



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Rolandas Uscila

**BIOKURO KATILO ARDELĖJE VYKSTANČIŲ ŠILUMOS MAINŲ
MODELIAVIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Rolandas Jonynas

KAUNAS, 2018



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

**BIOKURO KATILO ARDELĖJE VYKSTANČIŲ ŠILUMOS MAINŲ
MODELIAVIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Termoinžinerija (621E30001)

Vadovas

Doc. dr. Rolandas Jonynas

Recenzentas

Doc. dr. Robertas Poškas

Projektą atliko

Rolandas Uscila

KAUNAS, 2018



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Rolandas Uscila

Termoinžinerija, 621E30001

„Biokuro katilo ardelėje vykstančių šilumos mainų modeliavimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2018 m. gegužės 30 d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano, Rolando Uscilos, baigiamasis projektas tema „Biokuro katilo ardelėje vykstančių šilumos mainų modeliavimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

Studijų programa: TERMOINŽINERIJA 621E30001

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Studentui Rolandui Uscilai

1. Baigiamojo projekto tema:

Biokuro katilo ardelėje vykstančių šilumos mainų modeliavimas. Modelling of Heat Transfer in Biofuel Fire Grate-Bar.

Patvirtinta 2018 m. balandžio 12 d. dekanu potvarkiu Nr. V25-11-6

2. Projekto tikslas ir uždaviniai: Ištirti šilumos mainus ardelėje. Apžvelgti kenksmingų kuro priedų poveikį ardelių metalui. Keraminių dangų formavimo technologijas. Taikant skaitinį metodą nustatyti metalo šiluminio laidumo koeficiento įtaką temperatūros kitimui ardelėje.

3. Pradiniai Projekto duomenys: netaikoma.

4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos: projektas turi atitikti jam keliamus reikalavimus (pagal metodinius nurodymus).

5. Projekto aprašomosios dalies struktūra: įvadas; literatūros apžvalga; tyrimo įranga ir metodika; rezultatai; išvados.

6. Grafinės Projekto dalies sudėtis: 5 lentelės, 49 paveikslų.

7. Projekto konsultantai:

Doc. dr. Kęstutis Buinevičius; Lekt. dr. Linas Paukštaitis

Magistrantas Rolandas Uscila

.....
(vardas, pavardė, parašas, data)

Projekto vadovas Rolandas Jonynas

.....
(vardas, pavardė, parašas, data)

Krypties studijų programos vadovas Algimantas Balčius

.....
(vardas, pavardė, parašas, data)

Turinys

ĮVADAS.....	11
1. LITERATŪROS APŽVALGA	12
1.1. Metalo koroziją įtakojantys veiksniai	12
1.2. Keraminės dangos ir jų taikymas	13
1.3. Dengimo būdai.....	14
1.3.1. Magnetinis garinimas	14
1.3.2. Plazminis purškimas.....	15
1.4. Skaitinio modeliavimo taikymas	16
1.5. Paviršių nelygimų įtaka medžiagos šiluminiam laidumui	18
1.6. Šilumos laidumas izoliacinėse medžiagose	20
2. TYRIMO ĮRANGA IR METODIKA.....	22
2.1. Eksperimento priemonės ir sąlygos	22
2.2. Bandinio paviršiaus tyrimas.....	25
2.3. Fluent CFX programinio paketo taikymas.....	26
2.4. Eksperimento skaitinis modelis	27
3. REZULTATAI	32
3.1. Supaprastinto modelio stacionaraus režimo tyrimo rezultatai	32
3.2. Supaprastinto modelio pereinamo režimo tyrimo rezultatai	33
3.3. Ardelės skaitinio modelio stacionaraus režimo tyrimo rezultatai.....	34
3.4. Metalų šiluminio plėtimosi rezultatai	44
3.5. Metalų ir dangos tyrimo rezultatai	46
IŠVADOS	47

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Cheminių elementų koncentracija skirtingos rūšies biokure.....	12
1.2 pav. Korozijos mechanizmas metalo paviršiuje.....	13
1.3 pav. Magnetinio garinimo principinė schema.....	14
1.4 pav. Plazmotrono schema.....	15
1.5 pav. Skaitinio modelio ardelės geometrija.....	16
1.6 pav. Modeliavimo rezultatai esant skirtingiems pirminio oro srautams.....	17
1.7 pav. Skaitinio modelio ribinės sąlygos.....	18
1.8 pav. Šilumos srauto ir šiluminės varžos pasiskirstymas esant skirtingam kontakto plotui.....	19
1.9 pav. Temperatūros pasiskirstymas esant tvirtinimo elementams ir be tvirtinimo elementų.....	20
1.10 pav. Skaitinio modelio skirtingų formų, ventiliacijos ertmės.....	21
1.11 pav. Varžos priklausomybė izoliacinėje medžiagoje esant skirtingiems oro tarpų tūriams.....	21
2.1 pav. Blokinė eksperimentinio stendo schema.....	22
2.2 pav. Eksperimentinio stendo principinė schema.....	23
2.3 pav. Termoporų išdėstymas bandinyje.....	24
2.4 pav. Termoporų išdėstymas bandinyje su danga.....	24
2.5 pav. Pagrindinės SEM dalys.....	25
2.6 pav. Įtekėjimo ir ištekėjimo nustatymai skaitiniame modelyje.....	28
2.7 pav. Ardelės 3D modelis.....	29
2.8 pav. Oro srauto įtekėjimo ir ištekėjimo zonos.....	29
2.9 pav. Suformuotas domenų tinklelis.....	30
2.10 pav. Matavimo atkarpų išdėstymas modelyje.....	30
3.1 pav. Temperatūros pasiskirstymas metale.....	32
3.2 pav. Temperatūros pasiskirstymas išilgai bandinio.....	33
3.3 pav. Temperatūros pokytis laike.....	33
3.4 pav. Temperatūros pasiskirstymas a tiesėje su danga.....	34
3.5 pav. Temperatūros pasiskirstymas a tiesėje be dangos.....	35
3.6 pav. Temperatūros pasiskirstymas b tiesėje su danga.....	35
3.7 pav. Temperatūros pasiskirstymas b tiesėje be danga.....	36
3.8 pav. Temperatūros pasiskirstymas c tiesėje su danga.....	36
3.9 pav. Temperatūros pasiskirstymas c tiesėje be dangos.....	37
3.10 pav. Šilumos srautas d atkarpoje su danga.....	38
3.11 pav. Šilumos srautas d atkarpoje be dangos.....	38
3.12 pav. Šilumos srautas oro domene.....	39
3.13 pav. Metalų domeno šilumos srautas ir temperatūra.....	39

3.14 pav. Pirminio oro srauto temperatūra ir greitis	40
3.15 pav. Šilumos srautas oro domene	40
3.16 pav. Metalo domeno šilumos srautas ir temperatūra.....	40
3.17 pav. Pirminio oro srauto temperatūra ir greitis	41
3.18 pav. Metalo domeno šilumos srautas ir temperatūra.....	41
3.19 pav. Pirminio oro srauto temperatūra ir greitis	42
3.20 pav. Šilumos srautas oro domene	42
3.21 pav. Metalo domeno šilumos srautas ir temperatūra.....	42
3.22 pav. Pirminio oro srauto temperatūra ir greitis	43
3.23 pav. Šilumos srautas oro domene	43
3.24 pav. Metalo domeno šilumos srautas ir temperatūra.....	44
3.25 pav. Pirminio oro srauto temperatūra ir greitis	44
3.26 pav. Šiluminio plėtimosi testas ardelės elemente.....	44
3.27 pav. 15W/(m*K) šiluminio plėtimosi testas ardelėje	45
3.28 pav. 50W/(m*K) šiluminio plėtimosi testas ardelėje	45
3.27 pav. Metalo paviršiaus struktūra	46
3.28 pav. Aliuminio oksido dangos struktūra	46

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Metalų šiluminis laidumas, kontakto aukštis.....	19
2.1 lentelė. Pirminio oro greičiai ir temperatūros.....	23
2.2 lentelė. Šiluminės medžiagų charakteristikos	25
2.3 lentelė. Atkarpų koordinatės metalo domene.....	31
2.4 lentelė. Modeliavimo metu keičiami parametrai.....	31
3.1 lentelė. Temperatūrų gradientas tarp paviršių.....	37

Rolandas Uscila. Biokuro katilo ardelėje vykstančių šilumos mainų modeliavimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Rolandas Jonynas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Energijos inžinerija (E13), Inžinerijos mokslai (E).

Reikšminiai žodžiai: šilumos mainai, modeliavimas, šiluminis laidumas, ardelė.

Kaunas, 2018. 47 p.

Santrauka

Viena iš aktualių problemų biokuro katilo degimo kameroje vykstant kontroliuojamam degimo procesui yra ardyno paviršių korozija. Medžiagos, iš kurių liejamos ardelės, turi pasižymėti atsparumu cheminiam poveikiui ir stabiliu darbu aukštose temperatūrose. Todėl svarbu įvertinti ardelės formos, jos dydžio ir fizikinių savybių įtaką temperatūros pasiskirstymui ardelės paviršiuje ir tūryje. Skaitinių tyrimų, nagrinėjančių šią problematiką, pasaulinėje mokslinėje-techninėje literatūroje yra nepakankamai.

Šiame darbe, naudojant skaitmeninį programinį paketą Fluent CFX, modeliuotas temperatūros pasiskirstymas ardelės paviršiuje ir tūryje. Modeliavimas atliktas naudojant skirtingus medžiagos šiluminius laidumus, keičiant pirminio oro srauto temperatūrą ir įvertinant keraminės dangos poveikį. Modeliavimo rezultatai parodė, kad medžiagos šilumos laidumui didėjant nuo $15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ iki $50 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, temperatūra ardelės paviršiuje mažėja nuo 1216° K iki 1019° K . Nustatyta, kad didinant oro srauto temperatūrą nuo 292° K iki 333° K , ardelės aušinamo paviršiaus temperatūra padidėja 4%. Apsauginė danga neturi didelės įtakos ardelės metalo temperatūros pasiskirstymui.

Rolandas Uscila. Modelling of Heat Transfer in Biofuel Fire Grate-Bar. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. Rolandas Jonynas; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Power Engineering (E13), Engineering Sciences (E).

Keywords: heat transfer, modeling .

Kaunas, 2018. 47 pages.

Summary

One of the most significant problems in a biofuel boiler combustion chamber during a controlled combustion process is the corrosion of the surface of the grates. The materials from which the grates are casted must be characterized by chemical resistance and stable work at high temperatures. Therefore, it is important to evaluate the influence of the shape of the grate, its size and physical properties on the distribution of the temperature on the surface and volume of the grate. The number of research analysing this problem in the world scientific-technical literature is insufficient.

In this work, the temperature distribution on the surface and in the volume of the grate is simulated using the Fluent CFX digital software package. The simulation was performed using different thermal conductivities of the material, varying the temperature of the primary air flow, and evaluating the effect of the ceramic coating. The modelling results showed that as the thermal conductivity of the material increased from $15 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$ to $50 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$, the temperature on the surface of the grate decreased from 1216° K to 1019° K . It was determined that with the increase of the primary air temperature from 293° K to 333° K , the temperature of the cooled surface of the grate increased by 4%. The protective coating does not have a significant influence on the distribution of the temperature in the grate metal.

ĮVADAS

Lietuvoje vis dažniau statomos biokuro jėgainės, kuriose pritaikoma deginti ne tik tradicinę medienos, bet ir žolinių augalų biomasę. Tokio kuro sudėtį sudaro sodininkystės žolinių augalų ir žemės ūkio bei augalų perdirbimo pramonės šalutiniai produktai bei atliekos. Problema pasitaikanti naudojant agrarinį biokurą ta, kad kai kuriuose rūšyse būna padidinta koncentracija cheminių elementų, kurie sukelia metalo koroziją. Aukšta temperatūrą ant ardyno paviršiaus įtakoja apnašų susidarymą ir pelenu lydumą, dėl kurių prastėja degimo procesas ir tenka atlikti katilo valymo darbus. Po kuro sluoksniu esant aukštai ardyno paviršiaus temperatūrai cheminiai elementai, tokie kaip chloras, jungiasi su geležimi sudarydamas druskas, taip prasiskverbdamas į gilesnius metalo sluoksnius ir juos ardydamas. Šiuo metu plačiai paplitusios ardelės liejamos iš ketaus legiruotu dideliu kiekiu chromu. Šio darbo tikslas išsiaiškinti kaip pasiskirsto temperatūra metale priklausomai nuo jo šiluminio laidumo. Modeliavimo metu pasirenkamas tokios metalų savybės, kurios atitinka įprastinio plieno, ketaus ir legiruoto ketaus šiluminiam laidumams. Vienas iš būdų apsaugoti dangas nuo kenksmingo korozijos poveikio tai paviršiaus dengimas keraminėmis ar kompozicinėmis medžiagomis, literatūros apžvalgoje aptariami keli taikomi dengimo būdai ir apsauginės medžiagos.

Norint ištirti, kokie šiluminiai procesai vyksta tarp skirtingų metalų ir fluidu, reikia įvertinti pakankamai daug faktorių, kurie gali įtakoti galutinius rezultatus. Todėl šiuo metu vienas iš sprendimo būdų yra taikyti specializuotus programinius paketus, kurie matematiškai išsprendžia sudarytas užduotis. Tokio tipo užduotis ir sprendžia šiame darbe pasirinktas Fluent CFX programinis paketas, kuris taiko baigtinio tūrio metodą. Tokiu būdu ne visada reikia brangios laboratorinės įrangos, medžiagų, personalo išteklių, taip pat atkreipta pavojus gyvybei, jei eksperimento metu įvyktų nenumatyti atvejai. Šio darbo metu sukurtas laboratorinis standas, kuriuo buvo tiriamas žinomų charakteristikų metalo bandinys su apsaugine danga ir be jos.

Šio **darbo tikslas** –ardelių temperatūros modeliavimas siekiant išsiaiškinti kokią įtaką ardelių paviršiui turi šiluminis laidumas.

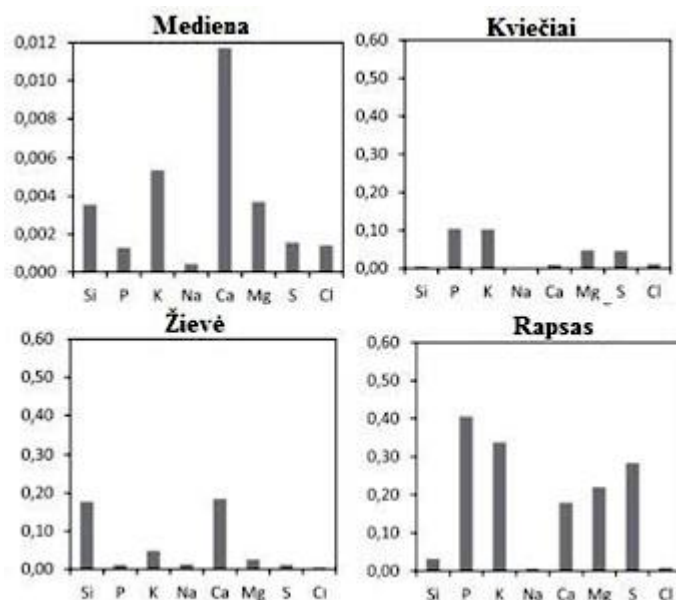
Šiam tikslui pasiekti buvo iškelti atitinkami uždaviniai:

- Apžvelgti kenksmingų kuro priedų poveikį ardelių metalui.
- Išsiaiškinti metodus, kuriuos taikant galima apsaugoti paviršius.
- Taikant skaitinį metodą nustatyti metalo šiluminio laidumo koeficiento įtaką temperatūros kitimui ardelės paviršiuje.
- Ištirti pirminio oro srauto įtaką aušinamo paviršiaus temperatūrai.
- Skaitiniu modeliu nustatyti kokią įtaką temperatūros gradientui turi metalo šiluminis laidumas, išilgai ardelės konstrukcijos.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

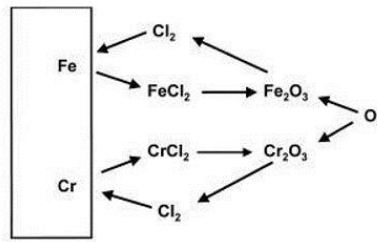
1.1. Metalo koroziją įtakojančios veiksniai

Siekiant kad, darbiniai katilo paviršiai tarnautų ilgiau yra labai svarbu išsiaiškinti, kokiomis sąlygomis, jiems teks dirbti. Viena iš pagrindinių pasitaikančių problemų – cheminė korozija. Tai priklauso nuo kuro sudėtyje esančių cheminių elementų. Kiekvienos biokuro rūšies sudėtis skiriasi. Augalinės kilmės kurą apibūdina vandenilio, anglies, sieros, ir šiuose elementuose esančio azoto ir deguonies kiekis. Be šių degių elementų aptinkamas nedidelis kalio, silicio, natrio, fosforo ir kitų elementų kiekis, kurie po degimo proceso sudaro pelenus. Medienos biokuras pasižymi didesniu magnio, kalcio kiekiu.[1] Nuotraukoje matomi biokuro sudėtyje esančių cheminių elementų kiekiai (mol./kg).



