

Boštjan Žagar

RAZVOJ TEHNOLOGIJE TEMPERIRANJA S
TERMOELEKTRIČNIMI MODULI IN
UPORABA V PREDELAVI POLIMERNIH
MATERIALOV

Doktorska disertacija

Mentor: prof. dr. Dejan Križaj, univ. dipl. inž. el.

Somentor: znan. sod. dr. Blaž Nardin, univ. dipl. inž. stroj.

Boštjan Žagar

COOLING TECHNOLOGY DEVELOPMENT VIA
THERMOELECTRIC MODULES AND
IMPLICATION INTO POLYMER PROCESSING

Doctoral thesis

Mentor: prof. dr. Dejan Križaj, univ. dipl. inž. el.

Comentor: znan. sod. dr. Blaž Nardin, univ. dipl. inž. stroj.

Avtor: Boštjan Žagar, univ. dipl. inž. el.

Naslov: Razvoj tehnologije temperiranja s termoelektričnimi moduli in uporaba v predelavi polimernih materialov

Odobritev teme: seja Senata Fakultete za elektrotehniko, dne 8. maja 2008
seja Senata Univerze v Ljubljani, dne 24. junija 2008

Datum zagovora: 14.12. 2009

Mentor: prof. dr. Dejan Križaj, univ. dipl. inž. el.

Somentor: znan. sod. dr. Blaž Nardin, univ. dipl. inž. stroj.

Predsednik komisije: prof. dr. Janez Nastran

Član: prof. dr. Danijel Vončina

Član: prof. dr. Karl Kuzman

Član: prof. dr. Rastko Fišer

Zahvala

Zahvaljujem se mentorjema prof. dr. Dejanu Križaju za vodenje skozi večletno raziskovalno delo in za pomoč pri numeričnih simulacijah termodinamičnih procesov ter višjemu znanstvenemu sodelavcu dr. Blažu Nardinu za popolno zaupanje v moje raziskovalno delo in omogočanje delovnih pogojev.

Vsem sodelavcem TECOS-a se zahvalujem za razvojno vzdušje, iskreno pomoč in toleriranje samosvojih delovnih navad. Hvala Janezu Navodniku za začetno viharjenje idej o novih tehnologijah temperiranja.

Podjetjema Gorenje Orodjarna, d. o. o., in Kolektor Sikom se zahvaljujem za razvojno sodelovanje pri implikacijah tehnologije v industrijsko prakso, podjetju Kistler (Švica) pa za podporo z merilno opremo.

Članom komisije, prof. dr. Rastku Fišerju, prof. dr. Danijelu Vončini in prof. dr. Karlu Kuzmanu, se zahvaljujem za hitre in skrbne preglede naloge, za tehtne popravke in nasvete, ki so izboljšali disertacijo.

Hvala domačim za raziskovalno inženirsko vzgojo ter za pogoje, ki so omogočali raziskovalno rast.

Povzetek

Začetni pristop k raziskovalnemu delu je bil osnovan na zahtevi tehnološkega trga predelovalne industrije polimerov po inovativnejši, zmogljivejši in končnemu uporabniku (tehnologiji predelave polimerov) prilagodljivejši tehnologiji temperiranja orodij. Vnos predstavljene tehnologije v industrijsko prakso je bil izveden na najhitreje rastočem [1, 2] predelovalnem področju – predelavi polimerov, ki je bilo izbrano zaradi pomembnosti rasti tehnologije, trenutnega stanja tehnologije ter kandidatovega trenutnega področja dela. Generalno pa so tehnologije temperiranja prisotne pri vse procesih, kjer je proces tako ali drugače odvisen od manipulacije toplote.

Hipoteza celotnega večletnega raziskovalnega dela poskuša dokazati upravičenost vnosa tehnologije temperiranja orodij za brizganje plastike s pomočjo termoelektričnih modulov (v nadaljevanju TEM).

Kronološko in vsebinsko je bilo raziskovalno delo razdeljeno na štiri vsebinska poglavja.

V prvem delu je bila izvedena obširna pregledna (state-of-the-art) analiza trenutnega stanja tehnologij temperiranja na področju predelave polimerov, ožje na injekcijskem stiskanju termoplastov (v nadaljevanju brizganje plastike). Hkrati je bil izveden pregled študij in aplikacij, ki se ukvarjajo z manipulacijo toplote s pomočjo termoelektričnih modulov. Oba pregleda sta potrdila tako smiselnost kot upravičenost nadaljnjega raziskovalnega dela. V raziskovalnih študijah ni bilo zaslediti omembe vrednega dela, ki bi se ukvarjal s problematiko termodinamike v postopkih brizganja plastike s pomočjo termoelektričnih modulov. Ob pregledni študiji pregleda intelektualne lastnine tovrstne tematike pa lahko zasledimo nekaj podeljenih patentov, ki naj bi se generalno ukvarjali s tovrstno tematiko. Rezultatov takšnih študij ali dejanskih implikacij industrializacije ni bilo mogoče zaslediti niti v obstoječem stanju na trgu tovrstne opreme.

Pri pregledu stanja krmiljenja in regulacije TEM smo zasledili dva koncepta: PID- in FUZZY-tip regulacije. Zgradili smo FUZZY-tip regulatorja s pripadajočo močnostno elektroniko.

V drugem delu razvoja smo omenjeno tehnologijo s serijo obsežnih testov v prototipnem okolju preskusili v praksi. Preskusili smo električne, mehanske in temperaturne omejitve termoelektričnih modulov ter preverili točnost fizikalnih podatkov proizvajalcev.

Vzporedno smo pričeli z gradnjo numeričnega modela TEM in njegovega delovanja v prototipnem sklopu. Namen izdelave numeričnega modela TEM je boljše razumevanje vpliva posameznih dejavnikov (parametrov), možnosti za kasnejše optimiranje termodinamičnih procesov v orodjih za brizganje plastike, predvsem pa zmožnosti manipulacije toplote s TEM. Model je bil izdelan v dveh numeričnih okoljih, optimiranje pa je potekalo na osnovi prototipnih rezultatov. Model je bil preizkušen na več prototipnih realnih primerih (orodjih) in je pokazal zadovoljive rezultate.

Tretji del raziskovalnega dela je obsegal predstavitev testiranja celotne aplikacije temperiranja orodij za brizganje plastike s TEM v realna orodja. Izkušnje smo nabirali ob testnem orodju za merjenje skrčkov termoplastov po standardu ISO 293. Poglavitna spoznanja, pridobljena na tej stopnji, so bila povezana z obnašanjem tovrstne tehnologije v industrijskem okolju in z vsemi problemi, ki jih prinaša. Gre za testiranje dovoljenih tlačnih obremenitev zaradi tlakov taline v orodni votlini, problematiko montaže v smislu potrebne izolacije termodinamičnega sistema, problematiko vnesenih

mehanskih napetosti in kondenzacije zaradi rapidnega temperaturnega režima ipd. Z vsemi izkušnjami, pridobljenimi na tej stopnji, smo razvili tri namenska testna orodja, ki so najnazornejše nakazovale prednosti predstavljene tehnologije.

Četrty del je služil predstavitvam zmožnosti tehnologije temperiranja orodij s TEM. Kompleksne termodinamične pogoje pri predelavi duroplastičnih materialov smo poskušali realizirati preko dveh razvitih orodij. Testi so obsegali testiranja zmožnosti vnosa tehnologije v predelavi (brizganju) duroplastičnih polimerov, kjer je problematika manipulacije temperature v orodjih kompleksnejša kot pri termoplastičnih materialih.

Drugi niz testov je bil izveden z brizganjem plastike (termoplastov) preko namensko razvitega orodja, ki je omogočalo vzporedno primerjavo klasičnega temperiranja s predstavljeno tehnologijo. Poleg tega je imelo orodje še nekaj namensko vgrajenih problematičnih detajlov, kjer smo lahko lokalno predstavili vse prednosti tehnologije.

Zadnji niz testov pa je bil orientiran k testiranju tehnologije v orodjih za brizganje mini-/mikroizdelkov iz plastike. Gre za izdelke izredno majhnih dimenzij, kjer so termodinamični pogoji kompleksnejši kot v orodjih večjih gabaritov.

Vse navedeno raziskovalno delo je sledilo ciljem, zastavljenim v temi doktorske naloge. Prav tako so bili vsi zadani cilji izpolnjeni. Glede na dejstvo, da so bili tako zastavljeni kot tudi izpolnjeni cilji zelo industrijsko orientirani, smo uspeli predstavljeno tehnologijo dodobra preskusiti v industrijskem okolju, zato lahko podamo mnenje, da predstavljena tehnologija ni primerna za temperiranje plastičnih kosov večjih debelin, mer in mas; termoelektrični moduli so namreč še vedno omejeni s kapacitetami prenosa toplote. Hkrati je pereča problematika montaže oziroma minimizacija toplotnih vztrajnosti. Smiselnost vgradnje za večje kose je v lokalnem temperiranju, kar pomeni odpravo napak ali njihovo korekturo na plastičnih kosih, ki so posledica neustreznih temperaturnih režimov orodne površine. Termoelektrični moduli z omenjeno omejitvijo kapacitete manipulacije toplote pa vseeno popolnoma zadoščajo za potrebe in velikosti orodij za mini-/mikroorodja. S funkcionalnostmi in temperaturnimi režimi, ki jih lahko dosegamo s TEM, lahko trdimo, da je predstavljena tehnologija preverjeno zelo primerna za obširnejše impliciranje na tovrstnih orodjih.

Z začetnimi preglednimi študijami tehnologij temperiranja orodij ter uporabe TEM v aplikacijah temperiranja, ki so jim sledili prototipni testi tehnologije, predvsem pa z obširnimi industrijskimi testiranjmi, smo hipotezo dokazali. Smo pa z rezultati ožje opredelili posamezne podvrsti brizganja plastike, kjer so prednosti predstavljene tehnologije v primerjavi s klasičnim temperiranjem poudarjene močnejše kot drugod.

Izvirni prispevki znanosti se izražajo v naslednjih raziskovalnih rezultatih:

- Z opisanim sistemom smo uspeli dokazati primernost aplikacije za tehnologijo brizganja plastike. Dokazali smo, da z dodanim TEM povečamo natančnost temperaturne regulacije, hkrati pa omogoča kontrolirano časovno odzivnost sistema.
- Pokazali smo, da so TEM primernejši za režim gretja, manj pa za režim hlajenja. Za moči TEM, ki smo jih testirali (do 200 W), se je pokazalo, da so manj primerni za temperiranje večjih orodij (samo lokalno), zelo pa za manjša (mikro)orodja.

- S predstavljeno hibridno aplikacijo in z zmožnostjo generiranja temperaturnih časovnih profilov preko izdelovalnega cikla smo dokazali izrazite izboljšave v dosegljivi kakovosti plastičnih kosov (zmanjšanje tlakov, izboljšanje estetskih in mehanskih lastnosti plastičnih izdelkov).
- Numerično okolje za simulacijo delovanja TEM je bilo raziskano in izdelano z upoštevanjem vseh treh členov generiranja termoelektričnega efekta. Izdelan sklopljen makroskopski model temelji tako na enačbah za prenos toplote kot tudi na hidrodinamičnih relacijah.
- Izveden je bil elektronski regulacijski sklop za kontrolo in izvajanje zelenih temperaturno časovnih profilov temperiranja TEM. Pri tem je bila realizirana regulacija FUZZY.
- Večletno vzorno raziskovalno sodelovanje z največjim svetovnim proizvajalcem programske opreme za simulacije brizganja plastike Moldflow [3] je botrovalo dokončnemu razvoju funkcije generiranja spremenljive temperature orodja. Ta omogoča ob vnosu temperaturnih profilov pogled v reološko dogajanje, ki ga povzročijo takšna temperaturna gibanja.

V doktorski nalogi opisano raziskovalno delo je potekalo in je bilo sofinancirano v okviru več nacionalnih in evropskih raziskovalnih projektov. Naj omenimo vsaj EUREKA INTELLCON E!3492 ter IMOLD (New status driven injection moulding process for complex parts by the development of smart, self-controlling moulds).

Vzporedno z raziskovalnim delom je bil opravljen tudi pregled podobnih objavljenih raziskav, ki so del tehnološke intelektualne zaščite. V ta namen je bil opravljen obširen pregled podobnih tehnologij, ki se ukvarjajo z manipulacijo toplote, in predvsem njihova implikacija v procesu brizganja plastike. Glede na izsledke raziskave in že pridobljene rezultate obnašanja tehnologije v industrijski praksi smo leta 2007 vložili zahtevek za pridobitev evropskega patenta WO2007121934 A1-2007-11-0, kjer ščitimo predstavljeno aplikacijo v tehnologijah predelave polimerov, natančneje uporabo TEM za temperiranje orodij za brizganje termoplastov, duroplastov in elastomerov.

Rezultate raziskovalnega dela smo predstavili na več svetovnih (AFDM 2006, Pusan, J. Koreja), evropskih (TOOL 06, Torino, Italija; RPD 2008, Maria Grande, Portugalska) in slovenskih konferencah (ICIT 2005, ICIT 2007, IAT 2005, IRT 2006, IRT 2007, ERK 2006). Prav tako smo izsledke raziskav, ki so del doktorske naloge, objavili v različnih strokovnih publikacijah, ki jih citira Science Citation Index (SCI):

1. **ŽAGAR, Boštjan**, NARDIN, Blaž, GLOJEK, Andrej, KRIŽAJ, Dejan. Prilagodljivi sistem za hlajenje orodij za brizganje plastike s pomočjo termoelektričnih modulov = An adaptive system for cooling injection-moulding moulds via thermoelectric modules. *Stroj. vestn.*, 2006, letn. 52, št. 10, str. 630–644. [COBISS.SI-ID 9766683]
2. NARDIN, Blaž, **ŽAGAR, Boštjan**, GLOJEK, Andrej, KRIŽAJ, Dejan. Adaptive system for electrically driven thermoregulation of moulds for injection moulding. *J. mater.*

process. technol.. [Print ed.], 12. jun. 2007, vol. 187–188, str. 690–693. [COBISS.SI-ID 13822261]

3. **ŽAGAR, Boštjan**, NARDIN, Blaž, GLOJEK, Andrej. Adaptive system for electrically driven thermoregulation of moulds for injection moulding. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 2008, vol. 3, no. 2/3, str. 439–450. [COBISS.SI-ID 14450997]

Summary

Research work initiative was based upon polymer processing demands where more innovative, more powerful and most important, more adopted to polymer processing technologies cooling technologies were needed. Implication of presented technology into industry praxis has been set at highest rate growth processing technologies, polymer processing. This field has been chosen due to important growth, current technology level and authors field of work. In general, cooling technologies (tempering technologies) are used in all processing technologies where heat manipulation influences the process itself.

Basic hypothesis of research project is focused into proving the feasibility of implication of thermoelectric cooling into cooling technology for plastic processing, more exact, for injection moulding process.

Research work has been segmented into four chapters based on content and chronology.

Extensive »state-of-the-art« analyses of cooling technologies in polymer processing, more exact, in injection moulding, have been conducted in **first segment**. In parallel, same study of possible applications that manipulate heat via thermoelectric modules has been done. Both studies confirmed the feasibility of future research work. Further more, no reasonable studies were found dealing with problematic of thermodynamics in injection moulding technologies via thermoelectric modules.

Also, study on patents dealing with cooling technologies via thermoelectric modules in injection moulding has been realized. Some patents can be found dealing with such topics but all just in general. Any results of such patents, studies of industrialization proofs cannot be found. Furthermore, no such equipment exists in cooling technologies portfolio.

Two regulation types were met at state-of-the-art analyses for thermoelectric supply, PID and FUZZY type. Fuzzy type controller with all peripheral units has been built and tested.

Second segment of development was reserved for various testing of electrical, mechanical and temperature properties (limitations) of thermoelectric modules. These tests were performed in prototype environment and served as test of manufacturer's data.

In parallel of prototype testing, numerical model of thermoelectric module and complete prototype assembly has been built. Main reason for building the numerical model was in optimization of usage thermoelectric modules in injection moulding cooling environment. Model has been built in two numerical environments and tuned according to real prototype results. Results of several real tests showed reasonable agreement with test in real environment.

Third segment of research work comprised of tests of presented cooling technology via thermoelectric modules in industry environment of injection moulding. Industry environment experiences were gathered via mould for shrinkage testing according to ISO 293. Important data were gathered about behavior of presented technology in

industry environment. Tests consisted of allowed pressure tests inside mould cavity, testing various solutions for solving minimization of thermodynamic system, testing the effects of incorporated mechanical stresses and condensation due to rapid temperature changes etc. All gathered experiences and knowledge were later incorporated into development and manufactured three custom built test moulds that could serve as test ground for presented technology.

As already stated, **forth segment** consisted of several independent projects where presented application tried to prove its advantages in comparison to current technology results.

First sets of tests were conducted in thermoset application where temperature controls more important influence on parts quality as in thermoplastics applications.

Second mould was developed for parallel testing of presented cooling technology in comparison to classic technology; tests were performed in thermoplastic injection moulding technology. Besides that, plastic parts had incorporated several technical details where we could test presented cooling technology.

Last test mould had been developed for performing tests in mini/micro injection molding technology. Temperature behavior in such moulds has higher impact in comparison to larger moulds.

All stated research work was following directives placed in doctoral thesis theme. Further more, all stated goals were achieved. Considering that lots of work has been oriented in implication of presented technology in industry environment, several experience results can be stated.

One can state that presented technology does not represent best solution for complete heat manipulation inside moulds for injection moulding of larger parts (meaning larger thicknesses, measurements and masses). Reason for that is in limitation of possible heat transfer of thermoelectric modules. In parallel to that, mounting and minimizing the thermal inertia still represents severe disadvantage of presented technology. However, feasible usage of presented technology represents the local heat manipulation. In such way, thermoelectric modules can locally deal with plastic part defects that origin from incorrect temperature regimes of mould surface.

Although thermoelectric modules have limited thermal capabilities, these values are sufficient for implementation in mini/micro injection moulding technology. With described temperature regimes that are achievable via presented technology we can conclude that it is best suitable in such applications.

Hypothesis of doctoral thesis has been agreed via several prototype and especially wide industry oriented tests. Furthermore, wide technology test portfolio served as analyses tool which technology gives best results in comparison to classic technology.

Origin scientific contributions can be expressed as:

- Presented application proved feasibility analyses via injection moulding process. With additional TEM heat exchanger higher temperature precision regulation can be achieved while having the ability to enable temperature dynamics.
- It has been showed that TEM are more convenient more heating regimes in comparison to cooling regimes. Also, with tested TEM elements (up to 200 W)

we can conclude that presented technology is more convenient for smaller (micro) moulds while at larger moulds only local heat manipulation is feasible.

- With presented hybrid application and ability to generate temperature/time profiles within production cycle several major quality advantages have been gained (prussere reduction, improvement of aesthetical and mechanical plastic part properties).
- Numerical environment that served as simulation tool has been researched and realized. Model included all three generators of thermoelectric effect. Final makroskopic model includes both thermal and hydrodynamic relations.
- Electronic unit for control and generation of temperature/time profiles has been developed. Regulation unit has been based on fuzzy logic.
- Several years of research cooperation with biggest world software developer for plastic injection simulation Moldflow [3] resulted in finishing the functionality variable mould temperature generation. This functionality with reology background that Moldflow incorporates can result in comprehensive influence outcome of temperature profiling.

In doctoral thesis described research work and results were financed by several national and European research projects. Let us mention at least EUREKA INTELLCON E13492 and IMOLD (New status driven injection moulding process for complex parts by the development of smart, self-controlling moulds).

In parallel to described research work, more exact, in parallel of "state-of-the" analyses, international patent search has been realized. By doing that, more detailed overview of applications manipulating heat via thermoelectric means, especially in injection moulding applications, has been gained. On basis of mentioned search results and already having some results of implication in injection moulding environment, application for European patent has been realized in 2007. Afterwards, patent WO2007121934 A1-2007-11-0 has been granted that protects implication of thermoelectric heat manipulation in polymer processing, more exact, in injection moulding of thermoplastic, thermoset and elastomer materials.

Research results were published in several world (AFDM 2006, Pusan, S. Korea), European (TOOL 06, Torino, Italy; RPD 2008, Maria Grande, Portugal) and Slovenian conferences (ICIT 2005, ICIT 2007, IAT 2005, IRT 2006, IRT 2007, ERK 2006). Besides that, research results, stated in doctoral thesis, have been published in several publication cited in Science Citation Index (SCI):

1. **ŽAGAR, Boštjan**, NARDIN, Blaž, GLOJEK, Andrej, KRIŽAJ, Dejan. Prilagodljivi sistem za hlajenje orodij za brizganje plastike s pomočjo termoelektričnih modulov = An adaptive system for cooling injection-moulding moulds via thermoelectric modules. Stroj. vestn., 2006, letn. 52, št. 10, str. 630-644. [COBISS.SI-ID 9766683]

2. NARDIN, Blaž, **ŽAGAR, Boštjan**, GLOJEK, Andrej, KRIŽAJ, Dejan. Adaptive system for electrically driven thermoregulation of moulds for injection moulding. J. mater. process. technol. [Print ed.], 12. jun. 2007, vol. 187-188, str. 690-693. [COBISS.SI-ID 13822261]

3. **ŽAGAR, Boštjan**, NARDIN, Blaž, GLOJEK, Andrej. Adaptive system for electrically driven thermoregulation of moulds for injection moulding. International Journal of Microstructure and Materials Properties, 2008, vol. 3, no. 2/3, str. 439-450. [COBISS.SI-ID 14450997]

Kazalo

Kazalo	12
1 Uvod	19
1.1 Cilji raziskave	20
2 Tehnologija predelave plastike	21
2.1 Materiali	21
2.2 Toplotne lastnosti polimerov	22
2.3 Brizganje plastike	23
2.3.1 Faze v postopkih brizganja plastike	24
2.3.2 Temperaturne razmere v procesu brizganja plastike	27
2.4 Simulacije brizganja plastike	31
2.4.1 Uporaba računalniških simulacij pri razvoju novega izdelka	31
2.4.2 Simulacije brizganja plastike ob RTR-temperiranju	33
3 Stanje temperiranja orodij v industrijski praksi	34
3.1 Neposredne metode	35
3.2 Posredne metode	40
3.2.1 Postopek variotherm	40
3.2.2 Kombinacija segrevanja z IR-sevali	42
3.2.3 Segrevanje s plamenom (MMSH-tehnologija)	42
3.2.4 Segrevanje z elektromagnetno indukcijo	42
3.2.5 Primerjave navedenih RTR-tehnologij	42
4 Termoelektrični moduli	44
4.1 Uvod	44
4.2 Osnovne zveze med električnim in toplotnim tokom	46
4.2.1 Splošna enačba za električno polje \vec{E}	47
4.2.2 Splošna enačba za gostoto toplotnega toka \vec{W}	47
4.3 Poenostavljen opis Peltierovega efekta	48
4.4 Tehnični podatki TEM in omejitve	51

4.4.1 Osnovne enačbe termoelektričnih veličin (povzeto po [69]:	52
5 Testi tehnologije TEM	54
5.1 Razvoj prototipnega toplotnega izmenjevalnika s TEM	54
5.1.1 Izbor termoelektričnega modula	54
5.1.2 Testiranje možnih toplotnih obremenitev ter distribucije toplote po površini.....	55
5.1.3 Testiranje dosegljive toplotne dinamike.....	56
5.1.4 Obratovalni testi	57
5.1.5 Razprava.....	61
5.2 Temperiranje s TEM v orodju za brizganje plastike – testna ploščica ISO 294.....	62
5.2.1 Opisa testnega sistema.....	62
5.2.2 Vsebina testov.....	63
5.2.3 Rezultati	64
5.2.4 Razprava.....	66
5.3 Producersko orodje za izdelavo PS-pokrovov – Gorenje Orodjarna d.o.o.....	67
5.3.1 Opis testnega projekta	68
5.3.2 Merilno okolje:	71
5.3.3 Določitev konstantnih pogojev predelave	72
5.3.4 Spremljanje linije spoja.....	73
5.3.5 Lokalno predgrevanje – odstranitev pojava linij spoja.....	74
5.3.6 Temperaturne deformacije in njihov nadzor	75
5.3.7 Razprava.....	76
5.4 Testno miniorodje – aplikacija mikrobrizganja plastike	77
5.4.1 Vgrajeni tehnični detajli	79
5.4.2 Merilno okolje:	80
5.4.3 Testi in rezultati	81
5.4.4 Razprava.....	84
5.5 Uporaba tehnologije v tehnologiji brizganja duroplastov	86
5.5.1 Osnovne toplotne in reološke posebnosti predelave duroplastov	86
5.5.2 Razvoj orodja	89
5.5.3 Potek in rezultati testov	91
5.5.4 Razprava.....	91
6 Analiza z metodo končnih elementov (MKE).....	93

6.1	Fizikalni model, analize MKE	93
6.2	Opis simulacijskega modela	95
6.2.1	Geometrija	95
6.2.2	Snovne lastnosti posameznega sklopa	96
6.2.3	Robni pogoji elementov sklopa.....	98
6.2.4	Rezultati	100
6.2.5	Razprava.....	102
7	Električna nadzorna enota.....	104
7.1	Celoten sklop.....	104
7.2	Regulacija z logiko Fuzzy	105
7.2.1	Fuzzifikacija (mehčanje).....	106
7.2.2	Inferenčna matrika (proces odločanja)	107
7.2.3	Defuzzifikacija (ostrenje)	107
7.3	Aktuacijska enota	107
7.4	Razprava	109
8	Zaključki.....	111
8.1	Izvorni prispevki znanosti	115
9	Literatura	116
	Izjava	122
	Priloga 1.....	123
	Priloga 2.....	124
	Priloga 3.....	125
	Priloga 4.....	127
	Priloga 5.....	131

Kazalo tabel

Tabela 1	Rezultati testiranj linij spoja	74
Tabela 2	Rezultati deformacij zaradi različnih temperatur brizgalne in izmetalne strani orodja.....	75
Tabela 3	Preglednica opravljenih variacij testov in poimenovanje posameznih vzorcev	82
Tabela 4	Koeficienti polinomov za aproksimacijo termodinamičnih koeficientov [57]..	95
Tabela 5	Inferenčna matrika	107

Kazalo slik

Slika 1	Razlaga pvT-diagrama za amorfne materiale	22
Slika 2	Upodobitev časovnih razmer v času enega cikla	24
Slika 3	Razlaga faz procesa brizganja plastike	25
Slika 4	Razlaga tlačnih razmer v procesu polnjenja	26
Slika 5	Termodinamična blokovna shema procesa brizganja plastike	28
Slika 6	Toplotni tokovi v orodju za brizganje plastike.....	29
Slika 7	Variiranje temperature orodja preko delovnega cikla	29
Slika 8	Odvisnost časa hlajenja od temperature orodja za različne materiale	31
Slika 9	Določitev tehnološkega okna proizvodnje.....	32
Slika 10	Prikaz lastnosti vodnega toka v orodjih za brizganje.....	36
Slika 11	Postavitev temperirnih kanalov	37
Slika 12	Optimiranje postavitve temperirnih kanalov	38
Slika 13	Predstavitev problematike temperiranja oglišč.....	39
Slika 14	Predstavitev problematike temperiranja oglišč.....	41
Slika 15	Toplotni tokovi znotraj TEM preko posameznih PN-spojev	46
Slika 16	Primer Peltierovega efekta na zaključeni zanki.....	48
Slika 17	Blokovna shema termoelektričnega modula	50
Slike18	Prikaz merilnega okolja na Fakulteti za strojništvo (levo); detekcija distribucije temperature s pomočjo termovizijske kamere (desno)	55
Slika 19	Prikaz prehodnega pojava celotnega sklopa s slike 18.....	56
Slika 20	Prikaz merilnega okolja za prototipni test z zrakom kot okolico	58
Sliki 21	Prikaz temperature (glede na vhodni parameter) sklopa z zrakom na vroči strani TEM.....	58
Slika 22	Prikaz časovnega poteka temperature sklopa z zrakom na vroči strani TEM .	59
Sliki 23	Prikaz merilnega okolja za prototipni test z Al-blokom kot okolico	60

Slika 24	Prikaz rezultatov sklopa z Al-blokom na vroči strani TEM	60
Slika 25	Prikaz časovnega poteka temperature sklopa z Al-blokom na vroči strani TEM	61
Slika 26	CAD-model orodja (izmetalna stran) za brizganje testne ploščice z vgrajenimi TEM na brizgalni in izmetalni strani	62
Slika 27	Shema sestava prikazanega na sliki 26.....	63
Slika 28	Orodje za brizganje testnih ploščic pri preizkusu – stroju za brizganje plastike KM 80 CX.....	64
Slika 29	Končni izdelki testnega orodja; material: biokompozit (mešanica PP in lesa)	66
Slika 30	CAD-model testnega izdelka in brizgani izdelek (obe gnezdi – slika v sliki, spodaj desno).....	68
Slika 31	CAD-model sestava orodja	69
Slika 32	Prikaz deformacij gravurnega vložka zaradi tlačne obremenitve.....	70
Slika 33	Izgled izdelanega orodja; s TEM temperirano gnezdo in klasično temperirano gnezdo	71
Slika 34	Pregled brizgalnih parametrov	73
Slika 35	Pregled temperaturnih parametrov	73
Slika 36	Slika termične deformacije oziroma način merjenja	75
Sliki 37	CAD-model izdelka (levo) ter pripadajoča reprezentativna plastična kosa (desno).....	77
Slika 38	CAD-model izmetalnega dela orodja	78
Slika 39	Rezultat simulacije polnjenja izdelka in viden detajl linije spoja (potreben čas polnjenja 0,8 s.)	79
Sliki 40	Mikroskopska slika vlepljene silicijeve piramidne strukture na brizgalno stran orodja (levo) ter plastični odtis – izdelek s pripadajočo stopnjo preslikave (desno).....	80
Sliki 41	Merilno okolje predstavljenega mini-/mikroprojekta z navedeno opremo	81
Slika 42	Potek dosegljivih temperaturnih odzivov pri temperaturi vodnega izmenjavalca 30 °C; stanje 2b iz tabele 3.....	83
Slika 43	Potek tlaka taline ob spremenjenih temperaturnih režimih površine orodja; temperature so navedene v tabeli 3.....	84
Slika 44	Potek modula elastičnosti v odvisnosti od temperature za duroplaste	86
Slika 45	Potek stopnje zamreženosti od časa; $\alpha = 0$ definira začetek reakcije, popolno zamreženje predstavlja $\alpha = 1$	87
Slika 46	Potek viskoznosti od stopnje zamreženosti in časa	87
Slika 47	Potek viskoznosti od stopnje zamreženosti in časa [71]	89

Slika 48 CAD-detajli orodja in vgradnja TEM.....	90
Sliki 49 2-dimenzionalni model preučevanega sklopa v okolju MKE (levo) in njegova realna upodobitev (desno)	95
Slika 50 Shema modela TEM.....	97
Slika 51 Predstavitev temperaturnih robnih pogojev.....	99
Slika 52 Predstavitev robnih pogojev (tekočine)	100
Slika 53 Temperaturna porazdelitev optimiranega modela MKE po končanem prehodnem pojavu.....	101
Slika 54 Potek temperature po ordinatnem prerezu (prerez viden na sliki 53).....	102
Slika 55 Blokovna shema sistema za temperiranje površin v okviru 0,1 K	105
Slika 56 Programski blokovni diagram FUZZY-regulatorja	105
Slika 57 Prikaz napake temperature E in napake spremembe temperature D.....	106
Sliki 58 Krmilnik v delovnem okolju: na levi sliki je prikazana procesna enota, na desni pa celoten testni sistem, opisan v poglavju 5.1	108
Slika 59 Blokovna shema močnostne elektronike.....	109

1 Uvod

Polimeri so sestavljeni iz velikega števila (od nekaj sto pa do več milijonov) majhnih molekul, ki so med seboj povezane s kemijskimi vezmi.

S polimeri se srečujemo praktično na vsakem koraku; tudi naše telo je v veliki meri sestavljeno iz polimerov, saj so proteini polimeri aminokislin. Poznamo tako naravne kot umetne (sintetične) polimere.

Številni naravni polimeri se že tisočletja uporabljajo kot materiali, npr. volna, svila, bombaž.

Umetni polimeri (imenujemo jih tudi sintetični) so plod raziskav, nadomeščajo naravne polimere in imajo posebno kemijsko in fizikalno strukturo, prilagojeno področju uporabe. Plastika je le manjši del ogromne družine umetnih polimerov.

Področje materialov se je razvilo od najdbe in uporabe do tega, da se lahko materiali poljubno oblikujejo in krojijo po zahtevah. Raziskovanje in razvoj določata materiale, izdelke in celo trg.

Industrija polimerov in še posebej proizvodnja plastike (v nadaljevanju bomo uporabljali naziv plastika za vse termoplaste) sta postavljeni pred velike zahteve. Plastika je danes na veliko področjih tako dominantna, da se pogosto postavlja vprašanje, kako smo pred 50 leti sploh lahko shajali brez nje. Zaradi odlične predelave in razmerja cena-rezultat je edini material s tako hitro rastjo. Za tem razvojem stoji industrija z neprestanimi inovacijami: to so proizvajalci plastike, predelovalci in proizvajalci strojev. Skladno s tem še naprej raste količina svetovne proizvodnje plastike – lahka plastika je po volumnu prekoračila klasično jeklo že v 80-ih letih prejšnjega stoletja. V letu 2003 sta se v svetu proizvedla 202 milijona ton plastike. Stopnja rasti svetovne proizvodnje plastike znaša okrog 11 %. V manj kot 15 letih se je količina proizvedene plastike na svetu celo podvojila. V Evropi so v letu 2003 proizvedli okoli 52 milijonov ton plastike [2, 4].

Slovenska industrija polimerov je svetovni rekorder po predelavi polimerov na prebivalca, tj. 165 kg. Proizvodna statistika daje povsem izkrivljeno sliko, ker manjši proizvajalci ne oddajajo podatkov, večji pa plastične komponente prištevajo k svoji, npr. kovinski ali elektro panogi. Rekorderji smo tudi po številu podjetij, imamo jih 1.600 in še 300 orodjarn, ki v pretežni meri oskrbujejo z orodji ravno predelovalce plastike [5].

Tudi orodjarstvo, ki je ključno povezano s predelavo polimerov, je visoko razvito. Obe panogi hitro sledita tehnološkim spremembam in postajata pomemben del visokotehnoloških »megatrendov« prihodnosti. Nespoma je ugotovitev, da bodo polimeri med vsemi skupinami materialov še precej let zadržali rekordno rast in da bodo tudi v industriji razvitih držav še naprej igrali eno vodilnih vlog. Seveda pa se enostavni izdelki in postopki iz standardnih "monomaterialov" hitro umikajo v države s cenejšo delovno silo.

Navedena dejstva upravičujejo pospešen razvoj celotne tehnologije, ki se ukvarja s predelavo polimerov. Predstavljeno delo je tehnologijo, ki smo jo razvijali več let, testiralo na procesu brizganja plastike, ki predstavlja enega pomembnejših procesov predelave polimerov nasploh.

1.1 Cilji raziskave

Z osnovno hipotezo in celotnim večletnim raziskovalnim delom smo poskušali dokazati upravičenost vnosa tehnologije temperiranja orodij za brizganje plastike s pomočjo termoelektričnih modulov.

Z začetnimi preglednimi študijami tehnologij temperiranja orodij ter uporabo TEM v aplikacijah temperiranja, ki so jim sledili prototipni testi tehnologije, predvsem pa z obširnimi industrijskimi testiranjmi, smo hipotezo dokazali. Z rezultati smo ožje opredelili posamezne podzvrsti brizganja plastike, kjer so prednosti predstavljene tehnologije v primerjavi s klasičnim temperiranjem močneje poudarjene kot drugod.

2 Tehnologija predelave plastike

2.1 Materiali

Polimer je ogromna molekula (makromolekula), sestavljena iz ponavljajočih se strukturnih enot (monomerov), povezanih s kovalentno kemijsko vezjo. Beseda izhaja iz grščine, πολυ, poly, »veliko« in μέρος, meros, »del«. Dobro poznani polimeri so plastika, DNK in proteini.

Poznamo naravne in umetne polimere. Med naravne sodijo protein, škrob, celuloza, hitin, lignin in lateks, med umetne polimere pa plastične mase. Sintetični umetni polimeri se proizvajajo v velikih količinah za zelo različna področja.

Plástika ali plástična mása (iz grške besede plastikos - oblikovati, ulivati) je skupno ime za vrsto sintetičnih in polysintetičnih materialov, ki jih pridobivamo s polimerizacijo organskih ogljikovih spojin. Plastičen predmet je sestavljen iz množice dolgih ogljikovih verig, ki so sestavljene iz ponavljajočih se kratkih enot. Za večino teh materialov je značilno, da se ob delovanju sile upognejo, ne da bi se zlomili - plastičnost, po čemer so dobili tudi ime.

Večinoma smo se srečevali s termoplastičnimi polimeri (v literaturi se zasledi tudi beseda plast (plastomer)), ki predstavljajo skupino nezamreženih polimernih materialov, sestavljenih iz dolgih linearnih ali delno razvejanih polimernih verig, ki so prostorsko vezane s šibkimi molekulskimi ali van der Waalsovimi vezmi. Termoplasti niso odporni na povišano temperaturo, tako ob segretju najprej postanejo plastični (primerni za oblikovanje), kasneje pa tudi tekoči (primerni za brizganje). Po ohladitvi talina otrdi in obdrži dano obliko. Procesni so reverzibilni, kar pomeni, da lahko termoplaste recikliramo. Osnovna delitev termoplastov temelji na urejenosti molekul, in sicer na amorfne (izotropična struktura pogojuje lastnosti kot postopno taljenje, višjo viskoznost, manjše skrčke, manjše deformacije, nizko dinamično odpornost, nizko odpornost na topila in olja ter možnost transparentnih izdelkov) ter delnokristalinične (anizotropična struktura pojasnjuje ozko določeno tališče, nizko viskoznost, večje skrčke, večje deformacije, visoko dinamično odpornost, dobro odpornost na topila in olja ter netransparentnost materiala) [6].

Nanostrukturirani in inteligentni materiali, lahki multifunkcionalni visokoodporni materiali in prevleke, materiali z ekstremnimi specifičnimi lastnostmi so med najperspektivnejšimi skupinami. Tehnologije materialov so poleg procesnih tehnologij, strojegradnje, avtomatizacije in diagnostike temelj vseh industrijskih rešitev. Ključni vzvodi uspeha so nove učinkovitejše rešitve, nizki vseživljenjski stroški, vključno z reciklažo, ter zanesljivost, sonaravnost in varnost [2].

Vsi navedeni »inteligentni« plasti pa potrebujejo sledenje pri razvoju predelave. Brizganje plastike je najbolj razširjen ciklični postopek predelave plastike [7].

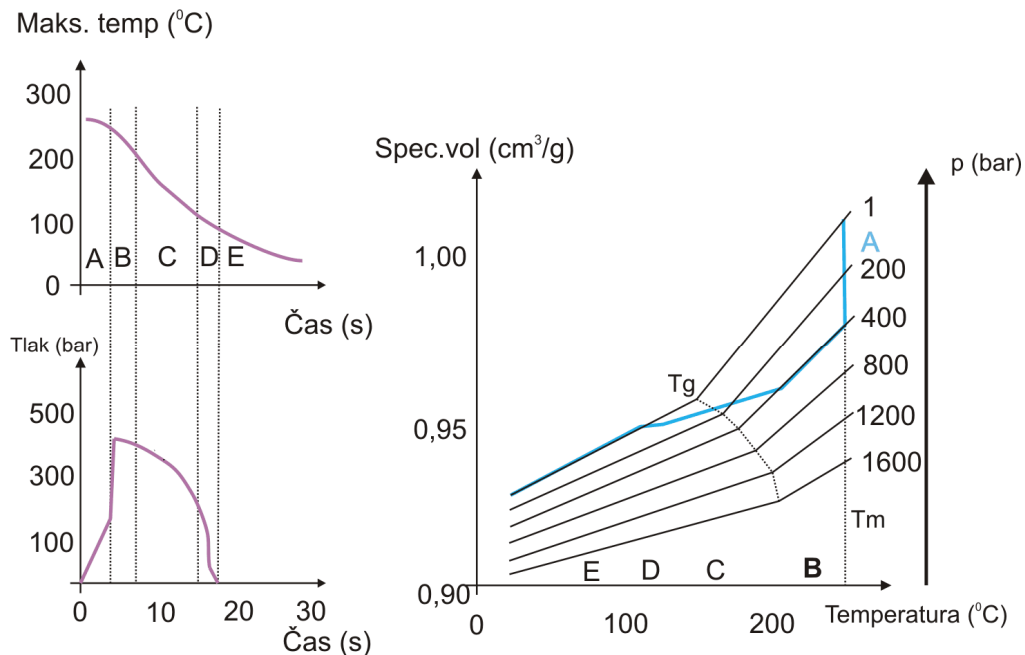
2.2 Toplotne lastnosti polimerov

Za proces brizganja so poglavitne tri fizikalne veličine: temperatura (T), tlak (p) in specifični volumen (v). Način predelave ter dimenzijska točnost končnega izdelka sta odvisna od specifičnega volumna oziroma gostote.

Vpliv strukture na lastnosti polimernih materialov - diagram pvT

Obe vrsti materialov, amorfni in delnokristalinični, kažeta na področju taline linearno odvisnost specifičnega volumna taline od temperature. Precejšnja razlika pa je na področju strjevanja. Zaradi kristalizacije delnokristaliničnih materialov med ohlajanjem taline v orodju se talina močno skrči. Specifični volumen pada z zniževanjem temperature eksponencialno, medtem ko ohranijo amorfni materiali linearno odvisnost med v in T tudi na področju strjevanja. To dejstvo je vzrok za veliko večji skrčec delnokristaliničnih materialov, kot pa je pri amornih materialih [6].

PvT-diagram materialov je sinonim za predvidevanje procesa predelave kot tudi za lastnosti končnega izdelka. Glede na dogajanja pri ohlajanju in krčenju taline amornih in delnokristaliničnih materialov morajo biti tudi pogoji predelave prilagojeni zakonitostim, ki jih velevajo strukturne značilnosti obeh vrst materialov. PvT-diagram prikazuje odvisnost specifičnega volumna od tlaka in temperature (za vse tri faze materiala: tekoča, trdna, faza prehoda) [3].



Slika 1. Razlaga pvT-diagrama za amorfne materiale

Razlaga diagrama:

pVT-podatki karakterizirajo cikel brizganja

- faza polnjenja
 - hiter, izotermni porast tlaka (A)
- faza naknadnega tlaka
 - izobarno hlajenje s tokom mase (B)
 - izobarno ali izohorno hlajenje s tokom mase (C)
 - izohorno hlajenje brez toka mase (D)
 - izobarno hlajenje pri atmosferskem tlaku (E)

Pri hlajenju taline po izobari (krivulje enakega tlaka) pridemo do prelomne točke, ki predstavlja točko steklastega prehoda T_g pri amorfni materialih in točko taljenja in začetek kristalizacije T_m pri delnokristaliničnih materialih. T_g obstaja samo pri amorfni materialih [3].

2.3 Brizganje plastike

Brizganje je najpomembnejši, najstarejši in najbolj razvit ciklični proces predelave polimerov, s katerim se predeluje duromere (duroplaste), elastomere in termoplaste (termoplaste). V Evropi se s predelavo plastike ukvarja približno 20.000 podjetij, ki zaposlujejo več kot 1,6 milijonov ljudi, od teh se jih več kot 15.000 ukvarja z brizganjem plastike [2].

Definicija: polimeren material potrebne viskoznosti (temperature 200–400 °C in pod visokim tlakom ca. 1000 barov) brizgamo v temperirano kalupno votlino. Osnovne značilnosti:

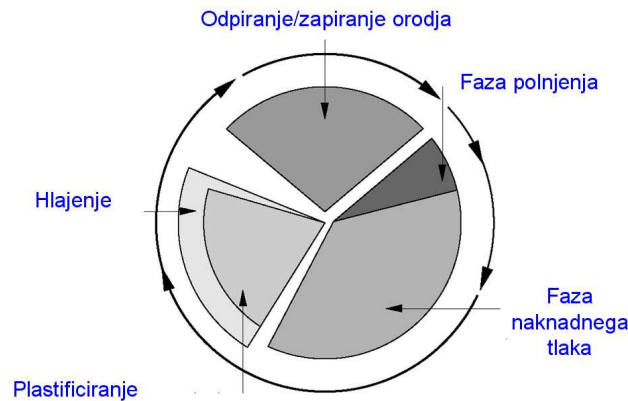
- predelujejo se lahko vsi materiali (termoplasti, duroplasti in elastomeri),
- postopek je visoko avtomatiziran,
- v večini je naknadna obdelava končnih izdelkov nepotrebna,
- razpon izdelkov je širok; od izdelkov široke potrošnje do kompleksnih tehničnih izdelkov (od mase, manjše od 0,1 mg, do večjih kot 25 kg).

V zadnjem desetletju so bili plastični materiali deležni najhitrejšega razvoja. Predelovalna tehnologija (stroji in oprema) ter orodja, s katerimi materiale preoblikujemo v novo obliko, ne sledijo razvoju.

