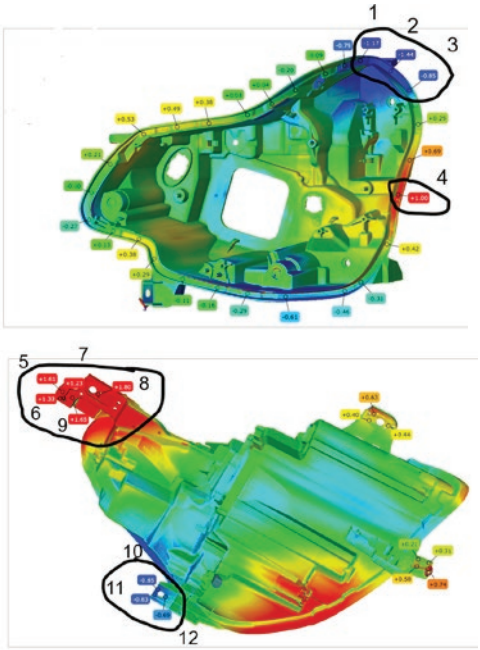
	Serijski proces	0,7% N_2	0,3% N_2	0,175% N_2	0,113% N_2	0,005% N_2
Čas brizganja [s]	3,5	1	1	1	1	1
Teža izdelka [g]	790	735	742	753	754	756
Efekt ekspandiranja	NE	JA	JA	NE	NE	NE
Kvaliteta površine	OK	NOK	NOK	OK	OK	OK

Fokus testiranja je bil izdelati vzorce, ki bi bili primerljivi serijskimi glede kvalitete površine, hkrati pa stabilnost procesa brizganja ne bi bila ogrožena.

Iz tabele je razvidno, da so vzorci z nižjimi odstotki plina (pod 0,175% N_2) bolj primerni za serijsko proizvodnjo, zaradi stabilnosti procesa brizganja, hkrati pa zadostujejo pogojem kvalitete površine.

3.4 Primerjava dimenzijskih meritev

Izdelani vzorci so bili poslani na dimenzijske 3D meritve. Iz 3D meritev serijskih izdelkov smo določili kritične točke na izdelku kjer so odstopanja zaradi zvijanja izdelka največja (Slika 7). V (Tabeli 2) je prikazana primerjava testnih vzorcev v kritičnih točkah izdelka.



Slika 7: Kritične merilne točke serijskega izdelka

Tabela 2: Primerjava dimenzijskih meritev v kritičnih točkah

Merilna točka	Serija [mm]	0,005% N_2 [mm]	0,113% N_2 [mm]	0,175% [mm]
1	-1,17	-0,81	-0,64	-0,69
2	-1,44	-0,79	-0,35	-0,45
3	-0,85	-0,23	0,19	-0,01
4	1	0,81	0,54	0,52
5	1,61	0,55	0,25	0,23
6	1,33	0,75	0,4	0,56
7	1,23	0,48	0,33	0,58
8	1,8	0,81	0,3	0,55
9	1,65	0,42	0,15	0,15
10	-0,85	-0,35	-0,33	-0,29
11	-0,83	-0,28	-0,26	-0,23
12	-0,69	-0,25	-0,18	-0,11

4 SKLEP

Test tehnologije s penjenjem je pokazal, da je postopek primeren za serijsko orodje brez dodatnih sprememb. Kvaliteta površine je pri nižjih odstotkih plina zadovoljiva, hkrati pa smo uspeli znižati težo izdelka v povprečju za 5%. Dimenzijska analiza je pokazala znatno izboljšavo v vseh kritičnih točkah izdelka, kar samo potrjuje, da so teoretične prednosti tehnologije tudi realno dosegljive. V proizvodnji pa to pomeni manj slabih izdelkov, manjša poraba materiala, ter hitrejši čas cikla, kar bo v prihodnosti samo še pripomoglo k boljši energetski in ekonomski učinkovitosti podjetja.

Viri:

[1] ENGEL global dostop 26.4.2022 , https://www.engelglobal.com/en/ca/blog/lighter-dimensionally-stable-components-thanks-to-plastic-foaming.html
[2] Trexel technology solutions, dostop 26.4.2022 ,https://trexel.com/technology-solutions/mucell/
[3] Forvia Hella , dostop 26.4.2022 , https://www.forvia.com/

RAZVOJ KOMPOSTABILNE NAGROBNE SVEČE

Martin JURKOVIČ[1], David JURKOVIČ[1], Gašper GANTAR[2,3]
[1]Svečarstvo Jurkovič, d. o. o.
[2]Visoka šola za proizvodno inženirstvo
[3]Fakulteta za varstvo okolja

IZVLEČEK

V prispevku je prikazan razvoj okolju prijaznega izdelka. Z lastnim znanjem smo prvi na svetu uspeli razviti in izdelati v celoti kompostabilno nagrobno svečo (torej tudi s pokrovom in držalom stenja), ki je po uporabi primerna za predelavo v kompost s postopkom industrijskega kompostiranja. Kompostabilnost je dokazana s certifikatom, podeljenim skladno s standardom SIST EN 13432:2001.

1 UVOD

Nagrobne sveče se uporabljajo za obeleževanje in poklon spominu na mrtve. Na svetu se vsako leto porabi več kot 200 milijonov nagrobnih sveč (v Sloveniji 14 mio.). Za njihovo izdelavo se uporabljajo predvsem materiali iz neobnovljivih virov (PVC, PP in parafinski vosek). Pri uporabi (gorenju) nastane približno 7 mio ton CO_2-e toplogrednih plinov (od tega v Sloveniji 28.000 ton CO_2-e) ter več kot 50.000 ton odpadkov (od tega v Sloveniji 2.500 ton).

Slika 1: Odpadne tradicionalne nagrobne sveče

Odpadne nagrobne sveče, ki so prikazane na sliki 1, se v Sloveniji ločeno zberejo in predelajo. Pri predelavi pridobljeni materiali gredo delno v nadaljnjo predelavo in reciklažo, preostanek pa se odloži na deponijo. V vseh ostalih državah, razen v Sloveniji, se odpadne sveče še vedno v celoti odlagajo na deponijo ali sežigajo v sežigalnicah.

Na trgu obstajajo številne nagrobne sveče, ki svetijo s plamenom in se oglašujejo kot okolju prijazne. Njihova ohišja so izdelana iz različnih materialov (stekla, papirja, bioosnovanih ali biorazgradljivih materialov) v ohišje pa imajo pritrjeno klasično kovinsko držalo stenja ali pa držalo stenja sploh ni vgrajeno.

V prispevku je prikazan potek razvoja kompostabilne nagrobne sveče, ki jo je po uporabo mogoče v celoti predelati v kompost s postopkom industrijskega kompostiranja.

2 POTEK RAZVOJA

Na grobovih se v splošnem lahko prižiga kakršnokoli sveče. V nadaljevanju bomo kot nagrobno svečo razumeli svečo, ki je sestavljena iz voska, stenja, držala stenja, pa tudi iz ohišja in pokrova za zaščito plamena pred vremenskimi vplivi (padavinami in vetrom). Razvoj je potekal v skladu s smernicami VDI-R 2221 [1], zastavljen cilj pa je shematsko prikazan na sliki 2.

2.1 Zastavljen cilj

Cilj obravnavanega projekta je bil razviti in izdelati nagrobno svečo za enkratno uporabo, ki sveti s plamenom in:

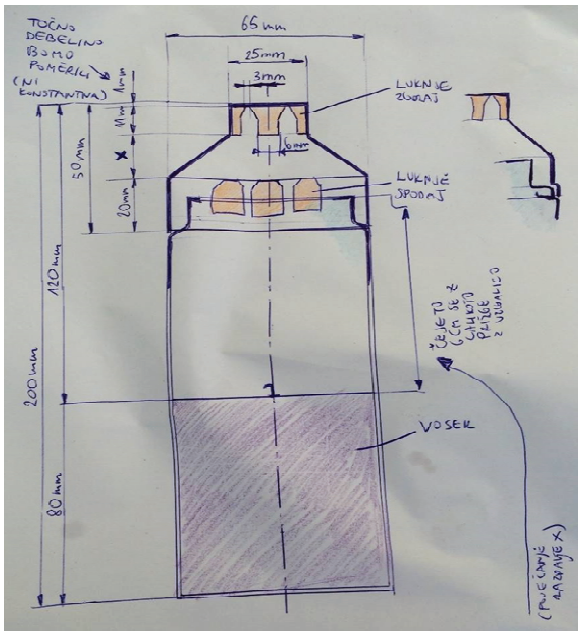
Martin JURKOVIČ[1], David JURKOVIČ[1], Gašper GANTAR[2,3]
[1]Svečarstvo Jurkovič, d. o. o.
[2]Visoka šola za proizvodno inženirstvo
[3]Fakulteta za varstvo okolja

1) jo je mogoče po uporabi v celoti (brez ločevanja ali razstavljanja) odvreči med biološke odpadke in predelati v kompost s postopkom industrijskega kompostiranja,
2) jo je mogoče izdelati z v svečarstvu poznanimi in dostopnimi izdelovalnimi tehnologijami,
3) zadosti ostalim zahtevam kupcev glede dimenzij, izgleda, časa gorenja, varnosti in cene.

Slika 2: Zastavljeni cilj projekta

2.2 Koncipiranje

Na sliki 3 je prikazana ena od konceptnih rešitev, ki zagotavlja visok pretok zraka v pokrovu.



Slika 3: Konceptna rešitev kompostabilne nagrobne sveče

Ideja o razvoju stroškovno sprejemljive kompostabilne nagrobne sveče je na prvi pogled preprosta, v bistvu pa je potrebno rešiti več tehnoloških izzivov, izmed katerih bi izpostavili dva: 1) razvoj stroškovno sprejemljivega držala stenja, ki je primeren za postopek industrijskega kompostiranja in je hkrati sposobno zanesljivo zaustaviti plamen ob koncu gorenja, in 2) razvoj stroškovno sprejemljivega pokrova iz biorazgradljivega materiala, ki je primeren za postopek industrijskega kompostiranja, a se hkrati zaradi gorenja plamena ne pregreje in poškoduje.

2.3 Snovanje

Na podlagi izbrane konceptne rešitve smo v sodelovanju z industrijskim oblikovalcem pripravili več zasnov ohišja, pokrova in držala stenja (slika 4).

Slika 4: Primeri konceptnih rešitev

Preučili smo razmere na trgu in se povezali z dobavitelji materialov (voska, granulatov, barvil, lepil, dodatkov za povečanje temperaturne obstojnosti, dodatkov za samogasnost idr.), ki so primerni za kompostiranje ter izbrali primerne dobavitelje in si zagotovili vzorce materialov.

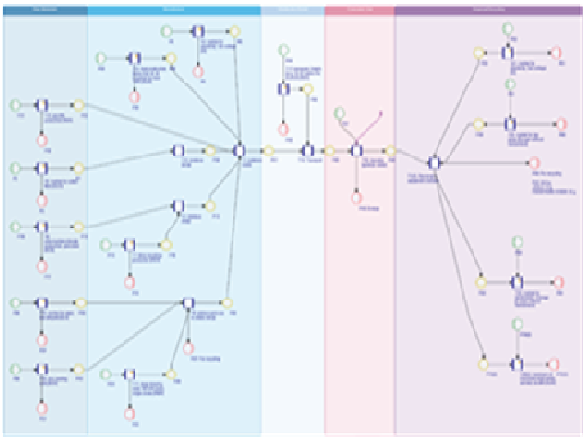
Martin JURKOVIČ[1], David JURKOVIČ[1], Gašper GANTAR[2,3]
[1]Svečarstvo Jurkovič, d. o. o.
[2]Visoka šola za proizvodno inženirstvo
[3]Fakulteta za varstvo okolja

Pri razvoju zasnove so bile uporabljene tudi sodobne tehnologije: numerične simulacije za napovedovanje in optimizacijo pretoka zraka skozi pokrov sveče in napoved temperature na kritičnem delu ter numerične metode za napovedovanja toka materiala v orodjih za brizganje pokrovov

2.4 Ocena vplivov na okolje

Pri razvoju nagrobne sveče smo upoštevali tudi priporočila ekodizajna [2].

Za dolgoročni komercialni uspeh kateregakoli »zelenega« izdelka je ključno, da ima dokazane okoljske prednosti pred obstoječimi tradicionalnimi izdelki. Standardizirana in uveljavljena metoda za analizo okoljskih vplivov izdelka je analiza življenjskega cikla (LCA analiza). LCA-analiza je bila izvedena s programom Umberto in podatkovno bazo Ecoinvent. Rezultati, ki so prikazani na sliki 5, so potrdili, da so okoljski vplivi v celotnem življenjskem ciklu kompostabilne nagrobne sveče nižji kot pri uporabi ostalih nagrobnih sveč.



	KLASIČNA PVC NAGROBNA SVEČA	STEKLENA NAGROBNA SVEČA	ECOTERRA
Potencial globalnega segrevanja GW [kg CO_2 – Eq]	2,021	2,081	1,700
Potencial zakisljevanja okolja AC [kg SO_2 – Eq]	0,0089	0,0100	0,007
Eutrofikacijski potencial EU [kg PO_4 – Eq]	0,0023	0,0023	0,0017
Izčrpavanje virov AD [kg antimona – Eq]	0,014	0,014	0,011
Potencial tanjšanja ozonske plasti OD [kg CFC-11 – Eq]	4,6E-08	7,8E-08	3,4E-08
Poraba vode WD [m^3]	0,0047	0,0049	0,0037
Poraba energije PED [MJ]	30,73	31,62	22,50

Slika 5: LCA model in rezultati LCA analize

2.5 Izdelava in testiranje prototipov

Prve prototipe smo izdelali s pomočjo 3D tiska (v projektu je bil za izdelavo prototipov uporabljen 3D- tiskalnik Makerbot Replicator 2). Nekatere filamente za 3D-tisk smo pripravili s pomočjo zunanjega izvajalca s postopkom ekstrudiranja. Primer natisnjenega prototipa je prikazana na sliki 6.

Slika 6: Prototip pokrova

Tako izdelani prototipi žal niso bili primerni za testiranje, saj se je izkazalo, da natisnjeni preizkušanci pod temperaturnimi obremenitvami, odpovejo bistveno prej, kot če bi bili preizkušanci enakih dimenzij izdelani z visokotlačnimi postopki (npr. brizganjem, ekstrudiranjem, stiskanjem idr.). Prav tako je prišlo pri izdelavi preizkušancev s postopkom 3D-tiska iz nekaterih materialov do težav (predvidevamo, da je prišlo do razpada $MgOH_2$ v šobi 3D tiskalnika, kar je povzročilo zamašitev šobe). Zato smo bili prisiljeni uporabiti drugačno tehnologijo. Odločili smo se za tehnologijo rezkanja. Žal surovcev iz materialov, ki smo jih izbrali za prototipe, ni bilo mogoče naročiti na trgu. Zato smo morali tudi surovce narediti sami. Izdelali smo jih v sodelovanju z zunanjim partnerjem, na manjši hidravlični stiskalnici.

Prototipe smo testirali v enostavnem preizkuševališču, kot je prikazano na sliki 7. Na zgornjem delu slike je prikazano testiranje

Martin JURKOVIČ[1], David JURKOVIČ[1], Gašper GANTAR[2,3]
[1]Svečarstvo Jurkovič, d. o. o.
[2]Visoka šola za proizvodno inženirstvo
[3]Fakulteta za varstvo okolja

pokrovov, kjer smo razdalje pokrova do plamena postopoma nižali, na spodnjem delu slike pa je prikazano testiranje držal stenjev.

Glede na rezultate testiranj smo izbrali optimalne oblike pokrova in držala stenja ter izdelali namenska izdelovalna orodja za njihovo izdelavo. Izdelali smo testno serijo. Delovanje smo preizkusili v pogojih, določenih s standardom RAL. V sodelovanju s centrom za ravnanje z odpadki smo preverili tudi kompatibilnost v praktičnih pogojih.

Slika 7: Testiranje prototipov

2.6 Pridobivanje certifikata kompatibilnosti

Analizo razvite nagrobne sveče v skladu z veljavnimi standardi in priporočili na področju kompostabilnosti je za nas opravil zunanji izvajalec. Pridobili smo certifikat Industrial compostable, ki dokazuje, da je nagrobna sveča, ki je bila predmet predstavljenega razvoja, primerna za odlaganje med biološke odpadke in za predelavo s postopkom industrijskega kompostiranja [3].

Slika 7: Kompostabilna nagrobna sveča ECOTERRA

3 SKLEP

S testiranji in pridobitvijo certifikata smo dokazali, da je nagrobna sveča ECOTERRA prva na svetu v celoti, torej tudi s pokrovom in držalom stenja, primerna za odlaganje med biološke odpadke in predelavo v kompost s postopkom industrijskega kompostiranja.

Zahvala

Razvoj kompostabilne nagrobne sveče je sofinancirala Javna agencija Republike Slovenije za spodbujanje podjetništva, internacionalizacije, tujih investicij in tehnologije razvoj in tehnologijo (številka operacije KKIPP-84/2017), za kar se najlepše zahvaljujemo.

Viri:

[1] Pehan, S.: Metodika konstruiranja: učbenik, Fakulteta za strojništvo Univerze v Mariboru, 2005
[2] Standard ISO/TR 14062
[3] Standard SIST EN 13432:2001

RECIKLIRANJE DUROPLASTIČNIH KOMPOZITOV

Silvester BOLKA, Teja PEŠL, Rebeka LORBER, Tamara ROZMAN, Rajko BOBOVNIK, Blaž NARDIN
Fakulteta za tehnologijo polimerov

IZVLEČEK

Industrijski odpad duroplastičnih kompozitov in tudi odsluženi duroplastični kompozitni izdelki predstavljajo velik okoljski problem. Na Fakulteti za tehnologijo polimerov razvijamo uporabo odpada duroplastičnih kompozitov v kombinaciji s termoplastičnimi matricami. Predstavljen prispevek opisuje uporabo zmletega odpada duroplastičnih kompozitnih delov iz slovenskega podjetja (Technol) v kombinaciji s poliamidno 6 (PA 6) matrico. Od podjetja smo dobili srednje grobo mleto frakcijo duroplastičnega kompozita, ki smo jih z dodatkom kompatibilizatorja in dodatkov za predelavo kompavndirali v PA 6 matrico. Dobljen termoplastični kompozit smo brizgali in karakterizirali toplotne in mehanske lastnosti. Pri primerjavi lastnosti smo uporabili čisto PA 6 matrico in kompozit na osnovi PA 6 matrice in dodanimi 30 % steklenih vlaken. Glede na čisto matrico smo uspeli dvigniti togost in trdnosti, pričakovano se je močno znižala žilavost. Glede na kompozit s PA matrico in 30 % steklenih vlaken smo dosegli nižjo togost in trdnost, tudi nižjo žilavost. Steklasti prehod se pri uporabi zmletega odpada duroplastičnih kompozitov za PA 6 matrico premakne k višjim temperaturam, hkrati je boljše dušenje vibracij v celotnem temperaturnem intervalu. Z uporabo zmletega odpada duroplastičnih kompozitov dobimo termoplastični kompozit, ki je zanimiva, okoljsko prijazna alternativa obstoječim termoplastičnim kompozitom.

1 UVOD

Material z dvema ali več različnimi sestavinami materialov, lahko imenujemo kompozitni materiali. Izraz kompozitni material se uporablja le, kadar se lastnosti sestavnih materialov razlikujejo od lastnosti sestavljenega materiala kot celote. [1]

Kompoziti so običajno sestavljeni iz neprekinjene faze in prekinjene faze. Prekinjena faza se imenuje armatura in je običajno močnejša in trša, medtem ko se kontinuirana faza imenuje matrica. Lastnosti kompozitnega materiala so močno odvisne od lastnosti, medsebojnega delovanja in usmerjenost sestavnih materialov. Orientacija in koncentracija ojačitvenega materiala imata pomembno vlogo pri določanju lastnosti kompozitnega materiala. Kompozitni materiali so razvrščajo v različne kategorije glede na vrsto, velikosti in usmerjenosti ojačitvenega materiala. [2]

Mehansko recikliranje se začne z zmanjšanjem velikosti na 50-100 mm z rezanjem ali drobljenjem pri nizki hitrosti in nato nadaljnjim zmanjšanjem velikosti na velikost 10-50 mm z uporabo visokohitrostnih mlinskih tehnik ali drugih. Nato se reciklati razvrstijo na frakcije, bogate z vlakni (bolj grobe), in frakcije, bogate s smolo (finejše). Ti delci se lahko nadalje uporabljajo v različnih ali se uporabljajo pri proizvodnji drugih kompozitnih materialov. Frakcije, bogate s smolo, se lahko uporabljajo kot polnila ali dodatke v drugih kompozitih, frakcije, bogate z vlakni, pa se lahko uporabijo kot ojačitve s kratkimi vlakni za izdelavo kompozitov. Mehansko recikliranje je eden od najbolj ekonomičnih metod recikliranja duroplastičnih materialov. [3]

Pri uporabi recikliranih karbonskih vlaken iz epoksi kompozitov v polipropilenski (PP) matrici, je natezna trdnost padla iz 17 MPa za čisti PP na 12 MPa za kompozit. [4]

2 EKSPERIMENTALNI DEL

2.1 Uporabljeni materiali

Komercialno dostopen PA 6 s trgovskim imenom Akulon K222-D Natural smo kupili pri podjetju Resinex iz Slovenije. Komercialno

dostopna steklena vlakna s trgovskim imenom DS 1128-10N smo kupili pri podjetju 3B iz Belgije. Komercialno dostopen kopolimer TPU s trgovskim imenom Kuramiron U TU-S5265 smo kupili pri podjetju Kuraray, Nemčija. Antioksidant (AT 10) smo kupili pri AMIK ITALIA S.p.A iz Italije. Komercialno dostopen modifikator Fusabond N416 smo kupili pri podjetju DuPont, Švica. Mlevino duroplasta nam je doniralo podjetje Technol iz Izole.

Sestava vzorcev je navedena v Tabeli 1.

2.2 Priprava vzorcev

Izdelali smo 3 serije vzorcev s tehnologijama kompavndiranja in brizganja. Vzorec PA 6 je služil kot referenca, pri vzorcu PA 6 GF30 smo uporabili komercialno dostopna steklena vlakna, pri vzorcu PA 6 rGF30 smo uporabili 30 % recikliranega duroplastičnega kompozita iz steklenih vlaken in poliestrske smole. V Tabeli 1 je prikazana sestava vzorcev.

Tabela 1: Sestava vzorcev za kompavndiranje

Vzorec	PA 6 (%)	GF (%)	rGF (%)	Fusabond N416 (%)	TPU (%)	Antioksidant (%)
PA 6	100					
PA 6 GF30	66,5	30		3		0,5
PA 6 rGF30	64,5		30		5	0,5

Pri kompavndiranju so bili materiali ločeno zmešani in ekstrudirani na dovpolžnem ekstruderju Labtech LTE 20-44. Premer polžev je bil 20 mm, razmerje L/D 44:1, obrati 200 vrtljajev na minuto, temperaturni profil je naraščal od lijaka (245 °C) do šobe (260 °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 (245 °C) do šobe (260 °C). Temperatura orodja je bila nastavljena na 80 °C, čas hlajenja pa na 10 s. Protitlak je bil nastavljen na 15 barov, obrati polža pa na 50 vrtljajev na minuto. Hitrost brizganja je bila nastavljena na 60 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 natezno togost (E_t), natezno trdnost (σ_m), raztezek pri natezni trdnosti (ε_m) in raztezek pri pretrgu (ε_{tb}). Pri upogibnem testu smo vrednotili upogibno togost (E_f) in maksimalno upogibno trdnost (σ_{fM}) ter upogib pri maksimalni upogibni trdnosti (ε_{fM}). Termodinamične lastnosti smo vrednotili z napravo Perkin Elmer DMA 8000. Vzorce smo segrevali z 2 °C/min od 25 °C do 130 °C (PA 6), 160 °C (PA 6 GF30) in 180 °C (PA 6 rGF30) v zračni atmosferi. V načinu z dvojno prižemo smo uporabili frekvenco 1 Hz in amplitudo 20 μm. Termogravimetrične analize (TGA) smo izvedli na instrumentu Perkin Elmer TGA 4000. 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 preskus 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 5 J.

3 REZULTATI

Dodatek (30 %) zmletega industrijskega odpada duroplastičnega kompozita iz steklenih vlaken in poliestrske smole je zvišal upogibno in natezno togost in trdnost kompozitov s PA 6 matrico. Upogibna togost se je zvišala za +96 % odstotkov v primerjavi s čisto matrico (za PA 6 GF30 se je zvišala za +162 %), upogibna trdnost se je zvišala za +16 % (za PA 6 GF30 se je zvišala za +96 %) (Tabela 2). Natezna togost se je zvišala za +152 % odstotkov v primerjavi s čisto matrico (za PA 6 GF30 se je zvišala za +222 %), natezna trdnost se je zvišala za +36 % (za PA 6

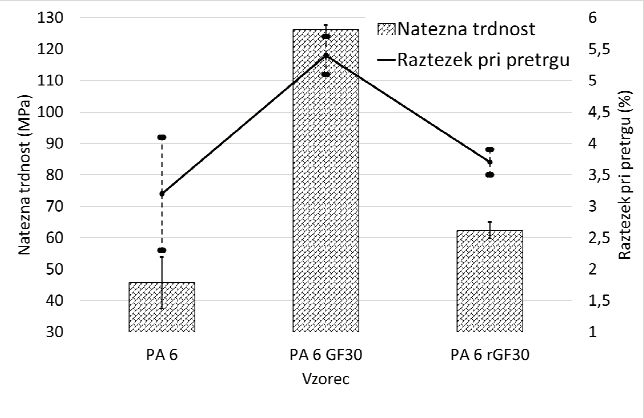
GF30 se je zvišala za +176 %) (Tabela 1, Slika 1). Nižji ojačitveni učinek zmletega industrijskega odpada duroplastičnega kompozita iz steklenih vlaken in poliestrske smole glede na komercialno dostopna steklena vlakna izhaja iz nizke vsebnosti steklenih vlaken v zmletem industrijskem odpadu, ki je znašal okoli ene tretjine. Višja togost in hkrati tudi izboljšanje trdnosti kompozitov so posledica dobrih medfaznih interakcij med zmletim industrijskim odpadom in termoplastično matrico. Dobre medfazne interakcije smo dosegli z uporabo ustreznega kompatibilizatorja, ki zagotavlja dobro površinsko adhezijo tako na steklena vlakna kot na utrjeno nenasičeno poliestrsko smolo. Dobre medfazne interakcije med zmletim industrijskim odpadom in PA 6 matrico potrjuje tudi višji raztezek pri pretrgu za PA 6 rGF30 vzorec glede na PA 6 referenco (Slika 1).

Tabela 2: Zbrani rezultati upogibnih testov

Vzorec	E_f (GPa)	σ_{fM} (MPa)	ε_{fM} (%)
PA 6	1,93±0,01	79,3±0,2	6,5±0,1
PA 6 GF30	5,06±0,08	155,1±0,9	6,6±0,1
PA 6 rGF30	3,79±0,05	92,0±0,9	3,4±0,1

Tabela 3: Zbrani rezultati neteznih testov

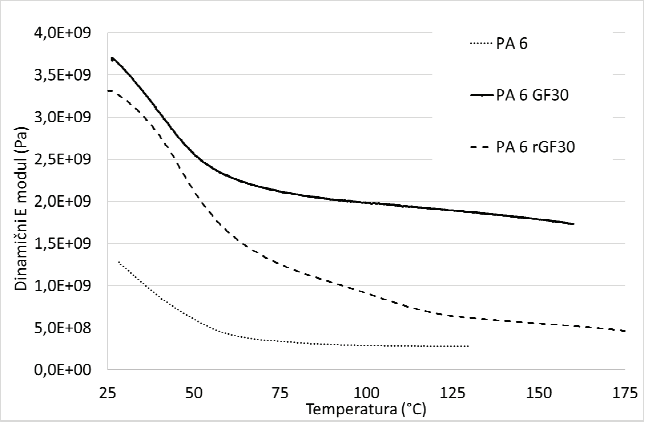
Vzorec	E_t (GPa)	σ_m (MPa)	ε_{tb} (%)
PA 6	1,63±0,11	45,7±8,1	3,2±0,9
PA 6 GF30	5,25±0,73	126,1±1,6	5,4±0,3
PA 6 rGF30	4,11±0,60	62,3±2,7	3,7±0,2



Slika 1: Zbrani rezultati nateznega testa: natezna trdnost in raztezek pri pretrgu

Višja trdnost in togost ter raztezek pri pretrgu so posledica dobre kompatibilizacije zmletega industrijskega odpada duroplasta v PA 6 matrico in posledično dobre površinske interakcije zmletega industrijskega odpada duroplasta in PA 6 matrice zaradi dodatka kompatibilizatorja TPU. Visok strig pri kompavdiranju in ustrezni kompatibilizator omogočata dobro omočljivost površine zmletega industrijskega odpada duroplasta s kompatibilizatorjem in PA 6 matrico.

Krivulje dinamičnega E modula (Slika 2) so pokazale prvi padec pri temperaturi steklastega prehoda za PA 6. Ta padec je za kompozit PA 6 rGF30 večji v primerjavi s kompozitom PA 6 GF30. Razlog je po vsej verjetnosti visoka vsebnost poliestrske smole, ki ji z višanjem temperature tudi pada togost in je njen ojačitveni učinek v kompozitu slabši kot od steklenih vlaken. Dinamični E modul za vzorec PA 6 rGF30 je v celotnem temperaturnem intervalu veliko višji kot za referenco PA 6, vendar hkrati nižji glede na vzorec PA 6 GF30. Pri vzorcu PA 6 rGF30 opazimo dvostopenjsko znižanje dinamičnega E modula. Prvo znižanje (okoli 50 °C) pri steklastem prehodu za PA 6 matrico, drugo znižanje pri višji temperaturi (okoli 110 °C), ki pa je po vsej verjetnosti steklasti prehod za poliestrsko smolo. Krivulja dinamičnega E modula doseže vrednost 0,5 GPa pri 166 °C, kar lahko vrednotimo kot HDT.

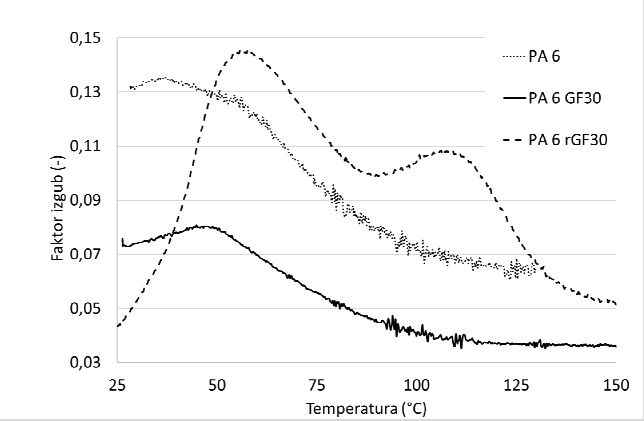


Slika 2: Zbrani rezultati dinamičnega E modula

Dodatek zmletega industrijskega odpada duroplastičnega kompozita iz steklenih vlaken in poliestrske smole v PA 6 matrico močno zviša dinamični E modul v celotnem temperaturnem

intervalu, hkrati sta vidna dva steklasta prehoda. Kompozit PA 6 rGF30 je uporaben do 166 °C, kar močno presega temperaturo uporabe čiste PA 6 matrice, hkrati je dinamična togost veliko višja in primerljiva z dinamično togostjo ojačanih PA 6 kompozitov, saj po steklastem prehodu za PA 6 ohrani še zelo visoke vrednosti.

Iz krivulj faktorja izgub (Slika 3) lahko razberemo, da je steklasti prehod najnižji pri vzorcu PA 6 (37 °C), potem pri vzorcu PA 6 GF30 (47 °C), najvišji je pri vzorcu PA 6 rGF30 (57 °C). Hkrati je pri vzorcu PA 6 rGF30 viden še dodatni steklasti prehod pri 107 °C, ki je po vsej verjetnosti steklasti prehod za poliestrsko smolo. Iz premih steklastega prehoda pri vzorcu PA 6 rGF30 lahko zaključimo, da pride do sinergijskih učinkov, po vsej verjetnosti zaradi dobre kompatibilizacije kot posledica dobrih medfaznih interakcij, zmletim industrijskim odpadom duroplasta in PA 6 matrice, ter se tako steklasti prehod za PA 6 premakne k višji temperaturi. Višina faktorja izgub je najnižja pri vzorcu PA 6 GF30 (0,08), sledi vzorec PA 6 (0,134), najvišja je pri vzorcu PA 6 rGF30 (pri 57 °C znaša 0,144, pri 107 °C znaša 0,108). Iz višine faktorja izgub lahko zaključimo, da ima najboljši ojačitveni učinek in hkrati najslabše dušenje vibracij vzorec PA 6 GF30, vzorec PA 6 rGF30 ima najboljše sposobnosti dušenja od temperature 40 °C navzgor.



Slika 3: Zbrani rezultati faktorja izgub

Iz rezultatov bi lahko zaključili, da dodatek zmletega industrijskega odpada duroplastičnega kompozita iz steklenih vlaken in poliestrske smole zviša temperaturo steklastega prehoda pri PA 6 matrici in da močno izboljša sposobnosti dušenja vibracij.

Pri TGA analiza dobimo enostopenjski razpad za vzorca PA 6 in PA 6 GF30. Pri vzorcu PA 6 rGF30 dobimo dvostopenjski razpad. Prvi razpad je pri nižji temperaturi, ker razpada poliestrska smola v širšem temperaturnem intervalu kot PA 6 matrica, tako da se vrh razpada premakne k nižjim temperaturam. Drugi razpad je pri 480 °C, kjer razpade še bolj temperaturno obstojen del poliestrske smole. Pri vzorcu PA 6 GF30 je bila vsebnost steklenih vlaken 29,2 %, pri vzorcu PA 6 rGF30 je bila vsebnost steklenih vlaken le 11,4 %, vsebnost poliestrske smole je bila 18,6 %. S to analizo smo pojasnili slabo togost in trdnost, ter dodaten lepo viden steklasti prehod za poliestrsko smolo.

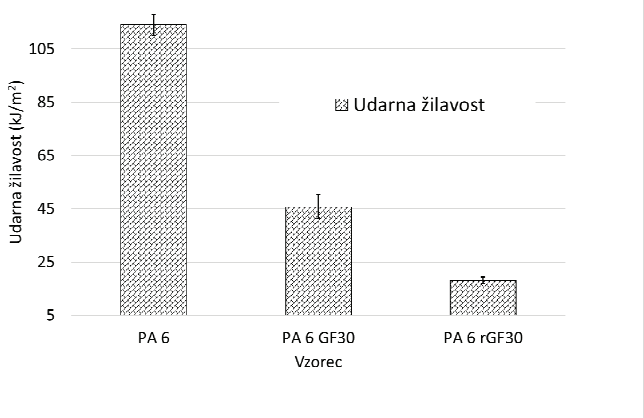
Iz rezultatov lahko zaključimo, da dodatek steklenih vlaken v PA 6 matrico zviša temperaturo degradacije, dodatek zmletega industrijskega odpada duroplastičnega kompozita iz steklenih vlaken in poliestrske smole zniža temperaturo degradacije, hkrati dobimo dvostopenjsko degradacijo.

Tabela 4: Zbrani rezultati TGA analiz

Vzorec	T_{d1} (°C)	$Razpad_1$ (%)	T_{d2} (°C)	$Razpad_2$ (%)	Ostanek (%)
PA 6	453	99,9	-	-	0,1
PA 6 GF30	467	70,8	-	-	29,2
PA 6 rGF30	427	70,0	480	18,6	11,4

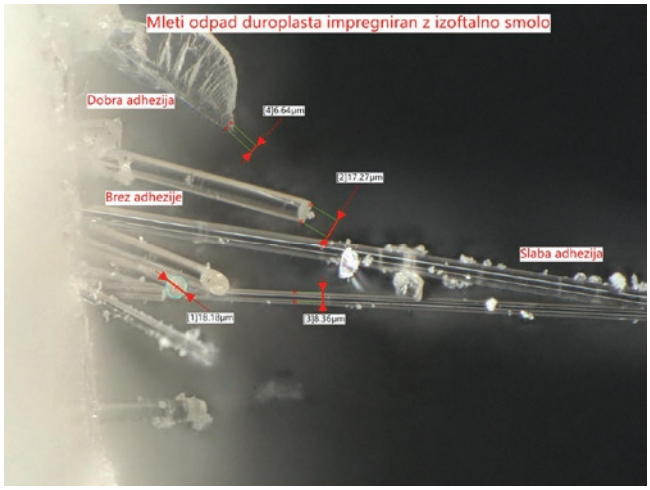
Udarna žilavost (Slika 4) je pričakovano najvišja pri vzorcu PA 6, sledi vzorec PA 6 GF30, najnižja je pri vzorcu PA 6 rGF30. Najnižja udarna žilavost je pričakovana, ker je v zmletem industrijskem odpadu duroplastičnega kompozita iz steklenih vlaken in poliestrske smole le ena tretjina steklenih vlaken ostalo je poliestrska smola, ki v zmletem stanju deluje le kot polnilo, ne kot ojačevalo.

Žilavost kompozitov je nižja od žilavosti reference PA 6, najnižja pa je pri PA 6 rGF30, zaradi visoke vsebnosti poliestrske smole.



Slika 4: Zbrani rezultati udarne žilavosti vzorcev

Glede na kompleksnost reševane naloge smo se odločili preveriti steklena vlakna, ki so v zmletem industrijskem odpadu duroplastičnega kompozita iz steklenih vlaken in poliestrske smole, ki smo ga impregnirali z izoftalno smolo. Mikroskopska slika (Keyence VHX-7000) nam razkrije, da je v zmletem industrijskem odpadu veliko različnih kvalitet steklenih vlaken. Razlikujejo se po premeru (od 6 do 18 µm) in tudi po impregnaciji površine. Tanjša steklena vlakna imajo impregnacijo, ki je kompatibilina z izoftalno smolo, debelejša steklena vlakna imajo impregnacijo, ki ni kompatibilina z izoftalno smolo. Te izsledke smo uporabili pri izbiri ustreznega kompatibilizatorja, da smo zagotovili čim boljše medfazne interakcije med steklenimi vlakni in zmleto poliestrsko smolo ter PA 6 matrico. Izbrali smo tudi ustrezne parametre priprave in predelave termoplastičinih kompozitov, da smo preprečili aglomeracijo zmletega odpada duroplasta in omogočili kvalitetno omočenje površin tako steklenih vlaken in zmlete poliestrske smole tako s kompatibilizatorjem kot PA 6 matrico.



Slika 5: Analiza mesta loma kompozita iz zmletega industrijskega odpada duroplastičnega kompozita iz steklenih vlaken in poliestrske smole

4 SKLEP

Preučevali smo možnost uporabe zmletega industrijskega odpada duroplastičnega kompozita iz steklenih vlaken in poliestrske smole kot ojačevala za termoplastično matrico.

Uporaba zmletega industrijskega odpada duroplastičnega kompozita iz steklenih vlaken in poliestrske smole v kombinaciji s pravim kompatibilizatorjem omogoča izdelavo kvalitetnega termoplastičnega kompozita s PA 6 matrico, kje se močno zvišata togost in trdnost, zviša se steklasti prehod PA 6 matrice, močno se izboljša tudi temperatura uporabe. Dodatno smo ugotovili, da kompozit z zmletim industrijskim odpadom duroplastičnega kompozita iz steklenih vlaken in poliestrske smole ter PA 6 matrico odlično duši vibracije.

Pripravljen kompozit je uporaben za industrijske aplikacije, kjer imamo tudi dinamične obremenitve in je zaželeno dobro dušenje vibracij. Tako smo pokazali, da lahko zmleti industrijski odpad duroplatov uporabimo brez ločevanja posameznih frakcij za pripravo kompozitov s termoplastično PA 6 matrico in tako omogočimo duroplastičnem odpadu trajnostno drugo »življenje«.

Viri:

[1] Evans, J. T.: Analysis and performance of fiber composites (second edition), *Mater Sci Eng A* (1992), str. 151.
[2] Sharma, A. K., Bhandari, R., Aherwar, A., et al.: Matrix materials used in composites: a comprehensive study, *Mater Today Proc* (2020), 21, str. 1559–1562.
[3] Ratna, D.: *Handbook of thermoset resins,* Shrewsbury, UK: ISmithers, (2009), pp.155–157.
[4] Thamizh, S. R., Vishakh, R., Pradyumna, M., Navami, M., Shantanu B.: Recycling technology of epoxy glass fiber and epoxy carbon fiber composites used in aerospace vehicles, *Journal of Composite Materials* (2021), 55 (23), str. 1-12

ZAHVALA: Zahvaljujemo se podjetju Technol za dobavo zmletega odpada duroplasta.

PA6 KOMPOZITI KOT ALTERNATIVA ZA PA66

Rebeka LORBER, Silvester BOLKA, Miroslav HUSKIĆ, Blaž NARDIN
Fakulteta za tehnologijo polimerov, Slovenj Gradec

IZVLEČEK

V zadnjih letih se po vsem svetu srečujemo s pomanjkanjem poliamida 66 (PA66). Ozko grlo dobavne verige je posledica nizke proizvodne zmogljivosti intermediatov, potrebnih za sintezo PA66, kot je adiponitril. Vpliv primanjkljaja se ne umirja in onemogoča tekočo proizvodnjo v podjetjih za predelavo plastike, cena materiala pa posledično narašča. Vzporedno narašča tudi zanimanje za cenejše in bolj zanesljivo dobavljive alternative.