1.1 pav. Cheminių elementų koncentracija skirtingos rūšies biokure

Pagrindiniai elementai sukeltys nuosėdų formavimąsi ir koroziją ant ardymo yra S ir Cl. Šie cheminiai elementai taip pat įtakoja aerozolių susidarymą. Siera yra augalo struktūros sudedamoji dalis, dalyvaujanti proteinų sintezėje. Formuoja dujinius: šarminius ir SO₂ ir SO₃ junginius, reakcijoje su ant metalo šiluminių paviršių esančiais, pelenais sukelia sulfatavimo reakcija. Sudaro sąlygas kalio sulfatų formavimuisi, taip sumažinant kalio chlorido formavimąsi. Chloro didesni kiekiai matomi medienos ir kai kuriam žolinės kilmės biokure. Dalyvauja fotosintezės procese, padeda augaluose paskirstyti maisto medžiagas ir vandenį. Kuro degimo procese esantis Cl formuoja tokius junginius kaip Cl₂, HCl, KCl, NaCl.



1.2 pav. Korozijos mechanizmas metalo paviršiuje

[2]Korozija pasireiškia tuomet, kai kiekis didesnis nei 0,1 % išsiskiria apie 60 % žemoms temperatūroms pirolizės etape, kai temperatūra siekia 200...400°C likusi dalis aukštoje temperatūroje 700...900°C.

1.2. Keraminės dangos ir jų taikymas

Keraminės dangos suformuotos iš tokių oksidų kaip ZrO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 vis dažniau naudojamos medicinos, kosmoso, karinės ir kitose pramonės šakose. Metalų paviršiai padengti atitinkamomis medžiagomis pasižymi geresnėmis fizikinėmis, mechaninėmis, bei cheminėmis savybėmis[3]. Tokios dangos perspektyvios dėl, kad padengus nedideliu μm sluoksniu, jos neturi didelės įtakos pradinės detalės geometrijai, tuo pačiu pakeičiamos jos plokštumos savybės. Suformuotos apsauginės dangos tinkamos atlaikyti aukštas temperatūras, padidinti medžiagos atsparumą korozijai, nusidėvėjimui bei dilimui [4,5]. Esant nedidelei žaliavos kainai iš kurių formuojamos aukščiausios kokybės keramika, aliuminio oksidui[6] randamos vis platesnės panaudojimo galimybės tarp keraminių medžiagų. Savybės, kuriomis pasižymi suformuotos dangos, iš šio oksido, tai dielektrinės - ji nelaidi elektrai, pasižymi dideliu šiluminiu laidumu $18 W/m^1 \cdot K^1$, tankio kitimo ribos priklausomai nuo grynumo 3,94 iki $4,2 kg/m^3$, lydymosi temperatūra – $2073^\circ C$, virimo temperatūra – $2978^\circ C$. Pasižymint kietumu tinkamas naudoti pjovimų įrankių darbiniai paviršiai sustiprinti. Kaip medžiaga aliuminis yra aktyvus metalas ir lengvai sudaro cheminius ryšius su kitais elementais. Atmosferos sąlygomis greičiausiai jungiasi su deguonimi, sudarant ypač ploną oksido plėvelę, iki 4nm storio, kuri apsaugo nuo oksidavimosi, gilesniuose sluoksniuose. Aukštoje temperatūroje atsparus stiprioms rūgštims, nesąveikauja su šarmais. Mokslinėje literatūroje[7] yra aprašyti išsamūs tyrimai apie keraminės dangos charakteristikas ir jos savybes. Nustatyta, kad skirtingo storio dangos turi vienodą paviršiaus šiurkštumą, taipogi jų fazinė α ir γ sudėtis nekinta. Formuojant storesnius sluoksnius didėja struktūros poringumas, bet taip yra prarandamas mikro kietumas ir atsparumas korozijai. Norint keisti Al_2O_3 mechanines savybes galima į dangos sudėtį įterpti kitus medžiagos komponentus.[8] Tokie kompoziciniai mišiniai kaip Al_2O_3/TiC ; Al_2O_3/ZrO_2 ; Al_2O_3/TiB_2 ; Al_2O_3/SiC ; Al_2O_3/TiN ; ir kt. naudojamos tribologinėms ir mechaninėms savybėms gerinti. Ti – gerina smūginį tįsumą, aukština lydymosi temperatūrą, Zr – pasižymi

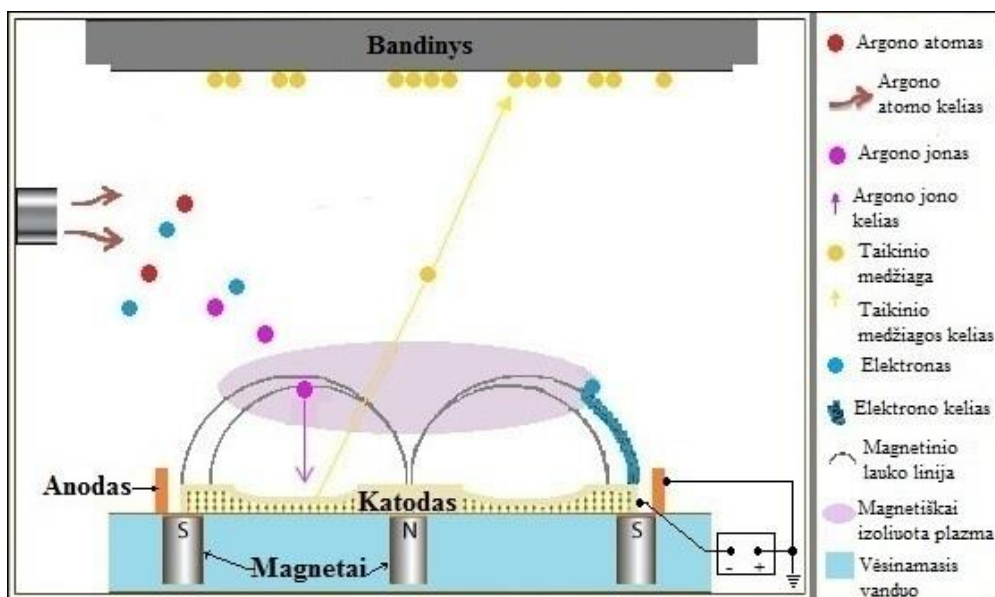
mechanišku stiprumu, atsparus korozijai, taip pat kai kurioms rūgštims esant aukštomis temperatūroms, Si – padidina atsparumą trinčiai ir cheminiam poveikiui.

1.3. Dengimo būdai

Formuoti šias dangas galima naudojant įvairius metodus, kiekvienas turi savo pranašumą ar trūkumą, priklausomai kokių charakteristikų danga pageidaujama. Nagrinėjant literatūros šaltinius [9] juose aptarta keletas dengimo būdų: anodinis oksidavimas, cheminis garų nusodinimas, fizikinis garų nusodinimas, jonų implantacija, plazmos purškimo nusodinimas, magnetinis garinimas ir kiti. Toliau apžvelgsiu, kelis naudojamus dangų formavimo metodus: magnetinio garinimo ir plazminio purškimo.

1.3.1. Magnetinis garinimas

[10] Magnetinio garinimo technologija priskiriama fizikiniu garų nusodinimo metodui ir yra palanki taikyti įvairiose pramonės sektoriuose. Toks procesas dažniausiai vadinamas garinimu arba vakuuminio dulkinimu. Formuojant ypač plonas dangas pasirenkamas būtent šis metodas, kadangi jis pranašesnis už kitus tuo, kad sluoksniai formuojami atomų lygiu.



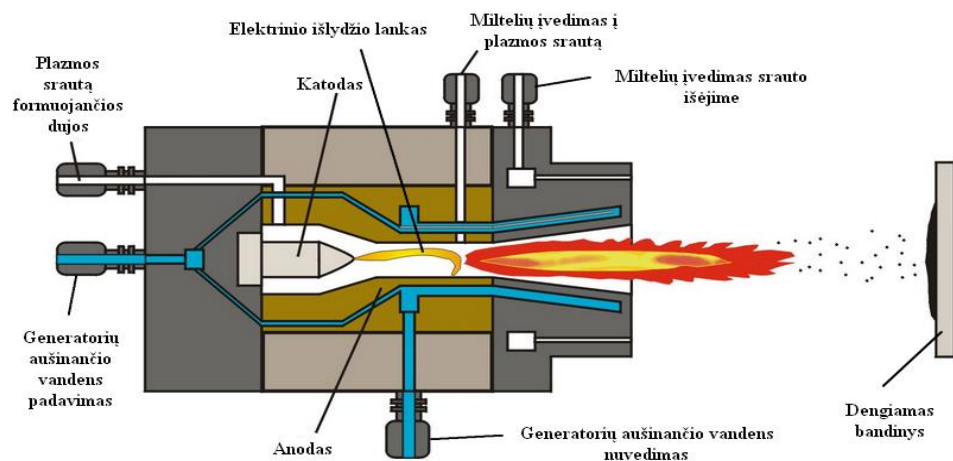
1.3 pav. Magnetinio garinimo principinė schema

Dangos formuojamos argono dujų aplinkoje, kurios tiekiamos į $0,5 \div 12$ Pa slėgio vakuuminę kamerą. Prie katodo jungiamas pora šimtų voltų maitinimo šaltinio neigiamas potencialas. Esant priešingam Ar elektronų potencialui, jie įgreitinami link katodo, susidūrimo vietoje išmušdami atomus į aplinką. Katodas pagaminamas iš tokios medžiagos, kuria norima padengti bandinį. Šie išmušti atomai pasklinda po kamerą, o priartėja ties bandiniu formuodama monosluoksnį [11]. Įvykus susidūrimui taip pat generuojasi antriniai elektronai, kurie įtakoja tolimesnę dujų jonizaciją. Elektrinio lauko poveikio

antriniai elektronai pagreitinami ir juda anodo link, tuo pačiu magnetinio lauko įtakojami esančio virš katodo, jie juda aplink magnetinio lauko linijas ties taikiniu. Šie jonizuoja Argono atomus taip susidaro stabili plazma, kuri sudaryta iš didelio jonų tankio. Dėl didesnio jonų tankio suaktyvėja katodo švitinimas dujų jonais, tai reiškia padidėja išmuštų atomų skaičius iš katodo, o tai pagreitina proceso greitį ir efektyvumą.[12]. Viena iš priemonių reguliuoti augimo greitį yra keisti atstumą tarp padėklo ir magnetinio garintuvo. Taip keičiasi ir formuojamos dangos sluoksnis dalelėmis, kurios suaktyvina dangos paviršių, tuo įtakodamos sluoksnio struktūrą.

1.3.2. Plazminis purškimas

Plačias galimybes apsauginių dangų gamyboje atveria plazminės technologijos. Plazminio purškimo metodas kilo iš elektrolankinio metalų suvirinimo ir terminio išpurškimo technologijų. Aktyvaus plazmos srauto poveikio dėka medžiagos įgauna naujas savybes, atsiranda kokybiškesni ryšiai tarp dispersinių dalelių, o taip pat tarp pagrindo ir dangos. Dangos formavimo proceso metu, dispersinės dalelės deformuojasi, jos tampa panašios savo forma dydžiu. Atlikti tyrimai rodo, kad formuojant dangas, jų struktūra, elementų forma ir matmenys tam tikrose ribose mažai priklauso nuo dalelių geometrijos parametrų, kai procesas reguliuojamas keičiant plazmos šaltinio parametrus, srauto charakteristikas bei dispersinių įvedimo vietą. Keičiant plazmos srauto parametrus, dalelių įpūtimo vietą kanale, bei purškimo nuotolį, galima reguliuoti dangos grūdėtumą, jos savitojo paviršiaus plotą. Plazmotrono pagrindiniai elementai[13], žaliavos ir darbinių dujų transportavimo taškai matomi žemiau pateiktame 1.4 paveikslėlyje.



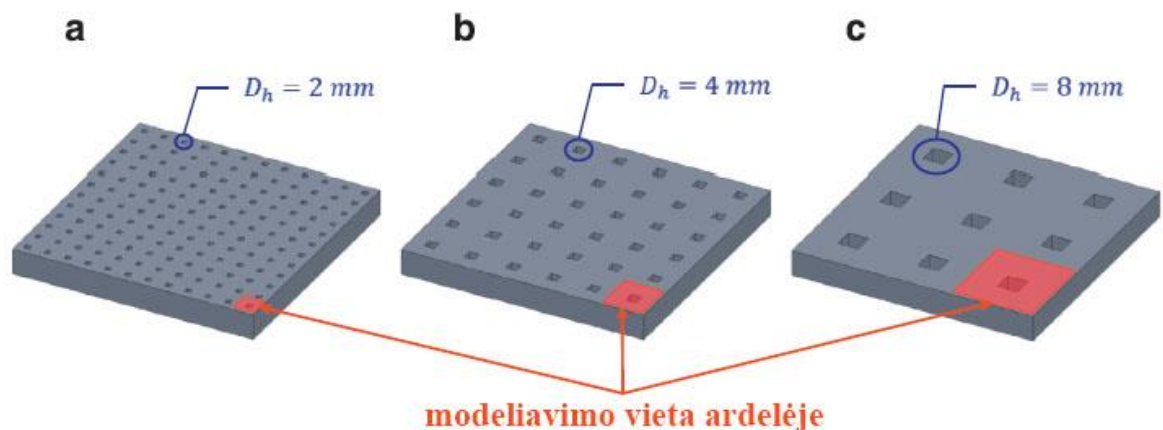
1.4 pav. Plazmotrono schema

Dangos užpurškimo metu milteliai, priklausomai nuo lydymosi temperatūros, įvedami srauto ištekėjime arba į dujų srautą kanale. Aukšta dujų srauto temperatūra išlydo miltelius ir srautu išpurškia link dengiamo bandinio. Atsitrenkę į paviršių išlydyti lašeliai nuo smūgio pasklinda paviršiumi

suformuodami naują dangos sluoksnį. Siekiant, kad bandinys neperkaistų dengimo proceso metu būna aušinamas nukreiptu oru srautu arba vandeniu. Plazmos srautas formuojamas elektros lanko tarp anodo ir katodo, kurį generuoja stabilizuotas nuolatinės srovės maitinimo šaltinis. Plazmą formuojantį dujų (oro, vandenilio, argono) srautą įkaitina nuo 5050° – 10000° K elektros lankas susidaręs tarp anodo ir katodo taip jį visiškai ar dalinai jonizuoja[14]. Sudarant skirtingų dispersinių dalelių mišinį, galima formuoti kompozicinio metalo polimerines dangas ar metalo-keramines dangas. Pasiekiant aukštas temperatūras plazminis dangų formavimo būdas taikomas formuoti dangas iš tokių medžiagų kaip grafitas, metalų karbidų, metalų oksidų, kurių aukšta lydymosi temperatūra. Suformuotos turi tvirtus tarpusavio atomų ryšius, kurios pasižymi geromis cheminėmis ir mechaninėmis savybėmis.