Eno najpomembnejših vlog (če ne najpomembnejšo) v procesu brizganja plastike ima temperatura – profil temperature predelave plastike preko delovnega cikla in temperatura orodja. Zaradi pomembnosti temperature je potrebno dodatno opisati toplotne procese v ciklu predelave plastičnega kosa.

2.3.1 Faze v postopkih brizganja plastike

Delovni cikel procesa brizganja plastike je sestavljen iz faze zapiranja orodja, brizga taline v orodno votlino, faze naknadnega tlaka za kompenzacijo skrčkov, faze hlajenja, faze odpiranja orodja in izmetavanja izdelka [8].

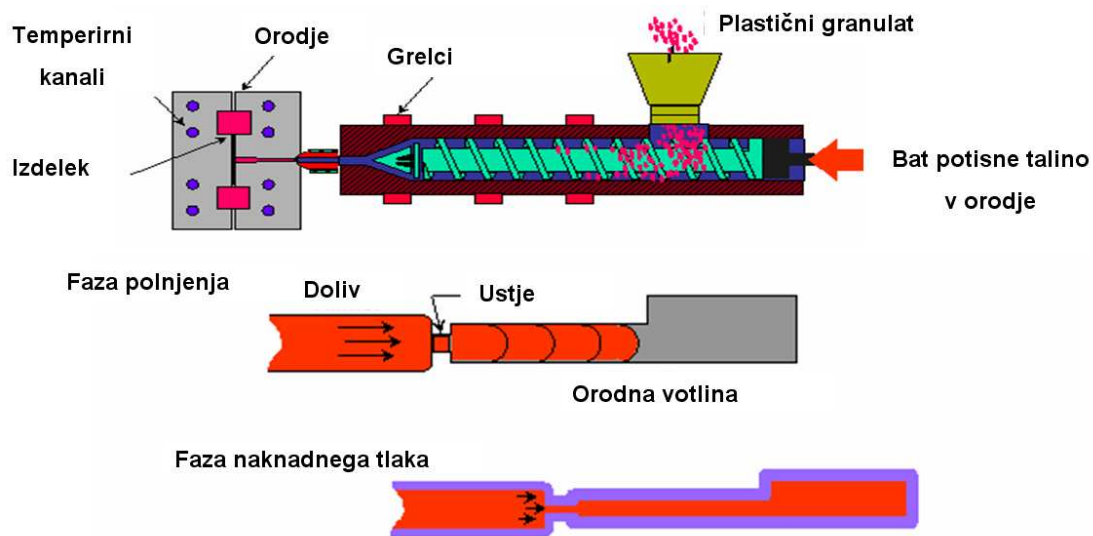


Slika 2. Upodobitev časovnih razmer v času enega cikla

Za razumevanje kompleksnosti termodinamične analize postopka je potrebno podrobneje predstaviti faze proizvodnega cikla. Da bi termodinamično proces lahko stekel, je potrebno material pretvoriti v talino s pomočjo grelcev (ob začetku procesa) oziroma trenja v plastifikatorju (v proizvodnem ciklu se večina toplote, potrebne za pripravo taline, generira s pomočjo trenja v plastificirni enoti, natančneje, trenja med mešanjem granulata) [7, 9]. V plastificirni enoti se talina pripravi na ustrezne delovne pogoje (viskoznost, temperatura) z namenom, da bi se lahko takoj zatem vbrizgala v orodno votlino predpisane temperature.

ZAPOLNJEVANJE

Zapolnjevanje sledi odpiranju/zapiranju orodja in predstavlja pomembno fazo izdelovalnega cikla. Fazo polnjenja poimenujemo čas od začetka polnjenja taline v orodno votlino do preklopa režima polnjenja (manjši tlak) na naknadni tlak (slika 3). Navadno je ta čas odvisen od velikosti (prostornine) izdelka in kapacitete plastificirne enote; čas polnjenja se namreč zaključi ob skoraj zapolnjenem izdelku (približno 95 % volumna) [10].



Slika 3. Razlaga faz procesa brizganja plastike

Osnovne lastnosti toka taline v orodno votlino:

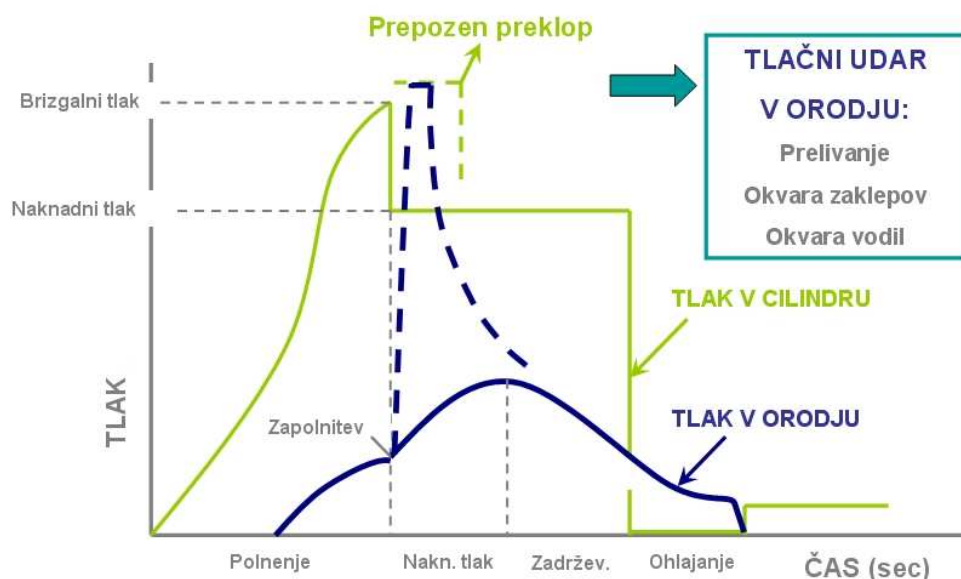
- material, ki prvi vstopi v orodno votlino, formira zamrznjeno plast ob ustju,
- material, ki zadnji vstopi v orodno votlino, je v sredini preseka,
- zapolnjevanje ima direkten vpliv na molekularno orientacijo in orientacijo vlaken na površini izdelka.

Ob skoraj zapolnjeni orodni votlini se polnjenje sicer nadaljuje, vendar z drugačnim režimom kot v fazi polnjenja. Imenujemo ga faza naknadnega tlaka.

NAKNADNI TLAK

Fazi zapolnjevanja sledi faza naknadnega tlaka, ki služi za kompenzacijo skrčkov, ki nastajajo v procesu strjevanja in so razloženi v pVT-diagramu. Najprimernejša razlaga namena, predvsem pa tlačih razmer, ki so generirane znotraj plastificirne enote in rezultat le-teh, tlak v orodju, prikazuje slika 4 [11].

Brizgalni ciklus:



Slika 4. Razlaga tlačnih razmer v procesu polnjenja

Osnovna funkcija naknadnega tlaka je kompenzacija skrčkov v procesu strjevanja. Ta postopek poteka takoj na začetku polnjenja orodne votline, zato je potrebno tlak na taline izvrševati tudi po zapolnitvi votline. Ti tlaki so navadno nižji od brizgalnih, dolžina trajanja pa je odvisna predvsem od debeline sten izdelka in s tem pripradajočimi skrčki. Zelo pomemben pa je čas (točka) preklopa iz brizgalnega na naknadni tlak. Če z naknadnim tlakom pričnemo prehitro, se kos ne bo pravilno in zadostno napolnil, če prepozno (slika 4) pa nastane prelitje ali celo mehanska okvara orodja (lom).

V orodni votlini material zopet spremeni agregatno stanje in se strdi pri predpisani temperaturi, preden lahko končan kos izmečemo iz orodja in pričnemo nov cikel. Iz opisanega sledi protislovje: plastiko je potrebno segreti in takoj zatem ohladiti, pri čemer naj bi temperatura orodja ostala enaka. Še več, ekonomika proizvodnosti zahteva čim nižje temperature predelave (krajši čas ohlajanja in s tem krajši cikel izdelave), kakovost plastičnih kosov pa čim višje temperature predelave. Prav iskanje kompromisa med proizvodnostjo in kakovostjo je osnova optimiranja termodinamičnega procesa v procesu brizganja plastike.

ČAS HLAJENJA

Čas hlajenja je čas od začetka delovanja časa naknadnega tlaka do začetka odpiranja orodja. Določamo ga računsko iz odvedene toplote pri ohlajanju izdelka ali pa ga določamo z različnimi empiričnimi metodami.

V večini primerov je čas hlajenja najdaljši od vseh časov, navedenih zgoraj, kar pomeni tudi stroškovno največjo postavko v ceni izdelave, in upravičuje nujnost raziskav na tem področju.

Čas hlajenja v procesu brizganja plastike je definiran kot potreben čas za ohladitev plastičnega kosa do temperature izmetavanja in je definiran v enačbi (1) [7]:

$$t_h = t_u + t_{np} + t_{ps} + t_{mr} + t_d, \quad (1)$$

kjer je t_h čas hlajenja, t_u čas brizga, t_{np} čas naknadnega tlaka, t_{ps} čas plastifikacije, t_{mr} čas morebitnega pomika plastifikatorja ter t_d kot dodaten čas hlajenja [7].

Poglavitni cilj optimiranja procesa in razvoja predstavljene tehnologije je skrajšati čas t_d , ki je teoretično nepotreben, v praksi pa zaseda od 45 do 67 % celotnega delovnega cikla.

Razmerja med pomembnimi temperaturami v procesu brizganja plastike so izkustveno podana z razmerjem (2) [7].

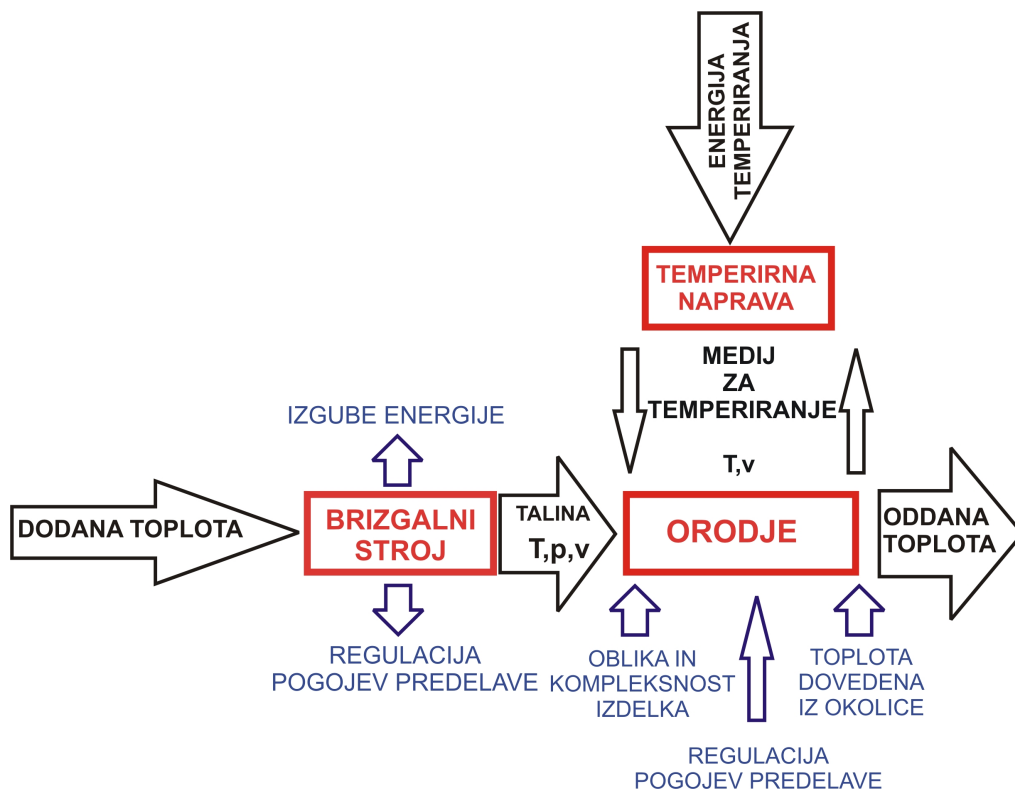
$$\Delta T_U : \Delta T_K : \Delta T_T = 6 : 5 : 1, \quad (2)$$

kjer je ΔT_U sprememba temperature izmetavanja, ΔT_K sprememba temperature orodja in ΔT_T sprememba taline materiala.

Iz razmerja (2) je razvidno, kako pomembno vlogo ima temperatura orodja.

2.3.2 Temperaturne razmere v procesu brizganja plastike

Termodinamični procesi v orodjih za brizganje plastike (in ostalih izdelovalnih procesih) so dandanes dobro popisani z modernimi programskimi paketi, ki delujejo na matematičnih osnovah izračunavanja s končnimi elementi (v nadaljevanju metode končnih elementov, krajše MKE). Pred tem so bili konstruktorjem orodij v pomoč t. i. nomogrami, diagrami z informacijami o porazdelitvi, preseki idr. temperirnih kanalov glede na lastnosti plastičnega kosa. Trenutno se pri večini konstrukcij orodij uporabljata analiza in optimizacija termodinamičnih lastnosti orodja z modernimi MKE-paketi zaradi tehnološke in ekonomske optimizacije proizvodnje. Zaradi navedenih analiz so omejitve temperirnih sistemov povezane in izvirajo samo iz omejitev temperirnega medija in konstrukcije temperirnega sistema [3, 12–16].



Slika 5. Termodinamična blokovna shema procesa brizganja plastike

Slika 5 prikazuje termodinamične sklope in povezave med njimi, ki opisujejo termodinamični proces brizganja plastike [9].

Z nadzorom nad temperaturami v procesu brizganja plastičnega nadziramo dva vzvoda:

a) Z optimizacijo temperiranja pridobimo vpliv na lastnosti kakovosti plastičnega kosa:

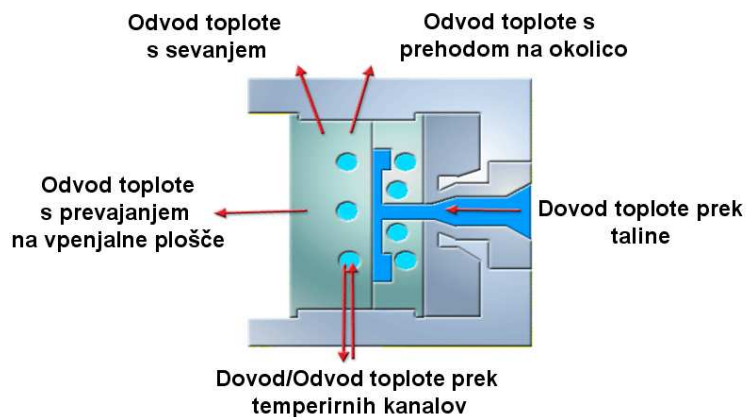
- izgled površine in njena kakovost
- zaostale mehanske napetosti
- kristalizacija
- termične deformacije
- dimenzijska stabilnost
- struktura materiala in orientacija vlaken

b) Prav tako pa so vsebina optimizacije tudi čas hlajenja in s tem povezana čas in cena izdelave:

- temperatura izmetavanja
- delovni cikel proizvodnje

Učinkovitost temperirnega sistema temelji na [17]:

- prehodu toplote med talino in orodno površino
- prestopu toplote med spojem plastika/orodje in spojem temperirni medij/orodje tj. preko orodja
- prehodu toplote med spojem temperirni medij/orodje in temperirnim medijem

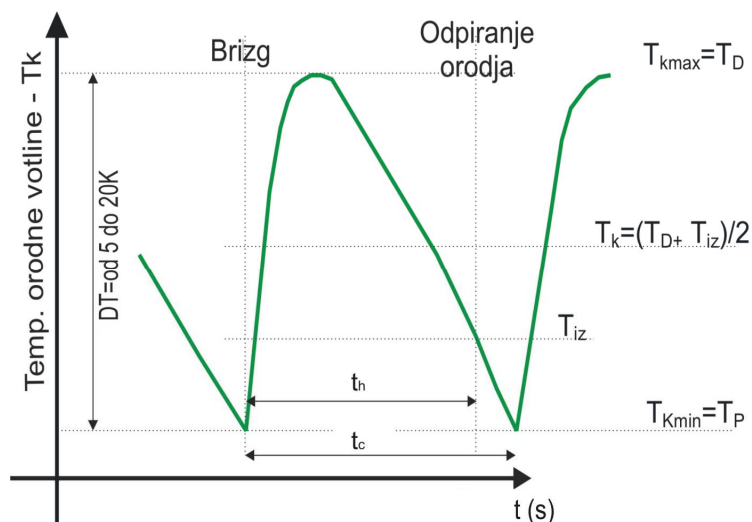


Slika 6. Toplotni tokovi v orodju za brizganje plastike

Poglavitne omejitve sposobnosti temperirnih sistemov

- lastnosti taline
 - specifična toplota
 - toplotna prevodnost
- temperaturni gradient med talino in temperaturo orodne votline
- kakovost površinskega spoja med plastiko in orodno votlino

Proces brizganja plastike je ciklični postopek, kakršen je tudi potek temperature površine orodne votline (slika 7), ki variira okoli srednje vrednosti [7].



Slika 7. Variiranje temperature orodja preko delovnega cikla

Maksimalna temperatura orodne votline je definirana kot [7]:

$$T_{KMAX} = T_D = \frac{T_P b_k + T_T b_p}{b_k + b_p}, \quad (3)$$

kjer je $T_P = T_{KMIN}$ začetna temperatura orodne votline (nastavljiva vrednost), T_{KMAX} maksimalna dosežena temperatura v orodni votlini, b_k toplotna prevodnost orodnih vložkov, b_p toplotna prevodnost polimera, T_P začetna temperatura orodnega vložka in T_T temperatura polimerne taline.

Enačba časa hlajenja plastičnega kosa se glasi [7]:

$$t_h = \frac{b_0^2}{K_0 \pi^2 a_{ef}} \ln \left(K_U \frac{T_T - T_K}{T_U - T_K} \right), \quad (4)$$

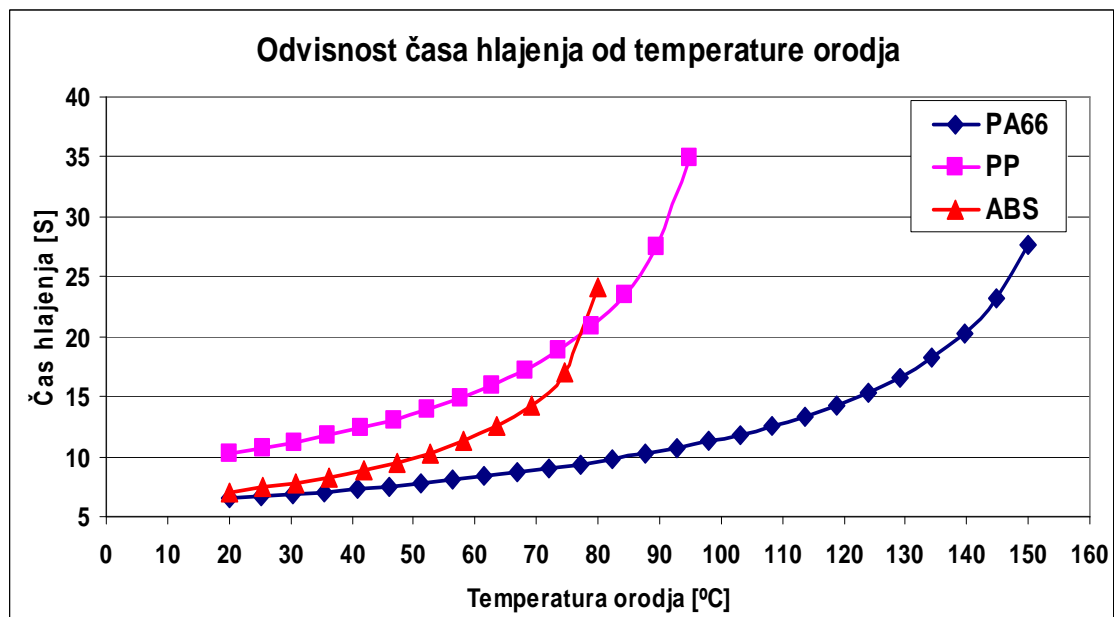
kjer je b_0 karakteristična dimenzija izdelka, a_{ef} toplotni prevodnostni koeficient materiala, K_U faktor oblike, T_T temperatura taline, T_K temperatura orodnega vložka ter T_U temperatura izmetavanja.

POVEZANOST TEMPERATURE ORODJA S ČASOM HLAJENJA

V industrijski praksi uporabljajo izkustveno pravilo glede povezanosti temperature izmetavanja plastičnega kosa (priporočena vrednost proizvajalca materiala, odvisno tudi od oblike kosa), temperature orodja ter temperature taline, navedeno že v enačbi 2.

Iz razmerja lahko opazimo velik vpliv sprememb temperatur orodja tako v primerjavi s temperaturo izmetavanja (priporočena vrednost) kot tudi temperature taline (prav tako priporočena vrednost proizvajalcev materialov).

Izrazitejša pa je odvisnost časa hlajenja (in s tem časom cikla) od temperature orodja pri različnih materialih [17].



Slika 8. Odvisnost časa hlajenja od temperature orodja za različne materiale

Slika 8 prikazuje odvisnost časa hlajenja od temperature orodja za posamezne materiale. Podatki temeljijo na brizganem kosu-ploščici, debelim 2 mm, dolgim 200 mm, s srednjo vrednostjo temperature taline za posamezen material ob času brizga 1 sekunda. Slika pojasnjuje kompleksnost relacij, in sicer da poleg temperature orodja, temperature izmetavanja in temperature taline (enačba 2) na čas hlajenja vpliva tudi vrsta materiala.

2.4 Simulacije brizganja plastike

2.4.1 Uporaba računalniških simulacij pri razvoju novega izdelka

Konstruiranje orodja za brizganje v veliki večini primerov temelji na izkušnjah razvojnih inženirjev oziroma konstruktorjev, vendar zaradi naraščanja zahtev po kakovosti izdelka, čim nižji ceni le-tega ter čim krajših dobavnih rokov, postaja delo razvojnih inženirjev vse težje.

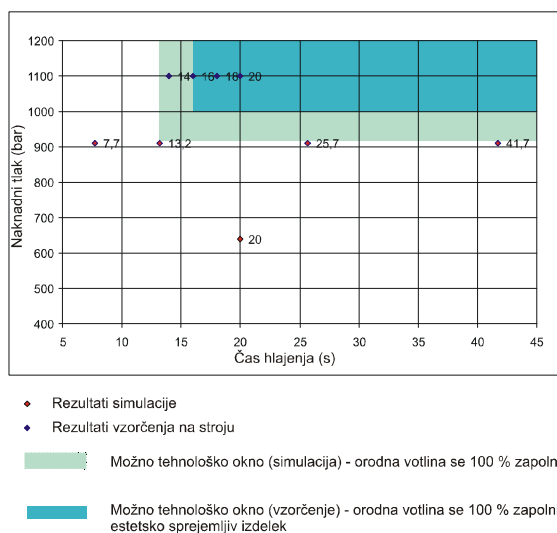
Računalniško podprto inženirstvo (CAE) predstavlja uporabo računalniške simulacije kot orodje za doseganje pogleda v procesna dogajanja. V zadnjih desetih letih smo priča izredno naprednemu razvoju na tem področju. Prednosti pri uporabi se izkoriščajo pri zmanjševanju stroškov izdelave, povečanju produktivnosti, s krajšanjem izdelovalnih časov in izboljševanju procesne stabilnosti ob istočasni povečani zanesljivosti.

- Razvojni inženirji lahko sedaj izvajajo preizkuse zapolnjevanja modela izdelka na računalniku, še preden je načrt izdelka v celoti zaključen.
- Konstruktorji orodja s pridom izkoriščajo rezultate simulacije za pravilno dimenzioniranje in oblikovanje orodja.

- Procesni inženirji lahko glede na izbrani stroj vnaprej določijo širino procesnega okna in dobijo podatke o celotnem vplivu procesnih parametrov, ki vplivajo na lastnosti, stroške in celoten izgled izdelka.
- Informacija o izbiri potrebne velikosti stroja v veliko pomoč načrtovalcem proizvodnje.
- Simulacija procesa predstavlja povratno informacijo, ki jo lahko koristno uporabimo kot vodilo pri nadaljnjem razvoju in izdelavi izdelka.

Trenutna praksa razvoja novih plastičnih izdelkov narekuje uporabo simulacij, natančnejše, simulacije se uporablja trikrat v življenjski poti razvoja novega izdelka, in sicer pri:

- razvoju izdelka: na tak način se optimira obliko izdelka, napove možnosti in problematiko zapolnitve, določi se potreben tlak in posledično potrebne zapiralne sile stroja, optimira se debeline stene izdelka, napove lokacije linij spoja in zračnih vključkov ter napove mesta z velikim volumskim skrčkom in posledično deformacije izdelka;
- razvoju orodja: poleg zgoraj naštetih lastnosti se lahko optimira še dolivne kanale, simulira in optimira se temperiranje orodja in napove možne izdelovalne cikle, natančnejše se lahko določi deformacije izdelka zaradi skrčka materiala;
- in optimizaciji tehnologije brizganja, kjer se izvedejo tako simulacije zapolnjevanja, temperiranja in deformacij z izdelanimi dolivnimi in temperirnimi sistemi; na ta način se optimirajo procesni parametri (čas polnjenja, hitrostni profil, temperatura mase, naknadni tlak, čas naknadnega tlaka in čas cikla), določi optimalne stroje za brizganje in najpomembnejše, določi možno teoretično tehnološko okno brizganja [13].



Slika 9. Določitev tehnološkega okna proizvodnje

Tehnološko okno predstavlja optimizacijo določenih vhodnih parametrov, čas polnjenja, hitrostni profil, temperaturo mase, naknadni tlak, čas naknadnega tlaka in čas cikla) glede na izbrane izhodne lastnosti (navadno je to kakovost izdelka, lahko pa so tudi omejitve stroja).

2.4.2 Simulacije brizganja plastike ob RTR-temperiranju

RTR-temperiranje je krajšava za vrsto procesa temperiranja z visokimi spremembami temperature v času delovnega cikla (RTR kot »Rapid Thermal Response«) [18–20].

Simulacije temperiranja orodij s trenutno obstoječimi programskimi paketi omogočajo analizo povprečnih temperatur preko delovnega cikla z največ eno prosto enodimenzijsko spremenljivko. Prav tako večina simulacijskih paketov [13] še zmeraj deluje na principu enodebelinskih mrežnih elementov preko debeline izdelka (t. i. »fusion« mreža). Popolne 3D-metode (naključno porazdeljeni elementi prek debeline izdelka) za analizo temperaturnih razmer so še zmeraj redke; takšnih, ki pa bi omogočale analizo aktivnih grelnih-hladilnih elementov v delovnem ciklu, trenutno ni na trgu.

Večina omenjenih paketov omogoča predoločene robne pogoje temperature taline, temperature temperirnega medija in srednjo vrednost temperature orodja. Takšni omejeni pogoji zato niso primerni za analizo RTR-postopka, zato je potrebno tovrstne probleme obravnavati v splošnih simulacijskih paketih (npr. Ansys, Comsol Multyphisycs ...), kjer lahko tovrstne fizikalne probleme obravnavamo sklopljeno, kot sklopljene tekočinsko-toplotne probleme oziroma sklopljene elektromagnetne/toplotne probleme.

Večletno vzorno raziskovalno sodelovanje z največjim svetovnim proizvajalcem programske opreme za simulacije brizganja plastike Moldflow [3] je botrovalo k dokončnem razvoju funkcije generiranja spremenljive temperature orodja. Ta omogoča ob vnosu temperaturnih profilov vpogled v reološko dogajanje, ki jih takšna temperaturna gibanja povzročijo.

3 Stanje temperiranja orodij v industrijski praksi

Čeprav se je z omenjenim postopkom predelave začelo že v drugi četrtini prejšnjega stoletja, pa so se termodinamične raziskave prenosa toplote v postopku predelave pričele šele v šestdesetih letih 20. stoletja, najprej empirično [21], kasneje pa tudi teoretično in eksperimentalno. Za razumevanje skupne izmenjave toplote v proizvodnem ciklu brizganja plastike pa je potrebno opisati proizvodni cikel izdelave plastičnega kosa. Da bi bil termodinamični proces možen, je potrebno polimerni material pretvoriti v talino (gretje), jo čim hitreje vbrizgati v orodno votlino predpisane temperature (temperiranje) in takoj zatem dovedeno toploto preko orodja (hlajenje) odvesti v okolico. S tem se doseže zadrževanje oblike plastičnega kosa po zapustitvi orodne votline. Iz opisanega sledi, da je potrebno plastiko ogreti in nato ohladiti, v obeh primerih na predpisano vrednost; prav tako obstajajo tudi omejitve temperatur orodja. Kakovost plastičnega kosa je najbolj odvisna od navedenih temperatur predelave. Proizvodnost zahteva čim nižje, kakovost pa čim višje temperature predelave. Prav doseganje kompromisa med proizvodnjo in kakovostjo pa je cilj optimizacije prenosa toplote v orodni votlini [22].

V sedemdesetih letih so se izdelali prvi teoretični celotni termodinamični modeli postopka, kasneje pa se je pozornost in optimiranje postopka predelave usmerila v razjasnjevanje termodinamičnih relacij v orodju. Sočasno s temi spoznanji so se zgradili konstruktorski napotki za orodja glede postavitve temperirnih kanalov [23]. V osemdesetih let so se razvila prva računalniška simulacijska orodja za analizo in kasneje tudi za optimiranje toplotnih razmer sistema orodja na osnovi optimiranja geometrije temperirnih kanalov [24]. Preko slednjih oziroma preko temperirnega medija se v orodja dovaja ali odvaja potrebna toplota [25].

Obvladovanje temperaturnih razmer v orodjih za brizganje plastike je eden izmed pomembnejših dejavnikov pri razvoju in izdelavi orodij [12, 26, 27]. Zmogljivosti omenjenega sistema s temperirnimi kanali in tekočim medijem kot sredstvom prenosa toplote pa so zaradi narave tehnologije (velike termične vztrajnosti) v veliko primerih nezadostne potrebam v industriji, ki narekujejo hitre in lokalno temperaturno ločene spremembe temperatur v orodjih. Kljub pomembnosti optimiranja postopka predelave in omenjeni slabosti temperiranja s tekočim medijem so se omembe vredne rešitve pojavile v devetdesetih letih prejšnjega stoletja.

Temperaturno problematična mesta se je najprej poskušalo obvladati z vgradnjo materialov z boljšo toplotno prevodnostjo kot orodno jeklo (berilij) [4], sledilo je obdobje aplikacij s tekočim dušikom ali CO₂ kot temperirnim medijem. Vse omenjene rešitve so reševale le probleme v orodjih, kjer s klasičnim pristopom ni bilo mogoče doseči zadostnega odvoda toplote (toploto je v sistem dovajala polimerna talina). Omenjene rešitve so reševale le probleme odvoda toplote. V primerih potrebnega dovoda toplote v termodinamični sistem orodja pa so bile aplicirane rešitve z vodo pod visokim tlakom (temperature do 200 °C), oljem kot tekočim temperirnim medijem ali električnimi grelci [25].

Vse omenjene tehnologije dovoda in odvoda toplote so se ukvarjale le s problematiko zagotavljanja konstantnih temperaturnih razmer v času delovnega cikla izdelave plastičnega kosa in niso sledile in reševale jedra temperirne problematike – zagotavljanja optimalne temperature v času zapolnjevanja orodne votline in nato čim hitrejšega odvoda toplote, dovedene s talino.

Tej rešitvi se je v devetdesetih letih prvič približala rešitev dovoda toplote z električnim grelci in odvoda z vodo v času hlajenja. Temu je sledil postopek VARIO THERM, ki je

dva temperaturna nivoja poskušal doseči z dvema ločenima temperirnima krogoma, v katerih sta dovod in odvod toplote ciklično vršila ustrezno pripravljena voda (vroča v času zapolnjevanje in mrzla v času hlajenja). V obeh primerih pa so omejitve predstavljale tako toplotne vztrajnosti orodij kot omejitve vztrajnosti in temperatur temperirnega medija.

Sredi devetdesetih pa so orodja za brizganje plastike začela postajati mehatronski sklopi, sistemi s tlačnimi, temperaturnimi senzorji in dajalniki pozicij posameznih premikajočih delov orodij [28]. Temu je sledil tudi razvoj tehnologij, ki je poskušal slediti smernicam razvoja predelave plastike [29]. Glede na način transporta energije ločimo neposredne metode (prevajanje, prestop toplote) in posredne metode (sevanje, prehod toplote).

Neposredne metode za prenos toplote uporabljajo prevajanje, v praksi pa je medij orodno jeklo. Najpogosteje modificirana rešitev sloni na kapljevinah kot izvoru/ponoru toplote. Osnovna zakonitost teh metod je, da obstaja vedno samo en medij in s tem povezan en konstanten nivo temperiranja. Preko kompleksnih oblik in poti temperirnih kanalov, ki sledijo 3D-obliki plastičnih kosov skupaj s kombinacijo materialov z izboljšano toplotno prevodnostjo in sistemom, ki preklaplja dva različna medija preko cikla, poskuša aplikacija slediti želenim temperaturnim profilom znotraj delovnega cikla. Omejitve še vedno predstavljajo fizikalne omejitve medija (voda) ter zahtevnost izdelave kompleksnih 3D-oblik kanalov [30]. Rešitev omejitve medija se rešuje z vodo pod visokim tlakom (30 barov, 250 °C) ali vpeljave medijev z boljšimi termodinamičnimi lastnostmi (suha para, glikol, CO₂). V posameznih aplikacijah se pojavlja tudi vnos električnega uporovnega gretja v kombinaciji s kapljevinastim medijem za hlajenje [25].

Pri posrednih metodah je poglobljena metoda prehoda energije elektromagnetno valovanje tako v primeru sevanja (infrardeč spekter [31], plamensko segrevanje [32]) kot tudi induktivnega segrevanja [33, 34]. Osnovna zakonitost indirektnih metod je zmožnost zagotovitve dveh različnih temperaturnih nivojev v enem izdelovalnem ciklu. Splošneje se za vse rapidne (z boljšim odzivom od klasičnega vodnega temperiranja) postopke segrevanja (v kombinaciji s hitrim ohlajanjem) uporablja naziv RTR [18–20]. Zahteva omenjenih postopkov je dovajanje velikih količin toplote v majhnem času (v času odpiranja in zapiranja orodja) in klasično hlajenje v preostalem ciklu. Z brizganjem taline v orodje temperature blizu temperature taline se močno izboljša kakovost procesa in plastičnega kosa [35].

3.1 Neposredne metode

Osnovni toplotni medij prenosa toplote za dovod in odvod potrebne oziroma odvečne toplote v sistem so kapljevine. V vsakodnevni industrijski praksi se v 90 % kot medij uporablja voda – zopet v večini primerov pod atmosferskimi pogoji (1 bar, do 100 °C). V primeru potrebe temperiranja orodij po višjih temperaturah se uporablja voda pod zvišanim tlakom (maksimalno 30 barov, 250 °C) ali o lje.

Najnovejše aplikacije temperiranja orodij poskušajo slediti termodinamičnim potrebam plastike [18, 36–39]. To pomeni, da se poskuša temperaturo površine orodne votline v času brizga približati temperaturi taline in jo nato z dovoljenimi (in priporočenimi) temperaturnimi gradienti skupaj z zapolnjeno votlino najhitreje ohladiti do temperature izmetavanja plastičnega kosa.

V vseh omenjenih primerih je izvir/ponor toplote kapljevina, ki je v orodje dovedena prek temperirnih kanalov, ki predstavljajo poglobitve omejitve omenjene tehnologije temperiranja.

Lastnosti temperiranja s temperirnimi kanali

Osnovne omejitve tehnologije podajata medij (tekočina in material) in oblika (postavitev kanalov).

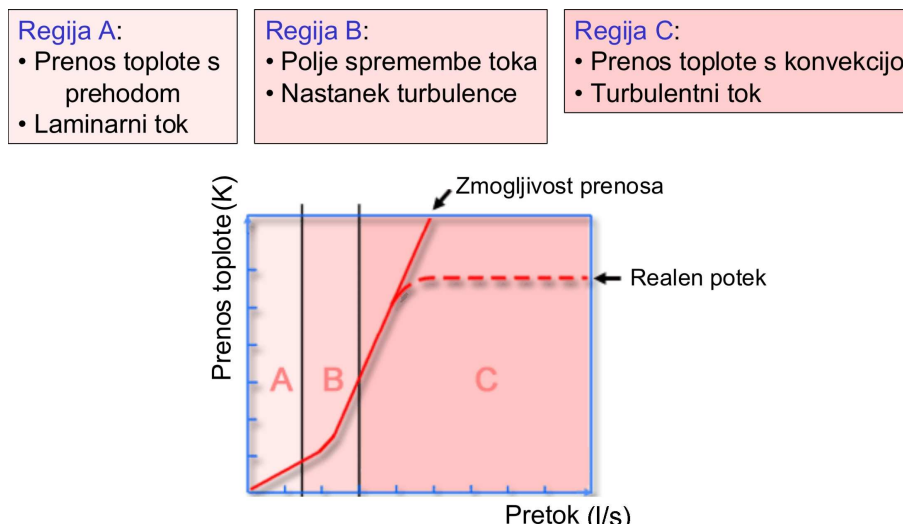
Lastnosti medijev

Snovne omejitve medijev:

- lastnosti polimerne taline:
 - specifična toplota
 - toplotna prevodnost
- temparturni gradient med talino in orodno površino
- kakovost spoja med plastičnim kosom in orodno površino

Poglobitve omejitve so torej vezane na termodinamične lastnosti orodnih materialov. Aluminij ima tako približno 5-kratno toplotno prevodnost navadnega orodnega jekla, zlitina berilija in bakra pa približno 10-krat boljšo toplotno prevodnost kot jeklo [3].

Vendar pa tudi mehanske lastnosti materialov pogojujejo izbiro, zato se v praksi uporablja kombinacija navedenih [3].



Slika 10. Prikaz lastnosti vodnega toka v orodjih za brizganje

Slika 10 prikazuje potek prenosa toplote glede na različne pretoke v vodnem kanalu, in sicer močno povečan prestop toplote preko stika temperirnega kanala in orodnega jekla v odvisnosti od povečevanje pretoka temperirnega medija in pojava turbulentnega toka. Vrednotenje prenosa toplote je predstavljeno z razliko temperatur temperirnega medija

na eni in orodnega jekla na drugi strani – večji prenos predstavlja manjšo temperaturno razliko.

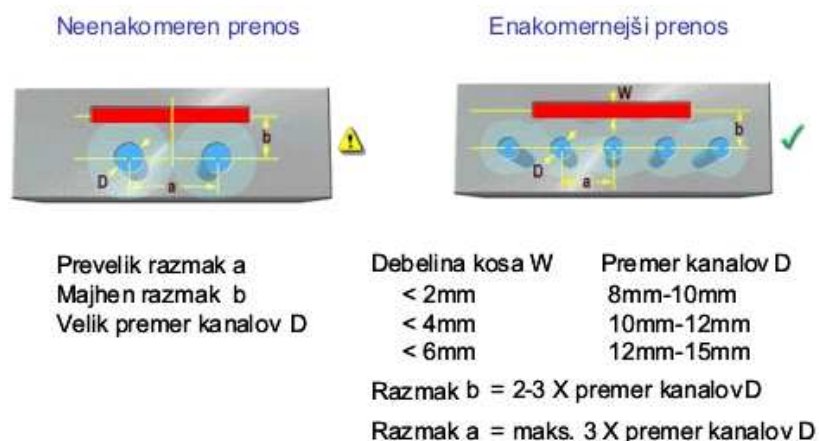
Podvojevanje pretoka (hitrosti) hkrati pomeni 8-kratno povečanje potrebne črpalne moči.

Prenos toplote iz/na orodje prek temperirnih kanalov je močno odvisen od hitrosti medija. Hitrost oziroma nastanek turbulentnega toka opisuje Reynoldsovo število; število 2200 opisuje mejo nastanka turbulentnega toka, ko se prenos toplote močno poveča v primerjavi z laminarnim tokom.

V praksi se zagotavlja turbulentni tok z Reynoldsovim številom, večjim kot 10000 [3].

Postavitev temperirnih kanalov

Postavitev temperirnih kanalov v praksi poteka na osnovi izkušenj in razpoložljivega prostora v orodjih. Glede na omenjeno neenakomernost postavitve prihaja do formiranja t. i. »mrtvih con«, predstavljenih na sliki 11. Možni izboljšavi tega problema sta povečanje števila temperirnih kanalov in zmanjšanje njihovega premera. Slednje je navzdol omejeno z zamašitvijo kanalov zaradi odlaganja vodnega kamna (1 mm vodnega kamna ima enako toplotno upornost kot 50 mm orodnega jekla [3]).

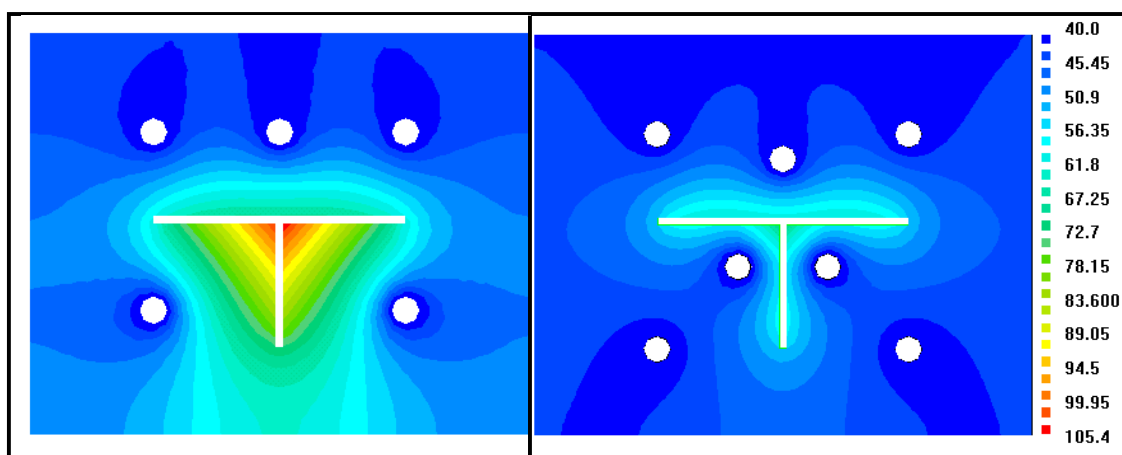


Slika 11. Postavitev temperirnih kanalov

Posamezne variacije postavitve temperirnih kanalov so odvisne od oblike in velikosti plastičnega kosa in oblike orodja – zmožnosti postavitve kanalov (drsni deli, izmetalni deli ...). Posamezne veje temperirnih kanalov so lahko med seboj povezane vzporedno (neenakomernost prenosa toplote zaradi nekontroliranega pretoka) ali zaporedno (problem padca tlaka in možnost premajhne kapacitete). Vedno pa težimo k zagotovitvi turbulentnosti toka.

Rezultati optimiranja postavitve temperirnih kanalov

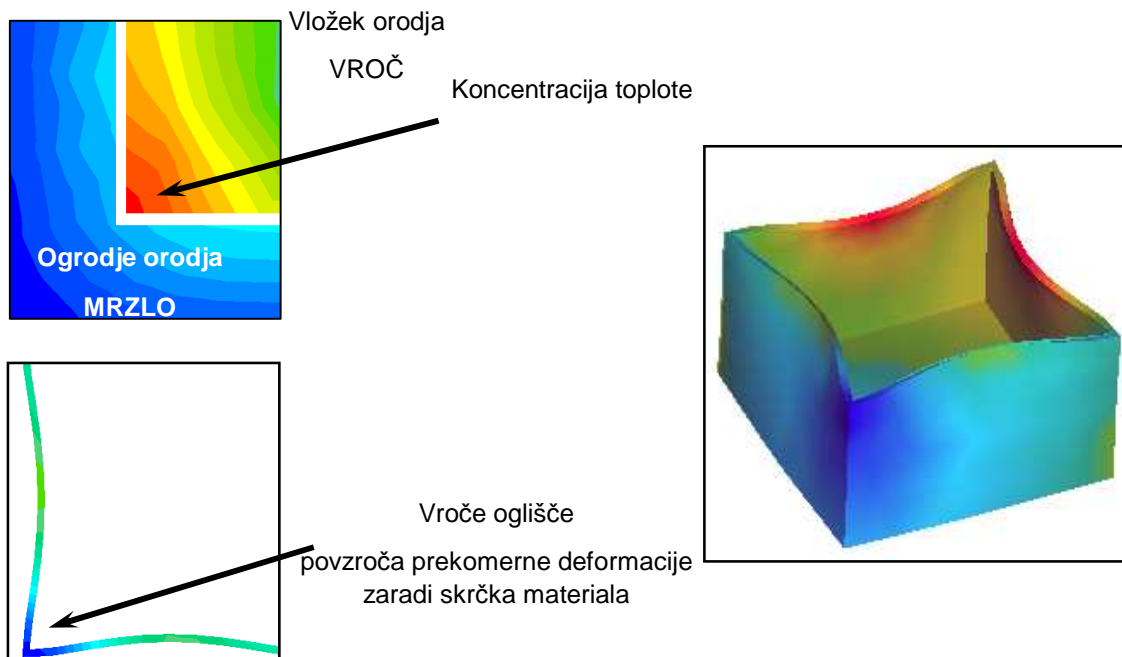
S sodobnimi simulacijskim paketi se postavitve temperirnih kanalov analizira in optimira. Na ta način se optimira temperaturno polje v orodju in s tem vpliv na kakovost izdelave plastičnega kosa. V omenjenem okolju se simulira optimalne razmere, ki naj bi vladale v produkcijskem ciklu [3].



