



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MECHATRONIKOS IR ROBOTIKOS KATEDRA

Ernas Topygov

**PLASTIKINIŲ DETALIŲ LIEJIMO FORMOS FORMUOJANČIŲ ĮDĖKLŲ
OPTIMALAUS AUŠINIMO NUSTATYMAS**

OPTIMUM COOLING SYSTEM EVALUATION OF INJECTION MOLD

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H33001

Mechatronikos specializacija

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2015

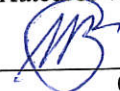
VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MECHATRONIKOS IR ROBOTIKOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas



(Parašas)

Vytautas Bučinskas

(Vardas, pavardė)

2015-05-22

(Data)

Ernas Toptygov

**PLASTIKINIŲ DETALIŲ LIEJIMO FORMOS FORMUOJANČIŲ ĮDĖKLŲ
OPTIMALAUS AUŠINIMO NUSTATYMAS**

OPTIMUM COOLING SYSTEM EVALUATION OF INJECTION MOLD

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H33001

Mechatronikos specializacija

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas doc. dr. Vytautas Bučinskas
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)



(Parašas)

2015-05-22

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas dr. Aušra Žemienė
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)



(Parašas)

2015-05-21

(Data)

Vilnius, 2015

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MECHATRONIKOS IR ROBOTIKOS KATEDRA

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H33001

Mechatronikos specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas



(Parašas)

Vytautas Bučinskas

(Vardas, pavardė)

2015 05 19

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

2015-03-18.....Nr. 7.....
Vilnius

Studentui

Ernei Topygov

(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema:

Plastikinių detalių liejimo formos formuojančių įdėklų optimalaus aušinimo nustatymas

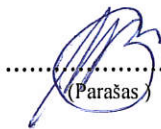
patvirtinta 2015 m. kovo 17 d. dekanų potvarkiu Nr. 74me

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2015 m. gegužės 22 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Pasirinkti optimizuojančių veiksmų algoritmą, pagal kurį bus nustatomi aušinimo sistemos parametrai, t. y. atstumas tarp liejiminio kontūro ir aušinimo kanalų, atstumas tarp aušinimo kanalų centrų, kanalų skersmenys. Suprojektuoti formuojančių įdėklų aušinimą pagal nustatytus aušinimo parametrus. Atlikti suprojektuotos aušinimo sistemos simuliaciją ir gauti teorinį aušinimo ciklą. Atlikti realios sistemos eksperimentinius tyrimus ir gauti eksperimentinį aušinimo ciklą. Suformuluoti išvadas ir rekomendacijas.

Vadovas



(Parašas)

doc. dr.

Vytautas Bučinskas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau



(Parašas)

Ernas Topygov

(Vardas, pavardė)

2015-03-18

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universiteto
egzaminų, sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo
bei gynimo organizavimo tvarkos aprašo
2011-2012 m. m.

1 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Ernas Toptygov, 20092295

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Mechanikos fakultetas

(Fakultetas)

Mechanikos inžinerija, MTfm-13

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2015 m. balandžio 4 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Plastikinių detalių liejimo formas formuojančių įdėklų optimalaus aušinimo nustatymas“ patvirtintas 2015 m. kovo 17 d. dekanų potvarkiu Nr. 74me, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas doc. dr. Vytautas Bučinskas.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).



(Parašas)

Ernas Toptygov

(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Mechanikos fakultetas Mechatronikos ir robotikos katedra	ISBN Egz. sk. Data-.....-.....	ISSN
Antrosios pakopos studijų Mechanikos inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas 4 Pavadinimas Plastikinių detalių liejimo formas formuojančių įdėklų optimalaus aušinimo nustatymas Autorius Ernas Topygov Vadovas doc. dr. Vytautas Bučinskas		
Kalba: lietuvių		
Anotacija Baigiamajame magistro darbe pateikiamas tyrimas, susijęs su plastikinių detalių liejimo formas formuojančių įdėklų optimalaus aušinimo nustatymu. Optimalūs aušinimo sistemos parametrai (atstumas tarp liejiminio konūro ir aušinimo linijos, atstumas tarp aušinimo kanalų, kanalų skersmenys) atrenkami iš aibės parametru, atsižvelgiant į teoriškai apskaičiuotą produkto aušinimo trukmę ir deformacijas. Teorinė aušinimo trukmė ir deformacijos apskaičiuojamos baigtinių elementų metodu specializuotoje programinėje įrangoje. Optimalūs aušinimo sistemos parametrai naudojami trimačiame formuojančių įdėklų projektavime. Suprojektuota liejimo forma yra pagaminama ir išbandoma liejimo mašinoje, tokiu būdu patikrinant teorinio ir eksperimentinio aušinimo ciklo atitikimą.		
Prasminiai žodžiai: aušinimo sistema, liejimo forma, baigtinių elementų metodas, gaminio kokybė.		

Vilnius Gediminas Technical University Faculty of Mechanics Department of Mechatronics and Robotics	ISBN Copies No. Date-.....-.....
Master Degree Studies Mechanical Engineering study programme Master Graduation Thesis 4	
Title	Optimum Cooling System Evaluation of Injection Mold
Author	Ernas Topygov
Academic supervisor	Assoc Prof Dr Vytautas Bučinskas
Thesis language: Lithuanian	
Annotation The final master's work contains study of optimum cooling system evaluation of injection mold. The cooling system parameters, i.e. offset distance of cooling line, cooling channel spacing, cooling channel diameters, are given accordingly to cooling time and product performance (deflection) in principle. The cooling time and product performance are predicted accurately by finite element method using special software. The cooling system parameters are used in 3D modeling of cavity and core inserts. Theoretic cooling time of product is compared to practical cooling time when the injection mold is put to the test in mold machine.	
Keywords: cooling system, injection mold, finite element method, product performance.	

TURINYS

IVADAS.....	10
1. LITERATŪROS APŽVALGA.....	12
1.1. Liejimo procesas	12
1.2. Liejimo formos struktūra.....	14
1.3. Liejimo mašinos struktūra	15
1.4. Aušinimo valdymo sistema	16
1.5. Formuojančių įdėklų aušinimas	20
1.6. Aušinimo laikas	21
1.7. Aušinimo sistemos projektavimas	23
2. EKSPERIMENTO METODIKA. MODELIAVIMO DARBAI	29
2.1. Liejamo komponento duomenys.....	29
2.2. Aproximacinio terminio projektavimo veiksmų taikymas	30
2.3. Aušinimo sistemos projektavimas baigtinių elementų metodu	31
3. EKSPERIMENTO ATLIKIMAS	42
3.1. Eksperimento eiga.....	42
3.2. Eksperimento rezultatai.....	45
IŠVADOS.....	49
NAUDOTA LITERATŪRA	51
PRIEDAI	53
1 priedas	54
2 priedas	55

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Liejimo mašinos principinė schema	12
1.2 pav. Principinė plastiko įpurškimo į liejimo formą schema	13
1.3 pav. Struktūrinė liejimo formos schema	14
1.4 pav. Liejimo mašinos struktūra.....	15
1.5 pav. GWK <i>Integrat Direct</i> aušinimo valdymo sistemos veikimo principinė schema	16
1.6 pav. Aušinimo grandinės schema	17
1.7 pav. Preliminari GWK <i>Integrat Direct</i> sistemos pajungimo schema	18
1.8 pav. Formuojančio įdėklo aušinimo schemas.....	21
1.9 pav. Aušinimo sistemos parametrų parinkimas	24
1.10 pav. Dvimatis aušinimo sistemos projektavimas	25
1.11 pav. Trimatis aušinimo sistemos projektavimas	26
2.1 pav. Liejamo komponento pagrindiniai matmenys.....	29
2.2 pav. Liejimo lizdo skerspjūvis	31
2.3 pav. Komponento suskirstymas į viršutinę ir apatinę dalis pagal skyrimo liniją	32
2.4 pav. Aušinimo sistemos parametrų diapazono sudarymo schema.....	33
2.5 pav. Teorinė komponento deformacijos priklausomybė nuo atstumo tarp liejiminio kontūro ir aušinimo linijos.....	35
2.6 pav. Teorinė aušinimo ciklo t_c priklausomybė nuo atstumo tarp liejiminio kontūro ir aušinimo linijos.....	36
2.7 pav. Komponento deformacijos simuliacija pagal aušinimo parametrų kombinaciją Nr. 8	37
2.8 pav. Komponento aušinimo trukmės nustatymo simuliacija pagal aušinimo parametrų kombinaciją Nr. 8	38
2.9 pav. Nejudančio formuojančio įdėklo modelis „Unigraphics NX 8.5“ programinėje aplinkoje ir jo darbo brėžinio fragmentas	39
2.10 pav. Judančio formuojančio įdėklo modelis „Unigraphics NX 8.5“ programinėje aplinkoje ir jo darbo brėžinio fragmentas.....	40
2.11 pav. Šliaužiklių įdėklų modeliai „Unigraphics NX 8.5“ programinėje aplinkoje ir jų darbo brėžinių fragmentai	41
3.1 pav. Surinkta liejimo forma	42
3.2 pav. Eksperimento schema	43
3.3 pav. Eksperimento algoritmas.....	44
3.4 pav. Išstumiamo komponento temperatūros priklausomybė nuo aušinimo ciklo.....	46
3.5 pav. Išlieto gaminio nuotrauka	48

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. GWK <i>Integrat Direct</i> sistemos charakteristika	18
1.2 lentelė. <i>Integrat Direct</i> sistemos aušinimo skysčio (vandens) hidrologiniai duomenys.....	19
2.1 lentelė. Aušinimo sistemos parametrų diapazonas	34
3.1 lentelė. Liejimo formos bandymų rezultatai.....	45
3.2 lentelė. Gaminio matmenų patikrinimo rezultatai	47

IVADAS

Kiekviena plastikinė detalė pagaminama sukuriant jai specialią liejimo formą. Liejimo slegiant procesas – tai išlydyto plastiko įšvirkštimas dideliu slėgiu į liejimo formą per lietį, šitaip užpildant plastiką formuojančių įdėklų lizdus. Reguliuojant formos temperatūrą bei palaikant slėgį, aušinamas įšvirkštas mišinys. Vos tik įvyksta liejinio kristalizacija (gaminys tampa pakankamai kietas, kad išlaikytų savo formą), jis pašalinamas iš liejimo formos stūmikliais.

Liejimo forma turi du pagrindinius komponentus: nejudantį įdėklą (angl. *cavity insert*) ir judantį įdėklą (angl. *core insert*). Nejudantis įdėklas formuoja liejamos plastikinės detalės išorinius paviršius, o judantis įdėklas – priklausomai nuo komponento geometrijos, tiek išorinius, tiek ir vidinius paviršius. Atsiskiriant įdėklams, sudaromos sąlygos gaminiui iš formos pašalinti.

Judančio ir nejudančio įdėklų optimalus aušinimas užtikrina liejimo ciklo sutrumpinimą bei apsaugo formą nuo perkaitimo. Būtent su šiuo aspektu susiduria konstruktoriai, projektuojantys naują liejimo formą. Konstruktorių viena iš svarbiausių užduočių, suprojektuoti kuo efektyvesnį aušinimą formuojantiems įdėklams. Šioje projektavimo stadijoje dažniausiai tenka pasikliauti inžinerine patirtimi, remtis jau sukurtomis konstrukcijomis bei vadovautis bazinėmis aušinimo kanalų išvedžiojimo taisyklėmis.

Optimalus aušinimo režimas (aušinimo skysčio tiekimo slėgis, skysčio tėkmės greitis, aušinimo laikas) nustatomas eksperimentiniu būdu. Suprojektuota ir pagaminta nauja liejimo forma įtvirtinama liejimo mašinoje, paruošiama bandymui bei išbandoma. Bandymas dažniausiai užtrunka nuo vienos iki dviejų dienų.

Tyrimo objektas

Tyrimo objektas – veiksmų algoritmas, skirtas liejimo formos formuojančių įdėklų optimalaus aušinimo režimo parametrų apskaičiuoti.

Darbo tikslai ir uždaviniai

Darbo tikslas – nustatyti liejimo formos formuojančių įdėklų optimalaus aušinimo parametrus, taikomus formuojančių įdėklų projektavimo procese.

Norint pasiekti užsibrėžtą tikslą, reikia įvykdyti šiuos uždavinius:

1. Išnagrinėti mokslinės literatūros šaltinius, kuriuose aprašyti liejimo formų aušinimo ypatumai bei nagrinėjamos panašaus pobūdžio aušinimo projektavimo sistemos.
2. Pasirinkti tinkamiausią optimizuojančių veiksmų algoritmą, pagal kurį bus skaičiuojami aušinimo sistemos parametrai.
3. Nustatyti algoritmui būtinus įėjimo parametrus bei konstantas.

4. Aprašyti aušinimo procesą charakterinėmis lygtimis.
5. Suprojektuoti formuojančių įdėklų aušinimą pagal apskaičiuotus aušinimo parametrus.
6. Atlikti suprojektuotos aušinimo sistemos simuliaciją.
7. Atlikti realios aušinimo sistemos eksperimentinius tyrimus.
8. Suformuluoti išvadas ir rekomendacijas.

Temos naujumas

Galimybė iš anksto, dar neatlikus bandymų su nauja pagaminta liejimo forma, projektavimo stadijoje nustatyti formuojančių įdėklų optimalų aušinimo režimą atrodo perspektyvi. Teorinis aušinimo ciklo nustatymas, turint pirminius projektavimo duomenis (liejamos detalės geometrinius matmenis, medžiagą, liejimo temperatūrą, užpilamo plastiko masę ir t. t.), padėtų žymiai sutrumpinti efektyviausio aušinimo režimo nustatymo laiką formos išbandymo metu. Teoriškai sugeneruotas efektyvus aušinimo diapazonas leistų bandytojams greičiau išbandyti liejimo formą nustatytose ribose bei pateikti išvadas apie jos tinkamumą produkcijai gaminti.

Temos aktualumas

Liejimo formos projektavimo stadijoje aušinimo kanalų išvedžiojimas „iš akies“ dažnai nulemia liejimo formos modifikacijas, susijusias su aušinimo tobulinimu. Yra būtinybė turėti teorinį įrankį, projektavimo stadijoje apskaičiuojantį optimalius aušinimo sistemos parametrus. Problema ypač aktuali ekonominiu atžvilgiu, nes sudaromos sąlygos greičiau paleisti liejimo formą į gamybą, o sutrumpėjęs bandymų laikas užtikrina mažesnes medžiagos sąnaudas. Supaprastėja bandytojų darbas, nes eksperimentai tampa teoriškai apibrėžti ir kryptingi. Atsiranda didesnė tikimybė pasiekti geresnį liejimo formos naudingo darbo koeficientą.

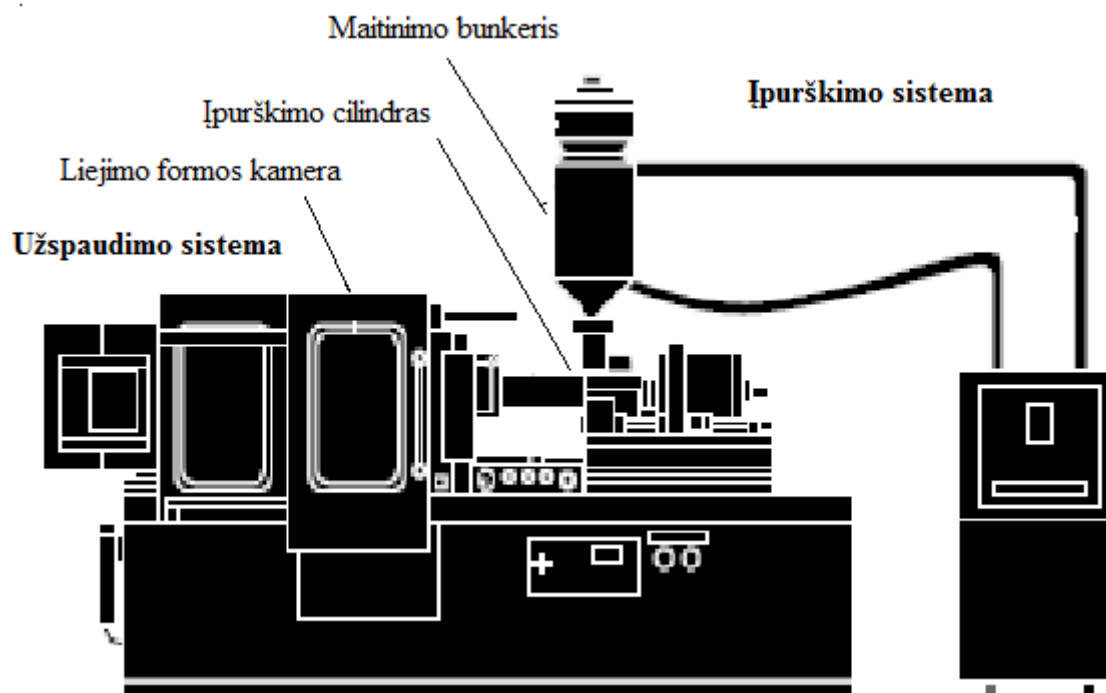
Tyrimo metodai

Teoriniams tyrimams atlikti naudojami „Unigraphics NX 8.5“ ir „Autodesk Mold Flow“ programiniai paketai. Eksperimentiniai sistemos tyrimai atliekami „UAB Intersurgical“ liejimo formų bandymo ceche. Sistemos prototipas bandomas realaus darbo sąlygomis. Tiriamas suprojektuotos sistemos pateiktų teorinių aušinimo rezultatų sutapimas su eksperimentiškai nustatytais aušinimo rezultatais. Atliekant bandymus naudojama „Krauss Maffei 110“ liejimo mašina. Tyrimų rezultatai apdoroti naudojant „Microsoft Office 2007“ programinį paketą.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

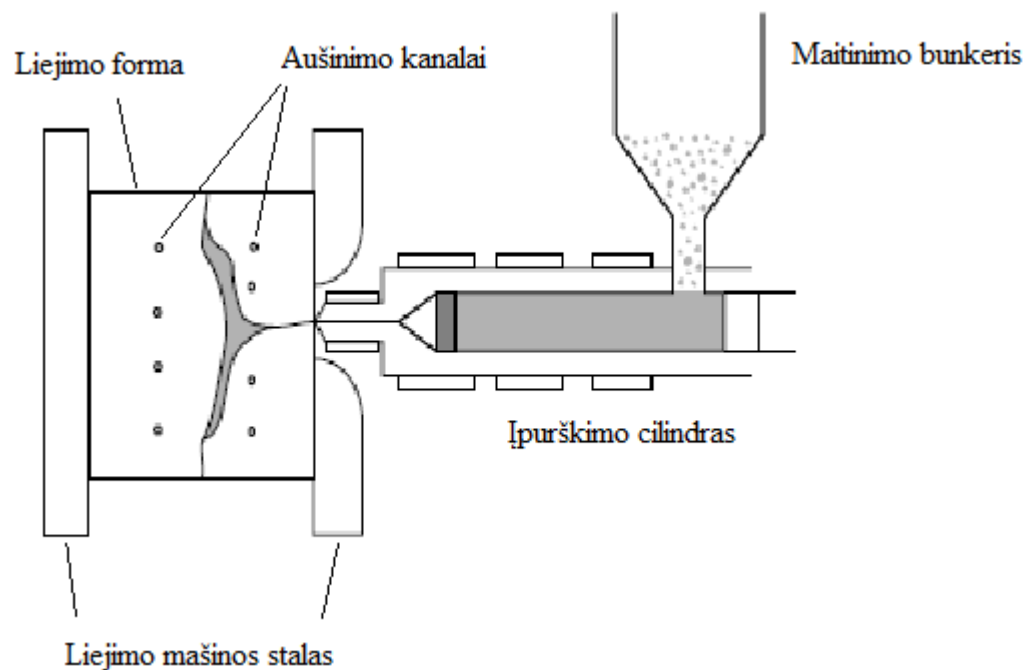
1.1. Liejimo procesas

Prieš pradėdant nagrinėti formuojančių įdėklų aušinimą, būtina apžvelgti patį liejimo procesą. Liejimo procesas sudarytas iš keturių pagrindinių etapų: formos uždarymo, plastiko įpurškimo, aušinimo ir komponento išstūmimo. Liejimas vykdomas liejimo mašinoje (1.1 pav.).



1.1 pav. Liejimo mašinos principinė schema (sudaryta autoriaus remiantis DuPont 2000: 5)

Plastiko įpurškimo slėgį užtikrina liejimo mašinos hidraulinė sistema. Įpurškimo slėgio vertė gali siekti iki 1600 bar. Įpurškiamo mišinio temperatūra svyruoja nuo 205 °C iki 300 °C. Po užpylimo įpurškimo slėgis sumažinamas nuo 30 % iki 70 % pastarojo slėgio, priklausomai nuo naudojamo plastiko, ir išlaikomas, kol lietus sukietėja. Minėtas procesas trunka apytiksliai 1/3 aušinimo laiko. Liekamasis aušinimo laikas reikalingas pakankamam medžiagos sukietėjimui užtikrinti, kas leidžia išlaikyti komponento formą. Detalės kristalizacijos metu paruošiamas naujas medžiagos kiekis įpurkšti (Mennig 1998: 7). Liejimo formos užpylimo principinė schema parodyta 1.2 paveiksle.



1.2 pav. Principinė plastiko įpurškimo į liejimo formą schema
(sudaryta autoriaus remiantis DuPont 2000: 5)

Liejimo ciklą sudaro laikas, būtinas formos uždarymui, medžiagos įpurškimui, aušinimui (išskiriami trys aušinimo etapai, t. y. paruošimas, dozavimas, išlaikymas), formos atidarymui, stūmiklių suveikimui. Visa aušinimo trukmė t_c apskaičiuojama pagal formulę (Fischer 2014: 341):

$$t_c = t_p + t_{rc}; \quad (1)$$

čia t_p – formavimo slegiant trukmė, s;

t_{rc} – liekamoji aušinimo trukmė, s.

Aušinimo trukmė t_c , esant liejimo formos temperatūrai ≤ 60 °C, apskaičiuojama pagal formulę (Fischer 2014: 341):

$$t_c = s \cdot (1 + 2s); \quad (2)$$

čia s – liejamos detalės storis, mm.

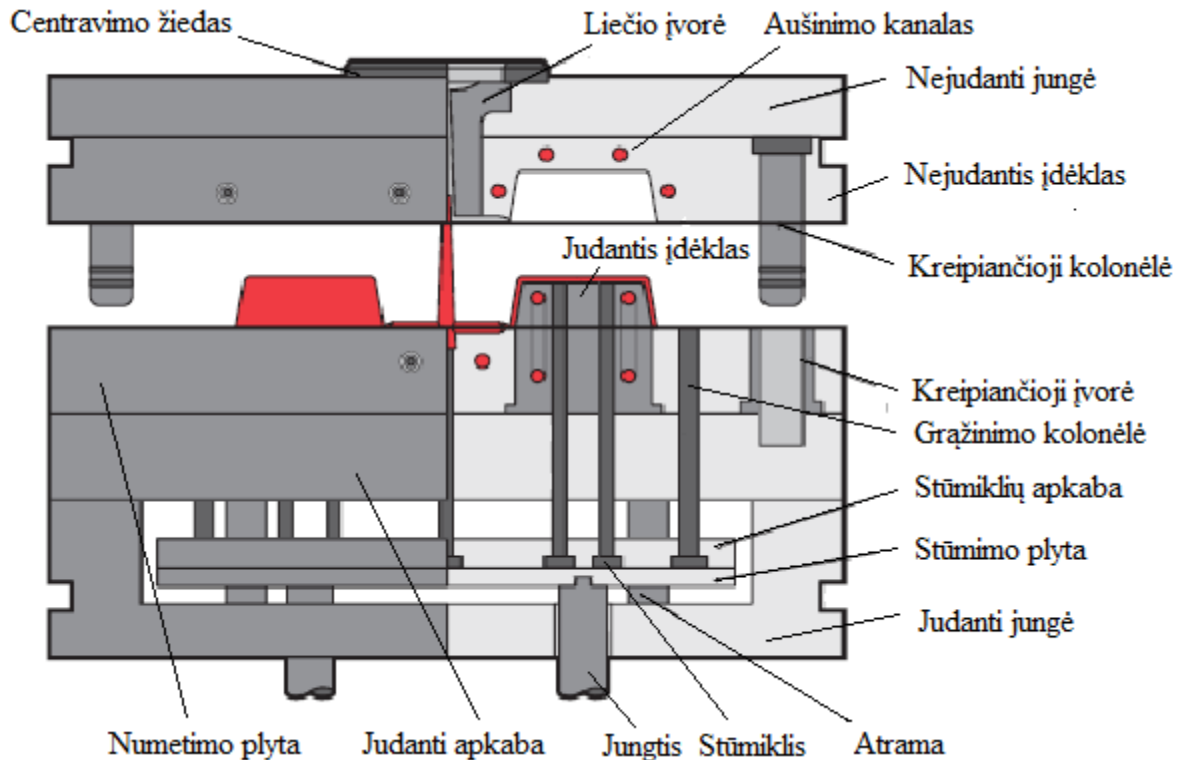
Esant liejimo formos temperatūrai > 60 °C, aušinimo trukmė t_c lygi (Fischer 2014: 341):

$$t_c = 1,3s \cdot (1 + 2s). \quad (3)$$

Užpylus ir išlaikius plastiką, paruošiamas atitinkamas išlydytos medžiagos kiekis kitam įšvirkštimui. Dozavimas prasideda įpurškimo cilindro atitraukimu ir medžiagos granulių įpylimu į maitinimo bunkerį. Medžiaga, tekėdama cilindru formos link, yra šildoma, suspaudžiama ir homogenizuojama. Išlydytas mišinys stumiamas iki įšvirkštimo antgalio. Į gaminiui išlieti reikalingą medžiagos tūrį turi būti įtrauktas liečio tūris, taip pat svarbu įvertinti medžiagos tankių skirtumą tarp skystosios ir kietosios fazės. Išlaikymo fazėje tiekiamas papildomas medžiagos tūris, kompensuojantis susitraukimą ir padedantis išvengti susitraukimo ženklų gaminyje.

1.2. Liejimo formos struktūra

Liejimo forma – tai įrankis, tvirtinamas liejimo mašinoje ir kuriame formuojama (liejama) produkcija. Įrankis sudarytas iš judančios ir nejudančios dalies (1.3 pav.). Abi formos dalys turi specifinę paskirtį, todėl jas sudarančios detalės yra skirtingos.