1.4. Skaitinio modeliavimo taikymas

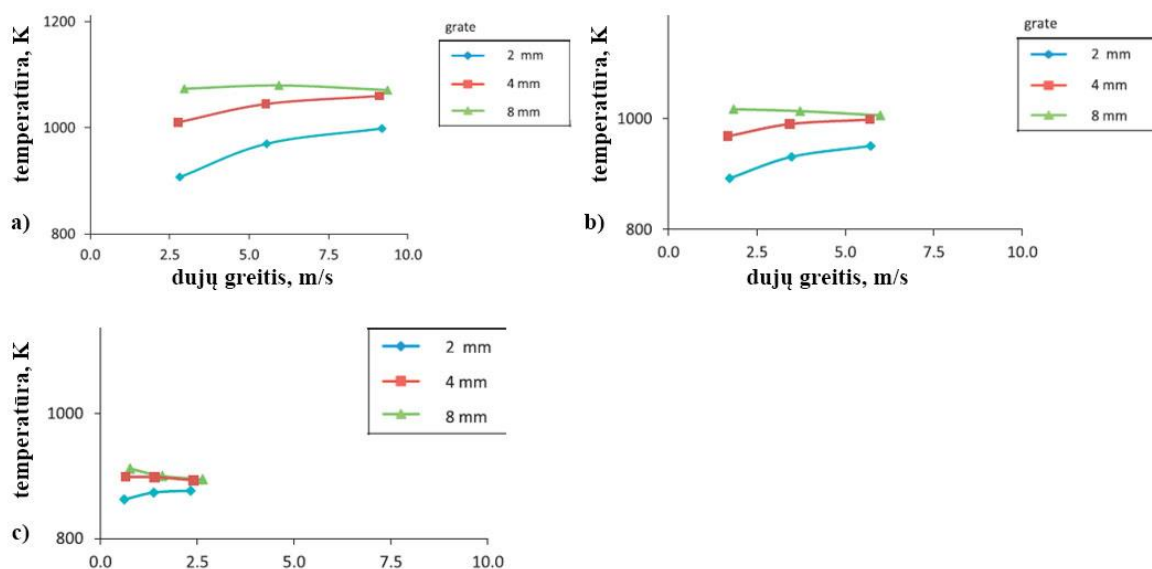
Norint greitai ir vaizdžiai įvertinti ar palyginti gautus rezultatus kai yra keičiami procesų, konstrukcijos, medžiagų ar kiti parametrai, galima pasinaudoti šiuolaikinėmis CFD skaičiuojamosiomis tekančių fluidų programomis. Programos naudojamos šilumos mainų, degimo procesams, takinių medžiagų sudėtingose trimatės ar dvimatės sistemos modeliavimui. Turintį plačias galimybes ir daugelį paketų tokio pobūdžio sprendimas apskaičiuoti naudojamas ANSYS Fluent. Pasitelkus šią programą autoriai N.T.M. Duffy ir kt.[15] modeliavo dujų srauto ir šilumos mainus ardymo paviršiuje.



1.5 pav. Skaitinio modelio ardelės geometrija

Keisdami pirminio oro debito kiekį, ribose nuo 0,05 iki 0,2 tyrinėjo ardymo paviršiaus temperatūros pokyčius. Programoje sudarytas trimatis skaitmeninis modelis, kuriuo galima prognozuoti degimo proceso įtaką šalia metalo paviršiaus. Šiluminiai mainai tarp kuro sluoksnio ir ardymo vyksta nurodant atitinkamą šilumos kiekio srautą ardymo paviršiui. Sukuriama sąsaja tarp ardymo ir dalelių susilietimo zonos, joms taikomas vienodas, bet priešingas šilumos srautas. Bendras šilumos srautas gali sudaryti

spinduliavimą ir konvekciją; laidumas tarp grotelių ir dalelių fazės yra laikomas nereikšmingu, tuo pačiu daroma prielaida, kad krosnies sienelių spinduliavimas į ardyno paviršių nevyksta, kadangi pastoviai yra padengtas kuro sluoksniu. Tuo pačiu įvertinant nustatytus parametrus, tokius kaip: pirminio oro srautą, susidariusių pelenų sluoksnio storį, ardelės storį ir forma. Modeliavimo metu grafikuose, matomi temperatūros priklausomybė nuo oro greičio.



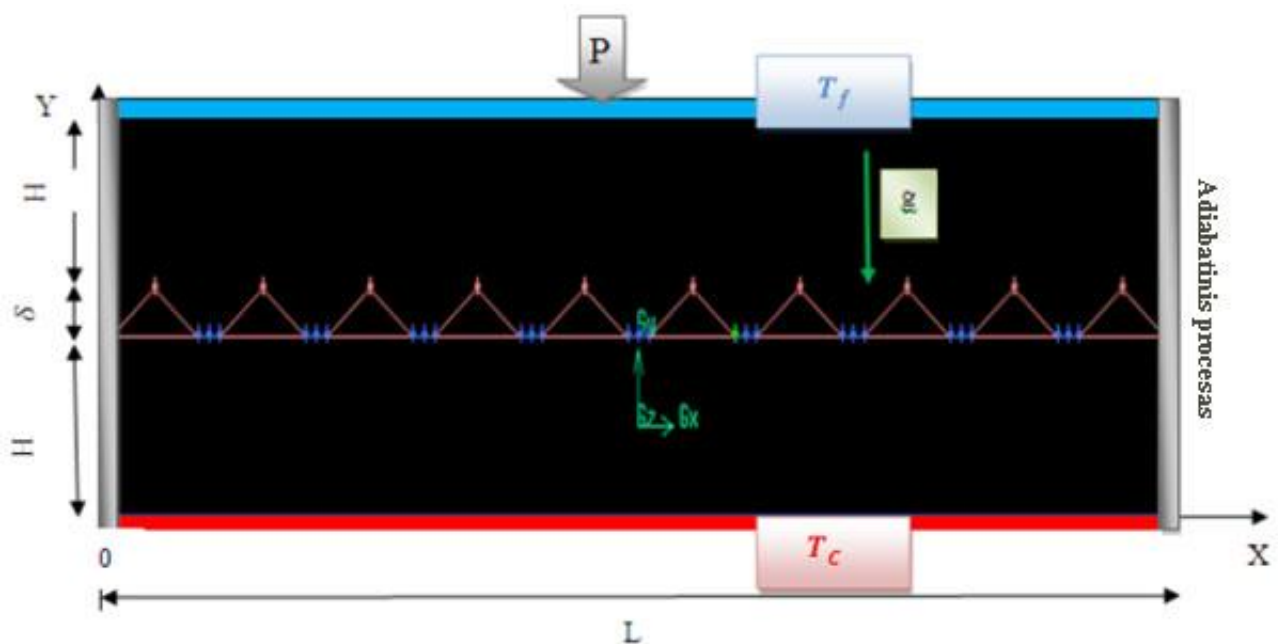
1.6 pav. Modeliavimo rezultatai esant skirtingiems pirminio oro srautams

Santykis tarp temperatūros ir dujų greičio esant skirtingiems pirminio oro debitams: (a) 0,2 kg/m²s, (b) 0,125 kg/m²s, (c) 0,05 kg/m²s. Iš gautų grafikų galima teigti, kad esant pirminio oro debitui didžiausiam, temperatūra skirtingose paviršių pusėse kai ardelės kvadratinės aušinimo kanalo kraštinės ilgis 8mm. yra aukščiausia ir siekia ~1080° K. Temperatūrų pokytis nežymus, bet pratekančio oro srauto greitis siekia iki 9,8m/s. Keičiant aušinimo kanalą į mažesnio ilgio, pastebimas nežymus temperatūros sumažėjimas, bet oro srauto greitis liek panašus. Mažiausio diametro aušinimo kanalas temperatūros pokyčiu turi žymiai didesnę įtaką siekia apie ~890° K esant 9,8 m/s srauto greičiui, ties kaitinimo paviršiumi pakyla iki 1000° K. Iš pateikto grafiko kai oro srautas sumažinamas iki 0,125 kg/(m²*s) dujų greitis išlieka panašus ir siekia nuo 2 m/s. iki 5,5 m/s. esant skirtingiems aušinamo kanalo kraštinėms. Tuo pačiu išlieka žemiausia temperatūra su 2mm kraštine, temperatūrų skirtumas apie 100° lyginant su 8 mm. Trečiam grafike matoma mažiausias temperatūrų skirtumas tarp paviršių iki 10°, 900° K ribose. Galima daryti išvadą, kad įleidžiamo oro srauto sumažinimas turi teigiamos įtakos ardelės paviršiaus temperatūros mažinimui. Tai paaiškinti galima tuo, kad mažesnis oro kiekis patenką į degantį kuro sluoksnį ir degimo procesas nevyksta taip intensyviai. Visiškai sumažinti aušinimo angos išmatavimus netikslinga, kadangi didelė tikimybė, kad į jas pateks kietos frakcijos pelenai ir aklinau jas užkimš.

Autorių teigimu pelenų sluoksnio buvimas ant grotelių paviršiaus turi teigiamą poveikį; tai skatina oro sklaidą grotelių paviršiumi.

1.5. Paviršių nelygumų įtaka medžiagos šiluminiam laidumui

Dažniausiai skaitome, kad sąlyginai lygūs metaliniai paviršiai yra lygūs nors taip iš tikrųjų nėra. Atliekant šiluminio laidumo tyrimus tarp dviejų ar daugiau kietų kūnų reikia įvertinti šiluminę varžą sąlyčio vietoje, remiantis atitinkančias geometrines sąsajos sąlygas ir naudojamų medžiagų charakteristikas. Metalo paviršiaus šiluminės savybės įtakoja jo topografija, šiurkštumas. Priklausomai nuo didesnis slėgis veikia kūną į paviršius, tuo sąlyčių taškų pasiskirstymas plokštumoje užima didesnę plotą. Daugelį šiluminiu uždavinių sudaro tai, kad kontaktuoja du kieti kūnai, kurių vienas yra lygus, o kitas porėtas ir šiurkštus. Norėdami ištirti kaip įtakoja paviršiaus nelygumai šiluminę varžą, autoriai Ch. Rachid, ir M. Mohammed [16] tyrė skaitmeniniu dvimačiu modeliu, kuris aprašomas žemiau pateiktame 1.7 paveikslėlyje



1.7 pav. Skaitinio modelio ribinės sąlygos

Dvimačį modelį sudaro dviejų dydžių metalinės plokštės, kurių ilgį L ir aukštį H , δ nurodo aukštį geometrijos formos aukštį, kuriuo teka fluidas, šiuo atveju oras. Išoriniuose paviršiuose yra palaikomos dvi skirtingos, bet pastovios temperatūros T_c ir T_f , numatyta, kad antroji yra didesnė. Vertikalios kraštinės $X=0$ ir $X=L$ skaitoma, kad yra termiškai izoliuotos, jomis nevyksta jokie šiluminiai mainai. Oro tarpai yra palyginus prasti šilumos laidininkai, todėl pirmiausia šiluma nuvedama vietose, kuriose yra tiesioginis kontaktas tarp plokščių, o tai sąlygoja, kad srauto linijos susitraukia, dėl kontakto terminės varžos. Skirtingos skysčių mechanikos problemos sprendžiamos ta pačia lygtimi, išskiriama tik kraštinės

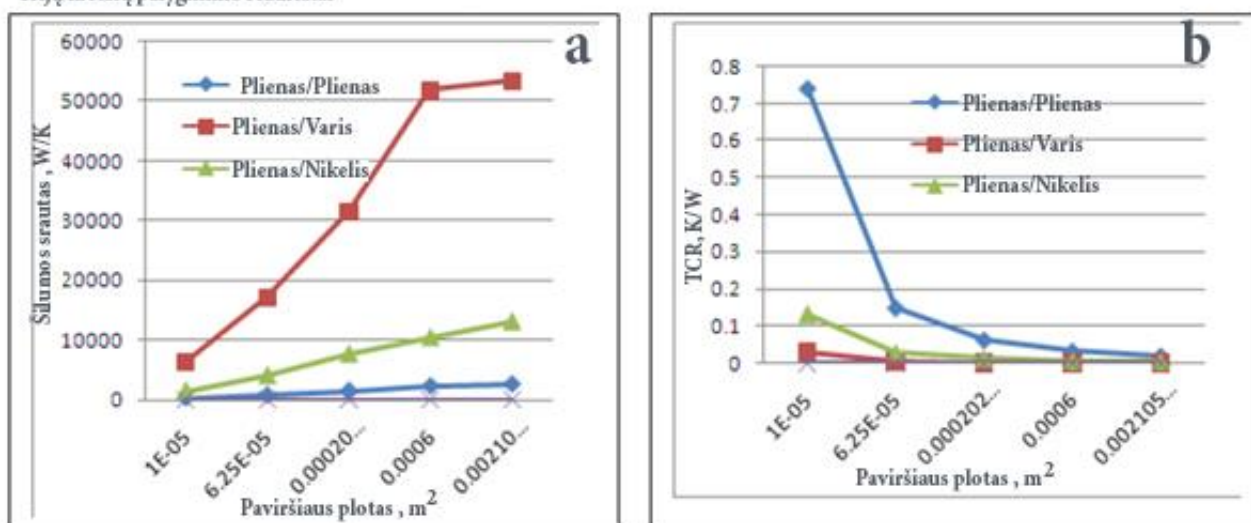
sąlygos. Nurodžius ribinius duomenis $T_C = 500K$, $T_f = 300K$, nurodoma gravitacijos įtaką fluido judėjimui $g=9,81m/s^2$. Modeliuojant buvo keičiamos dviejų metalų, kontakto zonos aukštis, šiluminis laidumas adaptuoti duomenis pateikiami lentelėje:

1.1 lentelė. Metalų šiluminis laidumas, kontakto aukštis

Metalas	λ_s $W/m * K$	Kontakto storis, δ				
		mm	mm	mm	mm	mm
Plienas-Plienas	16,27	0,05	0,04	0,033	0,025	0,019
Plienas-Varis	387,6	0,05	0,04	0,033	0,025	0,019
Plienas-Nikelis	91,74	0,05	0,04	0,033	0,025	0,019

Parinktos atitinkamas geometrijos, lietimosi zonos visais trimis atvejais taikomas vienodas, taip gauti rezultatai atvaizduojami žemiau pateiktame grafike. Keičiant kontakto aukštį keičiasi fluido t. y. oro kiekis tarp metalų paviršiaus, kuri įtakoja šiluminį laidumą tarp medžiagų esant skirtingoms temperatūroms.