Slika 12. Optimiranje postavitve temperirnih kanalov

S takšno optimizacijo postavitve se izognemo nepotrebnemu in predragemu naknadnemu popravljanju orodij.

Predstavljeno temperaturno polje neposredno vpliva na kakovost plastičnega kosa, obliko in mehanske lastnosti [13].



Slika 13. Predstavitev problematike temperiranja oglišč

Poenostavitve simulacij in posebnosti optimizacije hlajenja

Optimiranje obstoječe tehnologije temperiranja opisuje mnogo člankov. V doktorskem delu smo se glede optimiranja postavitve klasičnih kanalov seznanili z več avtorji [4, 11, 24, 26, 37, 40–45].

Prva skupina avtorjev [24, 26, 43, 44] je delo usmerila v postavitve novih, sklopljenih modelov, ki upoštevajo klasično ali izboljšano obliko (presek) temperirnih kanalov z namenom izboljšanja turbulentnosti toka. Postavljajo nove koncepte za avtomatsko generiranje poti z algoritmi optimiranja postavitve glede na neenakomernost porazdelitve temperature in s tem povezane deformacije [43].

Druga skupina avtorjev [46] se ukvarja s poglobljeno pomanjkljivostjo trenutnih simulacijskih paketov na trgu. Osnovne poenostavitve simulacijskih paketov so v predvidevanju enakomerne temperature po celotni orodni površini in enaki kakovosti toplotnega prenosa po celotni površini.

V praksi pa se plastični izdelek že v času hlajenja delno oddvoji od orodne površine, pri čemer se popolnoma spremenijo termodinamične relacije (toplotna prevodnost zraka je približno 1000-krat manjša od orodnega jekla). Tako se spremenijo kontaktne toplotne prevodnosti in s tem povezane kakovostne lastnosti plastičnega kosa.

Tretja skupina avtorjev [30, 42, 47] se ukvarja s preučevanjem t. i. konformnih oblik temperiranih kanalov. Ta oblika postavitve kanalov popolnoma sledi zunanji obliki orodne površine. Izdelavo tako omogočajo t. i. slojevite tehnologije, ki lahko izdelajo votle strukture, po katerih teče temperirni medij s slojevito gradnjo. Navadno so gradniki praškasti kovinski materiali, posamezne plasti pa utrdijo z visokoenergetskim žarkom (navadno laser). Končna trdnost kovinskega materiala se omogoči z omenjenim laserskim žarkom ali, če prvotni žarek samo poveže vezivo, z naknadnim sintranjem kosa pod visoko temperaturo in tlakom (izžiganje veziva).

Vse tri skupine pa so še zmeraj omejene s fizikalnimi lastnostmi medijev ter zmožnosti oblike in postavitve temperiranih kanalov. Zaradi tega je novejši razvoj tehnologije šel v smer t. i. indirektnih metod.

3.2 Posredne metode

Trendi razvoja v industriji proizvodnje plastičnih izdelkov so usmerjeni v minimizacijo in zmanjševanje mase. Izjemna rast izdelkov elektronike industrije široke porabe, t. i. 3C-industrije (»Computer, Communication in Consumer electronics«), silni razvoj v smer tanjšanja sten izdelkov (manj kot 1 mm). Še skrajnejše pa so zahteve mini-/mikroizdelkov (medicina, minisestavi itd.). Ti izdelki ob zmanjšani masi predstavljajo večjo prenosljivost, prihranek materiala (cena) ter nižje cene izdelave ob krajših izdelovalnih ciklih. V literaturi [48] so tankostenski izdelki karakterizirani s srednjo (povprečno) debelino, manjšo kot 1 mm, ali imajo razmerje med dolžino in debelino večjo kot 100.

Glede na predpostavke, da imamo pri klasičnem procesu (direktna metoda temperiranja) brizganja približno 0,25 mm debelo plast plastike (»kožica«), ki ob tečenju taline v orodno votlino zamrzne ob steni, lahko izračunamo, da pri 1 mm debelem kosa ostane samo še 0,5 mm efektivne debeline za tečenje taline. Zaradi tega dejstva je problem zapolnjevanja orodne votline pri tankostenskih izdelkih izredno pereč.

Prva rešitev problema zapolnjevanja so spremenjeni pogoji brizganja. Večji brizgalni tlaki in hitrosti, ki narekujejo mehansko »močnejša« orodja, ter materiali z nižjo viskoznostjo so prva rešitev tovrstnih problemov. Te rešitve pa kličejo po posebnih strojih, materialih in orodjih.

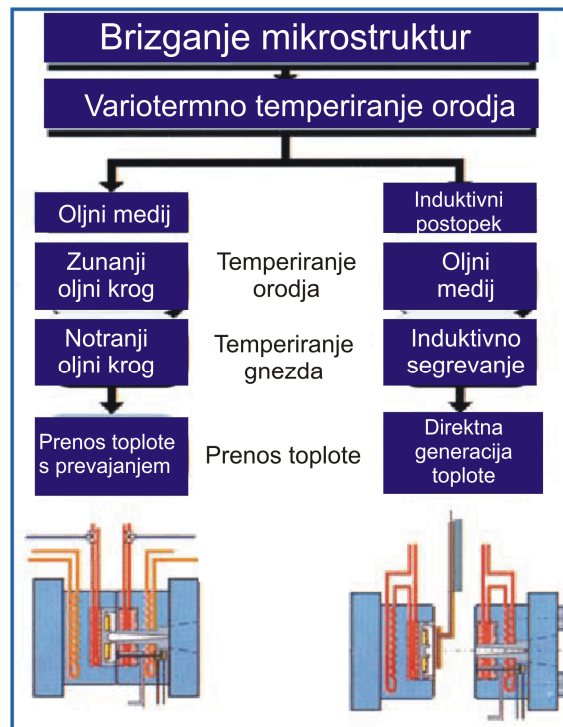
Druga rešitev pa je zviševanje temperature orodja in tanjšanje zamrznjene stene plastike (»kožice«) v času brizga. Avtorja Yao in Kim [49] veljata za utemeljitelja RTR-tehnologije (Rapid Thermal Response); tehnologijo omejuje zmožnost temperaturne spremembe orodne votline za vsaj 100 K ob ne pretemo podaljšanju časa cikla.

Tehnološke opcije zagotavljanja RTR

3.2.1 Postopek variotherm

V devetdesetih letih prejšnjega stoletja se je ideji dveh temperaturnih režimov v enem izdelovalnem ciklu prvič približala rešitev dovoda toplote z električnim grelci in odvoda z

vodo v času hlajenja [36, 49, 50]. Temu je sledil postopek variotherm, ki je dva temperaturna nivoja poskušal doseči z dvema ločenima temperirnim krogoma, v katerih sta dovod in odvod toplote ciklično vršila ustrezno pripravljena voda (vroča v času zapolnjevanja in mrzla v času hlajenja) [50].



Slika 14. Predstavitev problematike temperiranja oglišč

Postopek ima dve različici. Na levi je prva izpeljanka tega postopka, ki temelji na dveh ločenih temperirnih tokokrogih. Zunanji temperirni tokokrog služi za ohlajanje orodja. Notranji tokokrog je postavljen v gnezdo, da se temperatura v gnezdu tik pred vbrizgavanjem dvigne skoraj do temperature taline. Temperiranje poteka ločeno v zunanjem in notranjem tokokrogu. Hkrati se temperirna tokokroga tudi med ciklusom časovno preklapljata. Problematika predstavljene tehnologije [38, 51] je v pozicioniranju temperirnih kanalov, v tem primeru dvojnih.

Desna varianta ima le en temperirni tokokrog, ki zgolj temperira orodje. Za segrevanje se v odprto orodje zapelje induktivni grelec, ki ogreje površino orodja. Ko je površina segreta, se grelec hitro umakne iz orodja in sledi faza brizganja. Prednost desne variante z induktivnim grelcem je v tem, da ni potrebno segrevati celotnega orodja in ga nato ohlajati; segreva se namreč le površina orodja, ki pa v primeru mikrotehnologij predstavlja praktično celotno globino izdelka.

3.2.2 Kombinacija segrevanja z IR-sevali

Pri kombinaciji segrevanja z IR-sevali se uporablja energetski vir, ki preko elektromagnetnega valovanja (IR-spekter) seva energijo na površino orodne votline. Zmožljivosti in lastnosti tovrstne tehnologije opisujejo avtorji [31, 52] kot enostavno in robustno; še posebej, če gravurno površino slojevito obdelamo z mehansko odpornimi materiali z manjšo toplotno prevodnostjo. Na ta način se površina po prenehanju segrevanja in ob začetku brizga ne ohladi tako hitro na temperaturo celotnega orodja. Takšno aplikacijo opisujejo avtorji [31] kot izredno zmogljivo ob depoziciji dveh dodatnih slojev na orodno površino; prva (podlaga) služi za toplotno izolacijo in je osnovana na kovinskih oksidih, drugi (površinski) sloj pa temelji na kovini in služi kot mehanska bariera in sloj z veliko toplotno prevodnostjo (za določen IR-spekter seval).

3.2.3 Segrevanje s plamenom (MMSH-tehnologija)

Pri segrevanju s plamenom se za potrebe segrevanja uporablja tudi propanski plamen, ki služi kot vir toplote. Avtorji [32] zopet navajajo potrebo po zagotovitvi čim večje toplotne izoliranosti gretega (in ohlajane) gravurnega vložka. S tem se omili problem toplotne vztrajnosti sistema, ki je pereč v vseh aplikacijah s potrebo po hitrih toplotnih spremembah. Omenjena tehnologija je primerna za večje sisteme-orodja zaradi lažje dobave ogromnih količin toplote v kratkem času (toplotne moči reda nekaj deset kW).

3.2.4 Segrevanje z elektromagnetno indukcijo

Pri segrevanju z elektromagnetno indukcijo predstavlja vir segrevanja navitje. Čeprav so tovrstne raziskave zelo redke [53] (v industrijski praksi še ni zabeleženega primera uporabe), pa rezultati kažejo kompleksnost pri konstruiranju vira toplote – navitja. Največji problemi nastajajo pri dimenzioniranju, hlajenju navitja (visoki tokovi) ter predvsem čim enakomernjši distribuciji toplote po orodni površini (in ne samo nad navitjem). Princip generiranja toplote je na elektromagnetni indukciji, ki inducira t. i. vrtilne tokove, ki so poglaviti za nastanek toplote. Poleg tega pa je pri razlagi fenomena potrebno upoštevati še pojav kožnega pojava (skinefeka), ki služi za pojasnitev generiranja večine toplote na površini kovinske (feromagnetne) plošče – orodne površine. Toplotni pribitek histereznih izgub, ki prav tako nastajajo pri indukciji, se lahko v praksi zanemari, saj je v primerjavi s segrevanjem z vrtilnimi tokovi zanemarljiv.

3.2.5 Primerjave navedenih RTR-tehnologij

Postopek variotherm je primeren le za zelo enostavne (ploskovne) plastične kose zaradi problematike postavitve temperirnih kanalov. Obstajata dve verziji postavitve kanalov, in sicer enojni sistem, kjer z ventili v en tokokrog izmenično vsiljujemo mrzel/vroč medij. Drug sistem pa je dvojni, kjer sta aplicirana dva ločena tokokroga za mrzel in vroč medij, katerih pretok se izmenično ustavlja. Postopek je eden prvih znanih RTR-postopkov;

zaradi zmanjšane zmožnosti doseganja večjih temperaturnih razlik je primeren za enostavnejše aplikacije.

Različne študije [54, 55] so primerjale rezultate posameznih RTR-tehnologij. Kot najrobustnejša se je izkazala tehnologija segrevanja z IR-sevali (halogenske sijalke z določenim valovnim spektrom) z naknadnimi izboljšavami površinskih nanosov (toplotni izolativni sloji). Prednosti tehnologije so prevsem v enostavnosti vgradnje vira segrevanja (zunanja enota, ki se v času odpiranja orodja spusti med dele orodja in seva na orodni površini brizgalnega in izmetalnega dela). Hlajenje se aplicira s temperiranimi kanali. Prednost je tudi v enakomerni distribuciji toplote po površini.

Ena izmed robustnejših metod je tudi segrevanje z električnimi uporovnimi grelci [54, 55]. Problematična je toplotna vztrajnost oziroma apliciranje potrebnih izolacijskih medijev. Na ta način naj bi se greli predvsem deli blizu orodne površine in v čim manjšem obsegu ogrode orodja.

Segrevanje s postopkom indukcije je v literaturi še zmeraj slabo opisano, premalo je rezultatov raziskovalnega dela, industrijskih izkušenj pa sploh še ni. Vseeno lahko zasledimo problematiko pozicioniranja elektromagnetnega navitja, hlajenja, predvsem pa neenakomernost temperaturne porazdelitve. Hkrati pa tehnologija omogoča doseganje največjih temperaturnih razlik (do 100 °K v 2–3 sekundah) [32].

Segrevanje s plamenom (MmSH) je že v rabi v industriji preoblikovanja kovin (kovanja) za gretje orodij. Navadno se uporablja mešanico propana. Pri predelavi plastike pa naj bi se uporabljala (ni znanih industrijskih aplikacij) za segrevanje večjih orodnih površin (nad 300 mm krat 300 mm), kjer z zgoraj navedenimi tehnologijami težko dosežemo potrebne toplotne moči.

4 Termoelektrični moduli

4.1 Uvod

Kaj so termoelektrični moduli?

Peltierov efekt, znan od leta 1834, je prešel v rabo z dosežki pri razvoju in izdelavi termočlenskih materialov. Večina termoelektričnih modulov temelji na bismutovem telurju, litini bismuta, telurja, selena in antimona. Material je močno dopiran, da pridobi višek (n-tip) ali manjko (p-tip) elektronov. Nadalje je obdelan in orientiran kot polikristaliničen polprevodnik s termoelektričnimi lastnostmi. Zaradi optimalnega toplotnega prevajanja in visoke mehanske tlačne obremenitve kristali, električno vezani zaporedno in termično vezani vzporedno, sestavljajo sredico med metaliziranimi keramičnima ploščama.

Takšni moduli se sestavljajo v vzporedne sklope (za povečanje toplotne moči) ali zaporedne sklope (za povečanje dosegljive temperaturne razlike).

Termoelektrični moduli niso splošno uporabni pri problematiki temperiranja, vendar so prava rešitev v primerih, kjer potrebuje obravnavani sistem visoko zanesljivost, fizično majhnost (prostornina), nizko ceno in težo – deluje v problematičnem okolju ter ima potrebe po temperaturni natančnosti.

Zgodovina raziskav

Osnovni termoelektrični fenomeni, tj. Peltierov, Joulov in Thomsonov, so bili odkriti leta 1820. Njihova makroskopska termodinamična razlaga pa je bila raziskana do leta 1850. Ponovno zanimanje za omenjene fizikalne pojave se je pojavilo sredi dvajsetega stoletja ob spoznanju, da imajo dopirani polprevodniki očitno izboljšane termodinamične lastnosti kot kovine [56, 57].

Uporaba polprevodnikov z visoko srednjo atomsko maso in visokim termoelektričnim koeficientom za potrebe hladilne tehnike je bila predlagana že leta 1954 [58].

Istočasno je bila prvič raziskana zveza med koeficientom učinkovitosti (COP – coefficient of performance) in toplotno močjo za enostopenjski termoelektrični element ob predpostavljeni temperaturni razliki med toplo in hladno stranjo.

Že leta 1948 pa z recipročnim načelom Onsager [59] prvič pojasni termoelektrični efekt. Hkrati je pojasnjen [60] Thomsonov efekt na termoelektričnem elementu, formulirala pa se je reverzibilnost termoelektričnosti [61], ki je služila kot podlaga termoelektričnim hladilnim sistemom.

Tolman in Fine [62] sta predstavila celostno matematično razlago entropijskega sistema – generacije in porabe entropije v zaprtem sistemu. Predstavila sta pojav ireverzibilne entropije prek dveh termoelektričnih vodnikov ob upoštevanju energijskih izgub zaradi efekta Joulovega gretja (produkta upornosti in kvadrata električnega toka) in reverzibilnega prenosa toplote. Ta dela pa so bila osnova za modernejšie članke.

Entropija je termodinamična fizikalna veličina, ki si jo telesa izmenjujejo, ko izmenjujejo toploto, je mera za količino energije, ki se ne more spremeniti v delo. Pri reverzibilnih spremembah se entropija ne spremeni, pri ireverzibilnih pa se poveča. Pri reverzibilnih

spremembah in pri stalni temperaturi je sprememba entropije določena kot kvocient spremembe toplote pri dani temperaturi.

V 90. letih dvajsetega stoletja se je pojavilo ponovno zanimanje za raziskave ireverzibilnih termoelektričnih procesov. Hasse [63] in Yamanashi [64] sta objavila nove optimizacijske metode za termoelektrične hladilnike na osnovi brezdimenzijskih metod prenosa entropije.

Sungteak in Ghosal [65] sta objavila študijo uporabe modela obnašanja termoelektričnega hladilnika z modifikacijami splošne definicije učinka (figure of merit); slednji koncept omogoča natančnejšo študijo mejnih efektov.

Množica študij pa obravnava rezultate termoelektričnih analiz z uporabo klasičnih temperaturno-entropijskih načel, ki omogočajo enostavnejše razumevanje pretvorbe električne energije v zmožnost manipulacije toplotne energije [63–65].

Teorija

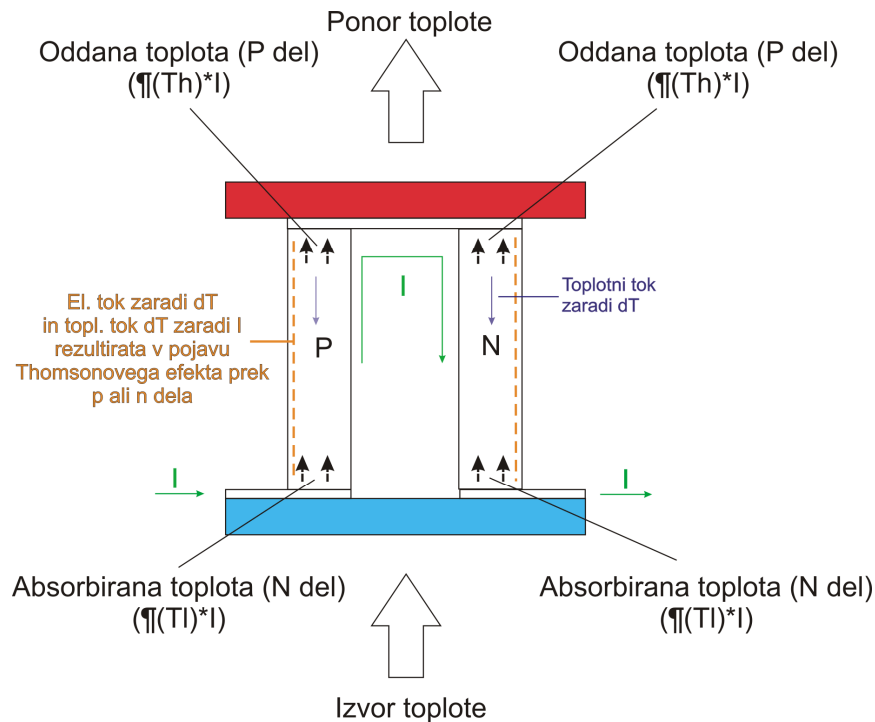
Vsi termoelektrični efekti, Seebeckov, Peltierov in Thomsonov, obravnavajo pretvorbo električne energije v toplotno in obratno. Ob prisotnosti električnega polja v termoelektričnem elementu se vzpostavijo naslednji fizikalni pojavi:

- električno prevajanje (električni tok zaradi gradienta električnega potenciala),
- prevajanje toplote (toplotni tok zaradi gradienta temperaturnega potenciala),
- prečni efekt (električni tok zaradi temperaturnega gradienta),
- recipročni efekt (toplotni tok zaradi gradienta električnega potenciala).

Toplotne lastnosti so odvisne od lastnosti polprevodniških materialov, tj. Peltierovega efekta, Joulove toplote, Thomsonove toplote in fizikalnih lastnosti materiala v celotnem temperaturnem območju delovanja ter med toplo in hladno stranjo.

Termoelektrični modul je sestavljen iz posameznih elementov-parov, ti so električno povezani v serijo, toplotno pa vzporedno. Termoelektrično hlajenje se generira ob prevajanju električnega toka preko PN-spoja; ob tem se temperatura na ponoru toplote (hladna stran) niža zaradi preskoka elektronov in vrzeli iz nižjega elektronskega nivoja (material P-tip) na višji elektronski nivoj (N-tip). Sočasno prihod elektronov in vrzeli na nasprotno stran pomeni povišanje energijskega nivoja, posledično se lokalno poviša temperatura.

Ob vzpostavitvi razlike temperatur tople in hladne strani se pojavi Seebeckova napetost, ki je proporcionalna razliki temperatur. Pri vsiljevanju električnega toka v termoelektrični element pride do Peltierovega pojava - absorpcije in generiranja toplote na različnih straneh PN-spoja. Efekt generiranja Peltierove toplote med polprevodnikom in kovino prikazuje slika 15 [66].



Slika 15. Toplotni tokovi znotraj TEM preko posameznih PN-spojev

Seebeckov koeficient je odvisen od temperature, ta pa se spreminja preko dolžine polprevodniškega para [67]. Gledano superpozicijsko je termoelektrični modul kombinacija serijsko vezanih PN-spojev, od katerih vsak generira/absorbira toploto – Thomsonova moč generirana na prostornino.

Thomsonov efekt nastaja ob prevajanju električnega toka preko termoelektričnega para ob razliki temperatur v termoelektričnem paru. Velikost efekta je proporcionalna velikosti električnega toka in razliki temperatur.

4.2 Osnovne zveze med električnim in toplotnim tokom

Osnovni izrazi za gostoto električnega in toplotnega toka sledijo direktno iz splošne Boltzmanove kinetične enačbe ob poenostavitvi – zanemarjanju magnetnega polja – $\vec{B} = 0$; [68]

$$\vec{J} = \overbrace{q^2 K_{11} \vec{E}} - q K_{11} T \cdot \vec{\nabla} \frac{F}{T} - q K_{21} \frac{1}{T} \vec{\nabla} T \quad (5)$$

$$\vec{W} = q K_{21} \vec{E} - K_{21} T \cdot \vec{\nabla} \frac{F}{T} - \underbrace{K_{21} \frac{1}{T} \vec{\nabla} T}_2 \quad (6)$$

kjer posamezni členi predstavljajo: $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ [As] (elementarni naboj), T absolutno temperaturo [K], F Fermijev nivo, K_{ij} kinetični koeficient (odvisen od materiala), \vec{J} gostoto električnega toka [A/cm²], \vec{W} gostoto toplotnega toka [W/cm²].

Prvi člen iz enačbe (5) pojasnjuje dejstvo, da je električno polje \vec{E} v materiala vzrok za nastanek električnega toka. Celoten člen pa lahko prepoznamo kot Ohmov zakon $\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}$. S primerjavo obeh členov lahko ugotovimo, da je specifična prevodnost σ oziroma specifična upornost ρ , podana z izrazom:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = q^2 K_{11} \quad (7)$$

V splošnem obstajajo trije generatorji električnega (\vec{J}) in toplotnega toka (\vec{W}):

$$\vec{E}, \vec{\nabla} \frac{F}{T} \text{ in } \vec{\nabla} T \quad (8)$$

4.2.1 Splošna enačba za električno polje \vec{E}

Če iz enačbe (5) izrazimo \vec{E} in jo uredimo, ob upoštevanju lastnosti parcialnih odvodov, dobimo splošno enačbo za električno polje:

$$\vec{E} = \underbrace{\frac{1}{q^2 K_{11}} \vec{J}}_a + \underbrace{\frac{1}{q} \vec{\nabla} F}_b + \underbrace{\frac{K_{21} - FK_{11}}{qK_{11}T} \vec{\nabla} T}_c, \quad (9)$$

kjer posamezni členi pojasnjujejo tri generatorje \vec{E} , in sicer, \vec{J} , $\vec{\nabla} F$ in $\vec{\nabla} T$.

Prvi člen (a) v enačbi (9) je prispevek Ohmovega zakona v obratni smeri. Navadno ta člen namesto s poljem označimo z ustreznim napetostnim padcem pri dani geometriji ($V = R \cdot I$).

Drugi člen (b) predstavlja prispevek zaradi nehomogenosti materiala, kar podaja $\vec{\nabla} F$. Znan primer je vgrajeno polje («built-in-field») v nehomogeno dopiranem polprevodniku, npr. v bazi bipolarnega transistorja.

Tretji člen (c) predstavlja prispevek k električnemu polju zaradi nehomogene temperature.

4.2.2 Splošna enačba za gostoto toplotnega toka \vec{W}

Če izraz za splošno električno polje \vec{E} iz enačbe (9) vstavimo v enačbo (6) in jo uredimo, dobimo splošno enačbo za gostoto toplotnega toka \vec{W} :

$$\vec{W} = \frac{K_{21}}{qK_{11}} \vec{J} - \frac{K_{31}K_{11} - K_{21}^2}{TK_{11}} \vec{\nabla} T \quad (10)$$

Enačbo (10) lahko zapišemo tudi kot:

$$\vec{W} = \pi \vec{J} - \lambda \vec{\nabla} T, \quad (11)$$

kjer posamezna člena predstavljata dva generatorja toplotnega toka, in sicer:

$$\pi = \frac{K_{21}}{qK_{11}} \text{ predstavlja Peltierov koeficient,}$$

$$\lambda = \frac{K_{31}K_{11} - K_{21}^2}{TK_{11}} \text{ predstavlja toplotno prevodnost materiala.}$$

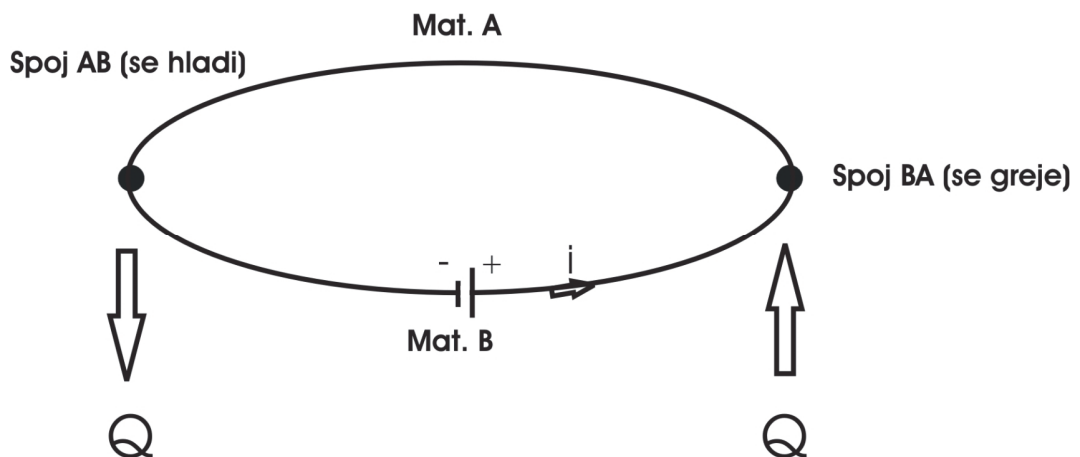
V splošnem obstajata dva generatorja toplotnega toka: \vec{J} in \vec{W} .

Prva člena v enačbah (10) in (11) ponazarjata vzrok za nastanek toplotnega toka, tj. električni tok. Omenjena zveza je osnova za različne termoelektrične pojave.

Druga člena v enačh (10) in (11) pa predstavljata toplotno prevajanje. Spreminjajoča se temperatura v materialu je vzrok za toplotni tok.

4.3 Poenostavljen opis Peltierovega efekta

Če teče električni tok skozi spoj dveh prevodnih materialov A in B (slika 16), se na spoju toplotna energija oziroma toplota Q sprošča ali absorbira, odvisno od smeri toka glede na električno polje oziroma napetost v spoju.



Slika 16. Primer Peltierovega efekta na zaključeni zanki (pojav je reverzibilen, če obrnemo smer toka)

Izpeljava enačb

Izhodiščni enačbi sta že navedeni enačbi (5) in (6) (poenostavljeno enačba 11). Ob začetni poenostavitvi konstantne temperature v celotnem področju vodnikov se enačba (11) poenostavi:

$$W = \pi \cdot \bar{J} \quad (12)$$

Enačba (12) predstavlja zvezo med gostoto toplotnega in električnega toka. Navadno pa nas bolj zanima zveza med oddano/prejeto toploto Q ter tokom vodnika i . Za opis razmer zadostuje enodimezionalni primer, kar omogoča skalarni opis.

Gostoto toplotnega toka iz spoja AB lahko tedaj zapišemo v obliki:

$$\bar{W} = \frac{1}{A_{toplotni}} \frac{dQ}{dt} = \pi_{AB} J = \pi_{AB} \cdot \frac{i}{A_{el}}, \quad (13)$$

kjer π_{AB} predstavlja Peltierov koeficient spoja AB, ki je določen z razliko Peltierovih koeficientov obeh materialov. $A_{toplotni}$ je topla površina, skozi katero teče toplotni tok oziroma oddaja toploto; A_{el} pa je površina, skozi katero teče električni tok (presek vodnika).

V primeru idealnih kontaktov (konstanten Fermijev nivo) velja enostavna zveza med π in Seebeckovimi koeficienti α , tj. $\pi = \alpha T$. Tedaj lahko zapišemo:

$$\pi_{AB} = \pi_A - \pi_B = (\alpha_A - \alpha_B)T \quad (14)$$

V praksi sta navadno A_{el} in $A_{toplotni}$ enaka. Tedaj velja poenostavitev:

$$dQ = \pi_{AB} \cdot i \cdot dt \quad (15)$$

Zaradi enostavnosti predvidimo še konstantnost električnega toka $i = I$; tedaj sledi:

$$Q = \pi_{AB} \cdot I \cdot t, \quad (16)$$

kjer enačba (16) predstavlja prejeto/oddano toploto Q na spoju AB pri električnem toku I v času delovanja t .

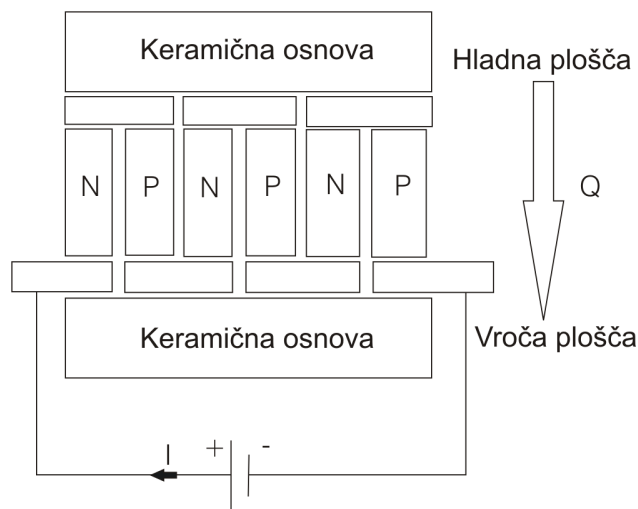
Na spoju BA pa velja $\pi_{BA} = \pi_B - \pi_A = -\pi_{AB}$. Toplotni tok se torej obrne in se rezultira v obratnem toplotnem pojavu (segrevanje/hlajenje).

Poudariti je potrebno, da opisano segrevanje nima povezave z Joulovim segrevanjem materiala, skozi katerega teče električni tok (ohmske izgube). Joulova toplota je kvadratično odvisna od električnega toka, Peltierova pa linearno odvisna (enačba 16).

Delovanje termoelektričnih toplotnih črpalk temelji na podobnem principu kot hladilniški sistemi, ki temeljijo na absorpciji in komprimiranju freonskih plinov. V obeh sistemih gre za ekstrakcijo toplotne energije s področja (in s tem znižanje temperature) in odlaganje

le-te v področje z višjo temperaturo. Plinski sistemi imajo gibajoče se dele, medtem ko jih termoelektrični moduli nimajo.

Zveza med električnimi in toplotnimi lastnostmi temelji na Peltierovem efektu. TEM-modul (slika 17) je sestavljen iz mreže urejenih parov polprevodnikov P- in N-tipa. Slednji so osnovani med dvema keramičnima substratoma, ki sta hkrati tudi prevodnika toplote TEM-modula. Moč in smer črpanja toplote je enoznačno definirana s polariteto in višino napajalne napetosti [69].



Slika 17. Blokovna shema termoelektričnega modula

Princip delovanja

Princip delovanja je najlažje ponazoriti preko konvencionalnega plinskega hladilnega sistema. Konvencionalno hlajenje vsebuje tri poglavitne hladilniške komponente: uparjalnik, kompresor in kondenzator. Uparjalnik (hladen del) je del sistema, kjer komprimiran hladilniški medij (freon) ekspandira, zavre in zato upari. Med tem procesom spreminjanja agregatnega stanja od tekočega do plinastega prihaja do absorpcije toplote. Kompresor služi tako za odvod pridobljene toplote v uparjalniku kot tudi toplote zaradi komprimiranja. Toploto odvaja v okolico oziroma v kondenzator.

Termoelektrični princip je analogen plinskemu. Na hladnem spoju prihaja do absorpcije toplote s strani elektronov, ki prehajajo iz nižjega energijskega nivoja v p-polprevodniškem delu na višji energijski nivo v n-polprevodniškem delu. Električna energija zagotavlja to prehajanje elektronov prek energijskih nivojev. Na vročem spoju se toplota oddaja k ponoru zaradi prehoda elektronov z višjega (n-tip) na nižji (p-tip) energijski nivo.

Analogija fizikalnega delovanja pa izhaja tudi iz bolj znanega Seebeckovega efekta, bolj znanega v delovanju termočlenov. Dve različni kovini (navadno železo in konstantan) sta spojeni tako, da dobimo dva spoja. En spoj je postavljen na referenčno temperaturo, medtem ko je drugi postavljen na merjeno mesto. Z odprtjem tega tokokroga (navadno

na mestu referenčne temperature) in merjenjem napetosti odprte zanke dobimo merilec temperature. Če pa si zamislimo oba spoja v zgornjem sistemu zaprta, v tokokrogu pa še energijski vir, imamo že opraviti s Peltierovim efektom, kjer se nam en spoj ohlaja, drugi pa greje.

4.4 Tehnični podatki TEM in omejitve

Ko je bila izbrana tehnologija temperiranja s termoelektričnimi moduli, je bilo potrebno določiti tri najpomembnejše parametre za izbor pravega TEM:

- T_c , temperatura hladnega spoja
- T_h , temperatura vročega spoja
- Q_c , količina toplote, ki jo je TEM zmožen prečrpati na hladno stran

V večini praktičnih primerov je T_c vhodni parameter, kar pomeni, da je izhodni rezultat hlajenje objekta na želene T_c . Prav tako je v večini primerov objekt v neposrednem kontaktu s hladno površino TEM, kar pomeni, da je temperatura objekta enaka T_c . Izjeme so primeri temperiranja prostornine, kjer je potrebna temperatura T_c nižja od želene temperature objekta.

Vroča stran TEM je odvisna od dveh poglavitnih parametrov:

- temperature okolice, kamor se odvaja prečrpana toplota,
- zmožnosti toplotne izmenjave med vročo stranjo in okolico.

Temperaturi T_c in T_h ter njuna razlika (ΔT) sta pomembnejša parametra pri izboru pravih TEM in konstrukciji toplotnega sistema.

Tretji pomemben parameter pri izbiri TEM je določitev toplote, ki jo bo moral TEM obvladovati. S tem je mišljena vsota vseh virov in ponorov toplote v sistemu, npr. električne izgube na elektronskih komponentah (I^2R), prevajanje toplote iz/na objekte v okolici TEM (električne žice, izolacije, zrak/plin okolice sistema, mehanski pritrdilni elementi); v kompleksnih primerih pa se ne sme zanemariti tudi sevalnega vpliva okoliških objektov.

Samostojni TEM moduli so zmožni realizacije 67 °C temperaturne razlike v neobremenjenem stanju, večje temperaturne razlike pa se realizirajo s sestavljanjem več TEM-modulov kaskadno enega na drugega [69]. Izračun takšnih kaskadnih sistemov je zahtevnejši od preračuna enega samega.

Poleg treh osnovnih parametrov izbora TEM (T_c, T_h in Q_c) obstaja še vrsta dodatnih parametrov. Eden najpomembnejših je t. i. koeficient učinkovitosti (COP – coefficient of performance). Definiran je kot kvocient med toploto, prečrpano na hladni strani (Q_c), in vhodno električno močjo (P). Večji COP se odraža v manjši porabljeni električni moči in manjši toploti, oddani na toplotni izmenjevalnik ($Q_h = Q_c + P$).

Pri delovanju TE-sistema je prav tako pomemben napajalni vir. Termoelektrični modul je enosmerni porabnik; vsaka valovitost električnega toka se odraža v slabšem delovanju, in sicer [69]:

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} = \frac{1}{1 + N^2}, \quad (17)$$

kjer je N valovitost v % (maksimalne priporočene vrednosti so do 10 %) [69].

Pomembno dejstvo pri dimenzioniranju toplotnega sistema s TEM je pozornost dimenzioniranja konstantne temperaturne točke. To je lahko ponor ali izvor toplote, vedno pa gre za toplotni izmenjevalnik; navadno namreč temperatura strani TEM, ki je v kontaktu z izmenjevalcem toplote, ni enaka dejanski temperaturi tega izmenjevalnika. Tipični padci temperatur za različne toplotne izmenjevalnike so:

- 10–15 °C za prisilno konvekcijo (ventilator prek hladilnih reber)
- 20–40 °C za naravno konvekcijo
- do 5 °C za vodne izmenjevalce

Glede na to, da je gostota toplotnega toka na vroči strani TEM veliko večja kot na hladni strani, obstaja priporočena vrednost za dimenzioniranje izmenjevalca za hladno stran, ki naj bi bil do 50 % manjši. [69]

4.4.1 Osnovne enačbe termoelektričnih veličin (povzeto po [69]):

Maksimalna prečrpana toplota mrzle strani:

$$Q_c = 2N(aIT_c - \frac{(I^2\rho)}{2G} - k\Delta TG) \quad (18)$$

$$\text{Napetost: } U = 2N \left[\left(\frac{I\rho}{G} \right) + a\Delta T \right] \quad (19)$$

$$\text{Maksimalni el. tok: } I_{\max} = \left(\frac{kG}{a} \right) \sqrt{1 + (2ZT_h)} - 1 \quad (20)$$

$$\text{Opimalni el. tok: } I_{\text{opt}} = \frac{\sqrt{k\Delta TG(1 + (1 + ZT_{sr}))}}{aT_{sr}} \quad (21)$$

$$\text{Optimalni COP: } COP_{opt} = \frac{T_{sr}}{\Delta T} \left[\frac{\sqrt{1 + ZT_{sr}} - 1}{\sqrt{1 + ZT_{sr}} + 1} + 1 \right] - \frac{1}{2} \quad (22)$$

$$\text{Maksimalna razlike temperatur (pri } Q = 0\text{): } \Delta T_{max} = T_h - \frac{\sqrt{1 + 2ZT_h} - 1}{Z} \quad (23)$$

Razlaga simbolov je navedena v Prilogi 1.

Omejitve termoelektričnih modulov:

Termične:

Omejitve predstavljajo spoji (loti) med električnimi prevodniki in posameznimi TE-pari. Od materiala lota je odvisna tudi maksimalna (krajši čas delovanja) dovoljena temperatura (do 225 °C).

Druge vrste omejitev pa predstavljajo konstantne temperature obratovanja, ki so odvisne od polprevodniških materialov TE-členov ter materiala električnih prevodnikov med posameznimi TE-členi. Nad temperaturo 80 °C se odvijata dva fizikalna pojava. Pojavi se difuzija bakra (v prevodnih delih) v TE-člene zaradi povečane zmožnosti prehajanja materiala in s tem povečana stopnja difuzije. Nad 100 urami obratovanja pri temperaturah 100–110 °C se zaradi povečane zmožnosti prehajanja materiala in stopnje difuzije zmožnost črpanja toplote zmanjša za približno 25 % (velja za klasične TEM, ki niso namenjeni povišanim temperaturam).

Nad 85 °C prihaja do procesa zlivanja manjših količin selena, telurja, kositra in niklja v litino. Kljub temu da je temperatura zlivanja šele pri 136 °C, ta kombinacija elementov že pri 85 °C povzroči penetracijo litine v material TE-spoja. To naknadno povzroči mehansko okvaro.

Vlaga:

Vlaga zaradi elektrokorozije ne sme priti v stik s TE-členi, saj povzroči degradacijo TE-elementov, prevodnih delov in lotov med njimi. Vlaga lahko prav tako povzroči kratek stik električnega ali toplotnega toka preko modula, zaradi česar je pri aplikacijah z možnostjo vdora vlage (kondenza) v TE-elemente potrebno celoten modul hermetično zapreti.

Mehanske omejitve:

Termoelektrični moduli so bili v drugi polovici 20. stoletja najbolj preskušeni in uporabljeni (in zaradi tega tudi razviti) v vojaških in vesoljskih aplikacijah. Čeprav so TE-moduli precej mehansko odporni na tlačne sile in napetosti, pa so manj odporni na strižne obremenitve, zato je pri vgradnji potrebno težiti k orientaciji TE-modulov v takšni smeri, da so tlačno obremenjeni. Priporočena tlačna obremenitev ob vgradnji je 7000 Pa.

5 Testi tehnologije TEM

Za potrebe začetnega spoznavanja s tehnologijo TEM, njeno uporabnostjo, omejitvami in prednostmi v primerjavi s klasičnimi temperirnimi postopki je bil izdelan prototipni toplotni izmenjevalnik, nadgrajen s potrebnimi funkcionalnostmi testiranja s TEM. Primarni dovod/odvod toplote zagotavlja voda, ki jo z želenimi lastnostmi (temperatura, pretok) pripravlja temperirna naprava. Na osnovi rezultatov različnih testiranj smo spoznali omejitve elementov TEM v obratovanju, rezultati pa so služili nadaljnjim testnim aplikacijam ter vzporednemu delu opisa delovanja TEM in toplotnih sklopov v simulacijskih okoljih.

5.1 Razvoj prototipnega toplotnega izmenjevalnika s TEM

Termoelektrične module smo izbirali na osnovi šestih navedenih osnovnih parametrov (poglavje 4.4.1, enačbe od 18 do 23).

Za zelene vrednosti manipulacije toplote (toplote, ki jo je potrebno odvesti/dovesti v orodje v določenem časovnem ciklu ob zanemarjanju izgub) smo upoštevali dovedene toplote, in sicer zmnožka specifične toplote materiala, ki ga brizgamo v orodno votlino, mase kosa, ki ga brizgamo, ter razlike temperature kosa in orodja – TEM smo prilagodili prvi kasnejši realni testni aplikaciji.

5.1.1 Izbor termoelektričnega modula

Na osnovi toplotnih podatkov materialov in zelenih ciklov izdelave smo določili potrebne toplotne lastnosti TEM, ki jih vgrajujemo v orodja. Za izbor TEM smo uporabili termodinamične lastnosti postopka brizganja, natančneje lastnosti taline in oblike plastičnega kosa.

$$\Delta Q = q \cdot m \cdot \Delta T, \quad (24)$$

kjer posamezne spremenljivke pomenijo:

Q ... dovedena toplota taline ob zaplnitvi orodne votline

q ... specifična toplota materiala (plastike); $2400 \frac{J}{kgK}$

ΔT ... razlika temperatur med vročo in ohlajeno talino; 150 K

m ... masa kosa; 8,5 g

$$\Delta Q = 3060 \text{ J}$$

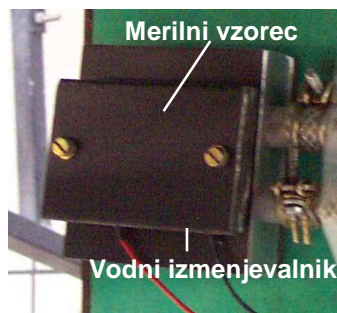
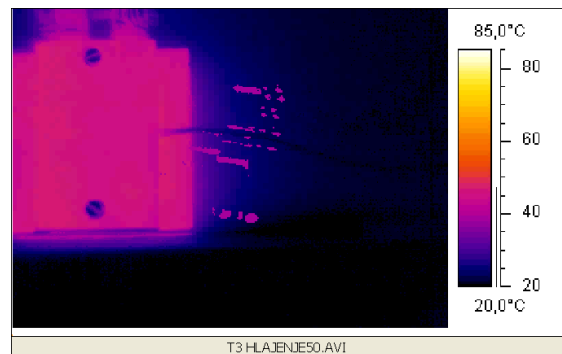
Glede na dejstvo, da želimo dovedeno količino toplote odvesti v 20 sekundah, lahko izračunamo potrebno moč TEM, in sicer:

$$P = \frac{\Delta Q}{t} = 150 \text{ W}$$

Izbrali smo TEM z nazivno močjo 170 W; natančnejši podatki so v Prilogi 2.