1.3 pav. Struktūrinė liejimo formos schema (sudaryta autoriaus remiantis Lanxess 2007: 122)

Kaip matyti 1.3 paveiksle, aušinamas nejudantis įdėklas montuojamas ant jungės. Tarp įdėklo ir jungės patalpinamos kreipiančiosios kolonėlės, skirtos judančioms ir nejudančioms dalims tarpusavyje centruoti formos uždarymo metu. Nejudanti formos dalis per jungę įtvirtinama toje liejimo mašinos pusėje, kur įtraukiamas ir atitraukiamas įpurškimo cilindras. Įšvirkštimo antgalį į liejimo formą centruoja centravimo žiedas. Įšvirkštas plastikas per liečio įvorę patenka į lizdus.

Aušinamas judantis įdėklas talpinamas tarp numetimo plytos ir judančios apkabos. Taip pat judančioje formos dalyje yra išstūmimo mechanizmas (stūmiklių apkaba, stūmimo plyta, atramos, stūmikliai, grąžinančiosios kolonėlės, jungtys). Išstūmimo eigą riboja atstumas tarp apkabos ir jungės. Išstūmimo mechanizme patalpinti stūmikliai, skirti išlietam produktui pašalinti ciklo pabaigoje, atsidarius formai. Užsidarant formai, grąžinančiosios kolonėlės nustato išstūmimo mechanizmą į pradinę (nulinę) padėtį. Atramos apsaugo numetimo plytą ir apkabą nuo galimos deformacijos. Judanti formos dalis per jungę fiksuojama liejimo mašinoje, išstūmimo mechanizmas per jungtis sujungiamas su liejimo mašinos užspaudimo sistema.

1.3. Liejimo mašinos struktūra

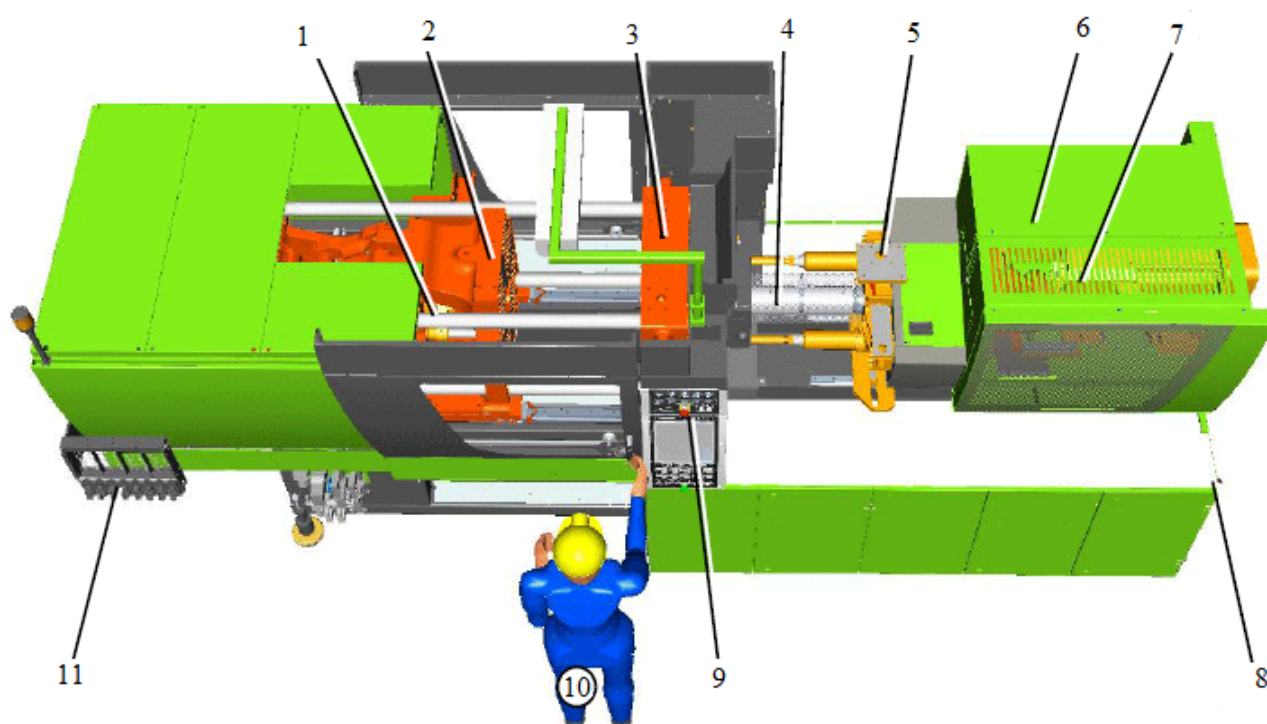
Bazinė plastikų liejimo mašinos struktūra pateikta 1.4 paveiksle. Galima išskirti dvi pagrindines liejimo mašinos sistemas, prieš tai nurodytas 1.1 paveiksle, t. y. užspaudimo sistemą (1–as, 2–as ir 3–ias punktai 1.4 paveiksle) ir įpurškimo sistemą (4–as, 5–as, 6–as ir 7–as punktai 1.4 paveiksle).

Užspaudimo sistema atlieka šias funkcijas:

- greitai uždaro ir užrakina formą, kad pastaroji būtų paruošta plastikui įšvirkšti;
- sulaiko formą uždarytą, tol kol ją veikia įpurškimo slėgis;
- atvėsus komponentui, iš pradžių lėtai atidaro formos puses, o galiausiai pagreitina atidarymą;
- pašalina išlietą komponentą iš liejimo formos (Mörwald 2011: 69).

Judanti formos dalis tvirtinama prie judančios įrankio plokštės. Liejimo formos išstūmimo sistema per jungtį prijungiama prie išmetimo įrenginio. Atitinkamai prie nejudančios įrankio plokštės montuojama nejudanti formos dalis.

Įpurškimo sistema sudaryta iš cilindro su pukštuku, dozavimo sraigto pavaros ir įpurškimo įrenginio (1.4 pav.). Cilindras yra šildomas tiksliai kontroliuojamais kaitintuvais, kurie užtikrina tolydų plastiko lydymąsi veikiant karščiui. Plastifikavimo metu sugeneruojama nuo 60 % iki 85 % energijos, reikalingos medžiagai išlydyti. Lydymosi temperatūra priklauso nuo cilindro temperatūros, priklausomai nuo buvimo cilindre laiko (Gastrow 1993: 7).



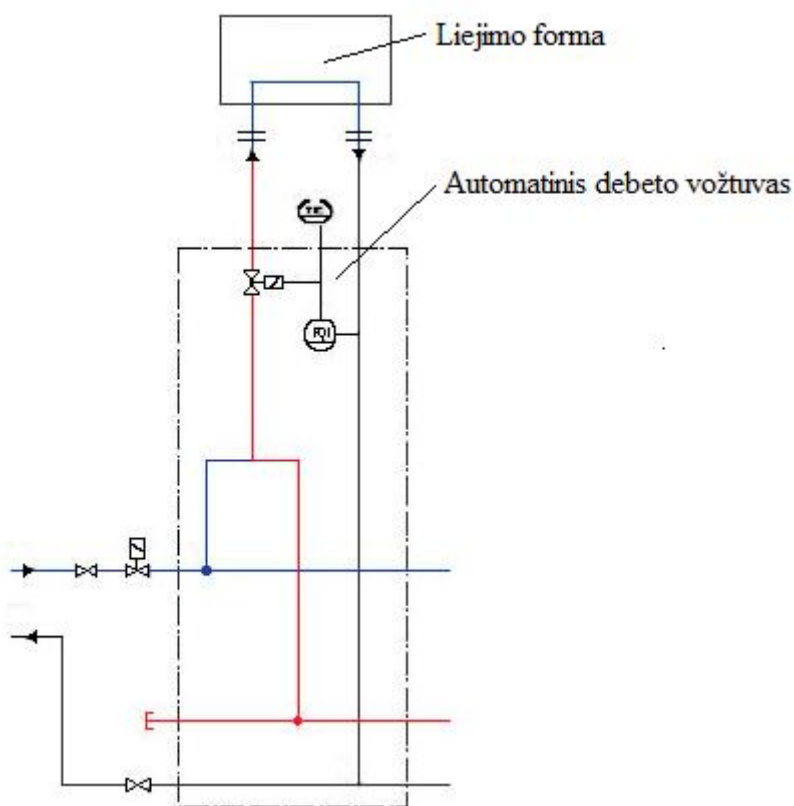
1.4 pav. Liejimo mašinos struktūra (sudaryta autoriaus remiantis Mörwald 2011: 12)

1.4 paveiksle skaičiais pažymėtos liejimo mašinos struktūrinės dalys: 1 – išmetimo įrenginys; 2 – judanti įrankio plokštė; 3 – nejudanti įrankio plokštė; 4 – cilindras su purkštuku; 5 – medžiagos tiekimo anga; 6 – dozavimo sraigto pavara; 7 – įpurškimo įrenginys; 8 – pagrindinis jungiklis ir agregato tipo informacinė plokštelė; 9 – jungiamasis pultas su ekranu; 10 – operatoriaus darbinė pozicija; 11 – aušinimo valdymo sistema .11-as punktą rodo aušinimo valdymo sistemą, kuri atskirai išnagrinėta 1.4. poskyryje. Aušinimo valdymo sistema aprašyta nuodugniau, nes pastaroji sistema susijusi su aušinimo optimizavimu formuojančiuose įdėkluose.

1.4. Aušinimo valdymo sistema

Aušinimo valdymo sistema skirta temperatūrai reguliuoti plastikų liejimo technologijoje. Pastaroji sistema integruojama į plastikų liejimo mašinas (1.4 pav.). Darbe pateiktas firmos GWK aušinimo valdymo sistemos *Integrat Direct* veikimo principas, nes ši sistema labai dažnai, užsakovų pageidavimu, įrengiama firmos „Krauss Maffei“ plastikų liejimo mašinose.

GWK *Integrat Direct* aušinimo valdymo sistema reguliuoja aušinimo skysčio kiekį grandinėje automatiškai valdomu vožtuvu (1.5 pav.). Pro vožtuvą tiekiamo aušinimo skysčio debetas gali būti keičiamas nuo 1 iki 15 l/min. Nominali grandinės aušinimo talpa siekia 14 kW.

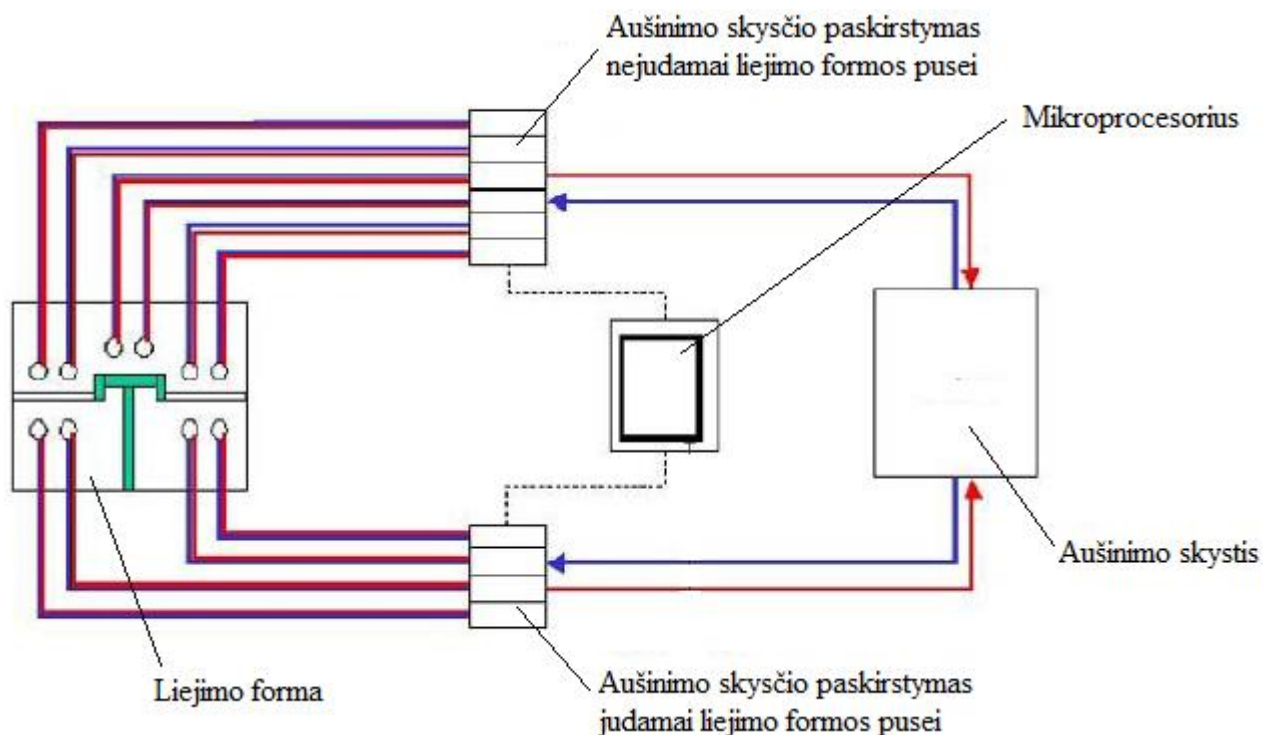


1.5 pav. GWK *Integrat Direct* aušinimo valdymo sistemos veikimo principinė schema (sudaryta autoriaus remiantis Behr 2011: 9)

Sistema suteikia:

- skaitmenines aušinimo parametrų reikšmes;
- aušinimo kanalų stebėsenos funkciją;
- aušinimo skysčio debeto reguliacijos funkciją;
- panaudoto (grįžtančio) skysčio temperatūros stebėsenos funkciją;
- panaudoto (grįžtančio) skysčio temperatūros reguliavimo funkciją (Behr 2011: 9).

Vieno mikroprocesoriaus (1.6 pav.) užtenka visos aušinimo grandinės valdymui. Mikroprocesorius palaiko nuolatinį ryšį su liejimo mašinos valdymo sistema ir centrine kompiuterių sistema. Grandinės nustatymai ir liejimo formos temperatūros parametrai išsaugomi mikroprocesorinės sistemos pastoviosios atminties įtaise, todėl esant būtinybei, buvę nustatymai gali būti panaudoti dar kartą. Mikroprocesorius taip pat praneša apie galimus grandinės sandarinimo defektus. Aušinimo grandinės būseną atvaizduojama grafiškai monitoriuje (duomenų lentelių ir grafikų pavidalu) (Behr 2011: 10).



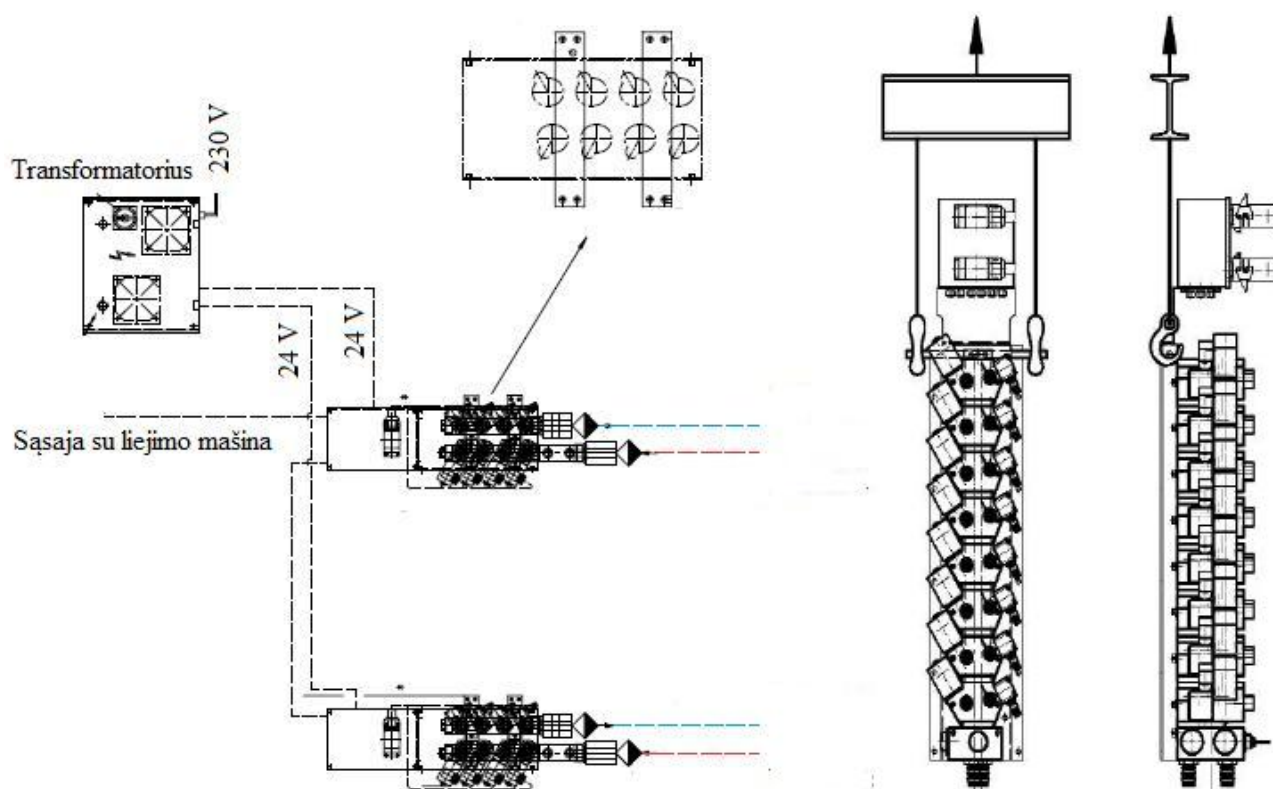
1.6 pav. Aušinimo grandinės schema (sudaryta autoriaus remiantis Behr 2011: 9)

Preliminarios GWK *Integrat Direct* sistemos schema bei jos pajungimo schema parodytos 1.7 paveiksle. Sistemos charakteristika pateikta 1.1 lentelėje (Behr 2011: 20).

1.1 lentelė. GWK *Integrat Direct* sistemos charakteristika (sudaryta autoriaus remiantis Behr 2011: 18)

Operacinė įtampa	230 V/54 Hz
Valdymo įtampa	24 V DC
Aušinimo skystis	Vanduo
Maksimali aušinimo skysčio temperatūra	95 °C
Kaitinimo galia	6 kW
Aušinimo skysčio maksimalus suslėgimas	6 bar

Aušinimo skysčio tiekimas į aušinimo valdymo sistemą pradedamas nuo filtracijos (žr. 1 priedą), nes su skysčiu į sistemą negali patekti dalelės, galinčios užkimšti kanalus ar pagreitinti liejimo formos detalių koroziją. Slėgio ir debeto paskirstymo sistema, naudodama sklendes su elektromagnetiniais vykdikliais, nustato skysčio debetą ir jo tiekimo slėgį į aušinimo valdymo sistemą. Prieš patenkant skysčiui į valdymo sistemą, išmatuojamas skysčio debetas ir temperatūra.



1.7 pav. Preliminari GWK *Integrat Direct* sistemos pajungimo schema (sudaryta autoriaus remiantis Behr 2011: 25–27)

Aušinimo valdymo posistemių skaičius n priklauso nuo aušinamų liejimo formos dalių skaičiaus (žr. 1 priedą). Valdymo posistemių skaičius n turi grįžtamąjį ryšį su slėgio ir debeto paskirstymo sistema, todėl tiekiamo aušinimo skysčio debetas ir slėgis bet kuriuo laiko momentu yra atitinkamai reguliuojamas.

Aušinimo valdymo posistemė sudaryta iš vožtuvo su elektromagnetiniu vykdikliu, temperatūros jutiklio ir debeto matuoklio (žr. 2 priedą). Kadangi viena valdymo posistemė skirta vienai specifinei liejimo formos aušinamai daliai, tai reiškia, kad įvairiems liejimo formos įdėklams, ženklams, šliaužikliams, apkaboms ir plytomis gali būti parinktas skirtingas aušinimo režimas.

1.2 lentelė. *Integrat Direct* sistemos aušinimo skysčio (vandens) hidrologiniai duomenys (sudaryta autoriaus remiantis Behr 2011: 22)

Hidrologiniai duomenys	Matavimo vienetai	Aušinimo sistema iki 60 °C	
		Minimali reikšmė	Maksimali reikšmė
pH–vertė	–	7,0	8,5
Laidumas	μS/cm	–	2000
Kietumas	mol/m ³	0,5	3,7
Chlorido jonų kiekis	mg/l	–	200
Sulfato jonų kiekis	mg/l	–	300
Nitratų ir nitritų kiekis	mg/l	–	50
Amoniako kiekis	mg/l	–	–
Geležies kiekis	mg/l	–	0,2
Mangano kiekis	mg/l	–	0,1
Vario kiekis	mg/l	–	0,5
Fosfatų kiekis	mg/l	nekenksmingi	nekenksmingi
Angliarūgštės kiekis	mg/l	–	8–15
Nuosėdos	ml/l	–	<3
Bakterijų kiekis	K/ml	–	1000

1.2 lentelėje pateikti *Integrat Direct* sistemoje naudojamo aušinimo vandens hidrologiniai duomenys. Nesilaikant lentelėje išvardytų reikalavimų vandeniui, galimi priešlaikiniai aušinimo valdymo sistemos gedimai.

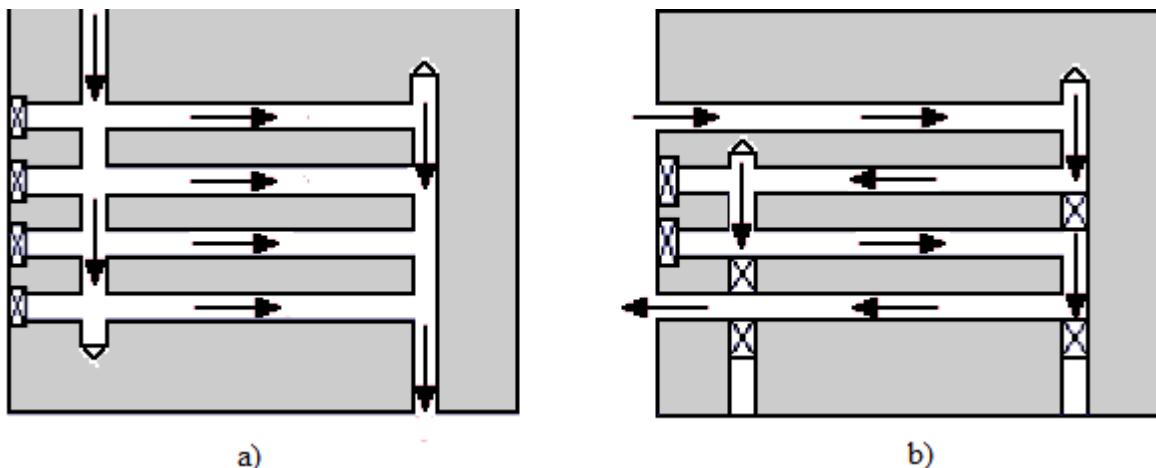
1.5. Formuojančių įdėklų aušinimas

Eksplatuojant liejimo formą, šilumos mainų greitis tarp įpurkšto plastiko ir liejimo formos yra svarbiausias ekonominis faktorius, nulemiantis pagamintos produkcijos kiekį per tam tikrą laiką. Formuojančių įdėklų aušinimo kanaluose tekantis skystis (vanduo, alyva) palaiko įpurškiamo plastiko kristalizacijos temperatūrą, kas leidžia įpurkštam mišiniui sukietėti į gaminį. Kadangi termoplastikai yra prasti šilumos laidininkai, įdėklų aušinimo laikas labiausiai nulemia bendrą liejimo ciklo trukmę. Aušinimo trukmė žymiai išauga storinant komponento sienelės. Aušinimo režimas taip pat turi poveikį liejamų produktų mikrostruktūrai, ypač produkcijai, pagamintai iš pusiau kristalinių plastikų, kadangi, liejant šias medžiagas, negalima leisti, kad formos įdėklų paviršiaus temperatūra nukristų žemiau reglamentuojamos temperatūros. Tokiu atveju liejimo procese naudojami temperatūros kontrolieriai, palaikantys skysčio temperatūrą pageidaujamose ribose. Kuo arčiau aušinimo kanalai išdėstyti formuojančio įdėklo paviršiaus, kuo arčiau aušinimo kanalai yra vienas kito, tuo tiksliau formuojančio paviršiaus temperatūra gali būti kontroliuojama (Mennig 1998: 31).

Formuojančiuose įdėkluose aušinimo kanalai yra išgręžiami. Ypatingais atvejais, kai įdėklo forma labai sudėtinga, stūmiklių išdėstymas trukdo išgręžti aušinimo kanalus, įdėklas yra padaromas panaudojant 3D spausdinimo technologiją.

Gamyboje vadovaujamasi šiomis bazinės aušinimo kanalų išvedžiojimo taisyklės:

1. Aušinimo kanalo skersmuo daugiau negu >10 mm nepagerina aušinimo (dažniausiai gręžiami 4, 6 ir 8 mm diametro kanalai).
2. Sienelė tarp formuojančio paviršiaus ir kanalo turi būti ne plonesnė negu kanalo skersmuo, o kritinėse zonose – 1–2 mm storesnė.
3. Esant lygiagrečiajam aušinimui (1.8a pav.), nuo maitinimo kanalo atsišakančių kanalų skerspjūvių plotų suma turi būti lygi užmaitinančio kanalo skerspjūvio plotui. Pvz., 8 mm skersmens kanalas gali užmaitinti keturis 4 mm skersmens kanalus ($8^2=4^2+4^2+4^2+4^2$).
4. Nuosekliajame aušinime (1.8b pav.) svarbu išlaikyti tą patį kanalo skerspjūvio plotą (vengti kanalo skersmens pokyčių, kad nesusidarytų hidrauliniai nuostoliai).
5. Vengti perteklinio kanalo išgręžimo gylio, šitaip išlaikant efektyvią aušinimo skysčio apytaką. Per giliai išgręžti kanalai sąlygoja „šulinių“ susidarymą, kurie kenkia šilumos mainams aušinimo metu.
6. Aušinimo kanalai turi būti išdėstyti atsižvelgiant į liejamo komponento geometriją, kad būtų užtikrintas tolygus produkto aušinimas.



1.8 pav. Formuojančio įdėklo aušinimo schemas: a) lygiagretusis aušinimas; b) nuoseklusis aušinimas (sudaryta autoriaus remiantis Kanyakunari 2012)

Formuojantys įdėklai gaminami iš aukštos kokybės plieno, dažniausiai naudojama 1.2083 plieno markė, 3D spausdinimo technologijoje taikomas plieno kompozitas 1.2343/1.2079. Įdėkluose pozicionuojamų formuojančių ženklų medžiaga būna 1.2379 markės plienas, kas apsaugo įdėklą ir ženklą nuo galimo tarpusavio sukibimo ir užstrigimo. Pastarieji plienai tinkami terminiam apdirbimui, pasižymi reikiamu kietumu ir stiprumu, poliruojami, atsparūs korozijai, kaitrai ir mechaniniam nuovargiui bei turi gerą šiluminį laidumą.