Trijų metalų palyginimo rezultatai

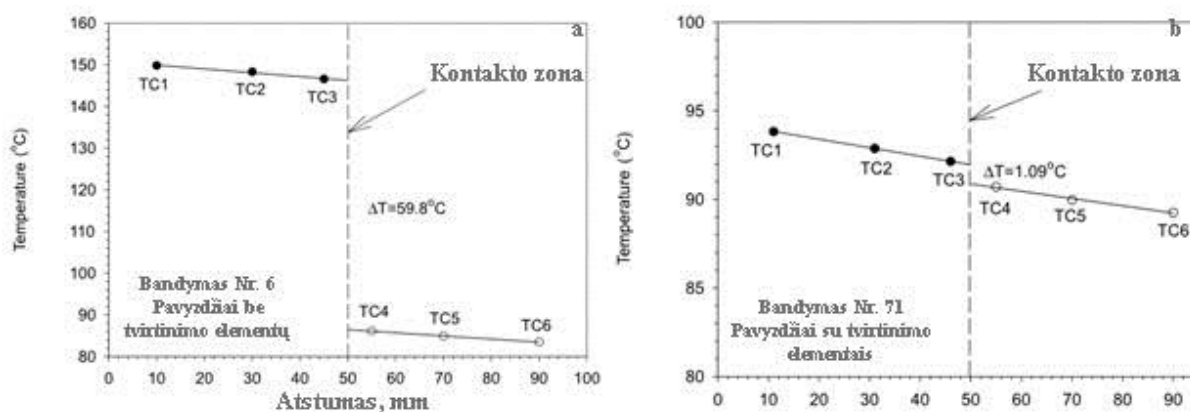


1.8 pav. Šilumos srauto ir šiluminės varžos pasiskirstymas esant skirtingam kontakto plotui

Paveikslėlyje (a) metalų poros plienas-plienas ir plienas-nikelis šilumos srauto pralaidumas kontakto ploto atžvilgiu skiriasi nedaug. Šilumos srauto priklausomybė nuo kontaktuojančio ploto atveju kai plienas-plienas žymios. Iš pateikto grafiko matome, kad metalo poros plienas-plienas šiluminio srauto priklausomybė nuo kontakto ploto nežymi. Plienas-Nikelis metalo poros įtaka šilumos srautui didesnė ir siekia 12kW. Didžiausias šuolis matomas metalo poroje Plienas-Varis, didžiausio kontaktinio ploto modeliavimo metu pasiekė 52kW tai yra žymiai daugiau nei ankstesnių variantų. Grafike (b) matomas metalų porų šiluminės varžos priklausomybė nuo ploto, kuriuo jie kontaktuoja vienas su kitu.

Šiuo atveju matoma mažiausia Plieno-Vario priklausomybė nuo ploto, galima teigti, kad šiluminė varža galime nepaisyti. Plienas-Nikelis mažiausio ploto atveju sudaro kontakto šiluminę varžą, kuri siekia 0,12. Plienas-Plienas metalo porų atveju kai kontakto plotas mažiausias šiluminė varža išsiskiria ir siekia 0,75, plotui didėjant varža tolygiai mažėja.

Kontakto šiurkštumo įtaką šiluminiu laidumui tarp dviejų metalų tyrinėjo A. K. Hasselström ir U. E. Nilsson [17]. Jų darbe aprašomi bandymai atlikti su skirtingų metalų plokštelėmis, kurios tarpusavyje buvo sujungtos varžtais. Vienu atveju plokštelės uždėdamos viena ant kitos, antru atveju kontakto užtikrinimui panaudoti keturi varžtai, trečiu aštuoni varžtai. Eksperimento metu keičiamas varžtų įveržimo stiprumas, įvertinama sudaryta prispaudimo jėga, ribose nuo 1 iki 10 Nm. Siekiant užtikrinti sklandų ir tolygų temperatūros palaikymą standą sudarė du kaitintuvai, izoliuojančiame sluoksnyje. Riboto ploto erdvėje sudedami du vienas ant kito metalo blokai, prie kiekvieno pritvirtinamos trys K - tipo termoporos. Vieną metalo bloko pusę kaitinama, antra vėsinama. Gautuose rezultatuose matomi aiškūs skirtumai tarp uždėtų plokštelių ir sutvirtintų varžtais.



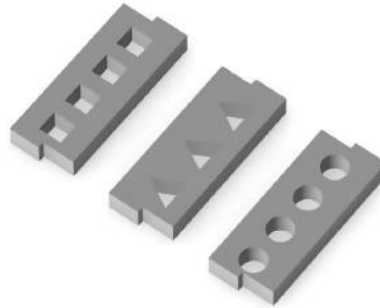
1.9 pav. Temperatūros pasiskirstymas esant tvirtinimo elementams ir be tvirtinimo elementų

Pateiktame paveikslėlyje (a) gauti rezultatai parodo, dviejų metalo plokščių, uždėtų viena ant kitos, kontakto vietoj jos temperatūros skirtumas siekia $59,8^\circ$. Šio bandymo metu nebuvo naudojami varžtai, paskaičiuotas šilumos kiekis siekė 14 kW/m^2 . Paveikslėlyje (b) atvejis su keturiais priveržtais varžtais, kurių veržimo metu buvo panaudotas 5Nm sukimo momentas. Temperatūra tarp skirtingų paviršių siekia $1,09^\circ$, šilumos kiekis 7.47 kW/m^2 .

1.6. Šilumos laidumas izoliacinėse medžiagose

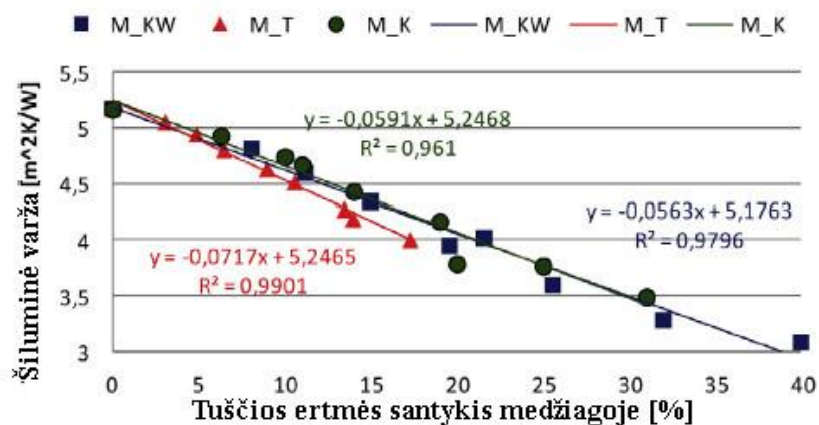
Kuriant naujas izoliacines medžiagas norima jas padaryti lengvesnes, bei tvirtesnes, todėl bandomos įvairios konstrukcinės modifikacijos. Tokiu būdu siekiama taupyti žaliavą iš kurios jos gaminamos neprarandant izoliacinių savybių. Statybų rinkoje tokių medžiagų pasirinkimas pakankamai didelis, visas jas sieja vienas bendras parametras tai mažas šilumos laidumo koeficientas. Kokią įtaką daro šiluminiui laidumui oro tarpų išdėstymas medžiagoje tyrinėjo B. Orlik ir J. Belok [18]. Jie keitė

oro kanalų geometriją, išdėstymą plokštėje. Sekcijos kurias tyrė turėjo apvalias, trikampes ir kvadratinės formas, kurios buvo įvairiai išdėstomos plokštėje.



1.10 pav. Skaitinio modelio skirtingų formų, ventiliacijos ertmės

Šių ertmių vidiniai paviršiai yra visiškai ar dalinai padengti medžiaga, kuri atspindi šilumą. Esant tokiai medžiagos struktūrai, atsižvelgiant į šilumos plitimo kryptį yra pakankamai sudėtinga apibūdinti šilumos perdavimo procesą [13-16]. Tokio pobūdžio sprendiniuose reikia atsižvelgti į laidumą pro kietus kūnus ir tarpus tarp jų, šilumos laidumą einantį per kanalą ir įskaitant šiluminių paviršių pasipriešinimą. Taip pat turi įtaką ir konvecinis fluido judėjimas kanalų ertmėse ir šiluminė spinduliuotė tarp medžiagos paviršių. Analizuojamas modelis sudarė dvidešimties centimetrų stačiakampio plokštę su viena eile kanalų išdėstytų lygiagrečiai plokštės ilgiui. Daroma prielaida, kad kanalai užpildyti oru, o jų galai užsandarinti folija, kurios emisijos koeficientas lygus 0,6, kitu atveju šis koeficientas lygus 0,1. Autoriai atliko skaičiavimus naudodami „Elmer“ programinį paketą.



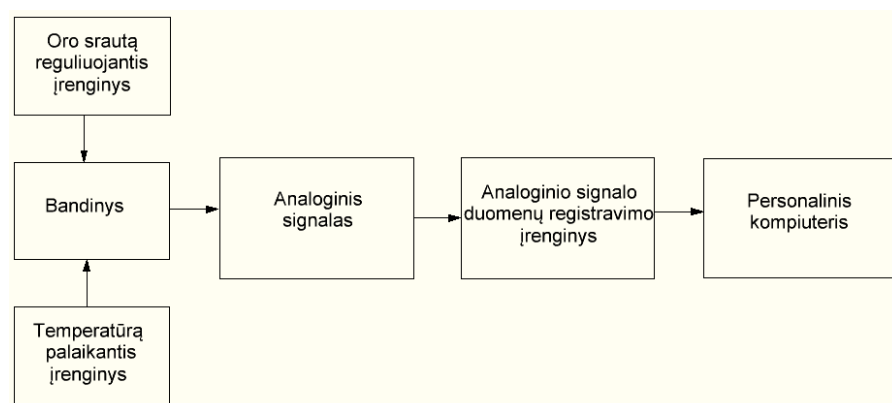
1.11 pav. Varžos priklausomybė izoliacinėje medžiagoje esant skirtingiems oro tarpų tūriams

Iš grafiko galima spręsti, kad trikampės formos ertmės gali užimti ne daugiau 17% erdvės ir jų šiluminė varža pakankamai didelė. Medžiagoje. Tikslinga naudoti kvadratinės formos ertmes, kadangi jų plotas gali užimti iki 40% medžiagos tūrio, taip sutaupydami žaliavą.

2. TYRIMO ĮRANGA IR METODIKA

2.1. Eksperimento priemonės ir sąlygos

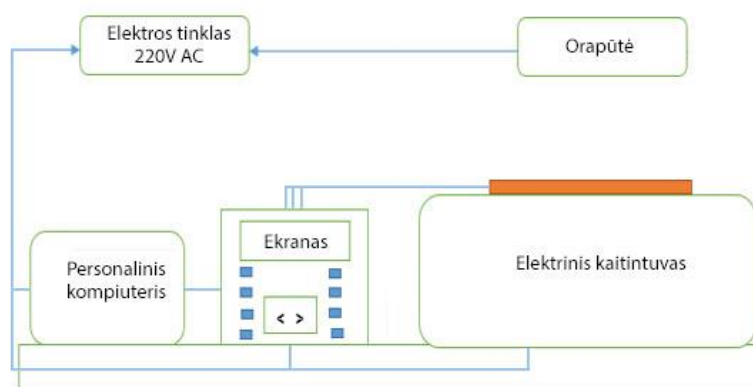
Tirti šiluminį laidumą nedidelio tūrio kūnuose pakankamai sudėtinga. Tam įtakos turi įvairūs faktoriai, kuriuos sudėtinga kontroliuoti. Patalpoje, kurioje vykdomi eksperimentai turi būti užtikrinta pastovi temperatūra ir pakankamai sandari, kad nesusidarytų papildomos sąlygos priverstinio oro judėjimui. Reikia įvertinti ir šilumos laidumo koeficientą tarp dviejų metalo paviršių, kurie kiekvieną kartą nuėmus kinta vieta ir dvi sąlyčio zonos niekada nebūna vienodos, tai sudaro paklaidų galimybę kartojant eksperimentus ir lyginant rezultatus. Įtampos kritimai elektros tinkluose taipogi neigiamai prisideda prie elektros įrengimų darbo režimų nustatymų. Eksperimente naudojami du prietaisai, kurių galingumas skaičiuojamas pagal aktyviają varžą: orapūtė - užtikrina vėsinaimo paviršiaus oro srauto greitį, temperatūrą ir kaitintuvas – paskirtis, temperatūros reguliavimas kaitinamo paviršiaus atžvilgiu. Siekiant išsiaiškinti temperatūrų pasiskirstymą metale buvo sukonstruotas eksperimentinis stendas, kurį sudarė šie pagrindiniai elementai: Orapūtė (Bosh), galinga 2000W sensoriniu valdymu, nustatytos ir realios temperatūros pateikimas skystų kristalų informaciniame ekranėlyje. Temperatūra tolydžiai reguliuojama iki 650° C, kintamas penkių padėčių oro srauto nustatymas tarp 250-500 l/min. Elektrinis kaitintuvas (Girmi), galingumas 1500W, metalinis paviršius, trijų padėčių pasirenkamos temperatūros nustatymas. Analoginių signalų registravimo įrenginys (Agilent 34405A), 22 kanalų, plačios matavimo ribos: nuolatinės įtampos 100mV...1000V, nuolatinės srovės 10mA...10A, talpos 1nF...10mF ir kt. Oro greičio matuoklis (Windmaster 2), matavimo ribos 0,7...42 m/s. Nešiojamas personalinis kompiuteris (Dell). Stendo blokinė schema pateikta žemiau



2.1 pav. Blokinė eksperimentinio stendo schema

Vizualiai parodyta, kokie įrenginiai naudojami eksperimento metu. Oro srautą reguliuojantis įrenginys palaiko norimą oro greitį ir temperatūrą, bandinio vėsinaimos pusės. Temperatūrą palaikantis įrenginys užtikrina bandinio kaitinamos pusės temperatūrą. Ardelėje pritvirtintos termoporos veikia kaip

keitiklis - fizikinį dydį keičia į analoginį signalą, tai yra temperatūrą į įtampą. Šie signalai vėliau patenka į duomenų registravimo įrenginį, kuris registruoja nustatytais laiko intervalais gautus duomenis. Vėliau kompiuteryje programiniu paketu gauti duomenys atvaizduojami ir išsaugojami.



2.2 pav. Eksperimentinio stendo principinė schema

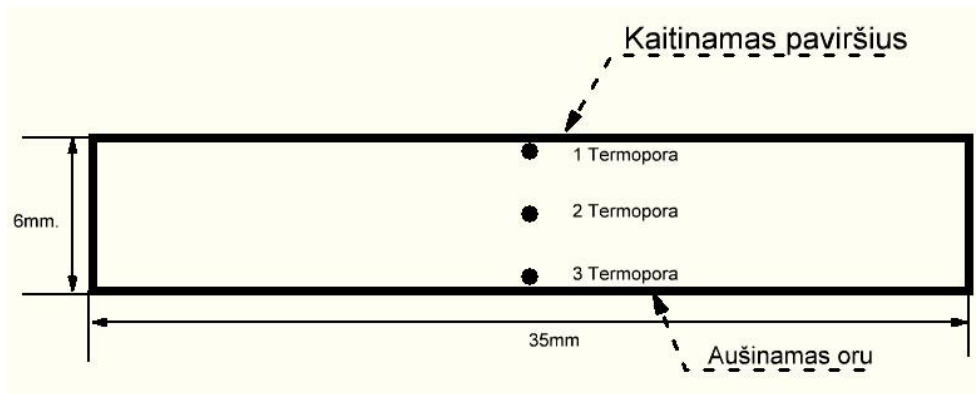
Stačiakampio gretasienio formos metalinis elementas, matmenys: $h=0,006\text{m.}$; $w=0,01\text{m.}$; $l=0,035\text{m.}$, kurio temperatūra 293°K padedamas ant kaitinimo paviršiaus. Viena elemento pusė yra kaitinama, kita pusė apipučiama oru, kurio greitis ties paviršiumi 6m/s , temperatūra 60°C . Greitis nustatytas padėjus prietaisą ant kaitinimo paviršiaus ir įjungus orapūtę prietaisu skirtu matuoti vėjo greičiui. Orapūtės padėtis viso eksperimento metu nesikeitė, keičiami buvo tik temperatūros ir greičio režimai. Sudaryta parametrų lentelė pateikta žemiau.