5.1.2 Testiranje možnih toplotnih obremenitev ter distribucije toplote po površini

Prvi sklop meritev je zaobjemal testiranje skrajnih temperaturnih razlik, ki jih je mogoče doseči s TEM (ob maksimalnih napajalnih električnih parametrih) in distribucijo toplote po površini TEM s pomočjo termovizijske kamere.



Slike18. Prikaz merilnega okolja na Fakulteti za strojništvo (levo); detekcija distribucije temperature s pomočjo termovizijske kamere (desno)

Slika 18 prikazuje dele dveh ločenih merilnih verig. Prva veriga predstavlja zmožnost točkovne detekcije temperature v merilnem vzorcu vsaki dve sekundi. Termočlen opravlja funkcijo detektiranja, termočlensko napetost pa meri umerjen merilni mostič, ki skrbi za konstantno temperaturo obeh odprtih sponk termočlena ter ojačuje šibek napetostni signal termočlena, ki ga naknadno merimo s preciznim multimetrom, povezanim z računalnikom, ki shranjuje rezultate. Druga merilna veriga pa s termovizijsko kamero omogoča časovno zvezno spremljanje spreminjanja temperature ter njeno ploskovno porazdelitev.

Merilni vzorec predstavlja jekleni blok, pod katerim je pozicioniran TEM, pod njim pa toplotni vodni izmenjevalnik dovaja/odvaja potrebno toploto.

Merilno okolje:

DC-napajalni vir (TEM) PS3010

TEM: Kryotherm DRIFT 1.2 (priloga 2)

Vodni izmenjevalnik velikosti 120 mm x 120 mm x 30 mm

Temperirna naprava SINGLE

Multimeter HP (merjenje termočlenske napetosti)

Naprava za širitočkovno merjenje termočlenov

Industrijski računalnik z aplikacijo za ciklično merjenje temperature

Termovizijska kamera dosegljivosti do 450 °C, 1200 x 800 merilnih točk

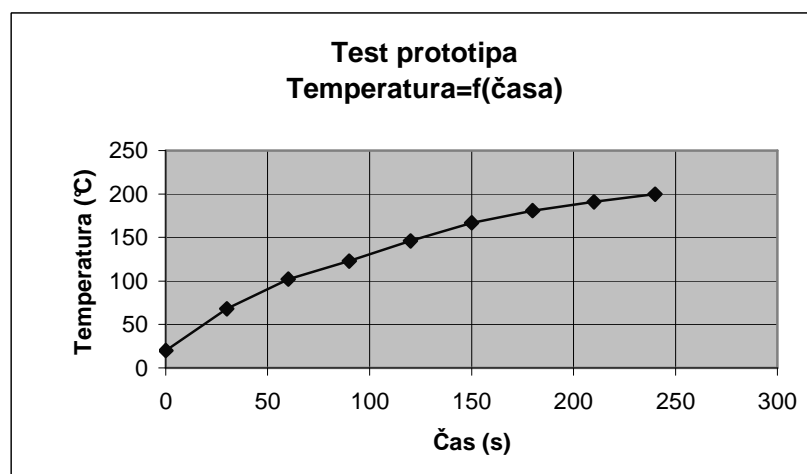
Rezultati

S prvotno izbranim TEM (Priloga 2) smo izvedli niz testov, ki so podali začetne realne dosegljive temperaturne nivoje sestava z vodnim toplotnim izmenjevalnikom.

Merilni vzorec dimenzij 100 mm dolžine, 100 mm širine, 15 mm debeline in mase 1,1 kg (orodno jeklo) smo z opisanimi merilnima verigama (časovno segmentirana detekcija temperature ter časovno zvezna s ploskovno porazdelitvijo) preizkusili z več različnimi obratovalnimi režimi in materiali.

5.1.3 Testiranje dosegljive toplotne dinamike

Na osnovi enakih testnih elementov in v enakih pogojih smo izvedli dinamične teste. Uporabili smo časovno segmentirano merilno verigo.



Slika 19. Prikaz prehodnega pojava celotnega sklopa s slike 18

Na sliki 19 je prikazan rezultat prehodnega pojava opisanega sklopa. Ob času 0 je TEM z enotino stopnico obremenjen s polno vrednostjo električne moči v delovnem režimu gretja. Dovedeni električni parametri so omejeni po priporočilih proizvajalcev ($U = 16 \text{ V}$, $I = 8 \text{ A}$).

Termovizijska kamera je primarno služila pogledu v površinsko porazdelitev temperature, sekundarna prednost sistema pa je bila v nazornem vpogledu v toplotne izgube in toplotne kratkostične mostove.

Z znanjem, izkušnjami in podatki, pridobljenimi s termovizijsko kamero smo v naslednjih projektih uspešneje reševali problematiko toplotnih izgub ter kratkostičnih toplotnih mostov.

S pomočjo rezultatov teh dveh testiranj smo pridobili izkušnje o največjih temperaturnih obremenitvah ter obnašanja TEM ob spremembi smeri električnega toka. Testi, navedeni v nadaljevanju, so nam pokazali, da je uporaba TEM smiselna le v režimih gretja do predpisane nadtemperature (dovoljene razlike temperature med toplo in hladno stranjo TEM) in ohlajanja na začetno temperaturo (navadno temperaturo toplotnega izmenjevalca); hlajenje pod to temperaturo tehnološko ni dovolj učinkovito zaradi prevelikih toplotnih izgub.

5.1.4 Obratovalni testi

Z modificirano zasnovo prototipa (slika 20) smo izvedli drugo serijo testov. S spreminjanjem osnovne temperature toplotnega izmenjevalnika smo poskušali pridobiti čim več informacij o obnašanju delovanja TEM pri različnih temperaturah in režimih gretja in hlajenja. Temperature smo izbrali glede na predvidene statične temperature orodij za predelavo plastike, ki se pojavljajo v praksi (20, 40, 60 °C). Osnovne temperature predstavljajo končno temperaturo orodne površine ob ohlajanju, ki ga predpisuje material predelave, torej temperatura izmetavanja.

Izvedli sta se dve seriji meritev: enkrat z zrakom kot okolico, drugič z Al-blokom kot okolico. Primerjalni testi rezultatov so nam podali okvirne toplotne lastnosti spojev TEM-okolice. Obe seriji testov sta bili poglobilni podatkovni bazi za kasnejše delo v modeliranju termodinamičnih sistemov v simulacijskem okolju (poglavje 6.2).

Prav tako smo zamenjali tip in proizvajalca TEM z zmogljivejšim, predvsem pa cikličnemu obratovanju primernejšim modelom. Izdelali smo nov toplotni izmenjevalnik zaradi zamenjave materiala z manjšo toplotno vztrajnostjo (boljša toplotna prevodnost in manjša masa).

Merilno okolje:

DC-napajalni vir (TEM) PS3010

TEM: FerroTEC TMC-161-1 6-15 0 MMS C-5 (priloga 3)

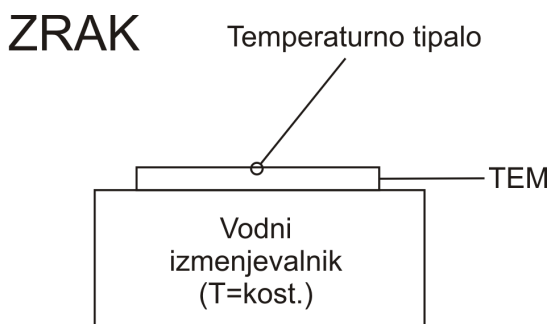
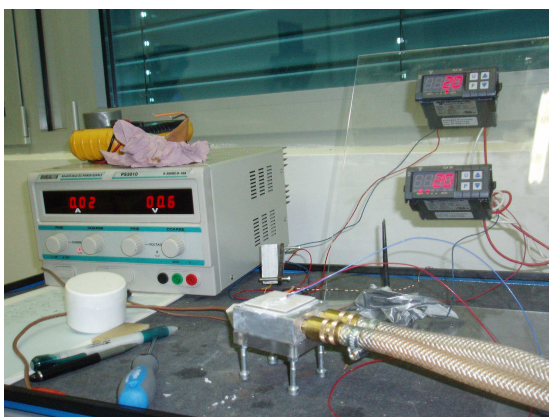
Vodni izmenjevalnik velikosti 120 mm x 120 mm x 30 mm (aluminij)

Termočlenski merilci temperature Tecnologic TLK 38

a) Meritve z zrakom kot okolico

V prvem primeru je bil testiran sklop vodnega izmenjevalca, ki je zagotavljal konstantno temperaturo hladnega dela (20, 40 in 60 °C), medtem ko je bila vroča stran (v primeru gretja) obdana z okolico – zrakom temperature 23 °C. Zrak predstavlja optimalen toplotni izolator (1000-krat boljši izolator kot jeklo). Vhodna spremenljivka je bil električni tok. TEM se električna upornost s temperaturo dviguje, zato je potrebna kompenzacija v smislu dviganja napetosti (zagotavljanje konstantnega električnega toka).

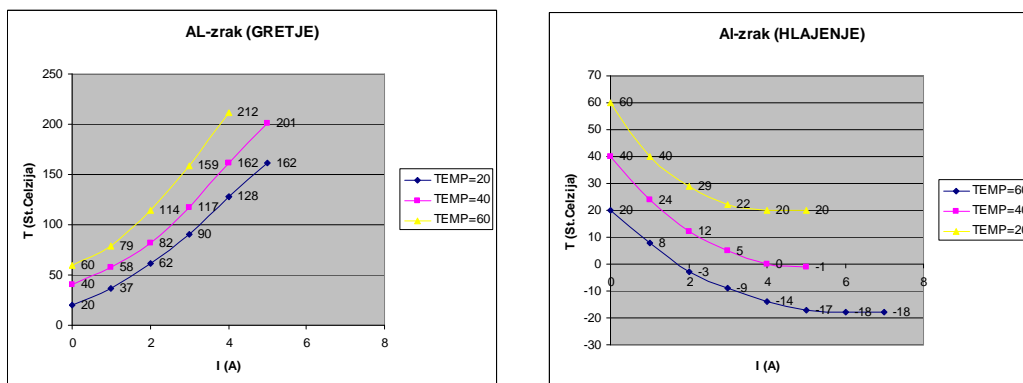
Temperatura se je merila po pretečenih 10 minutah (ali ko se je temperatura popolnoma umirila) na vsakem tokovnem koraku; merjenje pa je bilo kontaktno na stiku z vročo stranjo TEM preko termočlenske sonde.



Slika 20. Prikaz merilnega okolja za prototipni test z zrakom kot okolico

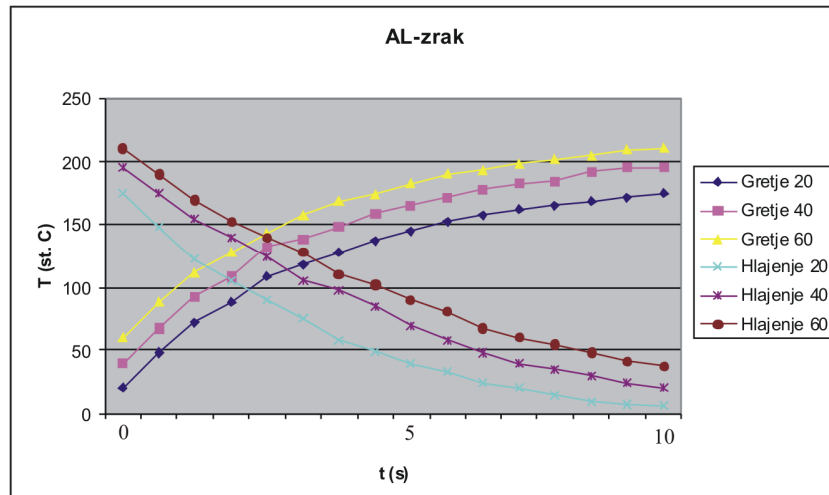
Slika 20 prikazuje merilno okolje za prototipne meritve sestava vodnega izmenjevalnika in TEM. Vodni izmenjevalnik je eksterno regulacijsko temperiran. Termočlenski tipali sta pozicionirani v vodni izmenjevalnik in na zunanjo površino TEM.

Meritve so bile izvedene v območjih, kjer še ni prihajalo do temperaturnih zasičenj. To velja za režim gretja (slika 21 levo), medtem ko desna stran slike 21 (hlajenje) že prikazuje asimptotično približevanje najnižjim dosegljivim temperaturam.



Sliki 21. Prikaz temperature (glede na vhodni parameter) sklopa z zrakom na vroči strani TEM

Leva stran slike 21 (gretje) prikazuje odsekoma konec temperaturnega poteka. Razlog je v prenehanju meritev zaradi nevarnosti temperaturnega uničenja. Desna stran (hlajenje) pa že nakazuje temperaturno zasičenje.



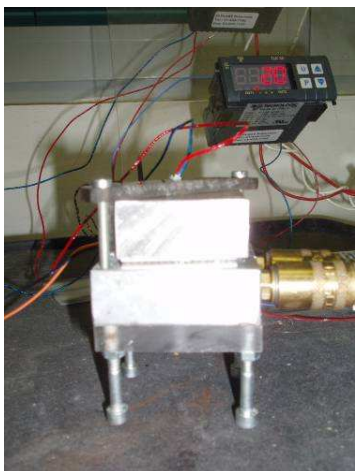
Slika 22. Prikaz časovnega poteka temperature sklopa z zrakom na vroči strani TEM

Slika 22 prikazuje rezultate enakega niza testov kot slika 21, vendar časovno odvisnost temperature za razliko od vhodnega parametra električnega toka. Poleg tega je v teh meritvah vhodni impulz TEM enotina stopnica ($U = 16 \text{ V}$, $I = 6 \text{ A}$).

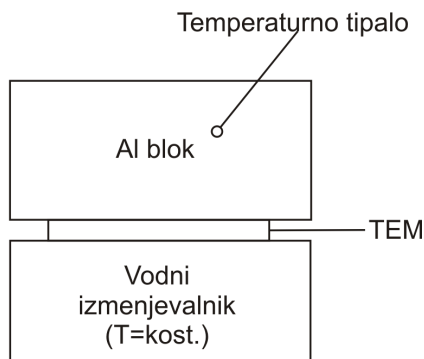
Meritve so potrdile spoznanja iz serije prvih testov glede (ne)smiselnosti hlajenja pod temperaturo vodnega izmenjevalnika zaradi nasičenja TEM in prevelikih toplotnih izgub. To se kaže predvsem v položnem padanju in položni rasti temperature blizu temperature nasičenja oziroma po prekoračitvi nazivne razlike temperatur med vročo in hladno stranjo (ΔT). Prav tako je potrebno poudariti problem temperaturne nesimetričnosti. Desna stran slike 21 nazorno prikazuje problematiko nedoseganja enakih temperaturnih razlik ob hlajenju in gretju, predvsem pri temperaturah hlajenja pod konstantno temperaturo vodnega izmenjevalca. Zaradi navedenega v naslednjih preizkusih nismo opravljali testov pod temperaturo vodnega izmenjevalnika.

b) Meritve z Al-blokom kot okolico

Drugo serijo meritev smo izvedli z aluminijastim blokom kot končnim elementom temperiranja. Namen teh testov je bil vzpostaviti spoznanje delovanja TEM pod bremenom in spremenjeni dosegljivi časovni dinamiki.



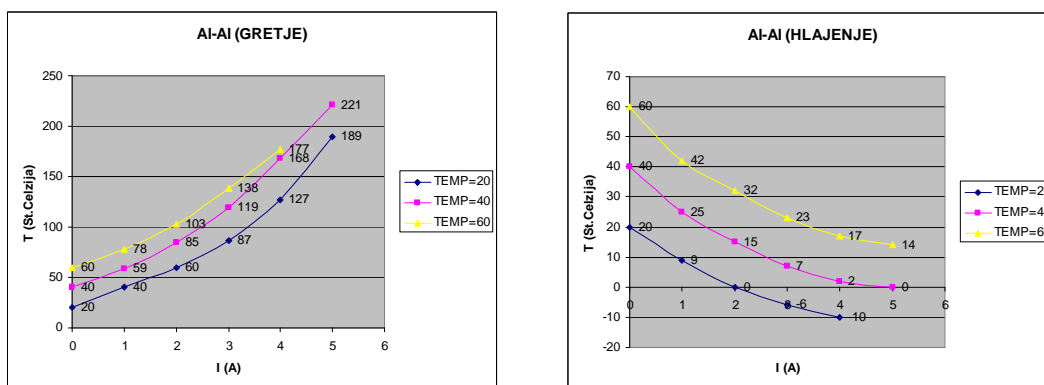
ZRAK



Sliki 23. Prikaz merilnega okolja za prototipni test z Al-blokom kot okolico

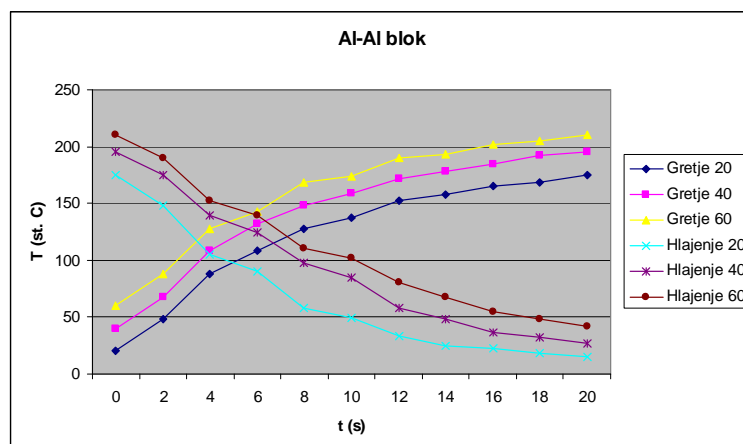
Tokrat je merilni objekt predstavljal Al-blok enakih dimezij kot toplotni izmenjevalnik.

Glede na dejstvo, da smo bili s temperaturami, predvsem pa z režimom obratovanja, ponovno pod toplotnimi zasičenji, se rezultati lahko razlagajo superpozicijsko.



Sliki 24. Prikaz rezultatov sklopa z Al-blokom na vroči strani TEM

Sliki 24 prikazujeta enake rezultate, kot so vidni na slikah 21; časovna dinamika namreč ni vidna zaradi električnega toka kot vhodne spremenljivke. Vseeno lahko predvsem pri ohlajanju opazimo zmanjšanje dosegljive statične temperaturne razlike, kar lahko pojasnimo s povečano površino ohlajanja (v primerjavi s sestavo brez Al-bloka), povečanimi toplotnimi izgubami in posledično znižani temperaturni razliki.



Slika 25. Prikaz časovnega poteka temperature sklopa z Al-blokom na vroči strani TEM

Slika 25 prikazuje pričakovano reduciranje dinamike poteka temperature v režimu gretja in hlajenja. Dinamika se poslabša za faktor 2.

Ta set meritev nam je v primerjavi s prvim setom (zrakom kot okolico) podal toplotne lastnosti spoja TEM z okolico. V primerjavi s prejšnjim setom smo tako lahko popisali toplotno upornost spoja in ga preko analogije električnih tokokrogov (Ohmovega zakona) primerjali z električno upornostjo. Rezultate smo uporabili in preskusili tudi v simulacijskem okolju (poglavje 6).

5.1.5 Razprava

Namena testiranj v prototipnem okolju sta bila dva. Prvi cilj je bil testiranje delovanja TEM v sklopu z vodnim izmenjevalnikom. Preskusili smo predvsem temperaturne omejitve, dosegljive temperature in dinamiko njenega spreminjanja. Prav tako so se izvedle različne meritve toplotnih lastnosti posameznih materialov (jeklo, aluminij) ter lastnosti spojev med njimi. Mehanskih (tlačnih testov) na tem mestu nismo opravljali. V tem sklopu sta bila preskušena tudi dva TEM različnih proizvajalcev (Prilogi 2 in 3). Testi so obsegali predvsem odpornost na ciklično obratovanje (gretje-hlajenje), kjer prihaja do fizičnih uničenj modulov zaradi prevelikih notranjih napetosti, ki so posledica rapidnih temperaturnih režimov.

Drugi cilj testiranj pa je bila družina testov, katerih namen je bil kreiranje nabora meritev, ki so služile predvsem kot referenčni podatek optimiranju numeričnega modela TEM. Prav tako smo tudi tukaj preskusili več različnih kombinacij materialov.

Osnovne ugotovitve testov so pokazale pogojno verodostojnost termodinamičnih podatkov, ki jih podajo proizvajalci. Pogojnost temelji predvsem na zagotavljanju optimalnih delovnih razmer, kar se je kasneje v industrijskem okolju izkazalo za zelo problematično predvsem zaradi toplotnega nasičenja TEM in toplotne nehomogenosti spojev.

Testi so potrdili dejstvo, da je v industrijske namene temperirani del nesmotrno hladiti za več kot 10 K pod temperaturo toplotnega izmenjevalca. Gretje kontroliranega dela pa je smotno tudi za več kot 70 K nad temperaturo toplotnega izmenjevalca. Smotrnost industrijske rabe poimenujemo zadovoljiv termodinamični odziv (do 50 K dosegljive temperaturne razlike v navadnem času proizvodnega cikla - 20 s) ob neizpostavi

električnim in toplotnim preobremenitvam TEM. Razlaga tega pojava leži v fizikalni popolni nereverzibilnosti procesa, ki ga zmanjšujeta Thomsonov in Joulov efekt.

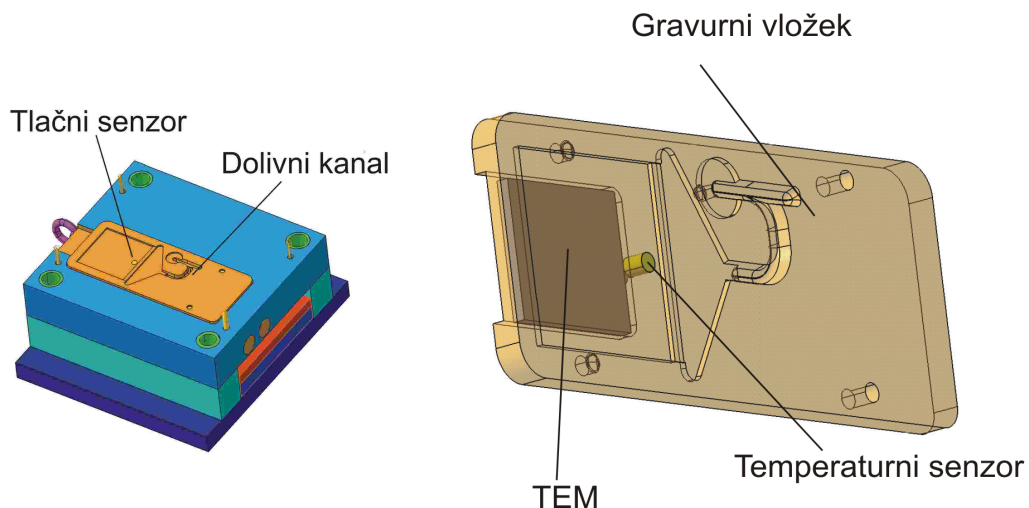
Naše meritve so potekale v temperaturnih območjih orodja, ki so zanimiva za predelavo plastike (od 30 do 120 °C), slednje območje pa je primerno tudi za obratovanje TEM. V testih smo temperaturo gretja zviševali do maksimalnih temperatur uničenja TEM, tj. preko 200 °C.

Seriji testov z zrakom kot okolico in aluminijastim blokom sta prikazali termodinamični vpliv spoja med TEM in okolico/Al-blokom ter toplotnimi lastnostmi okolice (zrak/aluminij). Poleg tega lahko na slikah 22 in 25 vidimo dosegljivo temperaturno dinamiko in izvedemo, da je ena pomembnejših veličin, ki vplivajo na termodinamiko, poleg velikosti (volumna) tudi površine odvajanja/dovajanja toplote. To drži v primerih, ko imamo opraviti z naravno konvekcijo prenosa toplote iz kontroliranega dela (orodni jeklo) v okolico (zrak).

5.2 Temperiranje s TEM v orodju za brizganje plastike – testna ploščica ISO 294

5.2.1 Opisa testnega sistema

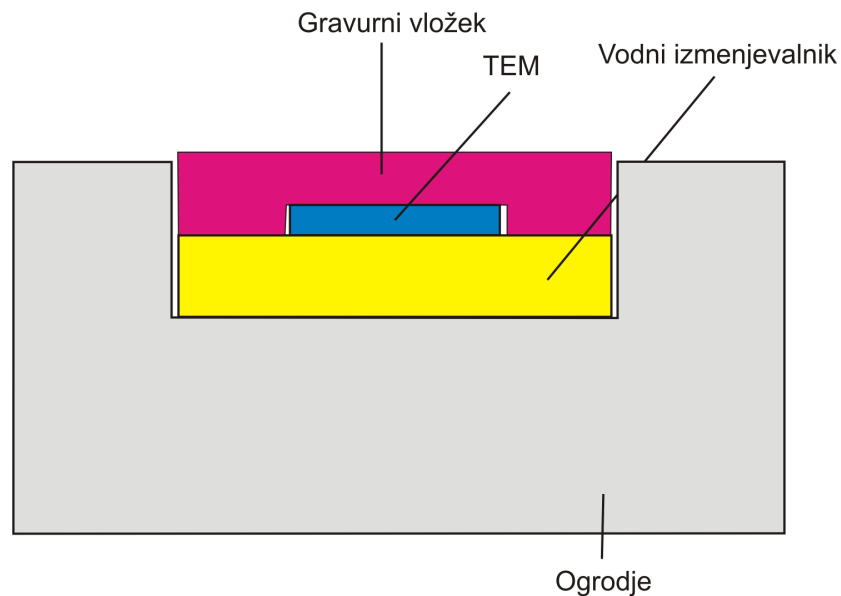
Naslednja smiselna stopnja razvoja in testov je bila vgradnja TEM v klasično orodje za brizganje plastike. V ta namen smo razvili orodje za testni izdelek ploščice za merjenje skrčkov. Gre za merilni izdelek za testiranje različnih skrčkov materialov po standardih ISO 294-3 (2002) in ISO 294-4 (2001). Standard predpisuje obliko kosa, ki omogoča meritve in primerjave prečnih in vzdolžnih skrčkov glede na smer tečenja materiala. Poleg tega so predpisani pogoji brizganja, da so meritve verodostojne.



Slika 26. CAD-model orodja (izmetalna stran) za brizganje testne ploščice z vgrajenimi TEM na brizgalni in izmetalni strani

Najenostavnejša orodja imajo izmetalno in brizgalno stran. Brizgalna je tista, preko katere v orodno votlino prihaja talina, izmetalna pa tista, na kateri strani so izvedeni

giblivi deli za izmet plastičnega kosa. Na sliki 26 (levo) je prikazana izmetalna stran orodja, in sicer celoten sestav, ki vključuje ogrodje, izmetalni podsestav ter gravurni del. Slednji je predstavljen tudi na desni strani v kombinaciji s TEM, ki je pozicioniran pod jeklenim gravurnim vložkom.



Slika 27. Shema sestava prikazanega na sliki 26

Sestav, viden na desni strani slike 26 (gravurni vložek in TEM), je privijačen na podložno ploščo, ki predstavlja vodni izmenjevalec, šele ta pa je privijačena na ogrodje orodja. Natančneje ta sestav prikazuje slika 27.

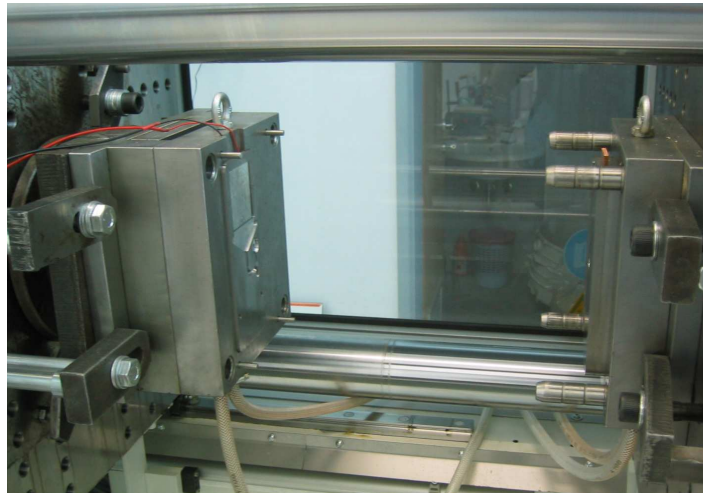
5.2.2 Vsebina testov

Testi na opisanem orodju so dodobra predstavili problematiko toplotnih izgub v celotnem sistemu orodja ter tlačne omejitve TEM. Zasnova orodja ni imela dobro izvedene toplotne izolacije med kontrolirano površino (površino orodne votline – gravurnim vložkom) ter ostalo konstrukcijo orodja. Zaradi tega je ta toplotni most (toplotni kratek stik) v režimih gretja površine ohlajal le-to prek ostale konstrukcije ter jo grel v režimih hlajenja. Ugotovili smo, da je zaradi kar najboljše toplotne dinamike potrebno gravurni del (temperaturno kontrolirani del) toplotno kar najbolje ločiti od ogrodja (konstrukcije) orodja, ki je na konstantni temperaturi. Drugega dela TEM, tj. dela toplotnega izmenjevalca, pa ni potrebno toplotno ločiti od ogrodja, ampak je pomemben zelo dober toplotni stik površine TEM in toplotnega izmenjevalca; enako velja tudi na kontrolirani strani.

V smislu povečanja toplotne dinamike kontrolirane strani je pomembna kar najmanjša toplotna kapaciteta (toplota, potrebna, da dano telo segrejemo za 1 °K – pri homogenih telesih se podaja specifična toplota, ki je toplotna kapaciteta na enoto mase) dela, ki ga temperiramo. To dosegamo na dva načina: z materialom s čim boljšo toplotno prevodnostjo (npr. zlitina bakra in berilija, ki ima približno 10-kratno toplotno prevodnost

v primerjavi z običajnim orodnim jeklom [3]) ali z dimenzijskim (masnim) minimiziranjem kontroliranega dela. Oba parametra (geometrija-masa in snov-toplotna prevodnost) močno vplivata na končne termodinamične lastnosti sestava.

Oba zgoraj omenjena parametra imata omejitve v mehanski trdnosti, ki jo zahteva površinski del orodja. Na to površino izvaja tlak taline, s katero zapolnjujemo orodno votlino sile reda velikosti nekaj tisoč N na cm^2 . Navadno govorimo o tlakih nekaj sto barov, lahko pa dosegajo tudi do 2000 barov. Ni naključje, da se primere, kjer so navadno problemi pri zapolnjevanju orodne votline, rešuje z višanjem celotne temperature orodja (daljšanje časa hlajenja in cikla) in nato z višanjem tlakov taline. Ti problematični deli so navadno ob tankostenskih izdelkih ali ob tankostenskih delih večjega izdelka.



Slika 28. Orodje za brizganje testnih ploščic pri preizkusu – stroju za brizganje plastike KM 80 CX

Slika 28 prikazuje testno orodje na preiskuševalnem stroju. Leva stran slike prikazuje izmetalni del orodja, desna pa brizgalni del.

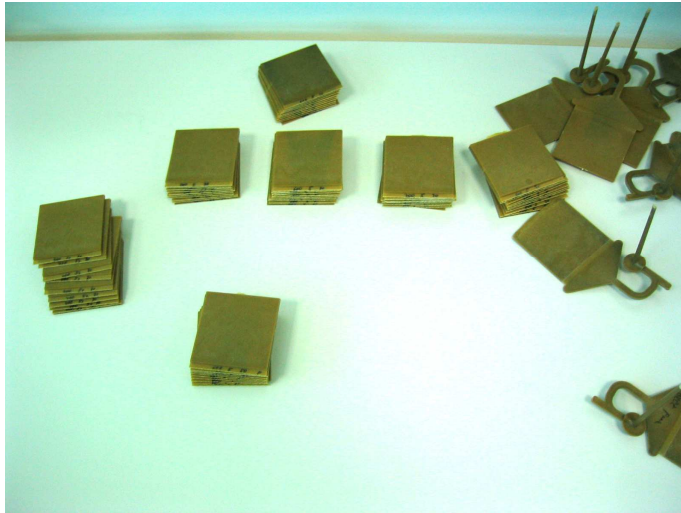
5.2.3 Rezultati

S poskusi smo ugotovili, kolikšna je potrebna minimalna debelina kontroliranega dela, da ne bi prišlo do uničenja TEM s tlačno obremenitvijo. Ta je 8 mm ob tlakih do 1000 barov ter odprtino oziroma velikost TEM 40 x 40 mm. Poskus je potekal tako, da smo tlak taline stopenjsko povečevali po 100 barov. Začeli smo pri 100 in končali pri 1200 barih, tlak taline pa smo merili s tlačnim senzorjem. Glede na dejstvo, da smo imeli v našem primeru debelino stene 6 mm in smo pri izmerjenem tlaku 1000 barov uspeli TEM mehansko uničiti (uklon stene izpraznitve za TEM s slike 26 desno), smo definirali potrebno debelino 8 mm glede na ta preizkus in mehansko analizo, predstavljeno v poglavju 5.3. V tem projektu nismo uporabili dodatnih mehanskih podpor, ki bi se zoperstavile sili tlaka taline.

Te izkušnje smo uporabili v naslednjih opisanih projektih. Dodatne mehanske podpore bi lahko pomagale prenesti tlačne sile taline, vendar navadno predstavljajo toplotne mostove (toplotne kratke stike). V literaturi navajajo največje priporočljive tlake na površino TEM do 2 MPa [69], vendar smo s poskusi in mehanskimi preračuni dokazali (slika 29), da moramo posebno pozornost nameniti predvsem dimenzioniranju nosilne strukture orodja (debeline orodnega vložka), ki ga temperiramo. Glede na dejstvo, da je večina tipov TEM primernih za aplikacije temperiranja orodij za brizganje plastike (s povišano temperaturno obstojnostjo, zvišanih dosegljivih temperaturnih razlikah ter predvsem primernosti cikličnega obratovanja – obstojnost na šoke mehanskih napetosti ob rapidnem segrevanju in ohlajanju) dimenzij 40 x 40 mm, smo poskuse opravili s takšno dimenzijo. Čeprav na trgu že obstajajo TEM s sredinsko luknjo za pritrjevanje, jih nismo testirali, saj bi sredinska izpraznitev lahko služila kot prostor za dodatni podporni steber, ki bi lahko bil izveden iz izolacijskih materialov in ne bi predstavljali toplotnih mostov. Tako bi lahko minimizirali potrebno debelino orodnega vložka.

S testiranjem opisanega sistema smo ugotovili tudi pomembnost stalnega in kakovostnega toplotnega stika (z najboljšo toplotno prevodnostjo) na obeh površinah TEM. Najboljše toplotne lastnosti smo dosegali z natančno dimenzijsko obdelavo delov, kamor se je vstavljal TEM, hkrati smo površino delno spolirali zaradi boljšega toplotnega kontakta. Poleg tega se je aplicirala tanka plast silikonske masti, ki je optimirala toplotne lastnosti spoja.

Z veliko testi pa se je izkazala precej nepričakovana anomalija. Toplotni raztezki celotnega oziroma posameznih delov orodja so kazali rezultate neenakomernih toplotnih lastnosti spojev TEM obeh polovic orodja. Zaradi različnih temperatur so tudi absolutni temperaturni raztezki posameznih delov različni. Ob velikih raztezkih se pritisk na TEM (dimenzije TEM se s temperaturami ne spremenijo; gre namreč za keramični hibrid) spreminja. Različno tesen spoj pomeni tudi različne toplotne lastnosti spoja in s tem celotnega sklopa; navadno je problematična vzpostavitev mikrorož, ki enormno povečajo toplotno upornost. To se zgodi na strani toplotnega izmenjevalca, kar privede do nezmožnosti odvoda/dovoda toplote, kar privede do močnega zmanjšanja učinkovitosti črpanja toplote, v skrajnostih tudi do temperaturnih uničenj TEM. Razlaga slednjih je v močno različnih koeficientih toplotne prevodnosti za različne materiale. Reže (zrak) imajo koeficient 0,026 W/mK, silikonska mast 0,87 W/mK, tipično jeklo, ki se uporablja v orodjih, 30 W/mK ter toplotno izboljšani materiali (zlitine berilija in bakra) do 250 W/mK [3, 69].



Slika 29. Končni izdelki testnega orodja; material: biokompozit (mešanica PP in lesa)

Slika 29 predstavlja izdelane plastične kose iz orodja, opisanega v poglavju 5.2. Cilji opisanega preizkusa niso bili usmerjeni v optimiranje plastičnega kosa; predstavljen kos namreč ni problematičen v smislu zapolnjevanja in s tem povezanimi visokimi tlaki. Poglavitni cilji so bili v preizkusu delovanja celotnega sestava v realnih industrijskih pogojih dela.

Merilno okolje:

Temperatura okolice: 18 °C.

Temperaturna sonda: TESTO 830-T2; zunanja dotikalna termočlenska sonda

Stroj: KM80 CX, premer polža: 40 mm; maksimalna masa brizga: 200 g (PS)

Temperirna naprava: Single (do 150 °C)

Tehtnica: UWE HGS-3000; natančnost: 0,1 g

Tlačni senzor: Kistler TIP: 6193A

TEM: FerroTEC TMC-161-1 6-15 0 MMS C-5 (Priloga 3)

Temperaturno nadzorna enota: razvita elektronska enota (poglavje 7)

Materiali: PS, PP, biokompoziti (mešanica PP in lesa)

5.2.4 Razprava

Osnovni namen navedenih testov je bil v prenosu testiranj v industrijsko okolje, natančneje v orodja za brizganje plastike, in prepoznavanje s tem povezane problematike.

Osnovno spoznanje je bilo povezano z omejeno kapaciteto toplote, ki jo TEM lahko manipulira, če kontrolirani sistem orodne površine (temperaturno nadzorovan sistem) ni toplotno izoliran od ogrodja. Kljub temu da je šlo za razmeroma manjše orodje, je termodinamična odzivnost takšnega sistema nezadovoljiva. Ta spoznanja smo uspešno implementirali v testne projekte.

Pri tem raziskovalnem projektu smo prav tako preskušali mehanske omejitve, in sicer minimalne debeline orodnih vložkov (debeline jekla med orodno površino in TEM), ki še uspešno prenaša tlačne obremenitve taline v orodni votlini. V ta namen smo izdelali nekaj orodnih vložkov z različnimi debelinami sten in preskusili njihovo obnašanje pod obremenitvijo. Ob uporabi najoptimalnejših dimenzij TEM (dolžine 40 mm in širine 40 mm) je potrebna debelina orodnega vložka vsaj 8 mm. Ob večji debelini zmanjšujemo toplotno vztrajnost in s tem zmanjšujemo odzivnost sistema, manjše debeline pa ne prenašajo tlakov taline nad 1000 barov.

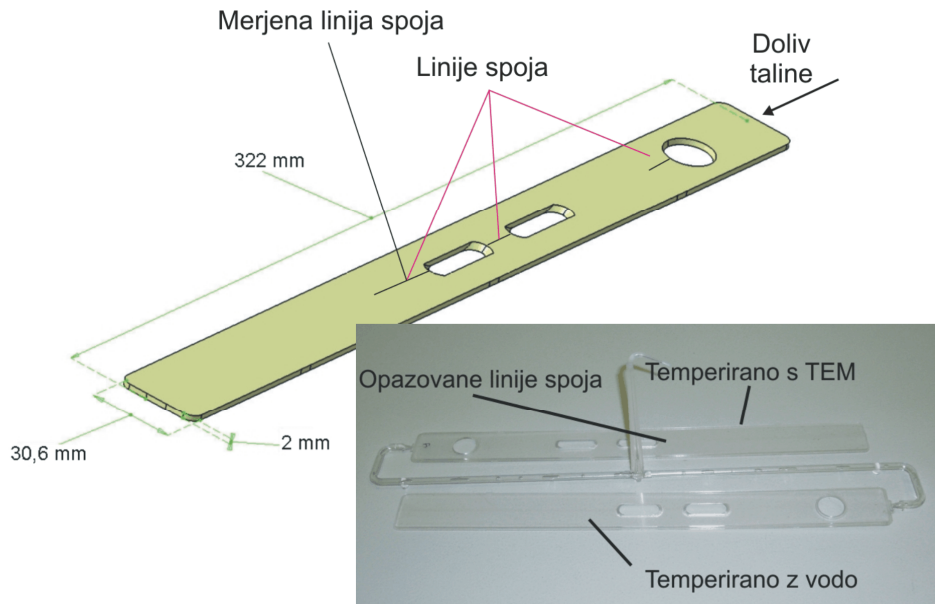
Namen testov tega segmenta je prav tako obsegal testiranje različnih materialov za izboljšanje toplotnih spojev med TEM in jeklom. Uporabili smo različne silikonske masti in teflonske paste ter ugotovili, da večjih rezultatskih variacij ni. Kljub dejstvu, da v tej seriji testov nismo uporabil drugih materialov kot jeklo za material orodnega vložka, smo se odločili za njegovo menjavo (za izboljšanje toplotne prevodnosti) ob naslednjih projektih.

Opisani projekt je služil tudi kot poligon za testiranje elektronske nadzorne enote. Preskusili smo različna tipa regulacije – PID in FUZZY. Čeprav večjih razlik med rezultati že optimiranih parametrov regulacijske zanke ni bilo opaziti, smo se odločili za FUZZY zaradi lažje in hitrejšje optimizacije. Ta prednost pa bo odločilna ob industrializaciji projekta in dejstvu, da bodo termodinamične lastnosti orodij, v katere se bo vgrajevala predstavljena aplikacija, vsakič drugačne in nepoznane. Ob tem dejstvu je optimiranje regulacijskih parametrov enostavnejše pri FUZZY-regulaciji.

5.3 Producersko orodje za izdelavo PS-pokrovov – Gorenje Orodjarna d.o.o.

V sodelovanju s koncernom Gorenje, d. d., Gorenje Orodjarno, d. o. o., smo v okviru projekta IMOLD (New status driven injection moulding process for complex parts by the development of smart, self-coltrolling moulds) razvili producersko primerjalno orodje za brizganje okrasnih pokrovov za enega izmed njihovih aparatov.

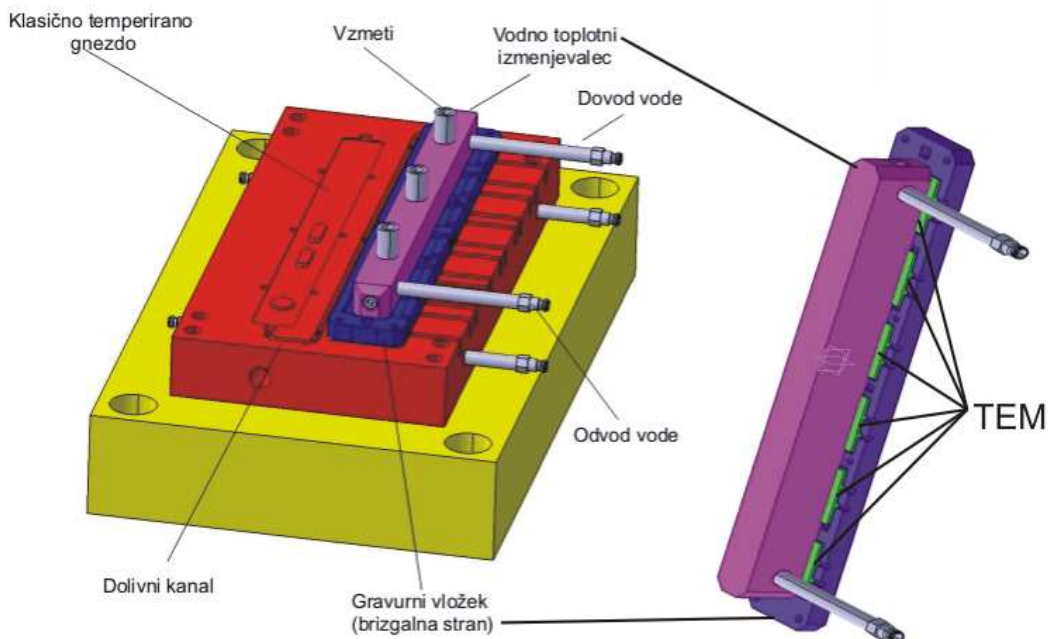
5.3.1 Opis testnega projekta



Slika 30. CAD-model testnega izdelka in brzani izdelek (obe gnezdi – slika v sliki, spodaj desno)

Slika 30 prikazuje model končnega izdelka. Gre za popolnoma prosojni trak dolžine 322 mm, širine 30,6 mm in debeline 2 mm. Izpraznitve na kosu (3 »luknje«) ob vzdolžnem zapolnjevanju predstavljajo dober testni poligon za nastanek linij spoja. Glede na to, da gre za visokoestetski kos, smo zmožnost temperiranja usmerili v rezultate, ki predstavljajo kose brez estetskih napak (linij spoja, krivljenje kosa zaradi neenakomernega ohlajanja, neposedenost itd.).