1.6. Aušinimo laikas

Šilumos mainai tarp plastiko ir aušinimo skysčio priklauso nuo liejimo formos šiluminio laidumo. Šiluminis laidumas aprašomas Furjė diferencialine lygtimi (Menges 1992: 272):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad (4)$$

čia $a = \frac{k}{\rho \cdot c_p}$ – šiluminis difuziškumas;

t – laikas;

x – poslinkis;

k – šiluminio laidumo koeficientas;

ρ – aušinimo skysčio tankis;

c_p – specifinė šiluminė talpa.

Įvertinus tai, kad iškart po plastiko įpurškimo į formuojančius įdėklus, mišinys visame tūryje įgauna pastovią temperatūros reikšmę T_M , todėl formuojančio įdėklo sienelės įkaista iki pastovios reikšmės T_W (Menges 1992: 272):

$$\frac{T_E - T_W}{T_M - T_W} = \frac{4}{\pi} e^{-\frac{a\pi^2}{s^2} \cdot t} \cdot \sin \frac{\pi x}{s}; \quad (5)$$

čia T_M – įpurškiamo mišinio temperatūra;

T_E – maksimali liejimo temperatūra;

T_W – formuojančio įdėklo sienelės temperatūra;

s – liejamo komponento sienelės storis.

Formulė (5) išreiškiama (Menges 1992: 273):

$$T_E - T_W = \frac{4}{\pi} \cdot (T_M - T_W) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \cdot e^{-\frac{a(2n+1)^2 \pi^2 t}{s^2}} \cdot \sin \frac{(2n+1)\pi \cdot x}{s}; \quad (6)$$

iš čia:

$$\frac{\overline{T_E} - T_W}{T_M - T_W} = \frac{8}{\pi^2} \cdot e^{-\frac{a\pi^2}{s^2} \cdot t}; \quad (7)$$

$\overline{T_E}$ – liejimo temperatūra.

Pagal lygtį (7) gaunama aušinimo laiko t_c išraiška (Menges 1992: 273):

$$\frac{s^2}{\pi^2 a} \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_M - T_W}{\overline{T_E} - T_W} \right) = t_c; \quad (8)$$

lygtis (8) pertvarkoma:

$$\frac{t_c \cdot a}{s^2} = \frac{1}{\pi^2} \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_M - T_W}{\overline{T_E} - T_W} \right). \quad (9)$$

Bedimensė aušinimo proceso išraiška (Menges 1992: 273):

$$\frac{T_E - T_W}{T_M - T_W} = \theta; \quad (10)$$

čia θ – aušinimo koeficientas.

Bedimensis Furjė skaičius lygus (Menges 1992: 273):

$$\frac{t_c \cdot a}{s^2} = Fo. \quad (11)$$

Pagal lygtį (9), aušinimo koeficientas θ yra vienintelė Furjė skaičiaus funkcija:

$$\theta = f(Fo). \quad (12)$$

Esant $\frac{t_c \cdot a}{s^2} = const.$, aušinimo greitis yra pastovus.

Atsižvelgiant į mišinio maksimalią temperatūrą tūrio centre, bedimensis aušinimo koeficientas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\frac{T_E - T_W}{T_M \cdot T_W} = \tilde{\theta}; \quad (13)$$

T_E – mišinio tūrio centro temperatūra.

Praktikoje aušinimo koeficientas $\tilde{\theta}$ svyruoja nuo 0,16 iki 0,25.

Laikant, kad visų termoplastikų aušinimas yra fiziškai panašus procesas, aušinimo laiką t_c galima išreikšti formule (Menges 1992: 277):

$$t_c = c_c s^2; \quad (14)$$

čia $c_c = 2...3 \text{ s/mm}^2$ – koeficientas;

s – liejamo komponento sienelės storis.

Esant sudėtingai liejamo komponento geometrijai, susidaro asimetriško aušinimo sąlygos, kas lemia skirtingą formuojančių įdėklų lizdų sienelių temperatūrą. Šiuo atveju, norint apskaičiuoti aušinimo laiką, tenka įtraukti liejamo komponento sienelės storio pataisą s^l . Sienelės storio pataisa apskaičiuojama pagal formulę (Menges 1992: 279):

$$s^l \approx \frac{2s}{\frac{q_2}{q_1} + 1}, \quad q_2 \leq q_1; \quad (15)$$

čia $\dot{q}$ – šiluminio srauto tankis, apibūdinamas įdėklo lizdo sienelių temperatūromis.

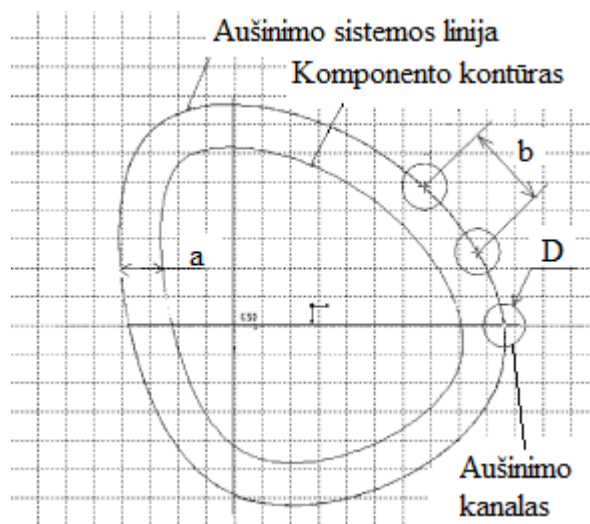
Simetriško aušinimo atveju $\dot{q}_1 = \dot{q}_2$. Pavyzdžiui, aušinant tik vieną komponento pusę, šiluminio srauto tankis lygus $\dot{q}_2 = 0$. Iš čia $s^l = 2s$, kas reiškia, kad pagal lygtį (14), aušinimo laikas padidėja keturis kartus.

1.7. Aušinimo sistemos projektavimas

Kokybiškiau pagaminta plastikų liejimo forma yra ta, kurios eksploatacijos metu, po išlydyto plastiko įpurškimo, staigiau ir tolygiau visame liejiminio kontūro plote pašalinamas mišinio suteiktas šilumos kiekis. Projektuodamas formuojančių įdėklų aušinimą, įrangos konstruktorius vadovaujasi keliais pagrindiniais principais:

1. Liejamas komponentas turi būti aušinamas tolygiai.
2. Liejimo forma turi kuo greičiau ataušti iki kito užpildymo ciklo.
3. Liejimo ciklo laikas privalo būti minimalus.

Aušinimo sistemos projektavimas svarbus ne tik ekonominiu, bet ir liejamos produkcijos kokybės atžvilgiu. Kuo didesnis atstumas tarp užpylimo lizdo kontūro ir aušinimo linijos (1.9 pav., a parametras), tuo tolygiau aušinamas ir tuo daugiau įpurškimo metu įkaista įdėklas. Kuo mažesnis atstumas tarp užpylimo lizdo kontūro ir aušinimo linijos, tuo efektyviau ir greičiau pašalinama išlydyto plastiko šiluma. Tačiau pastaruoju atveju galimi lizdo paviršiaus temperatūriniai svyravimai, kas nulemia liejamos produkcijos deformacijas. Parametras b (1.9 pav.), atstumas tarp aušinimo kanalų centrų, turi įtakos temperatūros tolygumui įdėkle bei priklauso nuo aušinimo kanalo skersmens, liejamo komponento geometrijos ir jo sienelės storio (Lin 2002: 228–229).



1.9 pav. Aušinimo sistemos parametrų parinkimas (sudaryta autoriaus remiantis Lin 2002: 229)

Aproksimacinis terminis projektavimas

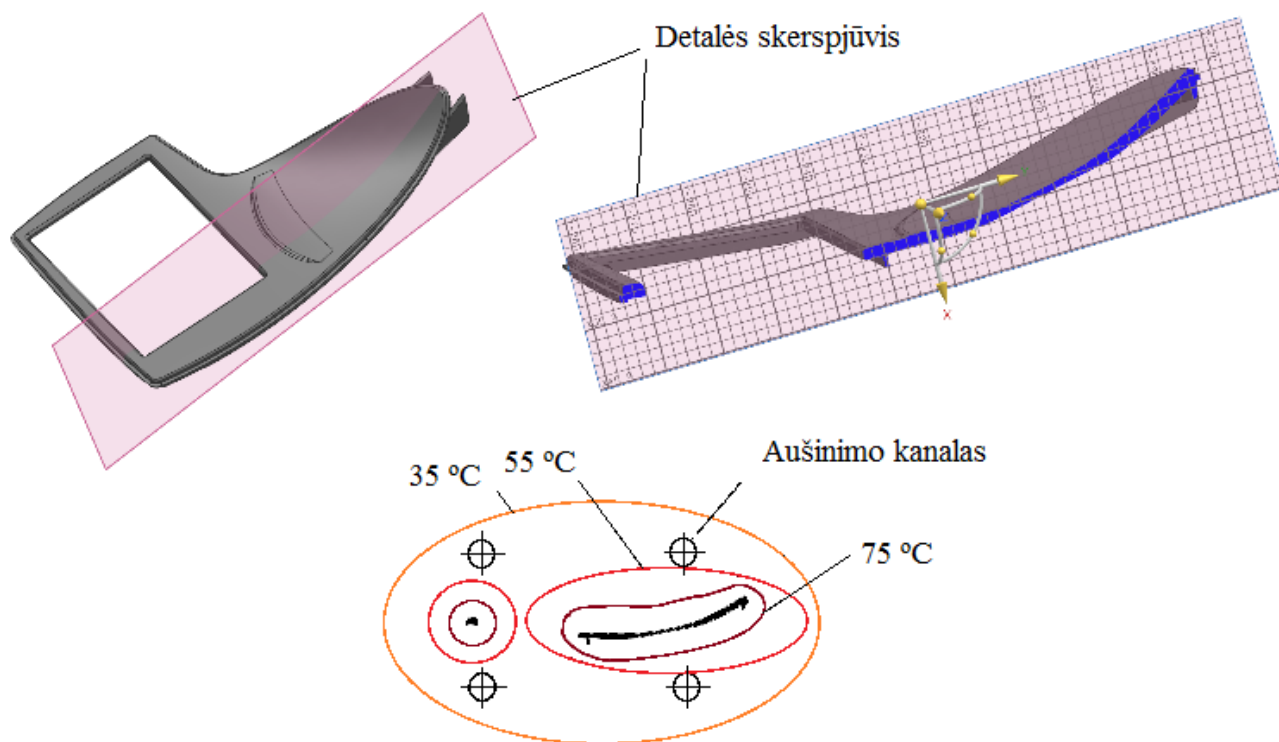
Paprasčiausias yra aproksimacinis terminis projektavimas, sudarytas iš šešių pagrindinių žingsnių, vykdomų paeiliui:

1. Aušinimo laiko apskaičiavimas, atsižvelgiant į komponento formą (tinka tik paprastos geometrinės formos detalės: plokštumoms, cilindrams, sferoms ir kubams).
2. Šilumos balanso nustatymas (kiek šilumos liejimo formai suteikiama, tiek pat turi būti jos pašalinta aušinant).
3. Aušinimo skysčio debeto per ciklą apskaičiavimas.
4. Aušinimo kanalo skersmens apskaičiavimas, esant $Re > 2300$.
5. Aušinimo linijos nustatymas, atsižvelgiant į temperatūros pasiskirstymo tolygumą.
6. Aušinimo skysčio tiekimo slėgio apskaičiavimas (Mennig 1998: 494–495).

Dvimatis aušinimo sistemos projektavimas

Tikslesniam aušinimo sistemos projektavimui taikomas dvimatis metodas, kurį aprašė mokslininkas B. Waschulewski's. Dvimatis metodas paremtas White'o–Metzner'io modeliu, aiškinančiu, kad liejimo formoje skysto plastiko temperatūros ir tekėjimo greičio pasiskirstymą nulemia ne jo klampa, o jame susidarantys įtempiai (Mennig 1998: 496).

Sutinkamos kelios dvimačio aušinimo sistemos projektavimo programos: „Micropus–T“, „C–Flow“, „Mold–Flow“. Išvardytoje programinėje įrangoje tiriamas liejamo komponento atitinkamas skerspjuvis, kuris suskirtomas baigtiniais elementais (Mennig 1998: 497–498). Atsižvelgiant į viskoelastiškumo sąlygą, baigtinių elementų metodu apskaičiuojamas temperatūros pasiskirstymas, aušinimo linijos atstumas nuo komponento kontūro bei kanalų skersmenys (1.10 pav.).



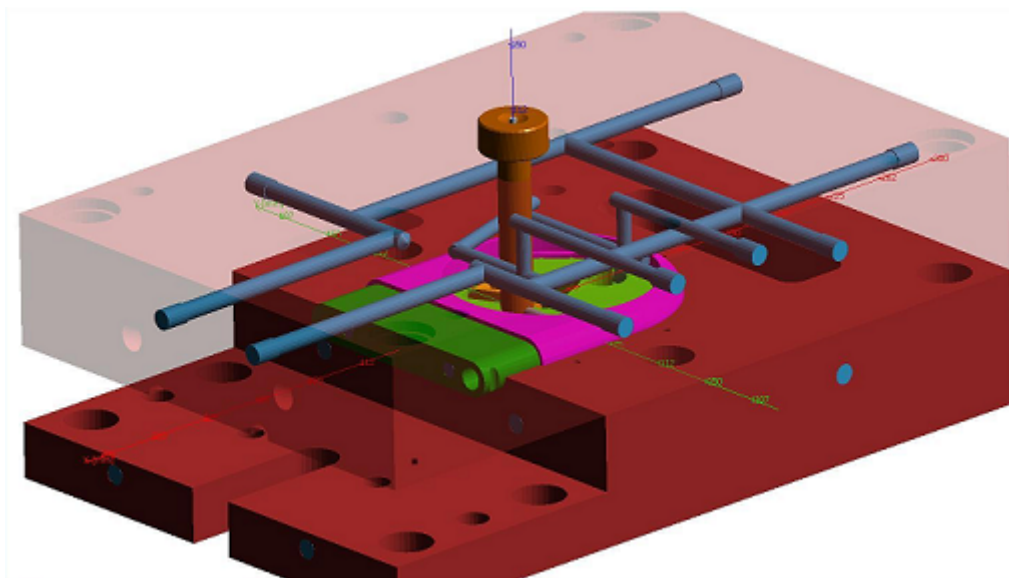
1.10 pav. Dvimatis aušinimo sistemos projektavimas

Projektavimo metodas netinka sudėtingą geometriją turinčių komponentų aušinimui aprašyti, kadangi tenka ištirti daug skerspjūvių bei suskirstyti juos baigtiniais elementais. Projektavimas užtrunka ilgą laiko tarpą, kas nėra pageidaujama, ypač jeigu projektas yra skubus.

Integralinių ribų metodas

Mūsų dienomis sutinkamas vis sudėtingesnės geometrijos plastikinės detalės. Šių detalių liejimo formų optimaliam aušinimui apskaičiuoti netinka iki šiol minėti projektavimo metodai, kadangi jie per daug supaprastina šilumos pasiskirstymą įdėkluose. Šiuo atveju aušinimo sistema projektuojama panaudojant integralinių ribų metodą, tiriant komponentą trimačiame lygmenyje (1.11 pav) (Mennig 1998: 498–500).

Pirmieji mėginimai apskaičiuoti aušinimo sistemą integralinių ribų metodu buvo atlikti mokslininkų M. R. Barone'o ir D. A. Caulk'o. Labiausiai šią metodiką išplėtojo mokslininkas M. Prox'as, kurio sukurtas sudėtingas matematinis algoritmas buvo pritaikytas aušinimo modeliavimo programose (pvz., „SigmaSoft“). Programinėje įrangoje, pagal liejamo komponento trimatį modelį, tiriamas šilumos pasiskirstymas įdėkluose, parenkami optimalūs aušinimo kanalų skersmenys bei kanalų išsidėstymas (1.11 pav.).



1.11 pav. Trimatis aušinimo sistemos projektavimas (sudaryta autoriaus remiantis SIGMA Engineering GmbH)

Programinė įranga leidžia pakankamai tiksliai nustatyti optimalius aušinimo sistemos parametrus, tačiau ji yra brangi ir jos taikymas projektavime reikalauja specialisto, galinčio tiksliai dirbti su pastarąja programa. Turint omenyje, kad atliekamas tik teorinis optimizavimas, tokios programinės įrangos naudojimas gamyboje gali būti netikslingas ekonominiu ir laiko atžvilgiu.

Neuroninių tinklų metodas

Neuroninių tinklų metodas, aprašytas mokslininko J. C. Lin (2002: 226–236), susieja įpurškimo proceso parametrus su aušinimo sistemos parametrais. Taikant šią metodiką, gali būti tiksliai nustatomas gaminio susitraukimas po įpurškimo ir formavimo.

Metodo principas:

1. Įėjimo duomenys – aušinimo sistemos parametrų parinkimas (tarpo tarp aušinimo linijos ir liejiminio kontūro, tarpų tarp aušinimo kanalų, kanalų skersmenų).
2. Optimizacinis algoritmas – komponento mažiausio susitraukimo ir mažiausių deformacijų apskaičiavimas prie atitinkamų aušinimo parametrų.
3. Išėjimo duomenys – komponento susitraukimo ir optimalių aušinimo parametrų apskaičiavimas.

Kaip ir baigtinių elementų metodikoje, neuroninių tinklų metodas paremtas sudėtingos sistemos suskaidymu į mažesnes ir paprastesnes posistemes pagal polinominius funkcinius mazgus, kurios papildomai suskirstomos į atskirus sluoksnius.

Polinominiai funkciniai mazgai yra šie:

1. Normalizavimas – įėjimo duomenų apibendrinimas (Lin 2002: 228):

$$a_1 = q_0 + q_1 x_1; \quad (16)$$

čia a_1 – normalizuoti įėjimo duomenys;

q_0 ir q_1 – normalizavimo koeficientai;

x_1 – originalūs įėjimo duomenys.

2. Baltasis mazgas – sluoksnio visų išėjimo duomenų linijinių svorių suma (Lin 2002: 228):

$$b_1 = r_0 + r_1 y_1 + r_2 y_2 + r_3 y_3 + \dots + r_n y_n; \quad (17)$$

čia y_1, y_2, y_3, y_n – sluoksnio įėjimo duomenys;

b_1 – mazgo išėjimo duomenys;

r_0, r_1, r_2, r_3, r_n – trigubo mazgo koeficientai.

3. Viengubas c_1 , dvigubas d_1 ir trigubas e_1 mazgas (Lin 2002: 228):

$$c_1 = s_0 + s_1 z_1 + s_2 z_1^2 + s_3 z_1^3; \quad (18)$$

$$d_1 = t_0 + (t_1 n_1 + t_2 n_1^2 + t_3 n_1^3) + (t_4 n_2 + t_5 n_2^2 + t_6 n_2^3) + (t_7 n_1 n_2); \quad (19)$$

$$e_1 = u_0 + (u_1 o_1 + u_2 o_1^2 + u_3 o_1^3) + (u_4 o_2 + u_5 o_2^2 + u_6 o_2^3) + (u_7 o_3 + u_8 o_3^2 + u_9 o_3^3) + u_{10} o_1 o_2 + u_{11} o_2 o_3 + u_{12} o_1 o_3 + u_{13} o_1 o_2 o_3; \quad (20)$$

čia $z_1, z_2, z_3, z_n; n_1, n_2, n_3, n_n; o_1, o_2, o_3, o_n$ – sluoksnio įėjimo duomenys;

$s_1, s_2, s_3, s_n; t_0, t_1, t_2, t_3, t_n; u_0, u_1, u_2, u_3, u_n$ – viengubo, dvigubo ir trigubo mazgo koeficientai;

c_1, d_1, e_1 – mazgų išėjimo duomenys.

4. Apjungiantysis mazgas – išėjimo duomenis paverčia į realius išėjimo duomenis (Lin 2002: 228):

$$f_1 = v_0 + v_1 i_1; \quad (21)$$

čia i_1 – tinklo išėjimo duomenys;

f_1 – realūs išėjimo duomenys;

v_0, v_1 – mazgo koeficientai.

Baigtinių elementų metodas

Šiame darbe baigtinių elementų metodas, kaip alternatyva integralinių ribų ir neuroninių tinklų metodui, bus naudojamas aušinimo sistemos projektavimui. Metodas paremtas keliais esminiais žingsniais:

1. Nustatoma plačiausia liejiminio kontūro sritis (1.9 pav.), kurioje atidedamas koordinačių centras.

2. Atsižvelgiant į liejiminį kontūrą ir pasirinktą koordinačių centrą, sudaromas aušinimo sistemos parametrų (aušinimo linijos padėties, atstumo tarp aušinimo kanalų, kanalų skersmenų) diapazonas.
3. Vykdomas optimaliausių aušinimo sistemos parametrų atrinkimas pagal aušinimo sistemos simuliacijos rezultatus „Autodesk Mold Flow“ programoje. Parametrų tinkamumas vertinamas pagal aušinimo ciklo ir liejamo komponento deformacijų reikšmes.

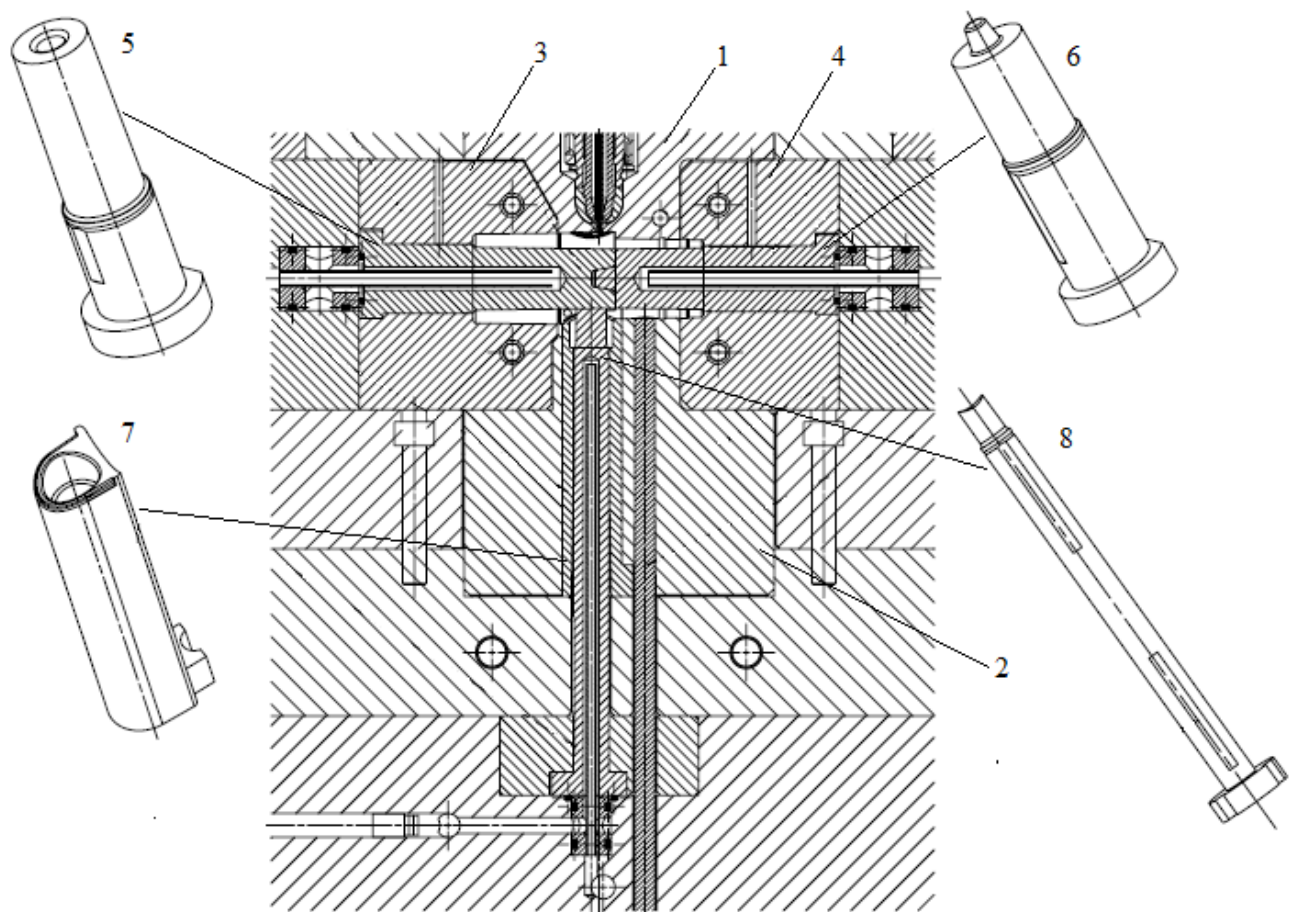
„Autodesk Mold Flow“ programoje liejamo komponento trimatis modelis automatiškai suskirstomas baigtiniais elementais, todėl detalės teoriniam aušinimo ciklo ir deformacijų įvertinimui užtenka įvesti aušinimo sistemos parametrų reikšmes. Mažesnės gaminio deformacijos ir trumpesnis aušinimo ciklas nulemia aušinimo sistemos parametrų tinkamumą. Tokiu būdu sugeneruoti optimalaus aušinimo parametrai toliau naudojami formuojančių įdėklų aušinimo sistemos projektavimui „Unigraphics NX 8.5“ programinėje aplinkoje.

2.2. Aproximacinio terminio projektavimo veiksmų taikymas

Liejimo formos projektavimo metu įvertinamas medžiagos susitraukimas, todėl liejimo lizdo matmenys dauginami iš 1,018 susitraukimo koeficiento. Atsižvelgiant į gaminio geometriją, centrinė komponento dalis formuojama nejudančiame ir judančiame įdėkluose (atitinkamai pozicijos 1 ir 2), jungtys – šliaužiklių įdėkluose (pozicijos 3 ir 4), apatinė mažoji jungtis – formuojančiame ženkle (pozicija 7) (2.2 pav.). Liejimo lizdo komponentai 1, 2, 3, 4 ir 7 formuoja išorinius komponento paviršius, o komponentai 5, 6 ir 8 – vidinius paviršius. Komponentai 5, 6 ir 8 tvirtinami šliaužikliuose bei vadinami formuojančiais ženklais (angl. *core*).