V prispevku je predstavljena priprava kompozitov na osnovi PA6, ojačanih s 30 % steklenih vlaken, bazaltnih vlaken, volastonita in Silatherma s kompavndiranjem z dvopolžnim ekstruderjem. Pripravljene kompozite smo nabrizgali in jim ovrednotili mehanske in toplotne lastnosti, vključno z nateznimi, upogibnimi in udarnimi lastnostmi (Charpy), dinamičnimi mehanskimi lastnostmi (DMA) in toplotnimi lastnostmi (temperatura degradacije in toplotna prevodnost) ter jih primerjali s PA66.

1 UVOD

Z naraščajočo potrošnjo PA66 v zadnjih letih, se težave povezane z dobavljivostjo tega materiala poglabljajo. Zaradi večjega povpraševanja od zmogljivosti proizvodnje, ozko grlo predstavljajo predvsem reaktanti za sintezo PA66, sorazmerno naraščajo tudi cene [1, 2].

Zaradi zagotavljanja kontinuirnega in ekonomsko učinkovitega delovanja proizvodnje tako narašča vsesplošno zanimanje za alternativne materiale. Proizvajalci kot alternative izpostavljajo reciklate, razne ojačane materiale na osnovi PA6 in polipropilena (PP), polifenilen sulfid (PPS), poliftalamid (PPA) in polibutilen tereftalat (PBT), večina le teh pa je še manj cenovno ugodna in ni vsesplošno ustrezna, prav tako pa zahteva prilagoditve procesov [3].

2 EKSPERIMENTALNI DEL

2.1 Priprava vzorcev

Epruvete za testiranje oblik skladnih s standardi ISO 527 (tip epruvete 1BA), ISO 178 in ISO 179 smo pripravili z brizganjem. Na brizgalnem stroju Krauss Maffei CX 50-180 smo nabrizgali vzorce iz PA66 (VZ 150), PA6 (Akulon K222-D) in 5 kompozitov na osnovi enakega PA6. Pripravili smo referenčni kompozit z antioksidantom (AT 10, Amik Italia S.p.A.) in kompatibilizatorjem (Fusabond N416, DoW) brez polnila in 4 kompozite s kompatibilizatorjem, antioksidantom in 30 m.% enega od uporabljenih polnil. Kot polnilo smo uporabili bazaltna vlakna (RBR-18-T5/5, Technobasalt), steklena vlakna (DS1128-10N, Binani Group), volastonit (Aspect 3992, Imerys) in mineralno polnilo na glineni osnovi (Silatherm 1466-600 AST, Quarzwerke Group). Kompozite smo pred brizganjem skompavndirali na dvopolžnem ekstruderju LabTech LTE 26-44.

2.2 Analize

Prav tako kot pripravo vzorcev smo tudi testiranja opravili v laboratorijih Fakultete za tehnologijo polimerov v Slovenj Gradcu.

Natezne in upogibne teste smo izvedli na trgalnem stroju Shimadzu AG-X plus z 10kN merilno celico. Natezne teste smo izvedli skladno z ISO 527, upogibne teste pa skladno z ISO 178. Pri nateznem testu je bil razmak čeljusti 50 mm, hitrost testiranja do raztezka 0,25 % je bila 1 mm/min, nad 0,25 % do pretrga pa 50 mm/min. Pri upogibnem testu je bil razmik med podporama 64 mm, hitrost testiranja pa 2 mm/min.

Meritve zarezne udarne žilavosti smo izvedli na Charpy LY-XJJDS skladno z ISO 179. Razmik med podporama je bil 60 mm, uporabili smo 2 J kladivo.

Dinamično mehansko analizo (DMA) smo izvedli na Perkin Elmer DMA 8000. Vzorce smo segrevali s hitrostjo segrevanja 2 °C/min, pri frekvenci 1 Hz in amplitudi 20 µm. Za testiranja smo uporabili dvojno prižemo.

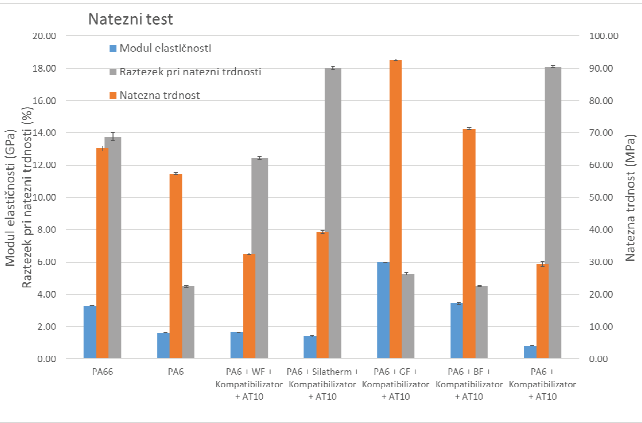
Termogravimetrično analizo (TGA) smo izvedli na instrumentu Mettler Toledo TGA/DSC 3+. Vzorce smo segrevali od 40 °C do 550 °C, s hitrostjo segrevanja 10 °C/min, v dušikovi atmosferi (20 mL/min), nato pa 30 min držali pri 550 °C v kisikovi atmosferi (20 mL/min).

Toplotno prevodnost smo izmerili na instrumentu HotDisk TPS1500 skladno s standardom ISO 22007-2. Uporabili smo senzor Kapton s premerom 3,189 mm.

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

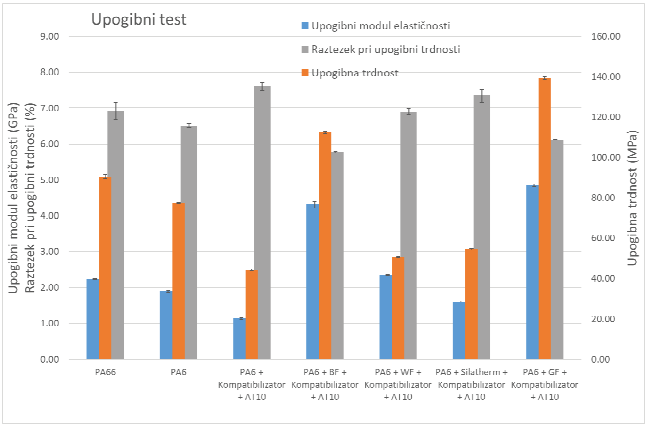
3.1 Mehanske lastnosti

Na sliki 1 so predstavljeni rezultati nateznih testov. Izmerjeni natezni modul elastičnosti PA6 je enkrat nižji od modula PA66. Kompatibilizator deluje kot modifikator žilavosti, saj zniža modul elastičnosti, natezno trdnost in poveča raztezek pri natezni trdnosti, kar pomeni, da je material s kompatibilizatorjem bistveno bolj žilav. Z dodatkom mineralnih polnil (volastonit, Silatherm) na modul elastičnosti bistveno ne vplivamo, natezna trdnost se poveča, raztezek pri natezni trdnosti pa zmanjša. Z dodatkom vlaken (bazaltna, steklena) pa zvišamo modul elastičnosti in natezno trdnost nad izmerjene vrednosti pri PA66.



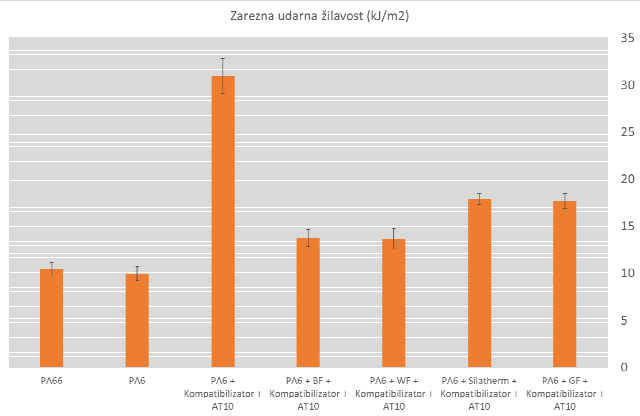
Slika 1: Rezultati nateznega testa

Graf na sliki 2 predstavlja rezultate upogibnih testov. Pri upogibnem testu so razlike med PA66 in PA6 bistveno manjše, kot pri nateznem. Dodatek kompatibilizatorja PA6 ponovno poveča žilavost. V primerjavi kompozitov s PA66, pri dodatku polnil z nizkim aspektnim razmerjem (volastonit in Silatherm) v PA6 imata kompozita primerljive upogibne module elastičnosti in raztezke pri upogibni trdnosti, hkrati pa tudi nižjo upogibno trdnost zaradi slabih interakcij polnila z matrico in nižje togosti PA6 matrice v primerjavi s PA66. Z dodatkom vlaken, predvsem steklenih glede na PA66, PA6 kompozitom bistveno zvišamo togost, kar se izrazi v višjem upogibnem modulu elastičnosti in upogibni trdnosti, trdnost nad izmerjene vrednosti pri PA66.



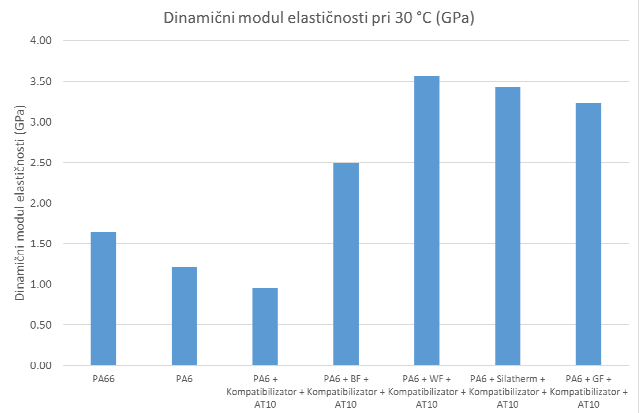
Slika 2: Rezultati upogibnega testa

Na sliki 3 so predstavljeni rezultati zarezne udarne žilavosti. PA66 in PA6 imata podobne vrednosti, medtem ko PA6 z dodatkom kompatibilizatorja dvignemo zarezno udarno žilavost za 3-krat. Z dodatkom polnil zarezno udarno žilavost znižamo, saj je material zaradi vsebnosti polnil bolj krhek. Kompoziti imajo višjo zarezno udarno žilavost kot PA66 in PA6, najverjetneje zaradi kompatibilizatorja, ki hkrati deluje tudi kot modifikator žilavosti.



Slika 3: Rezultati meritev zarezne udarne žilavosti

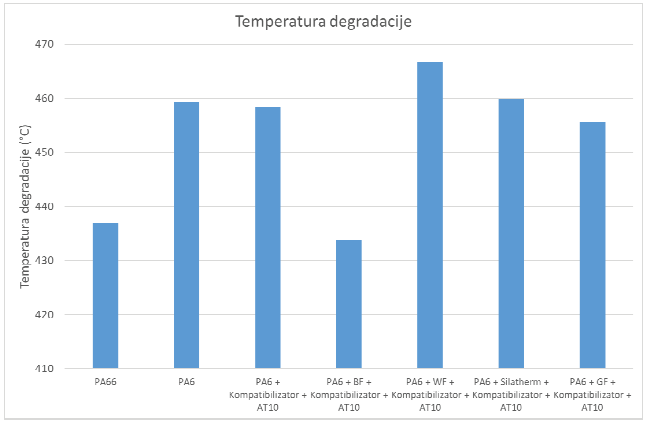
Graf na sliki 4 predstavlja rezultate dinamični modul elastičnosti materialov določen z dinamično mehansko analizo pri 30 °C. PA66 je od materialov brez polnil najbolj tog, najmanj pa PA6 s kompatibilizatorjem. Z dodatkom kateregakoli polnila dinamični modul elastičnosti bistveno zvišamo, kar pomeni, da se togost materiala poveča, saj polnila ovirajo gibanje polimernih molekul. Vsi kompoziti so bolj togi kot PA66 brez dodatkov, najvišjo dinamično togost pa dosežemo z dodatkom volastonita.



Slika 4: Rezultati dinamične mehanske analize

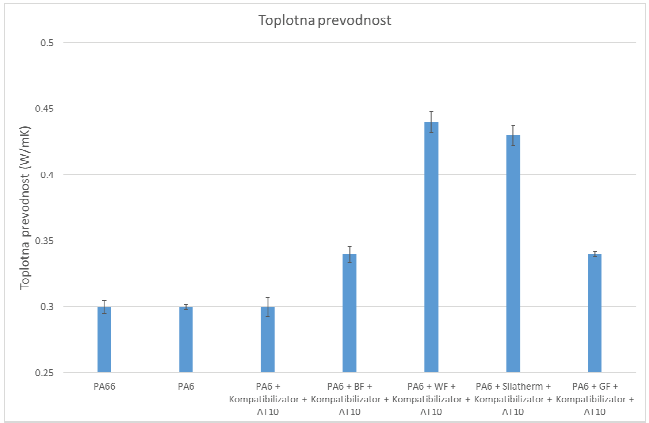
3.2 Toplotne lastnosti

Na sliki 5 so predstavljene temperature degradacij matric določene s termogravimetrično analizo. To so temperature, kjer je razpad polimerne matrice materiala najhitrejši. PA6 smo izmerili za več kot 20 °C višjo temperaturo degradacije kot PA66, najverjetneje je uporabljeni referenčni PA66 slabše toplotno stabiliziran kot PA6. Z dodatkom volastonita materialu povečamo odpornost na degradacijo, s Silathemom pa na temperaturo degradacije ne vplivamo. Pri dodatku steklenih vlaken se temperatura degradacije minimalno zniža, medtem ko pri dodatku bazaltnih vlaken odpornost materiala na toplotno degradacijo bistveno pade, celo nekoliko pod izmerjeno vrednost PA66.



Slika 5: Rezultati termogravimetrične analize

Graf na sliki 6 predstavlja izmerjene toplotne prevodnosti preučevanih materialov. PA66, PA6 in PA6 s kompatibilizatorjem imajo praktično enako toplotno prevodnost, razlike so v območju standardnih deviacij. Z dodatkom polnil pa bistveno dvignemo toplotno prevodnost. Najvišjo toplotno prevodnost dosežemo z dodatkom volastnita in Silatherma, medtem ko je ta vpliv pri ojačitvi z bazaltnimi in steklenimi vlakni nižji.



Slika 6: Rezultati meritev toplotne prevodnosti

4 SKLEP

Rezultati vseh testov nakazujejo na to, da lahko kompozite PA6 uporabimo kot alternativo za PA66. Izmed testiranih polnil so se za izboljšanje mehanskih lastnosti PA6 kot najbolj primerna izkazala steklena vlakna, za izboljšanje toplotnih lastnosti pa volastonit. Glede na to, da pri večini izvedenih testov s PA6 kompoziti s 30 m.% polnil presežemo PA66, bi bil za izenačenje lastnost dovolj že dodatek manjšega deleža polnila.

Vsekakor pa je pred poseganjem po alternativnem materialu potrebno vedeti, katerim specifikacijam mora material zadostiti in glede na to ustrezno izbrati alternativni material oziroma temu primerno prilagoditi recepturo alternativnega materiala, da bo izdelek iz prav tako dobro opravljal svojo nalogo.

Viri:

[1] GC Inteligence: PA66. (https://gc-intelligence.com/category/market-update/nylon66-pa66/9

[2] DSM: The PA66 Shortage Continues: How to Find a Drop-in Solution for your Production Process. (https://www.dsm.com/engineering-materials/en_US/blog/PA66-shortage-continues-solution-production-process.html)

[3] Albis: Possible Solutions to the PA66 Shortage. (https://www.albis.com/dam/jcr:8d76ea1b-fad7-4dc0-91ec-79c9b4223062/PA6%20vs%20PA66_Chart_ALBIS%20PLASTIC%20GmbH.pdf)

MODIFIKACIJA ŽILAVOSTI BIOKOMPOZITOV NA OSNOVI PLA

Teja PEŠL, Silvester BOLKA, Rebeka LORBER, Tamara ROZMAN, Rajko BOBOVNIK, Blaž NARDIN
Fakulteta za tehnologijo polimerov, Slovenj Gradec

IZVLEČEK

Polimlečna kislina (PLA) ni primerna za uporabo v embalažnem sektorju zaradi njene krhkosti. Da bi zaobšli to pomanjkljivost, obstaja veliko mešanic PLA z drugimi biološko razgradljivimi termoplastičnimi materiali. Najpogosteje uporabljena sta poli(3-hidroksibutirat) (PHB) in polibutilen adipat tereftalat (PBAT). Epoksi oligomeri se lahko uporabijo kot reaktivni kompatibilizatorji za izdelavo mešanice s PLA za uporabo v embalažnem sektorju. Za znižanje cene mešanice PLA lahko kot polnilo dodamo biomaso. V tem prispevku smo PLA matrico zmešali s 15 % in 20 % PBAT v prisotnosti kompatibilizatorja. Kot biomaso smo dodali 5 % in 10 % hmelja skupaj s kompatibilizatorjem. Dodatek hmelja ohranja toplotne lastnosti biokompozitov na ravni čistega PLA. Dodatek PBAT zmanjša togost in trdnost, vendar drastično poveča žilavost biokompozitov. V biokompozitih se hladna kristalizacija PLA pojavi pri nižjih temperaturah v primerjavi s čistim PLA. Iz rezultatov lahko sklepamo, da hmelj poveča togost in zniža temperaturo steklastega prehoda, medtem ko dodatek PBAT zmanjša togost in temperaturo steklastega prehoda, vendar oba skupaj delujeta kot nukleacijsko sredstvo za kristalizacijo PLA matrice. Biokompoziti se lahko uporabljajo v embalažnem sektorju zaradi svojih dobrih mehanskih lastnosti in nizke cene v primerjavi z materiali, ki se trenutno uporabljajo v embalažnem sektorju.

1 UVOD

Razlog za pogosto uporabo bioosnovanih in biorazgradljivih materialov je v nizkem ogljičnem odtisu, obnovljivost in možnosti kompostiranja. Tako kot termoplastični materiali na osnovi fosilnih goriv, imajo tudi bioosnovani in biorazgradljivi materiali nekaj pomanjkljivosti, ki pa se jim lahko izognemo z mešanjem teh materialov z drugimi termoplastičnimi materiali. Polimlečna kislina (PLA) in poli(butilen adipat-ko-tereftalat) (PBAT) sta poliestra, ki sta v zadnjem obdobju pritegnila veliko pozornosti, predvsem zaradi svoje biorazgradljivosti. PLA je sintetiziran iz obnovljivih virov, medtem ko je PBAT pridobljen iz nafte. PLA je delnokristaliničen polimer, ki ima temperaturo tališča okoli 180 °C in temperaturo steklastega prehoda med 50 °C in 65 °C. Toplotne lastnosti in žilavost PLA običajno ne zadostujejo za uporabo v številnih aplikacijah, med drugim tudi za embalažo [1]. Za izboljšanje neustreznih lastnosti PLA, lahko izdelamo mešanice z drugimi fleksibilnimi biorazgradljivimi materiali kot so polikaprolakton (PCL), poli(propilen karbonat) (PPC), poli(butilen sukcinat) (PBS), poli (butilen sukcinat-ko-adipat) (PBSA) in PBAT [2]. Raziskovali so mešanice PLA/PBAT z uporabo različnih tehnologij predelave in v različnih razmerjih med 90/10 % in 10/90 %. Za pihanje folije je bil maksimalen delež PLA 40 %. Nemešljivost PLA in PBAT je bila dokazana z dvema steklastima prehodoma, ki se praktično nista spremenila, pri vseh izdelanih mešanicah. Mešanica z 10 % PBAT je imela najvišjo togost, mešanica z 90 % PBAT pa je imela najvišji raztezek ob pretrgu [3]. Kadar mešamo PLA s PBAT (med 10 % in 20 % PBAT) se lahko ustvari prepletena mreža, ki omogoči, da se raztezek ob pretrgu poviša iz 10 % na 300 % [4]. Da bi omogočili mešljivost PLA s PBAT, je potrebno uporabiti ustrezen kompatibilizator. Ob dodatku 30 % PBAT k PLA, je 10 % PLA graftiranega z glicidil metakrilatom izboljšalo natezno trdnost in raztezek pri pretrgu [5]. Žilavost mešanice PLA/PBAT lahko izboljšamo tudi z uporabo trietil citrata in toluen diizocianata. Sinergistični učinek plastifikatorja in kompatibilizatorja je izboljšal mobilnost verig in medfazne interakcije med PLA in PBAT, kar je povzročilo izboljšanje nateznih lastnosti, udarne žilavosti in pospešilo hladno kristalizacijo [6].

Literatura poroča tudi o uporabi multifunkcionaliziranega epoksi polimera kot ustreznega kompatibilizatorja za mešanice PLA/PBAT [7,8,9,10]. Multifinkcionaliziran epoksi polimer (med 0,25 % in 0,5 %), uporabljen pri reakcijski ekstruziji mešanic PLA/PBAT (80/20 %), je izboljšal togost in raztezek pri pretrgu zaradi podaljšanja verig, razvejanosti verig in povezovanja PLA in PBAT [11].

2 UPORABLJENI MATERIALI IN METODE

V tem poglavju so predstavljeni uporabljeni materiali, postopki priprave vzorcev ter metode karakterizacije, ki smo jih uporabili.

2.1 Uporabljeni materiali

Komercialno dostopen PLA s trgovskim imenom Ingeo 4043D nam je dobavilo podjetje Plastika Trček, Slovenija. Komercialno dostopen PBAT s trgovskim imenom Ecoflex F Blend C1200 in komercialno dostopen multifunkcionaliziran epoksi polimer s trgovskim imenom Joncryl ADR 4468 smo kupili od podjetja BASF, Nemčija. Komercialen TPU kopolimer s trgovskim imenom Kuramiron U TU-S5265 smo kupili pri podjetju Kuraray, Nemčija. Komercialni hmelj s trgovskim imenom Styrian Aurora v obliki peletov je doniral Slovenski inštitut za raziskave hmelja in pivovarstvo, Slovenija.

2.2 Priprava vzorcev

Izdelali smo 4 serije vzorcev in sicer je bil vzorec 0 kot referenca, kjer smo uporabili le PLA. Pri vzorcih od 1 do 3 smo uporabili 4,5 % TPU in 0,5 % Joncryl, variirali pa smo delež PBAT in hmelja. Pri vzorcu 1 smo uporabili 15 % PBAT in 10 % hmelja, pri vzorcu 2 smo uporabili 15 % PBAT in 5 % hmelja, pri vzorcu 3 pa 20 % PBAT in 5 % hmelja. V tabeli 1 je prikazana sestava vzorcev.

Vse vzorce smo najprej kompavndirali na dvopolžnem ekstruderju Labtech LTE 20-44. Premer polžev je bil 20 mm, L/D razmerje 44:1, obrati polžev 300 min^{-1}, temperature cilindra od 145 °C na vstopni coni do 180 °C na šobi. Šoba je imela dve odprtini premera 4 mm. Filamenta smo vodili preko vodne kopeli (15 °C) v granulator Scheer, kjer smo filamenta narezali na dolžino okoli 5 mm.

Brizgali smo na brizgalnem stroju Krauss Maffei KM 50-180 CX. Premer polža je bil 30 mm. Temperaturni profil od 165 °C (vstopna cona) do 180 °C (na šobi). Temperatura orodja je bila 30 °C, čas hlajenja 20 s. Protitlak pri plastificiranju smo nastavili na 195 bar, obrate polža pri plastificiranju pa na 100 min^{-1}. Hitrost brizganja je bila nastavljena na 60 mm/s in na 20 mm/s za zadnja 2 mm.

Tabela 1: Sestava vzorcev

Vzorec	PLA (%)	PBAT (%)	TPU (%)	Joncryl (%)	Hmelj (%)
0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	70,0	15,0	4,5	0,5	10,0
2	75,0	15,0	4,5	0,5	5,0
3	70,0	20,0	4,5	0,5	5,0

2.3 Karakterizacija

Vse laboratorijske teste smo opravili v laboratorijih na Fakulteti za tehnologijo polimerov v Slovenj Gradcu.

Natezne in upogibne teste smo izvedli na trgalnem stroju Shimadzu AG-X plus 10 kN. Natezne teste smo izvedli skladno z ISO 527. Razmak čeljusti je bil 50 mm, hitrost testiranja do raztezka 0,25 % je bila 1 mm/min, nad 0,25 % do pretrga pa 50 mm/min. Upogibne teste smo izvedli skladno z ISO 178. Razmik spodnjih podpor je bil 64 mm, hitrost testiranja pa 2 mm/min. Pri nateznih testih smo karakterizirali natezni E modul (E_t), natezno trdnost (σ_m), raztezek pri natezni trdnosti (ε_m) in raztezek pri pretrgu (ε_{tb}). Pri upogibnih testih smo karakterizirali upogibni E modul (E_f), maksimalno upogibno trdnost (σ_{fM}) ter raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti (ε_{fM}).

Dinamične mehanske analize (DMA) smo izvedli na Perkin Elmer DMA 8000. Vzorce smo testirali na upogib z dvojno prižemo s frekvenco 1 Hz, amplitudo 0,02 mm in do 125 °C. Hitrost segrevanja je bila 2 °C/min.

Diferenčno dinamično kalorimetrijo (DSC) smo izvedli na kalorimetru Mettler Toledo DSC 2 skladno z ISO 11357. Hitrost segrevanja in ohlajanja je bila 10 °C/min. Vzorce smo segrevali od 25 °C do 180 °C, pri 180 °C je sledil izotermni segment 5 min, da smo izbrisali toplotno zgodovino vzorcev. Potem smo jih ohlajali od 180 °C do 25 °C, kjer je sledil izotermni segment pri 25 °C 5 min. Potem so se vsi koraki še enkrat ponovili. Vrednotili smo temperaturo kristalizacije (T_c), entalpijo kristalizacije (ΔH_c), temperaturo hladne kristalizacije (T_{cc}), entalpijo hladne kristalizacije (ΔH_{cc}), temperaturo tališča (T_m) in talilno entalpijo (ΔH_m) iz ohlajanja in drugega segrevanja.

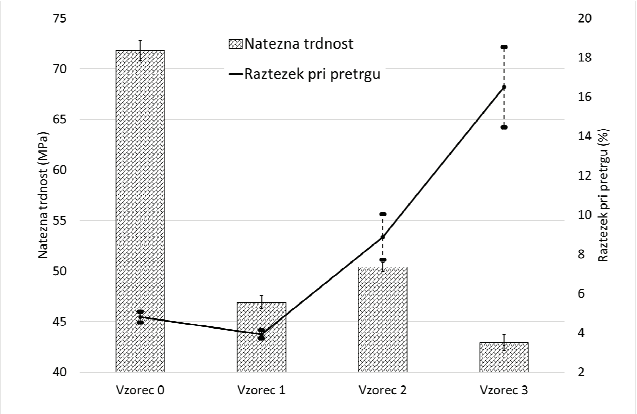
Teste udarne žilavosti smo izvedli na instrumentu Dongguan Liyi Test Equipment LY-XJJD5 v skladu s standardom ISO 179. Razdalja med podporama je bila 60 mm, uporabili smo 5 J kladivo za izvedbo udarne žilavosti in 2 J kladivo za izvedbo zarezne udarne žilavosti.

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

3.1 Rezultati nateznih in upogibnih testov

Na sliki 1 in v tabeli 2 so prikazani rezultati meritev nateznih in upogibnih testov. Kot je bilo pričakovano je dodatek PBAT zmanjšal trdnost in togost mešanic PLA/PBAT. Dodatek hmelja je znižal upogibno trdnost, vendar je povišal upogibno togost, znižal je tudi natezno trdnost ter togost in raztezek pri pretgu. Dodatek PBAT je drastično povišal raztezek ob pretrgu. Ugotovili smo, da je biokompozit PLA/PBAT z dodatkoma Joncryl in TPU dosegel večjo žilavost, saj sta ta dodatka delovala kot kompatibilizatorja.

Izboljšana žilavost je posledica dobre medfazne adhezije med termoplastično matrico in hmeljem, ki ga je povrzočil TPU, Joncryl pa je uspešno povezal PBAT in PLA. Višja vsebnost PBAT in nižja vsebnost hmelja sta zmanjšala togost in trdnost, vendar močno povišala raztezek pri pretrgu, kar lahko pripišemo plastifikacijskemu učinku PBAT in hkrati povezovanje dodatne količine PBAT na PLA kot posledica dodatka Joncryla. Nižja vsebnost PLA in višja vsebnost PBAT kažeta tako manjšo togost kot trdnost, raztezek pri pretrgu pa se močno poviša. Multifunkcionaliziran epoksi polimer je uspešno povezal PLA in PBAT, najverjetneje zaradi tvorbe manjših domen PBAT v fazi PLA [12].



Slika 1: Povzetek rezultatov natezne trdnosti (stolpci) in raztezka pri pretrgu (črta)

Tabela 2: Mehanske lastnosti vzorcev

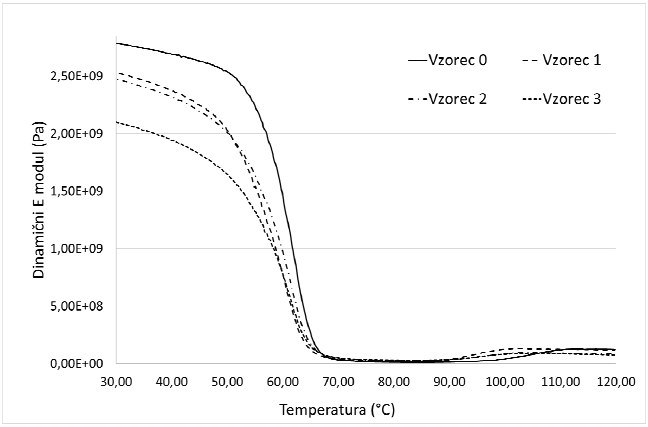
	Rezultati upogibnega testa		
Vzorec	E_f (GPa)	σ_{fM} (MPa)	ε_{fM} (%)
0	3,38	105,2	4,49
1	2,87	71,5	3,38
2	2,84	74,1	3,50
3	2,48	64,3	3,85

	Rezultati nateznega testa			
Vzorec	E_t (GPa)	σ_m (MPa)	ε_m (%)	ε_{tb} (%)
0	3,17	71,8	3,25	4,81
1	2,47	46,9	2,76	3,93
2	2,59	50,4	2,94	8,87
3	2,45	42,9	2,88	16,50

3.2 Rezultati DMA meritev

Na sliki 2 so prikazane meritve dinamičnega E modula (E'). Iz grafov je razviden hiter padec dinamičnega E modula, ki se zgodi pri temperaturi steklastega prehoda PLA. Z višjim deležem PBAT se temperatura steklastega prehoda zniža, enako na temperaturo steklastega prehoda vpliva tudi hmelj. Najvišji E' ima vzorec 0, najnižji E' pa ima vzorec 5, ki ima najvišjo vsebnost PBAT. Po temperaturi steklastega prehoda ima vzorec 0 najnižji E' in najvišjo temperaturo hladne kristalizacije. Biokompoziti (vzorci 1, 2 in 3) so imeli temperaturo hladne

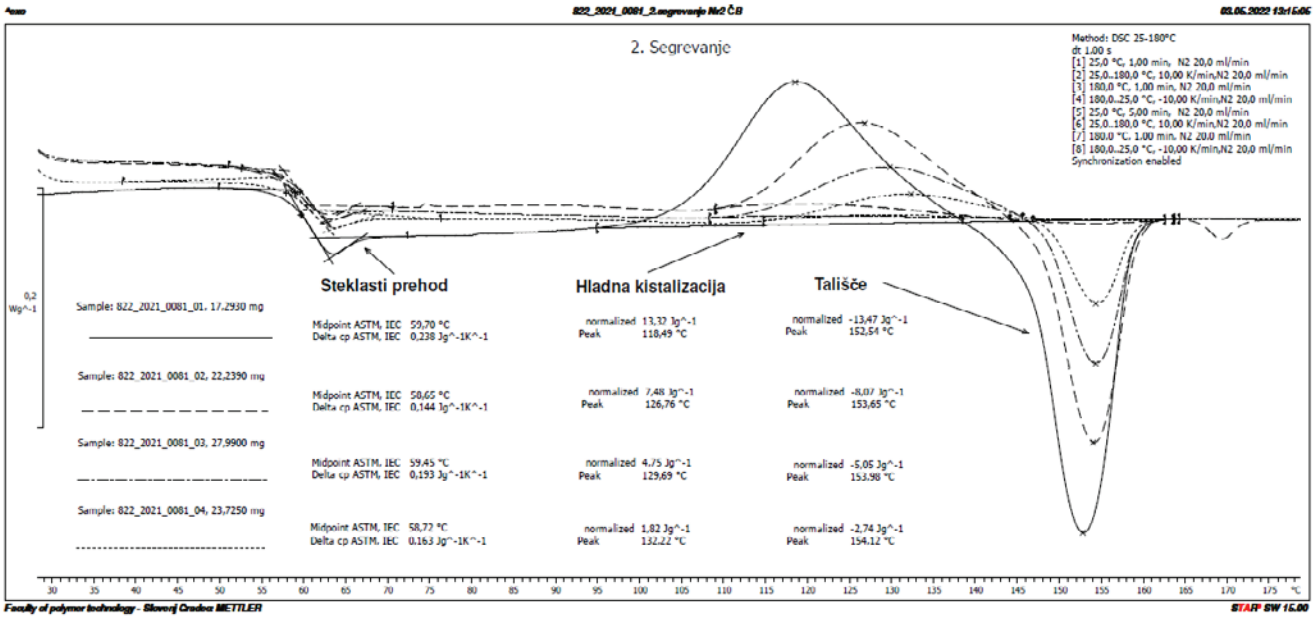
kristalizacije nižjo. Sklepamo lahko, da je nižja temperatura hladne kristalizacije posledica dodatka Joncryl. Med biokompoziti je najvišji E' imel vzorec 1, ki ima najvišji delež hmelja. Najverjetneje je hmelj deloval kot nukleacijsko jedro, ki omogoča hladno kristalizacijo pri nižjih temperaturah, saj manjša velikost delcev PBAT manj sterično ovira kristalizacijo PLA.



Slika 2: Graf prikazuje meritve dinamičnega E modula

Večjim deležem PBAT v mešanicah PLA/PBAT smo opazili, da se je znižala višina vrha za hladno kristalizacijo in tališče, temperatura steklastega prehoda se je premaknila k nižjim temperaturam, temperatura hladne kristalizacije in temperatura tališča pa k višjim temperaturam. Pri ohlajanju lahko opazimo kristalizacijo PLA (med 69 °C in 71 °C), ki ji sledita steklasti prehod PLA in kristalizacija PBAT (med 40 °C in 44 °C).

Večji delež hmelja in PBAT sta premaknila temperaturo steklastega prehoda PLA k nižjim temperaturam, kar potrjuje tudi rezultate DMA meritev in s tem potrjuje, da hmelj in PBAT delujeta kot plastifikatorja in omogočita dobre medfazne interakcije med PLA in PBAT. Medfazne interakcije med PLA in PBAT ter dobra kompatibilizacija hmelja s termoplastično matrico zavira hladno kristalizacijo, ki se zato pomika k višjim temperaturam s povečevanjem deleža PBAT in hmelja.



Slika 3: Termogrami 2. segrevanja DSC meritve

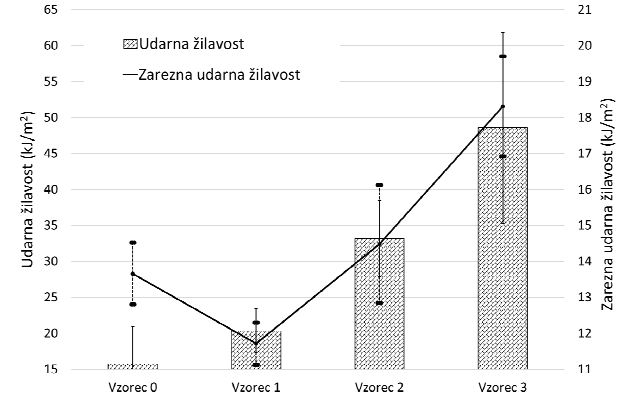
3.3 Rezultati DSC meritev

Zaradi nizke kristalizacije čistega PLA, smo opazili, da je pri drugem segrevanju prišlo do hladne kristalizacije (slika 3). Ob dodajanju PBAT je pri segrevanju prišlo do prekrivanja tališča PBAT in hladne kristalizacije PLA. Z

3.4 Rezultati meritev udarne žilavosti in zarezne udarne žilavosti

Biokompoziti z najvišjim deležem PBAT imajo najvišjo udarno žilavost in zarezno udarno žilavost. Višja žilavost je najverjetneje posledica dobrih medfaznih interakcij med PLA, PBAT in hmeljem. Višjo zarezno udarno žilavost smo lahko dosegli zaradi učinka plastificiranja, ki ga

povzroči PBAT, in tako prepreči nastajanje razpok. Kljub dobri kompatibilizaciji hmelja v mešanico PLA/PBAT, pri 10 % deležu hmelja zaznamo padec zarezne udarne žilavosti zaradi pomanjkanja plastifikacijskih področij, ki bi zavirala nastanek razpok, ki jih povzročijo delci hmelja, saj so le ti bili preveliki. Rezultati udarne žilavosti in zarezne udarne žilavosti, ki so prikazani na sliki 4, se ujemajo tudi z rezultati nateznih testov in DMA meritev.



Slika 4: Rezultati udarne žilavosti in zarezne udarne žilavosti

3 SKLEP

V tem prispevku smo raziskovali učinek dodajanja PBAT in hmelja v dveh različnih deležih na žilavost biokompozitov s PLA. Poleg tega smo raziskovali tudi sinergijski učinek multifunkcionaliziranega epoksi polimera in TPU kot kompatibilizatorja.

Ta sinergijski učinek, ki sta ga povzročila Joncryl in TPU, nas je pripeljal do izboljšanih lastnosti izdelanih biokompozitov. Materialu se je drastično povišala žilavost, biokompoziti so ostali biorazgradljivi, uspelo pa nam je tudi znižati temperaturo predelave v primerjavi s čistim PLA. Posebej zanimivo korelacijo smo opazili med kinetiko kristalizacije PLA in kristalizacijo PBAT. Biomasa je učinkovit dodatek za nukleacijo, hkrati pa deluje tudi kot plastifikator za kompozite na osnovi PLA. Da bi se izognili nemešljivosti PLA in PBAT, smo uporabili multifunkcionaliziran epoksi polimer in TPU kopolimer, ki sta skupaj dosegla odlično medfazno interakcijo med PLA in PBAT ter hkrati omogočila dobro kompatibilizacijo hmelja v mešanico PLA/PBAT brez kakršnekoli predhodne površinske obdelave biomase.

V prispevku smo dosegli veliko izboljšanje žilavosti brez kakršnihkoli dodatnih postopkov, razen mešanja vseh materialov v enem koraku. Izboljšanje žilavosti je še posebej pomembno v embalažnem sektorju za izdelavo fleksibilne embalaže. Drug prav tako pomemben dejavnik, ki smo ga dosegli v izdelanem biokompozitu, pa je dodajanje biomase v kompozitni material, ki nam spremeni lastnosti materiala, hkrati pa tudi znižuje njegovo ceno, ta pa je pogosto med pomembnejšimi dejavniki pri izbiri materiala.

Viri:

[1] Reddy, M. M., Vivekanandhan, S., Misra, M., Bhatia, S. K., & Mohanty, A. K.: Biobased plastics and bionanocomposites: Current status and future opportunities, *Progress in Polymer Science* (2013), str. 1653–1689.

[2] Wang, X., Peng, S., Chen, H., Yu, X., & Zhao, X.: Mechanical properties, rheological behaviors, and phase morphologies of high-toughness PLA/PBAT blends by in-situ reactive compatibilization, *Composites Part B: Engineering*, 2019.

[3] Su, S., Duhme, M., & Kopitzky, R.: Uncompatibilized PBAT/PLA blends: Manufacturability, miscibility and properties, *Materials*, 2020, str. 1–17.

[4] Deng, Y., Yu, C., Wongwiwattana, P., & Thomas, N. L.: Optimizing Ductility of Poly(Lactic Acid)/Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate) Blends Through Co-continuous Phase Morphology, *Journal of Polymers and the Environment*, 2018, str. 3802–3816.

[5] Lyu, Y., Chen, Y., Lin, Z., Zhang, J., & Shi, X.: Manipulating phase structure of biodegradable PLA/PBAT system: Effects on dynamic rheological responses and 3D printing, *Composites Science and Technology*, 2020.

[6] Phetwarotai, W., Phusunti, N., & Aht-Ong, D.: Preparation and Characteristics of Poly(butylene adipate-co-terephthalate)/Polylactide Blend Films via Synergistic Efficiency of Plasticization and Compatibilization, *Chinese Journal of Polymer Science (English Edition),* 2019, str. 68–78.

[7] Arruda, L. C., Magaton, M., Bretas, R. E. S., & Ueki, M. M.: Influence of chain extender on mechanical, thermal and morphological properties of blown films of PLA/PBAT blends, *Polymer Testing*, 2015, str. 27–37.

[8] Carbonell-Verdu, A., Ferri, J. M., Dominici, F., Boronat, T., Sanchez-Nacher, L., Balart, R., & Torre, L.: Manufacturing and compatibilization of PLA/PBAT binary blends by cottonseed oil-based derivatives, *Express Polymer Letters*, 2018, str. 808–

823.

[9] Lamnawar, K., Maazouz, A., Cabrera, G., & Al-Itry, R.: Interfacial tension properties in biopolymer blends: From deformed drop retraction method (DDRM) to shear and elongation rheology-application to blown film extrusion, *International Polymer Processing*, 2018, str. 411–424.

[10] Zhao, X., Hu, H., Wang, X., Yu, X., Zhou, W., & Peng, S.: Super tough poly(lactic acid) blends: A comprehensive review, *RSC Advances*, 2020, str. 13316–13368.

[11] Al-Itry, R., Lamnawar, K., & Maazouz, A.: Rheological, morphological, and interfacial properties of compatibilized PLA/PBAT blends, *Rheologica Acta*, 2014, str. 501–517.