Za opisani estetski kos (transparentni polistiren) smo skonstruirali in izdelali dvognezdno orodje (orodje z dvema orodnima votlinama, ki omogočata hkratno izdelavo dveh kosov) za vzporedno testiranje klasične tehnologije in tehnologije temperiranja s TEM. Eno gnezdo je temperirano s klasično tehnologijo temperiranja (voda), pri drugem gnezdu pa smo uporabili večino izkušenj in iz prejšnjih testnih projektov pridobljenega znanja v zasnovi in izdelavi temperirnega sestava s TEM.



Slika 31. CAD-model sestava orodja

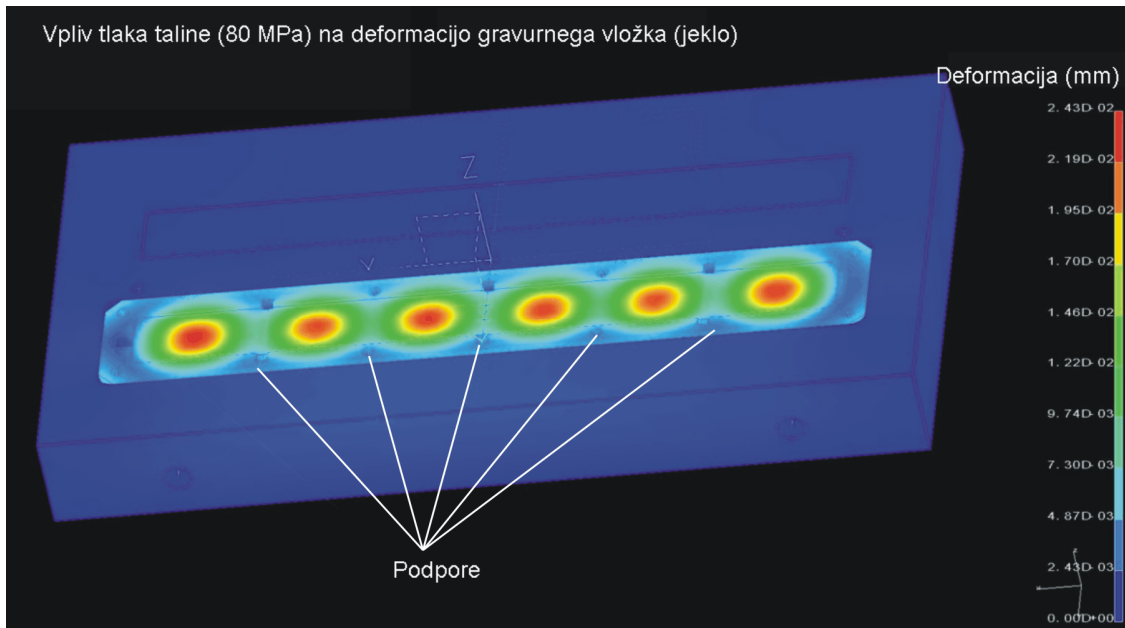
Slika 31 prikazuje model delnega sestava orodja za brizganje testnega izdelka s slike 30. Na ogrodju orodja (rdeči segment) je pozicioniran gravurni vložek, kjer se nahajata dve gnezdi. Klasično temperirano gnezdo ima pod površino gravure vodne kanale, kjer temperirna voda zagotavlja konstantno temperaturo. Druga stran pa ima izvedeno temperiranje s TEM. Celotni podsestav sestoji iz gruvrnega vložka, pod katerim je pozicionirano 6 TEM, ki dobijo potreben dovod/odvod toplote preko plavajočega vpetega vodnega izmenjevalnika (baker), ki vrši stalno kontaktno silo s TEM preko treh vijačnih vzmeti.

V tem primeru smo za potrebe toplotnega izmenjevalnika uporabili baker, ki ima približno šestkrat večjo toplotno prevodnost kot klasična orodna jekla. S tem smo izboljšali sposobnost odvajanja/dovajanja toplote k TEM, ki ležijo med omenjenim bakrenim toplotnim izmenjevalcev ter gravurnim vložkom, ki je zasnovan tako, da se kar najmanj dotika ogrodja orodja in tako ustvarja toplotne kratke stike. Na nujno potrebnih mestih se s tesnim ujemom zagotavlja konstantna pozicija gravurnega vložka, medtem ko so na večini dotikalnih površin izpraznitve, te pa predstavljajo z zrakom dovoljšno toplotno izolacijo.

Problematiko dilatacij med sestavnimi deli zaradi temperaturnih skrčkov različnih materialov zagotavljamo s premičnim sistemom vodnega izmenjevalnika, ki prek vzmeti vseskozi vrši predviden tlak na šest TEM. Sistem vzmeti tako rešuje problematiko potrebnega tlaka na TEM kot tudi problematiko nastajajočih rež zaradi skrčkov materiala.

Material gravurnega vložka pri gnezdu, ki ga temperiramo s TEM, ni bil izbran najoptimalneje glede na toploto; zlitina berilija in bakra bi bila toplotno boljša (približno 6-

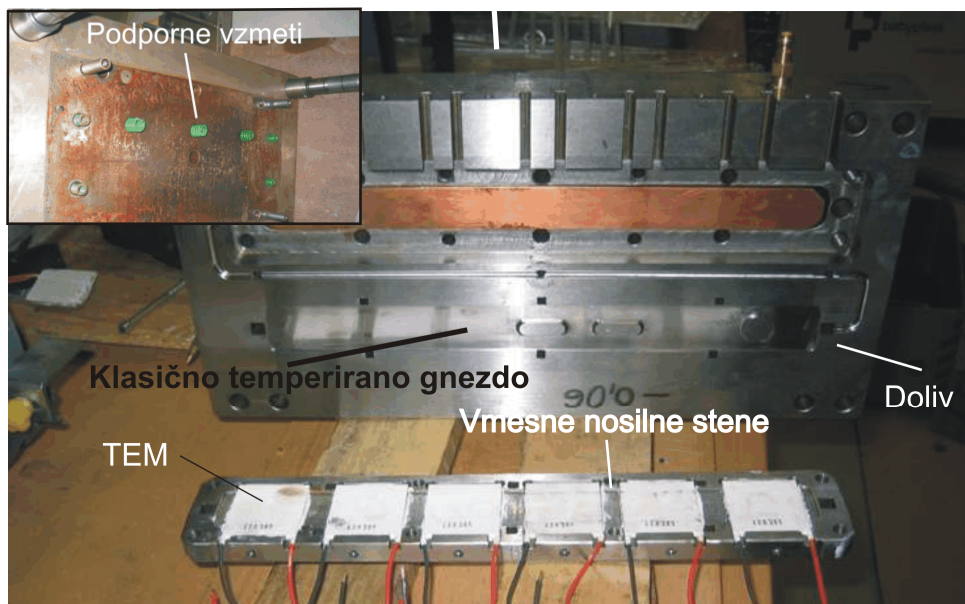
krat boljša toplotna prevodnost) kot orodno jeklo, vendar smo se zanj odločili zaradi dobavljivosti, robustnosti in tudi boljše trdnosti, ki v tem primeru ni bila zanemarljiva, kar je posledica preračuna tlačne obremenitve pri 800 barih taline, s katero vršimo tlak na gravurni vložek in posredno na TEM.



Slika 32. Prikaz deformacij gravurnega vložka zaradi tlačne obremenitve

Slika 32 prikazuje rezultate mehanske analize deformacije gravurnega vložka, če na površino, kjer učinkuje talina, tlak taline doseže 1000 barov. Rezultati prikazujejo uklon jeklenega vložka za red velikosti 2,5 stotinke milimetra. Analiza predpostavlja prostor, kjer so pozicionirani TEM, kot prazen, saj je mehanska trdnost TEM tisočkrat manjša kot mehanska trdnost jekla. Poleg tega smo z analizami potrdili potrebo po vmesnih nosilnih stenah gravurnega vložka.

Glede na rezultate simulacije tlačne obremenitve smo dimenzionirali potrebno debelino gravurnega vložka in njegov material. Dovoljeni tlaki na TEM so nas prisilili k vgradnji vmesnih sten (podpore) med TEM, ki podpirajo gravurni vložek in tako pripomorejo k prenašanju sil na ogrodje orodja in ne direktno na TEM (bolje vidno na sliki 33). Te vmesne stene predstavljajo popolni toplotni kratek stik in močno slabijo lastnosti temperirnega sistema s TEM. Izboljšava pomanjkljivosti bi bila v izdelavi podpornih elementov iz toplotnih izolativnih materialov z zadovoljivimi mehanskimi lastnostmi, ki bi prenesli tlačne obremenitve.



Slika 33. Izgled izdelanega orodja; s TEM temperirano gnezdo in klasično temperirano gnezdo

Slika 33 prikazuje izmetalni del orodja z obema vidnima gnezdoma. Slika v sliki (zgoraj levo) prikazuje opisane podporne vzmeti, ki omogočajo konstanten mehanski stik med vodnim izmenjevalnikom, TEM in gravurnim vložkom kljub temperaturnim diletacijam; bakreni vodni izmenjevalnik je namreč plavajoče vpet.

Testiranja in meritve smo opravljali nekajkrat, da bi odpravili vse možne napake pri izdelavi orodja, ki bi lahko ogrozile ponovljivost in kakovost meritev zmožljivosti delovanja TEM. Osnovni namen testov je bil prikazati zmožljivosti sistema delovanja TEM v orodjih za brizganje plastike. Prav tako smo imeli obliko plastičnega kosa, ki je omogočala spremljanje rezultatov testiranj (visokoestetski kos s problematiko dimenzij, linije spoja ter termične deformacije - zvijanja). Oblika kosa nam je omogočila spremljanje vpliva spreminjanja pogojev predelave.

5.3.2 Merilno okolje:

Stroj: KM80 CX, premer polža: 40 mm; maksimalna masa brizga: 200 g (PS)

Temperirna naprava: Single (do 150 °C)

Tehnica: UWE HGS-3000; natančnost: 0,1 g

Material: PS kristal

DC napajalni vir: PCE A6KW 40–150, do 40 V in 150 A

Temperatura okolice: 18 °C

Temperaturna sonda: TESTO 830-T2; zunanja dotikalna termočlenska sonda

Masa brizga: 42 g

Glede na tehnične detajle kosa smo serijo razdelili na tri ločene teste: spremljanje linij spoja, lokalno predgrevanje – odstranitev pojava linij spoja ter temperaturne deformacije in njihov nadzor.

5.3.3 Določitev konstantnih pogojev predelave

Zaradi izolacije spremenljivk procesa smo najprej optimirali proces glede na dosegljive in ponovljive parametre.

Orodje:

Celotno orodje smo s temperirno napravo ustallili pri 40 °C. S TEM temperirano gnezdo (brizgalno in izmetalno stran) smo nato površinsko greli pri konstantni temperaturi 85 °C. Klasično temperirano gnezdo je bilo konstantno greto s konstantno temperaturo 40 °C.

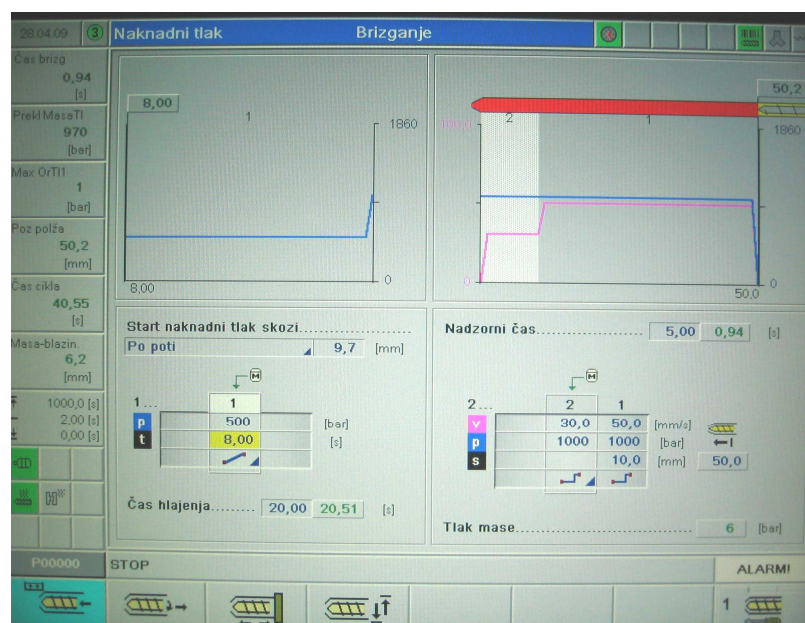
Brizgalni parametri:

Talino smo pripravili po priporočilih proizvajalcev polistirena (v nadaljevanju PS; sliki 34 in 35). Optimizacija polnjenja je potekala po klasični poti. Potreben tlak za zapolnitev orodne votline 1000 barov smo prepolovili in z naknadnim tlakom 500 barov polnili kos še potrebnih 8 sekund.

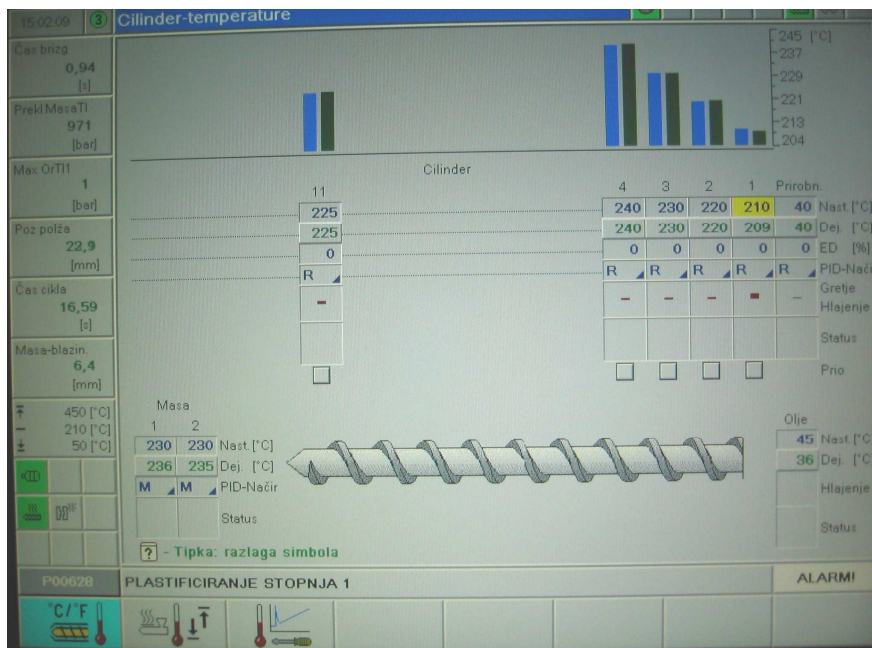
Čas naknadnega tlaka smo določili z masnim testom. Ob konstantnih tlakih smo podaljševali čas naknadnega tlaka toliko časa, da se je masa brizga (dve gnezdi in dolivek) ustalila pri 47,4 g.

Naknadni tlak smo aktivirali po poti (10 mm) in vseskozi opazovali dolžino talilne blazine, ki je ostajala konstantna. Aktivacija po poti predstavlja funkcijo vklopa naknadnega tlaka, ki reducira tlak v plastificirni enoti, ko pomik polža doseže pozicijo 10 mm do konca pomika.

Čas hlajenja je bil vseskozi nastavljen na 20 sekund.



Slika 34. Pregled brizgalnih parametrov



Slika 35. Pregled temperaturnih parametrov

Sliki 34 in 35 povzemata brizgalne in temperaturne parametre. Brizgalni parametri definirajo brizgalne pogoje (profili tlaka in hitrosti brizganja taline v orodno votlino glede na pozicijo polža), temperaturni pa parametre, pod katerimi je pripravljena talina v plastificirni enoti.

Električni parametri:

Pri tovrstnem testu smo kot napajalni vir uporabljali tokovni generator. Potrebno je poudariti spremenljive električne lastnosti TEM glede na temperaturo obratovanja ter obliko toka, zato smo uporabili funkcijo konstantnega tokovnega generatorja, ki jo je omogočal napajalni vir.

5.3.4 Spremljanje linije spoja

Ob predhodno določenih brizgalnih parametrih smo temperaturo s TEM temperiranega gnezda nižali do pojava linij spoja, predstavljenih na sliki 30. Na ta način smo načrtno ustvarili eno izmed najpogostejših estetskih napak. Z nižanjem temperature celotne površine gravure (izmetalne in brizgalne strani) smo merili tudi spreminjajoče se električne parametre celotne skupine TEM (6 kosov na izmetalni in 6 na brizgalni strani).

Tabela 1 – Rezultati testiranja linij spoja

Poskus	Napetost generatorja (V)	Tok generatorja (A)	Temperatura površine (°C)	Dolžina linije spoja (mm)
1	12	65	85	/
2	9,2	45	65	/
3	5,1	25	50	5
4	0	0	40	15
5	4,4	-25	28	20
6	8,1	-45	22	22
7	12,1	-65	20	22

Razlaga tabele 1: DC-napajalni vir smo uporabljali kot generator toka; negativni predznak v stolpcu tokov pomeni spremembo smeri toka in s tem spremembo režima dela TEM – iz gretja v hlajenje. Linije spoja so se pojavile pri temperaturi pod 50 °C. Čeprav bi morala masa celotnega brizga ob padanju temperature padati, se to ni zgodilo, masa je ostajala konstantna, 42,4 g, ker bi morala talina ob ustju ob zniževanju temperature prej zamrzniti in tako onemogočiti polnjenje izdelka (ob nespremenjenih brizgalnih parametrih). Tega nismo mogli identificirati zaradi metode tehtanja celotnega izdelka in dolivka skupaj. Po zamrznitvi ustja se je tako do konca faze polnjenja polnil dolivek in ne izdelek.

5.3.5 Lokalno predgrevanje – odstranitev pojava linij spoja

Rezultati naslednjega testa so potrdili izsledke prejšnjih meritev. Z aktivacijo TEM-modulov, ki so bili nameščeni pod kritična mesta za nastajanje linij spoja (»otoki«), smo dokazali, da je takšna uporaba v industrijske namene smiselna in upravičena. Vodno temperiranje je zagotavljalo konstantnih 40 °C, med tem ko je par TEM (na vsaki strani) deloval le v času brizga cikla. Pri merjenju dinamične odzivnosti smo pri odprtem orodju izmerili zmožnost predgretja površine ob »otokih« do 65 °C, kar je očitno zadostovalo za odstranitev linij spoja. Izmerjena vrednost tudi potrjuje rezultate meritev iz prejšnjega odstavka.

Potrebno je poudariti, da so te vrednosti izmerjene pri odprtem orodju in se močno spremenijo ob stiku s talino. Sami smo sicer izvedli dinamične meritve taline ob stiku z orodno površino, vendar so rezultati teh meritev zelo nestabilni in neponovljivi. Uporabili smo namenski temperaturni senzor podjetja Kistler s premerom 1 mm. V premeru 1 mm je ob dotikalni površini izveden termočlenski var. Takšna minimizacija sicer obljublja majhno temperaturno vztrajnost sensorja, vendar se je izkazalo, da je tudi ta prevelika za pravilne rezultate. Poleg tega je senzor v mehanskem in toplotnem stiku z gravurnim vložkom. To predstavlja direktni toplotni most in popači rezultate. V industrijski praksi nismo zasledili senzorjev z izvedeno toplotno izolacijo sensorja proti ogrođju. V našem primeru smo izmerili zelo položne odzive (toplotna vztrajnost), največje temperaturna nihanja pa so bila v rangi 5 °C; v realnosti bi morala biti višja (do 15 °C).

5.3.6 Temperaturne deformacije in njihov nadzor

Temperatura posameznih delov (navadno polovic) orodja ima največji vpliv na deformacije (zvijanje; poglavje 2). Zaradi tega ima predstavljena tehnologija precejšnje možnosti za izboljšave na tem področju. Test se je izvedel na osnovi konstantne temperature izmetalnega dela, medtem ko smo brizgalni del stopenjsko spreminjali. Deformacija predstavlja maksimalen odklon testiranega kosa.



Slika 36. Slika termične deformacije oziroma način merjenja

Slika 36 prikazuje smer merjenega termičnega zvijanja oziroma deformacije. Velikost deformacije je navedena v tabeli 4. Glede na dejstvo, da je kos zvit enakomerno (in ne tako kot na sliki 36), smo pri merjenju morali vpeljati poenostavitve postopka. Meritev je bila izvedena tako, da smo konec kosa poravnali ob ravno podlago, ob nasprotnem koncu pa izmerili razdaljo od te podlage.

Tabela 2 – Rezultati deformacij zaradi različnih temperatur brizgalne in izmetalne strani orodja

Poskus	Temperatura izmetalnega dela (°C)	Temperatura brizgalnega dela (°C)	Deformacija (mm)
1	40	25	-8,2
2	40	40	0
3	40	50	6,2
4	40	65	8,7
5	40	85	11,3

Tabela 2 prikazuje rezultate deformacij plastičnega kosa. Meritev številka 2 potrjuje hipotezo, da naj bi bili kosi ob enakomernih temperaturah orodja ravni. To sicer velja za kos take oblike, ki omogoča časovno enakomerno hlajenje, če kosi niso simetrično enaki (glede na ravnino odpiranja), pa različne debeline kosa generirajo deformacije, ki jih naknadno poskuša minimizirati z različnimi konstantnimi temperaturami polovic (delov) orodja.

Serijski predstavljeni testi opravičuje pričakovanja in dokazuje zmožnosti nadzora velikosti in smeri zvijanja plastičnih kosov, ki nastajajo zaradi toplotnih skrčkov (in ne zaradi neenakomerne porazdeljenosti raznih polnil, ojačitvenih vlaken itd.).

5.3.7 Razprava

Navedeni rezultati so eni zmed treh najpomembnejših končnih rezultatov doktorske naloge (poleg rezultatov v poglavju 5.4 in 5.5). Prav tako lahko trdimo, da so navedene ugotovitve potrdile vse hipoteze doktorske naloge, navedene v ciljnih raziskave (poglavje 1.1). Z usvojenim znanjem in izkušnjami dela na projektih, opisanih v poglavjih 5.1 in 5.2, smo v sodelovanju s koncernom Gorenje, d. d., izbrali najprimernejši plastični kos iz njihove serijske proizvodnje gospodinjskih aparatov, kjer so najočitnejši defekti tehnologije brizganja, ki so posledica neustreznih temperatur orodne površine. Gre za visokotransparenten estetski kos z izpraznitvami, ki so optimalen generator linij spoja. Poleg optimalne oblike izdelka, ki je lahko nudil nazorno spremljanje več parametrov, smo izdelali dvognezdno orodje (dva izdelka v orodju). En izdelek je imel orodno površino, temperirano s klasično tehnologijo (konstantna temperatura, realizirana z vodnim izmenjevalnikom), drugi izdelek pa je imel integrirano predstavljeno tehnologijo temperiranja. Na ta način smo uspeli pridobiti zelo realne primerjalne rezultate obeh tehnologij.

Po zagotovitvi optimalnih, popolnoma ponovljivih pogojev predelave, in nastavitvi vseh tehnoloških parametrov procesa z namenom doseganja kakovosti plastičnega kosa, smo vzporedno testiranje razdelili na tri segmente.

Prvi niz testov: ob konstantni temperaturi ogrodja in klasično temperirani gravurei smo temperaturo s TEM-temperirano gravuro povišali na 85 °C, nato smo jo stopenjsko nižali in opazovali nastajanje linij spoja; dolžino le-te smo tudi merili. Rezultati so bili pričakovani. Najpomembnejša prednost tehnologije s TEM je v predgrevanju orodne površine samo v času zapolnitve votline, nakar s spremembo smeri črpanja toplote odvečno toploto kar najhitreje odvedemo v okolico preko vodnega izmenjevalnika.

V drugem nizu meritev smo temperaturo orodne površine spreminjali tako na brizgalni kot tudi na izmetalni strani orodja in preko celotne površine (šest termoelektričnih modulov na vsaki strani). V drugem setu smo enako idejo spremljanja linij spoja izvedli samo lokalno ter aktivirali samo module, nameščene na problematičnih mestih, in dokazali pomembno možno funkcionalnost.

Tretji niz testov je obsegal kontrolo in nadzor nad termičnim zvijanjem plastičnega kosa. V poglavju 3.1 so opisani razlogi za zvijanje plastičnih kosov, ki večinoma ležijo v časovno neenakomernem ohlajanju. Ker prinaša ohlajanje tudi skrčke, se plastični kosi krivijo v smeri toplejše stene kosa (stena, ki dlje časa ostaja toplejša kot druga stran). Ker je v industrijski praksi nemogoče točno določiti velikost zvijanja, predlagamo uporabo predstavljene tehnologije za naknadno odpravo napak zaradi zvijanja s korekcijo temperatur.

Testni plastični kos je z obliko (dolžino) predstavljal zelo primeren poligon za izvedbo tovrstnih testov. Izmerjeni rezultati so potrdili našo predstavo o korigiranju termičnega zvijanja. Teste smo opravili le na materialu PS predvsem zaradi zahtevane visoke transparentnosti.

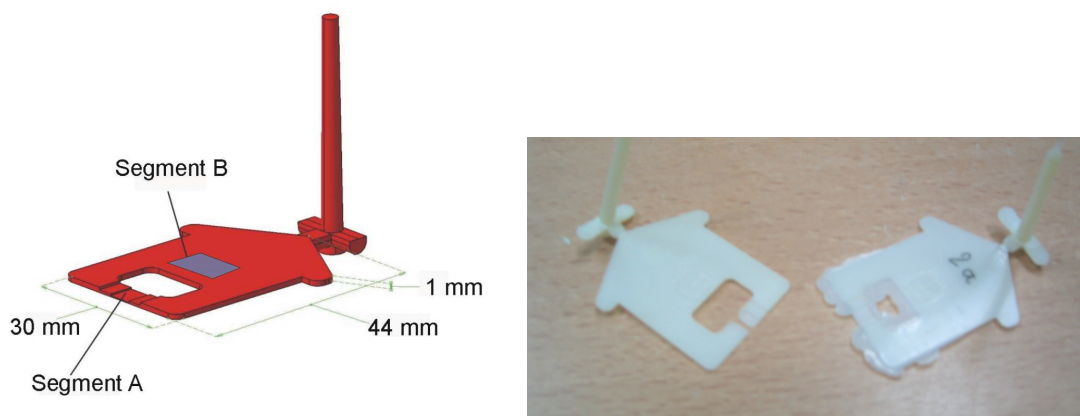
Opisan testni sistem je potrdil vsa naša pričakovanja o zmožnostih predstavljene tehnologije. Vse meritve so potekale sočasno v obeh gnezdih, kar nam je omogočalo najboljšo primerjavo rezultatov s klasično tehnologijo temperiranja.

OPOMBA: Zaradi popolne transparentnosti izdelka in visokega sijaja je fotografiranje izdelkov praktično nemogoče. Estetskih napak (linije spoja ter posedenosti) na takšnih kosih ni mogoče fotografirati.

5.4 Testno miniorodje – aplikacija mikrobrizganja plastike

Brizganje mikroizdelkov je postopek, kjer se proizvaja plastične izdelke, katerih karakteristična dimenzija posega v mikronsko področje, torej pod 1 mm. Velikost teh izdelkov narekuje težavnost izdelave in hkrati tudi rokovanje z izdelki po izdelavi. Mikrobrizganje je ena od tehnologij brizganja, kjer se vroča talina vbrizga v orodje. Tam se talina ohladi in oblikuje v končno obliko. Po končanem ciklusu se orodje odpre in gotov izdelek lahko izmečemo iz orodja.

Osnovna oblika izdelka je zelo podobna izdelku iz začetnega projekta (poglavje 5.1). Dimenzije izdelka so sorazmerno zmanjšane zaradi izvajanja testov tehnologije v mini-/mikrodimenzijah. V izdelek smo vgradili številne detajle za testiranje več različnih stanj, ki se v praksi izkazujejo za problematične. Najpomembnejša sprememba je izredna minimizacija orodja, ki je prilagojen pogojem dela na stroju Babyplast 6/10P. Poglavitne razlike orodja v primerjavi z orodjem iz projekta, opisnega v poglavju 5.2, pa je v majhnosti, saj je približno trikrat manjše, kar se odraža v močno izboljšani dinamiki temperirnega sistema zaradi izjemno majhnih toplotnih časovnih konstant sistema.



Sliki 37. CAD-model izdelka (levo) ter pripadajoča reprezentativna plastična kosa (desno)

Sliki 37 prikazujeta CAD-model izdelka (levo) ter pripadajoča plastična kosa. Vgrajen segment A predstavlja namerno stanjšanje izdelka zaradi poudarjenega nastajanja linije spoja, segment B pa predstavlja matriko struktur reda velikosti mikrometra, ki omogočajo teste za natančno zapolnjevanje oziroma vpliv temperature na zapolnjevanje. Desna slika prikazuje skrajna primera vpliva temperature orodja na izdelek ob enakih parametrih brizganja. Ob konstantni in prenizki temperaturi kosov ne zmoremo zapolniti orodne votline (ali nastajanja mehansko neustreznih spojev na predelu nastajanja linije spoja), pri previsoki temperaturi pa prihaja do prelitja.

V tem projektu smo združili večino že nabranih izkušenj. Velika prednost projekta je v minimizaciji orodja in s tem povezanimi izboljšanimi termodinamičnimi lastnostmi.

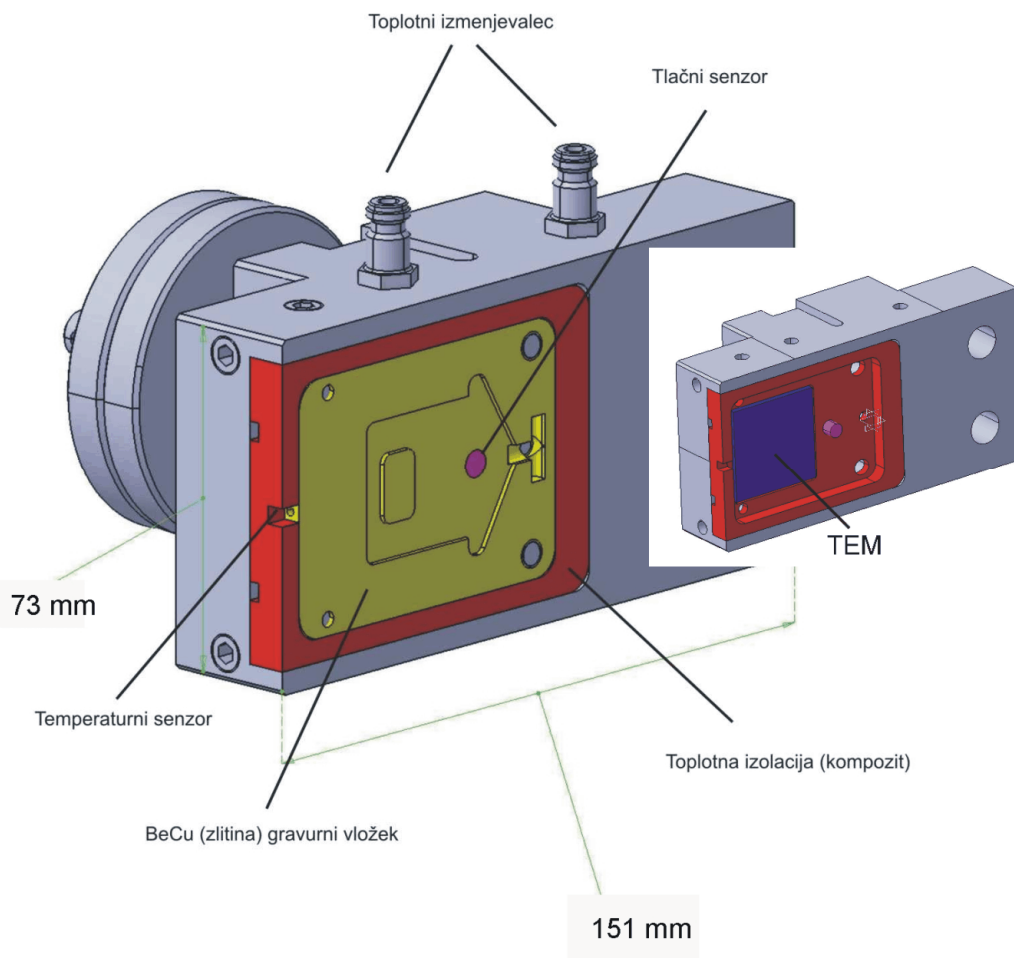
Gravurni vložek je izdelan iz zlitine bakra in berilija, ki združuje mehansko trdnost (berilij) ter visoko toplotno prevodnost (baker).

Pod njim je nameščen TEM (slika 38). Enakomeren tlak med elementi sestava zagotavlja precizna izdelava. Tu nismo vstavljali podpornih vzmeti zaradi majhnosti celotnega orodja in s tem povezanimi majhnimi temperaturnimi diletacijami.

Toplotno izolacijo med kontrolirano površino – gravurnim vložkom in ogrodjem orodja smo tukaj izvedli s kompozitno ploščo, ki zagotavlja zadostno mehansko trdnost ter odlično toplotno izolativnost.

Toplotni izmenjevalnik v tem primeru predstavlja celotno ogrodje orodja, vir/ponor toplote pa zagotavlja temperirana voda.

Glede na opisano zasnovo nam orodje omogoča izvedbo zahtevnejših elementov in variacij, ki jih s klasično tehnologijo ne bi mogli izvesti.



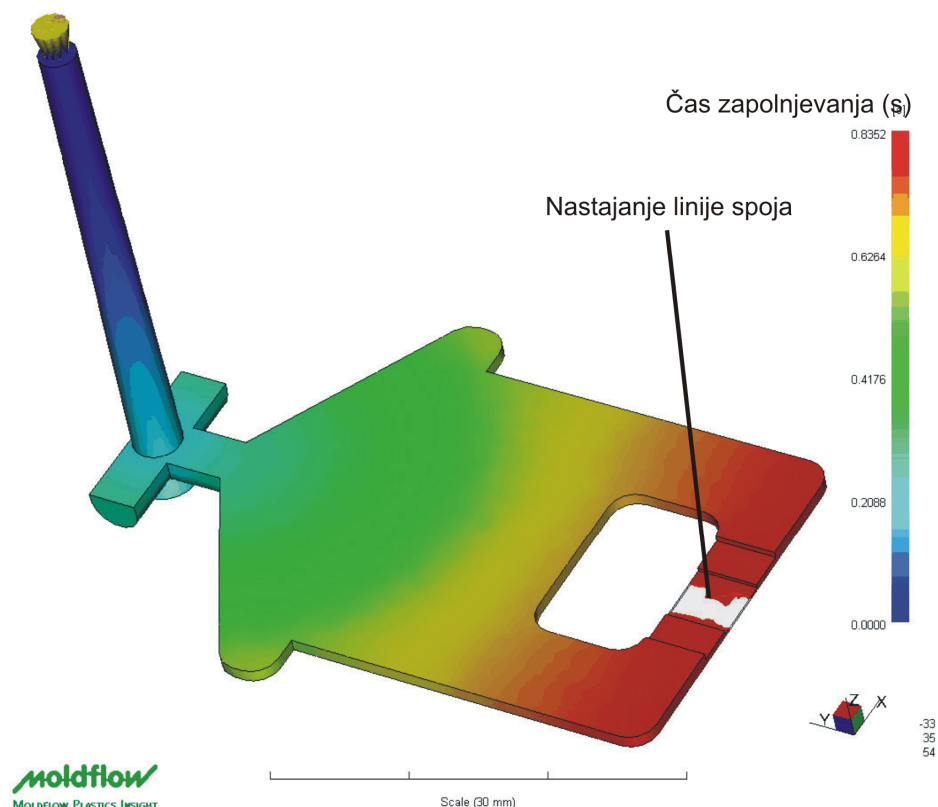
Slika 38. CAD-model izmetalnega dela orodja

5.4.1 Vgrajeni tehnični detajli

Plastični izdelek z dvema vgrajenima detajloma

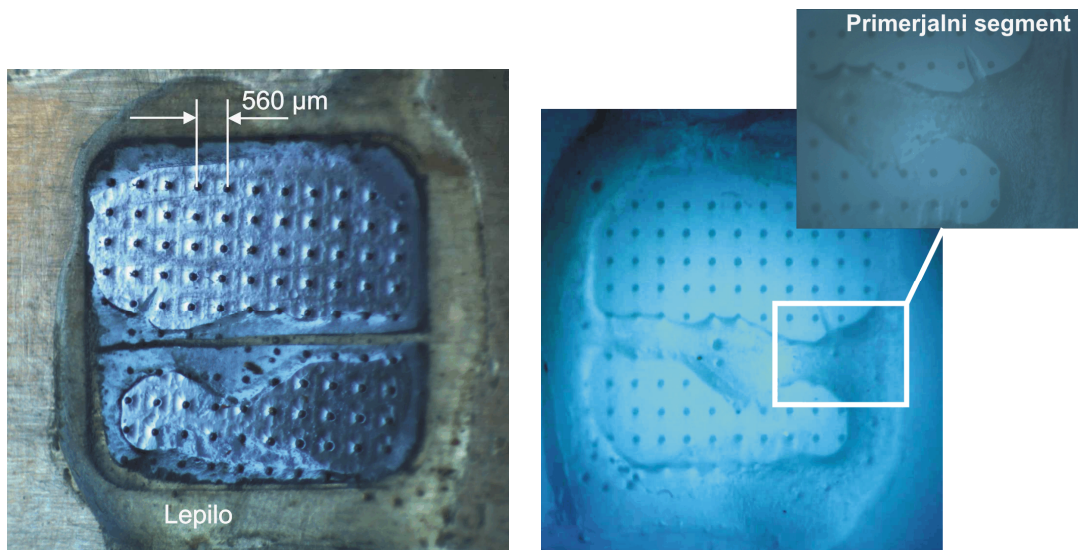
Segment A predstavlja namerno stanjšanje debeline ob predelu, kjer talina zapira orodno votlino najkasneje, zato je v normalnih pogojih delovanja (klasično temperiranje) polnjenje takšnih delov vedno problematično.

Poleg omenjene problematike zamrzovanja taline zaradi časovne zakasnenosti obstaja tudi problem linije spoja (**segment A**). Ta se pojavi kot posledica kombinacije opisane časovne zakasnenosti in tečenja taline, saj se liniji tečenja ločita ob izpraznitvi kosa (otoku) na sredini in se nato zopet srečata in spojata. Kakovost tega spoja (linije spoja) pa je v veliki meri odvisna od temperature taline in orodja, zato je potrebno ob zapolnjevanju kosa močno povišati temperaturo orodne površine (če bi bilo mogoče samo na problematičnih mestih, npr. linijah spojev) in jo nato ob ohlajanju čim hitreje ohladiti. Problematika linij spoja je tako estetske kot tudi mehanske narave (močno zmanjšana trdnost spoja). Reprezentativen kos pojava linije spoja predstavlja slika 37, natančneje levi kos desne slike. Desni del te slike predstavlja prenapolnjen izdelek, ki pa je bil izdelan pod enakimi brizgalnimi parametri, razlika je le v povečani temperaturi orodja ob času zapolnjevanja (levi kos pri 40 °C in desni kos pri 80 °C temperature orodja).



Slika 39. Rezultat simulacije polnjenja izdelka in viden detajl linije spoja (potreben čas polnjenja 0,8 s.) [13]

Drugi tehnični detajl, vgrajen v izdelek, pa je nameščen v **segment B**. Tu je bila na brizgalno stran orodja vgrajena (vlepljena) struktura, izdelana s fotolitografskimi postopki na silicijevem substratu. Gre za 100 μm visoke piramide z medsebojno razdaljo nekaj 560 μm , izdelane s postopkom suhega jedkanja, ki omogočajo izdelavo kristalografsko neodvisnih struktur. Struktura je bila izdelana v Laboratoriju za mikrosenzorske strukture na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Ta 0,7 mm debel Si-substrat je zalepljen z visokotemperaturno odpornimi lepili epoksidne osnove v izpraznitev v orodni votlini brizgalne strani.



Sliki 40. Mikroskopska slika vlepljene silicijeve piramidne strukture na brizgalno stran orodja (levo) ter plastični odtis – izdelek s pripadajočo stopnjo preslikave (desno)

Če je bilo v primeru detajla segmenta A poglavitno predgrevanje površine in s tem povezana odstranitev linije spoja, je v primeru segmenta B poglavitno predgrevanje površine zaradi zapolnjevanja vseh oblikovnih detajlov (mikrometrskih piramid).

5.4.2 Merilno okolje:

Stroj: Babyplast 6/10P, premer brizgalnega bata: 10 mm; maksimalna masa brizga: 5 g (PS)

Temperirna naprava: Single (do 150 $^{\circ}\text{C}$)

Tehtnica: UWE HGS-3000; natančnost: 0,1 g

Material: ABS natur

DC napajalni vir: PCE A6KW 40-150, do 40 V in 150 A

Temperatura okolice: 18 $^{\circ}\text{C}$

Temperaturna sonda: TESTO 830-T2; eksterna dotikalna termočlenska sonda

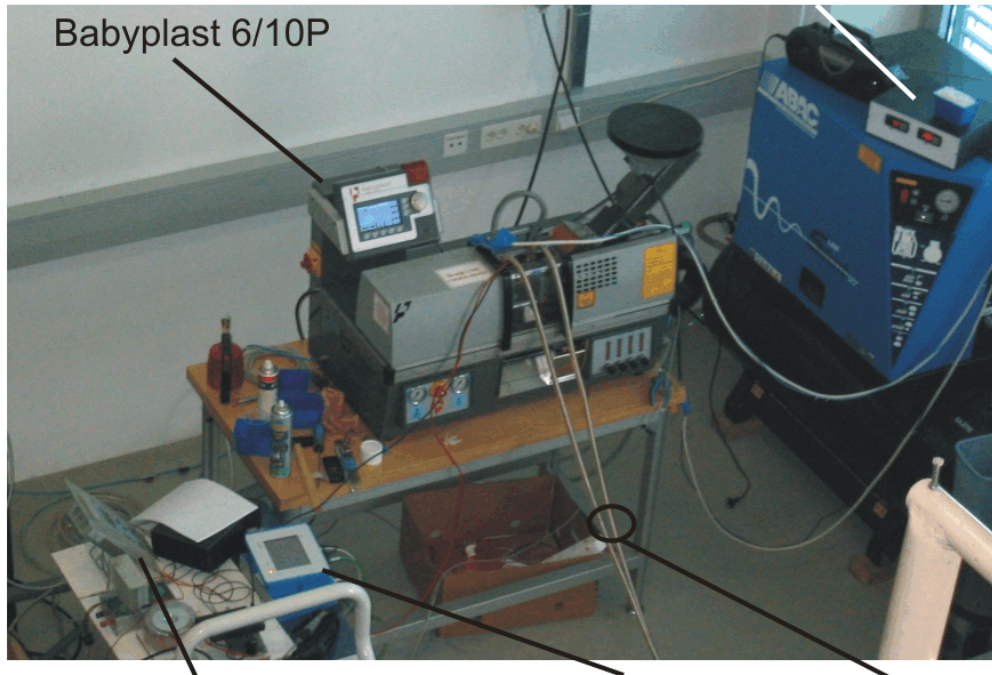
Masa brizga: 1,4 g

Termočlenski merilniki temperature Tecnologic TLK 38

Tlačni senzor: Kistler TIP: 6193A

Merilna oprema za merjenje tlakov taline v orodju: KISTLER CoMo, tip 5865A10

Dodatne temperaturne
sonde



Elektronska regulacijska
FUZZY enota

Merilna oprema
Kistler

Vodno
temperiranje

Sliki 41. Merilno okolje predstavljenega mini-/mikroprojekta z navedeno opremo

5.4.3 Testi in rezultati

Brizgalni parametri:

1) Temperature:

Šoba: 250 °C

Plastifikator: R1 = 245 °C

R2 = 235 °C

2) Parametri

Usipanje materiala: 27 mm

Čas hlajenja: 8 s

Čas cikla: 15 s

Brizgalni pritisk p1: 30 barov

Čas p1: 2 s

Hitrost v1: 50 %

Brizgalni tlak p2: 30 barov

Čas p2: 1 s

Hitrost v2: 50 %

Blazinica: 1 mm

Odmik plastifikatorja: 14 mm

Brizgalne parametre smo optimirali pri konstantni temperaturi orodja (izklopljeni TEM) 30 °C. Optimiranje se je izvedlo v smislu popolne zaplnitve kosa, vendar z vidnimi linijami spoja.