Remiantis 2.2 paveiksle pateiktu liejimo lizdo planu, iš anksto galima pritaikyti kelis aproximacinio terminio projektavimo veiksmus:

1. Gaminio vidus formuojamas trimis ženklais, todėl jie aušinami tradiciniu būdu, „fontanais“ (2.2 pav.). Šliaužikliuose įtvirtintuose ženkluose, įvertinant sienelių atsargą nuovargiui ir riziką galimam įskilimui, išgręžiami 6 mm diametro kanalai, į kuriuos įkišami „fontanai“. Mažesnę jungtį formuojančiame ženkle išgręžiamas 4 mm skersmens kanalas, kuriame taip pat įrengiamas „fontanas“.
2. Jungčių išoriniai paviršiai formuojami šliaužikliuose (2.2 pav.) ir jų aušinimo projektavimas paremtas baigtinių elementų metodu. Visgi aušinimo išvedžiojimą šliaužikliuose apriboja vietos stoka, t. y. dėl tvirtinimo ir centravimo elementų neįmanoma visiškai identišškai pagal teorinį modelį išgręžti aušinimo kanalų.
3. Būtina suprojektuoti efektyvų gaminio jungčių aušinimą. Jungčių matmenys (žiūrėti 2.1 paveiksle matmenis $\varnothing 7,6 \pm 0,04$ mm ir $\varnothing 15,47 \pm 0,04$ mm) po gaminio formavimo turi išlikti nustatytos tolerancijos ribose.
4. Aušinimo sistemos sudarymą judančiame įdėkle įtakoja išstūmimo sistema, todėl čia irgi sudėtinga tiksliai atkartoti teorinį aušinimo modelį.
5. Nejudančiame įdėkle yra karšto liečio sistemos vožtuvinis purkštukas (2.2 pav.), per kurį tiekiamas skystas plastikas į liejimo lizdą, todėl projektuojant įdėklo aušinimą svarbu įvertinti įkaitusio purkštuko skleidžiamą šilumą. Aušinimo kanalo padėtis turi užtikrinti liejimo lizdo ir įkaitusio purkštuko aušinimą.
6. Dėl aušinimo tolygumo, judančiame ir nejudančiame įdėkle aušinimo kanalų skersmenys turi būti vienodi, o kanalai išdėstyti simetriškai liejimo lizdo atžvilgiu. Kanalų asimetriškumas gali sukelti papildomas produkto deformacijas, kas galiausiai nulems gaminio kokybės neatitikimą.



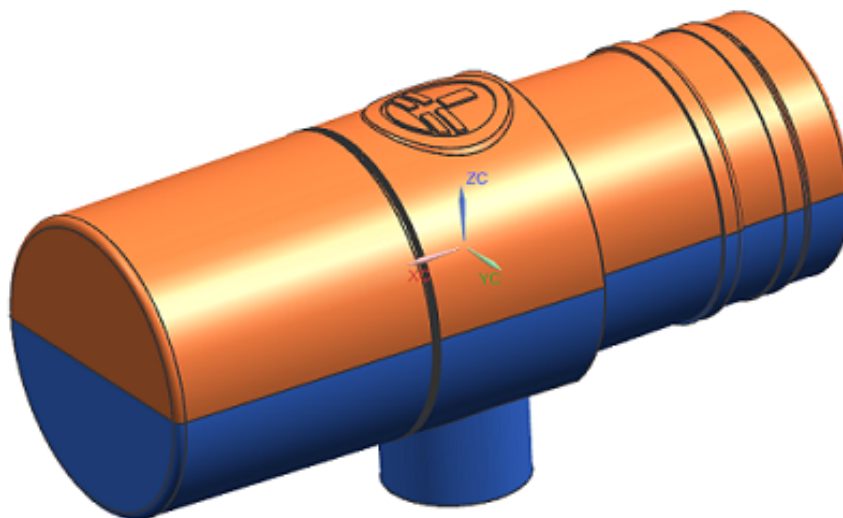
2.2 pav. Liejimo lizdo skerspjūvis: 1 – nejudantis formuojantis įdėklas; 2 – judantis formuojantis įdėklas; 3, 4 – šliaužiklių įdėklai; 5, 6, 7, 8 – formuojantys ženklai

Kituose darbo poskyriuose nagrinėjamas judančio ir nejudančio įdėklo (pozicijos 1 ir 2) bei iš dalies šliaužiklių (pozicijos 3 ir 4) aušinimo projektavimas, panaudojant baigtinių elementų metodą. Būtent aproksimacinio terminio ir baigtinių elementų metodo projektavimo veiksmams sudaro teorinį aušinimo modelį, kurio simuliacija bus atliekama „Autodesk Mold Flow“ programinėje aplinkoje.

2.3. Aušinimo sistemos projektavimas baigtinių elementų metodu

Aušinimo sistemos projektavimas baigtinių elementų metodu pradedamas nuo tiriamojo produkto suskirstymo į viršutinę ir apatinę dalis. Dalimis skirstoma pagal skyrimo liniją (2.3 pav.): viršutinė komponento dalis atitinka nejudančio įdėklo geometriją (2.3 pav. pažymėta oranžine spalva), apatinė – judančio įdėklo geometriją (2.3 pav. pažymėta mėlyna spalva). Nesudėtinga pastebėti, kad komponento forma yra cilindriška, todėl teorinis aušinimo sistemos projektavimas bus atliekamas detalės plačiausiam apvaliam skerspjūviui. Plačiausioje produkto vietoje apvalaus skerspjūvio spindulys lygus $R \approx 11,71$ mm. Mažojo porto geometrija nėra įtraukiama į aušinimo

projektavimą, kadangi pastarosios jungties aušinimas nustatytas aproksimaciniu terminiu projektavimu, aprašytu 2.2. poskyryje.



2.3 pav. Komponento suskirstymas į viršutinę ir apatinę dalis pagal skyrimo liniją

Aušinimo sistemos projektavimas apima kelis veiksmų etapus:

1. Aušinimo sistemos parametrų diapazono sudarymas pagal numatytus techninius reikalavimus.
2. Optimalios aušinimo sistemos nustatymas (viso diapazono patikrinimas „Autodesk Mold Flow“ programoje).
3. Optimalios aušinimo sistemos parametrų pritaikymas formuojančių įdėklų projektavimui „Unigraphics NX 8.5“ programinėje aplinkoje.

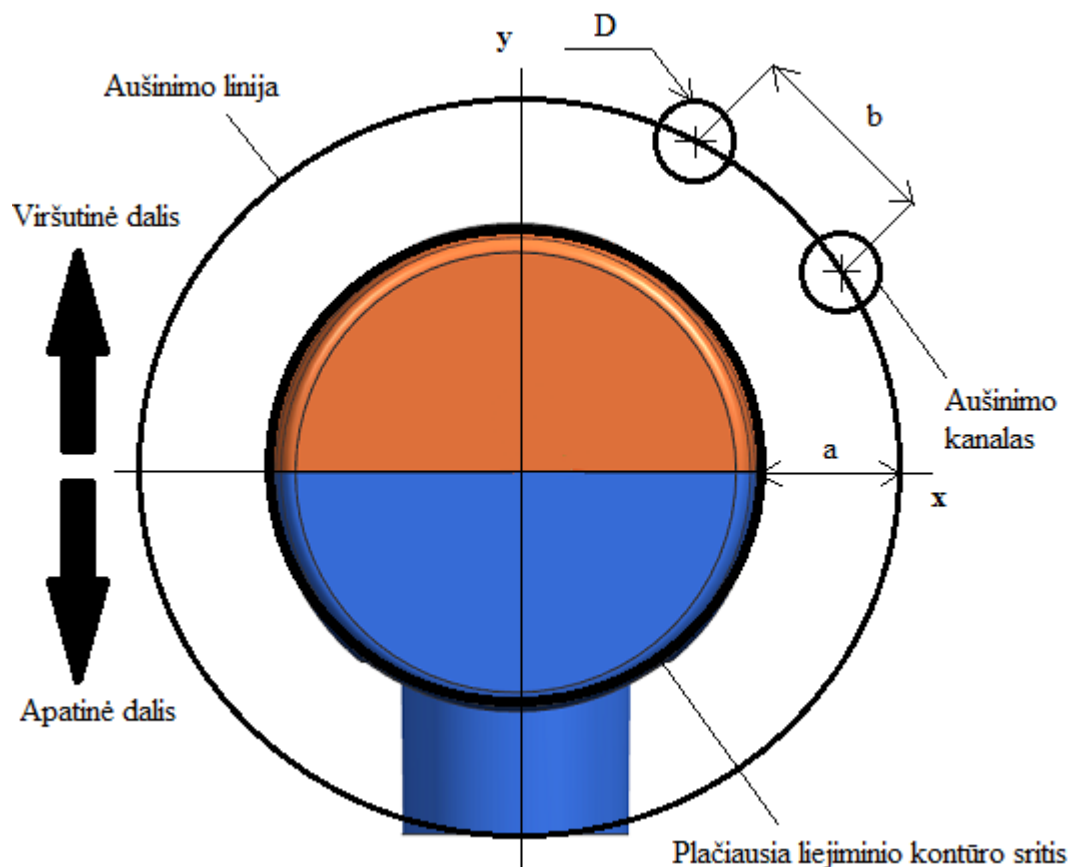
Techniniai reikalavimai diapazono sudarymui

2.4 pav. pažymėta plačiausia komponento sritis. Svarbu teisingai pasirinkti atskaitos tašką, pagal kurį bus nustatomi aušinimo parametrai. Šiuo atveju koordinačių centru taisyklingiausia būtų pasirinkti detalės ašyje esantį centrą.

Parametras a (2.4 pav.), tarpas tarp liejiminio kontūro ir aušinimo linijos, yra skirtingas viršutinei ir apatinei dalims dėl 2.2. poskyryje išvardintų priežasčių. Parametras a kinta ribose $1,5D - 1 \text{ mm} \leq a \leq 1,5D + 2 \text{ mm}$ (žr. 1.5. poskyrį).

Parametras b , atstumas tarp aušinimo kanalų, viršutinei ir apatinei daliai taip pat vertinamas atskirai. Pagrindinis reikalavimas šiam parametru yra $b \geq 2D$.

Parametro D , aušinimo kanalo skersmens, galimos variacijos aprašytos 1.5. poskyryje. Dėl formuojančių įdėklų geometrijos ir technologinių sprendimų, viršutinėje ir apatinėje dalyje kanalų skersmuo kinta nuo 4 mm iki 6 mm.



2.4 pav. Aušinimo sistemos parametrų diapazono sudarymo schema

Optimalios aušinimo sistemos nustatymas

2.1 lentelėje pateiktas aušinimo sistemos parametrų diapazonas, sudarytas iš 48 skirtingų kombinacijų. Kombinacijos suformuotos remiantis 2.4 pav. pateikta schema bei atsižvelgiant į techninius reikalavimus, keliamus diapazono sudarymui. Visos 48 aušinimo sistemos parametrų kombinacijos patikrintos „Autodesk Mold Flow“ programoje; atlikus simuliacijas, gauti teoriniai komponento deformacijos ir aušinimo ciklo t_c rezultatai. Remiantis simuliacijų rezultatais, sudaryti teoriniai priklausomybių grafikai: komponento deformacijos priklausomybės nuo atstumo tarp liejininio kontūro ir aušinimo linijos (a parametras) grafikas (2.5 pav.); aušinimo ciklo t_c priklausomybės nuo atstumo tarp liejininio kontūro ir aušinimo linijos grafikas (2.6 pav.).

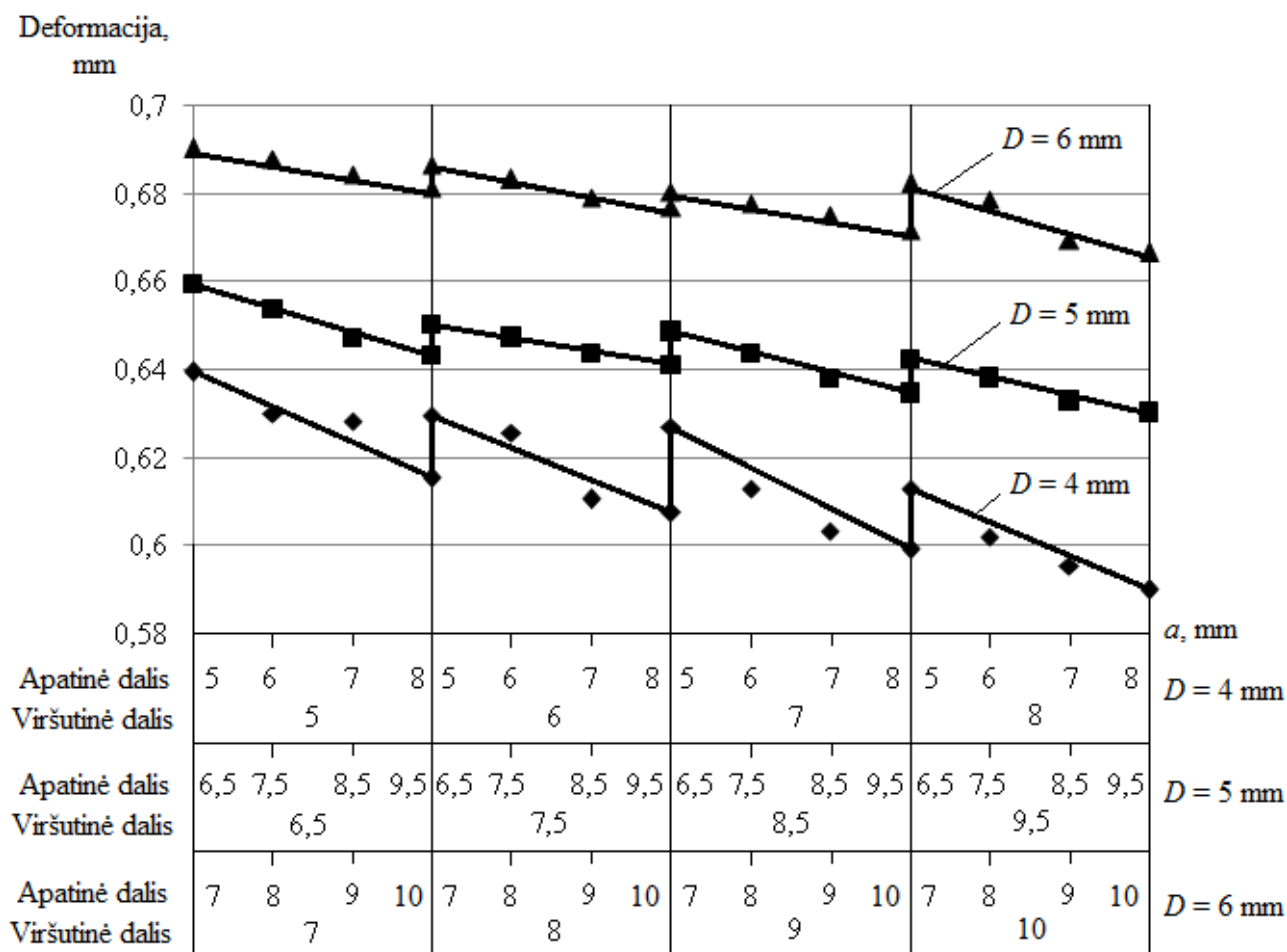
Atsižvelgiant į 2.1 lentelės duomenis ir 2.5–2.6 paveiksluose pateiktus grafikus, išrenkama viena tinkamiausia kombinacija formuojančių įdėklų trimačiam projektavimui. Aušinimo parametrų kombinacijos išrinkimo kriterijai: trumpas aušinimo ciklas t_c ; maža komponento deformacija (neviršijanti leistinų tolerancijos ribų, parodytų 2.1 paveiksle); aušinimo kanalų išsidėstymas (pakankama sienelių storių atsarga, apsauganti nuo įdėklo įskilimo vykstant temperatūriniais pokyčiams).

2.1 lentelė. Aušinimo sistemos parametrų diapazonas

Bandymo Nr.	D, mm	Viršutinė dalis		Apatinė dalis		Aušinimo trukmė t_c , s	Komponento deformacija, mm
		a, mm	b, mm	a, mm	b, mm		
1.	4	5	23,5	5	31	13,7	0,6395
2.	4	5	23,5	6	32	13,9	0,6301
3.	4	5	23,5	7	33	14,2	0,6282
4.	4	5	23,5	8	34	14,5	0,6153
5.	4	6	24,8	5	31	14,0	0,6295
6.	4	6	24,8	6	32	14,4	0,6256
7.	4	6	24,8	7	33	14,8	0,6105
8.	4	6	24,8	8	34	15,0	0,6074
9.	4	7	25,5	5	31	14,3	0,6270
10.	4	7	25,5	6	32	14,6	0,6128
11.	4	7	25,5	7	33	15,2	0,6033
12.	4	7	25,5	8	34	15,4	0,5991
13.	4	8	26,9	5	31	14,6	0,6128
14.	4	8	26,9	6	32	15,1	0,6019
15.	4	8	26,9	7	33	15,5	0,5953
16.	4	8	26,9	8	34	15,7	0,5898
17.	5	6,5	25,2	6,5	32,5	12,1	0,6595
18.	5	6,5	25,2	7,5	33,5	12,4	0,6538
19.	5	6,5	25,2	8,5	34,5	12,7	0,6472
20.	5	6,5	25,2	9,5	35,5	13,2	0,6433
21.	5	7,5	26,2	6,5	32,5	12,5	0,6502
22.	5	7,5	26,2	7,5	33,5	12,8	0,6473
23.	5	7,5	26,2	8,5	34,5	13,3	0,6437
24.	5	7,5	26,2	9,5	35,5	13,6	0,6411
25.	5	8,5	27,4	6,5	32,5	12,8	0,6487
26.	5	8,5	27,4	7,5	33,5	13,4	0,6435
27.	5	8,5	27,4	8,5	34,5	13,7	0,6378
28.	5	8,5	27,4	9,5	35,5	14,0	0,6346
29.	5	9,5	28,6	6,5	32,5	13,3	0,6422
30.	5	9,5	28,6	7,5	33,5	13,7	0,6381
31.	5	9,5	28,6	8,5	34,5	14,1	0,6329
32.	5	9,5	28,6	9,5	35,5	14,4	0,6302
33.	6	7	27	7	34	10,2	0,6903
34.	6	7	27	8	35	10,4	0,6879
35.	6	7	27	9	36	10,7	0,6845
36.	6	7	27	10	37	11,0	0,6813
37.	6	8	28,2	7	34	10,5	0,6867
38.	6	8	28,2	8	35	10,8	0,6834
39.	6	8	28,2	9	36	11,2	0,6793
40.	6	8	28,2	10	37	11,5	0,6769
41.	6	9	29,4	7	34	10,9	0,6805
42.	6	9	29,4	8	35	11,4	0,6778
43.	6	9	29,4	9	36	11,7	0,6751
44.	6	9	29,4	10	37	12,0	0,6716
45.	6	10	30,6	7	34	11,1	0,6824
46.	6	10	30,6	8	35	11,6	0,6786
47.	6	10	30,6	9	36	12,2	0,6695
48.	6	10	30,6	10	37	12,5	0,6667

Kanalų skersmuo lygus 6 mm lemia didžiausias gaminio deformacijas (žiūrėti grafike kreivę $D = 6$ mm). Nuokrypiai svyruoja nuo 0,6667 mm iki 0,6903 mm, atitinkamai mažinant a parametą viršutinėje ir apatinėje tiriamojo komponento dalyse. Aušinimo sistema su 5 mm skersmens kanalais leidžia atsirasti gaminio deformacijoms nuo 0,6302 mm iki 0,6595 mm. Mažiausi gaminio geometrijos išsikraipymai gaunami įvedus į „Autodesk Mold Flow“ programą aušinimo sistemos parametrus su 4 mm kanalų skersmeniu. Šiuo atveju deformacijos kinta nuo 0,5898 mm iki 0,6395 mm.

Didinant tarpą tarp liejiminio kontūro ir aušinimo linijos, mažėja aušinimo efektyvumas, leidžiantis temperatūrai tolygiai pasiskirstyti įdėkle. Vienodą poveikį aušinimo efektyvumui turi ir kanalo skersmens mažinimas. Temperatūros tolygumas įdėkle apsaugo gaminį nuo išsikraipymo ir galimo broko. Dėl šios priežasties, atsirenkant parametų kombinaciją, pirmenybė teikiama kreivei $D = 4$ mm (žiūrėti 2.5 paveikslą).

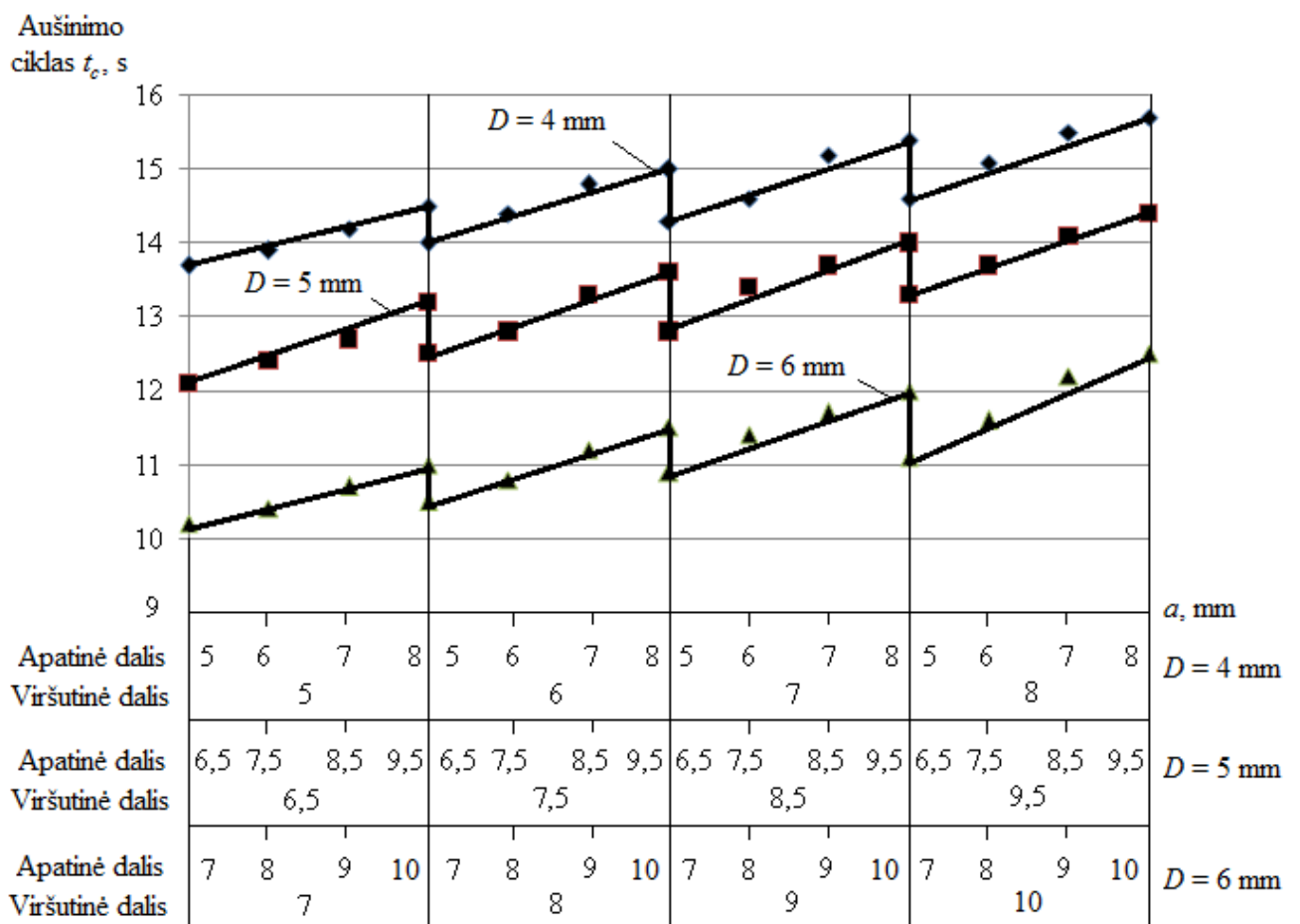


2.5 pav. Teorinė komponento deformacijos priklausomybė nuo atstumo tarp liejiminio kontūro ir aušinimo linijos

Atvirkščiai negu komponento deformacijų priklausomybės nuo a parametro atveju, 4 mm skersmens įdėklo kanalų sistema ilgiausiai aušina liejamą produktą, atitinkamai didėjant atstumui tarp liejiminio kontūro ir aušinimo linijos (žiūrėti 2.6 paveikslą). Laikas t_c svyruoja nuo 13,7 s iki 15,7 s. 5 mm skersmens kanalų sistema sutrumpina aušinimo ciklą t_c , pastarasis trunka nuo 12,1 s iki 14,4 s. Trumpiausias aušinimo ciklas pasiekiamas efektyviausiu aušinimu, kada sistemos kanalų skersmuo lygus 6 mm – ciklas kinta nuo 10,2 s iki 12,5 s.

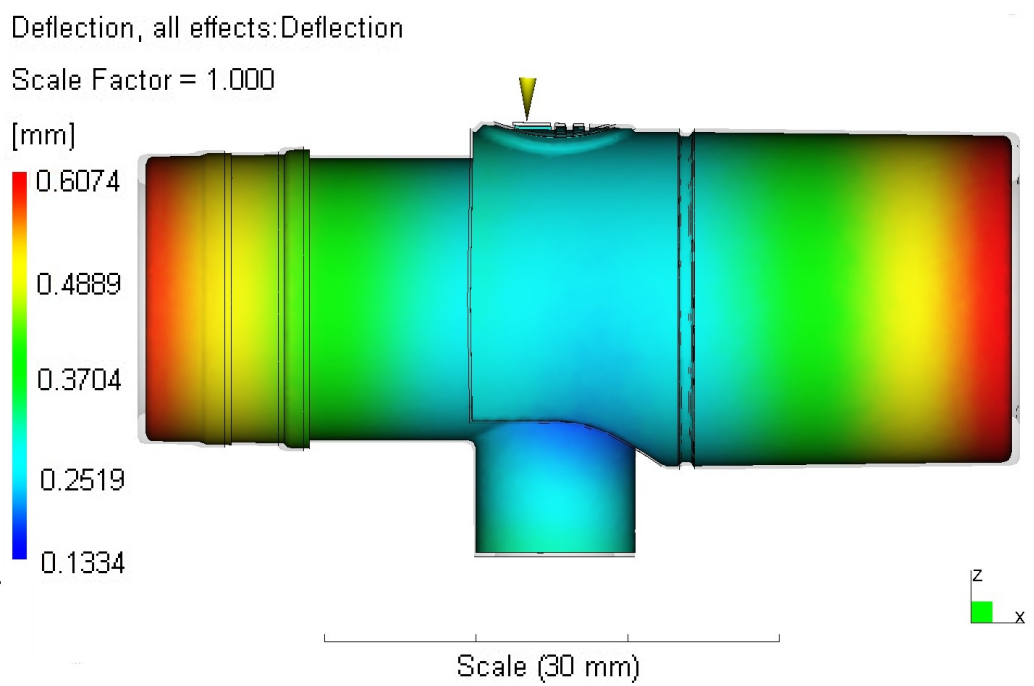
Tarpo tarp liejiminio kontūro ir aušinimo linijos mažinimas bei kanalo skersmens didinimas turi įtakos aušinimo ciklo trumpėjimui. Didesnis kanalo skersmuo užtikrina spartesnį šilumos mainų procesą tarp liejimo lizdo ir aušinimo sistemos. Šilumos mainų procesas taip pat intensyvėja mažinant a parametą.