[12] Ding, Y., Feng, W., Lu, B., Wang, P., Wang, G., & Ji, J.: PLA-PEG-PLA tri-block copolymers: Effective compatibilizers for promotion of the interfacial structure and mechanical properties of PLA/PBAT blends, *Polymer*, 2018, str. 179–187.

MODIFIKACIJA ŽILAVOSTI TERMOPLASTIČNE MEŠANICE NA OSNOVI PLA Z NANOKRISTALINIČNO CELULOZO

Silvester BOLKA, Teja PEŠL, Rebeka LORBER, Tamara ROZMAN, Rajko BOBOVNIK, Blaž NARDIN
Fakulteta za tehnologijo polimerov

IZVLEČEK

Od sedemdesetih let prejšnjega stoletja je sektor plastične embalaže začel rasti. Velika količina plastičnih odpadkov je vzpodbudila razvoj okolju prijaznih embalažnih materialov. Polimlečna kislina (PLA) je ena od bioosnovanih in biorazgradljivih alternativ. Poleg neproblematične predelave ima PLA tudi nekaj pomanjkljivosti. Da bi se izognili krhkosti PLA, se lahko nanokristalinična celuloza (NCC) vključi v PLA matrico. Površinska modifikacija NCC je dodaten korak obdelave, ki vključuje tudi kemikalije, ki niso vedno okolju prijazne. Alternativa površinski modifikaciji NCC je uporaba ustreznega kompatibilizatorja za izboljšanje medfaznih interakcij med NCC in termoplastično matrico. Pripravili smo tri različne koncentracije površinsko nemodificirane NCC (1 %, 2 % in 5 %) v mešanicah na osnovi PLA. Kot reference je bila uporabljena mešanica na osnovi PLA brez NCC. Izvedena sta bila dva cikla kompavndiranja, da bi preučili vpliv striga med obdelavo na lastnosti nanokompozitov in porazdelitev NCC v termoplastično matrico. Dodatek NCC poveča togost, trdnost in raztezek ob pretrgu. Rezultati kažejo na izboljšanje žilavosti mešanice na osnovi PLA z dodatkom NCC, čeprav je bil uporabljena NCC brez površinske modifikacije. Modifikacija z ustreznim kompatibilizatorjem pri mešanju je zelena alternativa za proizvodnjo nanokompozitov za embalažno industrijo.

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. Da bi znižali krhkost PLA, so znanstveniki vložili veliko truda v raziskovalno delo. Žilavost PLA so izboljšali z več strategijami, vključno s plastifikacijo, kopolimerizacijo in mešanjem taline z različnimi žilavimi polimeri, elastomeri in termoplastičnimi elastomeri. Zaradi odsotnosti reaktivnih stranskih skupin je modifikacija PLA zahteven proces. Žilavost PLA lahko primerjamo z žilavostjo polistirena, ki se pogosto uporablja v sektorju embalaže. Žilavost je odvisna od molekulske mase, prostorske razporeditve molekul, stopnje kristaliničnosti in mešljivosti v primeru termoplastičnih mešanic. Za ocenjevanje krhkosti materiala se najpogosteje uporabljajo natezni preskusi (raztezek pri pretrgu) in udarni preskusi. Najučinkovitejši postopek utrjevanja ostajata natezna togost in natezna trdnost [1]. Za čisti PLA so poročali o vplivu naraščajoče stopnje kristaliničnosti delno kristaliničnega PLA na povečanje žilavosti [2]. Najučinkovitejša načina usmerjanja molekul PLA sta vlečenje in dvoosna orientacija. Mešanje s plastifikatorji zviša elastičnost in drastično zniža trdnost mešanic. Z modifikacijo PLA in površine se področje uporabe PLA širi [3]. Nedavne modifikacije PLA za doseganje žilavega PLA znižujejo togost in trdnost, poleg tega pa s fizikalnim staranjem znižuje žilavost. Površinska modifikacija PLA z reaktivnimi in nereaktivnimi skupinami lahko vpliva tudi na lastnosti PLA zaradi migracije monomerov iz skupin za površinsko modifikacijo v izdelke iz PLA. Poročali so o povečanju žilavosti PLA z mešanjem taline s termoplastičnimi elastomeri in reaktivnim mešanjem [4]. Z dodatkom več kot 20 % termoplastičnega materiala na osnovi nafte, ki ni biorazgradljiv, je bila dosežena vrhunska udarna žilavost, vendar sta se hkrati hitro znižali togost in trdnost. Povezava med žilavostjo PLA in stopnjo kristaliničnosti še ni pojasnjena. Termodinamična nemešljivost PLA z večino termoplastov povzroča nepričakovane visoko zmogljive mešanice na osnovi PLA [5]. Da bi se

izognili tej slabosti, je potrebna kompatibilizacija pri mešanju s talino. Dodajanje kopolimerov je običajen in učinkovit način za kompatibilizacijo polimernih mešanic. Glavna ovira je pomanjkanje komercialno dostopnih kopolimerov PLA. Reaktivna kompatibilizacija je uporabna tudi v industrijskih aplikacijah. Vključitev nanodelcev pri reaktivni kompatibilizaciji lahko dodatno izboljša mehanske lastnosti in žilavost zaradi ojačitvenih učinkov nanodelcev zaradi spremenjenih medfaznih lastnosti in faznih morfologij. Funkcionalizirana organoglina [6, 7] vpliva na morfologijo mešanic PLA/PBS zaradi kompatibilizacijskega učinka nanodelcev. Organoglina deluje kot kompatibilizator v mešanicah PLA/PCL [8], mešanicah PLA/PBSA [9] in mešanicah PLA/TPS [10]. Združljivost mešanic PLA/PCL je bila izboljšana z dodatkom funkcionaliziranih večstenskih ogljikovih nanocevk (MWCNT) [11]. Funkcionalizirane MWCNT so bile razpršene predvsem v PCL in na faznih mejah. Dodatek modificiranega polihedralnega oligomernega silseskvioksana (POSS) [12] omogoča oblikovanje homogene mikrostrukture v mešanici PLA/PCL. Mešanica PLA/PC z nanosiliko [13] z ustreznim kompatibilizatorjem je obetaven okolju prijazen material. Značilna sta bila nižja togost in trdnost pri višjem raztezku pri pretrgu. Samarijev acetilacetonat [14] omogoča reakcije transesterifikacije med PLA in PC ter izboljša lastnosti mešanice PLA/PC. Kompatibilizator je prispeval k znatnemu ojačitvenemu učinku, ki je razviden iz povečanja dinamičnega E modula zmesi v temperaturnem intervalu med koncem in začetkom steklastega prehoda PLA oziroma hladne kristalizacije. Površinsko modificirani nanokristalinični celulozni nanokompoziti v mešanicah PLA/PBS so izboljšali medfazno adhezijo, togost z zmanjšanjem trdnosti in raztezek pri pretrgu [15]. Dodatek 1 % NCC v matrici PLA je povečal togost, dodatek 2 % in 3 % pa je togost zmanjšal v primerjavi s čisto matrico PLA [16]. Poročali so o različnih vplivih dodane količine NCC [17], kjer so dodatki 1, 3 in 5 % povečali togost nanokompozitov z matrico PLA v primerjavi s čisto matrico PLA. Raztezek pri pretrgu se je povečal z dodatkom 1 % NCC in zmanjšal pri 3 % in 5 % NCC v matriko PLA. Vsi navedeni rezultati za NCC so bili izvedeni s površinsko modificiranim NCC. Mokra sestava [18] NCC in PLA je pokazala izboljšane pregradne in mehanske lastnosti.

2 EKSPERIMENTALNI DEL

2.1 Uporabljeni materiali

Komercialno dostopen PLA s trgovskim imenom Ingeo 4043D je doniralo podjetje Plastika Trček iz Slovenije. Komercialno dostopen polikarbonat s trgovskim imenom Lexan 243 R smo kupili od podjetja Sabic, Avstrija. NCC je doniralo podjetje Navitas, Slovenija. Komercialno dostopni SEBS-*g*-MA s trgovskim imenom FG 1901 GT smo kupili od podjetja Kraton, Nemčija. Komercialno dostopen kopolimer TPU s trgovskim imenom Kuramiron U TU-S5265 smo kupili pri podjetju Kuraray, Nemčija. Komercialno dostopni $CaCO_3$ s trgovskim imenom Calplex Extra je doniralo podjetje Calcit, Slovenija. Sestava vzorcev je navedena v Tabeli 1.

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	PLA (%)	PC (%)	SEBS (%)	TPU (%)	$CaCO_3$ (%)	NCC (%)	Št. kompavndiranj (%)
PLAPC	42	40	10	5	3	0	1
PLAPC 1NCC-1	41	40	10	5	3	1	1
PLAPC 1NCC-2	41	40	10	5	3	1	2
PLAPC 2NCC-1	40	40	10	5	3	2	1
PLAPC 2NCC-2	40	40	10	5	3	2	2
PLAPC 5NCC-1	37	40	10	5	3	5	1
PLAPC 5NCC-2	37	40	10	5	3	5	2

V prvem ciklu kompavndiranja so bili materiali ločeno zmešani in ekstrudirani na dovpolžnem 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 (165 °C) do šobe (200 °C). Po kompavndiranju sta bila oba proizvedena filamenta ohlajena v vodni kopeli in narezana na pelete dolžine približno 5 mm in premera 3 mm. Pri drugem ciklu kompavndiranja so bili izdelani peleti nanokompozitov ekstrudirani na istem ekstruderju z enakimi nastavitvami ekstruderja.

Brizganje je potekalo na stroju Krauss Maffei 50-180 CX s premerom polža 30 mm. Temperaturni profil je naraščal od lijaka (185 °C) do šobe (200 °C). Temperatura orodja je bila nastavljena na 30 °C, čas hlajenja pa na 10 s. Protitlak je bil nastavljen na 150 barov, obrati polža pa na 50 vrtljajev na minuto. Hitrost brizganja je bila nastavljena na 60 mm/s, za zadnji 1 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 natezno togost (E_t), natezno trdnost (σ_m), raztezek pri natezni trdnosti (ε_m) in raztezek pri pretrgu (ε_{tb}). Pri upogibnem testu smo vrednotili upogibno togost (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 180 °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 0 do 200 °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 200 °C 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. Meritve oksidacijskega indukcijskega časa (OIT) smo vrednotili na DSC 2 v skladu s standardno metodo ISO 11357-6. Ko je bil vzorec 5 minut pri temperaturi 50 °C pod pretokom dušika 50 ml/min, se je meritev pričela. Vzorec smo segrevali od 50 °C do 200 °C s hitrostjo 20 °C/min, nato pa je bil 5 min zadržan za izravnavo, še vedno pod pretokom dušika 50 mL/min. Nato smo preklopili na kisik s pretokom 50 ml/min. Oksidacijo vzorca smo opazili kot strmo zmanjšanje toplotnega toka zaradi endotermne narave oksidacijske reakcije. OIT je bil dobljen kot začetek endotermnega vrha oksidacijske reakcije. Obnašanje pri hladni kristalizaciji smo določili na napravi Mettler Toledo Flash DSC 1 z vmesnim hladilnikom Huber TC45 in dušikom (50 ml/min). Vzorce smo ohladili iz taline (200 °C) na želeno temperaturo, jih hitro segreli na temperaturo staranja (90 °C za 100 s), hitro ohladili na 15 °C, ponovno segreli na 120 °C in nato hladno kristalizirali pri 120 °C v različnih časih (od 0,1 s do 2400 s). Hitro hlajenje in segrevanje (500 °C/s) je potekalo v vseh segmentih hlajenja in segrevanja, da smo preprečili kristalizacijo med hlajenjem in segrevanjem. Prvo segrevanje je potekalo pri temperaturi od 15 °C do 200 °C. Za oceno segrevanja je bil vzet segment št. 12, pri čemer sta bili opisani temperatura taljenja in talilna entalpija. Masa vzorcev je bila določena z normirano spremembo specifične toplotne kapacitete pri vrednotenju steklastega prehoda na podlagi vrednotenja meritev DSC 2. Udarni preskusi 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 5 J in 1 J, za zarezno udarne preskuse pa nihalo z energijo 1 J.

3 REZULTATI

Dodatek NCC v mešanico na osnovi PLA je povišal trdnost, togost in raztezek pri pretrgu (Slika 1) z dodatkom 1 % NCC in enim ciklom kompavndiranja, kot je prikazano v Tabelah 2 in 3. Dodatni cikel kompavndiranja zniža upogibno trdnost in togost, poviša natezno togost ter ne vpliva na natezno trdnost in raztezek pri pretrgu.

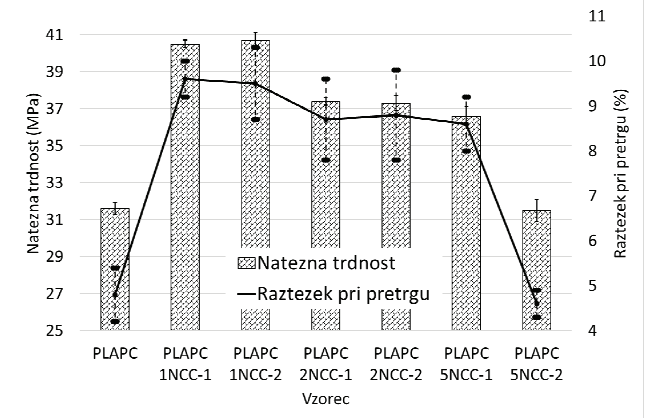
Pri višjih koncentracijah (2 % in 5 %) NCC v mešanicah na osnovi PLA drugi cikel kompavndiranja zniža trdnost in togost. Višja vsebnost NCC povzroči nižjo upogibno togost ter višjo natezno togost, trdnost in raztezek pri pretrgu, razen pri vzorcu PLAPC 5NCC-2.

Tabela 2: Zbrani rezultati upogibnih testov

Vzorec	E_f (GPa)	σ_{fM} (MPa)	ε_{fM} (%)
PLAPC	2,03±0,02	48,2±1,1	3,1±0,3
PLAPC 1NCC-1	2,08±0,01	57,6±0,3	4,7±0,1
PLAPC 1NCC-2	2,02±0,01	55,6±0,3	4,7±0,1
PLAPC 2NCC-1	1,95±0,01	52,6±0,3	4,8±0,1
PLAPC 2NCC-2	1,88±0,01	51,1±0,2	4,9±0,1
PLAPC 5NCC-1	1,94±0,01	51,6±0,5	4,8±0,1
PLAPC 5NCC-2	1,81±0,01	40,4±2,4	3,0±0,5

Tabela 3: Zbrani rezultati neteznih testov

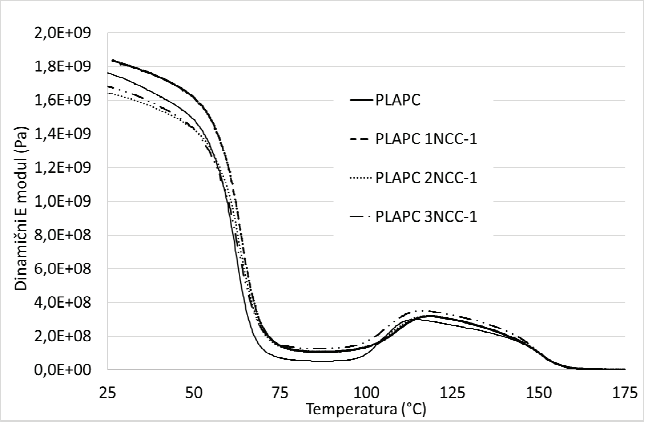
Vzorec	E_t (GPa)	σ_m (MPa)	ε_{tb} (%)
PLAPC	2,17±0,16	31,6±0,3	4,8±0,6
PLAPC 1NCC-1	2,37±0,31	40,5±0,2	9,6±0,4
PLAPC 1NCC-2	2,44±0,24	40,7±0,4	9,5±0,8
PLAPC 2NCC-1	2,38±0,27	37,4±0,2	8,7±0,9
PLAPC 2NCC-2	2,33±0,11	37,3±0,4	8,8±1,0
PLAPC 5NCC-1	2,23±0,07	36,6±0,5	8,6±0,6
PLAPC 5NCC-2	2,01±0,13	31,5±0,6	4,6±0,3



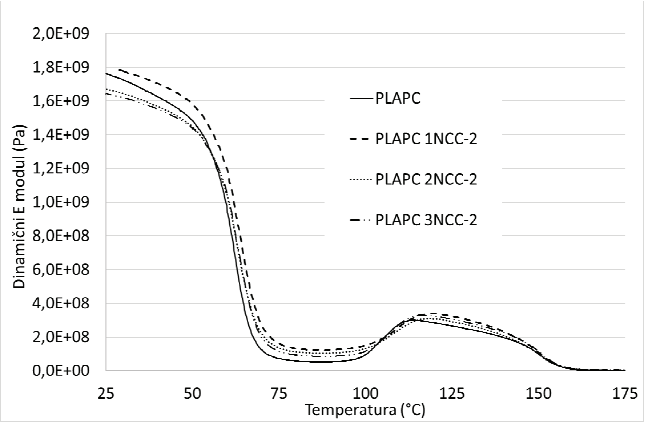
Slika 1: Zbrani rezultati natezne trdnosti in raztezka pri pretrgu

Višja trdnost in togost ter raztezek pri pretrgu so posledica dobre kompatibilizacije NCC v matrico mešanice na osnovi PLA in posledično dobre površinske interakcije NCC in modificiranih termoplastov zaradi dodatka kompatibilizatorjev SEBS-*g*-MA in TPU. Visoka stopnja striga pri ciklih kompavdiranja in ustrezni kompatibilizatorji preprečujejo močno aglomeracijo NCC v mešanicah na osnovi PLA med predelavo, kar vodi do višje trdnosti in raztezka pri pretrgu v primerjavi s čisto mešanico na osnovi PLA.

Krivulje dinamičnega E modula (Sliki 2 in 3) so pokazale prvi padec pri temperaturi steklastega prehoda za PLA. Ta padec je za mešanico na osnovi PLA večji v primerjavi z mešanicami na osnovi PLA z NCC. Dinamični E modul je v tem območju (75 °C do 100 °C) višji pri višjih vsebnostih NCC. Od 100 °C naprej se dinamični E modul poviša zaradi hladne kristalizacije materiala. Najnižji vrh temperature hladne kristalizacije je imel vzorec PLAPC (114 °C), najvišji vrh pa vzorec PLAPC 1NCC-2 (119 °C). Pri vseh vzorcih z dodatkom NCC je bil vrh temperature hladne kristalizacije za drugi cikel kompavndiranja pri višji temperaturi v primerjavi s prvim ciklom kompavndiranja.



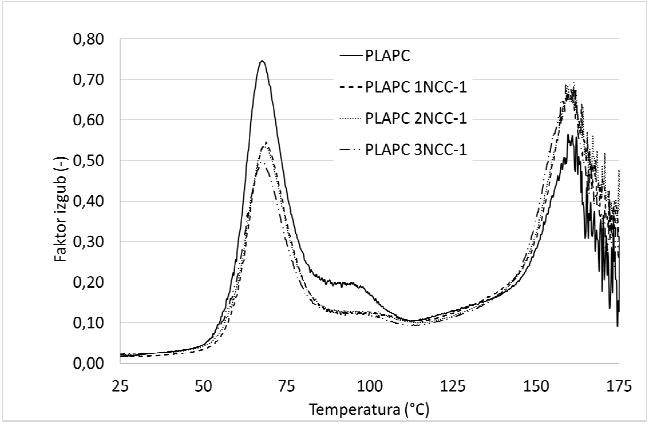
Slika 2: Zbrani rezultati dinamičnega E modula za prvo kompavndiranje



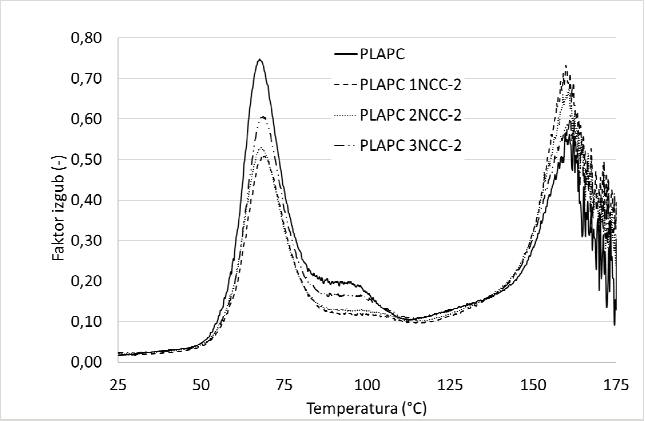
Slika 3: Zbrani rezultati dinamičnega E modula za drugo kompavndiranje

Dodatek NCC v mešanice na osnovi PLA zavira hladno kristalizacijo PLA. Pri nizki vsebnosti NCC (1 %) deluje NCC kot ojačitev zmesi na osnovi PLA, pri višjih vsebnostih (2 % in 5 %) pa togost nanokompozitov pade pod togost čiste matrice. Kljub zaviralnemu učinku NCC na hladno kristalizacijo NCC preprečuje mehčanje matrice na osnovi PLA po temperaturi steklastega prehoda PLA.

Krivulja faktorja izgub ima dva ostra vrhova pri 69 °C in 160 °C (Sliki 4 in 5) za matrico iz PLA oziroma PC. Višina prvega vrha je najnižja pri vzorcu PLAPC 1NCC in najvišja pri vzorcu PLAPC. Višina drugega vrha je najnižja pri vzorcu PLAPC in najvišja pri vzorcu PLAPC 1NCC. V drugem ciklu kompavndiranja so višine vrhov višje, kar kaže na začetek razgradnje matrice. Najbolj elastično obnašanje kaže vzorec PLAPC 1NCC po prvem ciklu kompavndiranja. Dobra površinska interakcija NCC z matrico zaradi kompatibilizatorja pri vzorcu PLAPC 1NCC zviša dinamični E modul, ohranja dinamični E modul na višjem nivoju z naraščajočo temperaturo in zniža višino vrha faktorja izgub za PLA. Višji vrh faktorja izgub za PC pri vzorcu je posledica najvišje temperature hladne kristalizacije za vzorec PLAPC 1NCC in posledično prekrivanja temperature steklastega prehoda PC in začetka taljenja PLA.



Slika 4: Zbrani rezultati faktorja izgub za prvo kompavndiranje



Slika 5: Zbrani rezultati faktorja izgub za drugo kompavndiranje

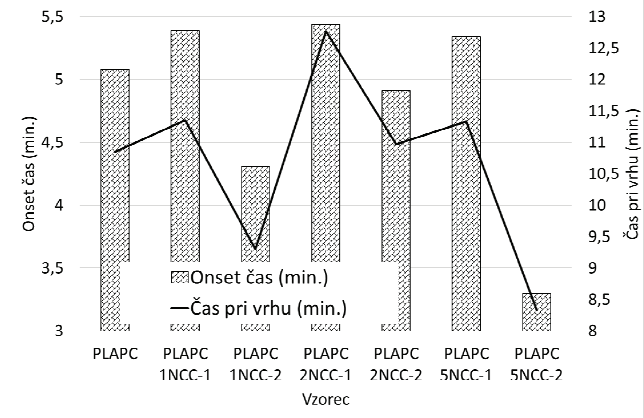
Z dodatkom NCC v mešanice na osnovi PLA se temperatura steklastega prehoda za PLA rahlo premakne k višjim temperaturam, prav tako se znižajo temperature kristalizacije in rahlo temperature taljenja (Tabela 3).

Tabela 3: Zbrani rezultati za drugo segrevanje pri DSC testih

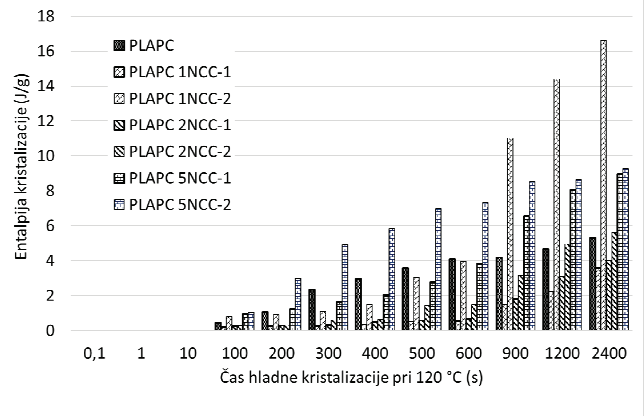
Vzorec	T_g (°C)	ΔC_p (J/gK)	T_{cc} (°C)	ΔH_{cc} (J/g)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	Diff. ΔH_m (J/g)
PLAPC	59,8	0,106	123,6	5,35	152,0	5,37	0,02
PLAPC 1NCC-1	60,8	0,091	133,3	0,32	152,2	0,37	0,05
PLAPC 1NCC-2	60,6	0,094	128,3	0,04	152,2	0,33	0,29
PLAPC 2NCC-1	61,1	0,079	133,4	0,13	152,4	0,31	0,18
PLAPC 2NCC-2	60,7	0,085	131,6	0,18	152,8	0,52	0,34
PLAPC 5NCC-1	61,1	0,060	130,4	0,24	153,2	0,48	0,24
PLAPC 5NCC-2	60,1	0,078	128,4	1,28	152,9	1,67	0,39

Entalpija taljenja je pri nanokompozitih NCC višja. Drugi cikel kompavndiranja zniža temperature steklastega prehoda in hladne kristalizacije ter zviša entalpije taljenja, ne vpliva pa na temperature taljenja. Z večjo vsebnostjo NCC se temperature steklastega prehoda in taljenja ter talilne entalpije zvišujejo. Toplotna stabilnost se z dodatkom NCC poviša praktično neodvisno od koncentracije, z drugim ciklom kompavndiranja pa se zniža (Slika 6). Indukcijski čas oksidacije in tudi najvišji čas razgradnje imata enak potek. Kinetika kristalizacije je bila opisana s pomočjo Flash DSC (Sliki 7 in 8). Začetek nastajanja kristalov v PLA je bil pri vseh vzorcih po 100 s staranja pri 90 °C in po 100 s pri 120 °C.

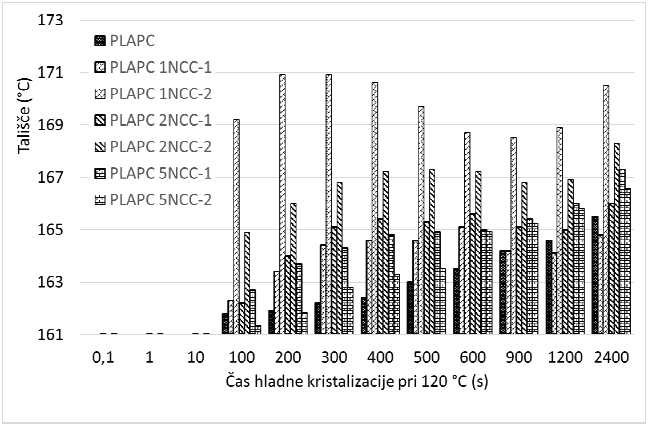
Krajši čas hladne kristalizacije pri 120 °C ne zadošča za nastanek kristalov v PLA. Višja vsebnost NCC je pospešila tvorbo kristalov PLA in tudi drugi cikel kompavndiranja. Najhitrejša in in največja tvorba kristalov v PLA je bil pri vzorcu PLAPC 5NCC-2 do časa hladne kristalizacije 600 s, nato pri vzorcu PLAPC 1NCC-2. Sklepamo lahko, da NCC zavira hladno kristalizacijo pri krajših časih in pospešuje hladno kristalizacijo pri daljših časih pri povišanih temperaturah. Gibljivost verig PLA pri povišanih temperaturah doseže prag za nastanek kristalov v PLA po 600 s za 1 % in 2 % NCC. Pri koncentraciji 5 % NCC zadostuje 100 s zaradi večje količine delcev NCC v matrici. Glede na rezultate lahko sklepamo tudi, da se aglomeracija NCC pojavlja v manjši meri in se z naraščajočo vsebnostjo NCC povečuje.



Slika 6: Zbrani rezultati za OIT, onset čas in čas pri vrhu izmerjenih krivulj za OIT

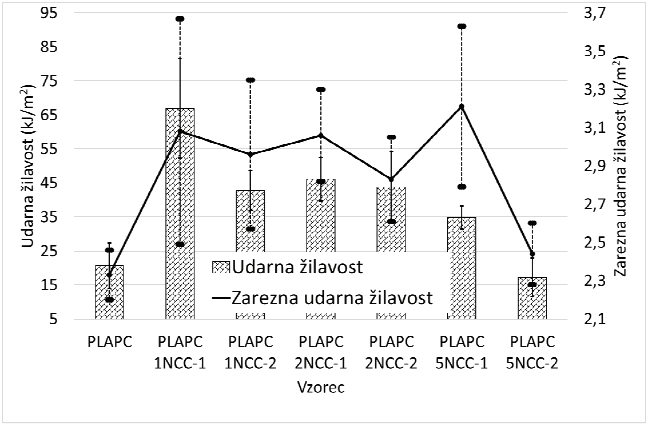


Slika 7: Zbrani rezultati za entalpijo kristalizacije vzorcev po staranju pri 90 °C za 100 s in različnimi časi hladne kristalizacije pri 120 °C



Slika 8: Zbrani rezultati za tališče vzorcev po staranju pri 90 °C za 100 s in različnimi časi hladne kristalizacije pri 120 °C

Dodatek NCC v mešanico na osnovi PLA je povišal udarno in zarezno udarno žilavost. Višja količina NCC in tudi dodatni cikel kompavndiranja zmanjšata žilavost. Višji udarno in zarezno udarno žilavost dobimo zaradi dobre površinske interakcije med NCC in matrico. Nižja žilavost pri višjih koncentracijah NCC v mešanicah na osnovi PLA je po vsej verjetnosti posledica večje aglomeracije NCC. Nižja žilavost pri drugem ciklu kompavndiranja je posledica rahle degradacije termoplastične matrice zaradi termične degradacije PLA. Žilavost nanokompozitov z izjemo vzorca PLAPC 5NCC-2 je višja v primerjavi z referenčno mešanico na osnovi PLA.



Slika 9: Zbrani rezultati udarne in zarezne udarne žilavosti vzorcev

4 SKLEP

Preučevali smo vpliv dodajanja NCC v treh različnih koncentracijah v mešanico na osnovi PLA in v dveh ciklih kompavndiranja na žilavost nanokompozitov na osnovi NCC/PLA. Raziskan je bil tudi vpliv vgradnje NCC v zmes na osnovi PLA ter mehanske in toplotne lastnosti.

Vključitev površinsko nemodificirane NCC v zmes na osnovi PLA s kompatibilizatorjema TPU in SEBS-*g*-MA pri visokem strigu pri kompavndiranju v veliki meri preprečuje aglomeracijo NCC in omogoča dobre površinske interakcije med NCC in termoplastično matrico. Aglomeracija NCC se z drugim ciklom kompavndiranja ni zmanjšala, na podlagi rezultatov pa lahko zaključimo, da se pojavi rahla termična degradacija PLA. Najvišja žilavost nanokompozita je bila potrjena z nateznim preskusom, pri katerem dodatek 1 % NCC v zmes na osnovi PLA poveča trdnost (+ 28 %), togost (+ 9 %) in raztezek pri pretrgu (+ 100 %). Zvišanje žilavosti je bilo potrjeno tudi z udarnimi preskusi, kjer sta bili izmerjeni višji udarna (+ 224 %) in zarezna udarna žilavost (+ 32 %) v primerjavi s čisto mešanico na osnovi PLA. Nadaljnje povečanje dodatka NCC in tudi drugi korak kompavdiranja znižata žilavost, vendar so vrednosti še vedno višje v primerjavi s čisto mešanico na osnovi PLA. Dodatek NCC zavira oksidacijo nanokompozitov zaradi višja toplotne stabilnosti nanokompozitov, kot posledica dobre površinske interakcije med NCC in matrico. Drugi koraki kompavdiranja znižajo OIT čas pod raven čiste mešanice na osnovi PLA. Dodatek NCC v mešanico na osnovi PLA zavira hladno kristalizacijo PLA med počasnim segrevanjem, vendar omogoča nastanek večjih PLA kristalnih območij. Drugi cikel kompavndiranja povzroči rahlo degradacijo matrice in zaradi krajših verig PLA omogoči nastanek še večjih PLA kristalnih območij.

Zaradi ustreznih kompatibilizatorjev med kompatibilizacijo taline so dobili nove lastnosti mešanice na osnovi PLA z NCC. Da bi opisali odvisnost od količine dodane NCC v nanokompozite, bi bilo treba v dodatnem raziskovalnem delu raziskati dodajanje manj kot 1 % NCC v nanokompozit na osnovi PLA.

Viri:

[1] Krishnan, S., Pandey, P., Mohanty, S., & Nayak, S. K.: Toughening of Polylactic Acid: An Overview of Research Progress, *Polymer - Plastics Technology and Engineering* (2016), 55(15), str. 1623–1652.

[2] Anderson, K. S., Schreck, K. M., & Hillmyer, M. A.: Toughening polylactide, *Polymer Reviews* (2008), 48(1), str. 85–108.

[3] Rasal, R. M., Janorkar, A. V., & Hirt, D. E.: Poly(lactic acid) modifications, *Progress in Polymer Science (Oxford)* (2010), 35(3), str. 338–356.

[4] Liu, H., & Zhang, J.: Research progress in toughening modification of poly(lactic acid), *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics* (2011), 49(15), str. 1051–1083.

[5] Zeng, J. B., Li, K. A., & Du, A. K.: Compatibilization strategies in poly(lactic acid)-based blends, *RSC Advances* (2015), 5(41), str. 32546–32565.

[6] Chen, G. X., Kim, H. S., Kim, E. S., & Yoon, J. S.: Compatibilization-like effect of reactive organoclay on the poly(l-lactide)/poly(butylene succinate) blends, *Polymer* (2005), 46(25), str. 11829–11836.

[7] Risse, S., Tighzert, L., Berzin, F., & Vergnes, B.: Microstructure, rheological behavior, and properties of poly(lactic acid)/poly(butylene succinate)/organoclay nanocomposites, *Journal of Applied Polymer Science* (2014), 131(12), str. 1–8.

[8] Hoidy, W. H., Al-Mulla, E. A. J., & Al-Janabi, K. W.: Mechanical and Thermal Properties of PLLA/PCL Modified Clay Nanocomposites, *Journal of Polymers and the Environment* (2010), 18(4), str. 608–616.

[9] Ojijo, V., Ray, S. S., & Sadiku, R.: Effect of nanoclay loading on the thermal and mechanical properties of biodegradable polylactide/poly[(butylene succinate)-co-adipate] blend composites, *ACS Applied Materials and Interfaces* (2012), 4(5), str. 2395–2405.

[10] Ferreira, W. H., Carmo, M. M. I. B., Silva, A. L. N., & Andrade, C. T.: Effect of structure and viscosity of the components on some properties of starch-rich hybrid blends, *Carbohydrate Polymers* (2015), 117, str. 988–995.

[11] Wu, D., Zhang, Y., Zhang, M., & Yu, W.: Selective localization of multiwalled carbon nanotubes in poly(ε-caprolactone)/polylactide blend, *Biomacromolecules* (2009), 10(2), str. 417–424.

[12] Monticelli, O., Calabrese, M., Gardella, L., Fina, A., & Gioffredi, E.: Silsesquioxanes: Novel compatibilizing agents for tuning the microstructure and properties of PLA/PCL immiscible blends, *European Polymer Journal (2014)*, 58, str. 69–78.

[13] Irani-Kolash, E., Moshiri-Gomchi, N., Talebi-Liasi, A., Sabahi, S., Bahri-Laleh, N., Mehdipour-Ataei, S., Mokhtari-Aliabad, J., & Mirmohammadi, S. A.: Preparation of an enhanced nanohybrid alloy based on polylactic acid/polycarbonate/nanosilica, *Plastics, Rubber and Composites* (2020), 49(6), str. 263–270.

[14] Chelghoum, N., Guessoum, M., Fois, M., & Haddaoui, N.: Contribution of Catalytic Transesterification Reactions to the Compatibilization of Poly(lactic acid)/Polycarbonate Blends: Thermal, Morphological and Viscoelastic Characterization, *Journal of Polymers and the Environment* (2018), 26(1), str. 342–354.
[15] Kian, L. K., Saba, N., Jawaid, M., & Sultan, M. T. H.: A review on processing techniques of bast fibers nanocellulose and its polylactic acid (PLA) nanocomposites, *International Journal of Biological Macromolecules* (2019), 121, str. 1314–1328.
[16] Sullivan, E. M., Moon, R. J., & Kalaitzidou, K.: Processing and characterization of cellulose nanocrystals/polylactic acid nanocomposite films, *Materials* (2015), 8(12), str. 8106–8116.
[17] Sung, S. H., Chang, Y., & Han, J.: Development of polylactic acid nanocomposite films reinforced with cellulose nanocrystals derived from coffee silverskin, *Carbohydrate Polymers* (2017), 169, str. 495–503.
[18] Sabo, R. C., Stark Nicole M., & Wei Liqing.: *Wet compounding of cellulose nanocrystals into polylactic acid for packaging application,* ANTEC-2019-The Plastics Conference 2019 (2019), str. 5.

ZAHVALA: Zahvaljujemo se podjetju NAVITAS za dobavo nanokristalinične celuloze, podjetju Plastika Trček za dobavo PLA in podjetju Calcit za dobavo $CaCO_3$.

VPLIV KOLIČINE KOMPATIBILIZATORJA NA ADHEZIJO IN LASTNOSTI KOMPOZITOV NA OSNOVI PE

Tamara ROZMAN, Silvester BOLKA, Teja PEŠL,
Rebeka LORBER, Rajko BOBOVNIK, Blaž NARDIN
Fakulteta za tehnologijo polimerov

IZVLEČEK

Biokompoziti s polietilenom (PE) kot matrico in biomaso kot ojačitvijo zaradi nizke gostote, visoke togosti, zmerne trdnosti in nizke cene vzbujajo pozornost raziskovalcev tudi na področju embalaže. Medfazna vez med nepolarno PE matrico in polarno biomaso določa lastnosti biokompozitov. Medfazno vezavo je mogoče izboljšati s površinsko obdelavo biomase ali z dodatkom ustreznega kompatibilnega sredstva. Kompatibilizator, v tem primeru anhidrid maleinske kisline, graftiran na glavno verigo PE, lahko olajša tudi disperzijo biomase v PE matrici. Adhezijo smo testirali s tehnologijo IML med brizganjem. Mehanske in toplotne lastnosti biokompozitov smo določili z upogibnimi in nateznimi preskusi, DMA, DSC in preizkusom udarne žilavosti. Izboljšanje adhezije je bilo doseženo z naraščajočo količino kompatibilizatorja. Togost se je zmanjšala z naraščajočo količino kompatibilizatorja, medtem ko se je trdnost povečala. Udarna žilavost se je povečala s količino kompatibilizatorja. Rezultati kažejo, da lahko kompatibilizator uspešno nadomesti površinsko obdelavo biomase, hkrati pa spodbuja adhezijo na površini brez dodatne površinske obdelave, kot je obdelava s korono. Rezultati tega pristopa so obetavni za pripravo biokompozitov za embalažni sektor, saj se izognemo dvema dodatnima korakoma in s tem znižamo ceno končnega izdelka.

1 UVOD

Na področju embalaže izraz toga plastika vključuje steklenice, kozarce, kadi in vedra. K rasti tega segmenta je prispeval tudi razvoj predelovalnih tehnologij za proizvodnjo toge plastične embalaže. Eden od ključnih vidikov je dizajn tega izdelka. Brizganje je zelo pogosto uporabljena tehnologija predelave za izdelavo toge embalaže [1]. Glavna prednost plastične embalaže je nizka gostota plastike [2]. Da bi ohranili nizko težo embalaže se raziskovalci zanimajo tudi za različne tehnologije dekoracije embalaže. Trg narekuje različne učinke dekoracije. Potrebno je razlikovati med samo embalažo kot tudi med dekoracijo embalaže in vrsto označevanja. Dekorativni učinki so tridimenzionalni, barvni učinki, kontrastni, sijajni in mat efekti, kovinski ali odsevni učinki in mnogi drugi. To je mogoče doseči s filmi, folijami, etiketami, črnili, barvami in premazi. Nekatere od teh tehnologij zahtevajo dodatne korake predelave, nekatere imajo velik vpliv na okolje, nekatere pa je mogoče z manjšimi spremembami integrirati v obstoječe proizvodne linije [3]. Zanimiva tehnologija za nanašanje etiket na embalažne posode je zabrizgavanje v orodju (IML). Ta tehnologija za dekoracijo ponuja številne možnosti za doseganje najboljše možne kakovosti za vizualni učinek in minimiziranje korakov za izdelavo končnega izdelka, kot bi bilo v primeru tiskanja. S tehnologijo IML je mogoče uporabiti zelo tanek material za etikete. Položaj etikete v orodju vzdržuje bodisi vakuum bodisi elektrostatični naboj. Večina robotskih sistemov za zabrizgavanje v orodju, ki so trenutno na voljo, ne zahteva posebnega brizgalnega stroja in jih je mogoče enostavno povezati z večino sodobnih strojev za brizganje s sistemi za hitro vpenjanje. Kot postopek za visokokakovostno dekoracijo brizgane embalaže se je IML izkazal za zadovoljivega [1][3][4]. Etikete za IML morajo imeti dobro adhezijo na površino brizganega izdelka. Najboljše rezultate je mogoče doseči, če se vbrizgana talina delno veže s filmom, kar izboljša adhezijo med filmom in brizganim delom [3][4]. V večplastni strukturi, tako kot v primeru IML, je adhezijo med plastmi težko zagotoviti, zlasti pri različno polarnih plasteh. Za boljšo

adhezijo lahko uporabimo dva glavna pristopa, in sicer predobdelavo površine ter modifikacijo materiala. Za reaktivno kompavndiranje polietilena se najpogosteje uporablja graftiran polietilen z anhidridom maleinske kisline (PE-g-MA). PE-g-MA izboljša površinsko interakcijo med PE in drugimi polarnimi polimeri ter dodanimi vlakni [5][6][7][8][9][10][11][12]. V tem prispevku je bil uporabljen PE-g-MA kot kompatibilizator za biomaso v PE-HD matrici, kot površinsko aktivna snov za biomaso in kot spodbujevalec adhezije za tehnologijo IML.