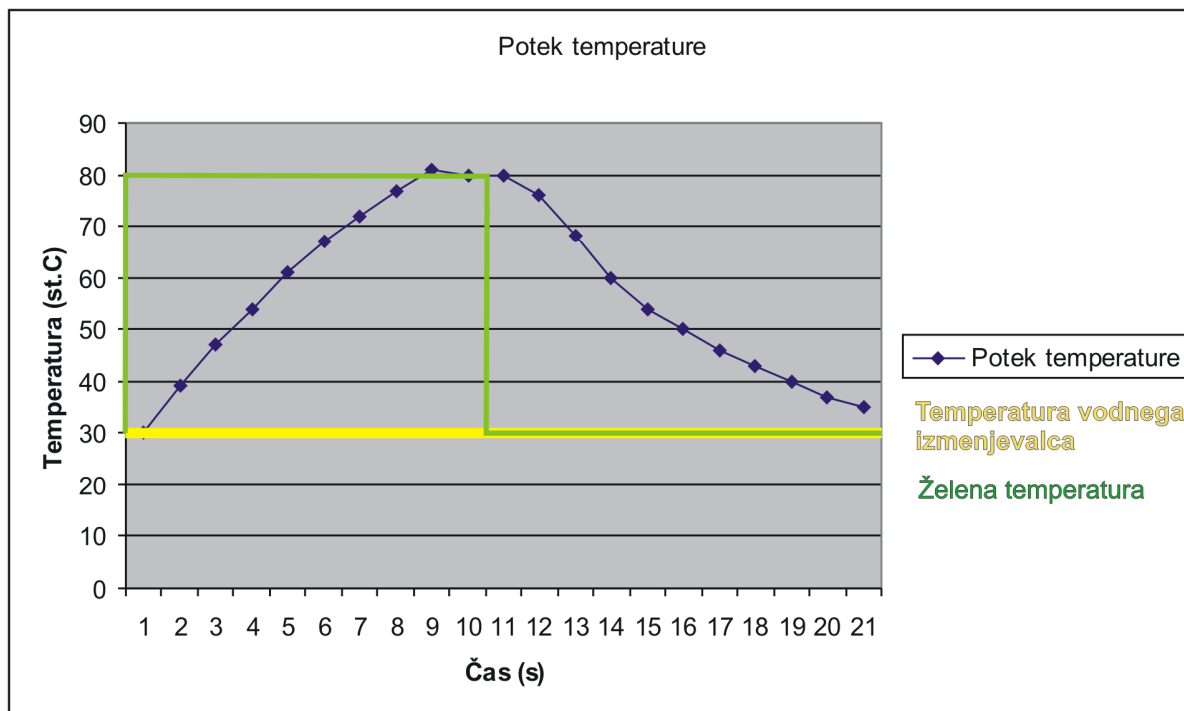
Preglednica testov:

Tabela 3 – Preglednica opravljenih variacij testov in poimenovanje posameznih vzorcev (več v prilogi 4)

T_{konst} (°C)	T1 (enako kot T_{konst} - brez TEM)	T1 (60 °C)	T3 (80°C)	T3 (90°C)	T4 (110 °C)	T5 (130 °C)
30	1a	2a	2b		2c	
50	3a			4a	4b	
70	5a				6a	6b

Tabela 3 prikazuje matriko različnih izvedenih variacij meritev. Pri treh različnih konstantnih temperaturah (30, 50 in 70 °C) vodnega izmenjevalca (in s tem celotnega orodja, če je bil TEM izklopljen) smo izvedli več temperaturnih nivojskih meritev. Izvedli so se samo režimi gretja in pri vsakem temperaturnem nivoju (po končanem prehodnem pojavu stabilizacije temperature) se je izvedlo vsaj pet brizgov.

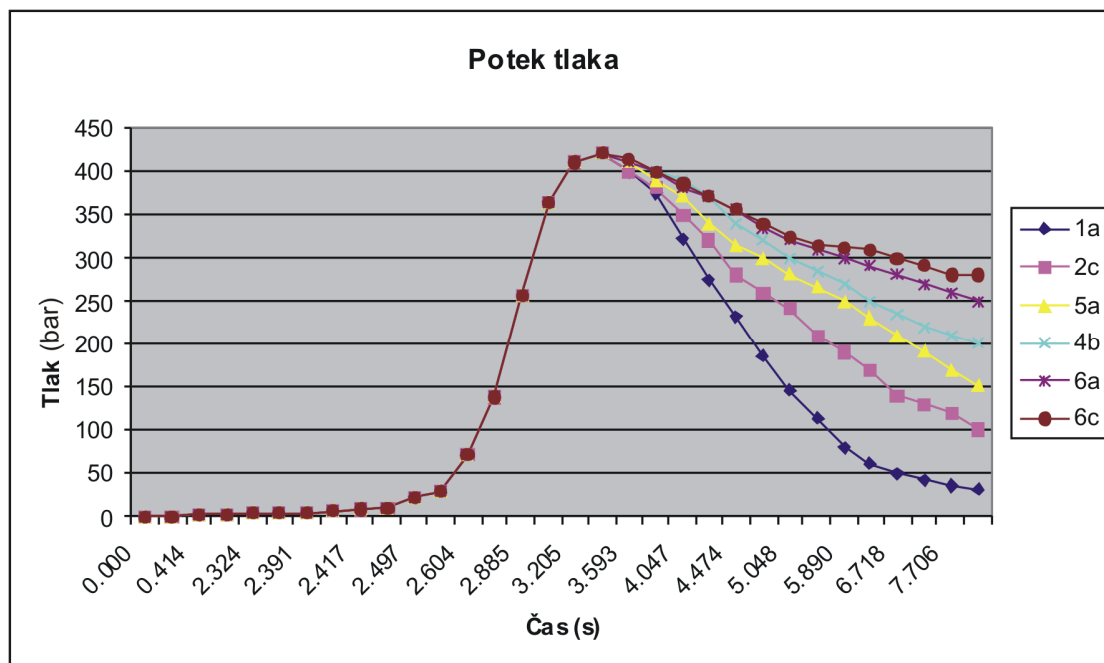
Ob aktiviranih TEM smo doseženo temperaturo dosegali v skupnem času odpiranja orodja, času odprtja in času polnjenja (slika 2). Glede na celoten čas cikla 20 s, je skupni čas gretja obsegal 10 s. V tem času smo uspeli površino gravurnega vložka segreti za velikostni razred približno od 60 do 70 °C. V preostalem času pa smo gravurni vložek ohlajali na prvotno temperaturo vodnega izmenjevalnika.



Slika 42. Potek dosegljivih temperaturnih odzivov pri temperaturi vodnega izmenjevalca 30 °C; stanje 2b iz tabele 3

Pomemben dejavnik ocene vpliva temperature je bila sposobnost preslikave miniaturnih struktur, realiziranih na silicijevem substratu. V prilogi 4 lahko natančneje predstavimo različno kakovostne plastične izdelke. Kakovost pojmuje kot kakovost preslikave vseh detajlov (piramid, napak v površini, prelitja kosa itd.).

Pri vseh meritvah so bili preko merilne verige Kistler nadzorovani tlaki taline v času polnjenja (priloga 4). Na ta način smo pridobili popoln vpogled v reološke pojave ob solidifikaciji taline, ki pa jo najboljše popisuje tlak. Opazovali smo časovni potek tlaka ob spremenjenih temperaturnih režimih, navedenih v tabeli 3.



Slika 43. Potek tlaka taline ob spremenjenih temperaturnih režimih površine orodja; temperature so navedene v tabeli 3

Slika 43 predstavlja dve pomembni ugotovitvi. Višina maksimalnega tlaka se ob povišani temperaturi ne zmanjšuje (nepričakovano), pričakovano pa je podaljševanje časa taline oziroma zmožnost uporabe naknadnega tlaka. Slika prikazuje začetek merjenja ob zapiranju orodja ($t = 0$), ob času 2,4 s nastopi cikel brizganja, ki traja 2 s, nato nastopi cikel naknadnega tlaka, ki traja nadaljnjo sekundo. Natančnejša razlaga obeh fenomenov je navedena v razpravi.

Dodatno izvedeni testi ugotavljanja tlačne razlike zaradi spremembe tlačnih padcev taline po poti tečenja so nam dokazali pričakovane rezultate. Pri konstantni temperaturi orodja 30 °C smo izmerili največjo vrednost tlaka 450 barov, pri 110 °C pa 360 barov.

5.4.4 Razprava

Aplikacija temperiranja v orodjih za brizganje mikroplastičnih izdelkov se je izkazala kot najobetavnejše področje vnosa predstavljene tehnologije. Visoka pričakovanja so temeljila predvsem na izkušnjah preteklih projektov, slednjega smo namreč realizirali ob koncu dela.

V seriji testov smo poskušali dokazati prednosti tehnologije, zapisane v ciljnih naloge. V nasprotju z dokazano uporabnostjo predstavljene tehnologije v večjih orodjih za brizganje plastike le v smislu lokalne odprave napak pri brizganju zaradi neprimerne temperature, smo v primeru aplikacije mikroorodja poskušali dokazati zmožnost popolnega nadzora temperature z uporabo TEM.

Koncept nastavitve stroja in testov je pogojeval smiselnost pričakovanih rezultatov. Pričakovani rezultati spremljanja tlaka so bili v podaljševanju časa uporabe naknadnega tlaka ter v znižanju maksimalnega tlaka v orodju ob poviševanju temperature, česar nismo zasledili.

Razlaga je v smeri poviševanja temperature. Osnovne parametre brizganja smo nastavili na začetno temperaturo orodja 30 °C, hkrati pa smo jo preverili ob maksimalni dosegljivi temperaturi (pri 30 °C osnovne temperature smo dosegli 110 °C maksimalne temperature). Tako smo morali postaviti omejitve tlaka stroja zaradi preprečitve prelitja ob maksimalni temperaturi, zato smo preko celotne temperaturne serije omejevali tlak stroja in ni bilo moč videti padca tlaka v orodni votlini zaradi zmanjšanja padcev tlaka ob povišani temperaturi orodja. To bi bilo mogoče videti le brez tlačne omejitve stroja, česar pa ne dovoljujeta prelitje in možnost okvare orodja. Ta problem pa bi lahko obšli z začetkom testov na maksimalni temperaturi, kjer bi optimirali brizgalne parametre na mehansko zmožnost orodja in eliminacijo prelitja ter minimalno omejitev brizgalnega tlaka. Z naknadnim zniževanjem temperature bi zagotovo lahko dokazali padec tlaka v orodju zaradi zmanjšanja upora.

Del opisane merilne verige je sestavljal tudi avtonomen sistem za merjenje tlakov taline v orodju podjetja Kistler, s katerim smo imeli popoln vpogled v reološko dogajanje taline v času polimerizacije. Notranji tlak v orodju je edini zanesljivi pokazatelj dinamike stanja taline (poglavje 2).

Prav pričakovane tlačne razlike taline v orodju so nam pokazale smiselnost uporabe predstavljene tehnologije pri problematičnih izdelkih, kjer je problematika zapolnjevanja zaradi prevelikih padcev tlaka po poti tečenja taline izrazitejša. Gre za majhne (mikro)izdelke oziroma izrazite tankostenske izdelke, kjer razmerje višine plastičnega kosa v nasprotju z dolžino kosa ne presega faktorja 2 - [50].

Logično nadaljevanje raziskave problematike zapolnjevanja kompleksnih izdelkov oziroma povezave med temperaturo orodja in potrebnimi tlaki zapolnjevanja je vodilo k spremljanju zapolnitve mikronske strukture detajla B v odvisnosti od temperature orodja. Detajl B je prikazan na slikah 40, in sicer silicijeva struktura na orodju (levo) ter njen plastični odtis (desno). Problematika izbočenih struktur – piramid na orodju (in s tem vbočenih na plastičnih kosih) – je vzrok za nemogoče kvalificiranje merilnega postopka, ki bi lahko izmeril globino in strukturiranost plastične matrice. Optični in elektronski mikroskopi ne omogočajo vidnosti struktur zaradi nezmožnosti odboja žarkov – popolne električne izolativnosti. Če bi na površino nanесли električno prevodno plast, bi s tem delno zakrili tudi strukturo, zato je primerjalna analiza potekala na strukturi detajla, ki smo ga lahko videli z optičnim mikroskopom (slika 40 desno, primerjalni segment). Ocene struktur v Prilogi 4 so zaradi navedenega kvalificirane med 1 in 5 (5 predstavlja najbolj strukturiran vzorec) na podlagi vidnih ostrih prehodov plastičnega odtisa. Iz pričakovanih rezultatov lahko povzamemo, da je struktura, izdelana pri najvišji temperaturi (130 °C), najostrejša. Navedeno trditev razlagamo z največjim tlakom taline pri najvišji temperaturi oziroma najmanjši padci tlakov taline ob tečenju do orodne votline – do segmenta B.

Rezultati opazovanja detajla A so bili prav tako pričakovani. Ob lokalnem zmanjšanju debeline spoja (z debeline 1 mm preko celotne površine na 0,5 mm na omenjenem detajlu) je prihajalo do nezapolnitve (pri temperaturi orodja 30 °C), slabega mehanskega spoja in vidnih linij spoja (pri temperaturah orodja od 50 do 70 °C) do nevidnih linij spoja in popolnih mehanskih lastnosti spoja pri temperaturah orodja nad 100 °C.

Poglavitni dejavnik dosegljive temperaturne dinamike leži v moči TEM ter toplotni vztrajnosti bremena – orodnega vložka. Glede na omejenost moči TEM smo veliko pozornosti posvetili optimiranju (zmanjševanju) toplotne kapacitete bremena. Predvsem material gravurnega vložka (zlitina berilija in bakra) ter nosilna kompozitna struktura z izrazito toplotno izolativnostjo (slika 38) pripomoreta k doseženi temperaturni dinamiki. V celotnem izdelovalnem ciklu 20 s se izmenjata cikel gretja, ki traja 10 s, in cikel hlajenja, ki traja 10 s. V času gretja lahko dosežemo približno 60 °C nadtemperature nad osnovno temperaturo ogrodja (vodnega izmenjevalca). Omejitev višje nadtemperature je reducirana z zmožnostjo hlajenja (poglavje 5.1).

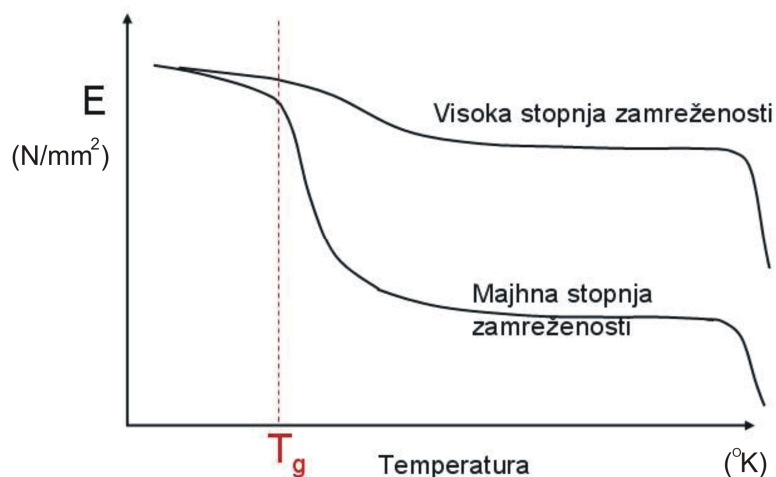
5.5 Uporaba tehnologije v tehnologiji brizganja duroplastov

V sodelovanju z največjim slovenskim predelovalcem duroplastov (Kolektor Sikom) smo preizkusili predstavljeno tehnologijo temperiranja s TEM v industrijski praksi brizganja duroplastov. Razvoj in testiranje sta potekala v dveh korakih. V prvem smo opravili preizkus tehnologije in več različnih materialov na orodju za merjenje skrčkov (ploščica za merjenje skrčkov – poglavje 5.1). Po pridobljenih izkušnjah smo v skupnem razvojnem projektu preizkusili tehnologijo za reševanje problematike prelivanja ob zabrizgavanju električnih kontaktov. Logika predelovanja in s tem obvladovanja temperatur v orodjih za predelovanje duroplastov je povsem drugačna. Temperatura orodja ima veliko večji vpliv na proces in kakovost izdelka kot pri termoplastih.

5.5.1 Osnovne toplotne in reološke posebnosti predelave duroplastov

Lastnosti duroplastov

Zaradi zamreženosti polimernih verig so duroplasti trdnejši, vendar tudi krhkejši kot termoplasti. Končna trdnost je funkcija stopnje zamreženosti in temperature obratovanja (E-modul elastičnosti) [70].



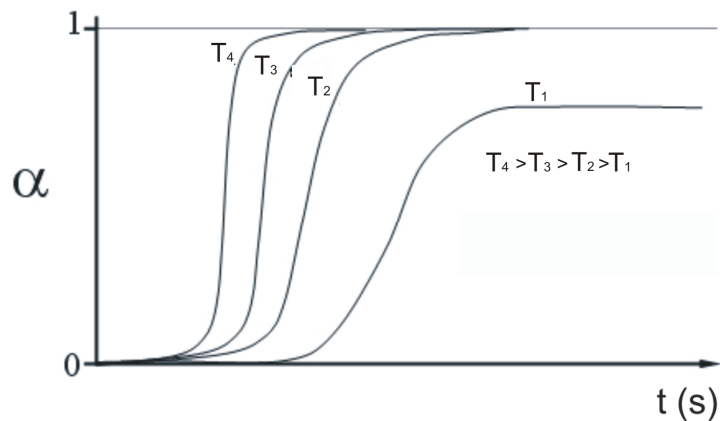
Slika 44. Potek modula elastičnosti v odvisnosti od temperature za duroplaste

Slika 44 predstavlja potek modula elastičnosti v odvisnosti od temperature; nad temperaturo T_g materialu močno oslabijo mehanske lastnosti (se zmehta) [70].

Kljub temu da se zamrežen duroplast ne tali, vseeno pride do razpada polimera nad določeno temperaturo.

Stopnja zamreženosti

Stopnja je odvisna od temperature in časa. Definirana je kot razmerje med vrednostjo entalpije v trenutnem času in končno vrednostjo entalpije pri reakciji. Entalpija je vsota notranje energije ter produkta tlaka in prostornine, ki nastopajo pri reakciji zamreževanja. Pri procesih, ki potekajo pri stalnih tlakih (tega v našem primeru ni), je sprememba entalpije enaka dovedeni ali odvzeti toploti [70].



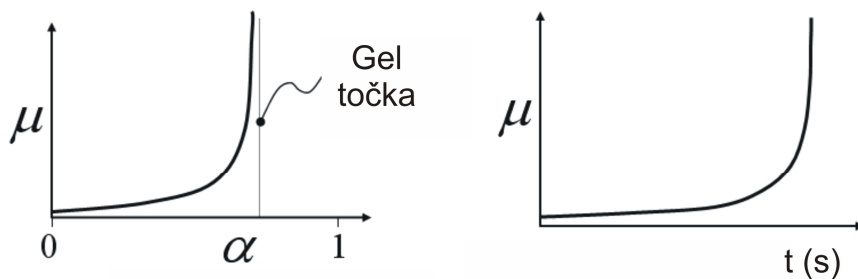
Slika 45. Potek stopnje zamreženosti od časa; $\alpha = 0$ definira začetek reakcije, popolno zamreženje predstavlja $\alpha = 1$

Slika 45 predstavlja časovni potek zamreževanja duroplastičnega materiala. Strmina zamreževanja je odvisna od temperature, višja kot je temperatura, hitreje poteka zamreževanje [70].

Viskoznost η

Za nekatere proizvodne procese je pomemben potek spremembe viskoznosti smole (veziva) med procesom.

V začetnem stadiju procesa se predpolimerizirane verige združujejo, kar povzroči naraščanje molekularne teže smole. To pomeni, da viskoznost narašča.



Stopnja zamreženosti

Slika 46. Potek viskoznosti od stopnje zamreženosti in časa

Sliki 46 prikazujeta poteka viskoznosti v odvisnosti od stopnje zamreženosti (α) in časa [70].

Gradient naraščanja je na začetku nizek, se pa rapidno povečuje, ko se stopnja zamreženosti približuje točki gela.

Fazni prehodi

Najpomembnejša prehoda sta prehoda v **gel** in **steklasti prehod**.

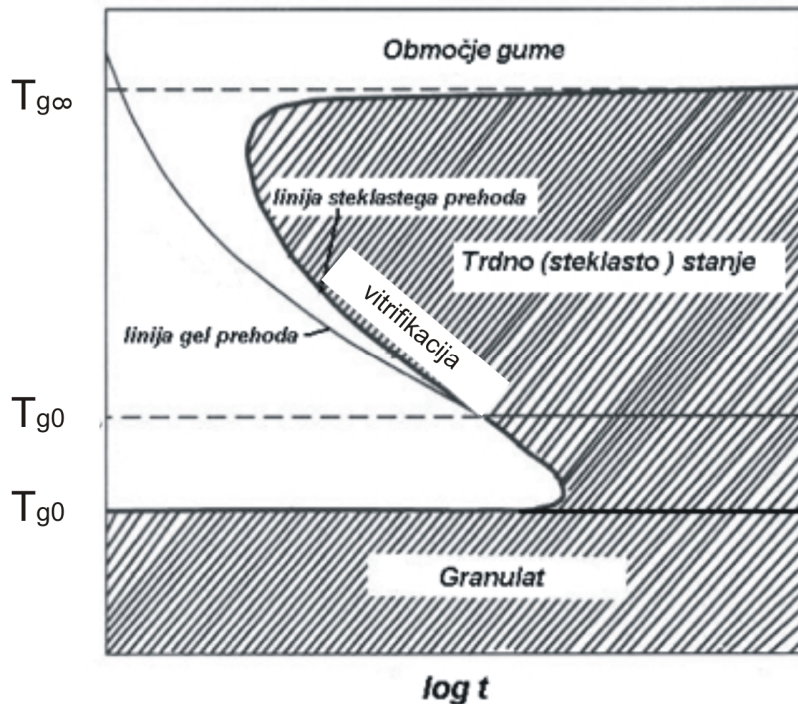
Prehod v gel:

- točka, kjer začnejo nastajati kovalentne vezi med verigami molekul,
- smola se transformira iz tekočega v gumasto stanje,
- reakcija poteka z veliko hitrostjo,
- viskoznost smole se drastično poveča.

Steklasti prehod:

- se zgodi, ko temperatura steklastega prehoda smole naraste na trenutno temperaturo smole;
- hitrost reakcije občutno pade, ker zamreževanje zahteva difuzijo molekul po mrežni strukturi;
- končno fizikalno stanje je odvisno od temperature, pri kateri se odvija proces.

Vpliv temperature in časa na fizikalno stanje duroplasta je najbolje predstavljen v TTT-diagramu (čas/temperatura/transformacija).



Slika 47. Potek viskoznosti od stopnje zamreženosti in časa [71]

OPOMBE k sliki 47 [71]:

$T_{g\infty}$ je temperatura steklastega prehoda pri 100 % zamreženosti.

TgGEL je temperatura, nad katero se prične proces geliranja pred steklastim prehodom

Tg0 je temperatura steklastega prehoda nezreagiranih komponent.

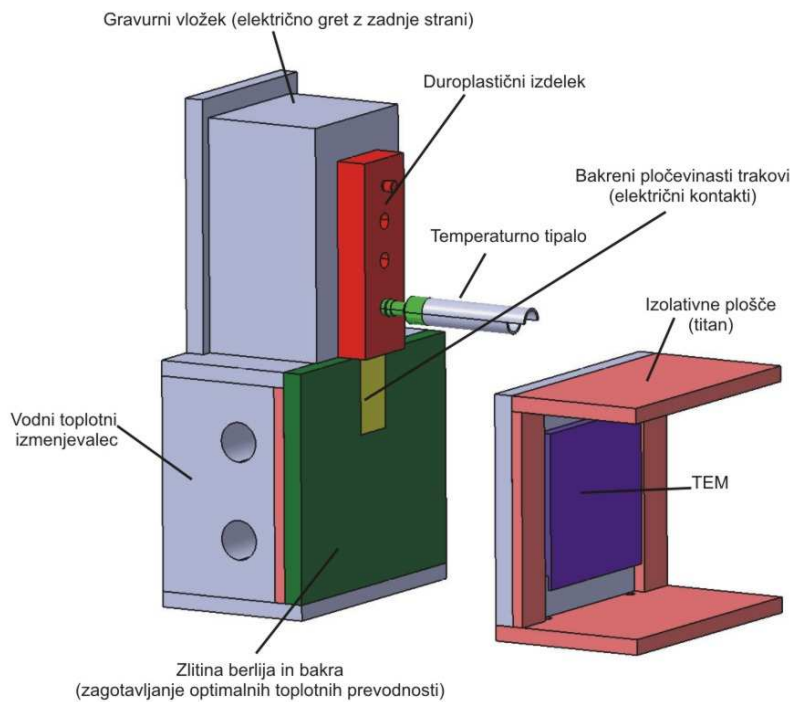
5.5.2 Razvoj orodja

Za testiranje tehnologije smo izbrali problematiko zabrizgavanja električnih kontaktov. Gre za pločevinaste in naknadno nikljane predpripravljene trakove, ki se jih vstavlja v orodja in obbrizguje z duroplastom. Na ta način nosilni material deluje kot nosilec kontaktov in kot električni izolator. Osnovni problem je v tolerančnem polju vhodnega materiala, tj. debelini pločevinastih trakov. Ožje kot je tolerančno polje vhodnega materiala, višje je njegova cena. Glede na nihanje debeline kontaktov (red nekaj mikrometrov do 10 μm) že slednje povzročata prelihanje duroplasta ob spoju kontakt-duroplast, ki ga je potrebno ročno odstranjevati, kar predstavlja veliko cenovno obremenitev. Zaradi navedenega je bil namen zagotavljati tesnost spoja in onemogočiti prelihanje.

To je mogoče doseči na dva načina. Mehansko nastavljeni sistem bi vsakokratno nastavljal debelino reže in tako onemogočal prelihanje, pri čemer je poglavitni problem viskoznost duroplasta, ki omogoča prelihanje ob tako majhni reži, kot je 10 μm . Zaradi

tega je rešitev s premikajočimi se mehanskimi elementi otežena, saj potrebujejo vsaj zračnost reda velikosti 10 μm za svoje delovanje.

Predlagana rešitev je bila osnovana na toplotnih reoloških osnovah duroplastov, navedenih v poglavju 5.5.1. Princip temelji na t. i. TTT-faznih diagramih, ki pojasnujejo vpliv temperature na stopnjo zamrežitev in s tem onemogočajo lahko tečenje materiala. Naša teza je temeljila na lastnosti materiala, da ob nižji temperaturi dela orodja ob kontaktu (hlajenja vstavljenega kontakta) material še ne prične z zamreževanjem in se mu s tem rapidno še ne zmanjšata viskoznost ter možnost prelivanja majhnih rež. V času polnjenja orodne votline smo močno hladili orodni del, kjer je bil pozicioniran pločevinast bakreni trak. Ko je bila orodna votlina napolnjena in večinsko zamrežena (površina orodja se pri durplastih normalno greje na 160 $^{\circ}\text{C}$) in se preneha z dodatnim polnjenjem (naknadnim tlakom) orodne voltline, pa smo pričeli z gretjem pločevinastega traku in tako omogočili popolno zamrežitev materiala tudi ob traku.



Slika 48. CAD-detajli orodja in vgradnja TEM

Slika 48 prikazuje sestavo jedra razvitega testnega orodja. Sestava in koncept orodja sta bila osnovana na preteklih izkušnjah tako v smislu sestave kot uporabljenih materialov. TEM dovajajo/odvajajo toploto iz/na vodnih izmenjevalnikih na gravurne vložke, ki so izdelani iz zlitine berilija in bakra. Le-ti hladijo/grejejo bakreni trak in talino zavirajo/pospešujejo (sprememba viskoznosti in hitrosti tečenja). Na ta način se izvede kontrola nad prelitjem kontakta. Preostali gravurni vložek je električno temperiran (gret) zaradi ločitve grelnih tokokrogov. Toplotna izolacija med obema toplotnima sestavoma je izvedena z izolativnimi titanovimi ploščami.

Merilna oprema:

Stroj: Arburg 420, premer polža: 40 mm; maksimalna masa brizga: 200 g (PS)

Temperirna naprava: Single (do 150 °C)

Tehtnica: UWE HGS-3000; natančnost: 0,1 g

Material: CY 4200 black

DC napajalni vir: PCE A6KW 40-150, do 40 V in 150 A

Temperatura okolice: 24 °C

Temperaturna sonda: TESTO 830-T2; eksterna dotikalna termočlenska sonda

Masa brizga: 16 g

5.5.3 Potek in rezultati testov

V orodju smo imeli dva električna grelna kroga. Oba bakrena vložka sta bila dodatno hlajena z vodo, kar je povzročalo problem pri gretju orodja (procesne napake na stroju zaradi nezmožnosti dosega želene temperature). To je povzročilo omejenost z vodnim hlajenjem oziroma s celotno zmožnostjo delovanja TEM zaradi nepopolnega delovanja toplotnega izmenjevalca. Razlog leži v dobri, vendar še zmeraj ne dovoljšnji toplotni izolaciji.

Začetne nastavitve brizganja so bile sledeče: temperatura bakrenega vložka se giblje od 100 do 105 °C, temperatura vode od 80 do 100 °C, br izgalni tlak 800 barov, naknadni brizgalni tlak 200 barov, čas naknadnega tlaka traja 6 s. Z vsakim naslednjim testom smo dvigovali brizgalne tlake in brizgalni volumen ter želeli najti optimalne zadovoljive parametre, pri katerih nam ne prelijejo stika.

Pri najvišjih nastavitvah brizgalnega tlaka 1200 barov in naknadnega tlaka 900 barov, čas naknadnega tlaka smo podaljšali s 6 na 20 s, smo dobili minimalno prelit kontakt. Maso je zaradi velikih tlakov prelilo v kavitetnem vložku.

Pri izvajanju testov smo naleteli na nezmožnost ponovljivosti zaradi ročnega vstavljanja kontaktov; ta čas se del mase zamreži že v pripravnem delu-polžu.

Predvsem zaradi nezmožnosti zagotavljanja ponovljivosti med testom nismo mogli tabelarično segmentirati rezultatov. Raztros vhodnih podatkov kot kompleksnost opisnih izhodnih parametrov nista omogočala grafičnega prikaza rezultatov. Opisni rezultati pa so navedeni v Prilogi 5.

5.5.4 Razprava

Iz napisanega v poglavju 5.5.1 je razvidno, da je proces solidifikacije oziroma zamreževanja (pri duroplastih govorimo o zamreževanju in ne strjevanju) veliko kompleksnejši kot pri termoplastih. Prav tako lahko trdimo, da ima temperatura veliko večji vpliv na proces zamreževanja in s tem povezane procese (skrčki, spremembe viskoznosti in prelitja, termične deformacije – zvitja) ipd.

V sodelovanju z največjim slovenskim predelovalcem duroplastičnih materialov Kolektor Sikomom, d. o. o., smo poskušali implementirati predstavljeno tehnologijo v industrijsko okolje duroplastov.

Osnovna problematika predelave duroplastov je v potrebnem dovodu toplote talini v orodju. Glede na že večkrat omenjeno omejitev kapacitete prečrpane toplote je to poglavitna pomanjkljivost tehnologije. Sicer se s toplotnimi izolacijami da zmanjšati nepotrebne toplotne vztrajnosti, vendar ostajajo določene omejitve.

V našem primeru smo poskušali preprečevati prelitje vstavljenega kovinskega kontakta v orodno votlino, ki ga oblije duroplastični material. To smo izvedli preko ohlajanja kontaktne pločevine v času zapolnjevanja votline (talini se je v stiku s podhlajenim kovinskim delom povečala viskoznost in ni prelila tehnološke zračnosti med kovinskim kontaktom in orodjem), takoj po zapolnitvi votline pa smo izvajali pospešeno gretje, da bi dokončno zamrežili material. Trdimo lahko, da smo uspeli dokazati želeni fizikalni princip.

Proces brizganja duroplastov ni konstanten kot brizganje termoplastov. Največkrat je spremenljivka v procesu material, za katerega se nikoli ne ve, v kolikšni meri je proces zamreževanja že stekel (proces se prične že ob proizvodnem procesu materiala in poteka vseskozi do predelave; višja temperatura le močno pospeši ta proces). Poleg materiala pa poglavitno spremenljivko v naših testih predstavlja nekonstanten časovni cikel (ročno vlaganje kovinskih kontaktov, čiščenje orodne površine ipd.) in nezadostna moč električnih grelcev, prisotnih v gravurah, ki so skrbeli za dokončno zamreženje materiala. Za potrebe dokazljivih in ponovljivih rezultatov je potrebno opraviti navedene popravke orodja:

- na izmenljiva bakrena vložka se mora vstaviti temperaturni senzor za spremljanje temperature v vložku, kjer imamo vgrajen TEM,
- površina bakrenih vložkov, kamor nalega kontakt, se bo dodatno polirala (da preprečimo lepljenje mase na baker, ko prelije kontakt) ter
- močnejši gibki grelec na izmetalni strani.

6 Analiza z metodo končnih elementov (MKE)

Moderen razvoj orodij za brizganje plastike je sestavljen iz več faz. Ena izmed njih je tudi konstrukcija in optimizacija temperirnega sistema. Ta operacija se izvaja v okviru namenskih programskih paketov za preračun s končnimi elementi – v nadaljevanju MKE (npr. Moldflow, Moldex, CADMOLD ... [13]), ki uspešno predvidijo zmogljivosti temperirnega sistema in njihov vpliv na mehanske lastnosti plastičnih kosov. Z iteracijo optimizacije v okolju MKE se optimira delovni cikel in parametri brizganja s popolnim nadzorom nad kakovostjo in reologijo plastičnih izdelkov.

Reološki rezultati simulacij so navadno točni in zanesljivi v primerih natančnih popisov materialnih parametrov. Glede na visoko stopnjo prirejenosti tovrstnih paketov MKE je analiza tehnologij, ki so drugačne kakor obstoječi temperirni sistemi, zelo otežena. Zaradi navedenega se je za potrebe analiz predstavljene aplikacije uporabilo splošnejše pakete MKE.

6.1 Fizikalni model, analize MKE

Implementacija analiz MKE v razvoj predstavljene tehnologije se je izvedla zaradi izkušenj na področju [3] in možnosti testiranja različnih parametrov znotraj računalniškega okolja. Celoten realen prototip s slik 31 in 33 je bil preslikan v okolje MKE (slika 49), kjer se je izvršila termodinamična analiza posameznih sklopov prototipa in prestopnih pogojev med njimi. Glede na ozko prirejenost obstoječih paketov MKE in nezmožnost analiziranja različnih prestopnih pogojev med elementi prototipa in popisa TEM delujočega v režimu toplotne črpalke se je izbralo splošno fizikalno okolje MKE COMSOL Multiphysics [72]. Slednji omogoča hkratno analizo več fizikalnih veličin (toplotni tok, pretok fluidov, elektromagnetne veličine itd.). Termodinamični rezultati prenosa dejanskih lastnosti prototipa v okolje MKE so bili primerjani z dejanskimi rezultati prototipnih testov. S tem je bilo omogočeno optimiranje parametrov simuliranja TEM-elementa zaradi natančnega popisa celotnega sklopa in pridobitve zanesljivih rezultatov termodinamičnih analiz.

State-of-the-art numeričnih analiz termoelektričnega pojava

Osnovna delitev analiz numeričnih analiz temelji na nivoju obravnave, na mikro- in makroskopskem nivoju.

Pri mikroskopski obravnavi se poskuša opisati osnovne materiale in njihove termoelektrične lastnosti. Obravnavane študije [73-75] temeljijo na poglobljeni analizi vseh treh fizikalnih osnov termoelektričnega pojava (Seebeckovega, Joulovega in Thomsonovega) ter njihovega modeliranja zaradi vpogleda v medsebojno odvisnost pojavov. Študije se ukvarjajo s primerjavo posameznih termoelektričnih materialov ter njihovo uporabo v hladilnih sistemih za t. i. MEMS-strukture (mikroelektromehanski sistemi) [75] ali za vpeljavo obravnave Thomsonovega efekta na termoelektrični pojav [73, 74]. Študije vpliva Thomsonovega efekta se pojavljajo šele v zadnjih petih letih, prej (in tudi sedaj v večini primerov) se njegov vpliv ni posebej obravnaval v termoelektričnih analizah (efekt malenkostno niža zmogljivosti termoelektričnega modula, tj. vsoto vseh treh omenjenih pojavov).

Večina študij termoelektrične pojave obravnava celostno kot skupek vseh treh fizikalnih pojavov, ki predstavljajo termoelektrični fenomen. Tudi obravnavane makroskopske študije [14, 66, 76-85] imajo različne pristope. Večina navedenih študij je osnovana na termodinamičnih enačbah posameznih fizikalnih vplivov, ki prispevajo svoj delež v celotnih toplotnih pretokih tople ali hladne strani TEM. Čeprav se v tem opisu fenomena pojavljajo termodinamične relacije, se za opis relacij uporablja električna analogija. Uporabljeni so zakoni Ohmovega tokokroga z vsemi (prenesenimi) lastnostmi virov (toplotnih), upornosti (toplotnih) in toplotnih tokov. Ta koncept smo izbrali tudi sami.

Električna analogija opisa TEM

Osnovna predpostavka takšne obravnave je stacionarno stanje, za katerega smo prevzeli [57] relacije toplotnih tokov (toplotnih moči) za toplo in hladno stran TEM. Enačbe prav tako privzemajo popolno izolacijo med posameznimi TE-peletami in ignorirajo Thomsonov efekt.

Za toplotno moč na hladni strani TEM lahko zapišemo [57]:

$$Q_c = 2N \left[\alpha T_c - \frac{\rho I^2}{2G} - kG(T_h - T_c) \right] \quad (25)$$

Enačba (25) je identična enačbi (18).

Za toplo stran TEM velja,

$$Q_h = 2N \left[\alpha T_c + \frac{\rho I^2}{2G} - kG(T_h - T_c) \right] \quad (26)$$

Natančnejša razlaga posameznih parametrov je v Prilogi 1, opisi posameznih členov v enačbah (25) in (26) pa so razloženi v poglavju 4.

V enačbah (25) in (26) nastopajo trije termodinamični parametri, ki so odvisni od temperature. Potek odvisnosti navedenih parametrov od temperature je mogoče aproksimirati s polinomi, kot je predstavljeno v tabeli 4.

Tabela 4 – Koeficienti polinomov za aproksimacijo termodinamičnih koeficientov [57]

α Seebeckov koeficient (VK^{-1})	ρ Specifična električna upornost (Ωm)	k Toplotna prevodnost ($Wm^{-1}K^{-1}$)
$\alpha = (\alpha_0 + \alpha_1 T_m + \alpha_2 T_m^2) \times 10^{-9}$	$\rho = (\rho_0 + \rho_1 T_m + \rho_2 T_m^2) \times 10^{-9}$	$k = (k_0 + k_1 T_m + k_2 T_m^2) \times 10^{-4}$
$\alpha_0 = 22,224$	$\rho_0 = 5112$	$k_0 = 62,605$
$\alpha_1 = 930,6$	$\rho_1 = 163,4$	$k_1 = -277,7$
$\alpha_2 = -0,9905$	$\rho_2 = 0,6279$	$k_2 = 0,4131$

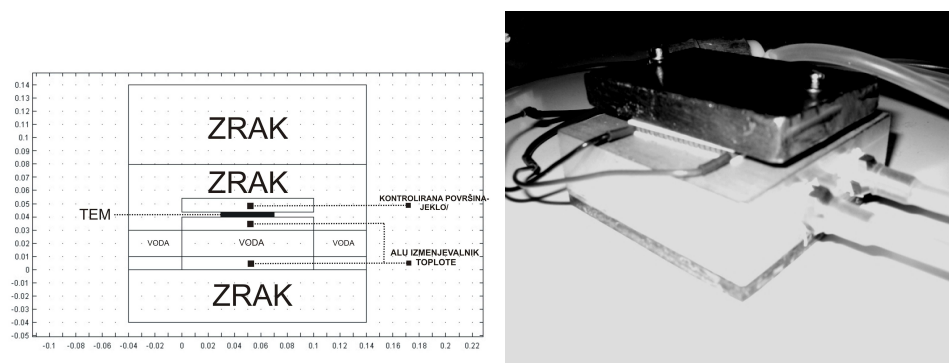
Tabela 4 navaja aproksimacijske polinome termodinamičnih koeficientov. V nadaljevanju smo upoštevali samo prva dva člena za vse tri navedene veličine; tretji člen namreč ne vpliva več pomembneje na potek.

T_m predstavlja srednjo vrednost temperature v posamezni peleti TE-elementa.

6.2 Opis simulacijskega modela

6.2.1 Geometrija

Zaradi vzporednega razvoja, numeričnih analiz in testov realnega prototipa smo za potrebe razvoja v numeričnem okolju izbrali geometrijo realnega prototipa. S tem je bilo omogočeno optimiranje parametrov simuliranja TEM-elementa za natančen popis celotnega sklopa in pridobitve preverljivih rezultatov termodinamičnih analiz.



Sliki 49. 2-dimenzionalni model preučevanega sklopa v okolju MKE (levo) in njegova realna upodobitev (desno)

Implementacija analiz MKE v razvoj predstavljene tehnologije se je izvedla zaradi izkušenj na področju [3] in možnosti nadzora različnih parametrov znotraj računalniškega okolja. Celoten realen prototip je bil preslikan v okolje MKE (slika 52), kjer se je izvršila termodinamična analiza posameznih sklopov prototipa in prestopnih pogojev med njimi. Glede na ozko prirejenost obstoječih paketov MKE in nezmožnost analiziranja različnih prestopnih pogojev med elementi prototipa in popisa TEM, delujočega v režimu toplotne črpalke, se je izbralo splošno fizikalno okolje MKE COMSOL Multiphysics [72]. Okolje omogoča sklopljeno analizo več fizikalnih veličin (toplotni tok, pretok fluidov, elektromagnetne veličine itd.). Celotno geometrijo opisujemo v 2D-okolju, saj zadostuje vpogledu v termodinamično dogajanje, za predstavljeno tehnologijo pa ne pomeni velikih poenostavitev ter hkrati močno poenostavi izračune.

6.2.2 Snovne lastnosti posameznega sklopa

Odločitev za makroskopsko [67] obravnavo problema temelji na zmožnosti prestavitve problema v električno okolje oziroma analoške obravnave problema. Problem obravnavamo v stacionarnem stanju. Vhodne spremenljivke v celoten sklop so električni tok modula (I) – predznak hkrati pomeni smer toka in s tem način dela (gretje/hlajenje).

Ostale termodinamične snovne lastnosti sklopa (osnovne lastnosti aluminija in vode) določimo v modelu na osnovi razpoložljivih podatkov izdelovalcev TEM.

Sklop smo obravnavali sklopljeno v okviru modela za obravnavo prehoda toplote (prevajanje in konvekcija) ter mehanike fluidov (upoštevanje nelaminarnega toka - enačbe Navier-Stokes).

Toplotne snovne lastnosti

V programskem okolju COMSOL preračunavamo temperaturno polje [72]:

$$\delta_{ts} \rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q, \quad (27)$$

kjer posamezni členi pomenijo:

δ_{ts} koeficient časovnega skaliranja,

ρ gostoto materiala,

c_p specifična toplota pri konstantnem tlaku,

k koeficient toplotne prevodnosti (tenzor) in

Q toplotni vir/ponor.

Enačba (27) se poenostavi za stacionarno stanje v smislu izničitve prvega člena. Če v enačbo (19) vnesemo še efekta konvekcije in sevanja enačba (27), preide v enačbo (28):

$$\delta_{is} \rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q + \underbrace{\frac{h_{trans}}{dA} (T_{ext} - T)}_a + \underbrace{\frac{C_{trans}}{dA} (T_{ambtrans}^4 - T^4)}_b, \quad (28)$$

kjer dodani parametri pomenijo:

h_{trans} konvekcijski koeficient,

T_{ext} zunanja temperatura zunanjega vira,

C_{trans} dodatno določljivi koeficient,

$T_{ambtrans}$ temperatura ambienta,

dA debelina elementov (2D) oziroma površino elementa (1D).

V enačbi (28) pri prehodu toplote zanemarjamo tretji (b) člen (sevanje); to lahko naredimo zaradi relativno nizke absolutne temperature ter prav tako majhnih temperaturnih razlik tako v TEM kot tudi preko celotnega sklopa.

Snovne lastnosti mehanike fluidov

Mehanika fluidov se ukvarja s študijo plinov in tekočin v gibanju ali mirovanju. Ob študiju toka tekočin privzemamo konstatno gostoto tekočine (nestisljive enačbe Navier-Stokes).

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot [\eta (\nabla u + \nabla u)^T] + \rho (u \cdot \nabla) u + \nabla p = F, \quad (29)$$

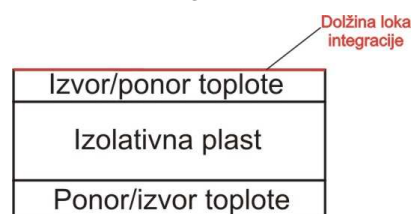
kjer posamezni členi v enačbi 29 predstavljajo:

η dinamično viskoznost (razmerje med strižnimi napetostmi in strižno hitrostjo), ρ gostoto, u matriko hitrosti, p tlak ter F matriko sil (npr. sila gravitacije).