Spartesnis šilumos mainų procesas leidžia atsirasti temperatūriniais skirtumams įdėklų tūryje, kas sąlygoja gaminio deformacijų atsiradimą. Renkantis aušinimo parametrų kombinaciją, tenka laviruoti tarp aušinimo ciklo ir gaminio deformacijų reikšmių, bandant atrasti optimaliausią aušinimo variantą.



2.6 pav. Teorinė aušinimo ciklo t_c priklausomybė nuo atstumo tarp liejiminio kontūro ir aušinimo linijos

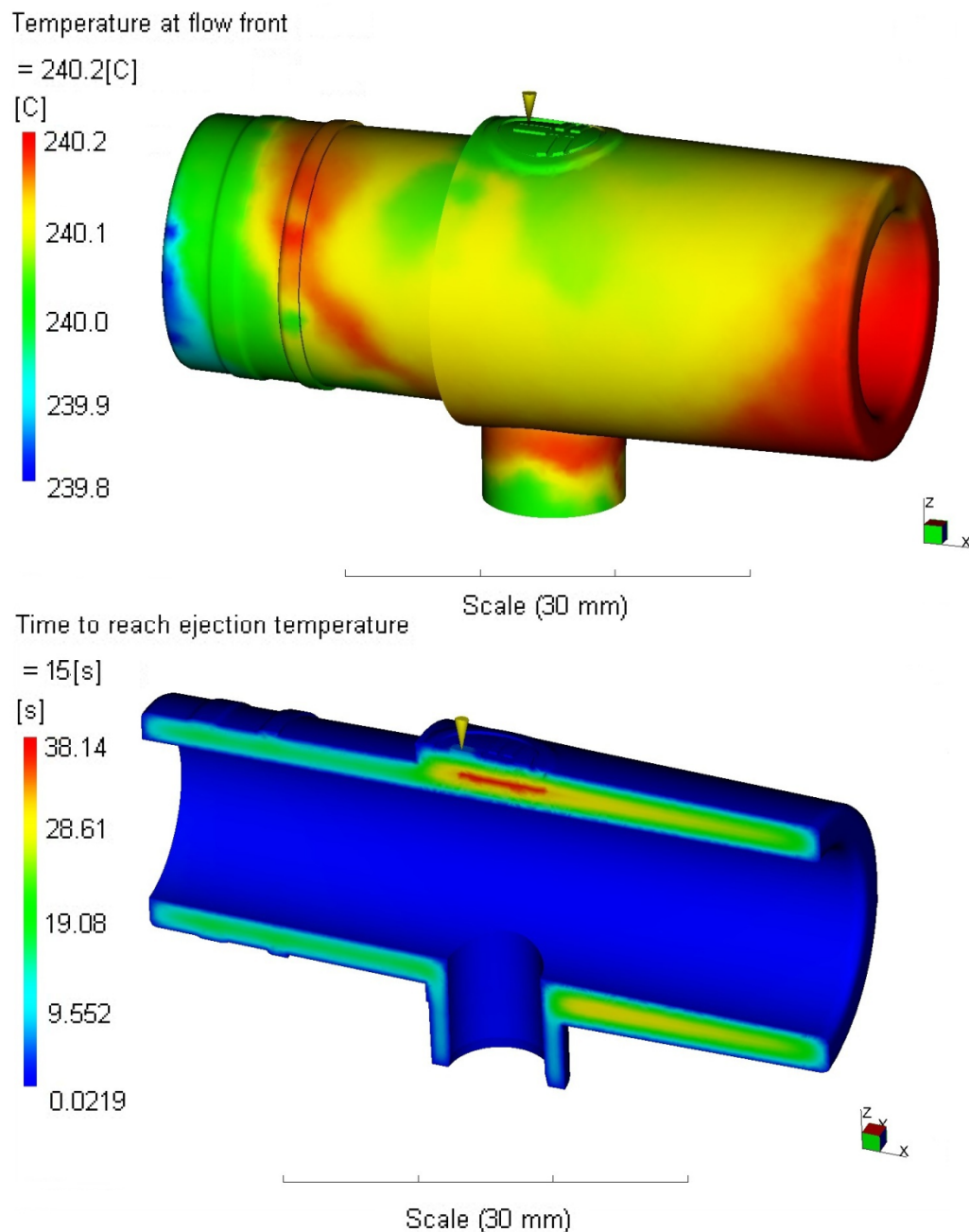
Išrinkta kombinacija Nr. 8 tolesniam formuojančių įdėklų projektavimui, nes esant pastarosios kombinacijos aušinimo parametrų, gaunama tinkama aušinimo trukmė $t_c = 15$ s ir maža komponento deformacija, lygi 0,6074 mm. Kombinacija Nr. 8 taip pat patogi technologiniu požiūriu, nes aušinimo linija, atstumas tarp aušinimo kanalų ir kanalų skersmuo suteikia galimybę išdėstyti stūmiklius pageidaujamose liejimo lizdo srityse, palikti pakankamus sienelių storius tarp aušinimo kanalų ir klasinių skylių.



2.7 pav. Komponento deformacijos simuliacija pagal aušinimo parametrų kombinaciją Nr. 8

2.7 paveiksle pateikta liejamo komponento deformacijos simuliacija „Autodesk Mold Flow“ programinėje aplinkoje, įvedus į programą kombinacijos Nr. 8 aušinimo parametrus. Labiausiai susitraukia išlieto komponento galai (paveiksle pažymėti raudona spalva). 0,6074 mm susitraukimas yra leistinas nuokrypis nuo nominalaus matmens, nurodyto 2.1 paveiksle. Mažiausiai išsikraipo komponento centrinė dalis (paveiksle pažymėta mėlyna spalva), čia deformacija svyruoja nuo 0,1334 mm iki 0,2519 mm.

Svarbiausia išlaikyti jungčių matmenų tolerancijas (2.1 paveiksle žiūrėti matmenis $\varnothing 7,6 \pm 0,04$ mm ir $\varnothing 15,47 \pm 0,04$ mm), nes priešingu atveju pagaminta detalė negalės būti sandariai sujungiama su kitu gaminiu. Remiantis simuliacijos rezultatais, galima teigti, kad intensyviausia deformacija vyksta x ašimi, todėl jungčių skersmenys yra paveikiami nežymiai, kas leidžia pastariesiems matmenims išlikti nustatytos tolerancijos ribose.

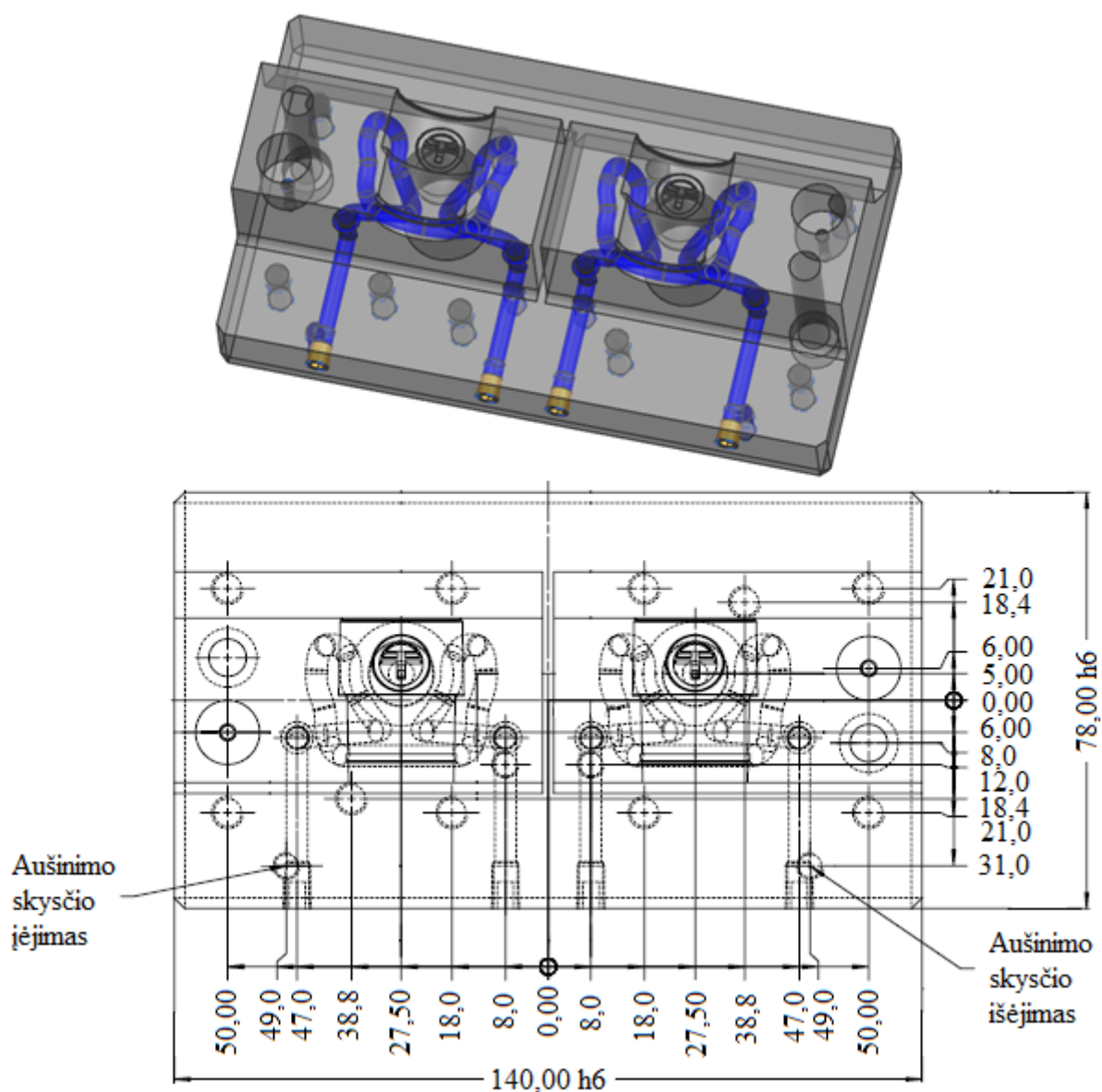


2.8 pav. Komponento aušinimo trukmės nustatymo simuliacija pagal aušinimo parametrų kombinaciją Nr. 8

2.8 paveiksle pavaizduota komponento aušinimo trukmės nustatymo simuliacija, atlikta pagal kombinacijos Nr. 8 aušinimo parametrus. Įpurkšto mišinio temperatūra liejimo lizde siekia 260,1 °C. Mišinio temperatūra visame liejimo lizde pasiskirsčiusi tolygiai (paveiksle pažymėta raudona spalva). Skiriasi tik jungties sritis, nes čia skystas plastikas spėja atvėsti iki 258,7 °C temperatūros (paveiksle pažymėta mėlyna spalva). Aušinimo metu plastiko kristalizacija storiausioje komponento sienelėje užtrunka 42,77 s po plastiko įpurškimo. Komponento išstūmimui tinkama temperatūra pasiekama po 15 s.

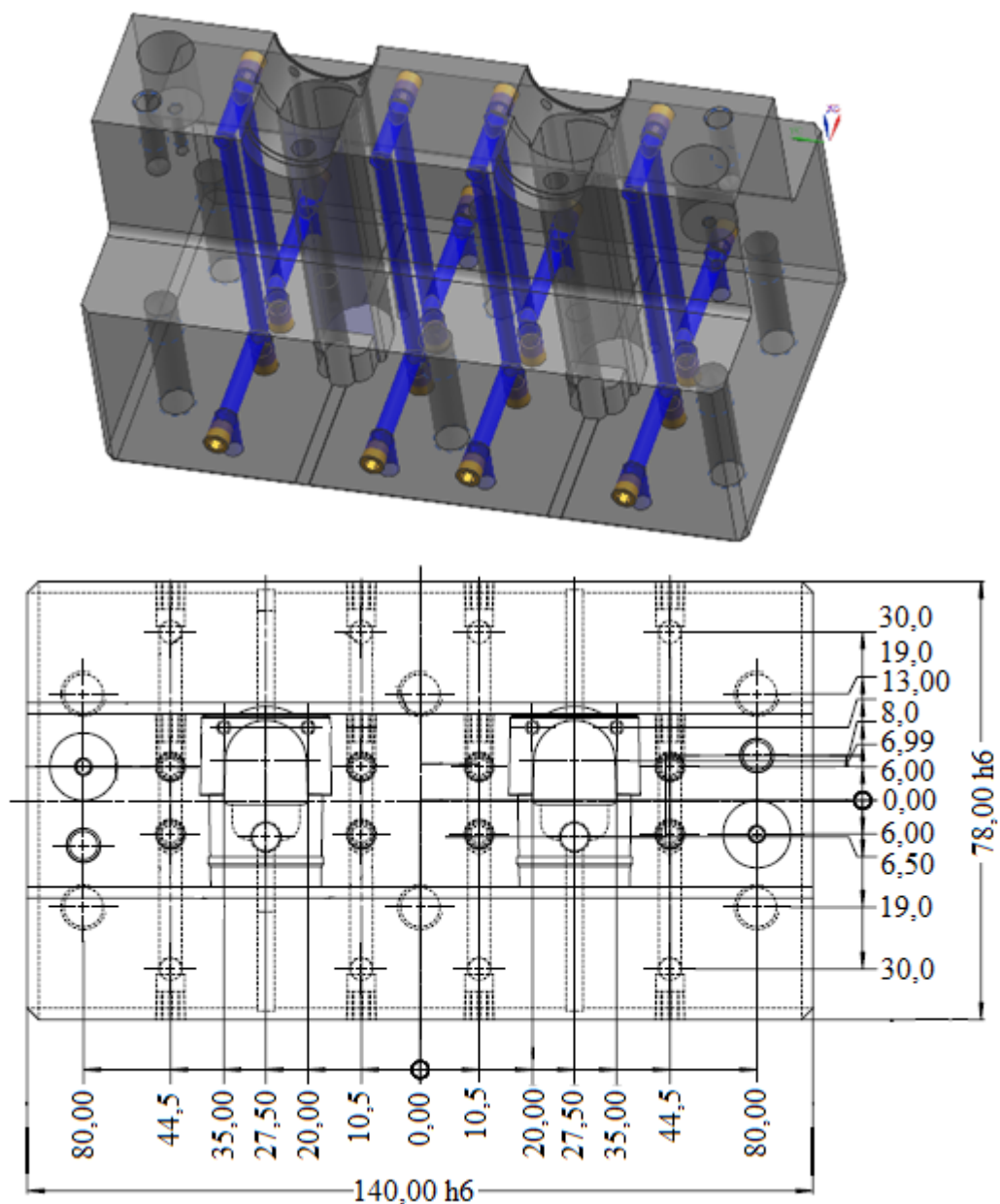
Formuojančių įdėklų projektavimas „Unigraphics NX 8.5“ programinėje aplinkoje

2.9 paveiksle pavaizduotas „Unigraphics NX 8.5“ programinėje aplinkoje suprojektuotas nejudantis formuojantis įdėklas. Aušinimo kanalai pažymėti mėlyna spalva. Dėl 2.2. poskyryje išvardintų priežasčių, kanalai yra sudėtingos formos, todėl jų neįmanoma padaryti įprastu gręžimu. Pastarojo formuojančio įdėklo gamybai bus naudojama 3D spausdinimo technologija, kuri leis atkartoti virtualioje aplinkoje suprojektuotą aušinimo sistemą. 3D spausdinimo technologijos brangumas leidžia ją taikyti tik išskirtiniais atvejais, kai neįmanomas apdirbimas tradiciniais būdais. Darbo brėžinio fragmente atvaizduotas klasikinių ir srieginių skylių išsidėstymas.



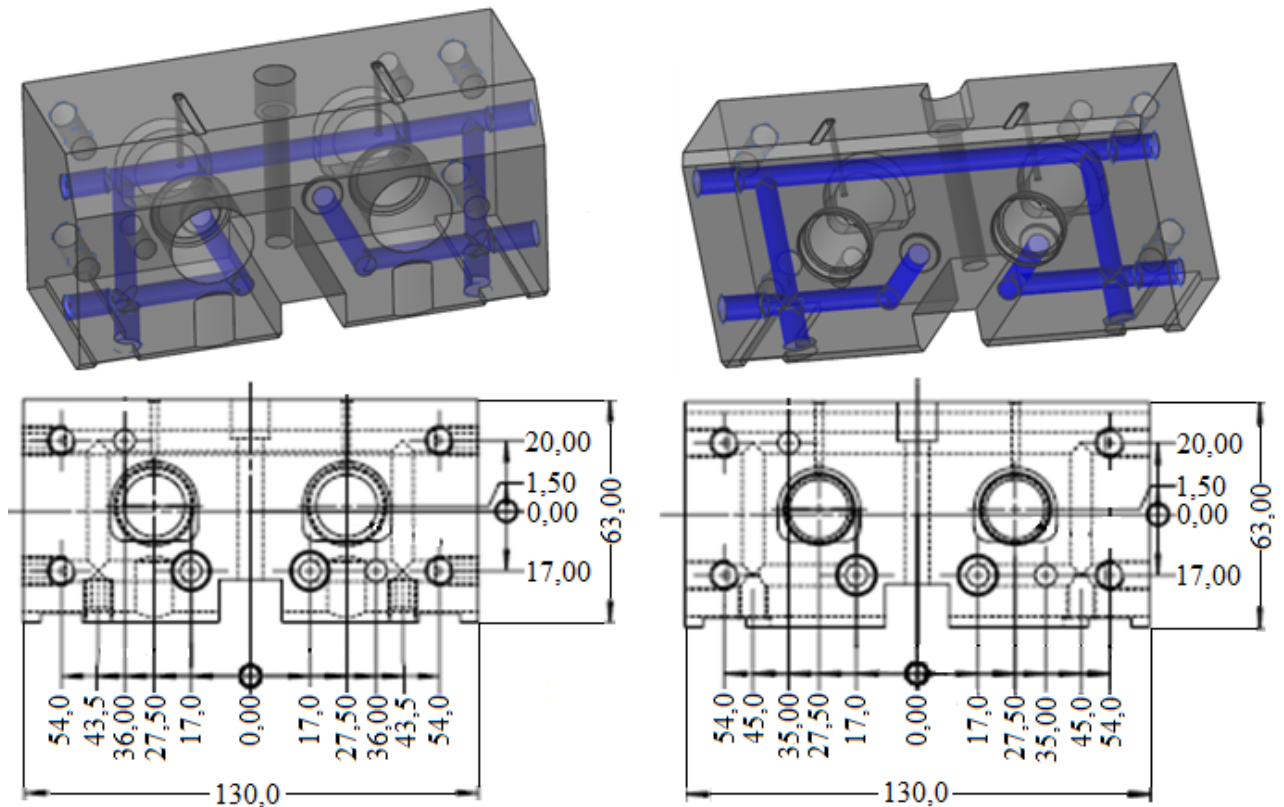
2.9 pav. Nejudančio formuojančio įdėklo modelis „Unigraphics NX 8.5“ programinėje aplinkoje ir jo darbo brėžinio fragmentas

2.10 paveiksle parodytas judančio formuojančio įdėklo trimatis modelis ir jo darbo brėžinio fragmentas. Aušinimo sistema įdėkle yra lygiagreti. Aušinimo kanalai išgręžiami standartiniu 4 mm skersmens grąžtu. Judančiame įdėkle nėra pozicionuojami karštų liečių purkštukai, todėl aušinimas vykdomas tik liejimo lizdams. Vanduo tiekiamas į įdėklą ir pašalinamas iš jo per liejimo formos apkaboje esančius kanalus. Vienas 8 mm skersmens kanalas užpildo vandeniu įdėklo keturis 4 mm skersmens lygiagrečius aušinimo kanalus.



2.10 pav. Judančio formuojančio įdėklo modelis „Unigraphics NX 8.5“ programinėje aplinkoje ir jo darbo brėžinio fragmentas

2.11 paveiksle pavaizduoti šliaužiklių įdėklų modeliai bei jų brėžinių fragmentai. Aušinimo sistema įdėkluose yra nuosekli. Dėl 2.2. poskyryje išvardintų priežasčių, aušinimo parametrai a , b ir D skiriasi nuo priimtų kombinacijos Nr. 8 parametrų. Parametras a yra lygus 8 mm, parametras D – 6 mm, parametro b įtaka nevertinama dėl nuoseklaus aušinimo. Kanalai išgręžiami standartiniu 6 mm skersmens grąžtu.



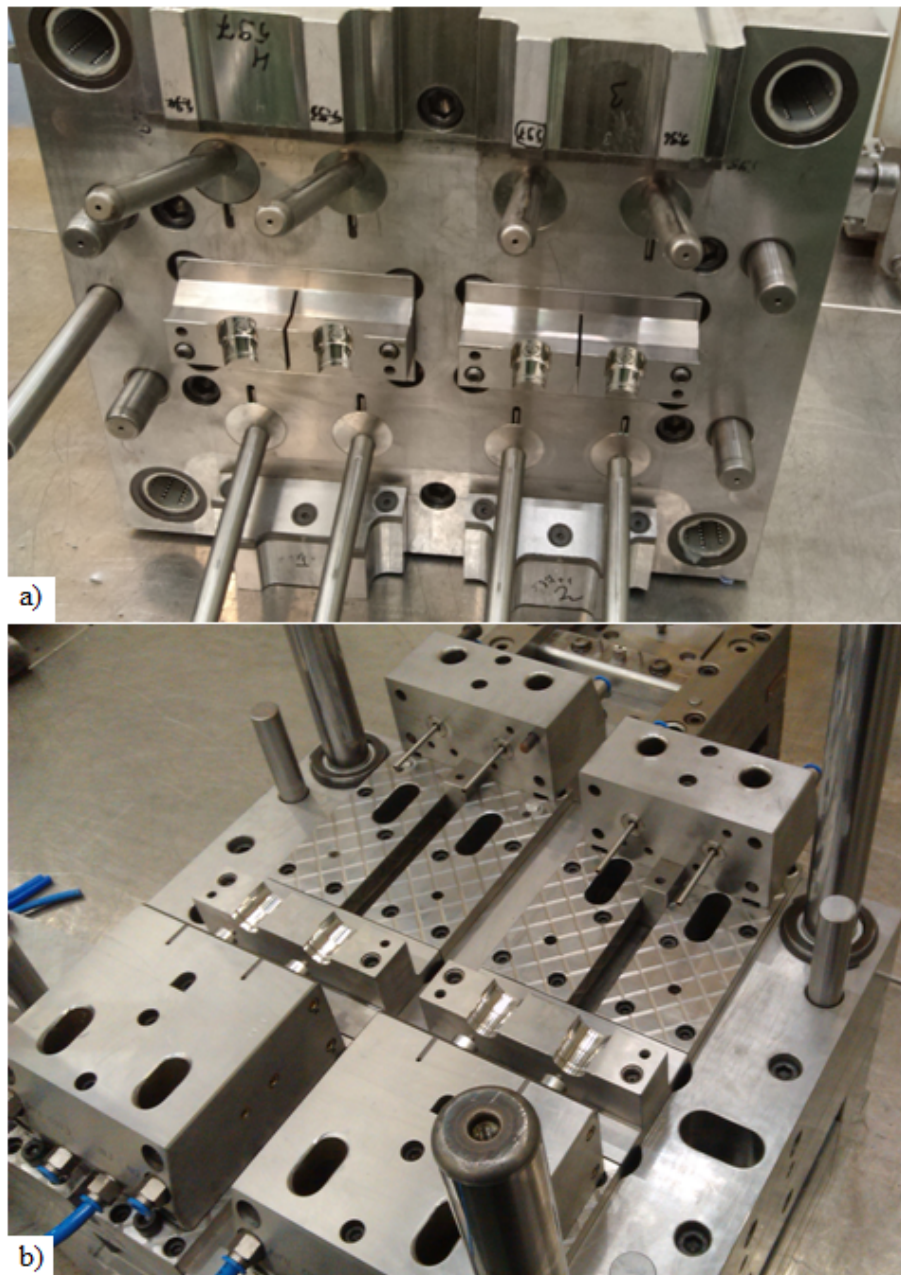
2.11 pav. Šliaužiklių įdėklų modeliai „Unigraphics NX 8.5“ programinėje aplinkoje ir jų darbo brėžinių fragmentai

Formuojančių įdėklų modelių sukūrimu užbaigiamas aušinimo sistemos projektavimas. Pagal įdėklų trimačius modelius ir jų darbo brėžinius toliau vykdoma liejimo formos formuojančių komponentų gamyba. Pagaminta ir surinkta liejimo forma išbandoma liejimo ceche. Kitame darbo skyriuje pateikiami liejimo formos bandymo rezultatai.