2 MATERIALI IN METODE

2.1 Vzorci

Tabela 1: Sestava vzorcev

Vzorec	PE-HD (m.%)	Miskantusova vlakna (m.%)	Odpadni papir (m.%)	Kompatibilizator (m.%)	Lubrikant (m.%)	Antioksidant (m.%)
15_02	66,62	30		2	1	0,38
15_03	64,62	30		4	1	0,38
15_04	62,62	30		6	1	0,38
60_01	66,62		30	2	1	0,38
60_02	64,62		30	4	1	0,38
60_03	65,62		30	3	1	0,38
60_04	63,62		30	5	1	0,38
63_01	65,62	30		3	1	0,38
63_02	64,62	30		4	1	0,38
63_03	63,62	30		5	1	0,38
63_04	65,62		30	3	1	0,38
63_05	64,62		30	4	1	0,38
63_06	63,62		30	5	1	0,38

Komercialno dostopen PE-HD s trgovskim imenom SABIC HDPE CC2056 je bil kupljen pri Sabicu v Savdski Arabiji. Komercialno dostopna vlakna miskantusa je podarilo podjetje Krilotim, Slovenija. Odpadni papir (odpadki iz proizvodnje papirja) je doniralo podjetje Papirnica Vevče, Slovenija. Komercialno dostopen PE-g-MA, kompatibilizator s trgovskim imenom Exxelor PE 1040, je bil kupljen pri podjetju ExxonMobil, Belgija. Komercialno dostopen lubrikant s trgovskim imenom Crodamide EBS-MB-(GD) je bil kupljen pri Croda v Italiji. Komercialno dostopen antioksidant s trgovskim imenom AT 10 je bil kupljen pri Amik Italia, Italija. Sestava vzorcev je prikazana v Tabeli 1.

2.2 Predelava

Vse vzorce smo najprej kompavndirali na dvopolžnem ekstruderju Labtech LTE 20-44. Premer polžev je bil 20 mm, L/D razmerje 44:1, obrati polžev 300 min^{-1}, temperature cilindra od 135 °C na vstopni coni do 160 °C na šobi. Šoba je imela dve odprtini premera 4 mm. Filamenta smo vodili preko vodne kopeli (15 °C) v granulator Scheer, kjer smo ju narezali na dolžino okoli 7 mm.

Testne epruvete smo nabrizgali na brizgalnem stroju Krauss Maffei KM 50-180 CX. Premer polža je bil 30 mm. Temperaturni profil od 145 °C (vstopna cona) do 160 °C (na šobi). Temperatura orodja je bila nastavljena na 45 °C, čas hlajenja pa 10 s. Protitlak je bil nastavljen na 195 barov, hitrost obratov pa na 175 vrt/min. Hitrost vbrizgavanja je bila nastavljena na 50 mm/s in 10 mm/s za zadnja 2 mm.

2.3 Karakterizacija

Vse laboratorijske teste smo opravili v laboratorijih na Fakulteti za tehnologijo polimerov v Slovenj Gradcu.

Natezne in upogibne teste smo izvedli na trgalnem stroju Shimadzu AG-X plus v skladu z ISO 527-1 oziroma ISO 178. Za vsak vzorec je bilo opravljenih pet meritev.

Pri nateznih testih smo določili natezni E modul (E_t), natezno trdnost (σ_m), raztezek pri natezni trdnosti (ε_m) in raztezek pri pretrgu (ε_{tb}). Pri upogibnem testu smo ovrednotili upogibni E modul (E_f), maksimalno upogibno trdnost (σ_{fM}) in raztezek pri maksimalni upogibni trdnosti (ε_{fM}).

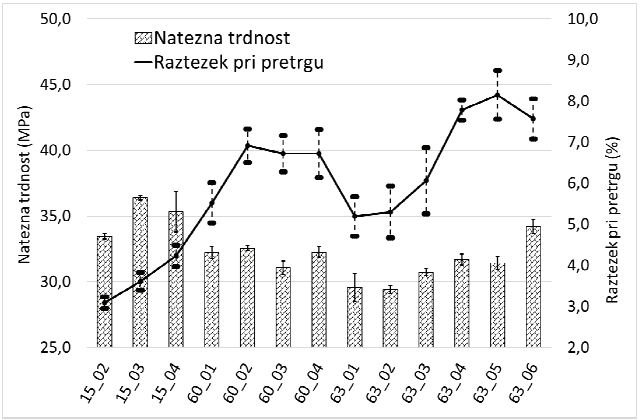
Termomehanske lastnosti smo testirali z dinamičnim mehanskim analizatorjem Perkin Elmer DMA 8000 v skladu z ASTM D5418. Vzorce smo testirali na dinamični tritočkovni upogib z dvojno prižemo, pri čemer smo jih segrevali s 2 °C/min od 25 °C do 140 °C v zračni atmosferi. Uporabljena je bila frekvenca 1 Hz in amplituda 20 μm.

Diferenčno dinamično kalorimetrijo (DSC) smo izvedli na kalorimetru Mettler Toledo DSC 2 v dušikovi atmosferi (20 ml/min). Hitrost segrevanja in ohlajanja je bila 10 °C/min. Vzorce smo segrevali od -40 °C do 180 °C, pri 180 °C je sledil izotermni segment 5 min. Potem smo jih ohlajali od 180 °C do -40 °C, kjer je sledil izotermni segment pri -40 °C 5 min. Potem so se vsi koraki še enkrat ponovili. Vrednotili smo temperaturo kristalizacije (T_c), entalpijo kristalizacije (ΔH_c), tališče (T_m) in talilno entalpijo (ΔH_m) iz ohlajanja in drugega segrevanja.

Meritve udarne žilavosti smo izvedli skladno s standardom ISO 179 na nihajnem kladivu znamke Dongguan Liyi LY-XJJD5 s 5J (udarna žilavost) in 2J (zarezna udarna žilavost). Razdalja med podporama je bila 60 mm.

3 REZULTATI IN DISKUSIJA

3.1 Mehanske lastnosti



Slika 1: Zbrani rezultati natezne trdnosti in raztezka pri pretrgu

Kot pričakovano, je dodatek miskantusa v PE-HD matrico skupaj s kompatibilizatorjem in dodatki (Tabeli 2-3, Slika 1) povečal trdnost in togost v večji meri kot dodatek odpadnega papirja. S povečanjem količine kompatibilizatorja se trdnost biokompozitov poveča za več kot 4 %, kot tudi raztezek pri pretrgu. Na samo togost biokompozitov večja količina kompatibilizatorja ni vplivala. Kompatibilizator je izboljšal medfazno interakcijo med miskantusom ali odpadnim papirjem in PE-HD matrico, vendar je za dodatek 30 m. % biomase zahtevana količina kompatibilnega sredstva najmanj 4 m. %, da se omogoči dobro omočenje celotne površine biomase. Maleinski anhidrid se med kompavndiranjem kemijsko veže na površino biomase zaradi visokega striga. Dobre interakcije med kompatibilizatorjem in površino biomase dodatno omogočajo boljšo disperzijo biomasnih delcev v PE-HD matrici. Večja količina kompatibilizatorja omogoča še boljšo vezavo biomase v PE-HD matrico, ki se kaže v višjem raztezku pri pretrgu in višji trdnosti biokompozitov. Višja togost, višja trdnost in večji raztezek pri pretrgu so dobri pokazatelji odlične kompatibilnosti biomase s PE-HD matrico, kljub temu, da površina biomase pred kompavndiranjem ni bila predhodno obdelana.

Tabela 2: Zbrani rezultati nateznih testov

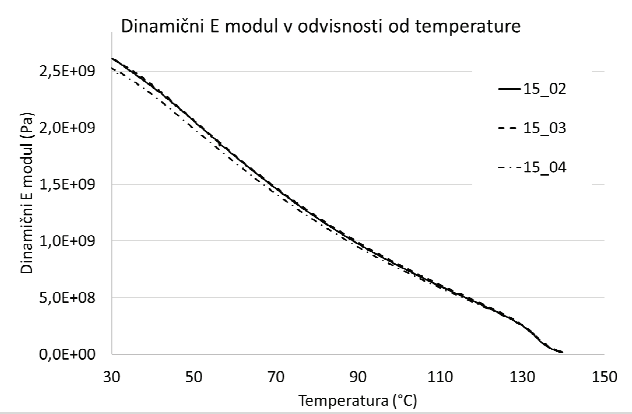
Vzorec	E_t (GPa)	σ_m (MPa)	ε_m (%)	ε_{tb} (%)
15_02	2,38	33,5	3,0	3,1
15_03	2,64	36,4	3,5	3,6
15_04	2,44	35,3	3,9	4,2
60_01	1,98	32,2	5,4	5,5
60_02	1,63	32,6	6,4	6,9
60_03	1,67	31,0	6,3	6,7
60_04	1,68	32,3	6,5	6,7
63_01	2,14	29,6	4,8	5,2
63_02	1,82	29,4	5,0	5,3
63_03	1,97	30,7	5,6	6,1
63_04	2,00	31,7	7,1	7,8
63_05	1,91	31,4	7,2	8,2
63_06	1,81	34,2	7,0	7,6

Tabela 3: Zbrani rezultati upogibnih testov

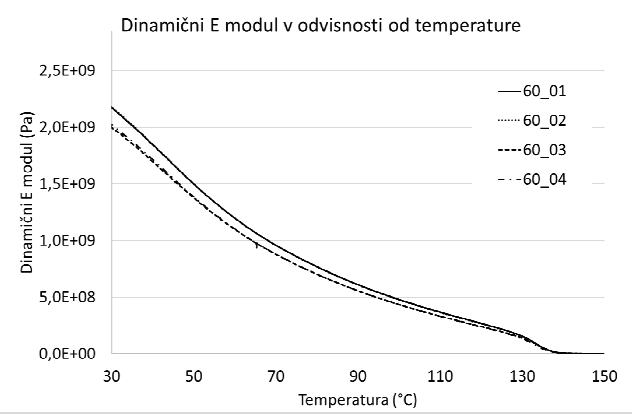
Vzorec	E_f (GPa)	σ_{fM} (MPa)	ε_{fM} (%)
15_02	2,15	39,0	5,6
15_03	2,16	40,5	6,0
15_04	2,05	38,9	6,0
60_01	1,59	30,7	6,8
60_02	1,60	31,6	6,8
60_03	1,57	30,8	6,8
60_04	1,49	30,6	6,9
63_01	1,74	33,7	6,1
63_02	1,77	34,2	6,1
63_03	1,79	35,0	6,2
63_04	1,48	30,0	6,9
63_05	1,44	29,7	6,9
63_06	1,53	31,0	6,9

3.2 Rezultati DMA meritev

Krivulje dinamičnega E modula (Slike 2-4) kažejo podobno odvisnost dinamičnega E modula od temperature. Ob začetku taljenja PE-HD matrice opazimo znatno zmanjšanje dinamičnega E modula. Količina kompatibilizatorja nima pomembnega vpliva na dinamični E modul biokompozitov. Pri biokompozitih z miskantusom je dinamični E modul višji od dinamičnega E modula biokompozitov z odpadnim papirjem, kar je v dobri korelaciji z upogibnimi in nateznimi testi. Edina izjema je vzorec 63_02, kjer je dinamični E modul nižji od sobne temperature do 70 °C, nad 70 °C pa se poveča na vrednosti ostalih biokompozitov z miskantusom.

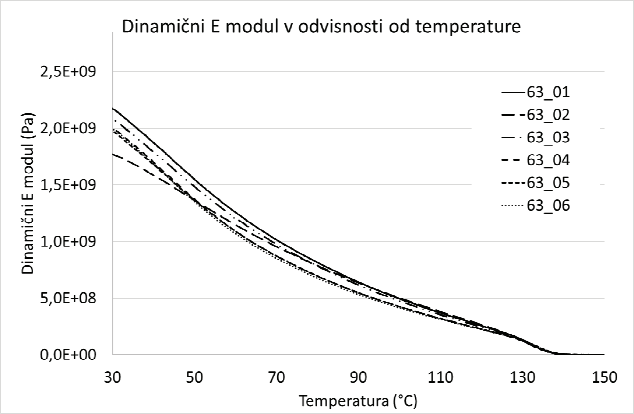


Slika 2: Zbrani rezultati dinamičnega E modula vzorcev 15_02-04



Slika 3: Zbrani rezultati dinamičnega E modula vzorcev 60_01-04

Razlog za to vedenje je lahko posledica večje velikosti delcev miskantusa, kjer je ojačitveni učinek vlaken bolj izrazit pri višjih temperaturah. Iz rezultatov je mogoče sklepati, da ima odstopanje v lastnostih biomase večji vpliv na dinamični E modul kot količina dodanega kompatibilizatorja v biokompozitih.



Slika 4: Zbrani rezultati dinamičnega E modula vzorcev 63_01-06

3.3 Toplotne lastnosti

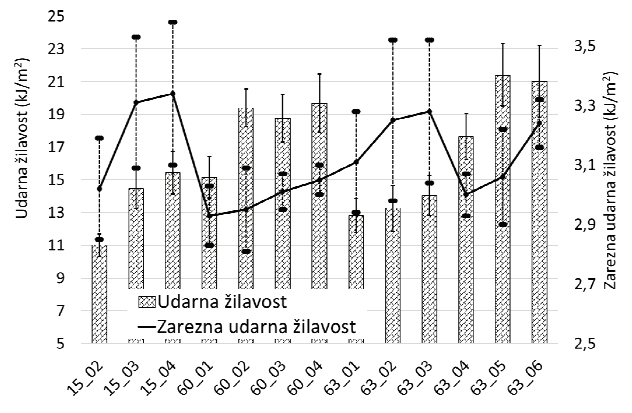
Z naraščajočo količino kompatibilizatorja je bila stopnja kristaliničnosti višja pri biokompozitih z dodatkom odpadnega papirja (Tabela 4). Pri biokompozitih z miskantusom smo opazili bimodalno obnašanje z največjimi vrednostmi pri 2 m. % in 6 m. % dodatka kompatibilizatorja ter nižje vrednosti v območju od 3 m. % do 5 m.%. Že pri rezultatih DMA je bil vpliv velikosti delcev miskantusa najverjetneje razlog za drugačno vedenje.

Tabela 4: Zbrani rezultati drugega segrevanja in ohlajanja

Vzorec	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	X_c (%)
15_02	131,1	132,4	116,5	132,1	67,8
15_03	132,1	115,9	116,6	111,2	61,2
15_04	131,6	122,2	115,9	113,6	66,6
60_01	130,9	140,4	116,9	134,5	71,9
60_02	131,0	125,9	116,9	113,9	66,5
60_03	131,2	133,0	116,7	126,9	69,2
60_04	132,2	136,1	115,9	132,8	73,0
63_01	130,2	126,4	117,1	120,7	65,7
63_02	134,4	104,3	113,6	98,9	55,1
63_03	132,4	109,1	115,0	107,8	58,5
63_04	134,9	111,5	114,3	110,0	58,0
63_05	132,3	122,7	115,9	118,0	64,8
63_06	132,1	124,4	116,3	121,9	66,7

Kristalizacijo lahko zaviramo tudi z dodatkom večjih delcev, pri čemer sterična pregrada preprečuje kristalizacijo PE-HD matrice. Na temperaturo tališča in kristalizacije količina kompatibilizatorja nima vpliva.

3.4 Žilavost vzorcev



Slika 5: Zbrani podatki žilavosti

Pri biokompozitih z odpadnim papirjem smo izmerili višje vrednosti udarne žilavosti kot pri biokompozitih z miskantusom (Slika 5). Po drugi strani pa smo pri vzorcih z miskantusom izmerili višje vrednosti zarezne udarne žilavosti. Udarna in zarezna udarna žilavost sta se povečali z vsebnostjo količine kompatibilizatorja. Iz tega lahko sklepamo, da kompatibilizator daje prednost medfazni adheziji med biomaso in PE-HD matrico. Površina biomase, prevlečene s kompatibilizatorjem, pa se povečuje z naraščajočo količino kompatibilizatorja. Odpadni papir v PE-HD matrici je izboljšal udarno žilavost v večji meri kot miskantus, saj ima po večini manjši premer delcev v primerjavi z miskantusom, kjer je velikost delcev večja. Vpliv mineralnega polnila v odpadnem papirju je povzročil zmanjšanje zarezne udarne žilavosti biokompozitov v primerjavi z biokompoziti z miskantusom zaradi lažjega širjenja razpok v biokompozitih, polnjenih z mineralnim polnilom z razmerjem stranic blizu 1.

3.5 Zabrizgavanje

Za zabrizgavanje folij na biokompozite je bilo uporabljenih več različnih materialov. Najboljšo adhezijo smo dosegli pri biokompozitih z dodatkom 5 m. % in 6 m. % kompatibilizatorja v matrico PE-HD. Teste smo opravili s tiskanimi folijami, tiskanim tekstilom in NFC čipi. Najboljšo adhezijo smo dosegli s tiskanim tekstilom in z vzorcem 15_04. Testi so pokazali, da lahko količina dodanega kompatibilizatorja, ki presega kompatibilnost biomase, prispeva k adheziji folij in biokompozitov brez potrebe po površinski obdelavi, kot v primeru ločenega koraka označevanja po brizganju izdelkov.

4 SKLEP

Raziskovalno delo je bilo osredotočeno na preučevanje vpliva količine dodanega kompatibilizatorja v biokompozitih s PE-HD matrico na adhezijo folij v tehnologiji zabrizgavanja in lastnosti brizganih izdelkov. Večja količina kompatibilizatorja nima drastičnega vpliva na togost, se pa pri tem poveča trdnost in raztezek pri pretrgu. Dobra medfazna adhezija med biomaso in PE-HD matrico je bila nadalje potrjena s premikom modula izgub na višjo temperaturo ter naraščajočo udarno in zarezno udarno žilavostjo z naraščajočo količino kompatibilizatorja v biokompozitih. Največji vpliv na lastnosti biokompozitov je imela velikost delcev biomase. Večje velikosti delcev so zmanjšale togost, dinamični E modul, udarno žilavost in kristaliničnost. Z miskantusom smo dosegli večje izboljšanje mehanskih lastnosti v primerjavi z odpadnim papirjem. Razlog za to je verjetno v visoki vsebnosti anorganskega polnila v odpadnem papirju, kar pa je obenem povzročilo tudi zmanjšanje zarezne udarne žilavosti. Boljšo adhezijo folije smo dobili, če je bilo dodanih vsaj 5 m. % kompatibilnega sredstva, medtem ko dodana biomasa na adhezijo ni imela vpliva. Dokazali smo, da je postopek označevanja v enem koraku izvedljiv s pravo količino dodanega kompatibilizatorja v biokompozitih. Zato je uporaben tudi za aplikacije embalaže, saj se je mogoče izogniti dodatnim proizvodnim korakom, kot sta čiščenje in aktiviranje površine pred označevanjem, ki povzročita dodatne stroške in porabo časa.

V nadaljnjih raziskavah bi bilo smiselno preveriti, kakšna je povezava med količino dodanega kompatibilizatorja in izbiro materiala zabrizgane folije.

Viri:

[1] Hannay, F., Joong, P., Chang, Y., Han, D.: Rigid Plastics Packaging - Materials, Processes and Applications. *Item 1 Macromolecules* (2002), 13(7).
[2] Susan, S. E., John, C. D.: Selke, Culter Plastics Packaging. *Plastics Packaging: Properties, Processing, Applications, and Regulations* (2016).
[3] Crutchley, E.*:* Innovation Trends in Plastics Decoration and Surface Treatment Decorative Effects on Moulded Plastics (E. Crutchley (ed.)). *Smithers Rapa Technology* (2014).
[4] Chen, S. C., Li, H. M., Huang, S. T., Wang, Y. C.: Effect of decoration film on mold surface temperature during in-mold decoration injection molding process. *International Communications in Heat and Mass Transfer* (2010), 37(5), str. 501–505.
[5] Barczewski, M., Matykiewicz, D., Piasecki, A., Szostak, M.: Polyethylene green composites modified with post agricultural waste filler: thermo-mechanical and damping properties. *Composite Interfaces* (2018), 25(4), str. 287–299.
[6] Gao, H., Xie, Y., Ou, R., Wang, Q.: Grafting effects of polypropylene/polyethylene blends with maleic anhydride on the properties of the resulting wood-plastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* (2012), 43(1), str. 150–157.
[7] Garcia-Garcia, D., Carbonell-Verdu, A., Jordá-Vilaplana, A., Balart, R., Garcia-Sanoguera, D.: Development and characterization of green composites from bio-based polyethylene and peanut shell. *Journal of Applied Polymer Science* (2016), 133(37), str. 12–17.
[8] Husseinsyah, S., Azmin, A. N., Ismail, H.: Effect of Maleic Anhydride-Grafted-polyethylene (MAPE) and Silane on Properties of Recycled Polyethylene/Chitosan Biocomposites. *Polymer - Plastics Technology and Engineering* (2013), 52(2), str. 168–174.
[9] Nugent, P.: Rotational Molding. *Handbook of Plastic Processes* (2005), str. 387–453.
[10] Petchwattana, N., Covavisaruch, S., Chanakul, S.: Mechanical properties, thermal degradation and natural weathering of high density polyethylene/rice hull composites compatibilized with maleic anhydride grafted polyethylene. *Journal of Polymer Research (2012),* 19(7).
[11] Rahman, M. R., Rahman, M. M., Hamdan, S., & Lai, J. C. H. Impact of maleic anhydride, nanoclay, and silica on jute fiber-reinforced polyethylene biocomposites. *BioResources* (2016), 11(3), str. 5905–5917.
[12] Roumeli, E., Terzopoulou, Z., Pavlidou, E., Chrissafis, K., Papadopoulou, E., Athanasiadou, E., Triantafyllidis, K., Bikiaris, D. N.: Effect of maleic anhydride on the mechanical and thermal properties of hemp/high-density polyethylene green composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* (2015) 121(1), str. 93–105.

ODABIR ADITIVNE TEHNOLOGIJE ZA IZRADU POLIMERNIH DIJELOVA

Amir ŠEĆERKADIĆ, dipl. ing.
IZIT d.o.o.

SAŽETAK

Aditivne tehnologije ili tehnologije aditivne proizvodnje, kolokvijalno zvane 3D printanje, obuhvaćaju više procesa izrade, s time da im je zajedničko to da izradu vrše po slojevima, dodavanjem materijala. Svaka od tehnologija aditivne proizvodnje ima svoje prednosti i mane te je time svaka optimalna za neke zadatke, dok je manjkava za neke druge. Osvrt koji slijedi napravljen je na osnovu karakteristika opreme industrijske klase.

1. UVOD

Aditivne tehnologije ili tehnologije aditivne proizvodnje, kolokvijalno zvane 3D printanje, obuhvaćaju više procesa izrade, s time da im je zajedničko to da izradu vrše po slojevima, dodavanjem materijala. Svaka od tehnologija aditivne proizvodnje ima svoje prednosti i mane te je time svaka optimalna za neke zadatke, dok je manjkava za neke druge. Osvrt koji slijedi napravljen je na osnovu karakteristika opreme industrijske klase.

Kako bi se moglo na sistematičan način pristupiti odabiru optimalne tehnologije za pojedine namjene, najbolje je krenuti od karakteristika konačne izrađevine.

Izrađevinu možemo promatrati kroz slijedeće karakteristike:

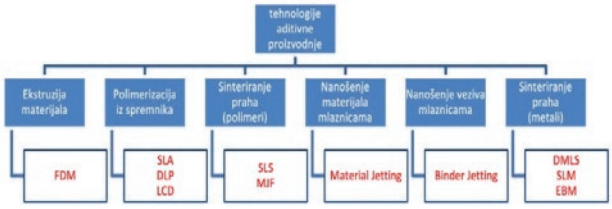
- Mehanička svojstva
- Otpornost na kemikalije
- Korištenje u namjenama gdje je potrebna certifikacija
- Vizualne karakteristike
- Veličina
- Točnost izrade

Prve tri navedene karakteristike izrađevine su vezane uz materijal koji je moguće koristiti u procesu gradnje dok su druge vezane uz svojstva izrađevine koja određena tehnologija može postići, pa ćemo prema tim kriterijima razraditi nastavak dokumenta.

2. ODABIR ADITIVNE PROIZVODNJE PREMA MATERIJALU

Današnje tehnologije aditivne proizvodnje omogućuju izradu dijelova iz više osnovnih grupa materijala:

- Polimeri
- Metali
- Ostali materijali – keramika, pijesak

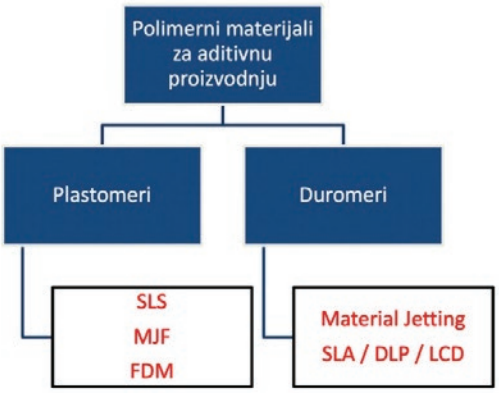


Slika 1. Podjela tehnologija 3D printanja polimera

U nastavku ovog osvrta ćemo se koncentrirati na aditivnu proizvodnju dijelova iz polimera. Polimeri od kojih je moguće vršiti izradu dijelova dijele se na dvije osnovne grupe:

- Plastomeri
- Duromeri

Tehnologije aditivne proizvodnje polimernih materijala mogu se u grubo podijeliti na slijedeći način:



Slika 2. Podjela tehnologija 3D printanja polimera po materijalima

3. PLASTOMERI

Plastomeri su polimerni materijali, koji pri zagrijavanju do temperature mekšanja ili taljenja ne mijenjaju kemijsku strukturu, nego samo agregatno stanje te ih je time moguće koristiti više puta. Plastomeri su najpogodniji za funkcionalne aplikacije, koje uključuju proizvodnju funkcionalnih prototipova i funkcionalnih dijelova za konačnu upotrebu. Imaju vrlo dobra mehanička svojstva, visoku otpornost na udar, habanje i kemijske utjecaje. U novije vrijeme, za aditivnu proizvodnju se mogu koristiti i kompozitni plastomeri, koji sadrže vlakna za učvršćivanje (npr. ugljična vlakna, staklena vlakna i sl.) čime se značajno poboljšavaju svojsta osnovnog materijala. Tzv. inženjerska klasa plastomernih materijala se u današnje vrijeme vrlo široko primjenjuje u industriji.

SLS i *MJF* tehnologije koriste materijal u praškastom stanju, dok *FDM* koristi materijal u obliku žice namotane na kolute. Načelno, *SLS* i *MJF* tehnologije izrađuju dijelove sa višim nivoom detalja i tanjih stijenki, dok *FDM* ima znatno veći raspon raspoloživih materijala, ekonomičniji je i u nekim slučajevima može izrađivati točnije i preciznije velike dijelove, gdje ostale tehnologije gube točnost i preciznost radi zaostalih termičkih naprezanja u izrađevinama.

MJF tehnologija je relativno nova, u zadnje vrijeme se pojavila mogućnost izrade dijelova u boji, aplikacijom veziva u boji, no ta je primjena još uvijek u začecima, radi više tehnoloških izazova, koji rezultiraju ograničenim gamutom boja i slabijim mehaničkim svojstvima izrađevina.

Dostupne obitelji plastomera za primjenu na SLS i MJF tehnologijama:	Dostupne obitelji plastomera za primjenu na FDM tehnologijama:
• PA • TPU / TPE • Izvedenice dobivene miješanjem s drugim materijalima (npr. PA miješan sa aluminijskim prahom ili PA miješan sa staklenim kuglicama) Kod industrijske klase opreme, postoje materijali sa nekim od nivoa biokompatibilnosti. Neki od proizvođača SLS opreme imaju certifikate za primjenu u transportnoj industriji.	• PLA • ABS • ASA • PC-ABS • TPU • PETG • PA • PC • PP • PPE • PPSF/PPSU • PEEK • PEKK • PEI (ULTEM) • Razni topivi plastomeri koji se koriste kao potporni materijal ili kao materijal za izradu topivih alata (tzv. Sacrificial Tooling) Kod industrijske klase opreme, postoje materijali sa nekim od nivoa biokompatibilnosti. Industrijska klasa opreme može omogućiti i slijedivost materijala radi certifikacija različitih primjena u medicini, prehrambenoj industriji, avio-industriji, transportnoj industriji itd. Širina dostupnih polimera širi razinu upotrebe tehnologije.

Tablica 1. Dostupne obitelji plastomera za različite tehnologije aditivne proizvodnje

4. DUROMERI

Druga grupa polimera zastupljena u tehnologijama aditivne proizvodnje su duromeri. Za razliku od plastomera, duromere se ne može koristiti više puta izmjenom njihovog agregatnog stanja. U pravilu, pri proizvodnji aditivnim tehnologijama duromeri se dobivaju polimerizacijom smola pomoću nekog izvora svijetla. Izvor svijetla može biti laserska zraka, lampa ili dioda, a materijal se može nalaziti u spremniku za gradnju ili se može dovoditi putem nanošenja glavom za print. Prema tome se vrše i podjele ovakvih tehnologija.

SLA, *DLP* i *LCD* tehnologije drže materijal u spremnicima u tekućem stanju, te osvjetljavaju zonu sloja gradnje pomoću različitih izvora svijetla. *SLA* koristi lasersku zraku a *DLP/LCD* svijetlo određene valne duljine. *SLA*, *DLP* i *LCD* tehnologije su gotovo istovjetne kada se izuzme izvor svijetla, pa ih je moguće zbirno promatrati. *Material Jetting* tehnologije dovode materijal zatvorenim sustavom do glava za print, koje nanose materijal na sloj gradnje i smjesta ga polimeriziraju.

Duromeri su kao materijali bolje pogodni za primjene gdje je estetika izrađevina jedan od ključnih faktora, jer su tehnologije koje ih koriste u mogućnosti izraditi dijelove gotovo glatkih površina koje izgledom i nivoom detalja simuliraju završnu obradu izrađevina napravljenih na klasični način. Općenito govoreći, duromeri su krući i krhkiji od plastomera, tako da imaju ograničenu upotrebljivost pri funkcionalnim primjenama. Kako se radi o materijalima osjetljivim na svijetlo, izrađevine pokazuju izražene znakove starenja, pogotovo ako su izložene vanjskom svijetlu.

Tehnologije *Material Jetting* i *SLA/DLP/LCD* mogu izraditi usporedivo precizne i fine izrađevine te koriste vrlo slične materijale (*Material Jetting* u industrijskoj primjeni ima nešto manje/finije debljine sloja). Jedna od prednosti *Material Jetting* tehnologija je mogućnost korištenja više materijala u isto vrijeme, čime se omogućuje izrada izrađevina koje imaju različita mehanička i estetska svojstva unutar volumena (tzv. Multi-Material 3D Print). Ova mogućnost dopušta izradu dijelova od digitalnih kompozita (izrađevina koje unutar volumena imaju ciljano položene zone materijala različitih svojstava) i dijelova u raznim bojama. Prednost *SLA/DLP/LCD* grupe tehnologija u odnosu na *Material Jetting* je veličina radnog volumena, mada uvjetno rečeno, jer postoje neki *Material Jetting* strojevi koji imaju iznimno velike radne volumene.

Kako *SLA/DLP/LCD* tehnologije koriste samo jednu smolu od koje gradi, a izrađevinu je potrebno učvrstiti u kontaktu sa radnom plohom (najčešće pod kutem, radi površinske napetosti tekućine), učvršćenje se radi „stupićima“ od istog materijala kao što je i izrađevina. Za planiranje gradnje potrebno je da operater ima iskustva s organizacijom potpornog materijala, s obzirom da krivo planirani potporni materijal najčešće rezultira neuspjelom gradnjom, čime se gubi vrijeme i materijal. Izrađevinu je nakon gradnje potrebno čistiti od ostataka materijala u tekućem stanju (vrlo bitan korak radi dimenzionalne točnosti), dovršiti postupak polimerizacije u stanici za post-curing, te mehanički ukloniti potpore.

Kod *Material Jetting* tehnologija izrađevinu se mora očistiti od potpornog materijala. Ovisno o tehnologiji, čišćenje se radi u peći za otapanje potpornog materijala, pomoću jedinice za čišćenje vodenim mlazom ili otapanjem potpornog materijala u otopini.

Dostupni duromeri:

- Standarni materijali
- Materijali koji mehaničkim svojstvima simuliraju ABS plastomer
- Materijali s povišenom žilavosti, koji simuliraju PP plastomer
- Prozirni materijali
- Elastični materijali
- Materijali s povećanom otpornošću na temperaturu

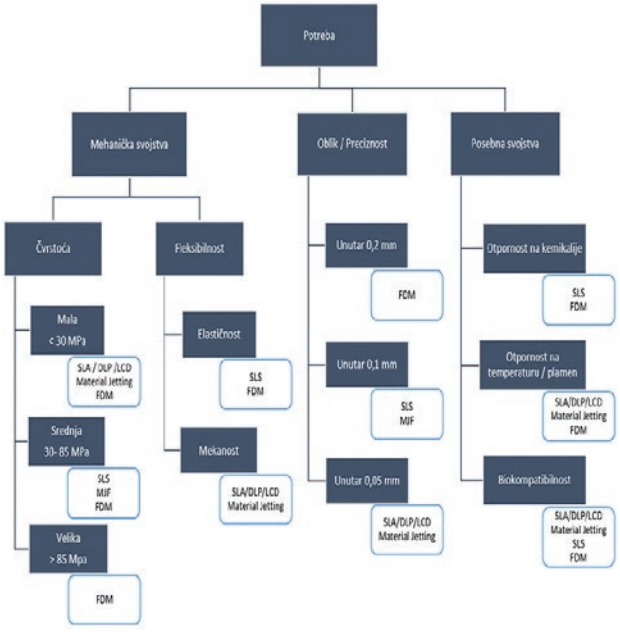
Kod industrijske klase opreme, postoje materijali sa nekim od nivoa biokompatibilnosti. Načelno, ove su tehnologije vrlo primjenjive u

stomatologiji i medicini, te se u tome smjeru razvija dosta materijala.

Material Jetting tehnologija, radi mogućnosti kombiniranja materijala, može proizvesti razne kombinacije, pa se time broj materijala značajno povećava, no uvijek unutar grupe duromera.

5. ODABIR TEHNOLOGIJE PREMA SVOJSTVIMA IZRAĐEVINE

Prilikom odabira tehnologije za aditivnu proizvodnju, treba imati na umu je li za izrađevinu važnija funkcija ili izgled. Općenito govoreći, plastomeri su povoljniji materijal za izradu funkcionalnih dijelova, dok su duromeri povoljniji za vizualni dojam izrađevine. Naravno, postoji i još kriterija kojima se može pristupiti ovoj problematici.



Slika 3. Podjela tehnologija prema očekivanim svojstvima izrađevine

Komentari i detalji:

- Prilikom odabira tehnologije u smislu točnosti, treba voditi računa o stvarnim potrebama za tijesnim tolerancijama. Općenito govoreći, najčešće vrijedi što točnije to skuplje. Dijelove izrađene aditivnim tehnologijama može se doraditi na klasični način u zonama gdje se traži velika preciznost, npr. kako se i odljevci strojno dorađuju. Primjerice, moguće je narezati navoje, proširiti rupe na mjeru, poravnati dosjedne plohe i sl.
- Jedna od ključnih karakteristika svake tehnologije gradnje, ukoliko se želi primjenjivati u industriji je ponovljivost. O tome ćemo napraviti osvrt u jednom od budućih članaka.
- Čvrstoća izrađevine ovisi o geometriji i mahaničkim svojstvima materijala. Da bi se olakšao izbor tehnologije, može se poslužiti tablicama čvrstoće materijala. Kod visokih zahtjeva za čvrsoćom, u posljednje je vrijeme trend da se koristi *FDM* tehnologija i materijali s ojačalima, npr. ugljičnim vlaknima. Ovakve izrađevine se svojim mehaničkim svojstvima približavaju metalnim dijelovima, uz vrlo malu težinu.
- Ukoliko se traže neka posebna svojstva izrađevine, potrebno je pogledati koje tehnologije mogu odgovoriti na koji posebni zahtjev.
- Za meke materijale, potrebno je znati traži li se visoka elastičnost (mogućnost produljenja) ili mekanost materijala, pošto ova razlika može implicirati različite tehnologije. Primjerice, materijal TPU ima izvanredna elastična svojstva a može ga se graditi pomoću *FDM* i *SLS* tehnologija, dok materijale različitih mekanosti mogu raditi *Material Jetting* i *SLA/DLP/LCD* tehnologije, s time da *Material Jetting*, radi mogućnosti multi-material 3D printa, može simulirati gotovo sve Shore vrijednosti materijala.

5.1 ODABIR PREMA VIZUALNOM DOJMU

Kada je glavno svojstvo izrađevine izgled izrađevine, možemo koristiti slijedeću podjelu:

5.1.1. Ako trebamo glatku površinu izrađevine

- *SLA/DLP/LCD* - S napomenom da će se u zoni potpornih „stupića“ poznati tragovi.
- *Material Jetting*

5.1.2. Ako trebamo prozirnu izrađevinu

- *SLA/DLP/LCD* - s napomenom da će se u zoni potpornih „stupića“ poznati tragovi.
- *Material Jetting*

5.1.3. Ako trebamo aplicirati teksturu na izrađevinu

- *SLA/DLP/LCD*
- *Material Jetting*
- Uvjetno *FDM, SLS* i *MJF* - aplikacija teksture vizualno skriva slojnice i zrnatost na izrađevini i moguće je dobiti vrlo dobre rezultate u smjeru gradnje. Moguće je vrlo dobro simulirati teksturirane gumene dijelove.

5.1.4. Izrađevina u više boja

- *Material Jetting* - Najbolja tehnologija za aditivnu proizvodnju u boji, postoje i strojevi s kalibriranim bojama (po PANTONE skali), čime se omogućuje dobivanje predvidljivih rezultata. Boju se može kombinirati s prozirnim i/ili mekim materijalima.
- *MJF* - Nova tehnologija za izradu predmeta u boji. Jedan od glavnih izazova je taj što osnovni materijal ne može biti sasvim bijel, radi apsorpcije energije za sinteriranje, što rezultira zagasitim izrađevinama (ne mogu se dobiti jarke boje). U usporedbi sa izrađevinama samo jedne boje (siva), dijelovi izrađivani u boji imaju znatno lošija mehanička svojstva.
- *FDM* - Ograničeno da možemo mijenjati boje samo po slojevima.

Komentari i detalji:

- I *SLA/DLP/LCD* i *Material Jetting* tehnologije mogu izraditi dijelove sa glatkim površinama, sličnim onima kakve je moguće dobiti injekcijskim brizganjem. Osnovna razlika između tehnologija je ta da *Material Jetting* tehnologije koriste drugačiji potporni materijal, koji je topiv ili periv, dok *SLA/DLP/LCD* koristi potpore od istog materijala koje se moraju fizički uklanjati nakon izrade. Potpore ostavljaju tragove na površini, te je površinu potrebno naknadno obrađivati da bi se ti tragovi umanjili ili uklonili. Osim toga, *Material Jetting* može kombinacijom materijala (Multi-Material 3D Print) postići značajno veći raspon svojstava izrađevine.
- *Material Jetting* može izraditi potpuno prozirne izrađevine, dok su *SLA/DLP/LCD* djelomično prozirne, a može ih se dovesti u prozirno stanje naknadnom obradom.
- *Material Jetting* i *MJF* tehnologije su jedine koje trenutno mogu ponuditi višebojnu izradu. *Material Jetting* ima bolja svojstva u tome smislu, može postići puno veći gamut boja na kontroliran i kalibriran način (kalibracija po PANTONE), a osim toga može boju kombinirati s različitim mehaničkim svojstvima izrađevine.
- Tehnologije koje rade izradu od plastomera imaju slijedeće vizualne karakteristike:
  - *FDM* – radi dijelove koji imaju vidljive slojnice polaganja materijala. Slojnice su u ovisnosti o odabranoj debljini sloja izrade. Slojnice su vidljivije na sjajnim polimernim materijalima, a manje vidljive na mat polimernim materijalima. Dijelovi su jednobojni (osim mogućnosti izmjene boje po slojevima), za određeni broj materijala postoji širok izbor boja na raspolaganju.
  - *SLS* – radi izrađevine koji imaju površinu sličnu finom brusnom papiru. Slojnice su vidljive, ali u manjoj mjeri (ovisno o odabranoj debljini sloja). Za najveći dio materijala vrijedi da je izrađevina bijele boje (osim za materijale miješane s aluminijskim prahom ili ugljičnim kuglicama i sl.). Izrađevine su izrazito hidroskopne, što omogućuje da se vrlo kvalitetno bojaju u bilo koju nijansu boje, no to zahtijeva dodatnu opremu.
  - *MJF* – radi izrađevine koji imaju površinu sličnu finom brusnom papiru. Slojnice su vidljive, ali u manjoj mjeri (ovisno o odabranoj debljini sloja). Oprema najčešće radi sive dijelove. Bijela je boja za ovu tehnologiju problem, jer je radi apsorpcije dovoljne količine energije potrebne za sinteriranje potrebna tamnija nijansa, tako da je izrađevina kod velike industrijske opreme siva. Postoje

novi manji modeli strojeva koji rade sa bojom blizu bijele, pa mogu nanošenjem veziva u boji raditi izrađevine u boji.