2.1 lentelė. Pirminio oro greičiai ir temperatūros

Orapūtės nustatymai		Prie dangos	
Padėtis	Temperatūra	Greitis	Temperatūra
	C	m/s	C
1	0	1.5	19
2	0	2.9	19
1	50	3.1	30.4
2	50	5.4	31.8
1	330	3.7	62
2	330	6.2	63

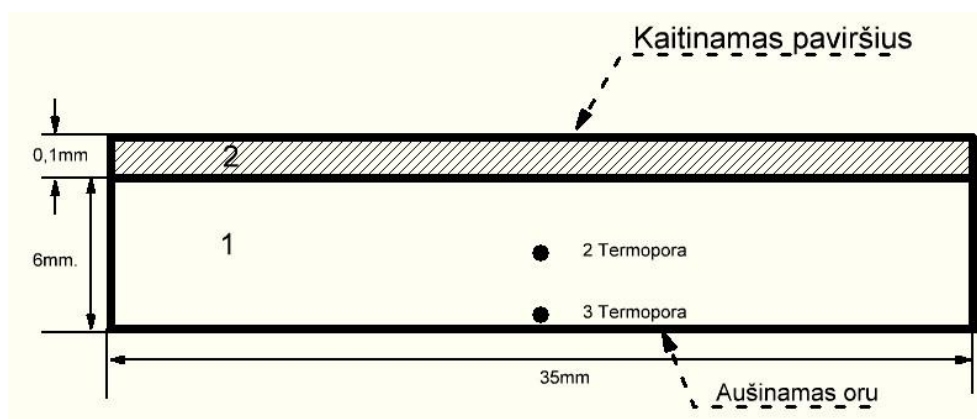
Temperatūros kontrolei užtikrinti naudojamos K-tipo termoporos. Jų matavimų ribos siekia nuo -270°C iki 1370°C turinčią $\pm 0,4\%$ matavimo paklaidą. Žinoma tai priklauso nuo kokybiško jos tvirtinimo prie metalinio paviršiaus, kad kuo mažiau iškraipytų matavimo tikslumą, jos įvirinamos į metalą taškiniu suvirinimo prietaisu. Įsitikinti matavimo paklaidoms, daromi kontroliniai matavimai:

verdančiame (373° K), ir lediniame (273° K) vandenyje, vėliau lyginant duomenis normatyvinėse lentelėse ir užfiksuotus prietaiso duomenis. Pirmu atveju buvo matuojami temperatūros pasiskirstymai bandinio be dangos, temperatūros pokyčiai stebimi trimis termoporumis. Prieš padedant ant kaitinamo paviršiaus, bandinio plokštuma buvo užtempta aukštai temperatūrai atspari pasta.



2.3 pav. Termoporų išdėstymas bandinyje

Antru eksperimento atveju su danga, kad būtų geras kontaktas tarp plokštelės ir kaitintuvo, specialiu plonu strypeliu prispaudžiama prie aušinamo paviršiaus. Tokių būdu pati plokštelė įtvirtinama, tuo mažėja galimybė, kad pajudės bandymo metu. Temperatūros pokyčiams stebėti įtvirtinamos dvi termoporos, viena prie aušinamo paviršiaus, antra per vidurį. Prie keraminio paviršiaus nėra galimybės fiksuoti termoporos, kadangi gręžiant ar kitaip paveikus dangą yra galimybė ją pažeisti.



2.4 pav. Termoporų išdėstymas bandinyje su danga

Medžiagų matmenys ir charakteristikos pateiktos žemiau esančioje 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Šiluminės medžiagų charakteristikos

Medžiaga	Išmatavimai (p; i; a) mm	Specifinis svoris kg/m ³	Šiluminis laidumas W/(m*K)	Specifinė šiluma J/(kg*K)
Plienas	10x35x6	7800	50	450
Al. oksidas	10x35x0,1	3690	18	880

2.2. Bandinio paviršiaus tyrimas

Dangos struktūros morfologijai ir cheminiam poveikiui įvertinti buvo naudojamas SEM (skaitmeninis elektroninis mikroskopas) Praėjus daugiau nei 70 metų nuo pirmojo elektroninio mikroskopo išradimo, iš sąlyginai nesudėtingo prietaiso, pritaikius šiuolaikines technines naujoves tapo prietaisu su turinčiu didelę rezoliuciją ir neribotas analitines galimybes. Taikant pažangius metodus prietaiso naudojimas neapsiriboja vien kietų medžiagų morfologijos atvaizdavimui yra galimybė elementų sudarančių objektų kiekybiniam matavimams. Skenuojanti elektroninis mikroskopas sudarytas iš vakuuminės sistemos, detektorių, elektronų optinės patrankos, elektronikos bei programinės įrangos. SEM vaizdas yra formuojamas iš „taškų“. Pirmiausia siauras plonas didelės energijos elektronų spindulys sufokusuojamas į vieną tašką bandinio paviršiuje. Dėl elektronų sąveikos su kietuoju kūnu toje srityje vyksta plataus energijų intervalo elektronų emisija. Kai išspinduliuoti elektronai yra registruojami davikliais, gaunamas elektrinis signalas, kuris naudojamas formuoti vaizdai ekrane. Tokiu būdu gaunamas vienas labai mažo paviršiaus ploto vaizdas. Sekančiame žingsnyje elektronų spindulys fokusuojamas kitame šalia esančiame taške ir procesas vėl kartojamas, kol gaunamas viso tiriamo bandinio vaizdas. Skenuojančiu elektroniniu mikroskopu vaizdas gali būti padidintas nuo 20 iki 100000 kartų [21].



2.5 pav. Pagrindinės SEM dalys

- Elektronų šaltinis, formuoja siaurą elektronų pluoštą ir įgreitina juos iki ~ 50 kV
- Lęšių sistemos, fokusuoja elektronų spindulį
- Sistema kontroliuojanti elektronų spindulį, kuriuo skenuoja bandinį
- Bandinio laikiklis, suteikia galimybę pasukti ar pakreipti tiriamą medžiagą.
- Elektronų detektorius
- Elektrinė grandinė užtikrinanti stabilų energijos tiekimą prietaiso sistemoms
- Vakuuminių siurblių sistema, užtikrina vakuumą.

Dangų paviršius tirtas Lietuvos energetikos institute esančiu Hitachi S - 3400N skenuojančiu elektroniniu mikroskopu. Padarytos paviršių nuotraukos metalo su danga ir be jos, prieš paveikiant KCl ir po 5 ciklų 779°K atkaitinimo. Gauti vaizdai aptariami rezultatuose.

2.3. Fluent CFX programinio paketo taikymas

Nagrinėjant kūno judėjimo fluide ypatumus, nustatant aptekėjimo pobūdį, pasipriešinimo jėgą, šilumos mainus tarp kūno ir fluido, bei kitus termodinaminius parametrus, dažniausiai naudojami brangūs eksperimentinių tyrimų įrengimai ir sudėtingos techninės konstrukcijos. Atvejai, kai tiriama aukštos temperatūros pokyčiai, tarp nedidelių matmenų turinčių objektų, tampa techniškai sudėtinga įgyvendinti, pasitaiko vis dažniau. Tuo pačiu gautus rezultatus sudėtinga informatyviai atvaizduoti išskyrus atvejus, kai tai nesudėtingi, kelių reikšmių grafikai. Todėl šiuo metu vis dažniau naudojami moksliniai-inžineriniai programų paketai, kurie palengvina atliekamas užduotis, suteikia galimybę dalinai ar visai atsisakyti fizinių eksperimentinių tyrimų. ANSYS - programų paketas atliekantis inžinerinę(terminę ir struktūrinę) projektų analizę pritaikant baigtinių elementų metodą. Paketas sudarytas iš elektronikos, skysčių, struktūrinės, tinklelio sudarymo ir simuliacijos modulių. Šiame darbe skaitiniai tyrimai atlikti naudojant FLUEN (CFX) , pritaikyta fluidų tekėjimo, šilumos perdavimui tiriamo kūno geometrijai modeliuoti.[19,20] Naudojami skaitiniai metodai ir algoritmai, padedančius spręsti ir analizuoti fluentų srauto tekėjimo kylančias problemas. Taikomas metodas Navjė ir Stokso lygčiai spręsti. Tai diferencialinė lygtis, nuspėjanti fluentų masės judėjimą. Ji sudaryta iš energijos ir diferencialinės masių tvermės dėsnio formos:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho)u}{\partial x} + \frac{\partial(\rho)v}{\partial y} + \frac{\partial(\rho)w}{\partial z} = 0;$$

2.1 lygtis išreiškia masės tvermės dėsnį, kuris dar dažniausiai vadinasi tęstinumo lygtimi, kadangi jai nereikia sudaryti jokių prielaidų, išskyrus tai, kad tankis ir greitis yra tęstinumo funkcijos. Taigi srautas gali būti kintantis arba pastovus, be trinties arba klampus, spūdis ar nesugniuždomas. Tai dalinė diferencialinė lygtis, sudaranti ašinį greitį(u, v, w) ir tankį (ρ).

$$\rho g_x - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{du}{dt};$$

$$\rho g_y - \frac{\partial \rho}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{dv}{dt};$$

$$\rho g_z - \frac{\partial \rho}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{dw}{dt};$$

Momento tvermės dėsnis priskiriamas prie fundamentalaus gamtos dėsnio. Jis nusako, jei uždaroje sistemoje objektus neveikia išorinės jėgos, tuomet tokioje sistemoje momentas nepakis ir išliks pastovus. Viena iš šio teiginio samprotavimų gali būti tokia, kad bet kokio objekto sistemos masės centro greitis, pastoviai išlieka nekintantis, nebent pati sistema bus paveikta kitos išorinės jėgos. (2.2) lygtyje tankis, tekančio fluideo slėgis, laikas ir klamos koeficientas yra kintamieji.

$$\rho \frac{du}{dt} + p(\Delta V) = \Delta(k\Delta T) + \emptyset.$$

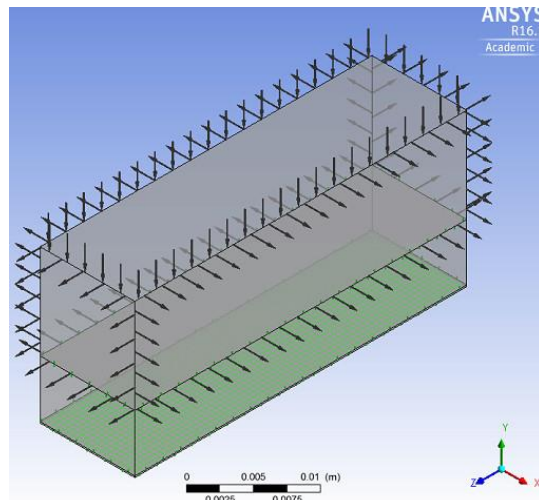
(2.3) lygtis – energijos tvermės dėsnis galiojantis niutoniniams fluidams pagrindinėmis nestabilumo, klamos, spūdomo, šilumos perdavimo srauto sąlygomis, išskyrus neigiamą šilumos perdavimą spinduliavimą ir vidinius šilumos mainus, kurie gali atsirasti vykstant cheminių reakcijų metu. Kintamieji lygtyje yra tekančio fluideo slėgis, tankis, vidinė energija (u), greitis (V), šilumos laidumo koeficientas (k), temperatūros (T), gradientas ir laikas (t).

2.4. Eksperimento skaitinis modelis

Norint pradėti naudotis Fluint CFX paketo galimybėmis pirmiausiai reikia sukurti fluideo ir kūno geometrijos. Ilgio matavimo dydžius galima nurodyti kaip metrais taip ir milimetrais, tai labai patogu priklausomai kokie numatytų objektų matmenys. Pasirenkamos norimos koordinačių ašys ir piešiami kūnai, vėliau pervadinami programos suteikti vardai pagal nutylėjimą, kad būtų aiškiau su koku elementu dirbama. Sekantis žingsnis, sudaryti skaitinio modelio tinklą, trimatį objektą kurį sudaro iš daug mažesnių elementų vadinamų domenais. Nuo jų kiekio priklauso skaičiavimo greitis ir gautų rezultatų tikslumas. Tyrinėjant sąveikas tarp kietų kūnų užtenka palikti kvadratinės formos tinklą. Kai kūnai sudėtingos formos ar skiriasi tarpusavy, tuomet verta naudoti funkciją, kuri ribas tarp kūnų lietimosi zonos papildomai sutankina, taip tiksliau atkartojami kontūrai. Vėliau plokštumoms priskiriami pavadinimai, kurioms bus suteikta tam tikra savybė. Šiuo nagrinėjimu atveju tai sudaro du domenai tai oras ir metalas, oro viena plokštuma oro srauto įtekėjimas ir keturioms plokštumoms priskiriama ištekėjimo funkcija. Metalas paviršiaus kraštinei priskiriama kaitinimo srauto kiekis, šoninėms kraštinėms, kad už jų nevyksta jokie šiluminiai mainai. Likusioms devynioms kraštinėms kurios įeina į

oro domeną, priskiriama funkcija, kad tarp jų vyksta šiluminiai mainai. Toliau užduoties sprendimo lange pasirenkama dvigubo tikslumo skaičiavimo metodas, išskiriama naudojama kompiuterinių atminties resursų kiekis ir uždavinys pradamas spręsti. Rezultatų lange išsirenkama kokiais vienetais norime matyti temperatūros, slėgio, greičio rezultatus.

Pirmu atveju sudaryti du nesudėtingos geometrinės formos kūnai ir aprašytos kraštinės sąlygos, kuo tiksliau atitinkančias atlikto fizinio eksperimento. Modelis sudarytas iš dviejų kūnų: kieto ir fluido.



2.6 pav. Įtekėjimo ir ištekėjimo nustatymai skaitiniame modelyje

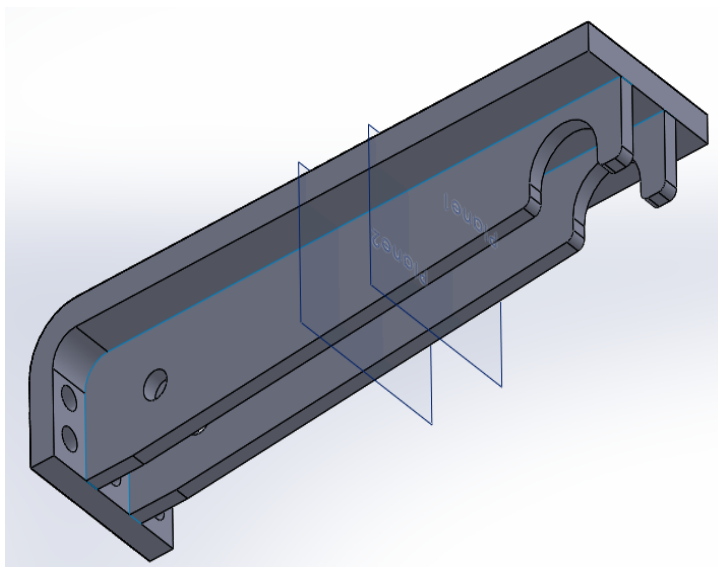
Pirminio oro įtekėjimo kryptis vyksta Y ašies atžvilgiu, nukreipta žemyn, priskirta laisvo kritimo pagreičio reikšmė. Modeliavimo metu buvo keičiama oro srauto temperatūra: 19° ir 60°, metalo šiluminis laidumas 30W/m*K, atitinka dauguma legiruotų metalų, 40W/m*K, tarpinis tarp legiruotų plienų ir įprastinių, 50W/m*K, standartinio plieno. Gauti grafikai pateikiami rezultatuose. Ištekėjimo srautas nustatytas keturiomis šoninėmis kraštinės kryptimis, nesudarant papildomo slėgio. Tarp oro ir metalo plokštumai nustatytas parametras, kad tarp šių paviršių vyksta šilumos mainai. Metalu keturioms kraštinėms priskirtas paviršius, kuriuo nevyksta šiluminiai mainai. Oro tūris modelyje sudaro 3500 mm³, metalas – 2100 mm³, danga 52,5 mm³.

Kitos tipiškos ribinės sąlygos yra šios:

- Pradinė tekančio srauto temperatūra visame pradiniame plote vienoda;
- Veikia gravitacijos jėga;
- Aplinkos temperatūra už kraštinių ribų 19°C;
- Įtekančio srauto turbulencijos laipsnis yra pastovus ir lygus 3 % ;
- Slėgis atmosferinis ir uždavinyje yra pastovus (p=101325 Pa).