3. EKSPERIMENTO ATLIKIMAS

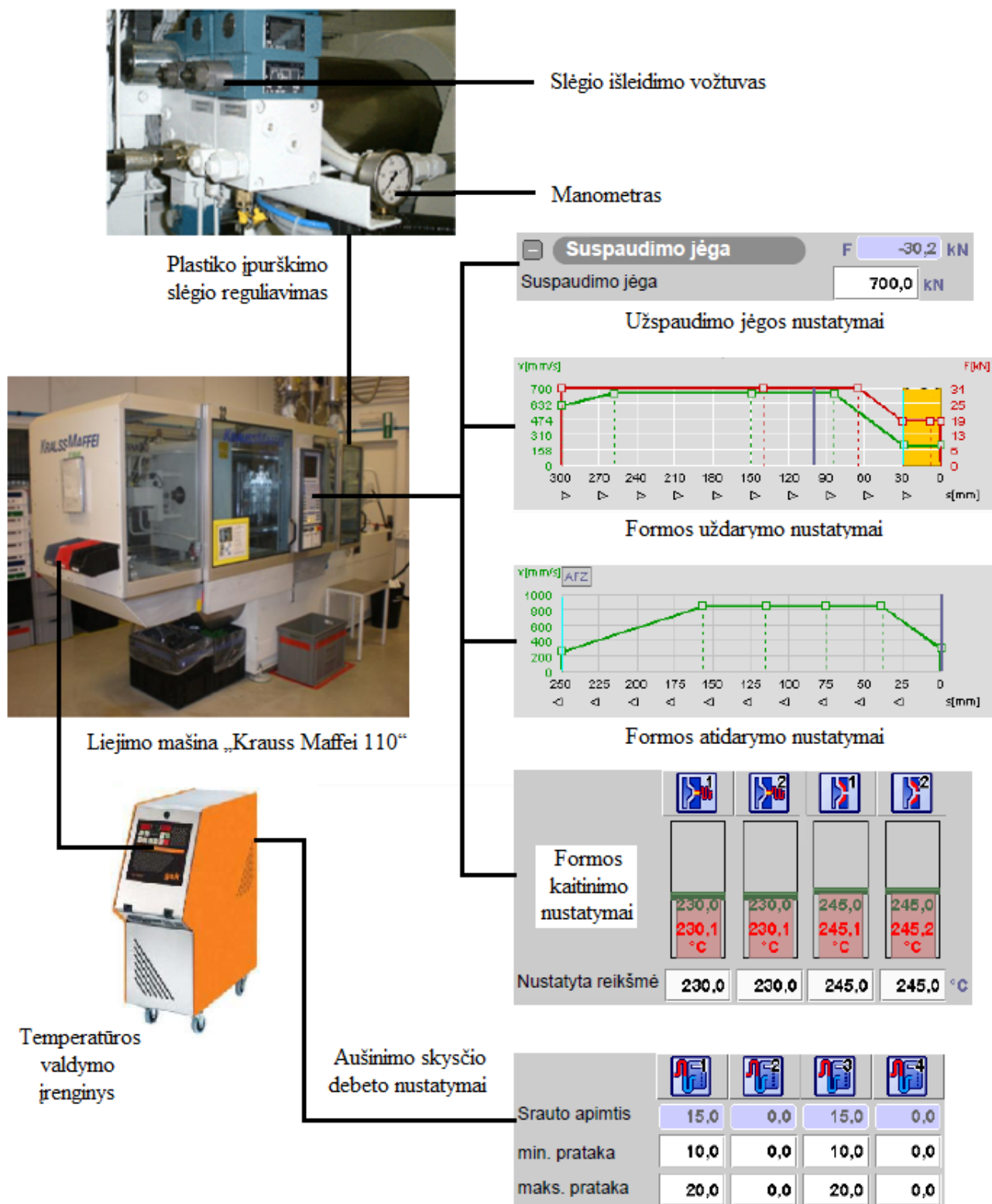
3.1. Eksperimento eiga

Surinkta liejimo forma parodyta nuotraukose (3.1 pav.). 3.1a pav. pavaizduoti nejudančioje formos pusėje įtvirtinti formuojantys įdėklai, kurių gamybai buvo naudojama 3D spausdinimo technologija. 3.1b pav. pateikta judančioji formos pusė, kurioje taip pat sumontuoti formuojantys įdėklai, ženklai ir šliaužikliai. Pagaminta liejimo forma gabenama į UAB „Intersurgical“ liejimo cechą bandymams. Formos bandymai atliekami liejimo mašinoje „Krauss Maffei 110“.



3.1 pav. Surinkta liejimo forma: a) nejudanti formos pusė; b) judanti formos pusė

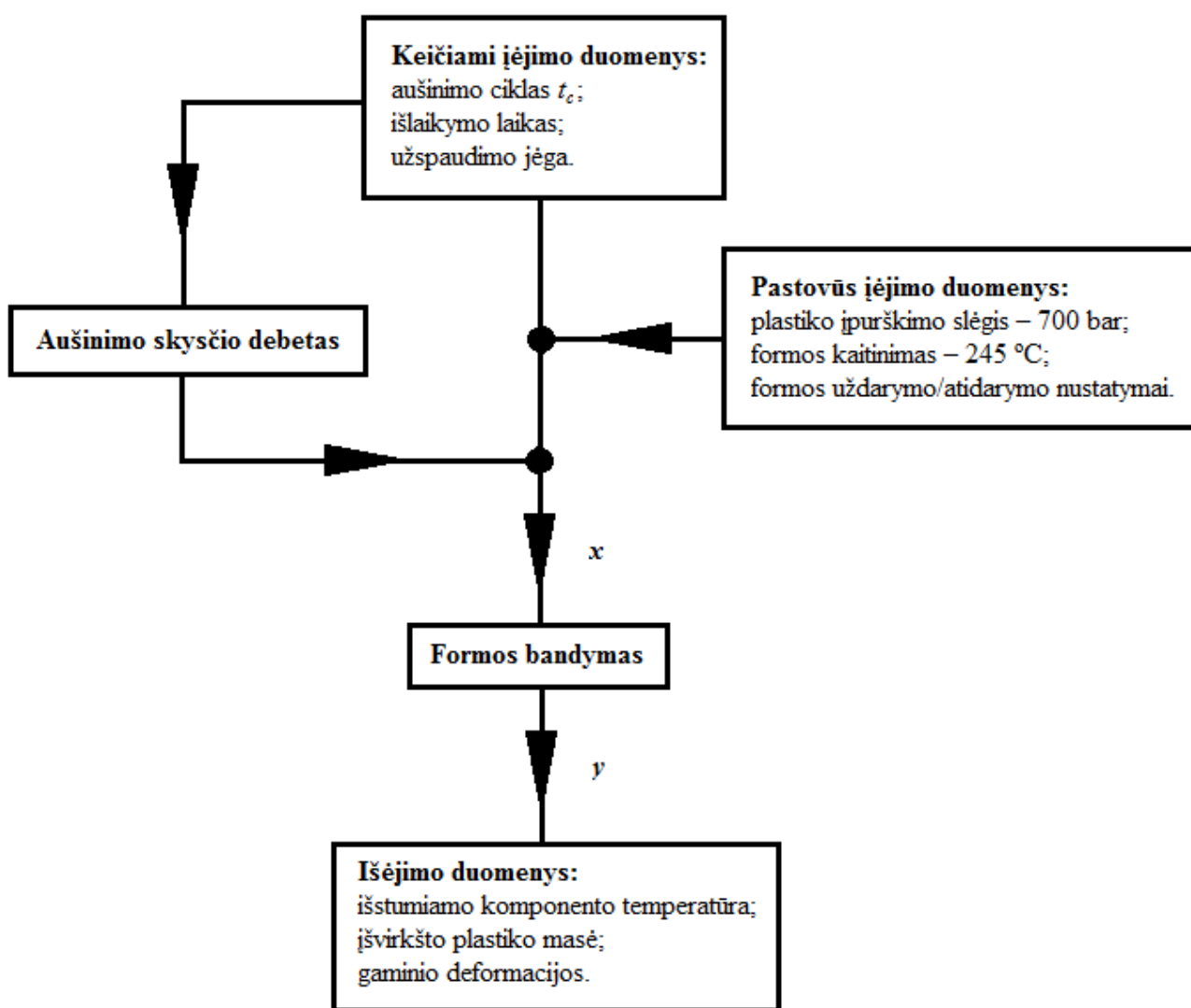
3.2 paveiksle pateikta eksperimento schema. Įtvirtinus formą liejimo mašinoje „Krauss Maffei 110“, valdymo pulte įvedami formos kaitinimo, uždarymo bei atidarymo, užspaudimo jėgos nustatymai (žr. 3.2 paveikslą). Užspaudimo jėga yra kintamas dydis, priklausantis nuo aušinimo



3.2 pav. Eksperimento schema

ciklo ir išlaikymo laiko (žr. 3.1 lentelę). Formos uždarymo ir atidarymo nustatymai pateikti grafikų pavidalu. Bandymams forma kaitinama iki 245 °C temperatūros.

Liejimo mašinoje integruota GWK *Integrat Direct* aušinimo valdymo sistema yra reguliuojama per temperatūros valdymo įrenginį GWK *Teco CS*. Matuodamas liejimo formos temperatūrą, įrenginys atitinkamai siunčia signalus į aušinimo valdymo sistemą, šitaip reguliuodamas skysčio debetą. Savo ruožtu liejimo formos temperatūra priklauso nuo mašinoje nustatyto aušinimo ciklo t_c ir išlaikymo laiko. Eksperimento metu GWK *Teco CS* įrenginio ekrane stebima formos temperatūra ir aušinimo skysčio debetas. Aušinimo valdymo sistemos GWK *Integrat Direct* veikimo principas aprašytas 1.4. poskyryje, taip pat žiūrėti 1 priedą ir 2 priedą.



3.3 pav. Eksperimento algoritmas

Liejimo mašinoje nustatytas plastiko įpurškimo slėgis lygus 700 barų. Esant pastarajam slėgiui, liejimo lizdai užpildomi plastiku per 0,94 s. Įpurškimo slėgio vertė matoma manometre. Iš įpurškimo įrenginio slėgis pašalinamas per išleidimo vožtuvą.

Eksperimento algoritmas pavaizduotas 3.3 paveiksle. Įėjimo duomenis sudaro keičiami ir pastovūs parametrai. Skirtingiems bandymams keičiami įėjimo duomenys (aušinimo ciklas t_c , išlaikymo laikas, formos užspaudimo jėga), kurie yra įvedami liejimo mašinos pulte. Po kiekvieno bandymo gaunami išėjimo duomenys: išstumiamo komponento temperatūra, išvirkšto plastiko masė, gaminio deformacijos.

Bandymais nustatoma išstumiamo komponento temperatūros priklausomybė nuo aušinimo ciklo t_c . Priimtinas tas aušinimo ciklas, po kurio liejamas komponentas būna pakankamai ataušęs, kad galėtų būti išstumiamas iš liejimo lizdo. Eksperimentinis aušinimo ciklas – laikas, per kurį greičiausiai pasiekama komponento išstūmimui tinkama temperatūra.

3.2. Eksperimento rezultatai

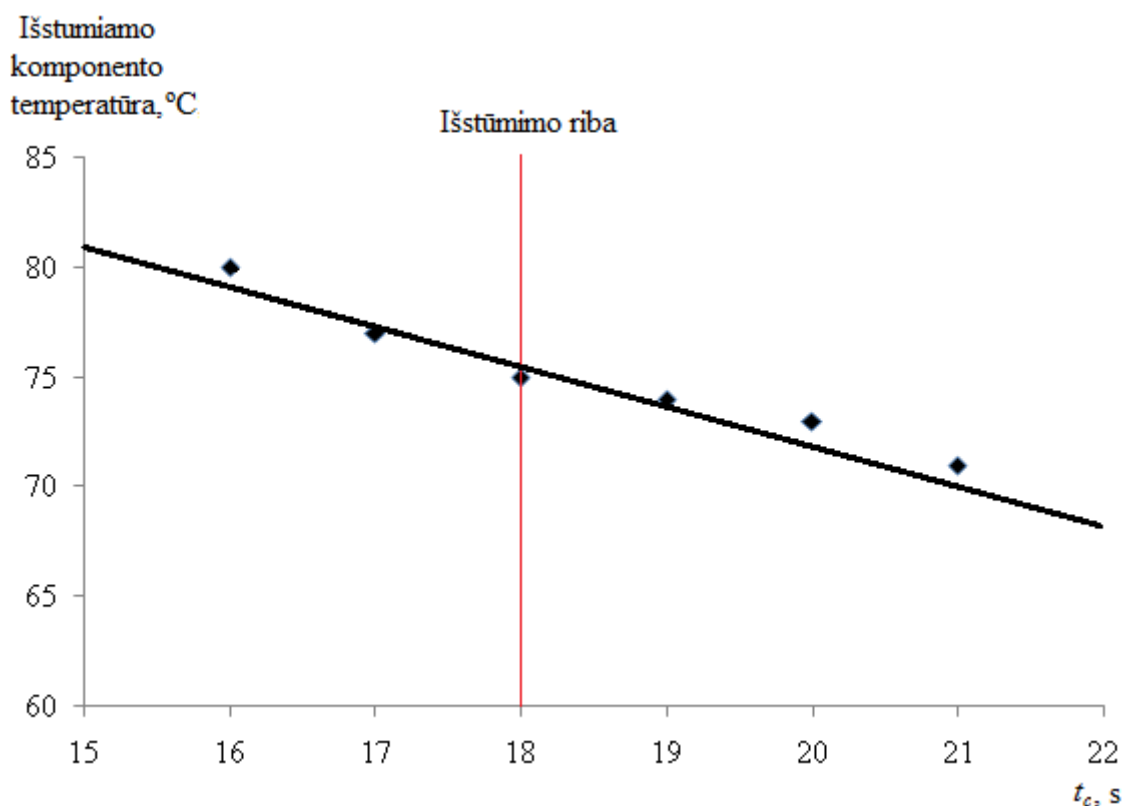
Eksperimento rezultatai pateikti 3.1 lentelėje. Bandymai Nr. 1 ir Nr. 2 nepasiteisino, nes per 16 ir 17 sekundžių aušinimo ciklą komponentai nespėjo pakankamai atvėsti ir sukietėti, todėl po išstūmimo ant detalių liko gilios stūmiklių žymės.

3.1 lentelė. Liejimo formos bandymų rezultatai

Bandymo Nr.	Aušinimo ciklas t_c , s	Išlaikymo laikas, s	Išstumiamo komponento temperatūra, °C	Užspaudimo jėga, kN	Išvirkšto plastiko masė, g
1.	16	8	80	200	37,31
2.	17	9	77	300	37,31
3.	18	10	74	400	37,29
4.	19	11	75	500	37,29
5.	20	12	73	600	37,29
6.	21	13	71	700	37,29

Optimaliausi rezultatai pasiekti bandymu Nr. 3 (žr. 3.4 pav.): per 18 sekundžių aušinimo ciklą komponentai atvėso iki 74 °C temperatūros ir buvo pašalinti iš liejimo formos be žymesnių geometrijos pažeidimų. Bandymai Nr. 4, Nr. 5 ir Nr. 6 nėra priimtini, nes ilgesnis aušinimo ciklas ir išlaikymo laikas, didesnė formos užspaudimo jėga yra nepageidaujami faktoriai ekonominiu atžvilgiu.

Remiantis 3.4 paveiksle pateiktu grafiku ir 3.1 lentelės duomenimis, pasirenkamas eksperimentinis aušinimo ciklas $t_c = 18$ s ir išstumiamo komponento temperatūra – 74 °C. Toliau vykdomas gaminių, išlietų pagal bandymo Nr. 3 parametrus, matmenų patikrinimas.



3.4 pav. Išstumiamo komponento temperatūros priklausomybė nuo aušinimo ciklo

Jau nagrinėjame 2.1 paveiksle parodyti nominalūs liejamo gaminio matmenys. Kaip buvo užsiminta 2.3 poskyryje, svarbiausia išlaikyti jungčių matmenų tolerancijas, nes priešingu atveju pagaminta detalė negalės būti sandariai sujungiama su kitu gaminiu. Gaminio deformacijos – aušinimo optimizacijos rodiklis. Aušinimo sistemos optimizacija gali būti klaidinga, jeigu dėl gaminio deformacijų matmenys neatitiks nustatytų tolerancijos ribų.

Gaminys yra cilindriškas, todėl jo matmenų patikrą galima atlikti paprastais matavimais naudojant slankmatį. Dvidešimt tikrinamų bandinių (po penkis iš kiekvieno liejimo lizdo) atsitiktinai atrenkami iš visos gaminių imties, išlietos eksperimento metu.

3.2 lentelėje pateikti išlieto gaminio pagrindinių jungčių, t. y. skersmenų $\varnothing 7,6 \pm 0,04$ mm ir $\varnothing 15,47 \pm 0,04$ mm matavimai. Mažiau svarbių matmenų (matmenys, kuriems nėra 2.1 pav. nurodytos tolerancijos ribos) tolerancija lygi $\pm 0,25$ mm. Matmenys, 2.1 paveiksle nurodyti skliausteliuose, yra netikrinami.

3.2 lentelė. Gaminio matmenų patikrinimo rezultatai

Liejimo lizdo Nr.	Bandinio Nr.	Išmatuotas dydis, mm	Korekcija, mm	Statusas
Matmuo Ø7,6 ± 0,04 mm				
1.	1.	7,59	- 0,05	tinkamas
	2.	7,51		tinkamas
	3.	7,59		tinkamas
	4.	7,52		tinkamas
	5.	7,53		tinkamas
2.	1.	7,60	- 0,04	tinkamas
	2.	7,63		tinkamas
	3.	7,62		tinkamas
	4.	7,52		tinkamas
	5.	7,58		tinkamas
3.	1.	7,51	- 0,05	tinkamas
	2.	7,52		tinkamas
	3.	7,51		tinkamas
	4.	7,52		tinkamas
	5.	7,52		tinkamas
4.	1.	7,63	- 0,04	tinkamas
	2.	7,64		tinkamas
	3.	7,64		tinkamas
	4.	7,62		tinkamas
	5.	7,63		tinkamas
Matmuo Ø15,47 ± 0,04 mm				
1.	1.	15,45	0,02	tinkamas
	2.	15,43		tinkamas
	3.	15,44		tinkamas
	4.	15,44		tinkamas
	5.	15,45		tinkamas
2.	1.	15,48	0,01	tinkamas
	2.	15,49		tinkamas
	3.	15,47		tinkamas
	4.	15,50		tinkamas
	5.	15,50		tinkamas
3.	1.	15,46	0,02	tinkamas
	2.	15,43		tinkamas
	3.	15,43		tinkamas
	4.	15,44		tinkamas
	5.	15,44		tinkamas
4.	1.	15,47	0,01	tinkamas
	2.	15,51		tinkamas
	3.	15,50		tinkamas
	4.	15,50		tinkamas
	5.	15,48		tinkamas

Visų patikrintų bandinių jungčių matmenys yra nustatytos tolerancijos ribose. Suprojektuota aušinimo sistema ir parinktas aušinimo režimas leidžia atsirasti tik minimalioms deformacijoms, kurios neturi svarbios įtakos gaminio kokybei.



3.5 pav. Išlieto gaminio nuotrauka

Nuotraukoje (3.5 pav.) parodytas išlietas gaminys. Detalėje neaptinkami didesni pažeidimai nuo stūmiklių, geometrija atitinka brėžinyje (2.1 pav.) nustatytus reikalavimus. Komponentas taip pat sandariai sujungiamas su kitu gaminiu. Detalėje nėra žymesnių defektų, todėl galima teigti, kad formuojančių įdėklų aušinimo sistemos optimizacija pavyko.

IŠVADOS

Baigiamajame magistro darbe pristatyta liejimo formos formuojančių įdėklų aušinimo sistemos optimizacija. Sudarytas optimalios aušinimo sistemos nustatymo algoritmas, užtikrinantis liejimo ciklo sutrumpinimą. Algoritmo panaudojimas projektavimo procese leidžia išvengti brangių liejimo formos modifikacijų, susijusių su aušinimo tobulinimu.

Aušinimo sistemos parametrai (aušinimo linijos padėtis, atstumas tarp aušinimo kanalų, kanalų skersmuo) išrenkami iš sudaryto diapazono, atliekant simuliacijas „Autodesk Mold Flow“ programoje. Programinėje aplinkoje komponento modelis tiriamas baigtinių elementų metodu, o apie aušinimo parametrų efektyvumą sprendžiama pagal simuliacijos rezultatus, t. y. sugeneruotą teorinį aušinimo ciklą ir komponento deformaciją.

Darbe atlikta su liejimo formos eksperimentu susijusios literatūros apžvalga, aprašyta eksperimento metodika bei aprašytas aušinimo sistemos projektavimo principas, pateikti eksperimento rezultatai. Suformuluotos išvados:

1. Sudaryta teorinė komponento deformacijos priklausomybė nuo atstumo tarp liejiminio kontūro ir aušinimo linijos. Didinant tarpą tarp liejiminio kontūro ir aušinimo linijos bei mažinant kanalo skersmenį, prarandamas aušinimo sistemos efektyvumas, t. y. šilumos mainai vyksta lėčiau ir tolygiau visame liejimo lizdo paviršiaus plote. Temperatūros tolygumas įdėkle apsaugo gaminį nuo deformacijų.
2. Sudaryta teorinė aušinimo ciklo priklausomybė nuo atstumo tarp liejiminio kontūro ir aušinimo linijos. Tarpo tarp liejiminio kontūro ir aušinimo linijos mažinimas bei kanalo skersmens didinimas trumpina aušinimo ciklą (vyksta spartesnis šilumos mainų procesas tarp įkaitusio įdėklo ir cirkuliuojančio vandens).
3. Formuojančių įdėklų projektavimo metu, bandant nustatyti optimaliausią aušinimo variantą, tenka suderinti aušinimo ciklo trukmę ir leistinas gaminio deformacijas.
4. Formuojančių įdėklų aušinimo sistema sukurta pagal parametrų reikšmes: atstumas nuo liejiminio kontūro arba a parametras – 6mm; atstumas tarp aušinimo kanalų arba b parametras – 24,8 mm; kanalų skersmuo arba D parametras – 4 mm.
5. Šliaužiklių įdėklų aušinimo sistema suprojektuota pagal parinktus parametrus: $a = 8$ mm; $D = 6$ mm.
6. Įdėklų modeliavimo darbai atlikti „Unigraphics NX 8.5“ programoje. Nejudantys įdėklai pagaminti naudojant 3D spausdinimo technologiją.
7. Teorinis aušinimo ciklas lygus 15 s, eksperimentinis – 18 s. Nesutapimas lygus 3 s arba 16,7 %. Liejimo metu leidžiama aušinimo ciklo paklaida yra ± 20 %. Simuliacijos

sugeneruotas teorinis aušinimo ciklas pakankamu tikslumu atvaizduoja realią aušinimo trukmę.

8. Eksperimento metu išlietų gaminių kokybė yra patenkinama. Komponentuose aptinkamos deformacijos, neviršijančios nustatytų tolerancijos ribų.
9. Formuojančių įdėklų aušinimo sistemos optimizacija pavyko – pagal optimalius parametrus suprojektuota ir realizuota sistema sąlygojo minimalų 18 s eksperimentinį aušinimo ciklą ir jo aptikimą šešiais eksperimentiniais bandymais.

Optimizacinis algoritmas gali būti tikslingai naudojamas įmonėse, užsiimančiose plastikinių detalių gamyba. Darbe aprašyta optimizacija reikalauja brangios ir specializuotos programinės įrangos, būtinos virtualių simuliacijų atlikimui ir įdėklų trimačiam modeliavimui. Sudėtingos aušinimo sistemos atveju, įdėklų gamyba atliekama 3D spausdinimo įrenginyje. Išvardytos priežastys apriboja optimizacinio algoritmo pritaikymą nedidelėse įmonėse, negalinčiose sau leisti įsigyti išvardytą programinę ir gamybinę įrangą.

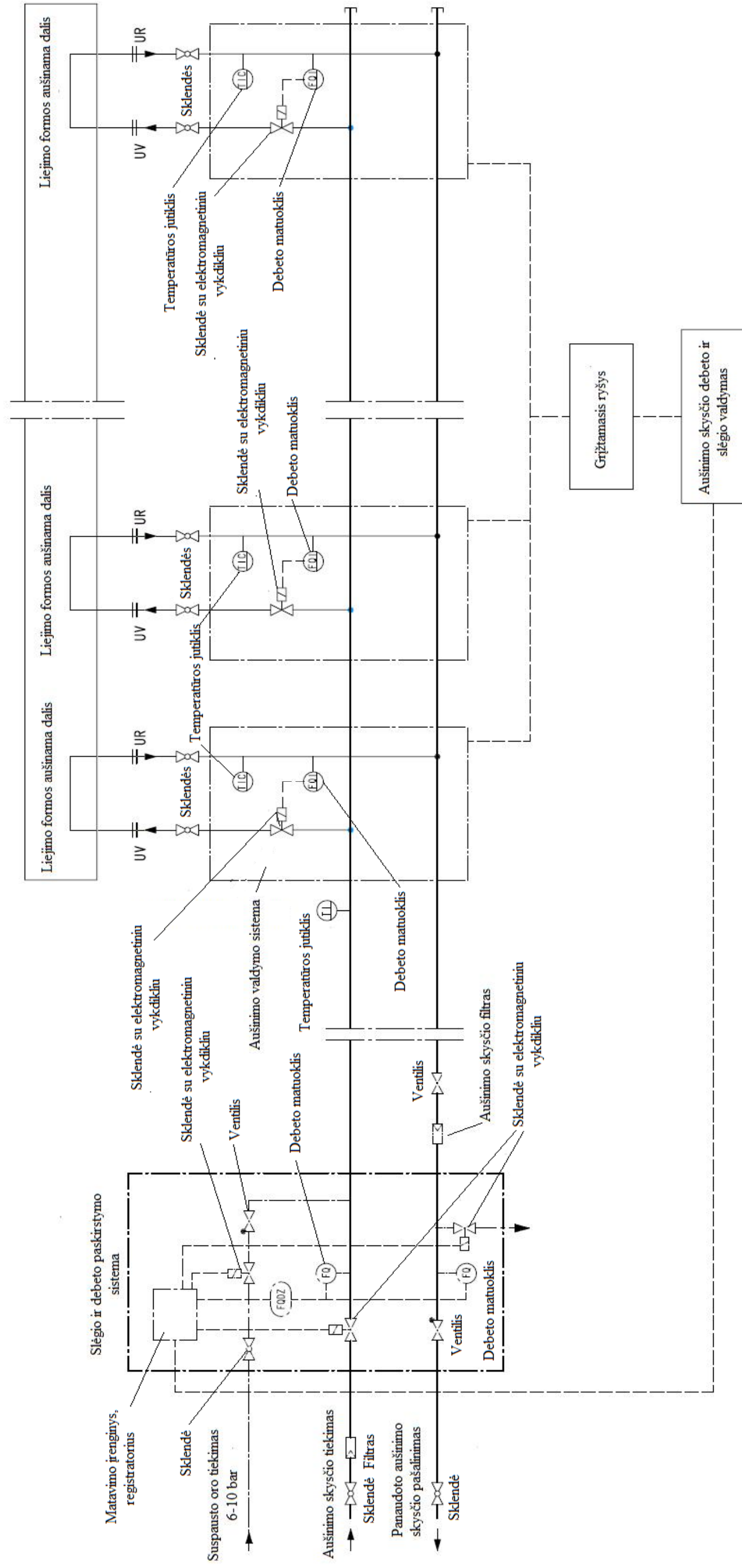
NAUDOTA LITERATŪRA

- Augustaitis, V. K. 2000. *Mechaninių virpesių pagrindai*. Vilnius: Žyburio leidykla. 319 p. ISBN 9986–524–27–X.
- Barauskas, R.; Belevičius, R.; Kačianauskas R. 2004. *Baigtinių elementų metodo pagrindai*. Vilnius: Technika. 612 p. ISBN 9986–05–792–2.
- Behr, R. 2011. *GWK. Operating Instructions*. Kierspe. 56 p.
- Bushko, W. C.; Stokes V. K. 1996. Solidification of Thermoviscoelastic Melts, *Polymer Engineering Science* 36: 352–364 p.
- DuPont. 2000. *General Design Principles for DuPont Engineering Polymers*. Wilmington. 136 p.
- Fischer, U. 2014. *Mechanikos inžinieriaus žinynas*. Kaunas: Technologija. 444 p.
- Gastrow, H. 1993. *Injection Molds 108 Proven Designs*. 2nd ed. Munich, Vienna, New York, Barcelona: Hanser Publishers. 260 p.
- Gerdžiūnas, V., Plakys, V. 2005. *Bendrieji akademinių darbų įforminimo reikalavimai*. Vilnius: Technika. 76 p. ISBN 9986–05–860–0.
- Jurevičius, M. 2006. *Mašinų ir prietaisų gamybos technologija*. Vilnius: Technika. 352 p.
- Kanyakunari, R. 2012. *Tool Design – Mold Cooling System and Design Consideration* [interaktyvus], [žiūrėta 2014 10 19]. Prieiga per internetą: <<http://www.plastic-knowledge-kanyakunari.blogspot.com>>.
- Lanxess. 2007. *Part and Mold Design*. Pittsburgh. 170 p.
- Lin, J. C. 2002. Optimum Cooling System Design of Free-Form Injection Mold Using an Abductive Network, *Journal of Materials Processing Technology* 120: 226–236 p.
- Menges, G., Mohren, P. 1992. *How to Make Injection Molds*. 2nd ed. Munich, Vienna, New York, Barcelona: Hanser Publishers. 385 p.
- Mennig G. 1998. *Mold-Making Handbook*. 2nd ed. Munich, Vienna, New York, Barcelona: Hanser Publishers. 732 p.
- Mörwald J. 2011. *E-Motion. Operator Manual–Machine*. Schwertberg. 342 p.
- Park, S. J. 1998. Thermal and Design Sensitivity Analyses for Cooling System of Injection Mold, *Journal of Manufacture Science* 120: 287–295 p.
- Prox, M. 1988. *Entwicklung eines Programm zur Berechnung des Wärmeflussvorgänge in Spritzgießwerkzeugen mit Hilfe der Boundary-Integral-Methode (BIM)*. Aachen: IKV.
- Rutkauskas, A. V.; Plakys, V.; Sūdžius, V. 2011. *Magistro mokslinis darbas: forma, struktūra ir procesas*. Vilnius: Technika. 100 p. ISBN 978–9955–28–818–3.
- SIGMA Engineering GmbH [interaktyvus], [žiūrėta 2015 04 06]. Prieiga per internetą: <<http://www.sigma-epd.com>>.