Poglaviten razlog preračunavanja mehanike fluidov z enačbami (29) predstavlja turbulenten tok v toplotnem izmenjevalcu, ki pomembno vpliva na prehod toplote (poglavje 2).

Modeliranje TEM

Daleč najkompleksnejše se je izkazalo modeliranje TEM. Za stacionarno stanje smo povzeli priporočila [57] za predstavitev toplotnih tokov obeh strani TEM. S to predstavitvijo smo privzeli popolno toplotno izolativnost termoelektričnih pelet med seboj ter zanemarili celoten učinek Thomsonovega efekta na delovanje TEM.



Slika 50. Shema modela TEM

Na osnovi navedenih poenostavitvev smo realno debelino TEM razdelili na tri plasti, kjer skrajni plasti ponazarjata keramični substrat, vmese plasti pa toplotno izolativnost termoelektričnih pelet.

Upoštevanje termoelektričnih veličin smo izpeljali z enačbama (26) in (27) in podatkov iz tabele 4. Na ta način smo podali površinsko gostoto toplotnega toka obema krajnima površinama TEM (slika 50).

Za izračun stacionarnih stanj pa smo upoštevali spreminjanje delovanja TEM preko iterativnega izračunavanja končnih temperatur tople TEM in hladne strani. To se je izvedlo prek cikličnega izračunavanja, natančneje, integriranja gostote toplotnega toka (q) po zgornji površini (slika 50).

Celotni matematični model je bil osnovan na dvodimenzionalnem modelu, zato so vse matematične operacije minimizirane na dve koordinati. V primeru določanja spreminjanja temperature površine TEM je šlo za enodimenzijsko integriranje po loku.

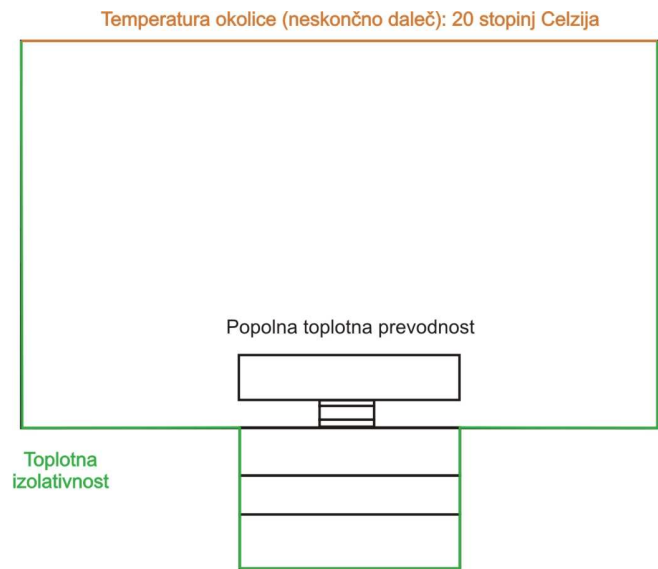
Toplotno prevodnost obeh krajnih površin smo določili preko že omenjenih vzporednih primerjav testov z realnim prototipom. Prav koeficienta toplotne prevodnosti obeh segmentov (določili smo ju enako) sta opravljala funkcijo natančne ponastavitve izračunanih podatkov z izmerjenimi (koeficient toplotne prevodnosti je 0,5).

Ostale snovne toplotne lastnosti posameznih segmentov smo določili preko znanih konstant.

Modeliranje vodnega toka v toplotnem izmenjevalniku smo izvedli preko enačb Navier-Stokes, ki omogočajo upoštevanje turbulentnosti toka, preko robnih pogojev pa smo določili lastnosti vodnega toka. Termodinamične lastnosti stika med tekočino in steno toplotnega izmenjevalca smo določili z robnimi pogoji.

6.2.3 Robni pogoji elementov sklopa

Temperaturni robni pogoji temeljijo na popolnem prevajanju med posameznimi segmenti sklopa in tako ne upoštevajo toplotnih upornosti spojev. Slednje kompenziramo s spreminjanjem toplotne prevodnosti TEM glede na meritve prototipa. Opazovano polje zunaj strukture sklopa smo postavili za več kot 15 velikostnih razredov od sklopa (slika 51 ni posnetek realnega stanja) – s tem smo zadostili pogojem temperature neskončne oddaljenosti (20 °C) ter simetričnost opazovanega problema z vertikalno izolativnostjo.



Slika 51. Predstavitev temperaturnih robnih pogojev

Slika 51 prikazuje robne pogoje vodnega izmenjevalnika, ki temeljijo na potrebnih temperaturnih pogojih. Celoten sestav smo navzven obravnavali kot izoliran sistem, medtem ko smo elemente med seboj obravnavali v idealnem toplotnem stiku.

Temperaturni robni pogoji:

Robne pogoje temperaturnega polja lahko opišemo z enačbo toplotnega toka [72]:

$$n(k\nabla T) = q_0 + h(T_{\text{inf}} - T) + \underbrace{c_{\text{const}}(T_{\text{amb}}^4 - T^4)}_a, \quad (30)$$

kjer posamezni členi pomenijo:

$n(k\nabla T) = 0$ predstavlja idealno toplotno izolacijo

$T = T_0$ predstavlja definirano konstatno temperaturo

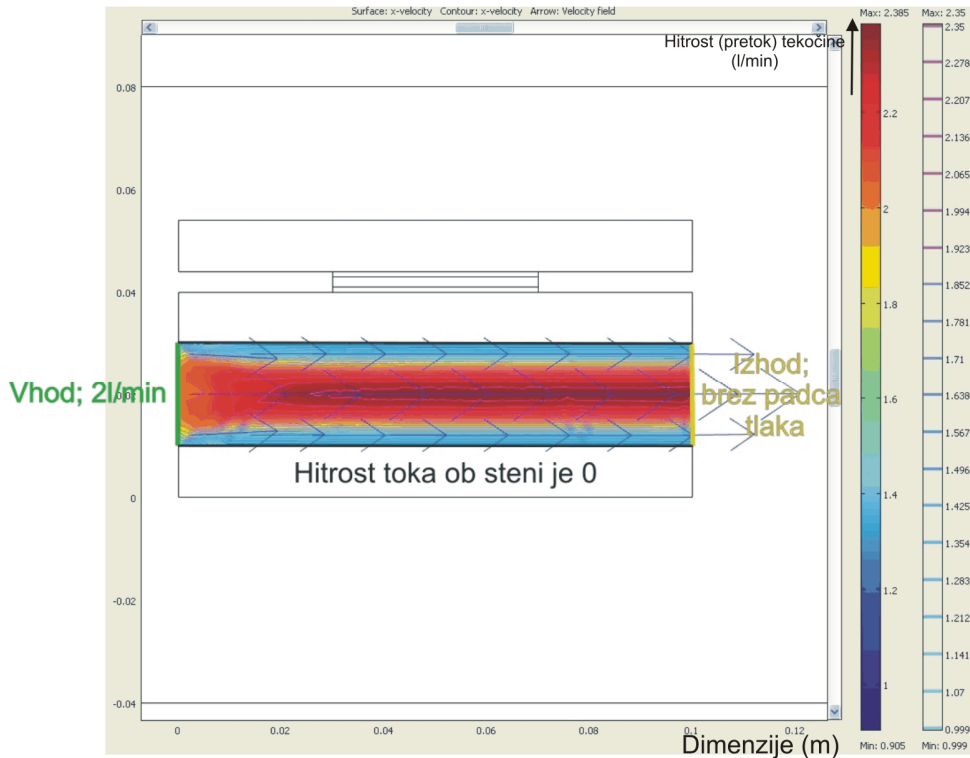
$h(T_{\text{inf}} - T)$ predstavlja člen konvekcije z zunanjimi elementi: h predstavlja koeficient konvekcije, T_{inf} pa konstatno temperaturo okolice.

Tretji člen v enačbi (30a) predstavlja prispevek sevanja, ki ga v našem primeru ne upoštevamo.

Robni pogoji mehanike fluidov

Posamezni parametri v enačbi (30) predpisujejo tudi robne pogoje za mehaniko fluida, in sicer predstavljajo:

$u = 0$ mirovanje toka ob steni, $u = u_0$ robni pogoj vstopa tekočine v vodni izmenjevalec ter $p = 0$ izhodni robni pogoj tekočine (ta pogoj je smiselno uporabiti le pri Reynoldsovih številih $\gg 1$).



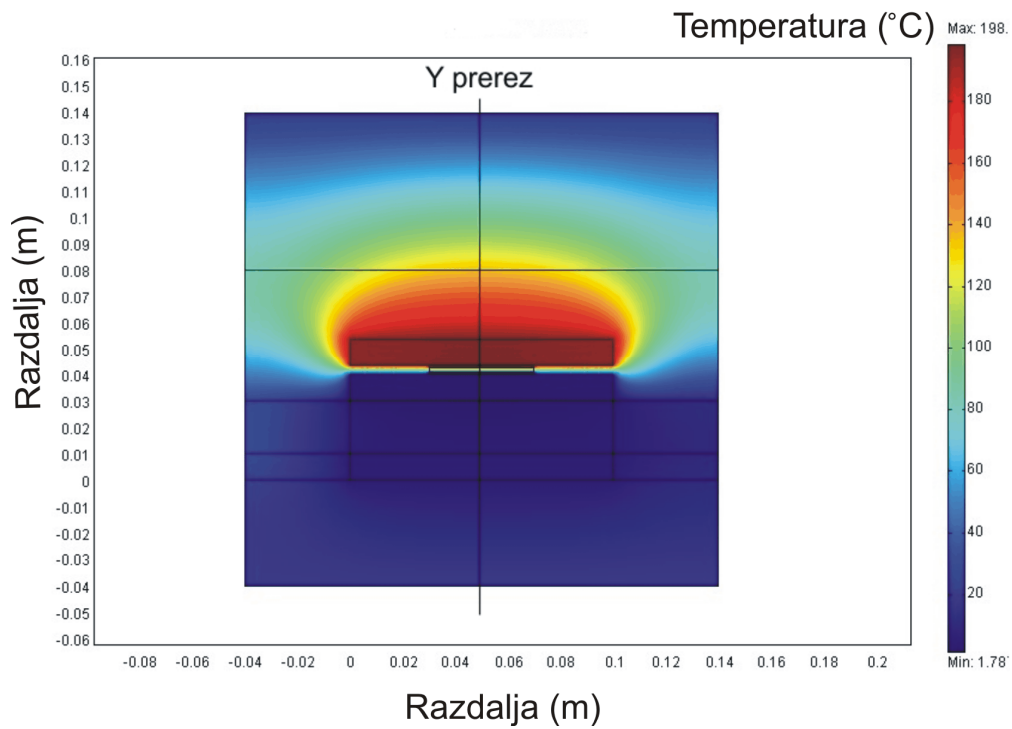
Slika 52. Predstavitev robnih pogojev (tekočine)

Slika 52 prikazuje robne pogoje vodnega izmenjevalnika, ki temeljijo na potrebnih pogojih vodnega toka. Za vhodno linijo smo predpisali vhodno hitrost (enako, kot smo jo dovajali realnemu prototipu). Tlačni padec vodnega toka zaradi upora sten smo zanemarili zaradi minimalne dolžine in predvsem zaradi velikega razmerja med presekom in dolžino toka. Prav tako smo privzeli dejstvo, da vodni tok popolnoma miruje ob stiku s stenami vodnega izmenjevalnika.

6.2.4 Rezultati

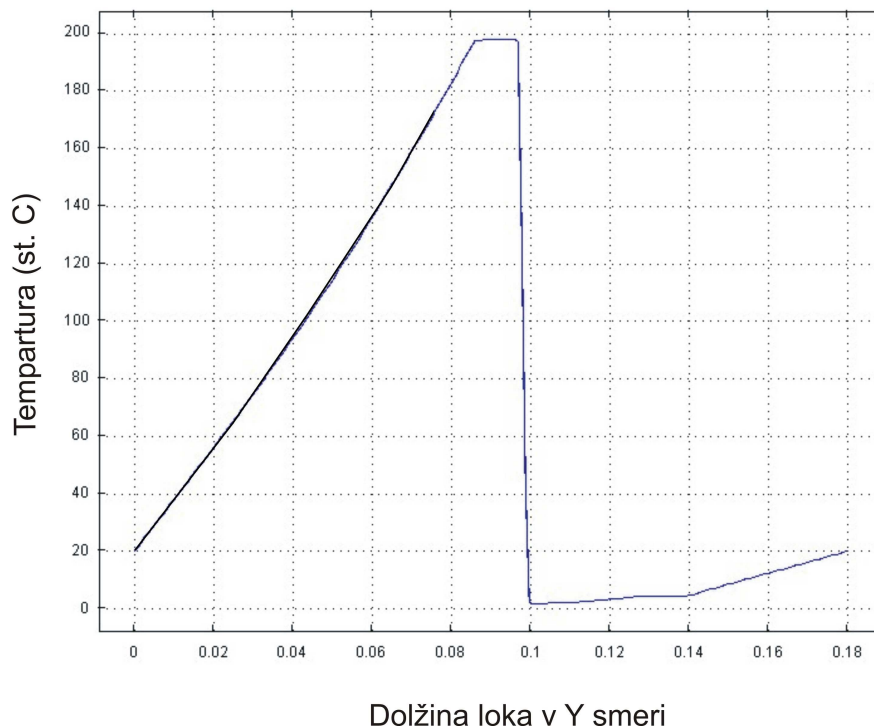
Stacionarni rezultati

Večina simulacij MKE je bila opravljena v stacionarnem stanju. Meritve smo opravljali po končanih prehodnih pojavih in vzpostavitvi novega, stacionarnega stanja. Osnova teh simulacij so bile meritve, opravljene na prototipnih orodjih, opisane v poglavju 5.1. Na podlagi rezultatov meritev iz realnega okolja so bili optimirani numerični modeli, in sicer koeficienti toplotne prevodnosti TEM.



Slika 53. Temperaturna porazdelitev optimiranega modela MKE po končanem prehodnem pojavu

Prav tako je bilo potrebno korigirati toplotne upornosti (koeficiente) prehodov med posameznimi elementi sklopa. Z iterativnim korigiranjem posameznih spremenljivk smo uspeli numerične rezultate približati rezultatom meritve realnega prototipa.



Slika 54. Potek temperature po ordinatnem prerezu (prerez viden na sliki 53)

Sliki 53 in 54 prikazujeta rezultate istega testa – stacionarno stanje sklopa v režimu gretja. Napajanje TEM je postavljeno enako kot v realnem primeru, napajalni impulz oblike enotine stopnice, električni tok konstantne velikosti 6 A. Slika 54 potrjuje izmerjene temperaturne razlike na realnem prototipu, prikazane na slikah 24 in 25.

6.2.5 Razprava

Primarni namen vzporednega dela v numeričnih programskih paketih je poglobljeno razumevanje posameznih toplotnih tokov v celotnem sklopu, sekundarni namen pa je povezan s testiranjem sklopa, materialov in različnih spojev znotraj simulacijskega okolja. Končna, še nerealizirana ideja, pa je v sklopljeni povezavi ali integraciji modela TEM in obstoječih paketov za simuliranje procesa brizganja plastike [13].

Pri našem delu smo uporabili rezultate prototipnih testiranj kot referenco. Termoelektrični modul smo opisali na osnovi podatkov proizvajalcev in na način, kot nam ga je dopuščal simulacijski paket.

Trenutna razvojna stopnja nam omogoča simulacijo obnašanja toplotnih tokov znotraj delovnega cikla. To pomeni, da v omenjenih namenskih programskih paketih vzpostavimo geometrijsko stanje orodja, vanj vgradimo TEM in ga opišemo s

preskušeni metodami. Nato lahko simuliramo dosegljive temperaturne nivoje znotraj delovnega cikla z upoštevanjem termodinamičnih veličin taline. Na ta način lahko znotraj simulacijskega okolja preskusimo različne geometrije in materiale (predvsem različne konfiguracije izolacije) in dosegljive temperaturne nivoje.

Trenutna razvojna stopnja nam ne omogoča povratne informacije vpliva spremenljivk temperaturnih režimov na reološke lastnosti taline in kasneje lastnosti plastičnega kosa (skrčki, deformacije, linije spoja, mehanske lastnosti ipd.). Glede na dejstvo, da namenski simulacijski paketi za brizganje plastike [13] trenutno še ne omogočajo sklapljanja z zunanjimi orodji, ki bi generirala potek temperature preko delovnega cikla, poskušamo proizvajalcem teh paketov pojasniti pomembnost in nujnost razvoja takšne funkcionalnosti. Opisani RTR-postopki in s tem povezana spremenljiva temperatura orodne površine namreč niso dosegljivi samo s pomočjo TEM. Navedene tehnologije naglo prodirajo iz raziskovalnih laboratorijev v industrijsko prakso – najprej na področjih mikrobrizganja.

7 Električna nadzorna enota

V sklopu raziskovalnega dela sta bili razviti dve prototipni elektronski vezji, ki sta izvajali naloge generiranja enosmernih napajalnih signalov. Obe napravi sta dovedeno moč omejevali s pulzno – širinsko modulacijo (v nadaljevanju PWM). Moč (izhodni tok) je bila sicer nastavljiva ter temperatura v zaprti regulacijski zanki, vendar aplikacija ni omogočala nastavitve časovnih temperaturnih profilov.

Zaradi tega smo funkcionalnost izvedli z razvojem nove naprave, ki bi omogočala našeto. Jedro krmilne elektronike smo prevzeli od že obstoječe temperaturne regulacijske naprave, na novo pa smo izvedli programski del, ki nadzoruje regulacijsko zanko. Obstoječi PID-sistem smo zamenjali s FUZZY-tipom regulacije ter izdelali novo močnostno elektroniko, ki temelji na zmožnosti reverziranja električnega toka skozi breme (H-most).

7.1 Celoten sklop

Aplikacija celotnega krmilno-izvajalnega dela je sestavljena iz TEM-modulov, ki predstavljajo jedro aplikacije, okoli katerega je zgrajen krmilno-merilni del.

Krmilni del sestoji iz procesnega računalnika z uporabniškim vmesnikom in močnostnega dela. Merilni del sestavlja temperaturni senzor, za primerno energijsko podporo skrbi napajalni modul.

Procesni računalnik je sestavljen iz mikroprocesorja in periferne opreme (digitalnih vhodov, digitalnih izhodov, analognih vhodov, LCD-zaslona in folijske tipkovnice). Digitalni izhodi so uporabljeni za krmiljenje močnostnega H-mosta, na katerega je priklopljen TEM-modul. Nekaj digitalnih izhodov in vhodov je uporabljenih za sinhronizacijo s strojem za izdelavo plastike. Operater ima s pomočjo tipkovnice in LCD-zaslona možnost nastavljanja temperaturnih časovnih profilov. Opisani sklop prikazuje slika 55.

H-most predstavlja povezavo med procesnim računalnikom in TEM-modulom. Ukazi procesnega računalnika se izražajo kot v pozitivni (gretje) ali negativni (hlajenje) tok preko TEM-modula. Izdelan je iz diskretnih FET-tranzistorjev z ustreznimi predojačevalniki.

Temperaturni senzor je priklopljen na analogni vhod procesnega računalnika in predstavlja povratno zanko v procesu gretja ali hlajenja.

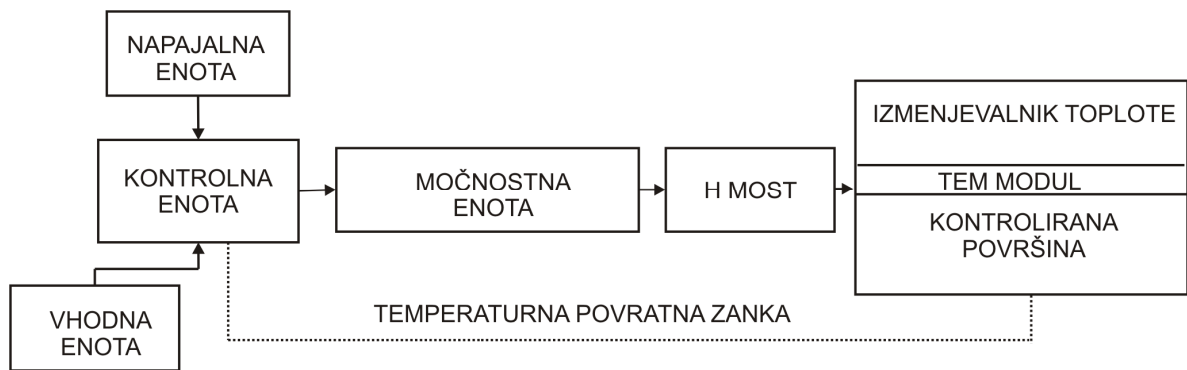
Napajalni modul je namenjen dobavi ustrezne električne moči (enosmerne napetosti in toka z ustrezno valovitostjo [69]) za TEM-modul.

Vsi omenjeni elementi tvorijo zaključeno regulacijsko zanko, preko katere poskuša elektronska enota slediti zelenim temperaturno časovnim profilom.

Opisan sistem je zmožen delovanja v režimu hlajenja ali gretja, kar omogoča popoln nadzor temperature v orodju preko celotnega delovnega cikla. Poleg tega omogoča

sledenje različnim temperaturno časovnim profilom tako za zagonske kot zaključne režime delovanja.

Aplikacija je s to lastnostjo uporabna na vseh procesno-proizvodnih področjih z zahtevami po natančnem temperaturnem časovnem nadzoru.



Slika 55. Blokovna shema sistema za temperiranje površin v okviru 0,1 K

Za zagotavljanje želenih temperaturnih razmer in profilov je bila razvita kontrolna enota, ki nadzira in izvršuje potrebne ukaze.

Kontrolna enota pridobiva vhodne podatke preko treh vhodov, ki so opremljeni s 16-bitnimi AD-pretvorniki in so zmožni zaznavanja PT-senzorjev ter J- in K-termočlenskih sond. Realizirana je tudi funkcija programskega kalibriranja temperaturnih sond na osnovi določitev dveh znanih točk ($y = k * x + n$).

7.2 Regulacija z logiko Fuzzy

Osnovni koncept omenjene regulacije temelji na treh blokih, in sicer FUZZYFIKACIJA vhodnih spremenljivk (postopek mehčanja), postopek INFERENCE (proces odločanja) in DEFUZZYFIKACIJA zgrajenih FUZZY-množic; izhod slednje enote je hkrati vhod izvršilnim enotam (PWM-stopnji).



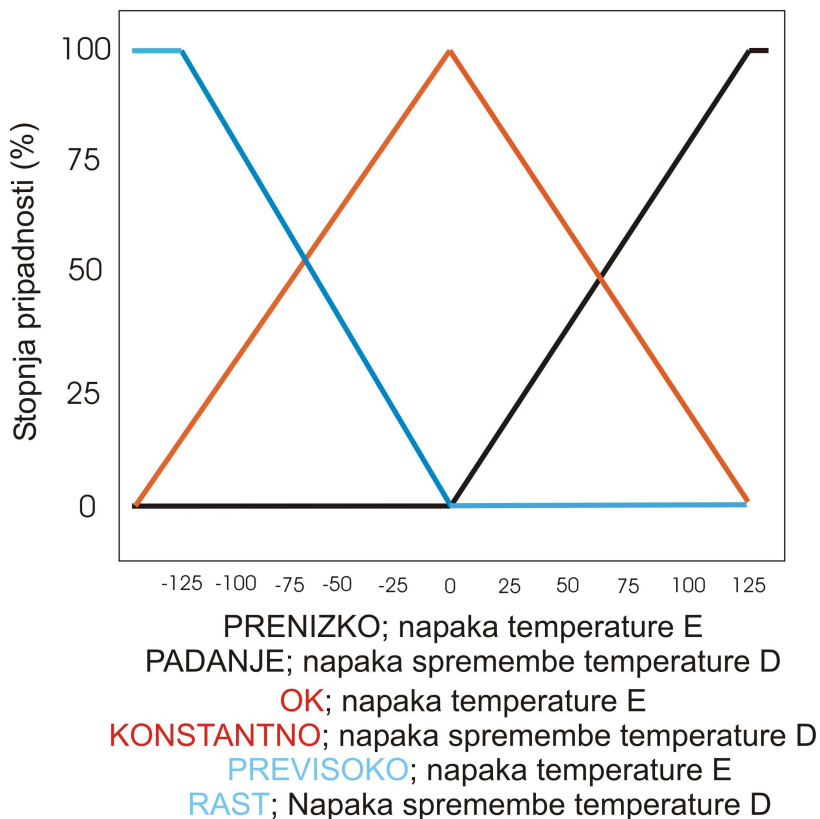
Slika 56. Programski blokovni diagram FUZZY-regulatorja

7.2.1 Fuzzyfikacija (mehčanje)

Osnovni koncept vsebuje set predeterminiranih vprašanj – lingvističnih spremenljivk. Navodila za nadzor nad procesom temeljijo na IF-THEN-pravilih, ki morajo izhajati iz procesa. Na tej lingvistični osnovi je zelo enostavno opisati sistem in ga tudi nadzorovati. Število takšnih pravil, ki opisujejo stanja sistema v klasičnih sistemih, je teoretično neomejeno. Z vpeljavo FUZZY-množic kot lingvističnih spremenljivk, se pojavi stanje, ko lahko z eno spremenljivko popišemo več odzivov na vходу.

Kontrolni sistem uporablja dve vhodni spremenljivki, in sicer napako temperature (E) in zadnjo spremembo temperature ter pripadajoče tri lingvistične spremenljivke. Za opis napake temperature so spremenljivke: prenizko, OK, previsoko, medtem ko so za spremembo temperature spremenljivke: padanje, konstantna in rast.

Slika 57 prikazuje stopnjo pripadnosti za pripadajoče spremenljivke. Stopnja pripadnosti determinira stopnjo pomembnosti vsake spremenljivke. Ta stopnja se preračunava vsak regulacijski cikel posebej. Med preračunom stopnje pripadnosti se te vrednosti normalizirajo v rangu od 0 do 100 % zaradi popisa vrednosti z 8-bitno resolucijo (-128 ... 127).



Slika 57. Prikaz napake temperature E in napake spremembe temperature D

7.2.2 Inferenčna matrika (proces odločanja)

Vsa mogoča stanja za tri izhodna stanja so predvidena na spodnji tabeli – inferenčna tabela, ki povzema vsa možna stanja, kot bi proces prevzel človeški operator. FUZZY-stanja povečaj, OK in znižaj so obravnavana podobno kot v Veitchevem diagramu z razliko, da so logični operatorji IN in ALI zamenjani z maksimalnimi in minimalnimi operatorji.

Tabela 5 – Inferenčna matrika

D\E	PRENIZKO	OK	PREVISOKO
PADANJE	povečaj	povečaj	enako
KONSTANTNO	povečaj	enako	zmanjšaj
RAST	enako	zmanjšaj	zmanjšaj

7.2.3 Defuzifikacija (ostrenje)

Metode defuzifikacije temeljijo na iskanju kompromisa med vsemi FUZZY-stanji in generiranja čimbolj točne izhodne vrednosti. Najbolj tipična metoda je metoda centra maksimuma (COM - centre of maximum). Preko slednje metode lingvistične spremenljivke pridobijo nove fiksne vrednosti. Posamezne vrednosti, utežne s stopnjo pripadnosti, se seštevajo. Končna vrednost je tako srednja vrednost vsot utežnih vrednosti.

Druga pogosta metoda je metoda težišča (COG – centre of gravity), ki se za kompleksne sisteme izkaže za boljšo predvsem v hitrosti.

V predstavljenem primeru smo preskusili obe metodi, izbrali smo metodo centra maksimuma, ki je popolnoma zadostovala regulacijskim potrebam sistema.

7.3 Aktuacijska enota

Posebna pozornost je bila posvečena tudi izdelavi sklopa za PWM-regulacijo. Kontrolna enota modulira PWM-signal z nosilno frekvenco 100 Hz in 10-bitnim časovnikom. Signal nadzira delovanje N-kanalnih tranzistorjev v H-mostu, v katerega je vpet TEM. Na tak način zmanjšamo preklopne izgube na tranzistorjih.

Osnovni razlog za izbor FUZZY-regulatorja v primerjavi s klasičnimi PID-regulatorji je bila preprostost izvedbe, predvsem pa uporabnost algoritma na širokem naboru v končnih okoljih – bremena. V našem primeru aplikacije je nabor bremen zelo različen, še bolj pa variirajo pogoji za delovanje, zato bi bila vpeljava klasičnih regulatorjev s pomočjo samonastavitvenih (autotuning) algoritmov problematična.

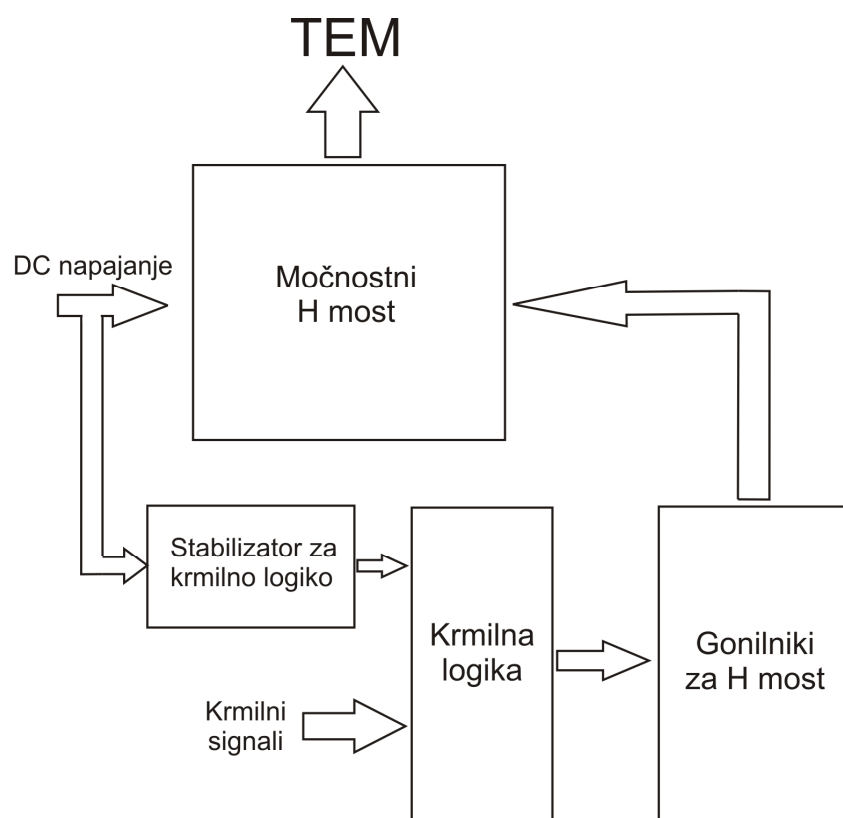
Poleg tega je potrebno poudariti, da popoln izkoristek TEM dosežemo, če napajalni signal ne vsebuje več kot 10 % izmenične komponente, zato je bil apliciran tudi izhodni LC-filter.

Testiranje v industrijskem okolju je pokazalo, da lahko preidejo termoelektrični moduli v t. i. temperaturno nasičenje. Največkrat se to zgodi zaradi nezmožnosti odvajanja/sprejemanja toplote na strani toplotnega izmenjevalnika, lahko pa je tudi posledica nepredvidenih toplotnih mostov. Zaradi tega so bila na strani toplotnega izmenjevalnika dodana temperaturna tipala, ki zagotavljajo maksimalno temperaturno spremembo na obeh straneh TEM 70 K. Če je ta vrednost presežena, nastopi omejitev električne moči TEM.



Sliki 58. Krmilnik v delovnem okolju: na levi sliki je prikazana procesna enota, na desni pa celoten testni sistem, opisan v poglavju 5.1

Predstavljena aplikacija je bila raziskana in preizkušena na dveh nivojih, in sicer v okolju MKE ter v realnem prototipnem okolju. Obe okolji služita za medsebojno kontrolo rezultatov in boljše razumevanje problematike termodinamike.



Slika 59. Blokovna shema močnostne elektronike

Shema, predstavljena na sliki 59, predstavlja blokovno povezavo posameznih komponent, ki sestavljajo močnostni modul. Napajanje poteka preko enosmerne napetosti (od 12 do 20 V) z manj kot 10 % valovitosti izmenične komponente. Napajanje je dovedeno v močnostni H-most, ki ga sestavljajo štiri transistorji MOSFET (IRFZ44N). Napajanje za krmilno elektroniko je dodatno stabilizirano s stabilizacijskim vezjem L7812. Krmilno logiko predstavljajo NOR-vrata (HCF4001), ki preprečujejo hkratni vklop enakih vej H-mosta in s tem kratek stik v H-mostu. Gonilniki za H-most so realizirani z dvema integriranimi vezjema (eno vezje za dva močnostna transistorja) IR2110.

7.4 Razprava

Kljub dejstvu, da je bilo na začetku celotnega razvoja aplikacije na trgu že mogoče kupiti namenske krmilniške enote, smo se odločili za lasten razvoj potrebnih manjkajočih enot. Odločitev je temeljila na nezmožnosti cikličnega obratovanja obstoječih krmilnikov, nezmožnosti obratovanja po predpisanih časovnih temperaturnih profilih. Naveden vzrok je dopolnjevala tudi želja po celovitejšem spoznavanju problematike napajanja TEM.

Osnovna zahteva TEM temelji na obliki enosmernega napajalnega toka s čim manjšo vrednostjo valovitosti. Izmenična komponenta naj bi močno krnila toplotne zmogljivosti TEM, česar nismo preskusili v praksi, vendar smo verjeli priporočilom ob dimenzioniranju izhodnih LC-filtrov.

Za strojno osnovo smo privzeli že obstoječ in v Sloveniji proizvajan mikrokrmilniški modul s potrebno strojno opremo. Prav tako smo privzeli osnovni programski okvir, v katerega smo vkomponirali lastne želje. Poglavitna izmed slednjih je regulacijska zanka. FUZZY-tip regulacije smo izbrali zaradi najlažje optimizacije regulacijskih parametrov oziroma samooptimizacijske zmožnosti. To dejstvo je pretehtalo ob primerjavi s klasičnim PID-tipom zaradi lažje industrializacije. Vsako breme, v našem primeru orodja, ima svoje termodinamične lastnosti, tako snovne kot geometrijske, ki pomembno vplivajo na delovanje regulacije.

Razvit je bil tudi močnostni aktuacijski del, ki skrbi za dobavo električne energije do TEM (slika 59). Gre za klasični H-most. Močnostni del tako skrbi za generiranje enosmernega električnega toka do 100 A pri napetosti do 20 V.

Rezultati delovanja celotnega sklopa so zadovoljivi in so upravičili razvoj. Enota ima poleg predstavljenih funkcionalnosti zmožnosti priključitve temperaturnih senzorjev drugačnega tipa, hkrati ima že razvite zmožnosti zunanje komunikacije z modulom.

8 Zaključki

Obširne raziskave state-of-the-art so pokazale neobstojanje podobnih raziskovalnih projektov na področju predelave polimerov – brizganju plastike, vsekakor v svetovni literaturi tako obsežne in predvsem tako industrijsko orientirane ni bilo mogoče najti.

Analize stanja v raziskovalnem in industrijskem okolju smo izvedli zaradi pregleda podobne zaščite intelektualne lastnine. Tovrsten pregled je opravila tudi tuja institucija in nam potrdila primat in evropski patent za vnos predstavljene tehnologije v uporabi brizganja termoplastov, duroplastov in elastomerov.

Raziskovalni projekt je v času trajanja poskušal slediti predvsem rdeči niti, ki smo si jo zastavili ob začetku raziskav, to je implikaciji predstavljene temperirne tehnologije v industrijsko prakso brizganja polimerov. Kasneje smo ta osnovni cilj razširili s cilji, zapisanimi v temi doktorske naloge. Vse zastavljene cilje, tako osnovnega kot razširjene v temi doktorske naloge, smo izpolnili.

Močno poudarjeno industrijsko delo, podkrepjeno z realnimi testiranjem, vzdrži kot resna primerjalna študija na rezultatih, iz katerih lahko izvlečemo zaključke, lahko pa služijo kot realni temelji za nadaljnje delo.

Zaključimo lahko, da je tehnologija najprimernejša v aplikacijah brizganja termoplastov, in sicer v mini-/mikroaplikacijah ali kot lokalne rešitve temperaturnih razmer v večjih orodjih. Tehnologija ni primerna kot samostojen vir manipulacije toplote v večjih orodjih zaradi premajnih zmogljivosti TEM.

Glede na dejstvo, da namenski simulacijski paketi za brizganje plastike [13] trenutno še ne omogočajo sklapljanja z zunanjimi orodji, ki bi generirala potek temperature preko delovnega cikla, poskušamo proizvajalcem teh paketov pojasniti pomembnost in nujnost razvoja takšne funkcionalnosti. Opisani RTR-postopki in s tem povezana spremenljiva temperatura orodne površine namreč niso dosegljivi samo s pomočjo TEM. Še več, omenjene tehnologije naglo prodirajo iz raziskovalnih laboratorijev v industrijsko prakso – najprej na področjih mikrobrizganja.

Podrobnejši opis rezultatov doktorske naloge je razdeljen na posamezna poglavja:

1. Prototipno okolje: v prototipnem okolju (poglavje 5.1) smo preskusili temperaturne omejitve, dosegljive temperature in dinamiko njihovega spreminjanja. Osnovne ugotovitve testov so pokazale pogojno verodostojnost termodinamičnih podatkov, podanih s strani proizvajalcev. Pogojnost temelji predvsem na zagotavljanju optimalnih delovnih razmer, kar se je kasneje v industrijskem okolju izkazalo za zelo problematično. Problematiko predstavljajo predvsem toplotna nasičenja TEM in toplotna nehomogenost spojev. Testi so potrdili dejstvo, da je za industrijske namene temperirani del nesmotrno hladiti za več kot 10 K pod temperaturo toplotnega izmenjevalca. Gretje kontroliranega dela pa je smotno tudi za več kot 70 K nad temperaturo toplotnega izmenjevalca. Smotrnost industrijske rabe poimenujemo zadovoljiv termodinamični odziv (do 50 K dosegljive temperaturne razlike v navadnem času proizvodnega cikla – 20 s) ob neizpostavitvi električnim in toplotnim preobremenitvam TEM. Razlaga tega pojava pa leži v fizikalni popolni nereverzibilnosti procesa, ki ga zmanjšujeta Thomsonov in Joulov efekt.

2. Orodje za merjenje skrčkov: serija empiričnih testov, opisanih v poglavju 5.2, je pokazala nepričakovano anomalijo. Rezultat toplotnih raztezkov celotnega oziroma posameznih delov orodja so neenakomerne toplotne lastnosti spojev TEM obeh polovic

orodja. Zaradi različnih temperatur so tudi absolutni temperaturni raztezki posameznih delov različni. Ob velikih raztezkih se pritisk na TEM spreminja (dimenzije TEM se s temperaturami ne spremenijo; gre namreč za keramični hibrid). Različno tesen spoj pa pomeni tudi različne toplotne lastnosti spoja in s tem celotnega sklopa. Navadno je problematična vzpostavitev mikrorož, ki enormno povečajo toplotno upornost, to se dogaja na strani toplotnega izmenjevalca, kar privede do nezmožnosti odvoda/dovoda toplote. Razlaga teh dejstev je v močno različnih koeficientih toplotne prevodnosti za različne materiale. Reže (zrak) imajo koeficient 0,026 W/mK, silikonska mast 0,87 W/mK, tipično jeklo, ki se uporablja v orodjih, 30 W/mK, ter toplotno izboljšani materiali (zlitine berilija in bakra) do 250 W/mK [3, 69].

Osnovni namen navedenih testov je bil prenos testiranj v industrijsko okolje, in sicer v orodja za brizganje plastike, in prepoznavanje s tem povezane problematike.

Pri tem raziskovalnem projektu smo prav tako preskušali mehanske omejitve, torej minimalne debeline orodnih vložkov (debeline jekla med orodno površino in TEM), ki še uspešno prenašajo tlačne obremenitve taline v orodni votlini, zato smo izdelali nekaj orodnih vložkov z različnimi debelinami sten in preskusili njihovo obnašanje pod obremenitvijo. Ob uporabi najoptimalnejših dimenzij TEM (dolžine 40 mm in širine 40 mm) je potrebna debelina orodnega vložka vsaj 8 mm. Ob večji debelini zmanjšujemo toplotno vztrajnost in s tem zmanjšujemo odzivnost sistema, manjše debeline pa ne prenašajo tlakov taline nad 1000 barov.

Opisani projekt je služil tudi kot poligon za testiranje elektronske nadzorne enote. Preskusili smo različna tipa regulacije PID in FUZZY. Čeprav večjih razlik med rezultati že optimiranih parametrov regulacijske zanke ni bilo opaziti, smo se odločili za FUZZY zaradi lažje in hitrejše optimizacije. Ta prednost pa bo odločilna ob industrializaciji projekta in dejstvu, da bodo termodinamične lastnosti orodij, v katere se bo vgrajevala predstavljena aplikacija, vsakič drugačne in nepoznane. Ob tem dejstvu je optimiranje regulacijskih parametrov enostavnejše pri FUZZY-regulaciji.

3. Primerjalni testi mehanskih in estetskih lastnosti: testni plastični kos, opisan v poglavju 5.3, je s svojo obliko (dolžino) predstavljal zelo primeren poligon za izvedbo opisanih testov. Izmerjeni rezultati so potrdili našo predstavo o korigiranju termičnega zvijanja. Teste smo opravili le na omenjenem materialu (PS) predvsem zaradi zahtevane visoke transparentnosti.

Navedene ugotovitve so potrdile vse hipoteze doktorske naloge, navedene v ciljnih raziskave (poglavje 1.1). Po zagotovitvi optimalnih, popolnoma ponovljivih pogojev predelave in nastavitvi vseh tehnoloških parametrov procesa z namenom doseganja kakovosti plastičnega kosa, smo vzporedno testiranje razdelili na tri segmente.

Prvi niz testov: ob konstantni temperaturi ogrođja in klasično temperirane gravure smo temperaturo s temperirano gravuro TEM povišali na 85 °C, nato smo jo stopenjsko nižali in opazovali nastajanje linij spoja, merili smo tudi dolžino. Rezultati so pričakovani. Najpomembnejša prednost tehnologije s TEM je v predgrevanju orodne površine samo v času zapolnitve votline, nakar s spremembo smeri črpanja toplote odvečno toploto kar najhitreje odvedemo v okolico preko vodnega izmenjevalnika.

V drugem nizu meritev smo temperaturo orodne površine spreminjali tako na brizgalni kot tudi na izmetalni strani orodja in preko celotne površine (šest termoelektričnih modulov na vsaki strani). V drugem setu pa smo enako idejo spremljanja linij spoja izvedli samo lokalno. Tako smo aktivirali samo module, nameščene na problematičnih mestih in tako dokazali pomembno možno funkcionalnost.

Tretji niz testov pa je obsegal kontrolo in nadzor nad termičnim zvijanjem plastičnega kosa. V poglavju 3.1 so opisani razlogi za zvijanje plastičnih kosov, ki večinoma ležijo v časovno neenakomernem ohlajanju. Ker prinaša ohlajanje tudi skrčke, se plastični kosi krivijo v smeri toplejše stene kosa (stene, ki dalj časa ostaja toplejša kot druga stran). Ker je v industrijski praksi nemogoče točno določiti velikost zvijanja, predlagamo uporabo predstavljene tehnologije za naknadno odpravo napak zaradi zvijanja s korekcijo temperatur.

4. Mikroaplikacija: aplikacija temperiranja v orodjih za brizganje mikroplastičnih izdelkov (poglavje 5.4) se je izkazala kot najobetavnejše področje vnosa predstavljene tehnologije.

V seriji testov smo poskušali dokazati prednosti tehnologije, zapisane v ciljnih naloge. V nasprotju z dokazano uporabnostjo predstavljene tehnologije v večjih orodjih za brizganje plastike, le v smislu lokalne odprave napak pri brizganju zaradi neprimerne temperature, pa smo v primeru aplikacije mikroorodja poskušali dokazati zmožnost popolnega nadzora temperature z uporabo TEM.

Prav pričakovane tlačne razlike taline v orodju so nam pokazale smiselnost uporabe predstavljene tehnologije pri problematičnih izdelkih, kjer je problematika zapolnjevanja zaradi prevelikih padcev tlaka po poti tečenja taline izrazitejša. Gre za majhne (mikro)izdelke oziroma izrazite tankostenske izdelke, kjer razmerje višine plastičnega kosa proti dolžini kosa ne presega faktorja 2 - [50].

Rezultati opazovanja detajla A so bili prav tako pričakovani. Ob lokalnem zmanjšanju debeline spoja (z 1 mm debeline preko celotne površine na 0,5 mm na omenjenem detajlu) je prihajalo do nezapolnitve (pri temperaturi orodja 30 °C), slabega mehanskega spoja in vidnih linij spoja (pri temperaturah orodja od 50 do 70 °C), do nevidnih linij spoja in popolnih mehanskih lastnosti spoja pri temperaturah orodja nad 100 °C.