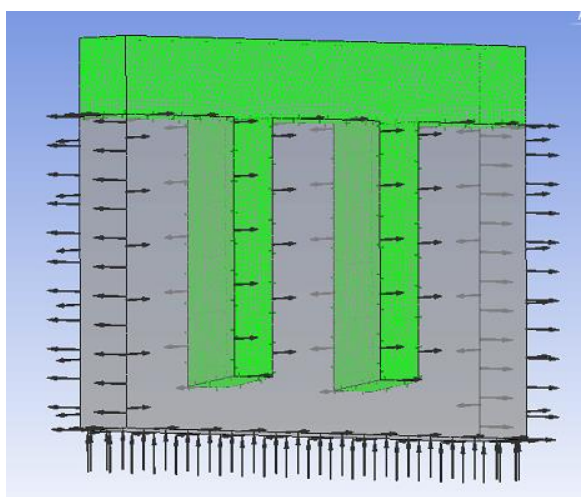
Antru atveju ardelės geometrija sudėtingesnė, todėl ji buvo sukurta panaudojant SOLIDWORKS inžinerinio dizaino sprendimų programiniu paketu. Šios programos privalumas tas, kad turi galimybę virtualiai analizuoti modeliuojamus objektus. Naudojant Ansys CFX programinį paketa pakankamai

sudėtinga perprasti trimačių objektų kūrimą. Kairėje pusėje pavaizduota ardelės geometrija ir dvi plokštumos, tarp kurių esantis fragmentas ir bus modeliuojamas. Pastebėta, kad modeliuojant tokios geometrijos objektus, padidinus jų ilgį rezultatai keičiasi nežymiai.



2.7 pav. Ardelės 3D modelis

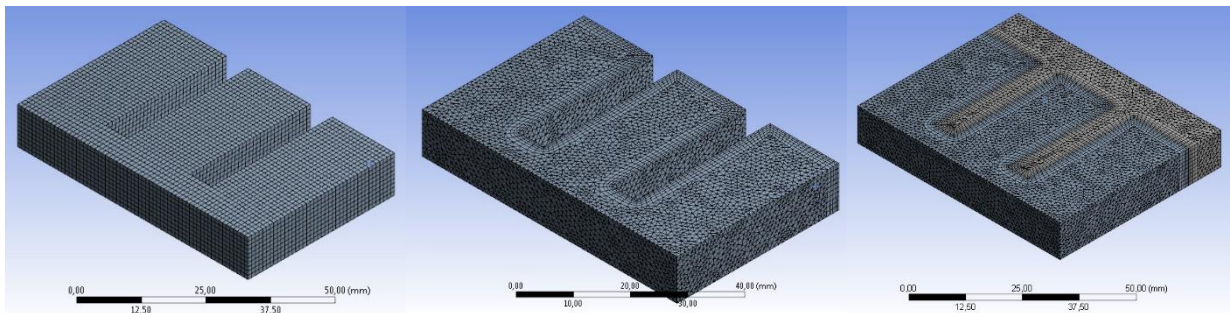
Visą ardelę pakankamai sudėtinga modeliuoti, reikalingi didelį kompiuteriniai resursai, siekiant pagreitinti skaičiavimo procesą buvo pasirinktas fragmentas. Kaitinamo paviršiaus plotas užima 630mm^2 , pačio fragmento tūris 10320cm^3 . Oro tūris sudaro 21180cm^3 , plotas kuriuo ribojasi su metalu užima 1971cm^2 . Oro įtekėjimo plotas sudaro 630cm^2 , srauto ištekėjimo 5024cm^2 .



2.8 pav. Oro srauto įtekėjimo ir ištekėjimo zonos

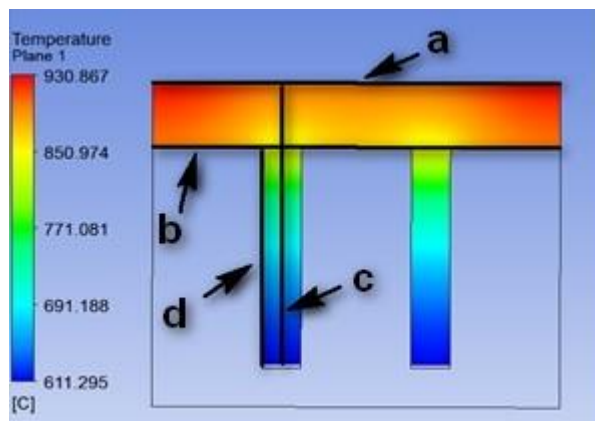
Ribinės sąlygos panašios kaip ir pirminiam variante tik keičiama pirminio oro įtekėjimo kryptis, kuri vyksta Y ašies atžvilgiu, nukreipta aukštyn, priskirta laisvo kritimo pagreičio reikšmė priešingai Y ašiai Gauti grafikai pateikiami rezultatuose. Ištekėjimo srautas nustatytas keturiomis šoninėmis kraštinėmis

kryptimis, nesudarant papildomo slėgio. Tarp oro ir metalo liečiančiomis devyniomis kraštinėmis nustatyta, kad tarp šių paviršių vyksta šilumos mainai. Metalu aštuonioms kraštinėms priskirtas paviršius, kuriuo nevyksta šiluminiai mainai. Modeliavimo metu buvo keičiama oro srauto temperatūra: 19° ir 60° , keli grafikai palyginimui, kaip įtakoja oro debito pokyčiai metalo temperatūrai, metalo šiluminis laidumas 30W/m²K, 40W/m²K, 50W/m²K. Norint tikslesnių rezultatų galima didinti tinklelio domenų skaičių, bet tai įtakoja apskaičiuojamų rezultatų laiką, kuris gali pailgėti tris kartus. Kai modeliuojami du kieti kūnai dažniausiai pakanka tinklelio nustatymus palikti pagal nutylėjimą, tai sudaro domeno geometriją iš kvadratų. Tačiau kai ribojasi fluideo ir kieto metalo paviršiai tikslinga panaudoti tinklelio sutankinimą – „inflation“ metodą.



2.9 pav. Suformuotas domenų tinklelis

Kairėje matomi domenai taisyklingos geometrijos pritaikyti kietiems kūnams, viduryje panaudojus sutankinimo metodą fluidams. Dešinėje metodas pritaikytas fluidui ir kietam kūnui. Skaičiavimo rezultatai apriboti galima iteracijų skaičiumi arba paklaidos tikslumu. Atvaizduoti rezultatus programoje galima įvairiais metodais: plokštumoje, taškuose, linijose ir kt. Šiame darbe oro ir metalo kūnų temperatūros atvaizduojamos plokštumoje, oro greičio pasiskirstymas erdvėje – srauto linijomis. Puikiai matosi kaip apteka prieš save pasitaikančias kliūtis ir vietas kur susidaro srauto sukūriai. Išilgai ir skersai metalo nubrėžtos linijos naudojamos suformuojant temperatūros grafikus.



2.10 pav. Matavimo atkarpų išdėstymas modelyje

Matavimo atkarpos pasirinkto metalo domene tose vietose, kuriose domina esanti temperatūra kuri bus atvaizduojama grafikuose. Atkarpų koordinatės domene nurodytos žemiau pateiktoje 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Atkarpų koordinatės metalo domene

Koordinatės		X	Y	Z
Atkarpa - a	Pradžia	0	0,005	0
	Pabaiga	0,063	0,005	0
Atkarpa - b	Pradžia	0	0,005	0,01
	Pabaiga	0,063	0,005	0,01
Atkarpa - c	Pradžia	0,02	0,005	0
	Pabaiga	0,02	0,005	0,045
Atkarpa - d	Pradžia	0,017	0,005	0,01
	Pabaiga	0,017	0,005	0,045

Tiesė a - nubrėžta horizontaliai per kaitinamo paviršių, tiesė b - horizontaliai per aušinamo paviršių, c - vertikaliai per ilgiausią ardelės konstrukcijos vietą, d - per vertikalios ardelės konstrukcijos briauną iki aušinamo paviršiaus. Žemiau pateiktoje lentelėje 2.4 aprašomi skaitinio modeliavimo parametrai, kokia eilės tvarka kai bus keičiami.

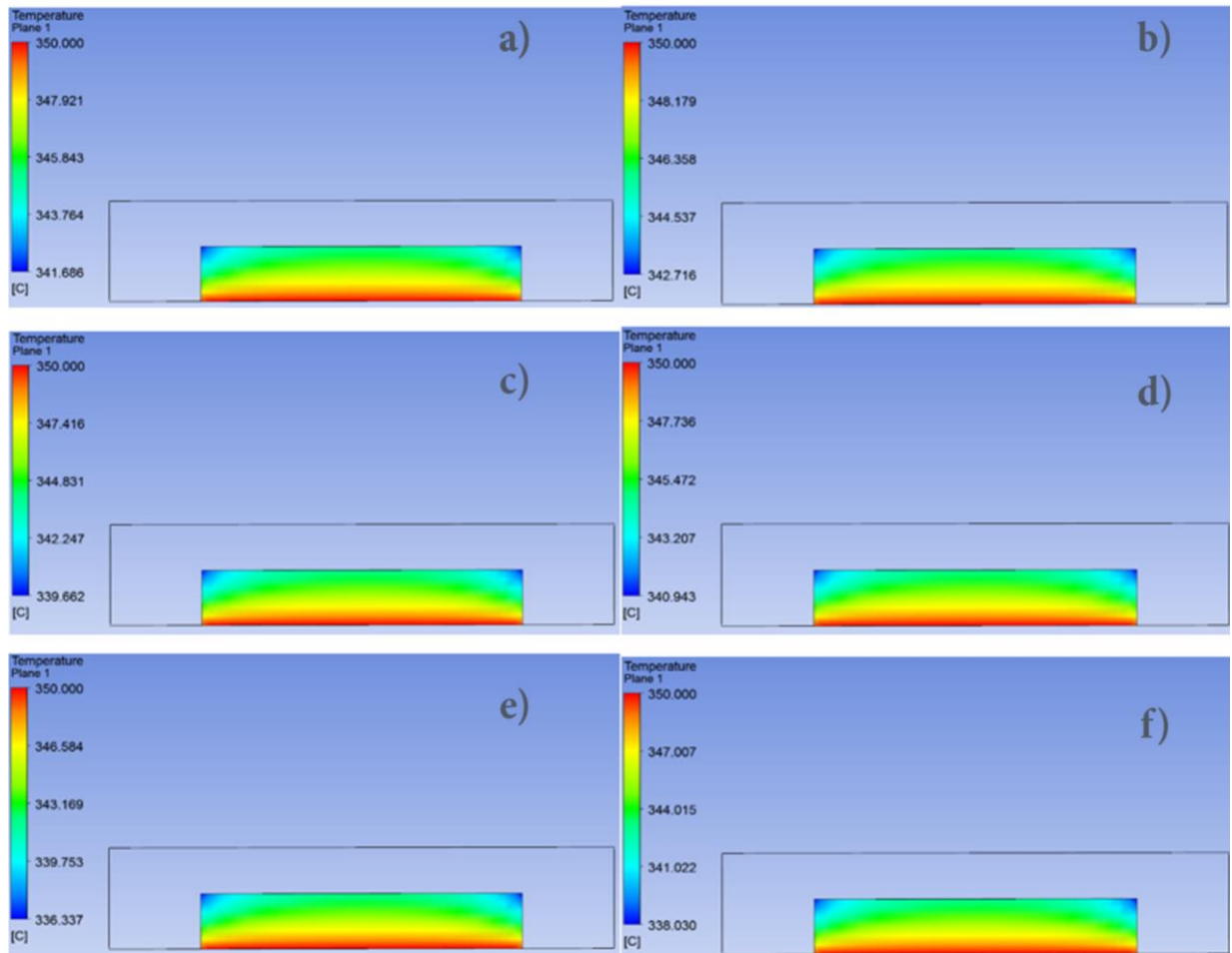
2.4 lentelė. Modeliavimo metu keičiami parametrai

Bandymo Nr.	Metalo laidumas W/m*K	Dangos laidumas W/m*K	Oro temperatūra K	Danga
1	50		292	Nėra
2	50		333	Nėra
3	50	18	292	Yra
4	50	18	333	Yra
5	30		292	Nėra
6	30		333	Nėra
7	30	18	292	Yra
8	30	18	333	Yra
9	15		292	Nėra
10	15		333	Nėra
11	15	18	292	Yra
12	15	18	333	Yra

3. REZULTATAI

3.1. Supaprastinto modelio stacionaraus režimo tyrimo rezultatai

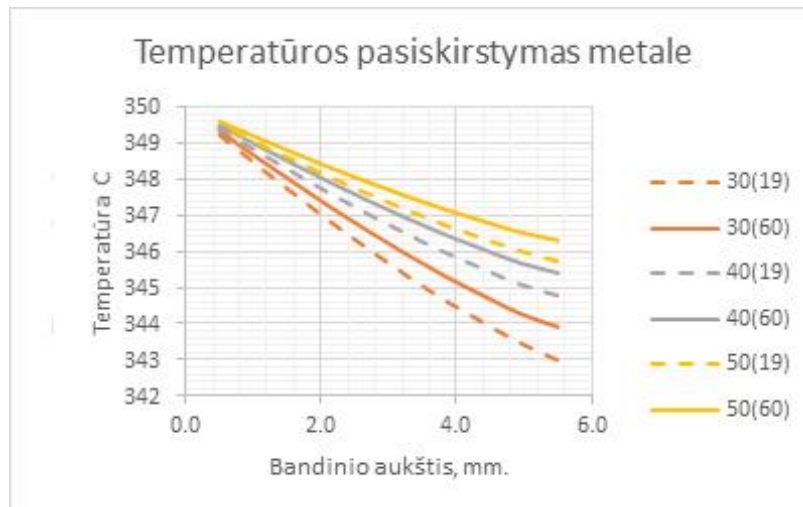
Gauti skaitinio modelio rezultatai, skaičiavime priimtas stacionarus režimas, kaitinamam paviršiui užduota pastovi 350°C temperatūra, keičiama pirminio oro temperatūra, medžiagos šiluminis laidumas. Iš gauto temperatūros profilio matomi, kad vėsiausios vietos kampuose, kur pirminis oro srautas apteka intensyviausiai.



3.1 pav. Temperatūros pasiskirstymas metale

- a) Pirminio oro greitis 6 m/s 19°C metalo laidumas 50 W/(m*K) –b) atveju 60°C
Aukščiausias ir žemiausias temperatūros skirtumas yra 8,3°, antru atveju 7,3°
- c) Pirminio oro greitis 6 m/s 19°C metalo laidumas 40 W/(m*K) –d) atveju 60°C
Aukščiausias ir žemiausias temperatūros skirtumas yra 10.3°, antru atveju 9°
- e) Pirminio oro greitis 6 m/s 19°C metalo laidumas 30 W/(m*K) –f) atveju 60°C
Aukščiausias ir žemiausias temperatūros skirtumas yra 13,6°, antru atveju 12°

Žemiau pateiktame grafike 3.2 pav. gauti rezultatai nubrėžiant liniją per metalo vidinį tūrį ir atvaizduojama temperatūros priklausomybė nuo medžiagos šiluminio laidumo ir apipučiamo oro temperatūros.