- Vekteris, V.; Kasparaitis, A.; Kaušinis, S. 2000. *Matavimų teorija ir praktika*. Vilnius: Žyburio leidykla. 382 p. ISBN 9986-524-26-1.
- Vekteris, V.; Jurevičius, M.; Kilikevičius, A. 2008. *Matavimų teorija ir praktika*. Vilnius: Technika.
- Waschulewski, B. 1988. *Erstellung einer Software-Schnittstelle zwischen den Programmsystemen CADMOULD-MEFISTO und MICROPUS-T*. Aachen: IKV.
- Мягков, В. Д. 1984. *Допуски и посадки*. Ленинград. 546 с.

PRIEDAI

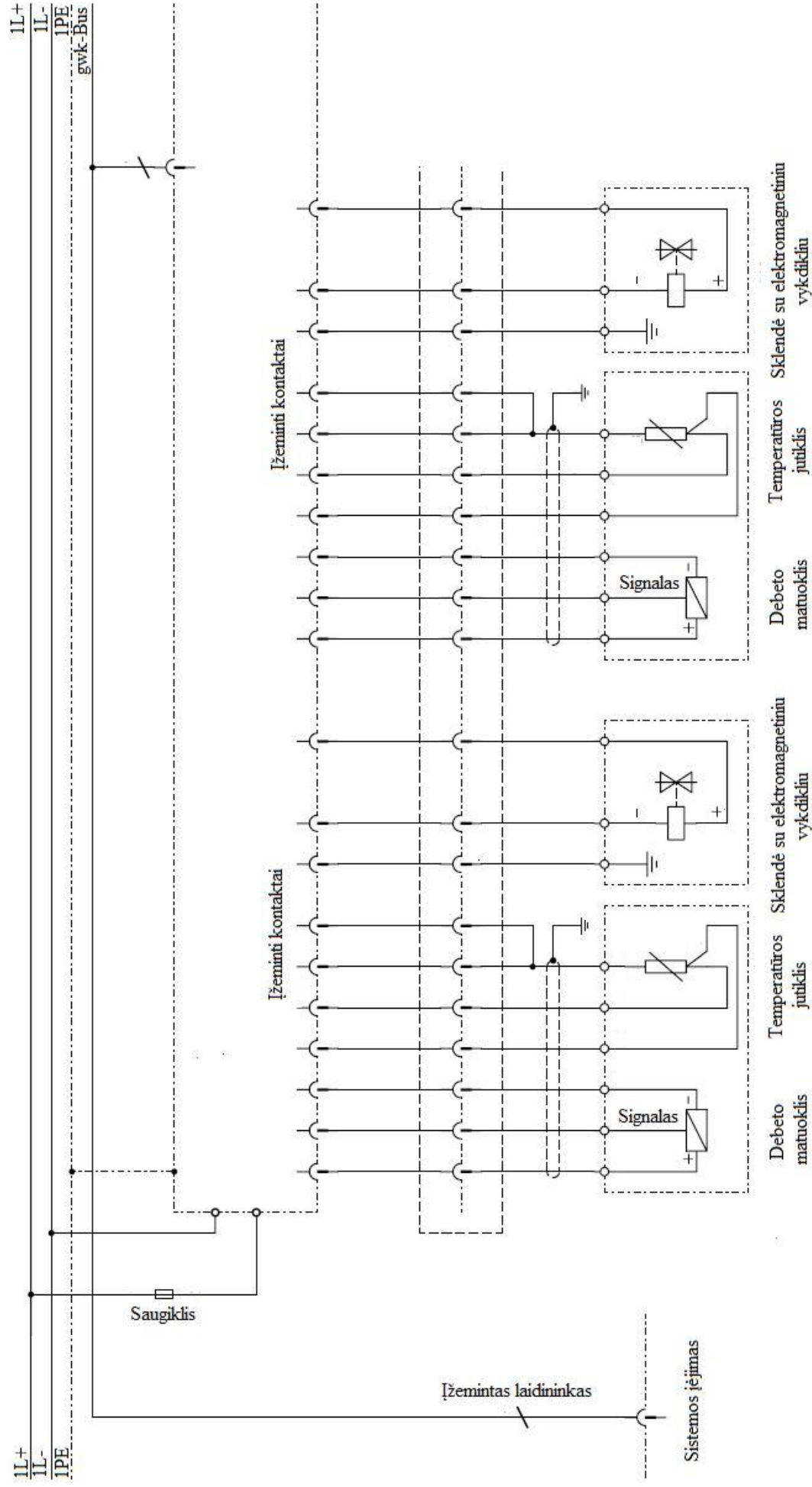
1 priedas



Aušinimo grandinės valdymo funkcinė-blokinė schema

(sudaryta autoriaus remiantis Behr 2011: 34)

2 priedas



Aušinimo valdymo posistemės funkcinė-blokinė schema

(sudaryta autoriaus remiantis Behr 2011: 38)

PLASTIKINIŲ DETALIŲ LIEJIMO FORMOS FORMUOJANČIŲ ĮDĖKLŲ OPTIMALAUS AUŠINIMO NUSTATYMAS

Ernas Toptygov

Mechatronikos ir robotikos katedra, Mechanikos fakultetas, Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Adresas: J. Basanavičiaus g. 28, 03224, Vilnius, Lietuva

El. p.: ernas.toptygov@gmail.com

Anotacija. Straipsnyje pateikiamas tyrimas, susijęs su plastikinių detalių liejimo formos formuojančių įdėklų optimalaus aušinimo nustatymu. Optimalūs aušinimo sistemos parametrai (atstumas tarp liejinio kontūro ir aušinimo linijos, atstumas tarp aušinimo kanalų, kanalų diametras) atrenkami iš aibės parametrų, atsižvelgiant į teoriškai apskaičiuotą produkto aušinimo trukmę ir deformacijas. Teorinė aušinimo trukmė ir deformacijos apskaičiuojamos baigtinių elementų metodu specializuotoje programinėje įrangoje. Optimalūs aušinimo sistemos parametrai naudojami trimačiame formuojančių įdėklų projektavime. Suprojektuota liejimo forma yra pagaminama ir išbandoma liejimo mašinoje, tokiu būdu patikrinant teorinio ir eksperimentinio aušinimo ciklo atitikimą.

Prasminiai žodžiai: aušinimo sistema, baigtinių elementų metodas, gaminio kokybė, liejimo forma, liejimo mašina

Įvadas

Kiekviena plastikinė detalė pagaminama sukuriant jai specialią liejimo formą. Liejimo slegiant procesas – tai išlydyto plastiko įšvirkštimas dideliu slėgiu į liejimo formą per lietį, šitaip užpildant plastiką formuojančių įdėklų lizdus. Reguluojant formos temperatūrą bei palaikant slėgį, vykdomas įšvirkšto mišinio aušinimas. Vos tik įvyksta liejinio kristalizacija (gaminys tampa pakankamai kietas, kad išlaikytų savo formą), jis pašalinamas iš liejimo formos stūmikliais.

Liejimo forma turi du pagrindinius komponentus: nejudantį įdėklą (angl. *cavity insert*) ir judantį įdėklą (angl. *core insert*). Nejudantis įdėklas formuoja liejamos plastikinės detalės išorinius paviršius, o judantis įdėklas – priklausomai nuo komponento geometrijos, tiek išorinius, tiek ir vidinius paviršius. Atsiskiriant įdėklams, sudaromos sąlygos gaminio pašalinimui iš formos.

Judančio ir nejudančio įdėklų optimalus aušinimas užtikrina liejimo ciklo sutrumpinimą bei apsaugo formą nuo perkaitimo. Būtent su šiuo aspektu susiduria konstruktoriai, projektuojantys naują liejimo formą. Konstruktorių viena iš svarbiausių užduočių, suprojektuoti kuo efektyvesnį aušinimą formuojantiems įdėklams. Šioje projektavimo stadijoje dažniausiai tenka pasikliauti inžinerine patirtimi, remtis jau sukurtais konstrukcijomis bei vadovautis bazinėmis aušinimo kanalų išvedžiojimo taisyklėmis.

Tyrimo objektas – veiksmų algoritmas, skirtas liejimo formos formuojančių įdėklų optimalaus aušinimo režimo parametrų apskaičiavimui. Mokslinėje literatūroje pateikti keli aušinimo sistemos projektavimo būdai: aproksimacinis

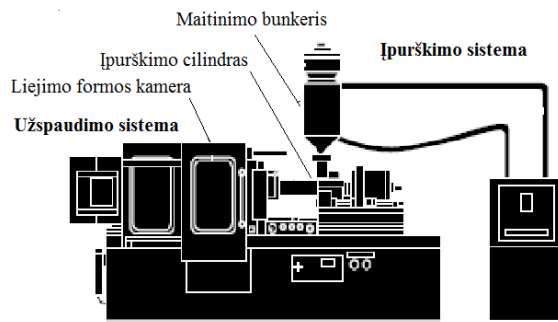
terminis projektavimas; dvimatis aušinimo sistemos projektavimas; projektavimas integralinių ribų, neuroninių tinklų bei baigtinių elementų metodais. Baigtinių elementų metodas iš išvardintų metodikų išsiskiria informatyvumu ir sąveika su CAD programine įranga, todėl šiame tyrime taikomas būtent šis aušinimo sistemos projektavimo būdas.

Darbo tikslas – nustatyti liejimo formos formuojančių įdėklų optimalaus aušinimo parametrus. Aušinimo sistemos parametrai (aušinimo linijos padėtis, atstumas tarp aušinimo kanalų, kanalų diametras) taikomi formuojančių įdėklų projektavime, kuris atliekamas „Unigraphics NX 8.5“ programinėje aplinkoje. Suprojektuoto aušinimo simuliacija atliekama „Autodesk Mold Flow“ programoje. Simuliacijos metu gauti teoriniai aušinimo rezultatai patikrinami eksperimentinių bandymų metu, išbandant formą liejimo mašinoje.

Liejimo formos projektavimo stadijoje aušinimo kanalų išvedžiojimas „iš akies“ dažnai nulemia liejimo formos modifikacijas, susijusias su aušinimo tobulinimu. Yra būtinybė turėti teorinį įrankį, projektavimo stadijoje apskaičiuojantį optimalius aušinimo sistemos parametrus. Problema ypač aktuali ekonominiu atžvilgiu, kadangi sudaromos sąlygos greičiau paleisti liejimo formą į gamybą, o sutrumpėjęs bandymų laikas užtikrina mažesnes medžiagos sąnaudas. Supaprastėja bandytojų darbas, kadangi eksperimentai tampa teoriškai apibrėžti ir kryptingi. Atsiranda didesnė tikimybė pasiekti geresnį liejimo formos naudingo darbo koeficientą.

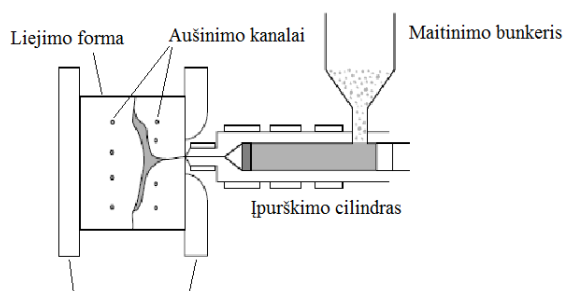
Liejimo procesas

Liejimo procesas sudarytas iš keturių pagrindinių etapų: formos uždarymo, plastiko įpurškimo, aušinimo ir komponento išstūmimo. Liejimas vykdomas liejimo mašinoje (1 pav.).



1 pav. Liejimo mašinos principinė schema
Fig. 1. Schematic of the injection molding machine
(sudaryta autoriaus remiantis DuPont 2000: 5)

Plastiko įpurškimo slėgį užtikrina liejimo mašinos hidraulinė sistema. Įpurškimo slėgis svyruoja nuo 35 iki 1600 MPa. Įpurškiamo mišinio temperatūra svyruoja nuo 205 °C iki 300 °C. Po užpylimo įpurškimo slėgis sumažinamas nuo 30 % iki 70 % pastarojo slėgio, priklausomai nuo naudojamo plastiko, ir išlaikomas, kol lietis sukietėja. Minėtas procesas trunka apytiksliai 1/3 aušinimo laiko. Liekamasis aušinimo laikas reikalingas pakankamam medžiagos sukietėjimui užtikrinti, kas leidžia išlaikyti komponento formą. Detalės kristalizacijos metu paruošiamas naujas medžiagos kiekis įpurkšti (Mennig 1998: 7). Liejimo formos užpylimo principinė schema parodyta 2 paveiksle.



Liejimo mašinos stalis
2 pav. Principinė plastiko įpurškimo į liejimo formą schema

Fig. 2. Schematic cross section of the plastifying cylinder and mold
(sudaryta autoriaus remiantis DuPont 2000: 5)

Liejimo ciklą sudaro laikas, būtinas formos uždarymui, medžiagos įpurškimui, aušinimui (išskiriami trys aušinimo etapai, t. y. paruošimas, dozavimas, išlaikymas), formos atidarymui, stūmiklių suveikimui. Visa aušinimo trukmė t_c apskaičiuojama pagal formulę (Fischer 2014: 341):

$$t_c = t_p + t_{rc}; \quad (1)$$

čia t_p – formavimo slegiant trukmė, s;

t_{rc} – liekamoji aušinimo trukmė, s.

Aušinimo trukmė t_c , esant liejimo formos temperatūrai ≤ 60 °C, apskaičiuojama pagal formulę (Fischer 2014: 341):

$$t_c = s \cdot (1 + 2s); \quad (2)$$

čia s – liejamos detalės storis, mm.

Esant liejimo formos temperatūrai >60 °C, aušinimo trukmė t_c lygi (Fischer 2014: 341):

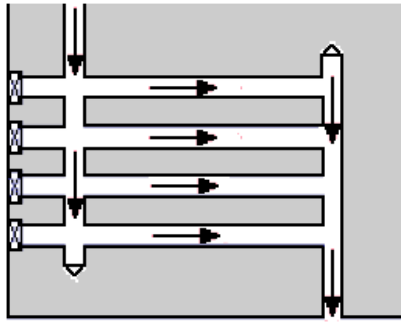
$$t_c = 1,3s \cdot (1 + 2s). \quad (3)$$

Užpylus ir išlaikius plastiką, paruošiamas atitinkamas išlydytos medžiagos kiekis kitam įšvirkštimui. Dozavimas prasideda įpurškimo cilindro atitraukimu ir medžiagos granulių įpylimu į maitinimo bunkerį. Medžiaga, tekėdama cilindru formos link, yra šildoma, suspaudžiama ir homogenizuojama. Išlydytas mišinys stumiamas iki įšvirkštimo antgalio. Į gaminiui išlieti reikalingą medžiagos tūrį turi būti įtrauktas liečio tūris, taip pat svarbu įvertinti medžiagos tankių skirtumą tarp skystosios ir kietosios fazės. Išlaikymo fazėje tiekiamas papildomas medžiagos tūris, kompensuojantis susitraukimą ir padedantis išvengti susitraukimo ženklų gaminyje.

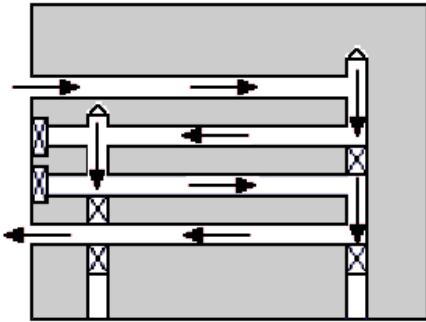
Formuojančių įdėklų aušinimas

Eksplloatuojant liejimo formą, šilumos mainų greitis tarp įpurškto plastiko ir liejimo formos yra svarbiausias ekonominis faktorius, nulemiantis pagamintos produkcijos kiekį per tam tikrą laiką. Formuojančių įdėklų aušinimo kanaluose tekantis skystis (vanduo, alyva) palaiko įpurškiamo plastiko kristalizacijos temperatūrą, kas leidžia įpurkštam mišiniui sukietėti į gaminį. Kadangi termoplastikai yra prasti šilumos laidininkai, įdėklų aušinimo laikas labiausiai įtakoja bendrą liejimo ciklo trukmę. Aušinimo trukmė žymiai išauga storinant komponento sienelės. Aušinimo režimas taip pat turi poveikį liejamų produktų mikrostruktūrai, ypač produkcijai, pagamintai iš pusiau kristalinių plastikų, kadangi, liejant šias medžiagas, negalima leisti, kad formos įdėklų paviršiaus temperatūra nukristų žemiau reglamentuojamos temperatūros. Tokiu atveju liejimo procese naudojami temperatūros kontrolieriai, palaikantys skysčio temperatūrą pageidaujamos ribose. Kuo arčiau aušinimo kanalai išdėstyti formuojančio įdėklo paviršiaus, kuo arčiau aušinimo kanalai yra vienas kito, tuo tiksliau formuojančio paviršiaus temperatūra gali būti kontroliuojama (Mennig 1998: 31).

Formuojančiuose įdėkluose aušinimo kanalai yra išgręžiami. Kanalai sudaro arba lygiagrečiojo, arba nuosekliojo aušinimo grandines (3 pav.). Ypatingais atvejais, kai įdėklo forma labai sudėtinga, stūmiklių išdėstymas trukdo išgręžti aušinimo kanalus, įdėklas ir jo aušinimo sistema yra padaromi panaudojant 3D spausdinimo technologiją.



a)



b)

3 pav. Formuojančio įdėklo aušinimo schemas:
a) lygiagretusis aušinimas; b) nuoseklusis aušinimas
Fig. 3. Configurations of cooling channels: a) parallel;
b) serial

(sudaryta autoriaus remiantis Kanyakunari 2012)

Formuojantys įdėklai gaminami iš aukštos kokybės plieno, dažniausiai naudojama 1.2083 plieno markė, 3D spausdinimo technologijoje taikomas plieno kompozitas 1.2343/1.2079. Įdėkluose pozicionuojamų formuojančių ženklų medžiaga būna 1.2379 markės plienas, kas apsaugo įdėklą ir ženklą nuo galimo tarpusavio sukibimo ir užstrigimo. Pastarieji plienai tinkami terminiam apdirbimui, pasižymi reikiamu kietumu ir stiprumu, poliruojami, atsparūs korozijai, kaitrai ir mechaniniam nuovargiui bei turi gerą šiluminį laidumą.

Aušinimo laikas

Šilumos mainai tarp plastiko ir aušinimo skysčio priklauso nuo liejimo formos šiluminio laidumo. Šiluminis laidumas aprašomas Furjė diferencialine lygtimi (Menges 1992: 272):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad (4)$$

čia $a = \frac{k}{\rho \cdot c_p}$ – šiluminis difuziškumas;

t – laikas;

x – poslinkis;

k – šiluminio laidumo koeficientas;

ρ – aušinimo skysčio tankis;

c_p – specifinė šiluminė talpa.

Priimant, kad iškart po plastiko įpurškimo į formuojančius įdėklus, mišinys visame tūryje įgauna pastovią temperatūros reikšmę T_M , tai formuojančio įdėklo sienelės įkaista iki pastovios reikšmės T_W (Menges 1992: 272):

$$\frac{T_E - T_W}{T_M - T_W} = \frac{4}{\pi} e^{-\frac{a\pi^2}{s^2} \cdot t} \cdot \sin \frac{\pi x}{s}; \quad (5)$$

čia T_M – įpurškiamo mišinio temperatūra;

T_E – maksimali liejimo temperatūra;

T_W – formuojančio įdėklo sienelės temperatūra;

s – liejimo komponento sienelės storis.

Formulė (5) išreiškiama (Menges 1992: 273):

$$T_E - T_W = \frac{4}{\pi} \cdot (T_M - T_W) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \cdot e^{-\frac{a(2n+1)^2\pi^2 t}{s^2}} \times \sin \frac{(2n+1)\pi \cdot x}{s}; \quad (6)$$

iš čia:

$$\frac{T_E - T_W}{T_M - T_W} = \frac{8}{\pi^2} \cdot e^{-\frac{a\pi^2}{s^2} \cdot t}; \quad (7)$$

T_E – liejimo temperatūra.

Pagal lygtį (7) gaunama aušinimo laiko t_c išraiška (Menges 1992: 273):

$$\frac{s^2}{\pi^2 a} \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_M - T_W}{T_E - T_W} \right) = t_c; \quad (8)$$

lygtis (8) pertvarkoma:

$$\frac{t_c \cdot a}{s^2} = \frac{1}{\pi^2} \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_M - T_W}{T_E - T_W} \right). \quad (9)$$

Bedimensė aušinimo proceso išraiška (Menges 1992: 273):

$$\frac{T_E - T_W}{T_M - T_W} = \theta; \quad (10)$$

čia θ – aušinimo koeficientas.

Bedimensis Furjė skaičius lygus (Menges 1992: 273):

$$\frac{t_c \cdot a}{s^2} = Fo. \quad (11)$$

Pagal lygtį (9), aušinimo koeficientas θ yra vienintelė Furjė skaičiaus funkcija:

$$\theta = f(Fo). \quad (12)$$

Esant $\frac{t_c \cdot a}{s^2} = const.$, aušinimo greitis yra pastovus.

Atsižvelgiant į mišinio maksimalią temperatūrą tūrio centre, bedimensis aušinimo koeficientas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\frac{T_E - T_W}{T_M \cdot T_W} = \tilde{\theta}; \quad (13)$$

T_E – mišinio tūrio centro temperatūra.

Praktikoje aušinimo koeficientas $\tilde{\theta}$ svyruoja nuo 0,16 iki 0,25.

Laikant, kad visų termoplastikų aušinimas yra fiziškai panašus procesas, aušinimo laiką t_c galima išreikšti formule (Menges 1992: 277):

$$t_c = c_c s^2; \quad (14)$$

čia $c_c = 2 \dots 3 \text{ s/mm}^2$ – koeficientas;

s – liejamo komponento sienelės storis.

Esant sudėtingai liejamo komponento geometrijai, susidaro asimetriško aušinimo sąlygos, kas įtakoja skirtingą formuojančių įdėklų lizdų sienelių temperatūrą. Šiuo atveju, norint apskaičiuoti aušinimo laiką, tenka įvesti liejamo komponento sienelės storio pataisą s^l . Sienelės storio pataisa apskaičiuojama pagal formulę (Menges 1992: 279):

$$s^l \approx \frac{2s}{\frac{\dot{q}_2}{\dot{q}_1} + 1}, \quad \dot{q}_2 \leq \dot{q}_1; \quad (15)$$

čia $\dot{q}$ – šiluminio srauto tankis, apibūdinamas įdėklo lizdo sienelių temperatūromis.

Simetriško aušinimo atveju $\dot{q}_1 = \dot{q}_2$. Pavyzdžiui, aušinant tik vieną komponento pusę, šiluminio srauto tankis lygus $\dot{q}_2 = 0$. Iš čia $s^l = 2s$, kas reiškia, kad pagal lygtį (14), aušinimo laikas padidėja keturis kartus.

Aušinimo sistemos projektavimas

Kokybiškiau pagaminta plastikų liejimo forma yra ta, kurios eksploatacijos metu, po išlydyto plastiko įpurškimo, staigiau ir tolygiau visame liejinio kontūro plote pašalinamas mišinio suteiktas šilumos kiekis. Projektuodamas formuojančių įdėklų aušinimą, įrangos konstruktorius vadovaujasi keliais pagrindiniais principais:

1. liejamas komponentas turi būti aušinamas tolygiai;
2. liejimo forma turi kuo greičiau ataušti iki kito užpildymo ciklo;
3. liejimo ciklo laikas privalo būti minimalus.