5.2 ODABIR PREMA SVOJSTVIMA PROCESA GRADNJE

Ako je izrađevina već poznata, često se tehnologija aditivne proizvodnje može odabrati prema svojstvima procesa gradnje. Slijede glavna svojstva procesa gradnje:

- Točnost
- Veličina radne komore
- Vrsta i priroda potpornog materijala

Tehnologija	**Točnost**	**Veličina radne komore**	**Vrsta i priroda potpornog materijala**
FDM	± 0,089 mm ili ± 0,0015 mm/mm (najviše ± 0,2 mm za velike izrađevine)	Do 900 x 600 x 900 mm	Zasebni potporni materijal koji se uklanja mehaničkim putem ili otapanjem. Potporni materijal se koristi u minimalnoj količini i nije svugdje potreban.
SLA/DLP/LCD	± 0.15% (donja granica: ± 0.05 mm)	Do 1500 x 750 x 500 mm	Koristi se gradivi materijal za gradnju potpora za izrađevinu. Uvijek je potreban.
SLS	± 0.3% (donja granica: ± 0.2 mm)	Do 750 x 550 x 550 mm	Nije potreban, izrađevinu podupire nesinteriran i prah.
Material Jetting	± 0.1% (donja granica: ± 0.05 mm)	Do 1000 x 800 x 500 mm	Zasebni potporni materijal koji se uklanja mehaničkim putem ili otapanjem. Uvijek je potreban.
MJF	± 0.3% (donja granica: ± 0.2 mm)	Do 380 x 285 x 380 mm	Nije potreban, izrađevinu podupire nesinteriran i prah.

Tablica 2. High – end industrijska klasa opreme

5.2 DEBLJINA SLOJA IZRADE

Jedna od važnih karakteristika svake tehnologije aditivne proizvodnje je debljina sloja izrade. Zbog prirode aditivnih tehnologija, koje dodaju materijal sloj po sloj, debljina slojeva određuje glatkoću izrađevine i najmanju veličinu detalja koji tehnologije može proizvesti (u Z smjeru). Korištenje manje debljine sloja smanjuje efekt „nazubljenosti“ i pomaže pri izradi točnih zakrivljenih ploha.

S druge strane, debljina sloja je u direktnoj funkcijskoj ovisnosti sa brzinom gradnje, tako da tehnologije koje omogućuju obabir debljine sloja (a pogotovo u većem rasponu), imaju značajno veću fleskibilnost od onih koje to ne nude, jer je pri aplikacijama s nižim zahtjevom za estetikom brzina gradnje jedan od ključnih faktora koji definiraju brzinu a time i cijenu izrađevine.

Tehnologija	Tipične debljine sloja
FDM	100 – 500 μm
SLA/DLP/LCD	25 – 100 μm

SLS	60 – 120 μm
Material Jetting	14 – 36 μm
MJF	70 – 100 μm

Tablica 3. Debljine slojeva gradnje

Vidljivo je da je raspon debljina sloja najveći kod *FDM* tehnologije, što tu tehnologiju čini vrlo fleksibilnom na način da može kontrolirati željeni nivo estetike/detalja i brzinu (efikasnost) gradnje.

Komentari i detalji:

Gotovo sve aditivne tehnologije, radi prirode gradnje izrađevina sloj po sloj, imaju različita svojstva u smjeru gradnje od onih u smjeru slojeva. To se naziva svojstvom neizotropnosti, koje je različito za sve tehnologije. *FDM* tehnologija ima najizraženije svojstvo neizotropnosti, pa je prilikom korištenja potrebno voditi računa o orijentaciji izrađevine u odnosu na funkciju i smjer gradnje.

6. ODABIR TEHNOLOGIJE PREMA OSTALIM PARAMETRIMA

6.1 ASPEKT FLEKSIBILNOSTI TEHNOLOGIJE

Različite tehnologije imaju različite spektre mogućnosti koji direktno utječu na fleksibilnost njihovog korištenja.

Tehnologije koje za materijal koriste prah (*SLS, MJF*) prilikom rada moraju cjelokupnu komoru za gradnju popuniti prahom, sve do visine najvišljeg elementa geometrije izrađevine. U slučaju da se mora izraditi samo jedan mali komad unutar radnog volumena, cijeli prazan prostor volumena potrebno je popuniti prahom. Neiskorišteni prah izložen je različitim utjecajima: od oksidacije i izloženosti vlazi u kontaktu sa okolnim zrakom do temperature unutar radne komore stroja. Prah je u pravilu vrlo fine granulacije, što ga čini osjetljivijim od plastomera u nekom voluminoznijem obliku. Samim time, određeni postotak neiskorištenog praha se ne može ponovo koristiti. Količina tog praha ovisi i o frekvenciji korištenja stroja: za strojeve koji koriste praškasti materijal najbolje je da su stalno u upotrebi.

Kod *MJF* i *Material Jetting* tehnologija treba uzeti u obzir i vezivo (Binder) ili materijal koji je unutar cijevi u stroju. Nije uputno da stroj dulje vrijeme stoji van upotrebe, na način da vezivo ili materijal stoji unutar instalacija stroja, jer postoji opasnost od začepljenja instalacija, što može biti povezano sa značajnim troškovima pa i ozbiljnim kvarovima opreme. Ako stroj nema posla, potrebno je isprazniti svu instalaciju stroja i napuniti je tekućinom za konzerviranje. Neiskorišteni materijal iz instalacije mora se zbrinjavati (bacati). U ovisnosti o veličini stroja, količina materijala u instalacijama kreće se u rasponu od 150 – 400 g.

Kod *SLA/DLP/LCD* tehnologije gradnja se vrši u otvorenim spremnicima s materijalom u nepolimeriziranom stanju koji je izložen okolini. Čim se materijal iz boce ulije u spremnik, počinju kemijski procesi unutar materijala koji mijenjaju njegova svojstva. Materijal koji je jednom izložen atmosferi i svjetlu potrebno je potrošiti u relativno kratkom vremenu, u protivnom ga se mora zbrinuti (baciti). Drugim riječima, ukoliko je frekvencija korištenja opreme niska, biti će potrebno zbrinjavati (bacati) veću količinu nepolimerizirane smole, što predstavlja značajan financijski trošak. U ovisnosti o veličini stroja, količina materijala izložena atmosferi može se kretati i do nekoliko desetaka kilograma. Radi otvorenog spremnika s materijalom, potrebno je štititi nepolimerizirani materijal od moguće kontaminacije, npr. prašinom).

Kod *FDM* tehnologije, gradnju je moguće vršiti samo u maloj zoni građevnog volumena, bez obzira što cjelokupni radni volumen može biti velik. Osim toga, kako je materijal u obliku ekstrudirane žice, njegova je trajnost daleko najdulja upravo kod *FDM* tehnologije. Profesionalna klasa opreme dodatno štiti materijal na način da ga drži u specijalnim kazetama sa sustavima za odvlaživanje.

Još jedan od aspekata fleksbilnosti neke tehnologije je mogućnost korištenja različitih materijala, u ovisnosti o namjeni izrađevine. Ovdje *FDM* ima značajnu prednost pred ostalim tehnologijama, jer omogućuje izradu dijelova iz velikog broja različitih plastomera realnih industrijskih svojstava.

6.2 ASPEKT DODATNIH TROŠKOVA VEZANIH UZ SIGURNOST

Tehnologije koje koriste praškaste materijale (*SLS, MJF*) su u pravilu izložene riziku od stvaranja eksplozivne atmosfere unutar prostorije gdje se vrši gradnja i manipulacija izrađevina. To znači da je za takvu opremu potrebno predvidjeti prostor sa ex-proof instalacijama i sustavom ventilacije koji osigurava rad na siguran način. Sva dodatna oprema vezana uz ovakve strojeve trebala bi biti u ex-proof izvedbi, što komplicira i poskupljuje rad.

Kod korištenja praškastih materijala, postoji zdrastveni rizik radi mogućnosti udisanja plastične prašine, te je potrebno poduzeti mjere zaštite osoblja u vidu zaštitne odjeće i sredstava za zaštitu respiratornog (dišnog) sustava operatera.

SLA, DLP i LCD tehnologije je potrebno dobro kontrolirati, radi zdravstvenih rizika. Kako se izrada vrši u otvorenim spremnicima, postoji izloženost operatera nepolimeriziranim smolama, koje su vrlo otrovne. Također, treba štititi osoblje od udisanja isparenja smola.

6.3 ASPEKT ODRŽAVANJA

Prilikom korištenja *SLS* i *MJF* tehnologija, prah se u pravilu tijekom eksploatacije kroz vrijeme nakuplja svugdje te ga je potrebno redovito čistiti, kao i štititi svu opremu u okolini od negativnog utjecaja nataložene polimerne prašine.

Kada govorimo o održavanju opreme industrijske klase, *FDM* ima najviše poveznica sa strojevima klasičnih i provjerenih tehnologija, te je njegovo redovito održavanje lakše i jeftinije.

6.4 ASPEKT PODRŠKE

Za rad s bilo kojom tehnologijom koja spada u profesionalnu industrijsku klasu, vrlo je bitno imati što bolji nivo podrške pri radu, kao i servisne podrške.

Podrška pri radu uključuje mogućnost da operater iz centra može kontaktirati podršku koja ima iskustva s korištenjem iste klase opreme i dati mu savjet kako rješavati pojedine probleme pri svakodnevnom radu.

Servisna podrška na lokalnom nivou je također vrlo važna, radi vremena odaziva ali pogotovo radi cijene. Ako se industrijska oprema nabavlja od dobavljača iz zapadne Europe ili direktno od proizvođača, svaki izlazak servisera na teren je vezan uz velike troškove, što puta a što visokih dnevnica. Lokalna servisna podrška omogućuje optimalno održavanje opreme uz bolje cijene.

7. ZAKLJUČAK

Svaka aktualna tehnologija aditivne proizvodnje ima svoje mjesto u nekoj primjeni. Prilikom nabavke opreme potrebno je razmisliti o tome kakva će biti konfiguracija zadataka koji će se postavljati pred opremu. Osim toga, neke su tehnologije prikladnije za primjenu tamo gdje se očekuje veća frekvencija posla, pa samim time otvara i mogućnost optimizacije procesa gradnje i neprekinuto korištenje opreme. Kako biste odabrali optimalnu opremu, naša je preporuka da se obratite stručnjacima koji će vam pomoći analizirati vaše potrebe i upotrijebiti neku od metodologija za kvalitetan odabir tehnologije i opreme.

RAZVOJ IZDELKA Z INTEGRIRANIM SENZORJEM S TEHNOLOGIJO 3D TISKA

Matic VOGRIN, Simon ERBAN
MARSi Group d.o.o.

IZVLEČEK

Prispevek obravnava razvoj in izdelavo sodobnih izdelkov z integriranimi senzorji, ki so izdelani s pomočjo tehnologije »Neposrednega laserskega sintranja kovin - DMLS«. Omenjena tehnologija »3D tiska« se vedno pogosteje uporablja za izdelavo visoko kakovostnih kovinskih delov v različnih industrijah. V okviru projekta, ki ga izvajamo v našem podjetju želimo razviti komponente tj. posamezne »pametne« orodne dele, ki nam bodo v pomoč pri boljšem nadzoru injekcijskega brizganja plastike s tako imenovano tehnologijo »Build-In Sensors«. Izdelava izdelka po slojih s tehnologijo DMLS, ki zagotavlja mikrotaljenje prahu, v teoriji omogoča vgradnjo diskretnih senzorjev in žic v kovinski material. Vendar pa je ta postopek izdelave zaradi številnih težav, povezanih s procesom, zelo zahteven. V tem prispevku bomo predstavili proces integracije temperaturnega senzorja v vzorec Maraging jekla MS1 izdelanega s postopkom DMLS. V končnem izdelku je senzor v celoti zaprt v kovinskem materialu s popolno zaščito pred zunanjimi vplivi in poškodbami.

1 UVOD

Tehnologija 3D tiska omogoča oblikovalcem svobodo pri razvoju in dizajniranju sodobnih pametnih izdelkov. Pametne izdelke je mogoče opredeliti kot elemente, ki se odzivajo, prilagajajo in/ali komunicirajo. Takšne naloge se lahko izvajajo z vgrajenimi napravami ali senzorji v izdelkih ali posameznih delih.

Integracija senzorjev v kovinske dele je zanimiva za številne aplikacije na različnih industrijskih področjih, na primer v našem primeru v orodjih za brizganje plastike za spremljanje temperature in tlaka v orodni votlini.

Tradicionalne metode za vgradnjo senzorjev v kovinske dele so z vrtanjem lukenj oz. rezkanjem, z uporabo držal/ohišij, z neposredno namestitvijo, z lepljenjem na površine ali z drugimi podobnimi postopki.

V strokovni literaturi je zaslediti primer vgradnje senzorja v beton [1,2], drugi primer pa je piezoelektrični pretvornik, ki je bil integriran v aluminij [3,4]. Optična vlakna so bila na primer integrirana v polimere s selektivnim laserskim sintranjem (SLS) [5]. Senzorji tlaka so bili inkapsulirani v polimerne jeklenke, zgrajene s stereolitografijo (SLA) [6] za spremljanje pretokov tekočine.

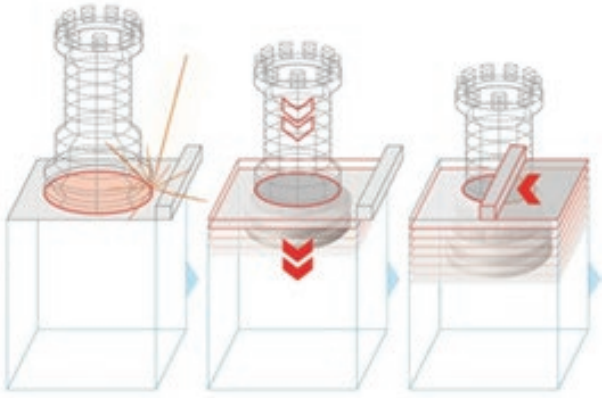
Z razvojem procesov aditivne proizvodnje se odpirajo nove možnosti za inovativne postopke integracije senzorjev, predvsem pri postopkih z nanašanjem kovinskega prahu po slojih, kot je neposredno lasersko sintranje kovin (DMLS) ali selektivno lasersko taljenje (SLM), ki zagotavljata najboljšo stabilnost in ponovljivost procesa pri izdelavi kovinskih delov.

Izzivi, ki so povezani s to inovacijo, so ohranjanje integritete senzorjev med taljenjem kovinskemu prahu z laserjem, ravnanje s senzorji med postopkom, izpostavljenost kovinskih reaktivnih praškov, kisiku iz okolja in ohranjanje celovitosti kovinskih delov.

V nadaljevanju prispevka je predstavljen proces integracije temperaturnega senzorja v vzorec Maraging jekla MS1 izdelanega s postopkom DMLS.

2 POSTOPEK DMLS

Neposredno lasersko sintranje kovinskih prahov (DMLS - Direct Metal Laser Sintering), je danes že osvojen in znan postopek za hitro izdelavo prototipov, oblikovnih vložkov orodij za brizganje plastičnih materialov in tlačno litje barvnih kovin. Z razvojem novih materialov so se izboljšale mehanske lastnosti sintranih izdelkov, z doseganjem večje oblikovne natančnosti pa se je uporabnost postopka razširila na področje neposredne izdelave kompleksnih funkcionalnih prototipov, kot tudi zahtevnih prototipnih orodij za brizganje omenjenih materialov.



Slika 1: Shematski prikaz DMLS postopka

Prednost hitre izdelave prototipov (Rapid prototyping RP) in orodij je v neposredni uporabi tridimenzionalnega modela CAD. Izdelani "3D CAD model" (STL, IGES, ProE, Catia, STEP, SW) stroj v procesno-računalniški enoti pretvori v svoj ".sli" format. Model razreže na dvodimenzionalne plasti, ki jih kasneje uporabi za svoje delovanje, oziroma sintranje posameznih slojev prahu. Stroj je sestavljen iz optično-laserskega sistema, ki usmerja laserski žarek, ki tali kovinski prah, procesno-računalniške enote za krmiljenje celotnega delovanja stroja, mehanskih sklopov, ki omogočajo posamezne delovne gibe stroja, hladilnega sistema za hlajenje laserskega izvora in sistema za odsesavanje plinov.

Pri neposrednem laserskem sintranju kovinskih prahov posnemalo iz zalogovnika materiala nanese material na delovno ploščo, ki je v našem primeru plošča iz orodnega jekla različnih debelin. Krmiljen laserski žarek stali plast nanešenega materiala glede na obliko, ki jo je dobil iz procesno-računalniške enote. Ko je plast v celoti sintrana, se delovna plošča spusti za debelino plasti, nanese se nova plast materiala, nato se sintranje materiala na predhodno plast ponovi. Z nadaljnjim spuščanjem delovne plošče in ponovnimi nanosi materiala ter ponavljajočim taljenjem dobimo tridimenzionalno obliko sintranega izdelka.

Tako kot pri metodi SLS bo kovinski model sloj za slojem pridobival svojo obliko, ki jo narekuje njegov 3D model. Največja razlika je sicer v delovni temperaturi. Pri delu s plastiko je potrebna temperatura za sintranje v območju od 160°C do 200°C, medtem ko je ta pri delu s kovinami med 1520°C in 1600°C.

Material za ta postopek 3D-tiskanja kovin so drobni kovinski delci. Običajno velikost kovinskih delcev ne sme presegati velikosti od 20 do 40 mikrometrov, saj ta močno vpliva na končno oblikovani del. Manjša kot je velikost omenjenih delcev, bolj “fin” bo končni izdelek. Poleg tega obstajajo tudi drugi dejavniki, ki so pomembni za dosego kakovosti končnega dela tj. površinske hrapavosti izdelka, katera je odvisna od debeline (nanosa) sloja praškastega materiala in parametrov laserja.

3 SENZORJI

V našem primeru, smo se odločili za integracijo temperaturnega senzorja v kovinski vzorec med proizvodnim procesom DMLS. Za uspešno integracijo senzorja je potrebno pred samo vgradnjo zagotoviti določene zahteve glede specifikacij in lastnosti senzorja, ki so namenjene kot pomoč pri izbiri optimalnega senzorja. Zahteve, ki smo jih upoštevali so:

– natančno merjenje temperature

– primernost za uporabo za 3D tisk

– temperaturna obstojnost

– kompaktnost
– enostavnost povezovanja
– prilagodljivost na vse vrste delov (geometrija in vrsta materiala)

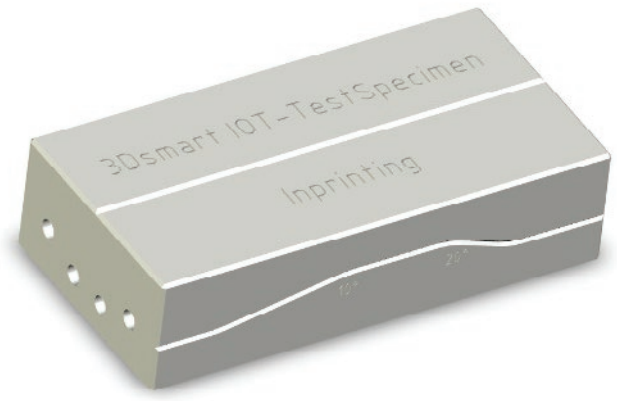
robustnost

– ekonomičnost

Za vgradnjo senzorja v kovinski vzorec je bil izbran žični termoelement, ki je izdelan iz izoliranih polnih žic termočlenov za merjenje temperature v predpisanem temperaturnem območju. Pri tem je zelo pomembno, da je senzor v termoelektričnem zaščitnem ohišju, kar pomeni, da je termočlen zaščiten v zaščitni cevki in izoliran od ohišja. Zaščitna debelina ohišja ter vrsta materiala ohišja morata biti prilagojena za proces 3D DMLS tiska, ker se ti senzorji lahko zlahka poškodujejo zaradi visoke temperature med samim procesom integracije. Na ta način je senzor zaščiten pred toplotnimi šoki, ki jih povzroči lasersko taljenje okoliškega prahu.

4 OPIS VZORCA IN PROCES IZDELAVE

Za izdelavo kovinskega vzorca z integriranim senzorjem je potrebno izdelati model vzorca *(Slika 2)* ter določiti postopek izdelave z definiranjem parametrov nastavitve in časovnega časa operacij, optimizirati integracijo senzorja znotraj materiala med postopkom taljenja in določiti proces validacije integriranega senzorja po postopku.

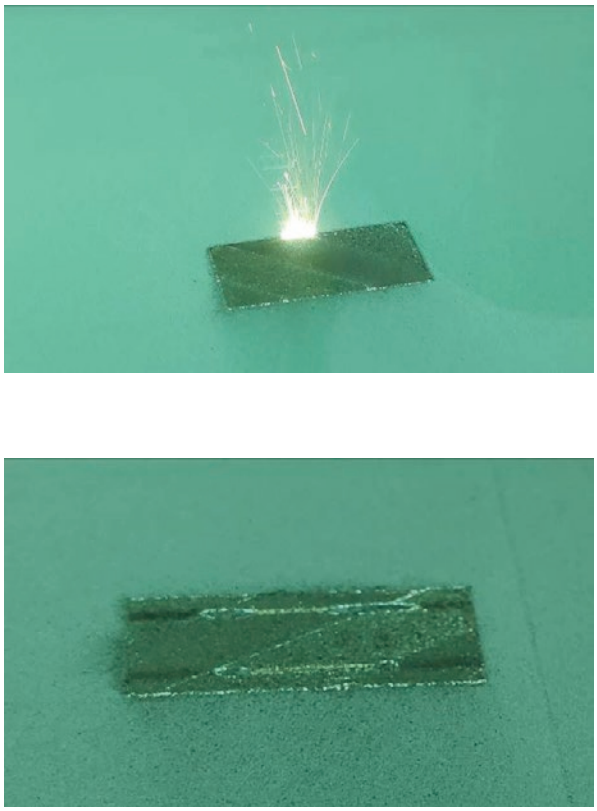


Slika 2: 3D model kovinskega vzorca

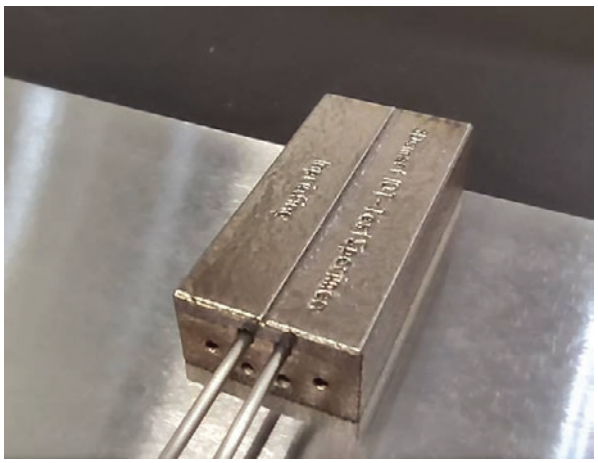
Za integracijo smo izbrali izolirani žični termoelement v zaščitnem ohišju s konektorjem premera 1,5 mm in dolžino 22 mm ter temperaturnim območjem od -25 … +400°C. *(Slika 3)*

Slika 3: Senzor - izolirani žični termoelement v zaščitnem ohišju

Kovinski vzorec dimenzij 40x20x10mm se je izdelal iz orodnega jekla MS1 s postopkom DMLS. Proces izdelave z integracijo senzorja je prikazan na spodnji sliki. *(Slika 4)*



Slika 4: Izdelava kovinskega vzorca z integriranim senzorjem z DMLS postopkom



Slika 5: Izdelan kovinski vzorec z integriranim senzorjem

5 TEST FUNKCIONALNOSTI SENZORJA

Delovanje temperaturnega senzorjev po integraciji senzorja v kovinski vzorec se je izvedlo pri proizvajalcu senzorja v obliki testiranja občutljivosti, ponovljivosti in natančnosti s funkcionalnimi testi. Rezultati meritev pred in po integraciji temperaturnega senzorja so prikazani na spodnji sliki. *(Slika 6)*.

616941121		
ETALON	MERILO	KOREKCIJA
50	50,30	-0,30
250	250,70	-0,70

(z blokom) 616941121		
ETALON	MERILO	KOREKCIJA
50	50,17	-0,17
250	251,20	-1,20

a.) b.)

Slika 6: Rezultati testiranja temperaturnega senzorja a.) pred integracijo, b.) po integraciji

Iz rezultatov meritev, je razvidno, da je bila integracija senzorja v kovinski vzorec s postopkom DMLS uspešno izvedena, kar potrjujejo tudi rezultati meritve funkcionalnosti senzorja.

6 SKLEP

Rezultati, ki so predstavljeni v tem prispevku, prikazujejo uporabo in zmožnosti tehnologije 3D tiska DMLS za integracijo senzorjev v kovinske dele. Na splošno je s tem pristopom mogoče na podoben način integrirati katero koli elektronsko napravo ali vezje. Hkrati bo z nadaljnjim razvojem naprednejših elektronskih sistemov možno integrirati v miniaturne in brezžične komponente v kovinske izdelke s tehnologijo 3D tiska. Elementi z integriranimi senzorji, ki imajo možnost zaznavanja ter so prilagojeni značilnostim posameznega subjekta bodo v prihodnje privlačna aplikacija na vseh industrijskih področjih.

Viri:

[1] Qin, L.; Li, Z.: *Monitoring of cement hydration using embedded piezoelectric transducers*. Smart Mater. Struct. 2008, 17, 055005.

[2] Martínez, I; Andrade, C.: *Examples of reinforcement corrosion monitoring by embedded sensors in concrete structures.* Cem. Concrete Compos. 2009, 31, 545–554.

[3] Pille, C.: *In-process-embedding of piezo sensors and RFID transponders into cast parts for autonomous manufacturing logistics.* Smart Syst. Integr. 2010, Vol. 20, 1–10.

[4] Klassen, A.; Rübner, M.; Ilg, J.; Rupitsch, S.J.; Lerch, R.; Singer, R.F.; Körner, C.: *Influence of the fabrication process on the functionality of piezoceramic patch transducers embedded in aluminum die castings.* Smart Mater. Struct. 2012, 21, 115014.

[5] R.R. Maier et al.: *Embedded fibre optic sensors within additive layer manufactured components.* IEEE Sensors Journal, vol. 13, pp. 969- 979, 2012.

[6] M. Tintelott et al.: *Flexible printed pressure sensor integrated into inner wall of a 3D tube using additive manufacturing.* Proc. of IEEE Sensors, Glasgow (Scotland), pp. 1-3, 2017.

[7] EOS GmbH – Electro Optical Systems [splet]. Dosegljivo: https://www.eos.info/en [06.05.2022].

INTEGRACIJA VENTILSKIH OTOKOV Z INTEGRIRANO BREZŽIČNO POVEZAVO

Nejc ZALOKAR, Matjaž VELUNŠEK, Marko MIRNIK, Aleš PLEŠNIK
TURNA d.o.o.

IZVLEČEK

V avtomatiziranih linijah za sestavo naših proizvodov se veliko uporabljajo rotacijske delilne mize. Ker se na vsaki delitvi izvajajo določene funkcije sestave, imajo rotacijske mize posamezne ventilske otoke. Do sedaj smo imeli težave, da se je med delovnim procesom izgubila komunikacija z ventilskim otokom, kar je pomenilo zaustavitev delovnega procesa in posledično zmanjšanje proizvodnih kapacitet. Z uporabo omenjene rešitve v članku smo popolnoma izničili zastoje zaradi izgube komunikacije v procesu ter pocenili projekt.

1 UVOD

Podjetje Turna d.o.o. je proizvajalec komponent za industrijo bele tehnike. Pred nekaj leti smo razvili inovativni tečaj za mehko zapiranje (SC) vrat pečice, ki ima tudi modularno funkcijo mehkega odpiranja (SO). Vsi tečaji izdelani v Turna se proizvajajo pod lastno blagovno znamko X-Turn® [1].

Na osnovi izredno pozitivnih odzivov na trgu glede delovanja naših tečajev, smo zbrali vso naše znanje in ga uporabili za razvoj nove generacije tečajev. Ta generacija pa je postala tudi mejnik v smislu strojegradnje v podjetju Turna. Z novo generacijo so prišle potrebne po namenskih strojih, glede na kompleksnost in know-how smo se odločili, da bomo stroje za izdelavo nove generacije tečajev izdelali v lastni strojegradnji pod blagovno znamko Turtech ® [1].

2 RAZVOJ STROJA ZA SESTAVO SKLOPA

Ker ima nova generacija tečaja drugačno zgradbo kot njena predhodnica, je bilo potrebno narediti nove stroje za sestavo komponent. Stroji se med sabo razlikujejo po konceptu delovanja. Lahko imajo samo posamezne postaje, ki so optimalno nameščene za posluževanje operaterja ali robota. Lahko pa se kosi sami pomikajo na postaje, kjer se nato izvede posamezna operacija. Premik kosa se lahko izvede na dva načina. Linearen hod ali krožen. Zaradi varčevanja s prostorom smo se odločili za krožen gib pomika kosov na postaje.

2.1 Osnovna konstrukcijska zasnova

Osnova za zasnovo stroja so tehnično-tehnološke zahteve. V njih se nahajajo bistvene informacije, kot so: število kosov letno, taktni časi, dnevne kapacitete stroja, način posluževanja stroj (človek/robot), stopnja avtomatizacije stroja, maksimalne dimenzije stroja… Glede na zahteve, smo se odločili za krožno gibanje komponent. Izbrali smo krožno delilno mizo s šestimi delitvami. Stroj ima tako šest delilnih particij, na katerih se lahko izvede posamezna operacija sestave. Na mizo ročno vstavljamo osnovne komponente oz. polizdelke, na katerih izvajamo postopke spajanja materiala in vstavljanje komponent. Na štirih delitvah opravljamo še preostale operacije spajanja materiala in dodajanja komponent. Na zadnji pa prelagamo delno sestavljanje komponente oz. polizdelke na gnezdo, kjer se nato pri ponovnem opravljenem krogu skozi operacije sestavi v zaključeno enoto oz. izdelek.

2.2 Konstrukcija delilne mize

Stroj je precej kompleksen. Vendar stopnje kompleksnosti ne definira končen sklop oz.

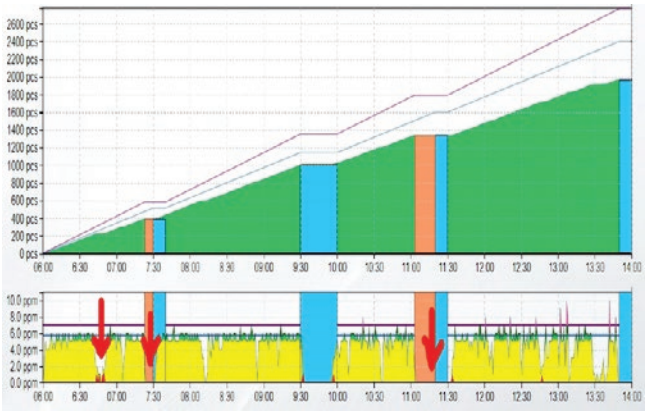
sestav, ampak polizdelki iz katerih je sestavljen. Komponente imajo zahtevne tolerance, hkrati pa je potrebno zagotavljati centričnost vseh izvrtin. Ta zahteva prihaja iz same zasnove komponent, kjer ujemi med njimi ne puščajo veliko prostora. Zaradi tega, je na krožni delilni mizi kar 48 cilindrov, ki opravljajo vlogo pridrževanja in vodenja. Vsak cilinder ima tudi dva senzorja, ki registrirata končno pozicijo posameznega cilindra. Tako, da imamo na krožniku tudi 96 senzorjev.

2.3 Krmiljenje

Kot je bilo že omenjeno v prejšnji točki, je na delilni mizi veliko aktuatorjev. Poleg njih, pa je potrebno zajeti veliko informacij o stanju le teh. Za delovanje aktuatorjev je potrebno zagotoviti medij, preko katerega bodo delovali. V našem primeru je to stisnjen zrak. Ker bodo ti aktuatorji krmiljeni z ventili, je potrebno tudi zagotoviti vir elektrike. Da imamo medi in elektriko na delilni mizi, obstajajo na trgu razni krožni delilniki. Lahko samo za eno ali drugo, obstajajo tudi razne kombinacije. Ker pa bomo ventile prožili v določenem zaporedju oz. logiki, moramo poskrbeti tudi za povezavo med ventili in glavnim računalnikom oz. PLC-jem. Prej omenjeni delilniki, ki omogočajo tudi komunikacij pa so cenovno zelo dragi. Ko smo iskali rešitev na trgu, smo se najprej lotili raziskave že znane rešitve krmiljenja ventilov in zajemanja stanja senzorjev na delilnih mizah. Ta rešitev pa nam ni bila všeč zaradi več razlogov.

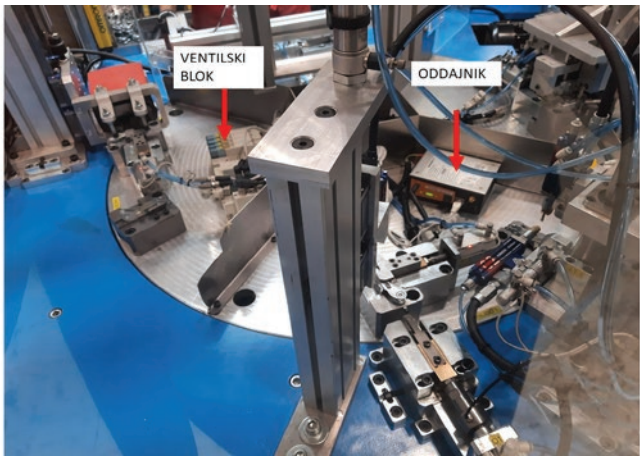
2.4 Problemi z obstoječo rešitvijo in nova rešitev

Do sedaj smo imeli težave, da se je med delovnim procesom izgubila komunikacija z ventilskim otokom, kar je pomenilo zaustavitev delovnega procesa in posledično zmanjšanja proizvodnih kapacitet (*slika 1*).



Slika 1: diagram MES sistema za stroj v proizvodnji

Vidimo, da prihaja med delovnim procesom do posameznih zastojev, ki niso po svojem značaju mikro, ampak že kar makro zastoji. Poleg zastojev pa so kosi, ki so trenutno v procesu izdelave označeni kot slabi, kar pomeni dodaten izpad proizvodnje.



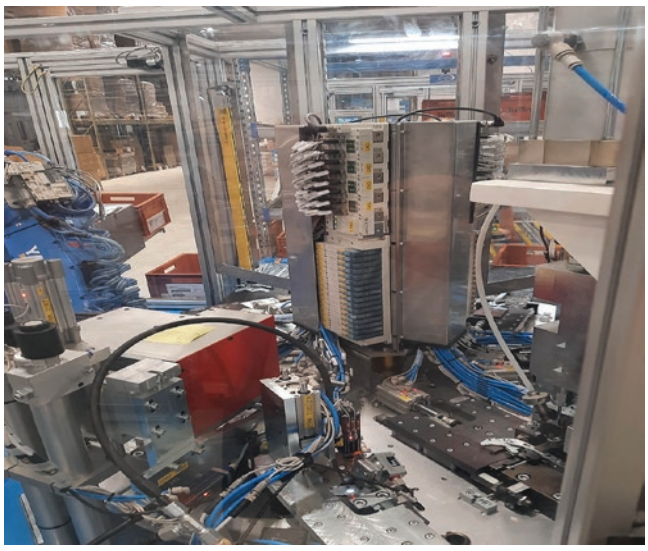
Slika 2: Obstoječa rešitev

Druga težava je, da s tem sistemom lahko povežemo samo en ventilski otok (*slika 2*). Ker smo si želeli na novih strojih zmanjšati oz. izničiti te težave, hkrati pa povezati več ventilskih otokov s PLC-jem, smo iskali nove načine komunikacije med otokom in PLC-jem. Uporabljen je bil modul EX600 podjetja SMC, ki omogoča brezžično komunikacijo med glavnim komunikacijskim modulom, ki je pritrjen nekje v prostoru in ventilskim otokom, ki je lahko od glavnega modula v radiju 10 m. Hitrost vspostavitve komunikacije je manj kot 0,5 sek. Prav tako omogoča veliko diagnostike in povezavo do 9 ventilskih otokov. Na ta blok lahko tudi priključimo senzorske kartice, tako da lahko ventilski blok skrbi tudi za senzoriko na otoku.

2.5 Umeščanje nove rešitve na stroj

Ker ima komponenta določene zahteve glede umestitve, je bilo potrebno pravilno vgraditi. Master sprejemnik, ki je že vgrajen v sam ventilski blok smo namestili na prosto, obrnjen proti delilni mizi (*slika 3*). Na delilno mizo so namestili 3 ventilske bloke s komunikacijskim modulom, ki so med sabo povezani v trikotnik. Tako da en ventilski blok pokriva 2 delitvi. Trikotnik je obrnjen tako, da je ventilski blok, ki mora opraviti določeno operacijo, vedno obrnjen proti master otoku (*slika 4*). Tako smo želeli tudi se izogniti izpadom komunikacije, čeprav je proizvajalec navedel, da orientacija master bloka in slave enot ni pomembna Pomembno je, da ni ena izmed komponent nameščena v kovinsko omaro.

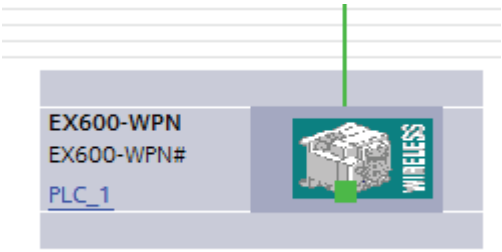
Slika 3: Ventilski otok z Masterjem



Slika 4: Ventilski bloki na delilni mizi

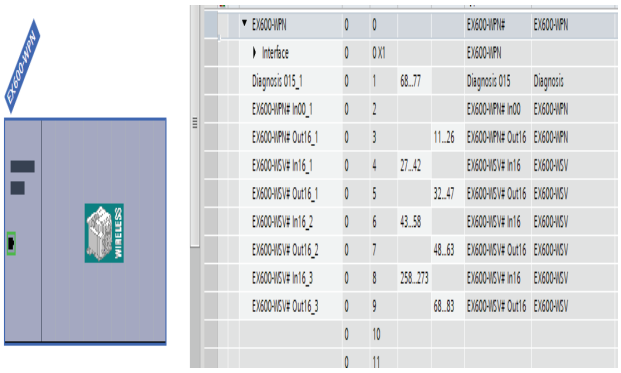
2.6 Integracija ventilskih otokov

Ventilski otoki se med sabo povežejo oz. prepoznajo s pomočjo NFC kartice in posebne aplikacije. Integracija pa se izvede preko TIA portala [2]. V podjetju Turna d.o.o. je prioriteta uporaba standardnega protokola PROFINET. V TIA portal vnesemo GSD datoteko (*slika 5*) za EX600-WPN.



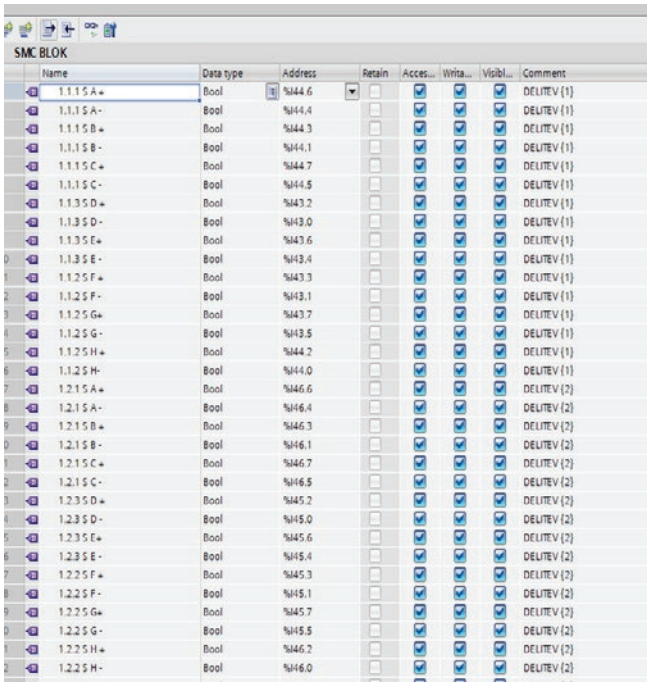
Slika 5: GSD file

Nato kliknemo na to datoteko, da določimo zgradbo ventila. Če želimo imeti diagnostiko samih blokov, to pomeni stanja blokov, napake, transferji, moramo posebej vnesti modu diagnostika. Ta blok je priporočljivo vnesti, saj nam poda veliko koristnih informacij. Predvsem, če gre kaj narobe. Nato vnesemo bloke. Pomembno je, da ločimo, kaj je master in kaj slave. Master je označen z WPN oznako, Slave pa WPS. Pomembno je tudi, da so bloki nastavljeni na enako št. bajtov, kot jih imamo v TIA portalu (*slika 6*).



Slika 6: Hardware nastavitev v TIA portalu

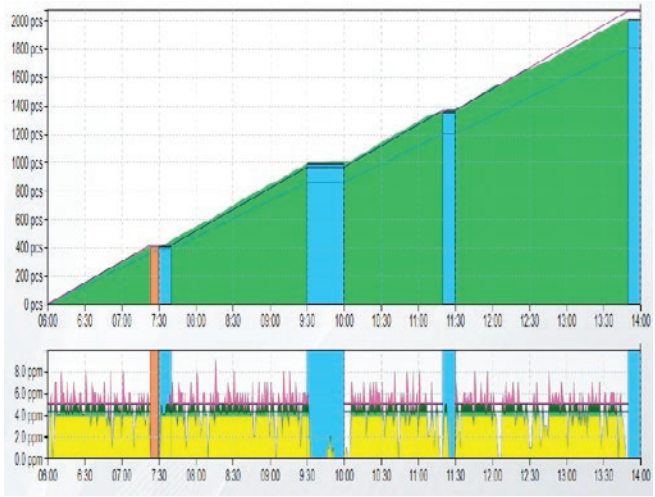
Pomembno je tudi, da imamo dva bloka na ventilski otok. Enega za vhode in enega za izhode. V našem primeru je blok za In vhod za senzorje, Out pa signal za izhode oz. za ventile (*slika 7*).