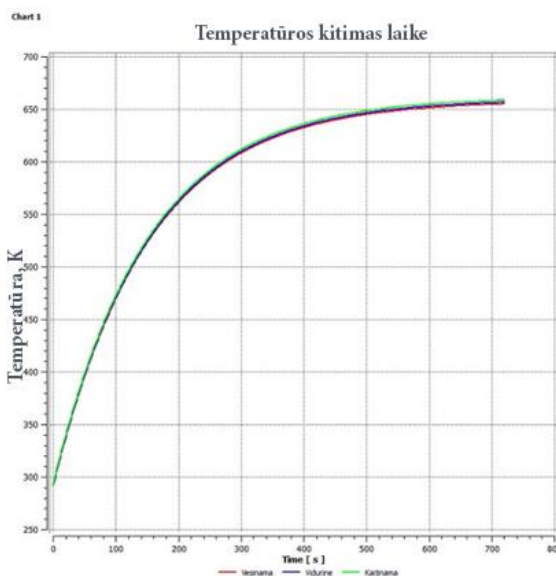


3.2 pav. Temperatūros pasiskirstymas išilgai bandinio

Gauti rezultatai rodo, kad temperatūra aušinamam paviršiuje, dėl apipučiamo oro srauto temperatūros pokyčio, kai medžiagos šiluminio laidumo koeficientas yra 30 W/(m*K) skiriasi 1°, o 50 W/(m*K) pokytis 0,5°.

3.2. Supaprastinto modelio pereinamo režimo tyrimo rezultatai

Atliekant eksperimentus stende, gautos temperatūros pasiskirstymas bandinyje laiko atžvilgiu. Iš žemiau pateikto grafiko matosi intensyvesnis temperatūros kylimas iki 200 sekundės, toliau temperatūra po truputi nusistovi.

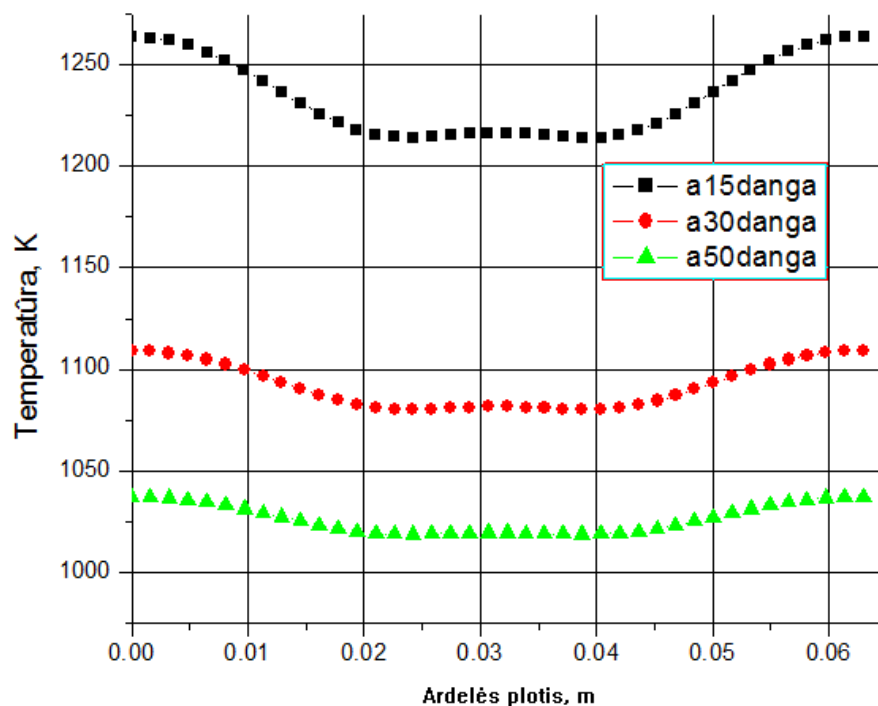


3.3 pav. Temperatūros pokytis laike

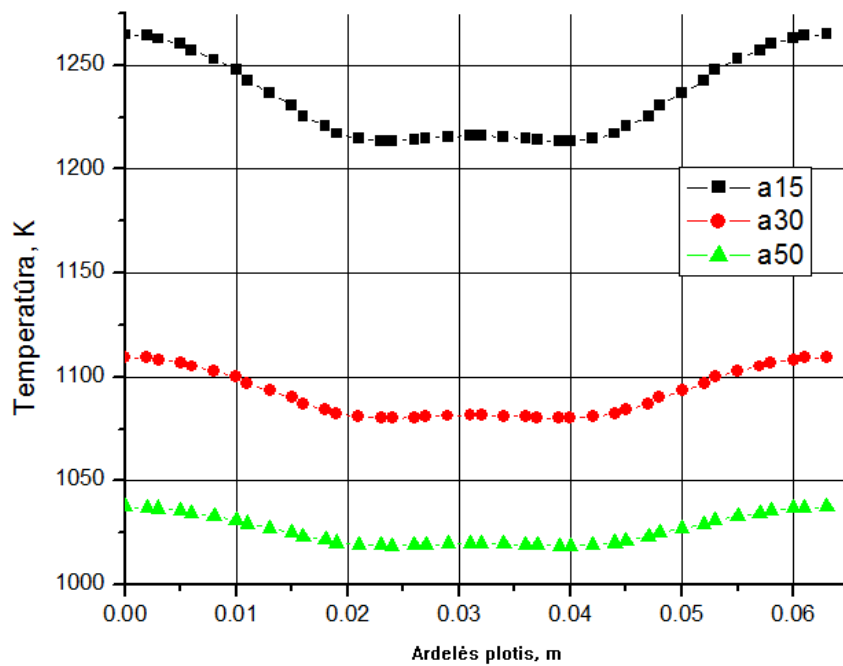
Sekantis modeliavimas pakeistas taip, kad vyktų pereinamasis procesas, kuris užduotais parametrais truko 720 sekundes. Laikas per kurį temperatūra artėja link nusistovėjimo buvo nustatytas laboratorinio eksperimento metu. Modelyje per išilginį bandinio tūrį nustatyti trys matavimo taškai, kurie nutolę vienas nuo kito 2.5mm. Iš grafiko galima teigti, kad esant nedideliame kūno tūriui sudėtinga stebėti vieną nuo kito greta išdėstytus taškus ir įvertinti tarpusavio temperatūros pokyčius. Skaitinio modeliavimo metu didžiausias skirtumas tarp kaitinamos ir vėsinamos pusių sudarė 2 laipsnius, laboratorinio stendo parodymais juos skyrė 4 laipsniai. Šis pokytis išliko bandymuose su danga tik skyrėsi pasiektos aukščiausios temperatūros vertės ribose 300°-350°. Kadangi bandinys kiekvieną kartą būdavo padedamas ne į tą pačią vietą.

3.3. Ardelės skaitinio modelio stacionaraus režimo tyrimo rezultatai

Šiuose grafikuose pateikia temperatūros pokytis kaitinamam ardelės paviršiui esant pastoviam pirminio oro srauto greičiui 6m/s ir temperatūrai 293° K. Metalų šilumos laidumas atitinkamai 50W/(m*K), 30W/(m*K), 15W/(m*K).

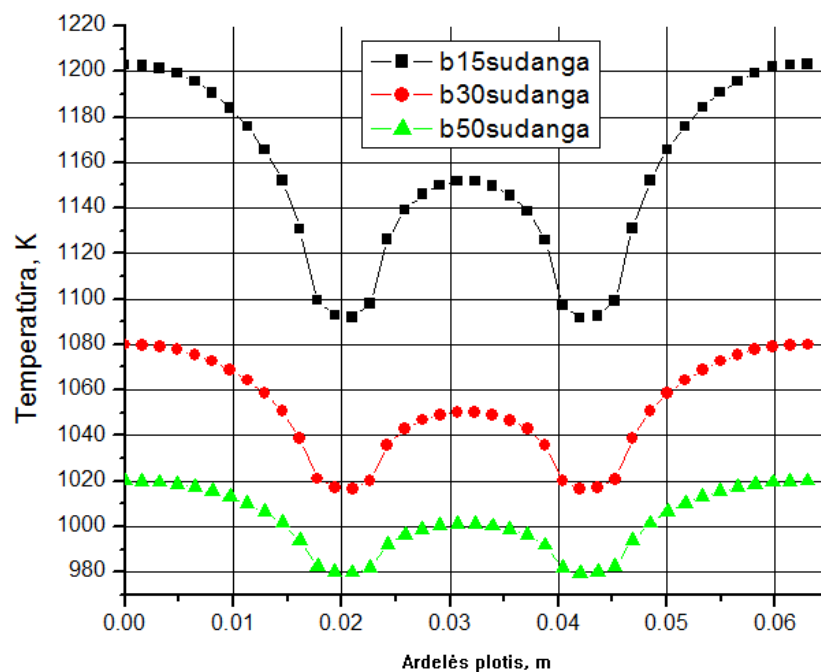


3.4 pav. Temperatūros pasiskirstymas a tiesėje su danga

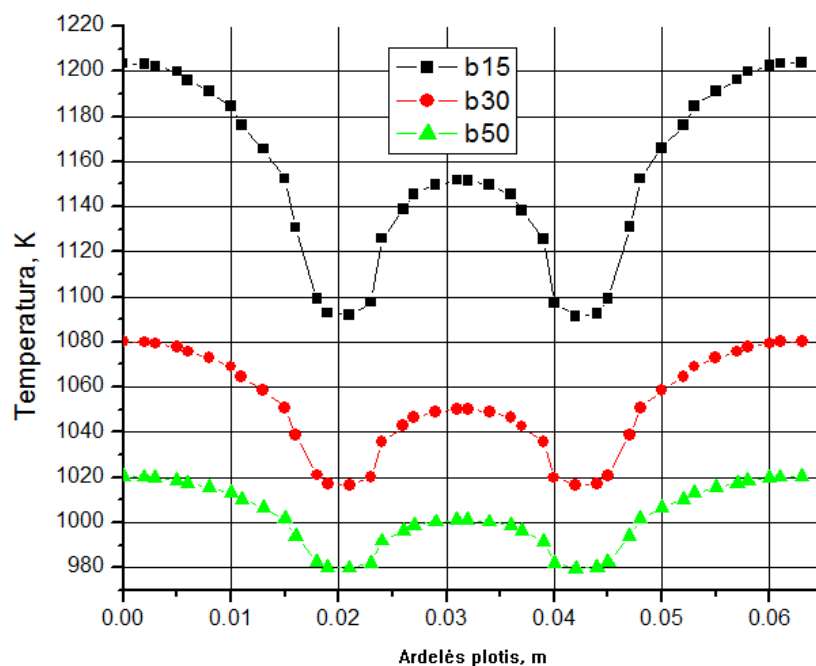


3.5 pav. Temperatūros pasiskirstymas a tiesėje be dangos

Viršutiniame grafike 3.4 pav. pateikiamos ardelės su 0,15mm. storio danga kaitinamo paviršiaus temperatūros esant skirtingiems medžiagos šiluminio laidumo koeficientams, 3.5 pav. be dangos. Iš gautų grafikų galima teigti, kad apsauginė danga nedaro jokios įtakos ardelės temperatūrai, bet suteiktas šilumos kiekis paviršiui turi įtakos ir didžiausias skirtumas siekia 220°.



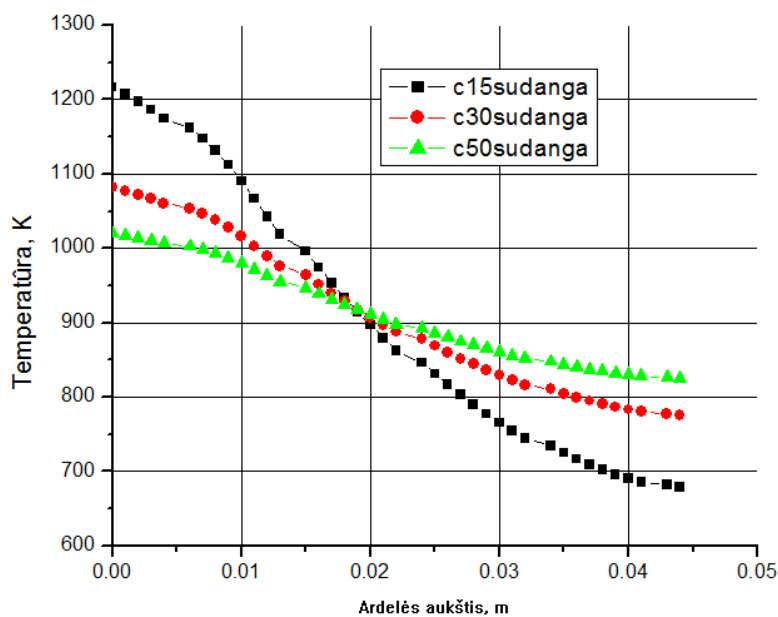
3.6 pav. Temperatūros pasiskirstymas b tiesėje su danga



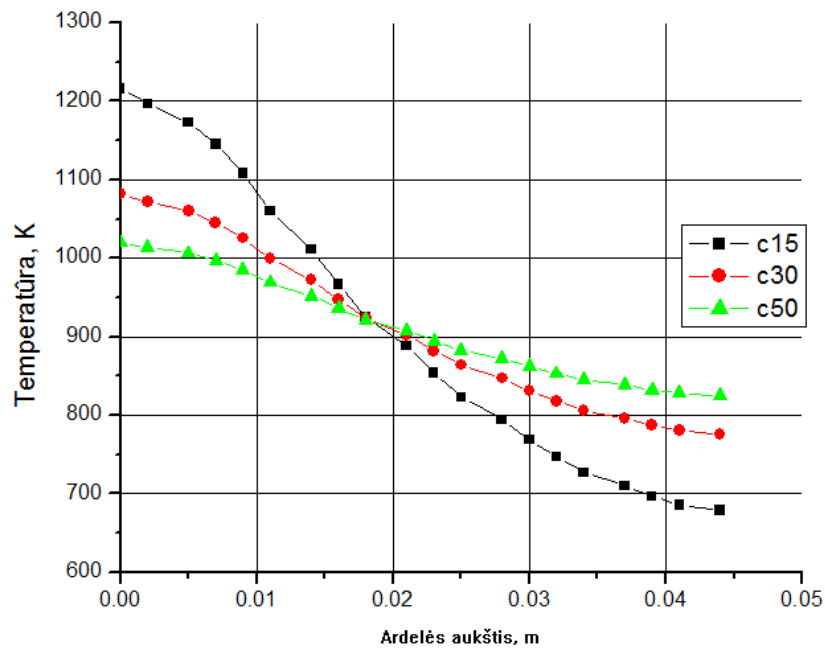
3.7 pav. Temperatūros pasiskirstymas b tiesėje be danga

Kairiajame Grafike pateikiamos ardelės su 0,15mm. storio danga vėsinamo paviršiaus temperatūros esant skirtingiems medžiagos šiluminio laidumo koeficientams, dešiniajam be dangos. Iš gautų grafikų galima teigti, kad apsauginė danga nedaro jokios įtakos ardelės temperatūrai, bet suteiktas šilumos kiekis paviršiui turi įtakos ir didžiausias skirtumas siekia 180°.

Šiuose grafikuose pateikia temperatūros pokytis ilgiausioje konstrukcijos dalyje esant pastoviam pirminio oro srauto greičiui 6m/s ir temperatūrai 293° K. Metalų šilumos laidumas atitinkamai 50W/(m*K), 30W/(m*K), 15W/(m*K).