Poglavitni dejavnik dosegljive temperaturne dinamike je v moči TEM ter toplotni vztrajnosti bremena – orodnega vložka. Glede na omejenost moči TEM smo veliko pozornosti posvetili optimiranju (zmanjševanju) toplotne kapacitete bremena. Predvsem material gravurnega vložka (zlitina berilija in bakra) ter nosilna kompozitna struktura z izrazito toplotno izolativnostjo (slika 38) pripomoreta k doseženi temperaturni dinamiki. V celotnem izdelovalnem ciklu 20 s se izmenjata cikel gretja, ki traja 10 s, in cikel hlajenja, ki traja 10 s. V času gretja lahko dosežemo približno 60 °C nadtemperature nad osnovno temperaturo ogrođja (vodnega izmenjevalca). Omejitev višje nadtemperature je reducirana z zmožnostjo hlajenja (poglavje 5.1).

S predstavljeno hibridno aplikacijo in zmožnostjo generiranja temperaturnih časovnih profilov preko izdelovalnega cikla smo dokazali izrazite izboljšave v dosegljivi kakovosti plastičnih kosov (zmanjšanje tlakov, izboljšanje estetskih in mehanskih lastnosti plastičnih izdelkov). Z aplikacijo mikrobrizganja smo dokazali padec maksimalnih tlakov taline v orodni votlini za najmanj 25 % s predgrevanjem temperature površine s 30 na 110 °C v času brizga.

5. Tehnologija brizganja duroplastov: iz napisanega v poglavju 5.5 je razvidno, da je proces solidifikacije oziroma zamreževanja (pri duroplastih govorimo o zamreževanju in ne strjevanju) veliko kompleksnejši kot pri termoplastih. Prav tako lahko trdimo, da ima temperatura veliko večji vpliv na proces zamreževanja in s tem povezane procese (skrčki, spremembe viskoznosti in s tem povezana prelitja, termične deformacije - zvitja) ipd.

V našem primeru smo poskušali preprečevati prelitje vstavljenega kovinskega kontakta v orodno votlino, ki ga oblije duroplastični material. To smo izvedli preko ohlajanja kontaktne pločevine v času zapolnjevanja votline (talini se je v stiku s podhlajenim kovinskim delom povečala viskoznost in ni prelila tehnološke zračnosti med kovinskim kontaktom in orodjem), takoj po zapolnitvi votline pa smo izvajali pospešeno gretje, da se material dokončno zamreži. Trdim, da smo želen fizikalni princip uspeli dokazati.

Že proces brizganja duroplastov ni tako konstanten kot brizganje termoplastov. Največkrat je spremenljivka v procesu material, za katerega se nikoli ne ve, v kolikšni meri je proces zamreženja že stekel (proces se prične že ob proizvodnem procesu materiala in poteka vseskozi do predelave; višja temperatura le močno pospeši ta proces). Poleg materiala pa poglavitno spremenljivko v naših testih predstavlja nekonstanten časovni cikel (ročno vlaganje kovinskih kontaktov, čiščenje orodne površine ipd.) in nezadostna moč električnih grelcev, prisotnih v gravurah, ki so skrbeli za dokončno zamreženje materiala.

6. Numerične simulacije: primarni namen vzporednega dela v numeričnih programskih paketih je poglobljeno razumevanje posameznih toplotnih tokov v celotnem sklopu, sekundarni namen pa je povezan s testiranjem sklopa, materialov in različnih spojev znotraj simulacijskega okolja. Končna, še nerealizirana ideja pa je v sklopljeni povezavi ali integraciji modela TEM in obstoječih paketov za simuliranje procesa brizganja plastike [13].

Trenutna razvojna stopnja nam omogoča simulacijo obnašanja toplotnih tokov znotraj delovnega cikla, kar pomeni, da v omenjenih namenskih programskih paketih vzpostavimo geometrijsko stanje orodja, vanj vgradimo TEM in ga opišemo s preskušeni metodami. Nato lahko simuliramo dosegljive temperaturne nivoje znotraj delovnega cikla z upoštevanjem termodinamičnih veličin taline. Na ta način lahko znotraj simulacijskega okolja preskusimo različne geometrije in materiale (predvsem različne konfiguracije izolacije) in dosegljive temperaturne nivoje.

Večletno vzorno raziskovalno sodelovanje z največjim svetovnim proizvajalcem programske opreme za simulacije brizganja plastike Moldflow [3] je botrovalo dokončnemu razvoju funkcije generiranja spremenljive temperature orodja. Ta omogoča ob vnosu temperaturnih profilov vpogled v reološko dogajanje, ki jih povzročijo takšna temperaturna gibanja.

7. Razvoj krmilja TEM: kljub dejstvu, da moduli za nadzor termoelektričnih sistemov že obstajajo na trgu, smo z raziskavami razvili potrebne manjkajoče elektronske sklope. Jedro sistema smo privzeli iz obstoječega mikrokrmilniškega sistema, kjer je bil prav tako že izveden osnovni okvir periferne opreme.

Poglavitna izmed izvedenih modifikacij je regulacijska zanka. FUZZY-tip regulacije smo izbrali zaradi najlažje optimizacije regulacijskih parametrov oziroma optimizacijskih zmožnosti. V industrijski praksi temperiranja orodij za brizganje plastike ima vsako orodje svoje termodinamične lastnosti, tako snovne kot geometrijske, ki pomembno vplivajo na delovanje regulacije. Na strani krmilnika so bili razviti tudi periferni moduli za priklop različnih temperaturnih tipal, na programski strani pa nastavljivost cikličnosti oziroma sledenje želenim časovnim temperaturnim profilom.

8.1 Izvirni prispevki znanosti

Izvirni prispevki znanosti v doktorski disertaciji »Razvoj tehnologije temperiranja s termoelektričnimi moduli in uporaba v predelavi polimerih materialov«:

- Primerjalna analiza delovanja predlagane tehnologije temperiranja s termoelektričnimi moduli v primerjavi z obstoječimi metodami temperiranja,
- Prenos tehnologije temperiranja s termoelektričnimi moduli v industrijsko prakso brizganja termoplastov in duroplastov z zahtevo po kompleksih temperaturnih pogojih.
- S hibridno aplikacijo in zmožnostjo generiranja temperaturno časovnih profilov prek izdelovalnega cikla so dokazane izrazite izboljšave tehnološkega procesa in v dosegljivi kvaliteti plastičnih kosov.
- Razvoj sklopljenega simulacijskega modela temperirnega sistema s termoelektričnimi moduli z upoštevanjem vseh treh členov generiranja termoelektričnega efekta.
- Izvedba in optimiranje regulacijskega algoritma za vzdrževanje zelenih temperaturno-časovnih profilov temperiranja s termoelektričnimi moduli.

9 Literatura

1. Čatić, I.: **Izmjena topline u kalupima za injekcijsko prešanje plastomera.** 1985.
2. Pardos, F.: **Engineering and Specialty Plastics in the World 2000-2010.** ANTEC 2002, *Proceedings of the 60st Annual Technical Conference & Exhibition, San Francisco, CA, May 5-9 2002.*
3. Unknown: **Moldflow tutorials.** 2009.
4. Catic, I., Rujnic-Sokele, M., Sercer, M.: **Influence of cavity materials on the cooling time of molding.** *Proceedings of 63rd Annual Technical Conference & Exhibition 2005*, **100802**:961-965.
5. Navodnik, J.: **Plastforma #5/2008.** 2008, **5**:2-3.
6. Navodnik, J., Klopčič, M.: **Plastik-orodjar.** 1995:574.
7. Čatić, I.: **Izmjena topline u kalupima za injelcijsko prešanje plastomera.** 1985.
8. Hernandez, J. M., Dubay, R., Pramujati, B.: **Cavity Temperature Control in Injection Molding Machine.** *Proceedings of 63rd Annual Technical Conference & Exhibition 2005*, **1195**:714-718.
9. Čatić, I., Johannaber, F.: **Injekcijsko prešanje polimera i ostalih materijala.** 2004.
10. Testori, R.: **Injection moulding process.** *Gradivo Assocomaplast 2008*, www.assocomaplast.org.
11. Hassan, H., Regnier, N., Lebot, C., Pujos, C., Defaye, G.: **Effect of cooling system on polymer temparture and solidification during molding.** *Applied Thermal Engineering 2008.*
12. Allan, P. S., McCalla, B. A., Mubarak, Y., Mulligan, D.: **An Evaluation of Heat Management in Injection Mould Tools.** ANTEC 2002, *Proceedings of the 60st Annual Technical Conference & Exhibition, San Francisco, CA, May 5-9 2002.*
13. Glojek, A.: **Moldflow simulaton projects.** 1996-2009.
14. Maruyama, S., Nino, E., Ruocco, G.: **Analysis of a thermoelectrical device for active heat transfer control.** *International Journal of Thermal Sciences 2001*, **40**:911-916.
15. Park, K., Kim, B., Yao, D.: **CAE Analysis of Rapid Thermal Response Molding Process for Thin Wall Parts.** ANTEC 2006, *Proceedings of the 64th Annual Technical Conference & Exhibition, Charlotte, NC, May 7---11, Society of Plastics Engineers 2006*, **3636**:1158-1162.
16. Shia-Chung, C., Hai-Mei, L., Chang-Yu, S., Zhi-Liang, J., Shun-Chih, H.: **3D simulation and verification for mold temperature control technologies.** ANTEC 2005-*Proceedings of the 63rd Annual Technical Conference & Exhibition, Boston, MA, May 1---5; Society of Plastics Engineers 2005*, **100728**:491-495.

17. Liu, W., Kimerling, T., Yao, D., Kim, B.: **Rapid Thermal Response (RTR) Hot Embossing of Micro-Structures.** *ANTEC 2006, Proceedings of the 64th Annual Technical Conference & Exhibition, Charlotte, NC, May 7---11, Society of Plastics Engineers 2004*, **178**:933-936.
18. Yao, D., Kim, B.: **Rapid Thermal Response Molding for Cycle Time Reduction.** *ANTEC 2003, Proceedings of the 61st Annual Technical Conference & Exhibition, Vol XLIX, Nashville, TN, May 4-8 2003*, **1120**:607-611.
19. Yao, D., Kim, B.: **Thin-Wall Injection Molding using Rapidly Heated Molds.** *ANTEC 2003, Proceedings of the 61st Annual Technical Conference & Exhibition, Vol XLIX, Nashville, TN, May 4-8 2003*, **960**:521-525.
20. Rao, N. S., Schumacher, G., Schott, N. R.: **A General Method of Designing Injection Molds by Straightforward Solution Procedures.** *ANTEC 2003, Proceedings of the 61st Annual Technical Conference & Exhibition, Vol XLIX, Nashville, TN, May 4-8 2003*, **820**:442-452.
21. Shoemaker, J., Hayden, K., Engelmann, P.: **Designing the Cooling System: What's the Relationship between Mold Material Selection, Water Line Spacing and Mold Surface Temperature Variation.** *ANTEC 2006, Proceedings of the 64th Annual Technical Conference & Exhibition, Charlotte, NC, May 7---11, Society of Plastics Engineers 2004*, **158**:823-827.
22. Chen, S.-C., Chau, S.-W., Lin, M.-C., Lin, Y.-W.: **Three-Dimensional Simulation of Transient Temperature Distribution for Lens Mold Embedded with Heaters.** *ANTEC 2006, Proceedings of the 64th Annual Technical Conference & Exhibition, Charlotte, NC, May 7---11, Society of Plastics Engineers 2004*, **120**:631-635.
23. Li, C. L.: **A feature-based approach to injection mould cooling system design.** *Computer-Aided Design 2001*, **33**:1073-1090.
24. Martinho, P. G., Neves, C. C., Brito, A. M.: **Effects of Design Solutions and Moulding Operating Conditions in Warpage.** *ANTEC 2003, Proceedings of the 61st Annual Technical Conference & Exhibition, Vol XLIX, Nashville, TN, May 4-8 2003*, **1380**:741-745.
25. Bozzeli, J.: **Use of Infrared Thermal Imaging to Study Mold & Part Cooling.** *ANTEC 2004, Proceedings of the 62nd Annual Technical Conference & Exhibition, Vol L Chicago, IL, May 16---20, Society of Plastics Engineers 2004*, **154**:803-806.
26. Angstadt, D. C., Gasparian, C. H., Coulter, J. P., Pearson, R. A.: **In-Situ Observation of Birefringence During Vibration-Assisted Injection Molding.** *ANTEC 2006, Proceedings of the 64th Annual Technical Conference & Exhibition, Charlotte, NC, May 7---11, Society of Plastics Engineers 2004*, **150**:783-787.
27. Steil, F. G.: **New Concepts in Mold Conformal Cooling Design.** *Proceedings of 63rd Annual Technical Conference & Exhibition 2005*, **100629**:916-920.
28. Chang, P.-C., Hwang, S.-J.: **Experimental Investigation of Infrared Rapid Surface Heating for Injection Molding.** *ANTEC 2006, Proceedings of the 64th*

- Annual Technical Conference & Exhibition, Charlotte, NC, May 7---11, Society of Plastics Engineers 2006, 3670:1285-1289.*
29. Byung-Ohk, R., Chang-Soo, K., Kevin, L., Myoung-Ho, K.: **Evaluation of Momentary-Mold-Surface-Heating (MmSH) Process.** *ANTEC 2005- Proceedings of the 63rd Annual Technical Conference & Exhibition, Boston, MA, May 1---5; Society of Plastics Engineers 2005, 1240:875-878.*
 30. Chen, S. C., Jong, W. R., Chang, Y. P.: **Variable Mold Temperature on tje Part Qualities of Injection Molded Parts.** *Proceedings of 63rd Annual Technical Conference & Exhibition 2005, 1032:588-592.*
 31. Schinkoethe, W., Walther, T.: **Kunststoffe Plast Europe.** 2000: 62-68.
 32. S. C. Chen, Chang, J. A., Jong, W. R., Chang, Y. P.: **Efficiencies of Various Mold Surface Temperature Controls and their Effects on the Qualities of Injection Molded Parts.** *ANTEC 2006, Proceedings of the 64th Annual Technical Conference & Exhibition, Charlotte, NC, May 7---11, Society of Plastics Engineers 2006, 3650:1280-1284.*
 33. Bendada, A., Erchiqui, F., Kipping, A.: **Understanding heat transfer mechanisms during the cooling phase of blow molding using infrared thermography.** *NDT & E International 2005, 38:433-441.*
 34. Callan, N., Kearns, M. P., Spencer, M. P., Crawford, R. J.: **Effects of Cooling Rate on the Mechanical Properties of Rotationally Moulded Polyethylene Parts.** *ANTEC 2002, Proceedings of the 60st Annual Technical Conference & Exhibition, San Francisco, CA, May 5-9 2002.*
 35. Kelly, A., Woodhead, M., Coates, P., Allan, P., Evans, R.: **Effects of Pulsed Tool Cooling on the Injection Moulding Process.** *ANTEC 2002, Proceedings of the 60st Annual Technical Conference & Exhibition, San Francisco, CA, May 5-9 2002.*
 36. McCalla, B. A., Allan, P. S., Hornsby, P. R.: **Evaluation of Pulsed Cooling in Injection Mould Tools.** *ANTEC 2006, Proceedings of the 64th Annual Technical Conference & Exhibition, Charlotte, NC, May 7---11, Society of Plastics Engineers 2004, 86:461-464.*
 37. Dickerson, C. M., Todd, W. G., Schwab, T. J., Wise, D. L.: **Optimize Injection Molding Cycles for HDPE by Considering the Effect of Cooling Times on Part Performance.** *ANTEC 2002, Proceedings of the 60st Annual Technical Conference & Exhibition, San Francisco, CA, May 5-9 2002.*
 38. Han, S.-Y., Kwag, J.-K., Kim, C.-J., Park, T.-W., Jeong, Y.-D.: **A new process of gas-assisted injection molding for faster cooling.** *Journal of Materials Processing Technology 2004, 155-156:1201-1206.*
 39. Li, C. G., Li, C. L.: **Plastic injection mould cooling system design by the configuration space method.** *Computer Aided Design 2008, 40:334-349.*
 40. Li, C. L., Li, C. G., Mok, A. C. K.: **Automatic layout design of plastic injection mould cooling system.** *Computer Aided Design 2005, 37:645-662.*

41. Qiao, H.: **A systematic computer-aided approach to cooling system optimal design in plastic injection moulding.** *International Journal of Mechanical Sciences* 2006, **48**:430-439.
42. Tang, S. H., Kong, Y. M., Sapuan, S. M., Samin, R., Sulaiman, S.: **Design and thermal analysis of plastic injection mould.** *Journal of Materials Processing Technology* 2006, **171**:259-267.
43. Masse, H., Arquis, E., Delaunay, D., Quilliet, S., Le Bot, P. H.: **Heat transfer with mechanically driven thermal contact resistance at the polymer-mold interface in injection molding of polymers.** *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2004, **47**:2015-2027.
44. Dimla, D. E., Camilotto, M., Miani, F.: **Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools.** *Journal of Material Processing Technology* 2005, **164-165**:1294-1300.
45. Jim, F.: In *ANTEC 1995, Proceedings*, vol. 41; 1995.
46. Yao, K., Kim, B.: *Polymer Engineering Science* 2002, **42**.
47. Jutter, G.: **Plastifiziereinheit fuer kleinste Schussgewichte.** *Kunststoffe* 2004, **1**:53-56.
48. Kelly, Coates, Evans, R.: **Effect of Cyclic Cooling on Power Consumption of the Injection Moulding Process.** *ANTEC 2006, Proceedings of the 64th Annual Technical Conference & Exhibition, Charlotte, NC, May 7---11, Society of Plastics Engineers* 2004, **87**:465-469.
49. Chang, J.-H., Yang, S.-Y.: **Development of Rapid Heating and Uniformly Pressing System for Micro Hot Embossing.** *ANTEC 2006, Proceedings of the 64th Annual Technical Conference & Exhibition, Charlotte, NC, May 7---11, Society of Plastics Engineers* 2004, **180**:942-945.
50. Chen, S. C., Peng, H. S., Chang, J. A., Jong, W. R.: **Rapid mold Surface Heating/Cooling Using Electromagnetic Induction Technology.** *ANTEC 2006, Proceedings of the 64th Annual Technical Conference & Exhibition, Charlotte, NC, May 7---11, Society of Plastics Engineers* 2004, **155**:807-811.
51. Chen, S. C., Chang, J. A., Jong, W. R., Chang, Y. P.: **Efficiencies of various mold surface temperature controls and their effect on the qualities in injection molded parts.** *ANTEC 2006, Proceedings of the 64th Annual Technical Conference & Exhibition, Charlotte, NC, May 7---11, Society of Plastics Engineers* 2006:1280-1284.
52. Chen, S. C., Li, H. M., Shen, C. Y., Jiang, Z. L., Huang, S. C.: **3D simulation and verification fro mold temperature control technologies.** *ANTEC 2005- Proceedings of the 63rd Annual Technical Conference & Exhibition, Boston, MA,* 2005:491-495.
53. Nolas, G. S., Sharp, J., Goldsmid, H. J.: **Thermoelectrics Basic Principles and New Materials Developments.** 2001.
54. Rowe, D. M.: **CRC Handbook of thermoelectrics.** 1995.

55. Goldsmid, H. J., Douglas, R. W.: **The use of semiconductors in thermoelectric refrigeration.** *Br Journal of Applied Physics* 1954:386-390.
56. Onsager, L.: **Reciprocal relations in irreversible processes.** *Physical Rev* 1961, **37**:405-426.
57. Callen, H. B.: **The application of Onsagers reciprocal relation to thermoelectric, thermomagnetic and galvanometric effects.** *Physics Rev* 1948, **15**:1349-1358.
58. De Groot, S. R., Mazur, P.: **Non-equilibrium Thermodynamics.** *North-Holland Pub Co, Amsterdam* 1962.
59. Tolman, R. C., Fine, P. C.: **On the irreversible production of entropy.** *Rev Mod Phys* 1948, **20**:51-77.
60. Hasse, R.: **Thermodynamics of Irreversible Processes.** *Dover Publications Inc, New York* 1990.
61. Yamanashi, M.: **A new approach to optimum design in thermoelectric cooling systems.** *J of Applied Physics* 1996, **80**:5494-5502.
62. Sungtaek, J. U., Ghoasl, U.: **Study of interface effects in thermoelectric micro-refrigerators.** *J of Applied Physics* 2000, **88**:4135-4139.
63. Astrain, D., Vian, J. G., Dominguez, M.: **Increase of COP in thermoelectric refrigeration by the optimization of heat dissipatipn.** *Applied Thermal Engineering* 2003, **23**:2183-2200.
64. Seifert, W., Ueltzen, M., Muller, E.: **One dimensional modeling of thermoelectric cooling.** *Phys Status Soldini* 2002, **194**:277-290.
65. Amon, S.: **Senzorji in aktuatorji.** *Študijsko gradivo* unknown.
66. Kelly, L.: **Thermoelectric handbook.**
67. Rath, M., Doering, J., Stark, W., Hindrichsen, G.: **Process monitoring of moulding compounds by ultrasonic measurements in compression mould.** *NDT&E international* 2000, **33**:123-130.
68. Neznan avtor: **Thermokinetics.** *Handouts of University of Auckland* 2003.
69. Neznan avtor: **Comsol Multyphysics tutorial.** 2008.
70. Huang, M.-J., Chou, P.-K., Lin, M.-C.: **Thermal and thermal stress analysis of a thin-film thermoelectric cooler under the influence of the Thomson effect.** *Sensors and actuators* 2006, **A 126**:122-128.
71. Huang, M.-J., Yen, R.-H., Wang, A.-B.: **The influence of the Thomson effect on the performance of a thermoelectric cooler.** *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2005, **48**:413-418.
72. Lee, K. H., Kim, O. J.: **Analysis on the cooling performance of the thermoelectric micro-cooler.** *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2007, **50**:1982-1992.

73. Bairi, A.: **Transient natural 2D convection in a cylindrical cavity with the upper face cooled by thermoelectric Peltier effect following an exponential law.** *Applied Thermal Engineering* 2003, **23**:431-447.
74. Chakraborty, A., Saha, B. B., Koyama, S., Ng, K. C.: **Thermodynamic modelling of a solid state thermoelectric cooling device: Temperature-entropy analysis.** *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2006, **49**:3547-3554.
75. Cosnier, M., Fraisse, G., Luo, L.: **An experimental and numerical study of a thermoelectrical air-cooling and air-heating system.** *International Journal of Refrigeration* 2008, **31**:1051-1062.
76. Gonzalez-Mendizabal, D., Bartot, P., Lopez de Ramos, A. L.: **A Thermal Conductivity Experimental Method Based on the Peltier Effect.** *International Journal of Thermophysics* 1998, **19**:1229-1236.
77. Guler, N. F., Ahiska, R.: **Design and testing of a microprocessor-controlled portable thermoelectric medical cooling kit.** *Applied Thermal Engineering* 2002, **22**:1271-1276.
78. Luo, J., Chen, L., Sun, F., Wu, C.: **Optimum allocation of heat transfer surface area for cooling load and COP optimization of a thermoelectric refrigerator.** *Energy conversion & management* 2003, **44**:3197-3206.
79. Maneewan, S., Khedari, J., Zeghmami, B., Hirunlabh, J., Eakburanawat, J.: **Investigation on generated power of thermoelectric roof solar collector.** *Renewable Energy* 2004, **29**:743-752.
80. Vian, J. G., Astrain, D., Dominguez, M.: **Numerical modelling and design of a thermoelectric dehumidifier.** *Applied Thermal Engineering* 2002, **22**:407-422.
81. Xuan, X. C.: **Investigation of thermal contact effect on thermoelectric coolers.** *Energy Conversion and Management* 2003, **44**:399-410.
82. Yu, J., Wang, B.: **Enhancing the maximum coefficient of performance of thermoelectric cooling modules using internally cascaded thermoelectric couples.** *International Journal of Refrigeration* 2008, **10**:1016.

Izjava

V skladu s Pravilnikom o doktorskih disertacijah Fakultete za elektrotehniko v Ljubljani izjavljam, da sem doktorsko disertacijo za naslovom RAZVOJ TEHNOLOGIJE TEMPERIRANJA S TERMoeLEKTRIČNIMI MODULI IN UPORABA V PREDELAVI POLIMERNIH MATERIALOV izdelal samostojno pod vodstvom mentorja prof. dr. Dejana Križaja in somentorja dr. Blaža Nardina. Izkazano pomoč ostalih sodelavcem sem navedel v zahvali.

Priloga 1

Oznaka	Razlaga	Enota
T_h	Temperatura vroče strani TEM	°K
T_c	Temperatura hladne strani TEM	°K
T_{sr}	Srednja vrednost temperature TEM $(T_h + T_c)/2$	°K
ΔT	Razlika temperatur $T_h - T_c$	°K
G	Površina TEM (dolžinska enota)	cm
N	Število termoelektričnih elementov	
I	El. Tok	A
COP	Koeficient učinka: $COP = \frac{Q_c}{I * U}$	
α	Seebeckov koeficient	$\frac{V}{^\circ K}$
φ	Specifična el. Upornost	Ωcm
κ	Toplotna prevodnost	$cm^\circ K$
Z	Učinek: $\frac{\alpha^2}{\varphi \kappa}$	$(^\circ K)^{-1}$

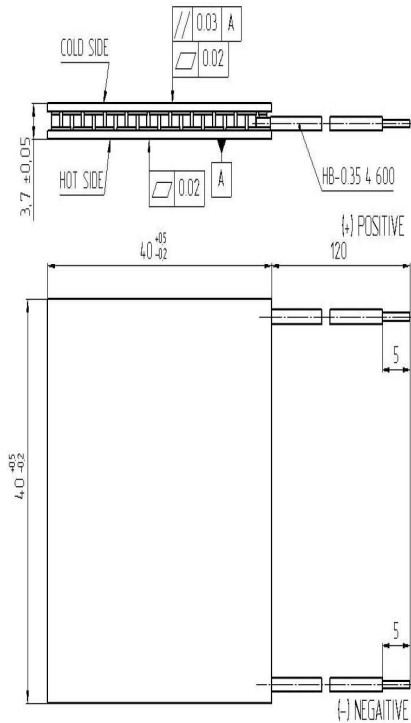
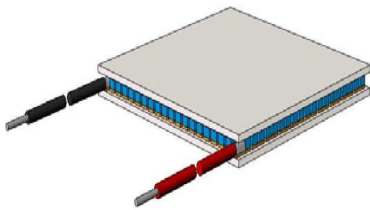
Tehnični parametri termoelektričnega modula Kryotherm Drift-1.2

<i>S</i>	Seebeckova napetost: $2\alpha N$	$\frac{V}{^{\circ}K}$
<i>R</i>	Električna upornost modula: $\frac{2\varphi N}{G}$	Ω
<i>K</i>	Toplotna prevodnost celotnega modula: $2\kappa NG$	$\frac{W}{^{\circ}K}$

Tehnični podatki TEM

Priloga 2

Priloga 3

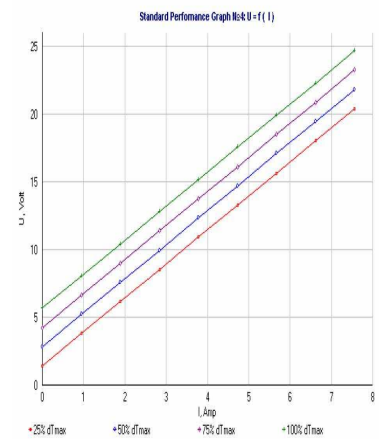
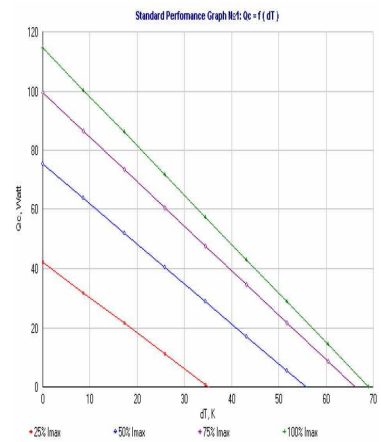


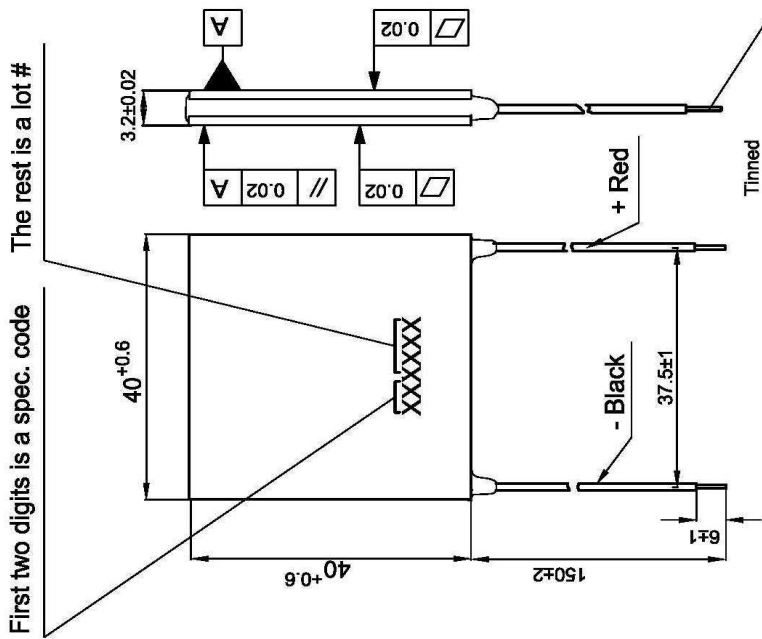
Thermoelectrical parameters	Unit	Value
I_{max}	Amps	7.6
U_{max}	Volts	24.6
ΔT_{max}	K	69
Q_{max}	Watts	115.0
R_{ac} (at 295 K)	Ohm	2.4
Tolerance	%	± 10

All parameters except R_{ac} are given at $T_h = 300$ K

Assembly parameters	Unit	Value
Wires	HB-0.35	4 600
Cross section	mm ²	035
Metallization		Not
Sealing		Not
Internal solder	°C	139
Brazing solder	°C	Not

Operational parameters	Unit	Value
Working temperature range	°C	-50 ÷ +80
Max. processing temperature	°C	130
ROHS compliance		YES





Technical Data	
V max	19.5 V
Q max	180 W
ΔT max	69°
I max	15.0 A
R	1.1 Ohm
Lead wires	20 AWG (0.5mm ²) Silicone insulation
Sealing	Silicone sealant
Solder	Lead Free
Ceramics	Al ₂ O ₃ , white 96%
Maximum processing temperature	170°C
Tolerances for thermal and electrical parameters ±10%	

Thermoelectric module

sctb NORD

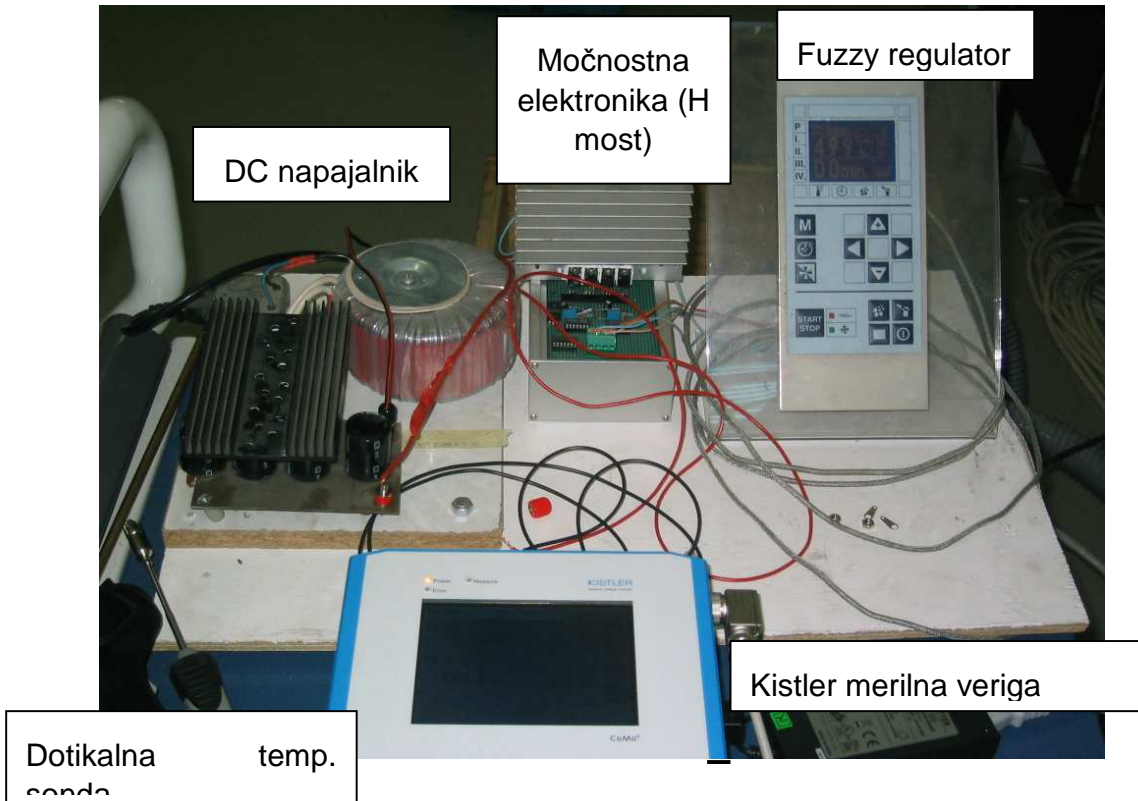
Drawing № ND 146.00.00 C-5

TMC-161-1.6-15.0 MMS

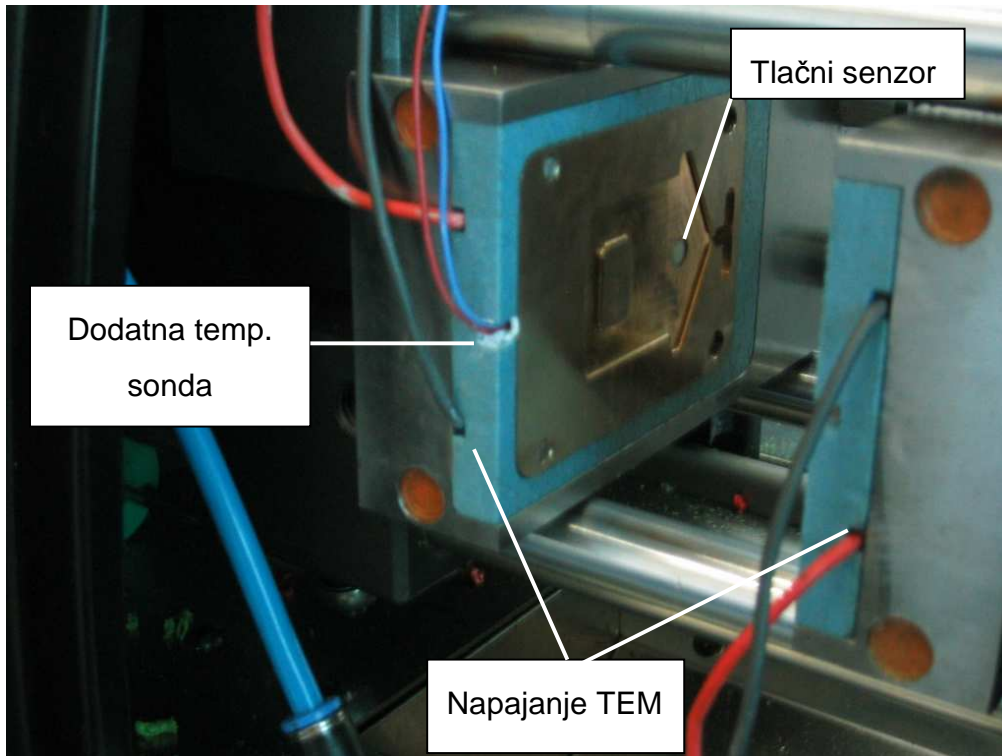
Certified ISO 9001:2000

Priloga 4

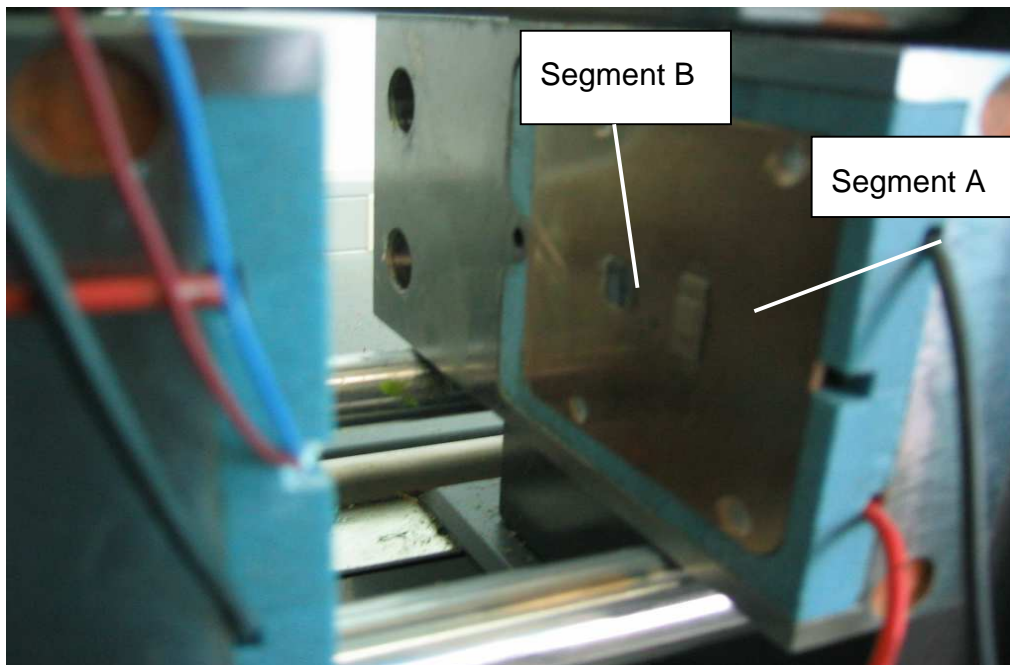
1.) Merilna oprema:



Slika 1; prikaz elektronskih komponent



Slika 2; izmetalna stran orodja

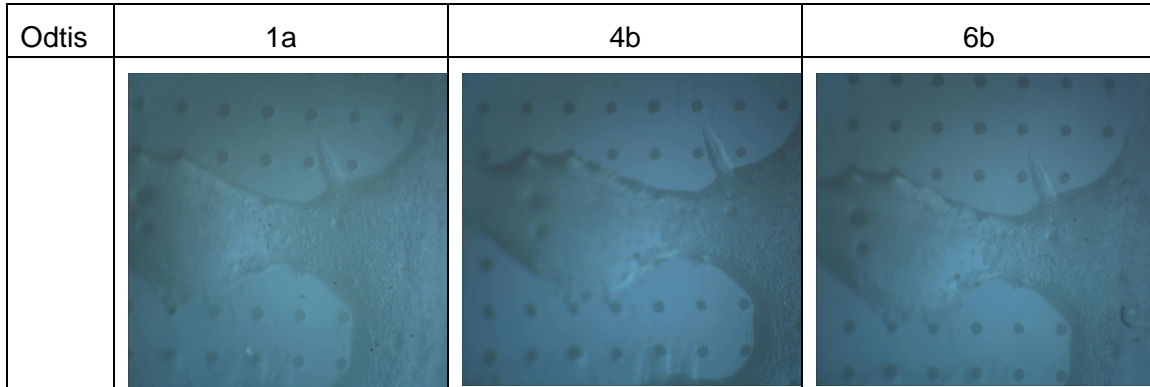


Slika 3; brizgalna stran orodja

2.) Merilni rezultati

a.) Kvaliteta odtisa glede na temperaturo orodja

Oznake vzorcev (temperature) povzete po Tabeli 6.



Slika 4; slike odtisov silicijeve matrike pri posameznih temperaturah orodja

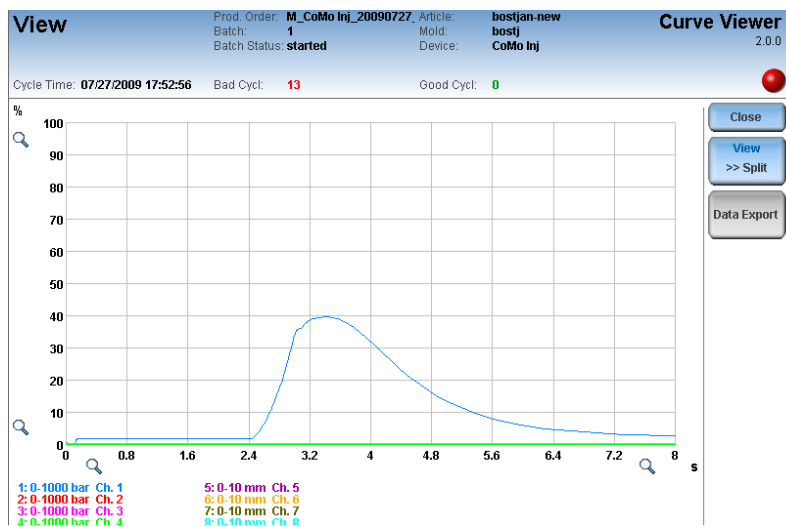
Z optičnimi pripomočki smo ocenjevali strukturiranost plastičnih odtisov. Glede na dejstvo, da primarnih piramid (piramidnih izpraznitev na plastičnih kosih) nismo mogli pregledati in izmeriti, smo za potrebe ocen izbrali polje preloma silicijevega substrata. Optične ocene so pokazale, da so temperaturi orodja 110 °C na plastičnih kosih vidne strukture reda velikosti 10 μm . Hkrati pa pri nižjih temperaturah (30 °C) teh struktura nismo zaznali oz so morala biti večja od 30 μm . Naj poudarimo, da je bil pri vseh vzorcih tlak v orodju enak 40 MPa.

b.) Dosegljiva temperaturna dinamika

Že v poglavju 5.4.3 so navedeno dosegljivi odkloni temperature, ki smo jih uspeli zagotoviti na testnem projektu. Možnosti izboljšave teh rezultatov ležijo v povečanju moči TEM ter izboljšavi toplotnih izgub v sistemu (boljša toplotna prevodnost gravurnega vložka, boljša toplotna izolativnost med gravurnim vložkom in ogrodjem orodja, optimalen toplotni izmenjevalec itd).

c.) Merjenje tlaka taline

Z opisanim sistemom tlačnega senzorja, ki deluje na piezo principu in pripadajočo opremo (ojačevalec naboja, mikrokrmilniški sistem za evaluacijo tlaka in možnost krmiljenja zunanjih enot) smo preko vseh testnih ciklov spremljali vrednosti in časovni potek tlaka v orodju. Na ta način smo dobili popoln vpogled v reološko sliko stanja v orodju.







Slika 5; direktni posnetek krivulje tlaka na merilni opremi

Predstavljena oprema pa ima možnost povezave z zunanji enotami, tudi osebnimi računalniki. To lastnost smo uporabili za prenos podatkov posameznih krivulj, ki smo jih lahko tako opisali, obdelali in ovrednotili (slika 43).

Priloga 5

Poročilo vzorcev:

	<p>TEST: 37</p> <p>Brizgalni tlak: 800 bar Naknadni tlak: 200 bar Hlajenje-gretje Voda: 100 °C</p> <p>Kontakt ni prelit, lepo zapolnjen kos, material je malo porozen na zadnjem delu (ob kontaktu).</p>		<p>TEST: 23</p> <p>Brizgalni tlak:800 bar Naknadni tlak:200 bar Hlajenje-gretje Voda: 100 °C</p> <p>Kos je zelo minimalno prelilo po kontaktu, material je malce porozen, ker je predolgo časa stal v polžu in se delno že zamrežil.</p>
	<p>TEST: 28</p> <p>Brizgalni tlak:800 bar Naknadni tlak:200 bar Hlajenje-gretje Voda: 100 °C</p> <p>Kos ima lepe ostre robove in ni prišlo do prelitja.</p>		<p>TEST: 29</p> <p>Brizgalni tlak: 800 bar Naknadni tlak:200 bar Hlajenje-gretje Voda: 100 °C</p> <p>Isti parametri kot pri testu 28. Prelilo je po kontaktu.</p>

	<p>TEST: 41</p> <p>Brizgalni tlak:700 bar Naknadni tlak:600 bar Hlajenje-gretje Voda: 80 °C</p> <p>Premalo nabrizgane mase – delno prelit kos, porozen material.</p>		<p>TEST: 46</p> <p>Brizgalni tlak:700 bar Naknadni tlak:600 bar Voda: 80 °C</p> <p>Primer testa, kjer smo pozabili po hlajenju s Peltierja še greti in masa se nam ni zapekla. Material je na koncu bil nezamrežen, meha k...</p>
	<p>TEST: 44 in 45</p> <p>Brizgalni tlak:600 bar Naknadni tlak:800 bar Hlajenje-gretje Voda: 80 °C</p> <p>Prelitja ni, malce porozen material.</p>		<p>TEST: 50</p> <p>Brizgalni tlak:1200 bar Naknadni tlak:900 bar Hlajenje-gretje Voda: 80 °C</p> <p>Zelo tanka plast mase je prelita po kontaktu, čeprav smo imeli visoke brizgalne tlake, zato nam je prelilo v delilni ravnini med kavitetami.</p>