Slika 7: Tabela vhodov in izhodov v krmilniku

2.7 Izboljšave

Integracije te rešitve je odpravila naše težave glede izpada komunikacije. Izpada proizvodnje iz tega naslova ni več (*slika 8*).



Slika 8: diagram MES sistema za stroj v proizvodnji

Dodana vrednost je tudi opcija dograjevanja sistema. Če želimo stroj nadgraditi, dokupimo samo blok, ki ga enostavno integriramo in vnesemo v program. Na razpolago je dobra diagnostika, tako glede stanja samega bloka, kot tudi stanja senzorjev in ventilov. Sama rešitev prispeva tudi k daljši življenjski dobi elektro komponent, saj napako komunikacije lahko odpraviš samo s popolnim izklopom stroja iz omrežja. Pomembno je tudi to, da sistem ni občutljiv na motnje iz okolice. V proizvodnji stoji vzporedno dvojček opisanega stroja z enako rešitvijo in ne prihaja do motenj. Prav tako je na samem stroju nameščeno veliko drugih elektro komponent in elektromotorjev, ki imajo določena elektromagnetna sevanja, pa do motenj ne prihaja.

3 SKLEP

Za integracijo nove rešitve na stroj smo pridobili veliko novih znanj in izkušenj. Tako v smislu konstrukcijskih rešitev, kot tudi integracijskih. Sama rešitev nam v konstrukcijskem smislu poda zanesljivo delovanje, da lahko v programskem delu maksimalno izkoristimo potencial izbrane komponente, v smislu diagnostike za odkrivanje napak na stroju. Poleg »pametnejšega« stroja so se nam z uvedeno rešitvijo znatno izboljšali izračuni doseganja skupne učinkovitosti opreme (OEE). Zaradi bolj stabilnega delovanja je manj slabe volje pri operaterjih, kot tudi pri vzdrževanju. Nam pa je obvladovanje te rešitve tudi odprlo nove ideje, predvsem glede integracije kompleksnih orodij na robotih ali premikajočih se orodjih.

Viri:

[1] X-Turn®, Turtech®: zaščiteni blagovni znamki podjetja Turna d.o.o.

[2] TIA Portal – programsko okolje Siemens

VARNOST STROJEV – POSTOPEK OCENJEVANJA TVEGANJA

Neja ROKAVEC
LTH Castings, d. o. o.

IZVLEČEK

Današnja visokotehnološka industrija, ki je v večji meri že vsaj delno avtomatizirana, ljudem omogoča izvajanje dejavnosti, ki presegajo njihove fizične in mentalne sposobnosti. Prav to pa za človeka prinaša tudi vedno večja tveganja in s tem potrebo po spreminjanju zahtev na področju varnosti strojev. Vključitev varnostnih naprav v delovni proces zato dandanes, zahvaljujoč napredni tehnologiji, ni več ovira za upravljavca, temveč celo pripomore k povečanju storilnosti. V podjetju LTH Castings d.o.o. načrtujemo in proizvajamo avtomatizirane proizvodne linije, pri čemer smo dolžni izpolnjevati zahteve evropske direktive o strojih 2006/42/EU, ki vključuje tudi izdelavo ocene tveganja za stroje. V prispevku bo zato podrobneje predstavljen celovit postopek izdelave ocene tveganja, ki omogoča sistematično izvedbo analize in vrednotenja tveganja. Prikazano bo tudi kako na podlagi te ocene sprejemamo ustrezne ukrepe za odpravo in zmanjšanje tveganja, z uvedbo ustreznih varovalnih ukrepov. Ker je varnost strojev v veliki meri odvisna od pravilne rabe in razumevanja standardov, so nam kot proizvajalcu strojev, le-ti v veliko pomoč pri opisovanju postopka ocene tveganja. Dobro se namreč zavedamo, da je preudarno upravljanje varnosti povezano z izboljšano uspešnostjo in dobičkonosnostjo podjetja.

1 UVOD

V podjetju LTH Castings je večina proizvodnih procesov avtomatiziranih, kar pomeni da so se tudi zahteve na področju varnosti strojev, zahvaljujoč napredni tehnologiji, dvignile na višji nivo. Danes zaščita ne temelji več le na fizičnih preprekah, temveč tudi na uporabi elektro občutljive varnostne opreme (ESPE). Pri načrtovanju strojev je zato potrebno analizirati vsa tveganja in sprejeti varnostne ukrepe, za zaščito operaterja pred nevarnostmi. Pri tem pa nam je v pomoč Direktiva o strojih 2006/42 / ES, ki proizvajalcem določa izpolnjevanje varnostnih in zdravstvenih zahtev, ter standardi, ki opredeljujejo in opisujejo postopek ocene tveganja. V prispevku bo podrobneje predstavljen celovit postopek izdelave ocene tveganja, ki je zaporedje logičnih korakov. Ti koraki na sistematičen način omogočajo izvedbo analize in vrednotenja tveganj povezanih s stroji. Prikazano bo tudi kako na osnovi informacij analize in vrednotenja tveganja, presodimo ali je zmanjšanje tveganja potrebno sli ne. Potrebno je namreč poudariti da pripravo ocene tveganja zahteva zakon in ni prostovoljna odločitev [1], zato je vsak naš stroj zasnovan ob upoštevanju rezultatov ocene tveganja.

2 POTREBNI PODATKI ZA OCENO TVEGANJA

Preden pričnemo z ocenjevanem tveganja moramo pridobiti naslednje informacije:

a) v zvezi z opisom stroja:
   1. podate o uporabnikih;
   2. pričakovane lastnosti stroja (opis obdobij celotne življenjske dobe stroja, tehnične risbe, potrebni viri energije);
   3. dokumentacijo o prejšnjih izvedbah podobnih strojev, če je to mogoče;
   4. navodila za uporabo stroja
b) podatke o ustreznih predpisih in standardih
c) podatke o preteklih nesrečah, nezgodah in dogodkih

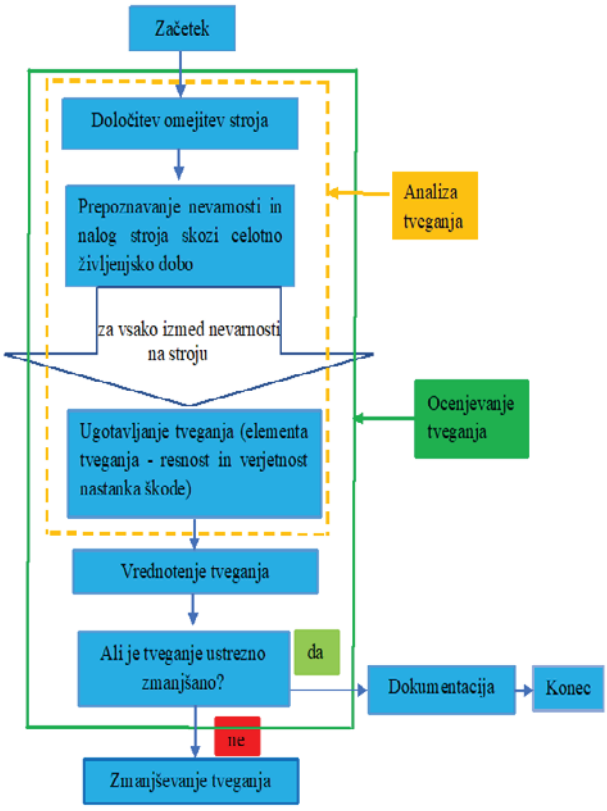
Če so na obstoječem stroju potrebne spremembe, je potrebno zgornje podatke posodabljati skladno s spreminjanjem stroja. Primerjava med podobnimi nevarnimi stanji pri različnih vrstah strojev je mogoča le, če imamo na voljo dovolj informacij o nevarnostih in o okoliščinah nezgod v teh stanjih. Če ni podatkov o nesrečah v preteklosti, to ne sme biti osnova za domnevo o majhnem tveganju [2].

3 OCENJEVANJE IN ZMANJŠEVANJE TVEGANJA KOT PROCES

Kot načrtovalci strojev moramo za izvedbo ocenjevanja in zmanjševanja tveganja izvesti ukrepe po spodnjem zaporedju:

1. Določiti omejitve stroja, vključno s predvideno uporabo in razumno predvidljivo napačno uporabo.
2. Prepoznati nevarnosti in z njimi povezana nevarna stanja, ki lahko nastanejo na stroju.
3. Za vsako prepoznano nevarnost določiti elemente tveganja (kako hude bi bile morebitne poškodbe in kolikšna je njihova verjetnost).
4. Ovrednotiti tveganje in se odločiti ali ga je potrebno zmanjšati.
5. Odpraviti nevarnost in zmanjšati tveganje z uporabo varnostnih ukrepov [2].

Na sliki 1 je shematsko prikazan proces ocenjevanja in zmanjševanja tveganja po korakih.



Slika 1: Shematski prikaz procesa ocenjevanja in zmanjševanja tveganja

Stroje je potrebno načrtovati in izdelati tako, da jih je mogoče upravljati, ne da bi bile osebe izpostavljene tveganju, kadar se dejavnosti izvajajo v predvidenih razmerah, vendar tudi ob upoštevanju vsake njihove razumno predvidljive napačne uporabe. Prav tako morajo biti izdelani tako, da je preprečena nenormalna uporaba, če bi le ta lahko povzročila tveganje [3].
V nadaljevanju bodo posamezni koraki izvedbe ocene in zmanjševanja tveganja prikazani na praktičnem primeru robotske celice RC T4405, ki smo jo izdelali znotraj našega podjetja.

3.1 Določanje omejitev stroja

Prvi korak v procesu analize tveganja je določitev omejitev stroja, ki je opredeljena z namembnostjo in uporabo stroja. Določiti je treba naslednje podatke:

a) Omejitve uporabe:

Predvidena uporaba: Robotizirana celica je namenjena pobiranju ulitkov iz vhodnega traku in vlaganju teh v vrtalni stroj.
Razumno predvidljiva napačna uporaba: Izvajanje vzdrževalnih del brez odklopa vseh varovalk, uporaba napačnega tipa ulitkov, poseganje v napravo med delovanjem zaradi čiščenja.
Področje uporabe: Industrijska uporaba.
Pričakovane okvare: Nečistoče na senzorjih in odsevnikih lahko vplivajo na nepravilno delovanje naprave. Zamašenost filtra za zrak, je lahko razlog da vakuumsko prijemalo robota slabo prijemlje.
Predvidene ravni usposabljanja, izkušnje in sposobnosti uporabnikov kot so: Tehnolog robotik, vzdrževalec, proizvodni delavec, proizvodni robotik, urejevalec.

b) Časovne omejitve:

Življenjska doba robotske celice: 10 let.
Servisni intervali se izvajajo enkrat na leto.

c) Prostorske omejitve:

Območje gibov je dokumentirano znotraj načrtov strojne konstrukcije.
Energetski priključki stroja so zavedeni v elektro-pnevmatski shemi.

d) Ostale omejitve:

Najvišja temperatura stroja: Do 70°C.
Uporaba v zaprtem prostoru ali na prostem: Zaprt industrijski objekt.

3.2 Prepoznavanje nevarnosti

Po določitvi omejitev stroja je bistven korak vsakega ocenjevanja tveganja stroja sistematično prepoznavanje nevarnosti v vseh obdobij življenjske dobe stroja. Ta obdobja so:

- transport, montaža in vgradnja
- predaja v uporabo
- uporaba oz. obratovanje
- demontaža, razgradnja [2].

Ukrepe za odpravo nevarnosti in zmanjšanje tveganja je mogoče izvesti šele, ko so nevarnosti že poznane. Za uspešno prepoznavanje nevarnosti je treba opredeliti načine delovanja stroja in naloge, ki jih bodo izvajali upravljavci stroja. Pri tem nam je v pomoč dodatek B standarda ISO 12100, kjer so nevarnosti razvrščene v skupine glede na vrsto nevarnosti: mehanske, električne, toplotne, nevarnosti zaradi hrupa, nevarnosti zaradi zanemarjanja ergonomskih načel… V tabeli 1 so po posameznih skupinah prikazane vse razumno predvidljive nevarnosti znotraj robotske celice RC T4405. Pri določanju nevarnosti nam je bila v veliko pomoč dokumentacija o prejšnji izvedbah podobnih robotiziranih celic.

Tabela 1: Prikaz nevarnosti znotraj robotske celice RC T4405

Izvor nevarnosti	Posledice
Mehanske nevarnosti	
Vhodni trak	Poteg, odrgnine
Robot	Trk, udarec
Enota za pripravo zraka	Poškodbe oči
Ostri robovi ulitkov	Ureznine
Električne nevarnosti	
Elektro krmilna omara	Stik z električnim tokom, smrt
Elektrostatika	Iskrenje
Nevarnosti zaradi hrupa	
Proizvodni proces	Poškodbe sluha
Nevarnosti zaradi zanemarjanja ergonomskih načel	
Dostop do robotske celice	Udarnine, padci
Lokalna razsvetljava	Poslabšanje vida

3.3 Ugotavljanje tveganja

Za vsako nevarno stanje je potrebno ugotoviti tveganje, ki je odvisno od naslednjih elementov; resnosti in verjetnosti nastanka škode, kar prikazuje slika 2.

Slika 2: Shematski prikaz elementov tveganja

Resnost škode se oceni ob upoštevanju:

a) resnosti poškodb (neznatna, velika, smrt)
b) obsega škode (prizadeta je ena ali več oseb)

Verjetnost nastanka škode pa je funkcija:

a) pogostosti in trajanja izpostavljenosti (potreba po dostopu do nevarnega območja, čas zadrževanja v nevarnem območju, pogostost dostopa)
b) verjetnost nastanka nevarnega dogodka (zgodovina nezgod, zgodovina zdravstveni težav)
c) možnost preprečiti ali omejiti škodo (različne osebe, ki so izpostavljene nevarnosti, kako hitro nevarno stanje privede do škode) [2]

Pri prepoznavanju nevarnosti in določitvi elementov tveganja za robotsko celico RC T4405, smo osnovali ekipo strokovnjakov s posamičnih področji, kot so: konstruiranje, programiranje, področje elektrotehnike… S čimer smo zagotovili objektivnost ocene tveganja.

3.4 Vrednotenje tveganja

Po oceni tveganja glede obsega škode in verjetnosti pojava se postavlja vprašanje, ali je tveganje sprejemljivo. Treba se je odločiti, ali so ukrepi za zmanjševanje tveganja potrebni ali ne. Dokler je tveganje večje od sprejemljivega mejnega tveganja, je potrebno izvesti zmanjšanje tveganja. Pri tem se postavlja vprašanje kje je meja sprejemljivega tveganja? Določanje meje tveganja zahteva ravnotežje med tveganji in posledičnimi koristmi. Pomembno je, da se razlikuje, ali se nekdo prostovoljno izpostavlja

posameznemu tveganju ali ne. Če je nekdo neprostovoljno izpostavljen tveganju, za določitev meje tveganja veljajo veljavne vrednote družbe. Meja tveganja je opredeljena v obliki tehničnih predpisov in standardov.
Postopek in izračun ocenjevanja tveganja, ki smo ga uporabili pri izdelavi ocene tveganja za robotsko celico RC T4405 je prikazan spodaj:

T (tveganje) = **R** (resnost) x **V** (pogostost / verjetnost) (1)

Mehanske nevarnosti				Oznaka tveganja: 03
Pozor, robot v gibanju				
Izvor nevarnosti	Posledice			
Robot	Trk, udarec			
Opis nevarnosti				
Pri stregi vrtalnega stroja z robotom, le-ta prime ulitek iz traku in ga odloži na odlagalno paleto v vrtalnem stroju, pri čemer obstaja nevarnosti trka oz. udarca človeka z robotom.				
Ocenitev tveganja				
R3	V2	V4	V6	T
5	2	3	1	**30**
Ukrepi za zmanjšanje tveganja				
Vgrajena varnost				
Varovanje in dopolnilni varovalni ukrepi	Ograja okoli robotske celice preprečuje dostop do gibljivih delov znotraj celice. Na vratih celice je mehanska ključavnica, ki preprečuje odpiranje vrat med delovanjem. Znotraj celice, za mehansko ključavnico, se nahaja gumb za zaustavitev celice v sili. Prav tako je v primeru nevarnosti možen izklop v sili, ki se nahaja na krmilni konzoli robota in na robotskem krmilniku.			
Navodila	V kolikor robot deluje je vstopanje v celico prepovedano oz. onemogočeno, kar je podrobneje opisano v navodilih za delo in varno delo. Na vratih celice se nahajajo piktogrami v obliki tablice, ki opozarjajo na nevarnosti.			
Ocenitev tveganja po sprejetju ukrepov za zmanjšanje tveganja				
R2	V2	V3	V6	T
2	2	1	1	**8**

Slika 3: Prikaz vrednotenja in zmanjšanja tveganj

3.5 Zmanjševanje tveganja

Vrednotenje tveganja nam pove ali je le-tega potrebno zmanjšati. Če je zmanjšanje tveganja potrebno, potem izberemo ustrezne varovalne ukrepe. Zmanjšanje tveganja se lahko doseže z odstranitvijo nevarnosti ali z ločenim ali hkratnim zmanjšanjem vsakega od dveh elementov, ki določata tveganje:

- resnosti škode
- verjetnosti pojava škode

Vse varovalne ukrepe za dosego tega cilja se uporablja v naslednjem zaporedju:
vgrajena varnost oz. konstrukcijske rešitve (odpravljanje nevarnosti z ustrezno izbiro konstrukcijskih lastnosti stroja)
varovanje in dopolnilni varovalni ukrepi (če nevarnosti z vgrajeno varnostjo ni mogoče odpraviti, se za zmanjšanje tveganja uporabi varovanje in dopolnilne varovalne ukrepe, pri čemer je treba upoštevati predvideno uporabo in razumno predvidljivo napačno uporabo). Slika 4 prikazuje primer varoval, ki smo jih uporabili za namen zmanjševanja tveganja.
navodila za uporabo (če tveganja ostajajo kljub vgrajeni varnosti in dopolnilnim varovalnim ukrepom, je potrebno preostala tveganja opredeliti v navodilih za uporabo) [2]

Slika 4: Varnostne naprave (prva slika z leve: laser skener; mehanska ključavnica; varnostna ograja)

4 SKLEP

V članku smo predstavili celoten proces ocenjevanja in zmanjševanja tveganja po standardu EN ISO 12100:2010, ter prikazali kako upoštevanje vseh korakov postopka vodi do izločanja nevarnosti in uvedbe ustreznih varnostnih ukrepov. Kot proizvajalec strojev stroj izdelamo tako, da zadosti zahtevam predpisov, na podlagi tega sestavimo izjavo o skladnosti proizvoda in označimo stroje z znakom CE. Oznaka CE pomeni skladnost proizvoda z evropskimi direktivami, katerih cilj je predvsem varnost in zmožnost predaje takšnega stroja na trg.

Viri:

[1] Dajčman, D.: *Ocena in vrednotenje tveganja za stroje*, 2018, str. 2.
[2] Dajčman, D.: *Tehnične zahteve in varnost strojev v praksi – od načrtovanja do uporabe*, Založba Forum Media d.o.o. meja, 2019, poglavje 15.3., 15.4.
[3] Srna M.: Postopek ocenjevanja tveganja za stroje, *Delo in varnost 52/2007/2,* str. 28-34

RAZVOJ IN IMPLEMENTACIJA DIGITALNE PLATFORME ZA VZDRŽEVANJE V REALNEM ČASU IN DIAGNOSTIKO

dr. Jelena TOPIČ BOŽIČ, Peter KORENČAN, dr. Andraž ŽERTEK , Dr. Dušan BOŽIČ
Inden, d. o. o.

IZVLEČEK

Razvoj in napredek v digitalnih tehnologijah je omogočil razvoj platform za vzdrževanje. Vpogledi, ki temeljijo na podatkih omogočajo podjetjem optimizacijo tehnične zanesljivosti in stroškov vzdrževanja v skladu s potrebami trga.

Digitalna platforma za diagnostiko in vzdrževanje vsebuje sistem za zajem podatkov. Razvita orodja omogočajo upravljanje z veliko količino vhodnih podatkov (»big data«) in agregacijo le-teh. Agregacija podatkov dovoljuje učinkovito analizo delovnih procesov in kontrolo kakovosti znotraj delovnega procesa z uporabo integrirana poročil, ki so dostopna uporabnikom. Ključ za zagotavljanje kakovosti je implementacija zaključene povratne zanke, ki vrača povratne informacije sistemu. Pri tem je upoštevan tudi standard ISO 13374, ki predpisuje osnovne zahteve, za spremljanje stanja strojev v realnem času in način procesiranja, komunikacije in prikaza pridobljenih informacij. Na ta način se zagotavlja kakovosten delovni proces in možnost načrtovanja vzdrževalnih del in njihovih vplivov na delovni proces.

Digitalne platforme za vzdrževanje omogočajo samodejno kreiranje vzdrževalnih nalogov in tako pripomorejo k hitrejši aktivaciji vzdrževalcev in zagonu proizvodnega procesa. Servisne platforme pomagajo zagotavljati stabilno delovanje opreme z zbiranjem informacij, ki prihajajo s senzorjev opreme v realnem času. Uporaba digitalnih platform znotraj proizvodnih obratov predstavlja svojevrsten izziv zaradi spremembe delovnih procesov.

1 UVOD

Digitalna transformacija je proces, ki ni le tehnološka sprememba, temveč tudi organizacijska, kulturna in vodstvena sprememba[1]. Digitalna transformacija pomeni posodobitev informacijskih tehnologij in hkrati vzpostavitev novih poslovnih procesov. Ne gre zgolj za avtomatizacijo poslovanja, temveč za nov način poslovanja [2]. Digitalno preobrazbo je omogočil napredek v digitalnih tehnologijah, kot so internet stvari (IoT), visokokakovostno širokopasovno omrežje ter vse večja avtomatizacija in avtonomija proizvodnje. Digitalna transformacija se zgodi preko štirih vzvodov:

- *Digitalni podatki*: zajem, obdelava in analiza digitalnih podatkov omogoča boljše napovedi in je v pomoč pri procesih odločanja.
- *Avtomatizacija*: kombiniranje tradicionalnih tehnologij z umetno inteligenco pripomore k razvoju sistemov, ki delajo avtonomno. To zmanjšuje pojavljanje napak in zmanjšuje operativne stroške.
- *Povezljivost:* povezovanje celotne verige sinhronizira dobavne verige in skrajša čas razvoja in prihoda izdelkov na trg.
- *Digitalni dostop za stranke:* dostopnost podatkov v digitalni obliki, avtomatizacija proizvodnih procesov, medsebojno povezovanje vrednostnih verig in ustvarjanje digitalnih uporabniških vmesnikov spreminja način poslovanja [3].

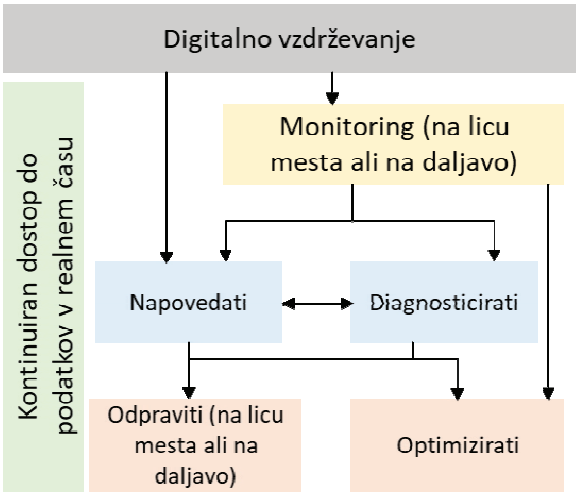
Z vpeljevanjem industrije 4.0 prihaja do sprememb v proizvodnji in drugih povezanih poslovnih procesih.

Vzdrževanje predstavlja posebno področje delovanja, ki je ključno za uspešno ohranjanje konkurenčne prednosti. Prediktivno vzdrževanje bo osrednjega pomena za načrtovanje uporabe delovnih sredstev, storitev in poprodajnih aktivnosti pri uresničevanju ciljev industrije 4.0. Pri tem je osrednjega pomena vpeljava umetne inteligence (AI), ki ponuja metode, ki temeljijo na podatkih [4,5]. Informacijske in komunikacijske

Slika 1: Koncept industrije 4.0, ki zajema vpeljavo naprednih digitalnih tehnologij znotraj industrije (povzeto po [5,6]).

tehnologije doživljajo eksponentno rast in nenehno se pojavljajo številne tehnologije, kot so računalništvo v oblaku, internet stvari (IoT), analitika velikih podatkov ter umetna inteligenca [4,5]. Na sliki 1 je prikazano kako digitalna transformacija vključuje digitalizacijo in integracijo celotne vrednostne verige. Pomembna je povezanost dobaviteljev, kupcev, tovarn, proizvodnih strojev, ki medsebojno komunicirajo v realnem času. Ta stopnja integracije se lahko doseže z uporabo IoT, analitike velikih podatkov in podatkov v oblaku, kar vodi do decentralizacije proizvodnje. Le-ta omogoča medsebojno komunikacijo med stroji, človeškimi viri, materiali in procesni krmilniki v realnem času. Sama količina komunikacijske učinkovitosti, preglednosti in nadzora minimizira čas izpada, odpadke, napake in tveganja v proizvodnih procesih. Integracija je torej ključna za uspešno vzpostavitev digitalnih platform za vzdrževanje [6].

Vzdrževanje je že dolgo eno od osrednjih poslovnih procesov vpeljave digitalizacije. Znotraj vseh tipov vzdrževanja je nujno hitro odkriti razloge za napake, popravila in izboljšave izdelkov. Digitalizacija vzdrževanja torej pomeni uporabo naprednih digitalnih tehnologij, ki so v pomoč pri odločanju in napovedovanju vzdrževanja. Na sliki 2 so predstavljene glavne funkcije digitalnega vzdrževanja. Kontinuirana razpoložljivost podatkov o sredstvih ali opremi v realnem času je ključna, saj pomaga pri spremljanju opreme in njenega delovanja v realnem času (na lokaciji dela ali na daljavo). Zbrani podatki skupaj z uporabo naprednih pristopov (strojno učenje, umetna inteligenca) so v pomoč pri diagnosticiranju vedenja, preferenc, vzorcev in napak in razumevanju le-teh. Tako se lahko celostno pristopi k reševanju težav in optimizaciji delovanja sredstev.



Slika 2: Glavne funkcije digitalnega vzdrževanja (povzeto po [11]).

Za vzpostavitev delujočega sistema pa ni dovolj samo tehnična rešitev, temveč sprememba celotne organizacije in akterjev. Ključno je namreč, da tudi struktura podjetja sledi tehničnemu napredku na področju digitalne transformacije [7].

2 RAZVOJ DIGITALNE PLATFORME

Proizvodni proces v podjetjih je najbolj časovno občutljiv del aktivnosti, ki se v podjetju izvajajo. Vzdrževanje opreme je časovno občutljiva aktivnost, saj se v primeru okvare opreme in tudi planiranega vzdrževanja ne izvaja proizvodnja v podjetjih ali pa se izvaja v manjšem obsegu. Kritično je, da se hitro določi vzrok napake in se le-to odpravi [8]. To za podjetja predstavlja velik strošek zaradi neobratovanja strojev in zmanjšane izkoriščenosti proizvodne opreme [9]. Integracija internet stvari (IoT) z uporabo pametnih senzorjev je pomemben korak pri pridobivanju informacij v realnem času o stanju strojev. V vse kompleksnejši proizvodnji, ki jo z avtomatizacijo in integracijo različnih sistemov prinaša Industrija 4.0, postajajo informacije ključen dejavnik za dosego učinkovite in zanesljive proizvodnje. Zaradi povečevanja kompleksnosti in količine podatkov postaja vzdrževanje opreme v pametnih tovarnah vse večji izziv. Težavo predstavlja predvsem časovno zamudno iskanje pravih informacij (npr. navodil za delo) in vzdrževanje vsega potrebnega znanja. Za zmanjševanje časa iskanja informacij in odpravo napak pri izvajanju operacij morajo imeti vzdrževalci pri delu nenehno na voljo ažurne informacije.

Zastavljeni izzivi pri razvoju platforme neposredno naslavljajo težave, ki se pojavljajo v praksi. S spletno rešitvijo za podporo vzdrževanju opreme bo omogočeno:

- spremljanje stanja (kvantitativno, lokacijsko zajeti podatki) in povečanje donosnosti delovnih sredstev s prediktivnim vzdrževanjem,
- povečanje učinkovitosti vzdrževalskih ekip (digitalni koledarji in distribuirana mobilna obveščanja),
- centraliziranje znanja in izkušenj v eno bazo - bazo znanja, ki povečuje fleksibilnost delovne sile (hiter, mobilni dostop),
- povečanje učinkovitosti in kvalitete vzdrževanja (povečana bo preglednost preteklih in prihodnjih nalog na posameznem delovnem sredstvu),
- digitalizacija starejših delovnih strojev z uporabo odprtega komunikacijskega API-ja.

Uporaba programske opreme za upravljanje z osnovnimi sredstvi že dlje časa utemeljeno, povečuje življenjsko dobo in učinkovitost osnovnih sredstev [7,9]. Digitalna platforma bo omogočila vstop v digitalno transformacijo podjetjem, ki so čakala prilagodljivo rešitev. Razvoj naprednih IT rešitev bo omogočil nadzor nad delovanjem strojne opreme in prediktivno vzdrževanje, h kateremu bo pripomogla tudi digitalizacija servisnih nalogov in vzpostavitev sistema alarmiranja. Z vključitvijo umetne inteligence (AI) se lahko omogoči samodejno ravnanje sistema v primerih nenadzorovanih odstopanj od predvidenih mejnih vrednosti posameznih parametrov in na ta način zagotovi visoko-kakovostno integrirano rešitev, ki je ekonomična in visoko storilna. Z odprtokodnim komunikacijskim kanalom želimo vzbuditi zanimanje individualnih strokovnjakov, da razvijejo svoje elektronske komponente, ki lahko dolgoročno znižajo stroške digitalizacije starejših strojev in bistveno prispevajo k integraciji fizikalnega in digitalnega sveta v tovarnah prihodnosti.

3 IMPLEMENTACIJA DIGITALNE PLATFORME VISIGHT

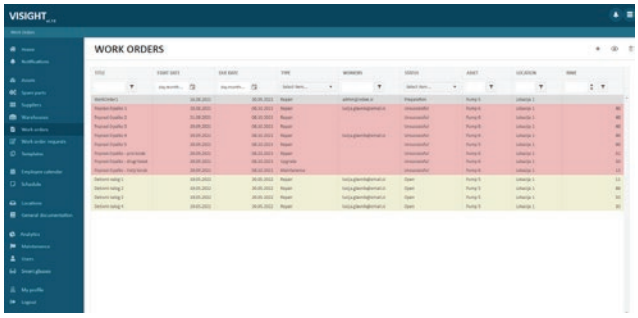
Glavni cilj razvoja in implementacije digitalne platforme VISIGHT je bil razviti spletno rešitev za podporo vzdrževanju opreme s 3 moduli:

a) modul za upravljanje vzdrževanja osnovnih / delovnih sredstev (Slika 3)
b) modul za vodenje vzdrževalcev (Slika 4)
c) modul za upravljanje z bazo znanja.

Za uspešno digitalizacijo vzdrževanja sta ključna dejavnika izobraževanje in usposabljanje, saj je znanje eno od pomembnih dobrin organizacije

[7,10]. Umestitev obogatene resničnosti ima tako smisel, saj lahko vzdrževanje postane bolj učinkovito. Integracija pametnih očal (npr. Google glasses) v proces vzdrževanja bi tako omogočila prostoročno pridobivanje informacij iz poslovnih informacijskih sistemov in pridobivanje konkretnih navodil za vzdrževanje konkretnega kosa oprema. Digitalna platforma bo s pomočjo pametnih očal (npr. Google Glasses) omogočala upravljanje celotnega procesa vzdrževanja (kaj in kdaj je bilo nekaj vzdrževano; katere so najpogostejše napake ipd.). S pomočjo sistema pa bo možno vzdrževalcem tudi posredovati ključne informacije za delo (npr. navodila za uporabo), ko jih bodo potrebovali. Sistem bo omogočal zajem (ali ročni vnos) meritev na delovnih sredstvih, njihovo vizualizacijo in analizo podatkov.

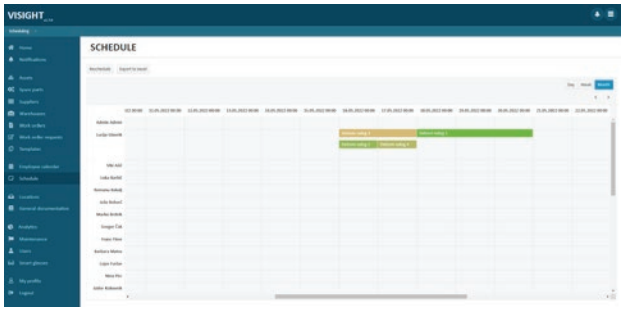
Z uporabo rešitve bo tako omogočeno celovito nadzorovanje vzdrževalnih nalogov in aktivnosti, prav tako pa bo mogoče skrajšati čas vzdrževanja (Slika 3 & Slika 4). Sistem temelji na združitvi sistema za vzdrževanje opreme in pametnih očal.



Slika 3: Modul za modul za upravljanje vzdrževanja osnovnih / delovnih sredstev.

Omogočal bo obojestransko vnašanje informacij (iz sistema na očala in iz očal nazaj v sistem). Sistem se lahko uporablja v različnih panogah/industrijah, kjer se pojavlja (zahtevno in) zamudno vzdrževanje.

Sistem lahko opozarja na planirane preglede in planirana vzdrževanja. Od vzdrževalca zahteva obisk lokacije in zajem dokaznega gradiva. Možno je slikati (z očali) stanje senzorjev / stroja in to shraniti v sistem. V primeru integracije senzorjev na posameznih delovnih sredstvih se stanje le-teh, na preprost intuitiven način, lahko spremlja prek spletnega vmesnika. Hkrati se lahko naroči proženje opozoril / alarmov, če določene vrednosti presegajo mejne vrednosti.



Slika 4: Modul za vodenje in razvrščanje vzdrževalcev.

4 ZAKLJUČKI

Vsak izdelek, sredstvo ali oprema ima določeno življenjsko dobo. S časom pride do tega, da so produkti vse manj učinkoviti, kar vodi do izpada, tj. obdobja, ko oprema preneha delovati ali ne deluje pravilno. Daljši kot je čas izpada, večji stroški nastajajo. Tu se prepozna vrednost vzdrževanja, saj lahko odpravi težave, in proizvodnja se nadaljuje. Ne glede na to, kdaj se vzdrževanje izvaja (po okvari ali preventivno tudi prej), je le-to neizogibna potreba [11].

Digitalna platforma Visight se lahko prilagodi za rabo v najrazličnejših industrijah (npr. proizvodna podjetja, turizem, servisne storitve). Z uporabo le-te bo mogoče zmanjšati izgubljen čas zaradi servisnih in vzdrževalnih del. Integracija baze znanja olajša iskanje pravih informacij, s tem pa bi se lahko učinkovitost vzdrževalca povečala (manj napak pri delu).

Končni cilj digitalne platforme VISIGHT je torej celostna programska platforma, ki je sestavljena iz več modulov, ki rešujejo različne probleme. Platforma je sestavljena iz več sestavnih delov zaradi večih razlogov. Vsekakor je eden bistvenih večja dostopnost zaradi nižje cene, hkrati pa vse industrije nimajo vseh problemov / potreb, ki jih naš digitalna platforma rešuje. Vsak posamezni modul vključuje svoj nabor sodobnih tehnologij, na osnovi katerih se lahko, v času trajanja raziskovalno / razvojnega projekta, razvije nove tehnologije.

Viri:

[1] Stark, J.: Digital Transformation of Industry. Springer Nature, Switzerland, AG, 2020.
[2] Pešić, A.: Digitalna transformacija podjetij (magistrsko delo). Univerza v Mariboru, Ekonomsko-poslovna fakulteta, 2019.
[3] Berger R. Strategy Consultants: The digital transformation of industryy ()
[4] Rodseth, H., Schjolberg, P., Merhaug, A.: Deep digital maintenance. *Adv. Manuf.* 5(2009), str. 299-310.
[5] Pai, Z., Honghui, W., Zhiqian, S., et. al.: Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 13(2019), str. 137–150.
[6] Ghobakhloo M. 2020. Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. Journal of Cleaner Production 252:1-21.
[7] Johansson, N., Roth, E., Reim, W.: Smart nad Sustainable eMaintenance: Capabilities for Digitalization of Maintenance. *MDPI Sustainability,* 11(13) (2019),3553, str. 1-19.
[8] Galar, D. Context Driven Maintenance: An eMaintenance Approach. *Manag. Syst. Prod. Eng*., 3(2014), str.112–120.
[9] Lee, J., Chen, Y., Al-Atat, H., et. al.: A systematic approach for predictive maintenance service design: Methodology and applications. *Int. J. Internet Manuf. Serv*., 2(2009), str. 76–94.
[10] Kajko-Mattsson, M., Karim, R., Mirijamdotter, A.: Essential components of emaintenance. *Int. J. Pedagog. Innov. New Technol*. 7(2011), str. 555–571.
[11] Karki, B. R., Porrasl J.: Digitalization for sustainable maintenance services: A systematic literature review. *Digital Business.* 1(2021), 100011.

MODERNIZACIJA NADZORNIH SISTEMOV V SODOBNI INDUSTRIJSKI PROIZVODNJI

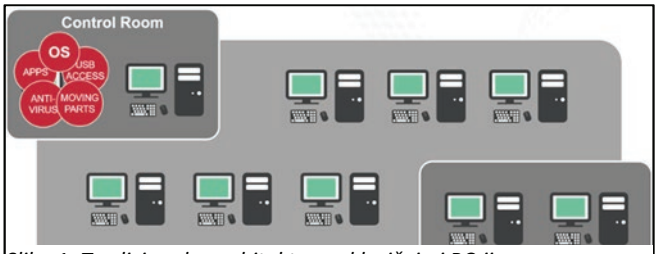
Jože PERKO, Peter SKOPEC
ControlTech d.o.o.

IZVLEČEK

Zakaj modernizacija? Lahko gre za projekte kibernetske varnosti, izboljšanje razpoložljivosti proizvodnje, rast produktivnosti, implementacijo mobilnih rešitev in nadzora dostopa ipd. Pogost sprožilec za modernizacijo v zadnjem času je potreba po nadgradnji starejših sistemov, ki tečejo na operacijskih sistemih, ki jih Microsoft ne podpira več. Glede na to, da praktično v vseh proizvodnih podjetjih intenzivno potekajo različne iniciative digitalizacije, je prav nadzorni sistem konvergenčna točka različnih deležnikov. Predstavljamo koncept modernizacije na vzorcu proizvodnih podjetij, s katerimi smo sodelovali, ter tipično izvedbo modernizacije večjega sistema. Nepredvidljivo servisno proceduro na strani HMI klienta, ki je lahko pomenila večuren izpad, zmanjšamo na manj kot 2 minuti. Zagotovimo izvajanje varnostnih protokolov, ki jih zahtevajo globalni korporativni standardi. Nadzorni sistem je pripravljen na prihodnost.

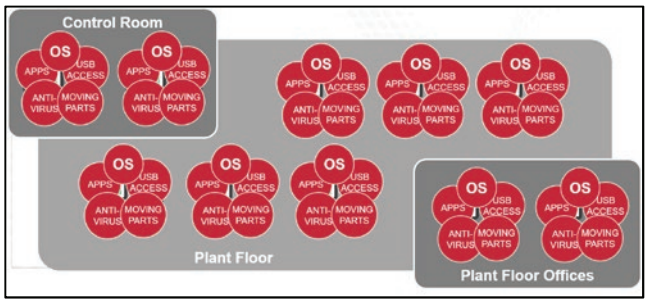
.

Izhodišče za razmislek: proizvajalci in uporabniki strojev se tipično zanašajo na (I)PC-je, na katerih poganjajo programe in različne aplikacije, ki jih potrebujejo za upravljanje in nadzor proizvodnje. Zanesljivo delovanje računalnikov je ključno za nemoten potek proizvodnje, zato se namenjajo veliko časa in sredstev za vzdrževanje. Vsak računalnik zahteva vzdrževanje in posodobitve uporabniških aplikacij, operacijskega sistema, protivirusne programske opreme, celo trdih diskov, ventilatorjev in napajalnikov, ki sčasoma odpovejo.



Slika 1: Tradicionalna arhitektura s klasičnimi PC-ji

Zamenjava osebnega računalnika vedno zahteva veliko časa. Celo v primeru, ko se vzdrževalci poslužujejo posnetkov diska (Image), s čimer bistveno skrajšajo postopek zamenjave, lahko proces traja ure in ure, kar povzroči drage zastoje proizvodnje.



Slika 2: Tradicionalna arhitektura - obseg vzdrževanja

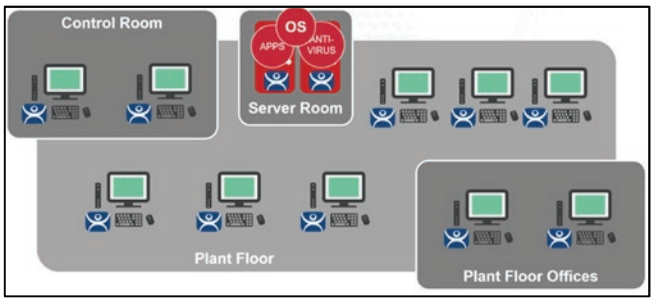
Računalniki so zelo ranljivi za zlonamerne napade. Dostopnost USB portov, lokalni trdi diski in možnost lokalnega upravljanja uporabnikov ustvarjajo veliko možnosti vsem, ki želijo povzročiti škodo.