Aušinimo sistemos projektavimas svarbus ne tik ekonominiu aspektu, bet ir liejamos produkcijos kokybės atžvilgiu. Kuo didesnis atstumas tarp užpylimo lizdo kontūro ir aušinimo linijos (4 pav., a parametras), tuo tolygiau aušinamas ir tuo daugiau įpurškimo metu įkaista įdėklas. Kuo mažesnis atstumas tarp užpylimo lizdo kontūro ir aušinimo linijos, tuo efektyviau ir greičiau pašalinama išlydyto plastiko šiluma. Tačiau pastaruoju atveju galimi lizdo paviršiaus temperatūriniai svyravimai, kas nulemia liejamos produkcijos deformacijas. Parametras b (4 pav.), atstumas tarp aušinimo kanalų centrų, turi įtakos temperatūros tolygumui įdėkle bei priklauso nuo aušinimo kanalo diametro, liejamo komponento geometrijos ir jo sienelės storio (Lin 2002: 228–229).

Paprasčiausias yra aproksimacinis terminis projektavimas, taikomas paprastą geometrinę formą turinčioms detalėms (plokštumoms, cilindrams, sferoms ir kubams). Aproksimacinis projektavimas paremtas baziniais skaičiavimais, kuriais nustatomas aušinimo laikas, šilumos balansas, aušinimo skysčio debetas, kanalų diameteras, aušinimo linija, skysčio tiekimo į sistemą slėgis.

Tikslesniam aušinimo sistemos projektavimui taikomas dvimatis metodas, kurį aprašė mokslininkas B. Waschulewski's. Dvimatis metodas paremtas White'o–Metzner'io modeliu, aiškinančiu, kad liejimo formoje skysto plastiko temperatūros ir tekėjimo greičio pasiskirstymą nulemia ne jo klampa, o jame susidarantys įtempiai. Sutinkamos kelios dvimačio aušinimo sistemos projektavimo programos: „Micropus–T“, „C–Flow“, „Mold–Flow“. Išvardytoje programinėje įrangoje tiriamas liejamo komponento atitinkamas skerspjuvis, kuris suskirtomas baigtiniais elementais (Mennig 1998: 497–498). Atsižvelgiant į viskoelastiškumo sąlygą, baigtinių elementų metodu apskaičiuojamas temperatūros pasiskirstymas, aušinimo linijos atstumas nuo komponento kontūro bei kanalų diameteras. Tačiau metodas netinka sudėtingą geometriją turinčių komponentų aušinimui aprašyti, kadangi tenka ištirti daug skerspjuvių bei suskirstyti juos baigtiniais elementais. Šiuo atveju projektavimas užtrunka ilgą laiko tarpą, kas nėra pageidaujama, ypač jeigu projektas yra skubus.

Integralinių ribų metodas suteikia galimybę komponentą ištirti trimačiame lygmenyje. Pirmieji mėginimai apskaičiuoti aušinimo sistemą integralinių ribų metodu buvo atlikti mokslininkų M. R. Barone'o ir D. A. Caulk'o. Labiausiai šią metodiką išplėtojo mokslininkas M. Prox'as, kurio sukurtas sudėtingas matematinis algoritmas buvo pritaikytas aušinimo modeliavimo programose (pvz., „SigmaSoft“). Programinėje įrangoje pagal liejamo komponento trimatį modelį tiriamas šilumos pasiskirstymas įdėkluose, parenkamas optimalus aušinimo kanalų diameteras bei išsidėstymas. Programinė įranga leidžia pakankamai tiksliai nustatyti optimalius aušinimo sistemos parametrus, tačiau ji yra brangi ir jos taikymas praktikoje reikalauja specialisto, galinčio tikslingai dirbti su pastarąja programa. Turint omenyje, kad atliekamas tik teorinis optimizavimas, tokios programinės įrangos naudojimas gamyboje gali būti netikslingas ekonominiu ir laiko atžvilgiu.

Neuroninių tinklų metodas, aprašytas mokslininko J. C. Lin (2002: 226–236), susieja įpurškimo proceso parametrus su aušinimo sistemos parametrais. Kaip ir baigtinių elementų metodikoje, neuroninių tinklų metodas paremtas sudėtingos sistemos suskaidymu į mažesnes ir paprastesnes posistemes pagal polinominius funkcinius mazgus, kurios papildomai suskirstomos į atskirus sluoksnius. Taikant šią metodiką, gali būti tiksliai nustatomas gaminio susitraukimas po įpurškimo ir formavimo. Metodo principas:

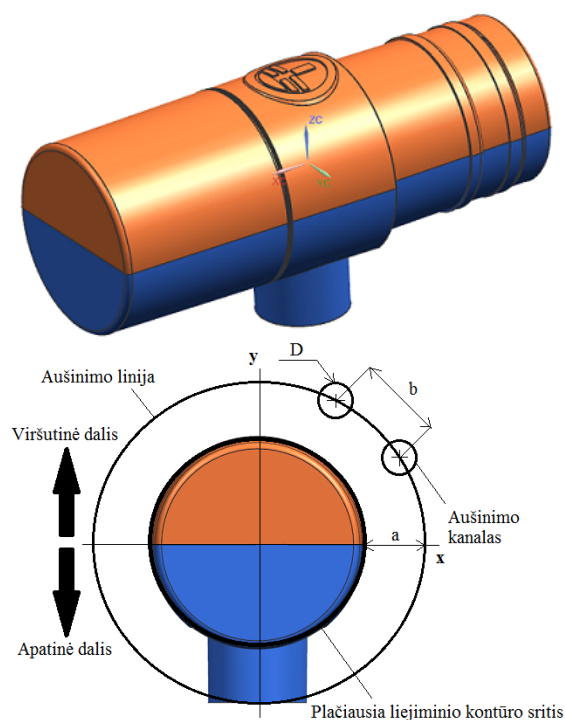
1. įėjimo duomenys – aušinimo sistemos parametrai (tarpas tarp aušinimo linijos ir liejinio kontūro, tarpai tarp aušinimo kanalų, kanalų diameteras);
2. optimizacinis algoritmas – komponento mažiausio susitraukimo ir mažiausio

deformacijų apskaičiavimas prie atitinkamų aušinimo parametrų;

3. išėjimo duomenys – komponento susitraukimas, optimalūs aušinimo parametrai.

Šiame tyrime aušinimo sistemos projektavimui naudojamas baigtinių elementų metodas kaip alternatyva integralinių ribų ir neuroninių tinklų metodui. Metodas paremtas keliais esminiais žingsniais:

1. nustatoma plačiausia liejiminio kontūro sritis (4 pav.), kurioje atidedamas koordinacių centras;
2. atsižvelgiant į liejiminį kontūrą ir pasirinktą koordinacių centrą, sudaromas aušinimo sistemos parametrai (aušinimo linijos padėties, atstumo tarp aušinimo kanalų, kanalų diametrų) diapazonas;
3. vykdomas optimaliausių aušinimo sistemos parametrai atrinkimas pagal aušinimo sistemos simuliacijos rezultatus „Autodesk Mold Flow“ programoje. Parametrai tinkamumas vertinamas pagal aušinimo ciklo ir liejamo komponento deformacijų reikšmes.



4 pav. Aušinimo sistemos parametrai diapazono sudarymo schema

Fig. 4. Cooling system size

„Autodesk Mold Flow“ programoje liejamo komponento tridimensinis modelis automatiškai suskirstomas baigtiniais elementais, todėl detalės teoriniam aušinimo ciklo ir deformacijų įvertinimui užtenka įvesti aušinimo sistemos parametrai reikšmes. Mažesnės gaminio deformacijos ir trumpesnis aušinimo ciklas nulemia aušinimo sistemos parametrai tinkamumą. Tokiu būdu sugeneruoti optimalaus aušinimo parametrai toliau

naudojami formuojančių įdėklų aušinimo sistemos projektavimui „Unigraphics NX 8.5“ programinėje aplinkoje.

Optimalios aušinimo sistemos simuliacija

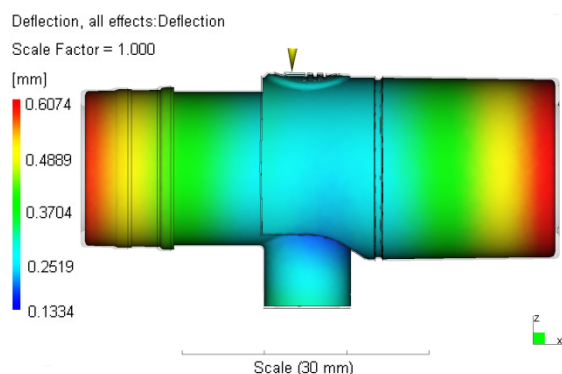
1 lentelėje pateikti aušinimo sistemos parametrai simuliacijos „Autodesk Mold Flow“ programoje rezultatai. Nustatyta aušinimo trukmės t_c ir komponento deformacijos priklausomybė nuo aušinimo sistemos parametrai.

1 lentelė. Aušinimo sistemos parametrai simuliacijos rezultatai

Table 1. Results of cooling system parameters' simulation

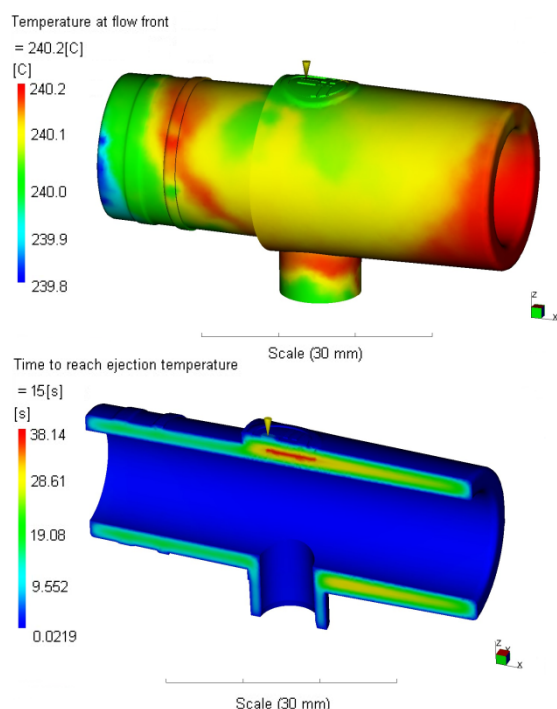
Nr.	D, mm	Virš. dalis		Apat. dalis		Auš. truk., s	Komp. def., mm
		a, mm	b, mm	a, mm	b, mm		
1.	4	5	23,5	5	31	13,7	0,6395
2.	4	5	23,5	6	32	13,9	0,6301
3.	4	5	23,5	7	33	14,2	0,6282
4.	4	5	23,5	8	34	14,5	0,6153
5.	4	6	24,8	5	31	14,0	0,6295
6.	4	6	24,8	6	32	14,4	0,6256
7.	4	6	24,8	7	33	14,8	0,6105
8.	4	6	24,8	8	34	15,0	0,6074
9.	4	7	25,5	5	31	14,3	0,6270
10.	4	7	25,5	6	32	14,6	0,6128
11.	4	7	25,5	7	33	15,2	0,6033
12.	4	7	25,5	8	34	15,4	0,5991
13.	4	8	26,9	5	31	14,6	0,6128
14.	4	8	26,9	6	32	15,1	0,6019
15.	4	8	26,9	7	33	15,5	0,5953
16.	4	8	26,9	8	34	15,7	0,5898
17.	5	6,5	25,2	6,5	32,5	12,1	0,6595
18.	5	6,5	25,2	7,5	33,5	12,4	0,6538
19.	5	6,5	25,2	8,5	34,5	12,7	0,6472
20.	5	6,5	25,2	9,5	35,5	13,2	0,6433
21.	5	7,5	26,2	6,5	32,5	12,5	0,6502
22.	5	7,5	26,2	7,5	33,5	12,8	0,6473
23.	5	7,5	26,2	8,5	34,5	13,3	0,6437
24.	5	7,5	26,2	9,5	35,5	13,6	0,6411
25.	5	8,5	27,4	6,5	32,5	12,8	0,6487
26.	5	8,5	27,4	7,5	33,5	13,4	0,6435
27.	5	8,5	27,4	8,5	34,5	13,7	0,6378
28.	5	8,5	27,4	9,5	35,5	14,0	0,6346
29.	5	9,5	28,6	6,5	32,5	13,3	0,6422
30.	5	9,5	28,6	7,5	33,5	13,7	0,6381
31.	5	9,5	28,6	8,5	34,5	14,1	0,6329
32.	5	9,5	28,6	9,5	35,5	14,4	0,6302
33.	6	7	27	7	34	10,2	0,6903
34.	6	7	27	8	35	10,4	0,6879
35.	6	7	27	9	36	10,7	0,6845
36.	6	7	27	10	37	11,0	0,6813
37.	6	8	28,2	7	34	10,5	0,6867
38.	6	8	28,2	8	35	10,8	0,6834
39.	6	8	28,2	9	36	11,2	0,6793
40.	6	8	28,2	10	37	11,5	0,6769
41.	6	9	29,4	7	34	10,9	0,6805
42.	6	9	29,4	8	35	11,4	0,6778
43.	6	9	29,4	9	36	11,7	0,6751
44.	6	9	29,4	10	37	12,0	0,6716
45.	6	10	30,6	7	34	11,1	0,6824
46.	6	10	30,6	8	35	11,6	0,6786

Formuojančių įdėklų projektavimui pasirinkta kombinacija Nr. 8, nes esant pastarosios kombinacijos aušinimo parametrų, gaunama tinkama aušinimo trukmė $t_c = 15$ s ir maža komponento deformacija, lygi 0,6074 mm (5–6 pav).



5 pav. Komponento deformacijos simuliacija pagal aušinimo parametrų kombinaciją Nr. 8
Fig. 5. The warpage of mold-flow analysis

5 paveiksle matyti, kad labiausiai deformuojasi išlieto komponento galai, portinės sritys (paveiksle pažymėtos raudona spalva), kurių 0,6074 mm deformacija yra leistinas nuokrypis nuo nominalaus matmens. Mažiausiai išsikraipo komponento centrinė dalis (paveiksle pažymėta mėlyna spalva), čia deformacija svyruoja nuo 0,1334 mm iki 0,2519 mm.



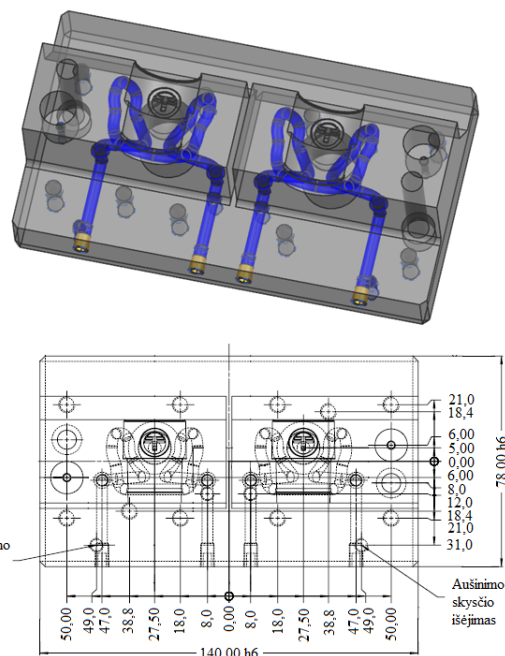
6 pav. Komponento aušinimo trukmės simuliacija pagal aušinimo parametrų kombinaciją Nr. 8
Fig. 6. Simulation of cooling cycle

6 paveiksle pavaizduota komponento aušinimo trukmės nustatymo simuliacija. Įpurkšto mišinio temperatūra liejimo lizde siekia 260,1 °C. Mišinio temperatūra visame liejimo lizde pasiskirsčiusi

tolygiai (paveiksle pažymėta raudona spalva). Skiriasi tik portinė sritis, nes čia skystas plastikas spėja atvėsti iki 258,7 °C temperatūros (paveiksle pažymėta mėlyna spalva). Aušinimo metu plastiko kristalizacija storiausioje komponento sienelėje užtrunka 42,77 s po plastiko įpurškimo. Komponento išstūmimui tinkama temperatūra pasiekama po 15 s.

Formuojančių įdėklų modeliavimas

7 paveiksle pavaizduotas „Unigraphics NX 8.5“ programinėje aplinkoje suprojektuotas nejudamas formuojantis įdėklas. Aušinimo kanalai pažymėti mėlyna spalva. Pastarojo formuojančio įdėklo gamybai bus naudojama 3D spausdinimo technologija, kuri leis atkartoti virtualioje aplinkoje suprojektuotą aušinimo sistemą. 3D spausdinimo technologijos brangumas leidžia ją taikyti tik išskirtiniais atvejais, kai neįmanomas apdirbimas tradiciniais būdais.



7 pav. Nejudamo formuojančio įdėklo modelis ir jo darbo brėžinio fragmentas
Fig. 7. 3D model of cavity insert and its drawing

Nejudamame įdėkle randasi karšto liečio sistemos vožtuvinis purkštukas, per kurį tiekiamas skystas plastikas į liejimo lizdą, todėl projektuojant įdėklo aušinimą svarbu įvertinti įkaitusio purkštuko skleidžiamą šilumą. 7 paveiksle pavaizduota, kad aušinimo kanalų padėtis užtikrina liejimo lizdo ir įkaitusio purkštuko aušinimą.

Bandymo rezultatai

Nuotraukoje (8 pav.) parodyti pagaminti ir nejudamojoje formos pusėje įtvirtinti formuojantys įdėklai. Surinkta liejimo forma išbandyta UAB „Intersurgical“ liejimo ceche. Formos bandymai

atlikti liejimo mašinoje „Krauss Maffei 110“ (9 pav.).



8 pav. Nejudamoji formos pusė
Fig. 8. Fixed side of injection mold

Eksperimento metu liejimo mašinoje nustatytas plastiko įpurškimo slėgis 700 bar. Esant pastarajam slėgiui, liejimo lizdai užpildomi plastiką per 0,94 s. Eksperimentinis aušinimo ciklas t_c nustatomas pagal išstumiamo komponento temperatūrą. Pasirenkamas tas aušinimo ciklas, kurio metu greičiausiai pasiekama komponento išstūmimui tinkama temperatūra.



9 pav. Liejimo mašina „Krauss Maffei 110“
Fig. 9. Injection molding machine KRAUSS MAFFEI 110

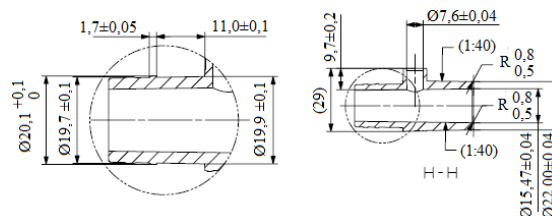
Eksperimento rezultatai pateikti 2 lentelėje. Bandymai Nr. 1 ir Nr. 2 nepasiteisino, kadangi per 16–17 sekundžių aušinimo ciklą komponentai nespėjo pakankamai atvėsti ir sukietėti, todėl po išstūmimo ant detalių liko gilios stūmiklių žymės. Geriausi rezultatai pasiekti bandymu Nr. 3: per 18 sekundžių aušinimo ciklą komponentai atvėso iki 74 °C temperatūros ir buvo sėkmingai pašalinti iš liejimo formos be žymesnių geometrijos pažeidimų. Bandymai Nr. 4, Nr. 5 ir Nr. 6 nėra priimtini, nes ilgesnis aušinimo ciklas ir išlaikymo laikas, didesnė formos užspaudimo jėga yra nepageidaujami faktoriai ekonominiu atžvilgiu.

2 lentelė. Liejimo formos bandymo rezultatai

Table 2. Results of injection mold trial

Band. Nr.	Auš. ciklas t_c , s	Išlaik. laikas, s	Išstum. komp. temp., °C	Užspaud. jėga, kN	Užpildo plastiko masė, g
1.	16	8	80	200	37,31
2.	17	9	77	300	37,31
3.	18	10	74	400	37,29
4.	19	11	75	500	37,29
5.	20	12	73	600	37,29
6.	21	13	71	700	37,29

10 paveiksle pateikti nominalūs liejamo gaminio matmenys. Svarbiausia išlaikyti portinių sričių matmenų tolerancijas, nes priešingu atveju pagaminta detalė negalės būti sandariai sujunginama su kitu gaminiu. Mažiau svarbių matmenų tolerancija lygi $\pm 0,25$ mm.



10 pav. Liejamo komponento nominalūs matmenys
Fig. 10. Nominal dimensions of the component

3 lentelėje pateikti išlieto gaminio vieno iš pagrindinių portų matavimai, t. y. patikrintas nominalus matmuo $\text{Ø}7,6 \pm 0,04$ mm.

3 lentelė. Gaminio porto matmens $\text{Ø}7,6 \pm 0,04$ mm patikrinimo rezultatai

Table 3. Results of component's port measurement

Liejimo lizdo Nr.	Bandinio Nr.	Matmuo $\text{Ø}7,6 \pm 0,04$ mm		
		Išmatuotas dydis, mm	Korekcija	Statusas
1.	1.	7,59	-0,05	tinkamas
	2.	7,51		tinkamas
	3.	7,59		tinkamas
	4.	7,52		tinkamas
	5.	7,53		tinkamas
2.	1.	7,60	-0,04	tinkamas
	2.	7,63		tinkamas
	3.	7,62		tinkamas
	4.	7,52		tinkamas
	5.	7,58		tinkamas
3.	1.	7,51	-0,05	tinkamas
	2.	7,52		tinkamas
	3.	7,51		tinkamas
	4.	7,52		tinkamas
	5.	7,52		tinkamas
4.	1.	7,63	-0,04	tinkamas
	2.	7,64		tinkamas
	3.	7,64		tinkamas
	4.	7,62		tinkamas
	5.	7,63		tinkamas

Visų patikrintų bandinių portų matmenys yra nustatytos tolerancijos ribose. Suprojektuota aušinimo sistema ir parinktas aušinimo režimas liejimo mašinoje leidžia atsirasti tik minimalioms deformacijoms, kurios neturi svarbios įtakos gaminio kokybei.

Išvados

1. Straipsnyje pateiktas liejimo formos formuojančių įdėklų optimalios aušinimo sistemos nustatymo algoritmas. Efektyviausi aušinimo sistemos parametrai (aušinimo linijos padėtis, atstumas tarp aušinimo kanalų, kanalų diametras) išrenkami iš sudaryto diapazono, atliekant simuliacijas „Autodesk Mold Flow“ programoje. Programinėje aplinkoje komponento modelis tiriamas baigtinių elementų metodu, apie aušinimo parametrų efektyvumą sprendžiama pagal simuliacijos rezultatus, t. y. sugeneruotą aušinimo ciklą ir komponento deformaciją.

2. Pasirinktų aušinimo parametrų reikšmės: atstumas nuo liejinimo kontūro – 6 mm; atstumas tarp aušinimo kanalų – 24,8 mm, kanalų diametras – 4 mm.

3. Pagal optimalius aušinimo parametrus atlikti formuojančių įdėklų modeliavimo darbai „Unigraphics NX 8.5“ programinėje aplinkoje. Įdėklai pagaminti naudojant 3D spausdinimo technologiją.

4. Teorinis aušinimo ciklas lygus 15 s, eksperimentinis – 18 s. Nesutapimas lygus 3s (16,7 %). Liejimo metu leidžiama aušinimo ciklo paklaida ± 20 %, todėl galima daryti išvadą, kad simuliacijos sugeneruotas teorinis aušinimo ciklas pakankamu tikslumu atvaizduoja realią aušinimo trukmę.

5. Išlietame komponente aptinkamos minimalios deformacijos, neviršijančios nustatytų tolerancijos ribų.

6. Formuojančių įdėklų aušinimo sistemos optimizacija pavyko – pagal parinktus optimalius aušinimo parametrus suprojektuota ir realizuota aušinimo sistema sąlygojo minimalų 18 s eksperimentinį aušinimo ciklą ir jo aptikimą šešiais eksperimentiniais bandymais.

Literatūra

Augustaitis, V. K. 2000. *Mechaninių virpesių pagrindai*. Vilnius: Žyburio leidykla. 319 p. ISBN 9986–524–27–X.
Barauskas, R.; Belevičius, R.; Kačianauskas R. 2004. *Baigtinių elementų metodo pagrindai*. Vilnius: Technika. 612 p. ISBN 9986–05–792–2
Behr, R. 2011. *GWK. Operating Instructions*. Kierspe. 56 p.
Bushko, W. C.; Stokes V. K. 1996. Solidification of Thermoviscoelastic Melts, *Polymer Engineering Science* 36: 352–364 p.
DuPont. 2000. *General Design Principles for DuPont Engineering Polymers*. Wilmington. 136 p.
Fischer, U. 2014. *Mechanikos inžinieriaus žinynas*. Kaunas: Technologija. 444 p.

Gastrow, H. 1993. *Injection Molds 108 Proven Designs*. 2nd ed. Munich, Vienna, New York, Barcelona: Hanser Publishers. 260 p.

Kanyakunari, R. 2012. *Tool Design – Mold Cooling System and Design Consideration* [interaktyvus], [žiūrėta 2014 10 19]. Prieiga per internetą:

<<http://www.plastic-knowledge-kanyakunari.blogspot.com>>

Lanxess. 2007. *Part and Mold Design*. Pittsburgh. 170 p.

Lin, J. C. 2002. Optimum Cooling System Design of Free-Form Injection Mold Using an Abductive Network, *Journal of Materials Processing Technology* 120: 226–236 p.

Menges, G.; Mohren, P. 1992. *How to Make Injection Molds*. 2nd ed. Munich, Vienna, New York, Barcelona: Hanser Publishers. 385 p.

Mennig G. 1998. *Mold-Making Handbook*. 2nd ed. Munich, Vienna, New York, Barcelona: Hanser Publishers. 732 p.

Mörwald J. 2011. *E-Motion. Operator Manual-Machine*. Schwertberg. 342 p.

Park, S. J. 1998. Thermal and design sensitivity analyses for cooling system of injection mold, *Journal of Manufacture Science* 120: 287–295 p.

SIGMA Engineering GmbH [interaktyvus], [žiūrėta 2015 04 06]. Prieiga per internetą:

<<http://www.sigma-epd.com>>

Optimum Cooling System Evaluation of Injection Mold

Ernas Toptygov

Summary

The final master's work contains study of optimum cooling system evaluation of injection mold. The cooling system parameters, i.e. offset distance of cooling line, cooling channel spacing, cooling channel diameters, are given accordingly to cooling time and product performance (deflection) in principle. The cooling time and product performance are predicted accurately by finite element method using special software. The cooling system parameters are used in 3D modeling of cavity and core inserts. Theoretic cooling time of product is compared to practical cooling time when the injection mold is put to the test in mold machine.

Keywords: cooling system, finite element method, injection mold, injection mold machine ,product performance