ThinManager je namenjen zagotavljanju varnega okolja za upravljanje končnih naprav in distribucijo vsebin ter za zmanjšanje tveganj, ko preidemo v povezano industrijsko okolje. Ne glede na to ali je pobuda opisana kot »Povezano podjetje«, »Digitalna proizvodnja« ali »Industrija 4.0« je treba razmisliti o zaščiti industrijskega nadzornega omrežja, ko se omrežja na ravni podjetja uvajajo v ta okolja.

ThinManager te izzive premaguje tako, da omogoča zamenjavo osebnih računalnikov z varnejšimi in enostavneje upravljivimi vitkimi

odjemalci oz. ThinClient-i, ki nimajo trdih diskov ali gibljivih delov in imajo v osnovi blokiran dostop do USB portov.

S centralizacijo vseh aplikacij in procesov ter umestitev v zaščiteno področje strežnikov lahko proizvajalci zmanjšajo količino naprav, ki jih je potrebno upravljati, z nadomestitvijo terminalov oz. PC-jev s vitkimi odjemalci (ThinClient) pa se stroški vzdrževanja in čas



Slika 1: Centralizirana arhitektura ThinManager

izpada proizvodnje močno zmanjšata. V primeru odpovedi ThinManager odjemalca, ga lahko zamenjate v približno dveh minutah, popolnoma brez izgube podatkov.

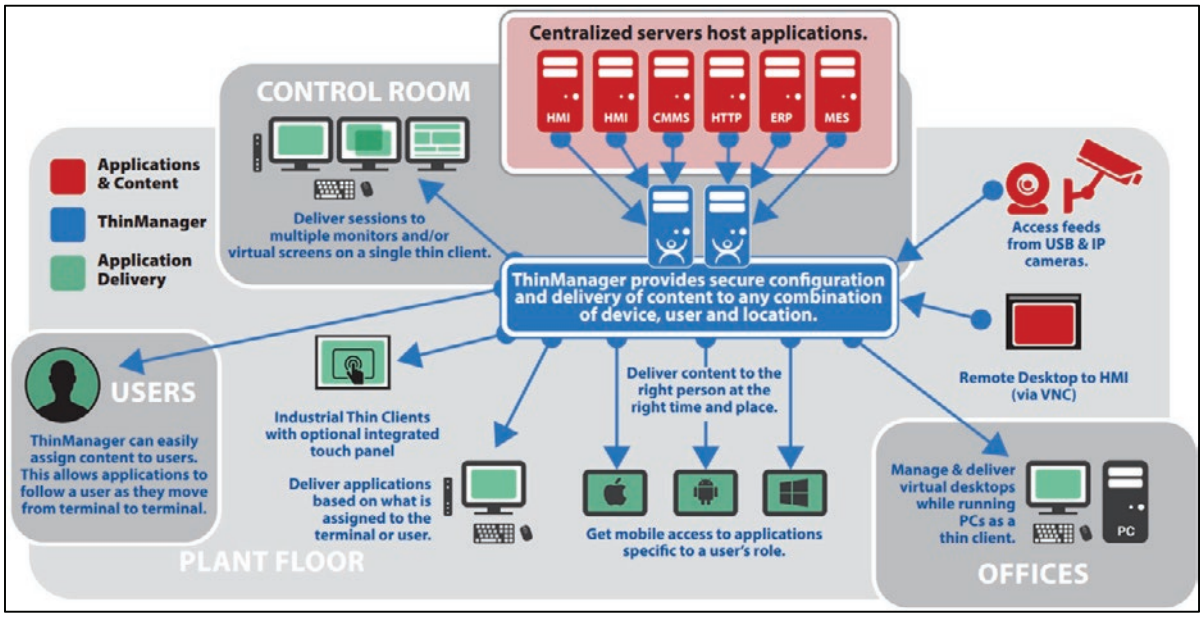
V skrajnem primeru lahko celo vaš osebni računalnik integrirate v sistem ThinManager v le nekaj minutah in ga centralizirano upravljate kot ThinManager odjemalca. Celotno rešitev nadgradite z zamenjavo osebnih računalnikov z industrijskimi vitkimi odjemalci in tako podaljšate življenjsko dobo strojne opreme.

Arhitektura ThinManager prav tako močno zmanjša število operacijskih sistemov, ki jih je potrebno vzdrževati. V virtualni ali fizični obliki.

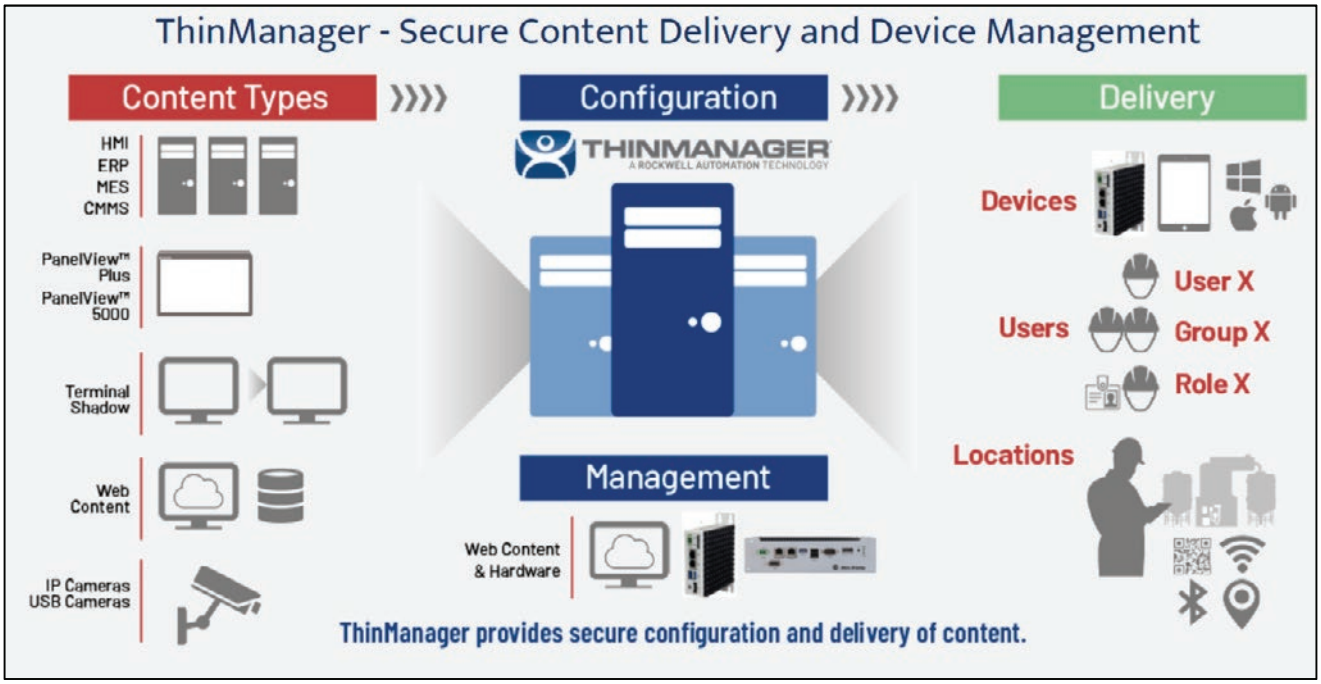
"Tehnologija ThinManager znižuje skupne stroške lastništva (TCO) informacijskega sistema do 50%."

Številne zmogljive in enostavne možnosti upravljanja, ki jih ponuja ThinManager, omogočajo veliko prilagodljivost. Aplikacije, nameščene na strežnikih, je mogoče posredovati na številne terminale ali različnim uporabnikom brez kakršne koli dodatne konfiguracije. V nekaj korakih hitro dodate nove uporabnike, terminale, vsebine video kamer in tako nadgradite vizualizacijo in nadzor v vaši tovarni. ThinManager centralizira distribucijo aplikacij odjemalcem in preko varne in šifrirane komunikacije odjemalcem dostavlja vsebino na osnovi oddaljenega namizja RDP.

ThinManager ponuja varno platformo tudi za distribucijo vsebin mobilnim napravam, zasnovano posebej za industrijske aplikacije in distribuira mobilno vsebino samo na določena mesta, ki jih sami definirate z različnimi tehnologijami za določanje lokacije kot so GPS,



Slika 2: Celotna arhitektura ThinManager



Slika 3: Distribucija vsebin glede na določene kriterije

WiFi, Bluetooth ali QR kode. ThinManager vam omogoča, da nastavite vnaprej določena varna območja, kamor je mogoče distribuirati mobilne vsebine. Še pomembneje pa je, da bo ThinManager preprečil dostop do mobilnih vsebin izven definiranega področja, ne glede na nivo dostopa, ki ga ima določeni uporabnik.

THINMANAGER
A Rockwell Automation Technology

Tovrstna centralizirana rešitev dviguje zanesljivost sistema s podporo redundantnih strežniških sistemov - t.i. Instant Failover, kar pomeni, da je zagotovljeno izvajanje aplikacij na redundantnem strežniku in v primeru odpovedi primarnega strežnika samodejni preklop odjemalcev na redundantni server.

ThinManager ponuja rešitev za izvedbo sodobnega, povezanega podjetja, saj zagotavlja pravo vsebino pravi osebi na pravem mestu. Povečajte svojo produktivnost, varnost vizualizacije in mobilnost z najzmogljivejšo industrijsko platformo za vitke odjemalce.

Viri:

[1]

https://thinmanager.com/profile/

[2]

https://www.rockwellautomation.com/en-za/products/software/factorytalk/operationsuite/thinmanager.html

OPC KOMUNIKACIJA – SEDANJOST IN PRIHODNOST

Andrej VRBANČIČ
INEA RBT – oprema za avtomatizacijo, d.o.o.

IZVLEČEK

OPC komunikacijski standard je v svetu avtomatizacije in raznih arhitekturah industrijske komunikacije stalnica že več kot dve desetletji. OPC je kot univerzalni protokol najbolj razširjen v projektih centralizacije podatkovnih tokov in osnovni korak v digitalizacijo. Smisel uvedbe OPC protokola je v enostavnosti zajema podatkov iz naprav različnih proizvajalcev, ki uporabljajo različne komunikacijske protokole, ter v centralizaciji in dostopnosti zajetih podatkov za različne odjemalce, predvsem na upravljalskih nivojih podjetij (planiranje proizvodnje, IT, nabava in prodaja, razvoj in konstrukcija, upravljanje kakovosti). Kratica OPC pomeni »Open Platform Communications«, sam komunikacijski standard pa ima svoje korenine že pred več kot 25imi leti. V svoji izvorni obliki OPC standard deluje le na napravah z Microsoft operacijskimi sistemi – tu je govora o OPC DA protokolu, naslednik omenjenega protokola pa je standard OPC UA (Unified Architecture). Slednji omogoča delovanje na drugih operacijskih sistemih (Linux) ter modernejše aplikacije (Cloud, IoT, razne Web arhitekture, ipd.). Danes najnovejša OPC orodja nudijo bogate funkcionalnosti, skoraj brezmejno povezljivost na eni strani industrijskih naprav (senzorji, PLC-ji, pogoni, roboti, CNC stroji, stroji za brizganje plastike, printerji,...) ter ERP/MES sistemov, baz podatkov, Excel/CSV orodij, hibridnih aplikacij in ostalih klijentov na drugi strani. V članku bodo predstavljene funkcionalnosti OPC strežnika KEPServerEX ter OPC Router-ja, orodja za dvosmerno komunikacijo OPC podatkov med OPC strežniki in ostalimi odjemalci OPC podatkov.

1 UVOD

Pojem Industrija 4.0 je že v lanskem letu praznoval okroglih 10 let, še vedno pa je precej mlajši kot sam OPC protokol. Vzporedno z Industrijo 4.0 se v zadnjih letih seveda pospešeno implementirajo digitalizirani poslovni modeli, prav tako se pospešeno digitalizirajo proizvodna okolja. Pri INEI RBT, kjer zametki našega delovanja segajo še v leto 1993, ko smo začeli (takrat še kot INEA d.o.o.) tržiti opremo za avtomatizacijo Mitsubishi Electric, smo v zadnjih letih vzporedno s potrebami trga začeli širiti proizvodni portfelj ter znanja in izkušnje, vezane na digitalizacijo proizvodnih okolij.

Danes so potrebe iz trga glede digitalizacije zelo različne. Na eni strani imajo v zadnjih letih proizvodna podjetja predvsem željo po zajemanju podatkov iz proizvodnih nivojev za potrebe odločevalnih nivojev. Službe planiranja, nabave, financ/računovodstva ter raziskav in razvoja, želijo vedeti kaj se v realnem času dogaja v procesih na proizvodnih tleh. Na drugi strani strojegradniki in sistemski integratorji trgu želijo ponuditi stroje/rešitve, ki so »IIoT Ready«. Želijo ponuditi rešitve z naprednimi funkcionalnostmi oziroma rešitve, katere je mogoče enostavno integrirati v odločevalne nivoje. Odnos med naročnikom in kupcem je na temu področju jasen, strojegradniki in sistemski integratorji ustvarjajo rešitve za proizvodna podjetja. Zadnje omenjeni želijo imeti proizvodni nivo dvosmerno povezan z vodstvenimi nivoji, za potrebe ERP in MES sistemov, baz podatkov ter ostalih odjemalcev. Podatki se pretvorijo v informacije, informacije pa so podlaga za optimalno odločanje kot odgovor na kompleksne razmere tako v dobavnih kot v prodajnih verigah.

Za začetek poglejmo kaj OPC komunikacija sploh je, kasneje pa preverimo kakšne rešitve nudimo pri našem podjetju za to področje.

2.1 OPC – Open Platform Communication

Termin »Open Platform Communication« lahko prevedemo kot platforma za odprto komunikacijo, kot je zapisano tudi v razlagi s strani OPC fundacije. OPC služi kot standard za varno in zanesljivo izmenjavo podatkov v svetu industrijske avtomatizacije in ostalih industrij.

Deluje interoperabilno in neodvisno od strojne opreme (v kolikor le obstajajo gonilniki za naprave katere želimo povezovati) ter povezuje naprave različnih proizvajalcev. Od leta 1996 dalje, ko je OPC kot medij komunikacije stopil v veljavo, OPC obsega množico specifikacij razvitih s strani razvijalcev strojne opreme, samih uporabnikov in seveda razvijalcev programske opreme. OPC kot medij komunikacije deluje med klijenti in strežniki, med večimi strežniki, z namenom izmenjave podatkov, alarmov in dogodkov v realnem času.

V svojih začetkih je OPC deloval le na Microsoft operacijskem sistemu (govorimo o OPC Classic oziroma OPC DA, tj. OPC Data Access). V začetkih je njegov namen bil povezati PLC protokole v nek standardizirani vmesnik za potrebe HMI in SCADA orodij. V osnovi je OPC Classic oziroma OPC DA specificiran kot podatkovna izmenjava med podatkovnimi točkami. Vrednost je lahko prebrana in zapisana za vsako podatkovno točko, sama vrednost podatkovne točke pa je definirana 1. kot dejanska vrednost, 2. kot časovna oznaka pri kateri je bila vrednost zajeta ter 3. kot podatek o kvaliteti oziroma »veljavnosti« podatka. Na začetku svojega obstoja je standard OPC (poznan tudi kot OPC Classic) bil prepoznan in implementiran v raznih industrijah, kasneje pa zaradi novih izzivov in potreb tudi ustrezno dodelan.

Leta 2008 se je na osnovi OPC DA standarda pojavila bolj napredna različica, tj. OPC UA. Slabost OPC DA standarda je ta, da je vezan izključno na Microsoft operacijski sistem, saj deluje na Microsoftovih tehnologijah COM in DCOM. Omenjena slabost je hkrati tudi bila povod za razvoj OPC UA. OPC UA danes deluje na Windowsih, Apple OSX, Androidu, Linuxu in ostalih operacijskih sistemih, ter na strojnih platformah PC, strežnikih, oblakih ter PLC/mikro krmilnikih. Danes še vedno veliko število OPC Server inštalacij temelji na OPC DA protokolu. OPC UA je v današnjih časih najbolj pomemben komunikacijski standard v projektih Industrije 4.0.

OPC strežnik se lahko pojavlja v dveh oblikah. Prva oblika so v strojno opremo vgradljivi OPC strežniški vmesniki (npr. v PLC krmilnik ali v stroj za brizganje plastike), ki že sami zagotavljajo OPC povezljivost za klijente. Druga oblika pa so neodvisni OPC strežniki, ki večinoma delujejo kot programska oprema. Slednji zagotavljajo precej bolj široko podporo za množico naprav, ki se najdejo v proizvodnih obratih širom sveta (senzorji, pogoni, PLC krmilniki, roboti, CNC stroji, stroji za brizganje plastike in ostali). Večinoma omenjeni stroji oziroma naprave ne vsebujejo že vgrajenih OPC strežniških vmesnikov, temveč le te prihajajo z napravo specifičnimi protokoli (Profinet, CC-Link, EtherNet/IP, EUROMAP77 in ostali). Prav tako neodvisni OPC strežniki, ki delujejo kot programska oprema, ponujajo znatno več funkcij kot vgrajeni strojni OPC strežniki. Poleg samega centraliziranega pregleda povezanih naprav nudijo enostavno konfiguracijo, zmožnost periodičnega posodabljanja podprtih naprav, večjo stabilnost in varnost ter ostale funkcije.

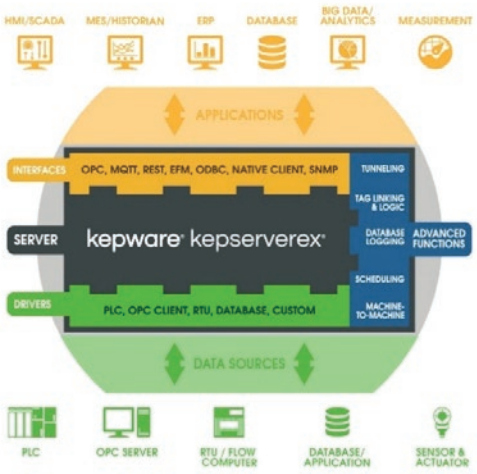
V OPC komunikacijskih arhitekturah več OPC strežnikov lahko komunicira med seboj ter z OPC klijenti (OPC Client). Tipični OPC klijenti so npr. SCADA in razne hibridne aplikacije, MES, ERP in Cloud sistemi, baze podatkov ter podobne aplikacije, ki so odvisne od podatkov. Medsebojna izmenljivost podatkov med izvori podatkov in ciljnimi destinacijami (pri čemer se njihova vloga lahko tudi zamenja) je hkrati tudi eden od ciljev in smislov Industrije 4.0. Sodobna proizvodna okolja po notah Industrije 4.0 težijo k temu da najrazličnejše naprave iz proizvodnega okolja zagotavljajo podatke za ciljne destinacije (ERP, MES, baze podatkov in ostalo), slednje pa so prav tako zmožne delovati kot izvor novih/povratnih podatkov in ukazov. Brez enotnega protokola (mislimo na OPC UA) in OPC strežnikov bi bilo povezovanje med izvori podatkov in ciljnimi destinacijami zelo kompleksno, s pomočjo OPC strežnika pa je celotna komunikacija poenotena, centralizirana in hitrejša.

2.2 KEPServerEX – OPC strežnik proizvajalca PTC/Kepware

KEPServerEX deluje kot OPC strežnik oziroma komunikacijska platforma, ki nudi en vir podatkov za različne klijente in aplikacije. Sama platforma uporabniku omogoča povezovanje ter nadzor/monitoring naprav in programskih aplikacij preko enega intuitivnega uporabniškega vmesnika. Kot orodje na prvem mestu uporablja OPC ter IT usmerjene komunikacijske protokole

(SNMP, ODBC in razne spletne storitve). Kot OPC platforma zagotavlja dostop do podatkov na strojni opremi, njihovo agregacijo, optimizacijo, povezljivost, varnost in tudi diagnostiko. Sam dostop do podatkov preko OPC protokola zagotavljajo vgrajeni gonilniki za posamezno strojno opremo, razni lastni protokoli (GE NIO, SuiteLink/FastDDE in Splunk), IT protokoli (MQTT, REST, ODBC in SNMP) ter industrijam specifični protokoli (sektorji Oil&Gas, Power in npr. Building Automation). Kar se tiče podpore OPC protokolom, KEPServerEX v osnovi pokriva OPC UA (Unified Architecture), OPC DA (Classic), OPC AE (Alarms & Events) in OPC HDA (Historical Data Access). V okviru strojne opreme je zajem podatkov možen iz opreme za avtomatizacijo vseh glavnih proizvajalcev ter strojev za brizganje plastike (Euromap 77) in CNC strojev.

Za IoT potrebe KEPServerEX ponuja povezljivost za Cloud, IT in ostale IoT aplikacije. Podprti so MQTT (za SCADA namene in namene oddaljenih omrežij), ODBC (za namene baz podatkov), REST in SNMP (izmenjava informacij med mrežnimi napravami). Poleg naštetih KEPServerEX podpira še Splunk API, Thin-Client Terminal Server in ThingWorx.



Slika 1: Komunikacijska platforma KEPServerEX

2.3 Modularnost platforme KEPServerEX

KEPServerEX v osnovi deluje kot knjižnica z več kot 150 gonilniki za naprave, klijente in napredne vtičnike. Povezuje naprave najbolj poznanih dobaviteljev strojne opreme (Mitsubishi Electric, Allen Bradley, GE, Omron, Schneider, Siemens,...) ter industrijskih iniciativ (MTConnect, DNP3, IEC 61580/60870 in BACnet). Kot vir podatkov nudi dostop do aplikacij ERP, MES, HMI in SCADA preko OPC in drugih protokolov.

Vse našteto se morda bere kot kompleksna množica funkcionalnosti, a kot produkt je za uporabnika dostopen po kosih oziroma v paketih ter dodatnih vtičnikih (»Plug-INih«). Paketi so oblikovani glede na industrijske vertikale, glede na proizvajalce strojne opreme oziroma tipične industrijske aplikacije. Vse skupaj je modularno združljivo.

Tako na primer Mitsubishi, Siemens, Omron ali pa Allen-Bradley »Suite« paketi nudijo gonilnike za podporo proizvodom in komunikacijskim protokolom, ki so specifični za naštete proizvajalce.

Za industrijske vertikale so namenjeni npr. »Building Automation«, »Oil and Gas« in pa »Power« paketi. Omenjeni paketi združujejo gonilnike za specifične protokole in naprave, ki se pogosto pojavljajo bodisi na področju avtomatizacije zgradb, v energetiki ali pa v »Oil and Gas« industriji.

Zanimiv paket je »Manufacturing Suite«, ki vsebuje številne gonilnike in podporo za več kot 100 komunikacijskih protokolov, tistih, ki se najbolj pogosto uporabljajo v različnih proizvodnih sektorjih. Paket omogoča »zapiši/preberi« transakcije ter polno integracijo podatkov za HMI, SCADA, MES, Historian in ERP aplikacije.

Sama platforma je razširljiva tudi z naprednimi vtičniki (Advanced Plug-Ins), ki nudijo bolj napredne strežniške funkcionalnosti. Tako recimo »Alarms & Events« vtičnik omogoča prejemanje in pregled nad alarmi v procesu, pregled nad aktivnostmi operaterja ter prejemanje in sledljivost sporočil. »IoT Gateway« napredni vtičnik denimo omogoča razširljivost za potrebe MES spletnih storitev in ostalih sistemov ter omogoča podatke v realnem času neposredno za potrebe »Big Data« analitike. »IoT Gateway« vsebuje MQTT Client ter REST Client/Server. V sklopu naprednih vtičnikov so na voljo še »Advanced Tag«, »Datalogger«, »EFM Exporter«, »Industrial Data Forwarder for Splunk«, »Local Historian«,

»Media Level Redundancy«, »Scheduler« in »SNMP Agent« vtičniki.

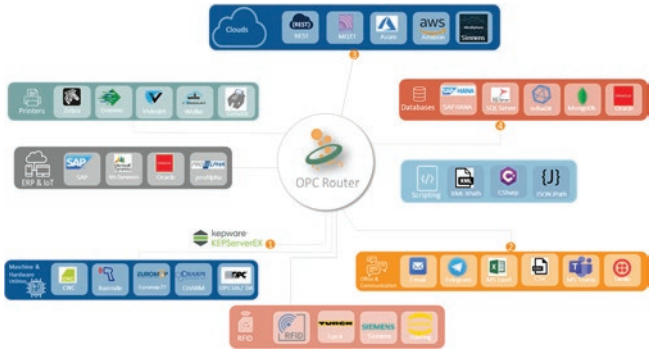
KEPServerEX torej deluje kot orodje za centralizacijo podatkov. Iz proizvodnih naprav zajema podatke, jih centralizira ter jih nudi za odjem različnim uporabnikom. Zelo učinkovito deluje tudi v paru z orodjem OPC Router katerega predstavljamo v nadaljevanju.

3.1 OPC Router

Ko imamo enkrat proizvodne podatke centralizirane in na skupnem protokolu (OPC), se nam odpirajo precej široke možnosti glede ciljnih destinacij oziroma odjemalcev teh podatkov. Povsem nove možnosti nudi orodje OPC Router, ki je zmožen dvosmerno pošiljati OPC podatke od izvora podatkov do ciljne destinacije. Ker je povezljivost dvosmerna, je tako lahko izvor podatkov tudi ciljna destinacija ob naslednji izmenjavi podatkov in seveda obratno. OPC Router dvosmerno distribuira OPC podatke med skupno osmimi možnimi skupinami izvorov podatkov oziroma ciljnimi destinacijami:

1. Najbolj osnoven vir OPC podatkov so OPC strežniki, med njimi tudi KEPServerEX
2. Drugo skupino predstavlja strojna oprema – CNC stroji, stroji za brizganje plastike, naprave za nadzor pristopa (Charm vtičnik), Bar Code skenerji in naprave z vgrajenimi OPC UA/DA vmesniki
3. ERP&IoT aplikacije – SAP, MS Dynamics, Oracle in proAlpha
4. Tiskalniki za označevanje produktov – Zebra, Domino, Videojet, Wolke in generični TCP/IP tiskalniki
5. Aplikacije v oblaku, ki temeljijo na REST/MQTT, Azure, Amazon AWS ter Siemens MindSphere
6. Baze podatkov SAP HANA, SQL Server, InfluxDB, MongoDB in Oracle
7. Razna orodja E-mail, Telegram, MS Excel, CSV, MS Teams in twilio
8. RFID orodja Turck, RFID, Siemens in Harting

Orodje temelji na vtičnikih za vse naštete podatkovne klijente in izvore, je pa tudi programabilen s skriptnim jezikom, XML Xpath, Csharp in JSON Jpath programskimi jeziki.



Slika 2: Povezovanje izvorov podatkov in ciljnih destinacij znotraj orodja OPC Router

Programabilnost tega orodja prinaša povsem nove možnosti. S pomočjo navedenih jezikov lahko določamo pogoje, ob katerih se sprožijo tokovi podatkov. Nazoren primer je recimo informacija o zaključenem proizvodnem nalogu, katero preko PLC krmilnika na proizvodnji liniji prejme OPC Router. Glede na naštete odjemalce je lahko informacija poslana dalje na primer na SAP sistem, ki v povratni smeri sproži nov proizvodni nalog. Informacija o zaključenem proizvodnem nalogu preko OPC Routerja lahko sproži tudi tisk nalepk za označevanje proizvodov, ki se pakirajo npr. v kartonske škatle. Še eden od mogočih tokov podatkov je recimo sporočanje alarma iz proizvodne linije. Oddelek vzdrževanja preko orodja Microsoft Teams prejme opozorilo ter ustrezno odreagira ali pa enostavno resetira napako.

Slika 3: Delovno polje OPC Routerja za povezovanje izvorov podatkov in ciljnih destinacij

Uporabniški vmesnik OPC Routerja temelji na »Drag-and-Drop« principu, kar pomeni da v delovnem polju povezujemo izvore podatkov s ciljnimi destinacijami ter pri temu določamo pogoje, ob katerih se komunikacija zgodi. Po korakih povezovanje izgleda sledeče:

1. Izberemo objekt izvora podatkov
2. Izberemo ciljno destinacijo za pošiljanje podatkov
3. Na izvorih in ciljnih destinacijah določimo TAGe
4. Določimo povezave med izvori in ciljnimi destinacijami podatkov
5. Določimo »triggerje« za komunikacijo

OPC Router orodje bazira na osnovnem OPC Router modulu, katerega se dopolnjuje z že omenjenimi vtičniki. Če na primer uporabnik želi povezati stroje za brizganje, ki uporabljajo Euromap 77 protokole, ter na primer SAP ERP sistem, bo potrebno uporabiti bazni OPC Router ter Euromap 77 in SAP vtičnike. Razvijalec in proizvajalec orodja OPC Router je nemško podjetje inray Industriesoftware Gmbh, ki orodje stalno razvija in dopolnjuje, skladno s trendi na trgu OPC klijentov pa se v nabor vtičnikov postopoma uvaja nove vtičnike.

KEPServerEX in OPC Router v paru delujeta komplementarno. KEPServerEX deluje kot izvor OPC podatkov, s številnimi gonilniki »bogato« pokriva strojno opremo na proizvodnih tleh. Na drugi strani OPC Router z raznimi vtičniki za ciljne destinacije na vodstvenem nivoju nudi bogate možnosti obdelave podatkov. Prvi torej nudi zajem podatkov in pošiljanje na OPC Router, slednji pa poskrbi za nadaljnjo distribucijo podatkov. Dodatna prednost je dvosmerna izmenjava podatkov med klijenti.

4 SKLEP

Brez dvoma je OPC komunikacija sedanjost in hkrati pogoj za digitalizacijo proizvodnih okolij. Večinoma vsa proizvodna podjetja s srednje ali pa velikim strojnim parkom že uvajajo rešitve digitalizacije. Samo zajemanje podatkov iz proizvodnih nivojev je osnovni pogoj za digitalizacijo proizvodnje. A preden se podjetje sploh loti prave digitalizacije, je osnovnega pomena sama priprava strojnega parka na kaj takega. Tu imamo v mislih povezovanje strojev na centralno strojno opremo (PC oziroma strežnik), kjer bo sam OPC strežnik deloval. Osnovni žični standard za povezovanje je Ethernet, kjer pa zna priti do problema, saj je strojni park v nekaterih proizvodnjah iz starostnega vidika lahko zelo raznolik. Zna se zgoditi, da nekateri starejši stroji morda niti ne temeljijo na PLC krmilnikih, kar predstavlja nov izziv. Spet drugi stroji temeljijo na starejših PLC krmilnikih, ki še nimajo vgrajene Ethernet komunikacije. Ta problem je mogoče reševati s komunikacijskimi pretvorniki, ki ustrezno prevajajo npr. serijski protokol na Ethernet protokol (pretvorniki Anybus proizvajalca HMS Networks). Izziv predstavljajo tudi CNC stroji ali pa stroji za brizganje plastike, ki so »zaklenjeni«. Čeprav so moderni in morda že sami vsebujejo OPC strežniški vmesnik, so zaklenjeni za zajem podatkov.

Ob vseh naštetih izzivih se je digitalizacije proizvodnega nivoja potrebno lotiti sistematsko – potrebno je narediti popis strojnega parka ter ugotoviti ustreznost izhodne komunikacije za povezljivost na OPC strežnik. Kasneje je potrebno zagotoviti enoten izhodni protokol strojev (tj. Ethernet) ter celotno komunikacijo pripeljati do centralnega strežnika. Šele kasneje se začne digitalizacija oziroma povezovanje izvorov podatkov in ciljnih destinacij.

Pri INEI RBT v zadnjih letih pospešeno širimo bazo referenc, predvsem pa znanja in izkušenj iz področja zajemanja proizvodnih podatkov. Ob pokrivanju celotnega Ex-YU teritorija smo se z vgradnjo OPC strežnika srečali že s prav vsemi glavnimi industrijskimi vertikalami, nov izziv pa ob hkratnem nudenju tako OPC strežnika kot OPC Routerja vsekakor predstavljajo inovativni modeli komunikacije.

Viri:

[1] PTC, Inc, Kepware. Interno gradivo.
[2] inray Industriesoftware Gmbh. Interno gradivo.
[3] The OPC Foundation. What is OPC? Več na https://opcfoundation.org/about/what-is-opc/.

PRIMER UPORABE TEHNOLOGIJE VERIŽENJA BLOKOV V INDUSTRIJI 4.0

Gal GANTAR[1], Gašper GANTAR[2,3]
[1]Fakulteta za računalništvo in informatiko, Univerza v Ljubljani
[2]Visoka šola za proizvodno inženirstvo
[3]Fakulteta za varstvo okolja

IZVLEČEK

V prispevku je opisana teorija veriženja blokov in njihovih kriptografskih rešitev. Opisano je osnovno delovanje tehnologije veriženja blokov in temeljni koncepti, ki veriženje blokov razlikujejo od ostalih rešitev shranjevanja podatkov. V prispevku je prikazan tudi primer uporabe veriženja blokov v industriji in temeljne prednosti tovrstnega pristopa pred dosedanjimi rešitvami.

1 UVOD

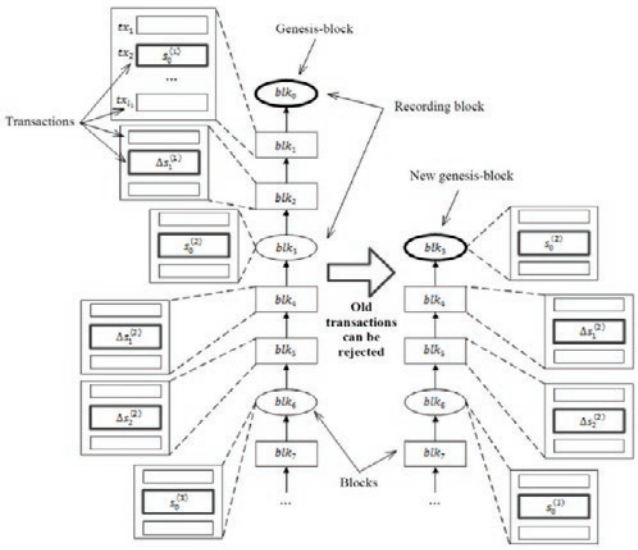
Tehnologija veriženja blokov (angl. *blockchain*) ima velik potencial za uporabo v industriji. Kriptografske rešitve, ki predstavljajo njen temelj, omogočajo shranjevanje podatkov varneje in z večjo transparentnostjo kot dosedanje rešitve.

V prispevku so najprej opisane teoretične osnove, nato pa prikazana možnost uporabe tehnologije veriženja blokov v proizvodnih podjetjih.

2 TEORETIČNE OSNOVE

2.1 Veriženje blokov

Veriženje blokov v osnovi predstavlja povezan seznam zapisov – podatkovnih blokov, ki so med seboj enolično povezani s kriptografskimi dokazi. Vrstni red podatkovnih blokov je kronološko vnaprej določen, tako da je dodajanje novega podatkovnega bloka v verigo mogoče samo na koncu verige. Posamezni podatkovni blok vedno vsebuje časovni žig, podatke o avtorju podatkovnega bloka, digitalni podpis avtorja in transakcijske podatke. Prvotno je bila tehnologija ustvarjena z namenom, da transakcijski podatki v podatkovnih blokih predstavljajo transakcije digitalne valute med uporabniki verige podatkovnih blokov. Tehnologija pa se je v zadnjih letih razvila do te mere, da sodobne različice veriženja podatkovnih blokov omogočajo, da transakcijski podatki niso več omejeni zgolj na finančne transakcije, temveč zavzemajo poljubne vrednosti. Na sliki 1 je prikazan princip dodajanja novega podatkovnega bloka v verigo.



Slika 1: Shema dodajanja novega podatkovnega bloka na verigo blokov [1]

2.2 Decentralizacija podatkov s pomočjo veriženja blokov

Shranjevanje velikih količin podatkov je izziv, ki obstaja približno toliko časa kot računalniki. Odkar je računalnik postal vsakdanje orodje množic, je bila hramba velike količine podatkov enake vrste (npr. uporabniških imen, seznamov

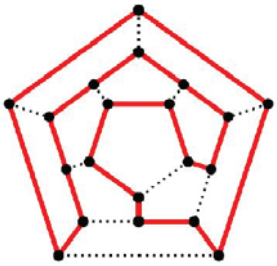
Gal Gantar[1], Gašper Gantar[2,3]
[1]Fakulteta za računalništvo in informatiko, Univerza v Ljubljani
[2]Visoka šola za proizvodno inženirstvo
[3]Fakulteta za varstvo okolja

izdelkov, stanja delovanja stroja ipd.) velik izziv računalništva. Za ta namen so bili razviti standardi, namenjeni bazam podatkov, kot so SQL in modernejši MongoDB, ki omogočajo hrambo več milijard dokumentov, hkrati pa tudi hitro preiskovanje in urejanje posameznega dokumenta. Glavna lastnost tovrstnih rešitev je, da so centralizirane – vsi podatki so shranjeni na enem ali več strežnikih v lasti podjetja, ki podatke hrani. Med hranilcem podatkov in uporabniki torej vlada hierarhija, saj lahko lastnik strežnika nemoteno spreminja, dodaja ali briše podatke.

Nasprotno pa so verige podatkovnih blokov primer decentralizirane hrambe podatkov. Temeljna tehnična lastnost verig podatkovnih blokov je, da ima vsak uporabnik verige svojo kopijo vseh podatkov, ki so na verigi shranjeni. Tak način hrambe je sicer lahko prostorsko potraten, zato moderne verige večinoma hranijo polno kopijo verige na omejenem številu mest – glavnih ponudnikih vozlišč, vsak uporabnik pa dodaja podatke v verigo s pomočjo svojega zasebnega ključa, opisanega v naslednjem razdelku. Uporabniki verig podatkovnih blokov so torej med seboj popolnoma neodvisni in enakovredni. Nihče (niti tisti, ki ima potencialno v lasti vse ponudnike vozlišč) ne more odstranjevati ali spreminjati podatkov, ki so že zapisani v verigi. Veriženje blokov torej ponuja način enosmernega shranjevanja podatkov, kjer verodostojnosti zapisov ne zagotavlja zaupanje v ponudnika nekega strežnika, ampak kriptografski dokazi [2].

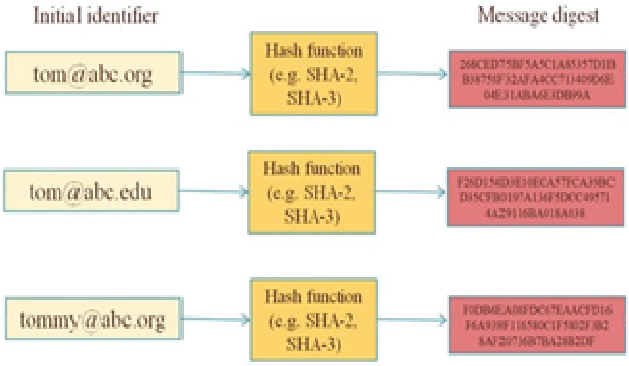
2.3 Osnove kriptografije

Vsak uporabnik ob začetku uporabe prejme zasebni in javni kriptografski ključ. Javni ključ vsakega uporabnika je dostopen vsem ostalim uporabnikom verige, zasebni ključ pa hrani samo uporabnik. S pomočjo zasebnega ključa lahko uporabnik digitalno overi podatke, ki jih zapiše na verigo blokov, vsi ostali uporabniki pa se lahko s pomočjo javnega ključa prepričajo, da je avtorstvo podatkov pristno. Med najbolj priljubljenimi kriptografskimi postopki za digitalne podpise sta RSA in ECDSA, ki delujeta na osnovi teorije števil in Eulerjeve formule, ter kriptografija eliptičnih krivulj (ECC), ki deluje na osnovi algebraičnih izrekov. V zadnjih dveh letih postajajo vse bolj priljubljeni dokazi z ničelno informacijo (angl. *zero-knowledge proofs*), ki zagotavljajo verodostojnost s pomočjo reševanja NP polnih problemov diskretne matematike. Na sliki 2 je prikazana shema Hamlitonovega cikla v grafu, kar je primer NP polnega problema, uporabljenega v dokazih z ničelno informacijo. Digitalni podpis avtorja bloka zagotavlja, da se vsebina bloka ni spreminjala [3].



Slika 2: Iskanje Hamlitonovega cikal v grafu [4]

Enoličnost vrstnega reda blokov je zagotovljena s skrčevalnimi funkcijami. Primer skrčevalne funkcije je SHA-3, katere delovanje je prikazano na sliki 3. Vsak na novo dodani blok v verigi vsebuje skrčitev vseh blokov pred njim, kar onemogoča, da bi med bloka kasneje vrinili še kakšen blok.



Slika 3: Prikaz zgoščevanja nizov s pomočjo skrčevalne funkcije SHA-3 [5]

Na koncu vsakega bloka je dokazilo o delu (angl. *proof of work*). Dokazilo zagotavlja, da je bilo za dodajanje bloka opravljeno računalniško delo oziroma reševanje problema, ki porabi veliko procesorske moči v računalniku. Potencialna sprememba samo enega izmed podatkovnih blokov bi torej zahtevala ponovno izračunavanje vsek dokazov za vse podatkovne

Gal Gantar[1], Gašper Gantar[2,3]
[1]Fakulteta za računalništvo in informatiko, Univerza v Ljubljani
[2]Visoka šola za proizvodno inženirstvo
[3]Fakulteta za varstvo okolja

bloke za njim, kar pa je v praksi skoraj nemogoče.

3 PRIMER UPORABE V INDUSTRIJI

3.1. Beleženje zgodovine uporabe izdelka ter prikrivanje in spreminjanje zgodovine uporabe

Vsak večji industrijski izdelek ima vgrajeno kontrolno računalniško vezje, ki izdelek upravlja. Vse od avtomobilov in gospodinjskih aparatov do proizvodnih linij in obdelovalnih strojev vodi računalnik. Kontrolno vezje ima vrsto senzorjev, s katerimi zbira podatke o tem, kaj se dogaja z izdelkom in na kakšen način je uporabljen.

Za primer vzemimo osebno vozilo. Sodobno osebno vozilo ima več kot 100 različnih senzorjev, ki merijo število prevoženih kilometrov, količino in tlak olja v motorju, temperaturo hladilne tekočine, pretok in temperaturo zraka, ki gre skozi zračni filter, pritisk goriva v brizgalnih šobah, tlak zraka v turbini, temperaturo izpušnih plinov in še mnogo drugih parametrov. Če računalnik zazna, da katerakoli komponenta avtomobila ne deluje pravilno, računalnik vozniku javi napako in jo shrani. Zabeleži tudi okoliščine, v katerih so se napake zgodile (število prevoženih kilometrov, datum in čas napake, hitrost avtomobila, motorne vrtljaje ob napaki, temperaturo hladilne tekočine v motorju) in čas, ko je bila napaka odpravljena. Računalnik beleži tudi vklop varnostnih sistemov (zaviranja v sili, zategovanj varnostnih pasov, zračnih vreč idr.) in morebitno nepravilno ravnanje voznika – kolikokrat je lastnik pognal motor v (pre)visoke vrtljaje ali mu s priganjanjem pretirano zvišal temperaturo hladilne tekočine, če je kljub napaki nadaljeval vožnjo, zamudil predpisan interval servisiranja ipd. Iz zbranih podatkov (ur delovanja posameznih sistemov) je mogoče sklepati tudi na njihovo rabo oziroma izrabo.

Večini deležnikov v življenjski dobi uporabe vozila je v interesu, da so podatki o zgodovini uporabe čim bolj avtentični: 1) proizvajalcu vozila, ki kupcu daje garancijo na prodano vozilo, 2) zavarovalnici, ki želi raziskati vzroke nesreče, 3) serviserju, ki želi odkriti in odpraviti napake med delovanjem in vzroke zanje, 4) kupcu rabljenega vozila, ki želi preveriti, koliko in katere napake so se pojavile pri prejšnjem lastniku, kako jih je odpravljal, kako je vozilo servisiral in kakšne so bile njegove vozniške navade idr.

Težava nastopi, kadar lahko podatke v spominu kontrolnega računalnika v napravi spreminja kdor koli, ki ima dostopom do naprave. V primeru osebnega vozila je to serviser ali celo bolje poučen uporabnik vozila, ki lahko spremeni podatke o prevoženih kilometrih, izbriše zavedene napake ipd.

Enako velja za industrijsko opremo (obdelovalne stroje, stiskalnice, stroje za predelavo plastike, livarske stroje ter drugo proizvodno opremo, kot je podajalna oprema, proizvodnje in montažne linijeidr.). Tudi te naprave imajo vgrajene senzorje in beležijo podatke, iz katerih je mogoče sklepati, koliko in kako so bili uporabljani: koliko delovnih ur so opravili, koliko delovnih gibov so opravili, ali so bili obremenjeni na zgornjim mejah zmogljivosti, ali so bili pogosto preobremenjeni, ali je pri uporabi prišlo do udarca ali kolizije, ki bi lahko povzročila izgubo kakovosti ali skrajšanje življenjske dobe ključnih komponent, kot so glavna vretena in vodila. Vsi ti podatki so pomembni pri uveljavljanju garancije, odpravljanju napak in prodaji stroja. Poseganje v kontrolne računalnike proizvodne opreme je bolj zapleteno kot poseganje v računalnike osebnih vozil. A interes za polno preglednost zapisanih podatkov in preprečevanje možnosti za njihovo spreminjanje ostaja enak (proizvajalec prepozna napačno uporabo in se v primeru reklamacij nanjo sklicuje, kupec rabljenega stroja se lahko prepriča, da je bil uporabljen v skladu z navodili, dobro vzdrževan, prejšnjemu latniku ni povzročal težav in je v takšnem stanju kot navaja trenutni lastnik oz. prodajalec). Na tak način rabljeni stroji in druga oprema ohranjajo višjo vrednost, kar je zagotovo tudi v interesu proizvajalca.

3.2. Rešitev problema z uporabo veriženja blokov

Rešitev problema je beleženje zgodovine uporabe proizvajalne opreme s pomočjo veriženja blokov. Vsaki napravi bi ob izdelavi pripadala zasebni in javni ključ, ki bi predstavljala serijsko

Gal Gantar[1], Gašper Gantar[2,3]
[1]Fakulteta za računalništvo in informatiko, Univerza v Ljubljani
[2]Visoka šola za proizvodno inženirstvo
[3]Fakulteta za varstvo okolja

številko izdelka na verigi. V predpisanih časovnih intervalih bi naprava na verigo blokov dodajala nove podatkovne bloke, v katere bi zapisala trenutno stanje naprave. Naprava bi podatkovni blok podpisala s svojim zasebnim ključem. Če bi naprava zaznala, da katera od komponent ne deluje pravilno, bi to prav tako zapisala v verigo podatkovnih blokov. Poleg tega bi se vsak tehnični pregled in servis zabeležil na verigi blokov, v tem primeru bi podatkovni blok podpisal zasebni ključ serviserja ali izvajalca pregleda in s tem potrdil, da je bil postopek opravljen po pravilih. Podatki v verigi blokov bi torej predstavljali popoln pregled zgodovine uporabe naprave, kriptografski podpisi in časovni žigi v posameznih podatkovnih blokih verige pa bi zagotavljali, da so podatki ostali nespremenjeni.

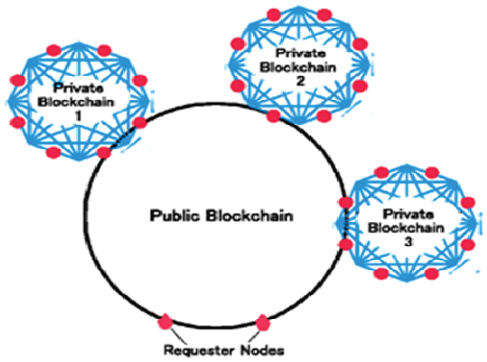
Na tak način bi lahko pooblaščena oseba proizvajalca naprave ali kupec rabljene naprave natančno preverili, kakšne težave, obremenitve ali potencialne primere napačne uporabe je zabeležila naprava in bil prepričani, da so podatki natančni in nespremenjeni.

Veriga blokov bi torej omogočala varen in transparenten način shranjevanja podatkov, v katerem brisanje in spreminjanje zapisov ni mogoče. Tak operacijski sistem bi povečal vrednost rabljenih naprav, kar je tudi v interesu proizvajalca. Prav tako bi omejil napačno uporabo naprav.

Seveda se tu pojavi težava z zasebnostjo podatkov. Vsi podatki na večini verig podatkovnih blokov so javno dostopni vsem napravam v verigi. To bi lahko pomenilo, da so na verigi shranjeni zaupni podatki, ki jih uporabnik naprave ne želi razkriti.

Kjer je v obtoku več tisoč izdelkov (gospodinjski aparati, vozila…), dejstvo, da so podatki na verigi podatkovnih blokov javni, ne predstavlja velikega tveganja za uporabnika, saj bi vsaka naprava podatke v verigo zapisovala preko svojega naslova v verigi, ki ni javno povezan z izdelkom samim. Prav tako bi naprava na verigo zapisovala samo podatke o tehničnem delovanju, ne pa tudi lokacije in drugih zasebnih podatkov lastnika.

V maloserijskih napravah, kjer je v obtoku manj naprav, kot so na primer proizvodni stroji ali specializirana namenska izdelovalna orodja, pa bi problem zasebnosti lahko rešili z uporabo zaprtih verig blokov, kjer bi vsaka naprava lahko dostopala izključno do podatkov, ki jih je sama zapisala na verigo. S tem pristopom ohranimo vse varnostne prednosti veriženja blokov, hkrati pa ne ogrožamo zasebnih podatkov lastnika naprave. Na sliki 4 je prikazana shema zaprte verige blokov.



Slika 4: Shema delovanja zaprtih verig blokov [6]

4 SKLEP

Tehnologija veriženja blokov je trenutno ena najhitreje razvijajočih se področij modernega računalništva. Poleg digitalnih valut nam kriptografski algoritmi omogočajo izgradnjo varnejših in transparentnih informacijskih sistemov, ki jih lahko koristno uporabljamo tudi v industriji. Iz meseca v mesec tehnologija veriženja blokov postaja hitrejša in cenejša za uporabo, s tem pa se povečuje njena uporabna vrednost. Širši pogled na priložnosti, ki jih ta tehnologija omogoča, nam razkriva, da bodveriženje blokov, podobno kot v svet finančnega poslovanja, prinesla velike spremembe tudi na področje tehnologije in industrije.

Viri:

[1] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-block-diagram-of-the-blockchain-with-floating-genesis-block_fig3_325570987
[2] https://www.ibm.com/topics/what-is-blockchain
[3] https://mirror.xyz/0x803a0261275d30C7Ab5EAA37F47fD044c5c633Bb/3ase7VgQwXePn8FBZf_4Gl2hsgg-Ks2SCITcM8QKmzw
[4] https://en.wiktionary.org/wiki/Hamiltonian_cycle
[5] https://www.mdpi.com/2410-387X/5/4/34
[6] https://www.researchgate.net/figure/A-tiered-architecture-with-private-blockchains-connected-to-a-public-blockchain-Private_fig1_329763546

INDUSTRIJSKI
FORUM
IRT
2022

Sodelujoči na Industrijskem forumu IRT

GLAVNI POKROVITELJ

ABB

FANUC

Hoffmann Group

RAZVOJNI PARTNER

ZDRUŽENJE MANAGER

DMS
Društvo za marketing Slovenije

VSEBINSKI PARTNER

mediade

NACIONALNI PARTNER FORUMA

SPIRIT SLOVENIJA
Zelena. Ustvarjalna. Pametna.

REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA GOSPODARSKI RAZVOJ IN TEHNOLOGIJO

POKROVITELJI

abc MAZIVA

BÖHLER

BTS COMPANY

MARSi group

METTLER TOLEDO

SCHUNK

sij ravne systems

TOPOMATIKA

voestalpine
ONE STEP AHEAD.

YASKAWA

RAZSTAVLJAVCI

ORGANIZATOR DOGODKA

PROFIDTP

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

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.*
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
Večer kvadrati
strojnistvo.com križišče strojnikov
obrtnik podjetnik
Računalniške novice – www.racunalniske-novice.com
Moj Prihranek
VENTIL
časopis industrija

PARTNER REGISTRACIJE

KLEMEN SOLUTIONS

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

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
2022

Komercialni oglasi podjetij

Let’s write the future.

FlexLoader™ M

Robotske rešitve za strego strojem.

www.abb.si/robotics

IRT 3000
INOVACIJE • RAZVOJ • TEHNOLOGIJE

SPLAČA SE BITI NAROČNIK

IRT 3000
INOVACIJE • RAZVOJ • TEHNOLOGIJE

ZA SAMO 70€ DOBITE:

- celoletno naročnino na revijo IRT3000 (10 številk)
- strokovne vsebine na več kot 140 straneh

IRT 3000 ADRIA
INOVACIJE • RAZVOJ • TEHNOLOGIJE

Revija v hrvaškem jeziku

ZA SAMO 28€ DOBITE:

- celoletno naročnino na revijo IRT3000 ADRIA (4 številke)
- strokovne vsebine na več kot 200 straneh

- vsakih 14 dni e-novice IRT3000 na osebni elektronski naslov
- možnost ugodnejšega nakupa strokovne literature
- vsak novi naročnik prejme majico in ovratni trak

DIGITALNA NAROČNINA

Na voljo tudi naročnina na digitalno različico revije za uporabo **V BRSKALNIKU** in **NA MOBILNIH NAPRAVAH**

BUTIK IRT3000

Naša ekskluzivna spletna trgovina kakovostnih izdelkov s prepoznavnim dizajnom vaše priljubljene revije za inovacije, razvoj in tehnologije.

- letna naročnina na slovensko ali adria izdajo revije
- strokovne knjige iz naše ponudbe
- pisarniške potrebščine in mali tehnološki pripomočki
- oblačila in dežniki
- skodelice in druga drobna darila

NAROČITE SE!

051 322 442
info@irt3000.si
www.irt3000.si/narocilo-revije

WWW.IRT3000.COM

THE FACTORY AUTOMATION COMPANY

FANUC

Velikost je pomembna

Izjemna nosilnost robota M-1000*i*A

MOČNO ZAPESTJE
Kompaktna zasnova v kombinaciji z veliko nosilnostjo in vztrajnostnim momentom

UPORABNIŠKI VMESNIK
Enostavna integracija s priključki na roki J3

ČISTA ZASNOVA
Čista zasnova robota zmanjšuje motnje s perifernimi napravami

ELEGANTNA ČLENKASTA ZASNOVA ROBOTA
Omogoča veliko prilagodljivost in enostavno integacijo

ODLIČNO RAZMERJE TEŽE/ NOSILNOSTI 5300 kg
Teža 5300 kg vs.
1000 kg nosilnosti

Širok razpon gibanja roke J3

Največji členkasti robot v liniji FANUC:

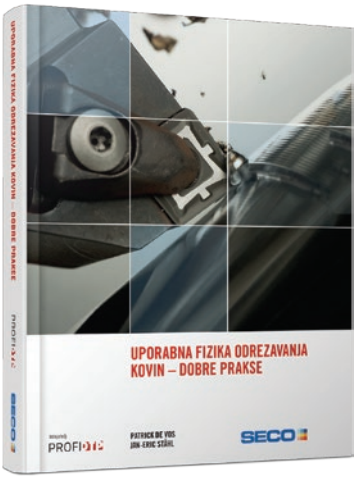
- zelo primerno za ravnanje s težkimi deli (npr. akumulator EV), težko paletiranje ali pakiranje in manipulacijo z materialom
- velika nosilnost 1000 kg
  vodoravni doseg: 3253 mm
  navpični doseg: 4297 mm
- IP54 na robotu, IP67 na zapestju omogoča uporabo za različne naloge
- podpira vztrajnost zapestja 840 kgm² in moment zapestja 5800 Nm

WWW.FANUC.SI

NOVO!

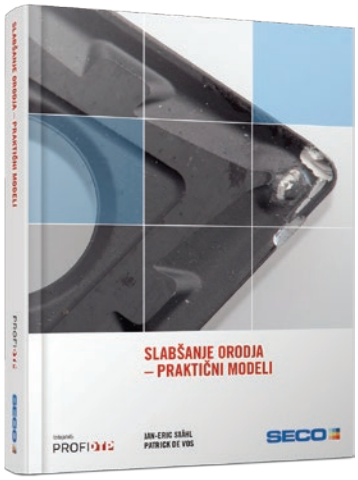
UMETNOST ODREZAVANJA KOVIN

ZBIRKA KNJIG PATRICKA DE VOSA



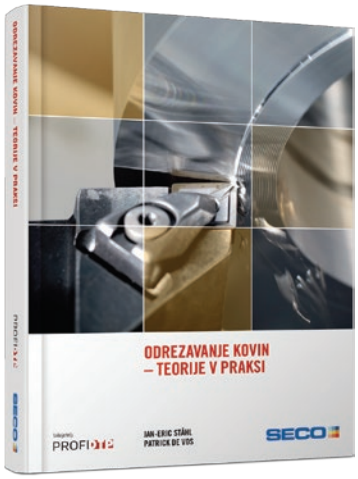
1. UPORABNA FIZIKA ODREZAVANJA KOVIN – DOBRE PRAKSE

Knjiga »Uporabna fizika odrezavanja kovin – Dobre prakse« je prva v zbirki štirih knjig, ki sta jih avtorja Patrick De Vos, korporativni vodja tehničnega šolanja pri Seco Tools, AB, in Jan-Eric Ståhl, profesor na katedri za proizvodne tehnologije in materiale Univerze v švedskem Lundu, namenila ljudem, ki imajo v industriji in praksi opravka z odrezavanjem kovin.



2. SLABŠANJE ORODJA – PRAKTIČNI MODELI

Ta knjiga obravnava samo en element postopka odrezavanja, in sicer obrabo orodij. Obraba orodij je ravnotežni element modelov odrezavanja. Večino težav, ki se pojavijo pri postopku odrezovanja, je mogoče opredeliti kot dogodke povezane z obrabo orodij. Končno vrednotenje izvedenih sprememb v procesu, da zagotovimo ravnotežje, prav tako temelji na obrabi orodij. Kot taka je obraba orodij ravnotežni element, ravnotežna točka in ravnotežni merilni sistem za odrezovanje brez težav: vse obenem.



3. ODREZAVANJE KOVIN – TEORIJE V PRAKSI

Ta 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.

Naročilo knjige
naročila sprejemamo
na e-poštni naslov
naslov: info@irt3000.si

Posamezen izvod
Knjiga 1: 25,00 EUR
Knjiga 2: 25,00 EUR
Knjiga 3: 29,00 EUR

Izdajatelj PROFIDTP d.o.o.

SECO

PROFIDTP

VEČ SE IZPLAČA!

Ob naročilu dveh knjig iz zbirke knjig SECOTOOLS vam priznamo

10 % popust

na celotni nakup.

Ob naročilu celotne zbirke knjig SECOTOOLS (3 knjige) vam priznamo

15 % popust

na celotni nakup.

Popusti se ne seštevajo.

Garant

ORODJA: MOČNA KOT TI.

Ali imate pri svojem delu kar največje zahteve? Imamo orodje, ki je narejeno povsem po vaši meri: več kot 45.000 certificiranih sistemskih orodij najvišje kakovosti za vse vrste uporabe na delovnem mestu. Odkrij svoje orodje:

www.garant-tools.com

Industrial Tooling and Equipment by Hoffmann Group

54. MOS

TEHNIKA ENERGETIKA

PROFESIONALNE ENERGETSKE REŠITVE, OPREMA IN ORODJA ZA PODJETJA IN DOMAČE MOJSTRE & DO OKOLJA PRIJAZNA TEHNOLOGIJA

Največja poslovno-sejemska prireditev v regiji s 54-letno tradicijo

CELJSKI SEJEM,
14.–18. SEPTEMBER 2022

Celjski sejem

MOS DOM **MOS TURIZEM** **MOS B-DIGGIT** **MOS PLUS**

I FEEL SLOVENIA

Krepimo slovensko gospodarstvo

ZELENA. USTVARJALNA. PAMETNA.

reddot winner 2021

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.

Slovensko gospodarstvo je v svetovnem merilu prepoznano kot izjemno ustvarjalno ter prepriča s tehnološkim in inovacijskim znanjem. Da bi ostalo v enaki ali celo boljši kondiciji, bomo v naslednjih 4 letih na javni agenciji SPIRIT Slovenija namenili 180 mio EUR nepovratnih sredstev za razvojno-inovacijske in pilotno-demonstracijske projekte ter velike investicije za dvig produktivnosti.

Poleg finančnih spodbud ne spreglejte drugih podpornih storitev za krepitev inovacijske aktivnosti, ustvarjanje dodane vrednosti in mednarodne konkurenčnosti slovenskih podjetij. **Spremljajte nas!**

SPIRIT SLOVENIJA

REPUBLIKA SLOVENIJA
MINISTRSTVO ZA GOSPODARSKI RAZVOJ IN TEHNOLOGIJO

SPIRIT Slovenija, javna agencija www.spiritslovenia.si.
Fotografija: Brabar Studio in Elan d.o.o.

DMS

DRUŠTVO ZA MARKETING SLOVENIJE

USTVARJAMO USPEHE PRIHODNOSTI

Izobražujemo: DMS na leto pripravi več kot 60 izobraževanj s področja marketinga (B2B marketing, produktni management, internacionalizacija), ...

Povezujemo: Na izobraževanjih Društva za marketing Slovenije se tkejo trajne vezi med udeleženci, ki si med seboj pomagajo na svojih poslovnih poteh.

Navdihujemo: Naša izobraževanja pogosto temeljijo na praktičnih primerih, ki lahko služijo kot navdih za rešitve, ki jih potrebujete v svojem poslovnem svetu.

Vabimo vas, da se nam pridružite in svoje znanje nadgradite tudi vi.

Udeleženci Industrijskega foruma lahko izkoristite **20 % popust** na članstvo.

KODA ZA POPUST: IRT20

Več na
www.dmslo.si/clanstvo-2022

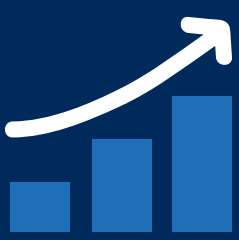
ZDRUŽENJE MANAGER
Dobri rezultati, na pravi način

Združenje Manager je že **33 let največje združenje managerjev v Sloveniji.**

Poslanstvo: Z odgovornim voditeljstvom in strokovnim managementom do skupnega napredka.

Podjetja, ki jih vodijo članice in člani Združenja Manager, so uspešnejša. Predstavljajo **32 % prihodkov gospodarstva in dosegajo za:**

- **26 % višjo dodano** vrednost
- **23 % višjo plačo** na zaposlenega
- **48 % višji dobiček** na zaposlenega
- **42 % višji prihodek** na zaposlenega



ZDRUŽENJE MANAGER

www.zdruzenje-manager.si

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

MOBILNA KOLABORATIVNA ROBOTSKA CELICA MC100

UČINKOVITA IN FLEKSIBILNA PROIZVODNJA

Mobilna celica z kolaborativnim robotom povečuje učinkovitost in fleksibilnost v proizvodnji ter omogoča, da robotizirana strega avtonomno izvaja proizvodnjo manjših serij. Zasnovana je za ročno strego transportnih voziČkov. MC100 lahko s pomočjo paletnega viličarja enostavno prestavimo na drugo delovno mesto v proizvodnji.

RAZNOLIKA UPORABA

- *Strega stroja*
- *Poliranje*
- *Varjenje*
- *Manipulacija*
- *Montaža*
- *Merjenje*
- *Nanašanje raznih mas*

Video MC 100

HITRA INTEGRACIJA

- *enostavne aplikacije je možno zagnati že v nekaj dneh*
- *ponovitveno programiranje opravimo že v nekaj urah*

KOLABORATIVNO & VARNO

- *deluje neposredno ob ljudeh, brez zaščitnih varoval*
- *opravlja ponavljajoča in dolgočasna dela*

ENOSTAVNO PROGRAMIRANJE

- *program s 3D-vizualizacijo za hitro programiranje robotske roke*
- *robotsko roko lahko ročno premaknemo na željeno točko v prostoru ali vodimo preko kontrolne konzole*

POVRNITEV INVESTICIJE

- *naložba se običajno povrne prej kot v letu dni*
- *zmanjšajo stroške dela*
- *ograje in varnostni elementi niso potrebni*

BTS Company d.o.o.
stroji@bts-company.si
www.bts-company.com

LJUBLJANA
Bratislavska cesta 5
T. 01 5841 433

MARIBOR
Cesta k Tamu 16
T. 040 350 084

BTS COMPANY 30 LET

REVIJA ZA FLUIDNO TEHNIKO, AVTOMATIZACIJO IN MEHATRONIKO

VENTIL

ISSN 1318 - 7279 Letnik 24

- 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

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.

Štiriindvajsetletno 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

BÖHLER

BDCC

BÖHLER Die Casting Concept

OPTIMIZACIJA MATERIALA ZA MAKSIMALNO DODANO VREDNOST

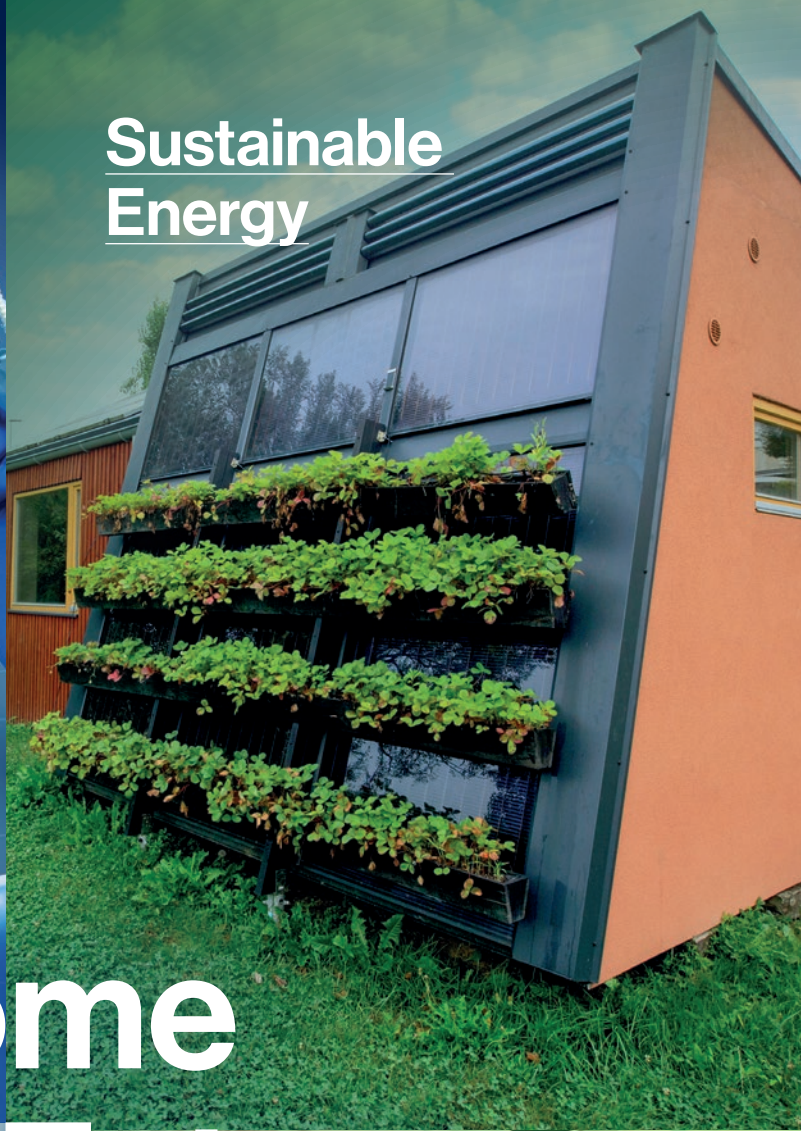
voestalpine BÖHLER Edelstahl

Kot eden izmed vodilnih proizvajalcev orodnega jekla na svetu, smo osredotočeni na najbolj zahtevne rešitve na področju orodjarstva. Eno izmed pomembnih področij predstavljajo materiali za področje industrije visokotlačnega litja. Z več kot 150 leti izkušenj na področju razvoja in proizvodnje orodnih jekel, lahko ponudimo optimizirane materialne rešitve za ta segment, ki so bolj odporne na toplotne razpoke, zmanjšujejo obrabo, povečajo trdnost v vročem, imajo večjo delovno trdoto ter tako zagotavljajo daljšo življenjsko dobo orodij. Trajnostni proizvodni procesi, odgovorna raba virov in najbolj napredne tehnologije, ki so prijazne do okolja, so že več desetletij neločljiv del naše korporativne filozofije.

Böhler Slovenija
Predstavništvo voestalpine High Performance Metals International GmbH
Jarška cesta 10b, 1000 Ljubljana
www.bohler-international.com

voestalpine
ONE STEP AHEAD.

Factories of the Future



Sustainable Energy

Welcome to the Future

Green and Safe Mobility

Health

Contact us to get your challenges solved!

www.fs.uni-lj.si rr@fs.uni-lj.si

Follow us on

University *of Ljubljana*
Faculty *of Mechanical Engineering*

ATOS
SCAN
BOX

TOPOMATIKA

Avtomatizirana merilna tehnika
Preprosto. Hitro. Natančno.

Učinkovita kontrola kakovosti v proizvodnji
in avtomatizirano vodenje procesov.
Vse v enem boksu - ATOS ScanBox.

That's why.

www.gom.com

gom
a ZEISS company

FS Fakulteta za strojništvo

ŠTUDIJSKI PROGRAMI

1. stopnja
dodiplomski študijski programi

VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJSKI PROGRAMI

STROJNIŠTVO
MEHATRONIKA
TEHNOLOGIJE TEKSTILNEGA OBLIKOVANJA

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAMI

STROJNIŠTVO
GOSPODARSKO INŽENIRSTVO smer STROJNIŠTVO
MEHATRONIKA
OKOLJSKO INŽENIRSTVO
OBLIKOVANJE IN TEKSTILNI MATERIALI

2. stopnja
magistrski študijski programi

STROJNIŠTVO
GOSPODARSKO INŽENIRSTVO smer STROJNIŠTVO
MEHATRONIKA
OKOLJSKO INŽENIRSTVO
INŽENIRSKO OBLIKOVANJE IZDELKOV
OBLIKOVANJE IN TEKSTILNI MATERIALI

3. stopnja
doktorski študijski programi

DOKTORSKA ŠOLA FS
GOSPODARSKO INŽENIRSTVO smer STROJNIŠTVO

Univerza v Mariboru

www.fs.um.si

Visoko-učinkoviti proizvodi za obdelavo kovin

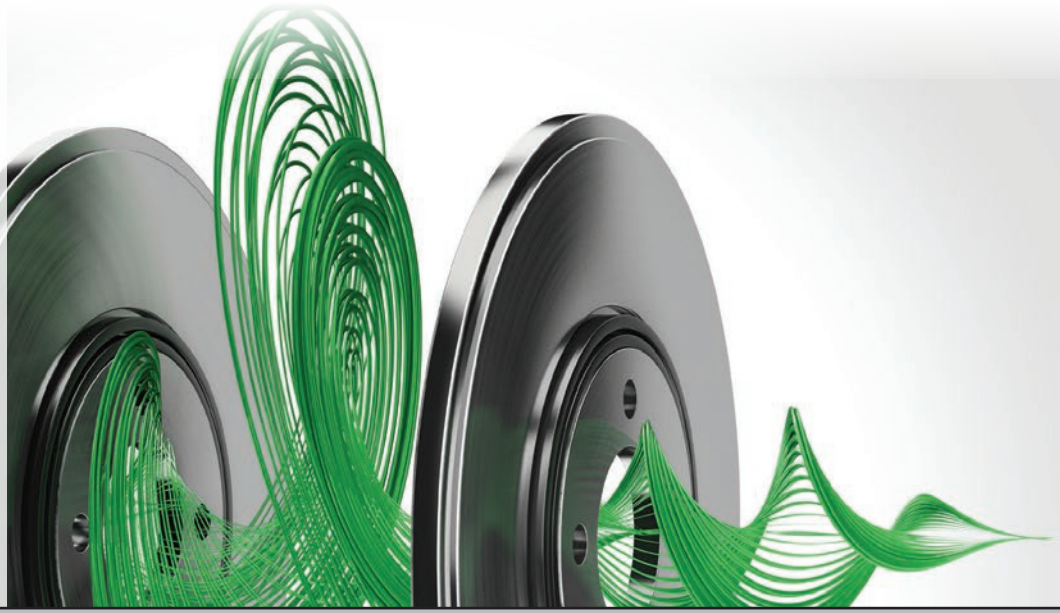
Struženje, rezkanje, brušenje, honanje in frezanje vseh vrst kovin. Olja za hidravliko, kompresorje, reduktorje, verige, turbine, štancanje ipd. Rezna olja, čistila, olja za prenos toplote, masti…

Najboljši proizvodi v svojem razredu

Castrol

ALUSOL XBB

HYSOL XBB

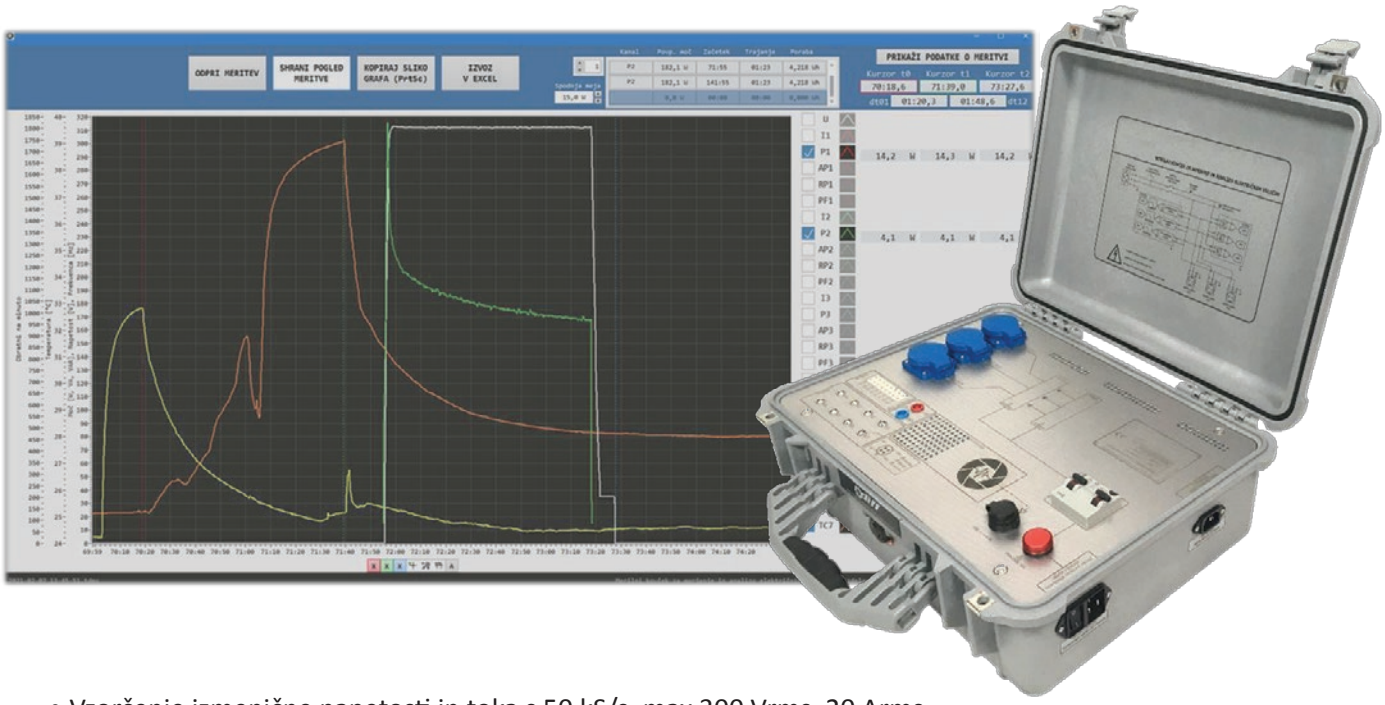


abc MAZIVA

ABC maziva d.o.o.
Bravničarjeva 13, 1000 Ljubljana
tel: +386 1 5136 242
info@abcmaziva.com www.abcmaziva.com

MERILNI KOVČEK

ZA MERJENJE IN ANALIZO ELEKTRIČNIH VELIČIN



- Vzorčenje izmenične napetosti in toka s 50 kS/s, max 300 Vrms, 20 Arms
- 3 merilne proge
- Sproten izračun električnih veličin (delovna, jalova in reaktivna moč, frekvenca, faktor moči, fazni zamik ...) vsakih 200 ms
- 8 kanalov za merjenje temperature s termočleni (podprti tipi J, K, T, E ,N, B, R, S)
- 8 analognih vhodov ±10 V, 50 kS/s
- Osnovano na industrijskem krmilniku cRIO
- Možnost izdelave z dodatnimi funkcijami in meritvami po željah naročnika (vibracije, obremenitve, navor, temperatura, tok, napetost, CAN, LIN, itd.)
- LabVIEW client aplikacija za merjenje in analizo, odprta koda
- LabVIEW funkcije za pridobivanje podatkov, tako da lahko naredite svojo oz. implementirate zajem podatkov v obstoječo aplikacijo
- Uporaba kot USB merilni instrument
- Možnost nadgradnje v samostojni analizator, ki meritve shranjuje na prenosni USB disk. Posneti signali se lahko kasneje prikažejo in analizirajo v client aplikaciji
- Dimenzije: 49.9 x 39.3 x 19.1 cm, teža cca. 10 kg

ADD ProS d.o.o. | info@add-pros.com | add-pros.com

GP20

YASKAWA

RAZVIT IN IZDELAN V SLOVENIJI

GLAVNE PREDNOSTI

- Vitka in robustna zasnova
- Zasnovan za uporabo v različnih robotskih aplikacijah
- 20 kg nosilnosti
- Velik polmer dosega: 1.802 mm
- Hiter / visoki pospeški in pojemki
- Enostaven zagon, uporaba in vzdrževanje

Controlled by
YRC1000

www.yaskawa.si

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

Equipped by SCHUNK

Zmanjšanje deformacije obdelovanca do faktorja 10

Zatesnjena vpenjalna glava stružnice ROTA NCR-A

2.000 Nm navora pri Ø 32 mm

Hidravlično ekspanzijsko orodje TENDO E compact

1.200 različnih tipov

SCHUNK standardnih vpenjalnih čeljusti

Superior Clamping and Gripping

SCHUNK®

Prednost pri opremljanju Vaše stružnice.

Od standardnih komponent do prilagojenih rešitev.
Uporabite celoten potencial vaše stružnice!

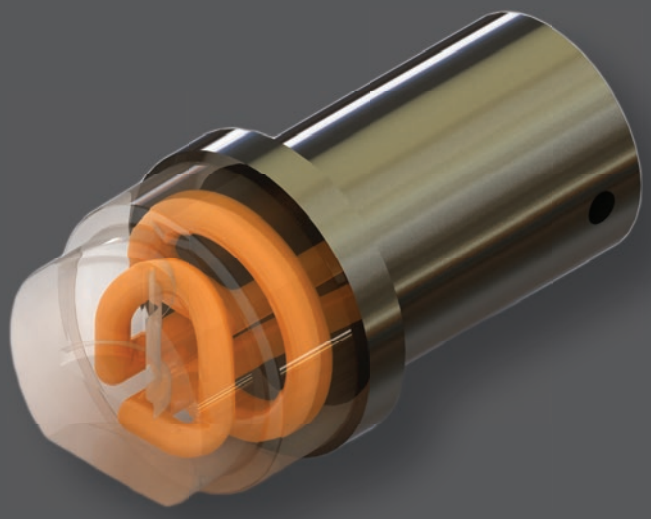
schunk.com/equipped-by

www.marsi.at

MARSi group

3D METAL PRINT SPECIALIST

Bodite drugačni.
Bodite inovativni.
Bodite vidni.
Bodite brezčasni.



Kontaktirajte nas:

Telefon: +386 (0)8 205 86 93
E-mail: info@marsi.at
Naslov: Slovenska vas 4k,
SI-8261 Jesenice na Dolenjskem

MARSi group

EConformal™

SILABS

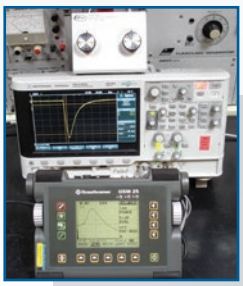
LABORATORIJI IN IZOBRAŽEVANJA

sij | ravne systems

KALIBRACIJSKI LABORATORIJ

akreditiran po standardu SIST EN ISO/IEC 17025:2017 s št. akreditacijske listine LK – 004 izvaja akreditirane kalibracije:

- dimenzionalnih veličin: dolžina, premer, odstopek oblike, navojne veličine, hrapavost, kot in nagib,
- mehanskih veličin: sila, trdota (Brinell, Vickers, Rockwell, Shore), tlak, moment sile, masa (poljubne mase in tehtnice),
- tekočinskih ter indikacijskih termometrov,
- ultrazvočnih aparatov (edini v Sloveniji) po SIST EN 12668-1:2011,
- ultrazvočnih merilnikov debeline,
- merilnikov osvetljenosti (luxmetri),
- merilnikov obsevanosti UV-A svetlobe,
- merilnikov magnetnega polja.



LABORATORIJ ZA NEPORUŠNE PREISKAVE

akreditiran po standardu SIST EN ISO/IEC 17025:2017 s št. akreditacijske listine LP – 107 izvaja:

- akreditirane preiskave s tekočimi penetranti,
- akreditirane preiskave z magnetnimi delci,
- akreditirane radiografske preiskave (Ir192, Co60, RTG 420 kV),
- akreditirane ultrazvočne preiskave,
- akreditirane preiskave zaostalih napetosti in zaostalega avstenita,
- neakreditirane radioskopske preiskave (RTG 450 kV).

PRESKUSNI LABORATORIJ

akreditiran po standardu SIST EN ISO/IEC 17025:2017 s št. akreditacijske listine LP – 107 izvaja akreditirane preskuse:

- ročnih elektromagnetov – jarmov,
- virov svetlobe UV-A (ročne UV lučke).

IZOBRAŽEVANJA

Izvajamo izobraževanja z različnimi temami s področja meroslovja in NPP preiskav:

- za nadzor nad merili,
- za izračun in podajanje merilne negotovosti,
- za merjenje v industriji,
- za geometrijsko dimenzioniranje in toleriranje (GD&T),
- za notranje presoje po SIST EN ISO 17025,
- za merjenje hrapavosti industrijskih izdelkov,
- za merjenje trdote,
- za merjenje momenta,
- za sistem vodenja kakovosti,
- za neporušne preiskave po ISO 9712 (UT, MT, PT in VT).

SIJ Ravne Systems d.o.o. • Koroška cesta 14, 2390 Ravne na Koroškem
T: +386 2 870 76 70 • M: +386 41 370 199 • E: meta.pikalo@ravnesystems.com

sij.silabs.si

INDUSTRIJSKI FORUM IRT 2022

INDUSTRIJSKI
FORUM
IRT
2022
forum-irt.si

ISBN 978-961-95800-0-4