3.8 pav. Temperatūros pasiskirstymas c tiesėje su danga



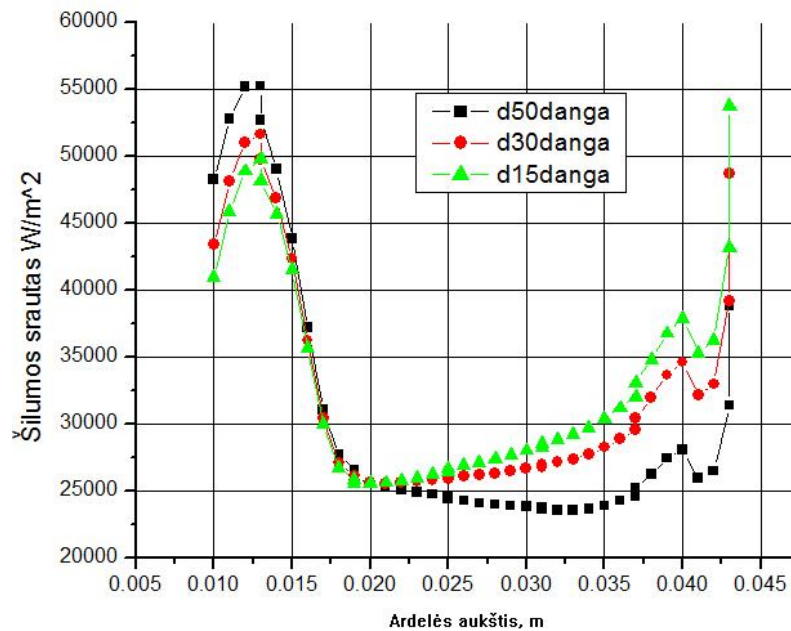
3.9 pav. Temperatūros pasiskirstymas c tiesėje be dangos

Gauti grafikai c tiesės einančios išilgai per ilgiausią ardelės dalį, temperatūrų skirtumai skirtinguose galuose sudaro: Medžiagoje turinčioje 50W/(m*K) laidumą temperatūros gradientas skirtinguose paviršiuose 194,3°. Medžiagoje turinčioje 30W/(m*K) laidumą 305,49°. Medžiagoje turinčioje 15W/(m*K) laidumą 537,06°. Grafikai šiek tiek skiriasi, kadangi rezultatuose be dangos tiesėje buvo 20 matavimo taškų, matavimuose su danga 40 taškų.

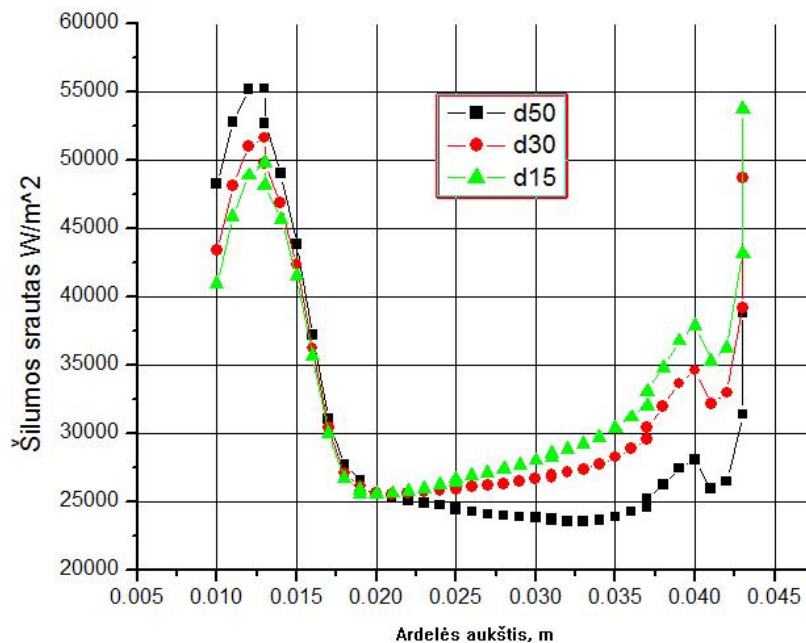
3.1 lentelė. Temperatūrų gradientas tarp paviršių

	Pirminis oras 19 C		
Metalas	50	30	15
Kaitinamas	1019,74	1081,68	1216,18
Aušinamas	825,44	776,19	679,12
ΔT	194,3	305,49	537,06
	Pirminis oras 60 C		
Metalas	50	30	15
Kaitinamas	1060,96	1122,92	1257,46
Aušinamas	866,62	817,38	723,01
ΔT	194,34	305,54	534,45

Žemiau pateiktose paveikslėliuose 3.10 ir 3.11 sudarytas grafikas d atkarpoje išilgai aušinamo paviršiaus ardelės konstrukcijos. Paprasto plieno medžiaga atiduoda iki 15kW/m^2 nei legiruoto.



3.10 pav. Šilumos srautas d atkarpoje su danga



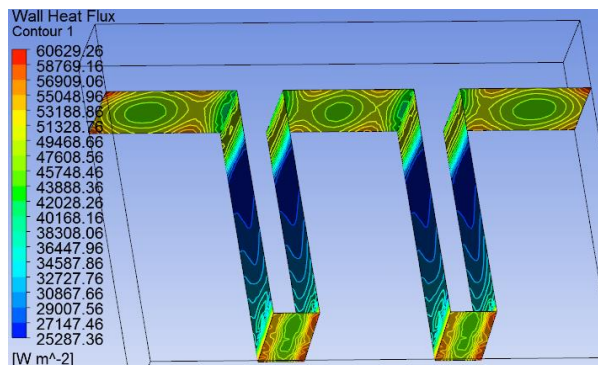
3.11 pav. Šilumos srautas d atkarpoje be dangos

Didžiausias šilumos srautas matomas arčiausiai aušinamo paviršiaus pirminio oro srauto aptekėjimo zonoje. Sulyginus grafikus, kurie suformuoti esant dangai ir be jos nepastebėta jokių pokyčių. O pakeitus pirminio oro srauto temperatūrą nuo 292° iki 333° šilumos srautas padidėja 15W/m^2 , kas sudaro 0,04%.

Toliau pateikiami eksperimento duomenys domenų metalo ir oro lietimosi zonose, atvaizduojama kontūre su dvidešimties spalvų rezoliucija.

Kaitinimo paviršius šilumos srautas 120kW, oras 6m/s 19C°, metalo šiluminis laidumas 50W/m*K. Iteracijų skaičius 250, laikas sugaištas uždaviniu spręsti 15minučių. Gautos metalo ir oro maksimalios ir minimalios vertės, metalo ir oro domenuose.

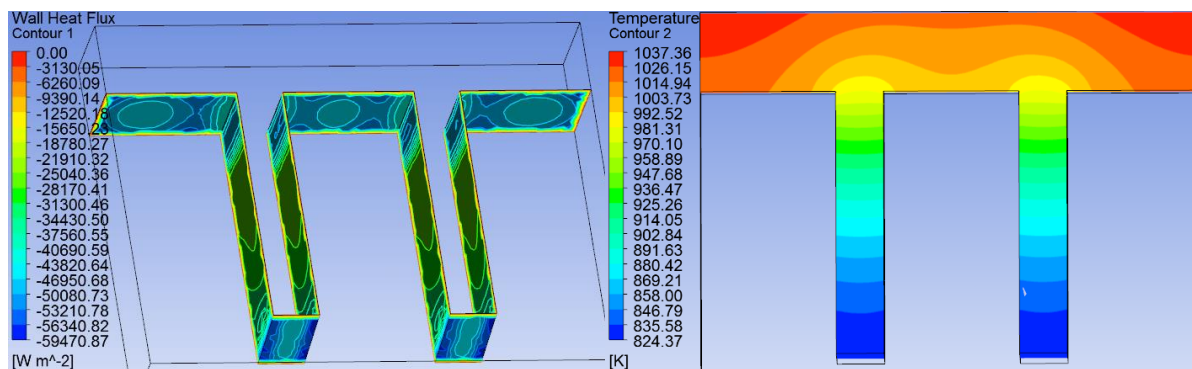
Pirmas modeliavimas 50W/(m*K) šiluminis laidumas, oras 6m/s 19C Iteracijų 175, laikas 9 min.



3.12 pav. Šilumos srautas oro domene

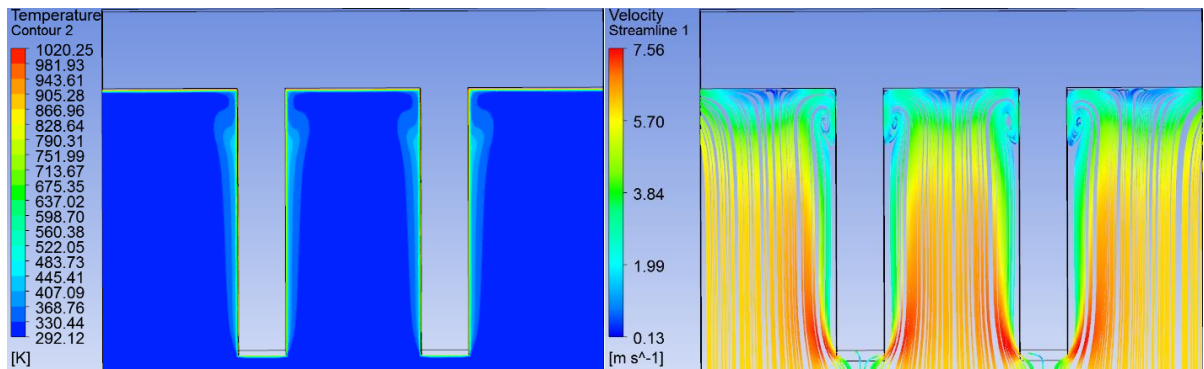
Naudojantis programinio paketo skaičiavimo funkcija gauta viso paviršiaus šiluminio srauto vidutinė vertė, kuri siekia: 9879,22 W/m². Oro domene didžiausias šilumos srautas pereina

Gauti rezultatai metalo domene atvaizduoti žemiau esančiame 3.7 paveikslėlyje.



3.13 pav. Metalo domeno šilumos srautas ir temperatūra

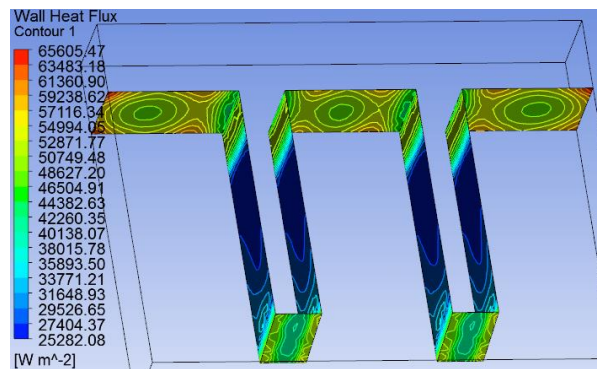
Maksimalus šilumos srautas kontakto vietoje 59.5kW/m², rezultatai atvaizduojami su minuso ženklu, kadangi metalas atiduoda šilumą orui. Metalo maksimali temperatūra kaitinamo paviršiaus kraštuose 1037.36°K Gauti rezultatai oro domene atvaizduoti žemiau esančiame 3.8 paveikslėlyje.



3.14 pav. Pirminio oro srauto temperatūra ir greitis

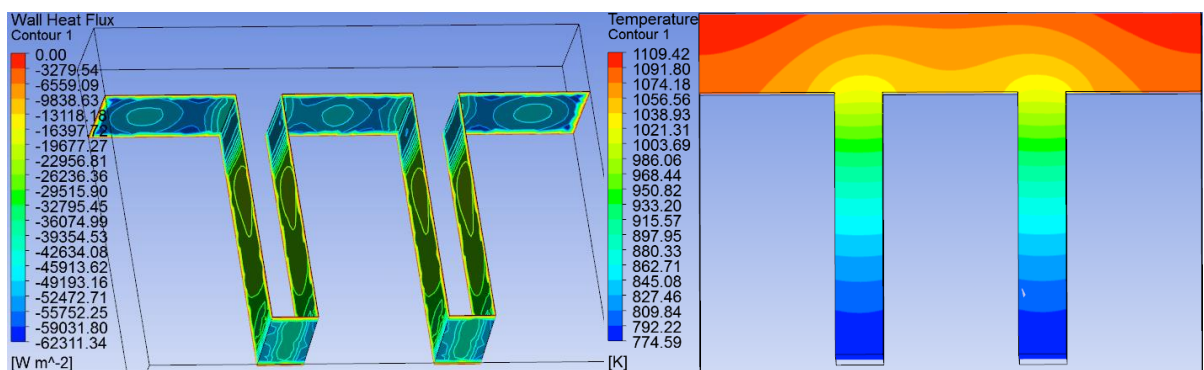
Maksimali temperatūra pasiekta oro domene 1020.25 , maksimalus pirminio oro srauto greitis 7.56 m/s.

Antro modeliavimo rezultatai gauti esant tokioms sąlygoms: 30W/(m*K) šiluminis laidumas, oras 6m/s 292° K Iteracijų skaičius 150, laikas 15 min.



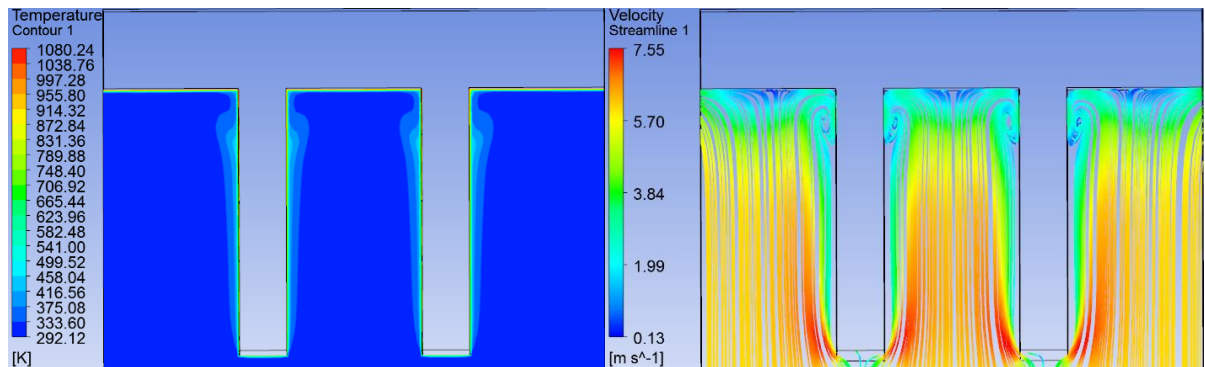
3.15 pav. Šilumos srautas oro domene

Sudarius pirminio oro srauto kontūrą, kuris atvaizduoja šilumos srautą modelio zonose siekia 65,6kW/m². Naudojantis programinio paketo skaičiavimo funkcija gautos viso paviršiaus vidutinis šilumos srautas 38833,1 W/m²



3.16 pav. Metalo domeno šilumos srautas ir temperatūra

Maksimalus šilumos srautas kontakto vietoje 62.3kW/m^2 , maksimali kaitinamo paviršiaus temperatūra esanti kraštuose siekia 1109.42°K

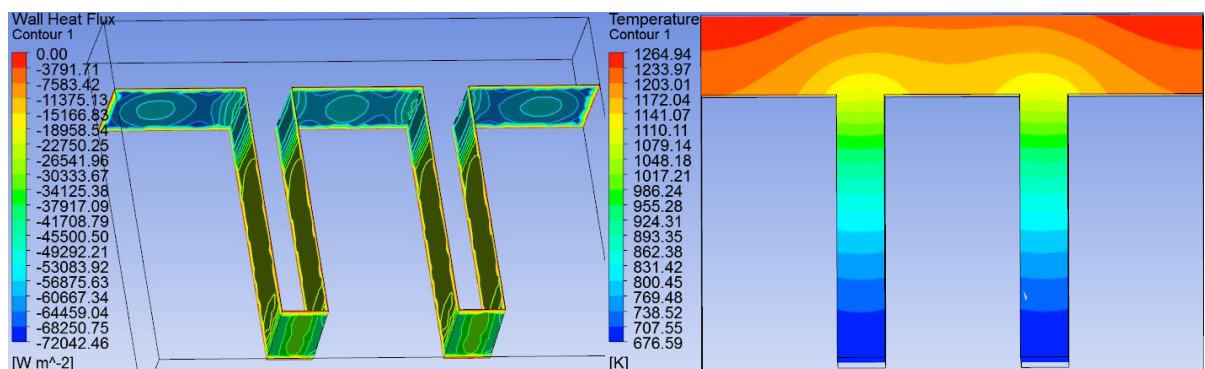


3.17 pav. Pirminio oro srauto temperatūra ir greitis

Maksimali temperatūra pasiekta oro domene 1080.24 , maksimalus pirminio oro srauto greitis 7.55m/s .

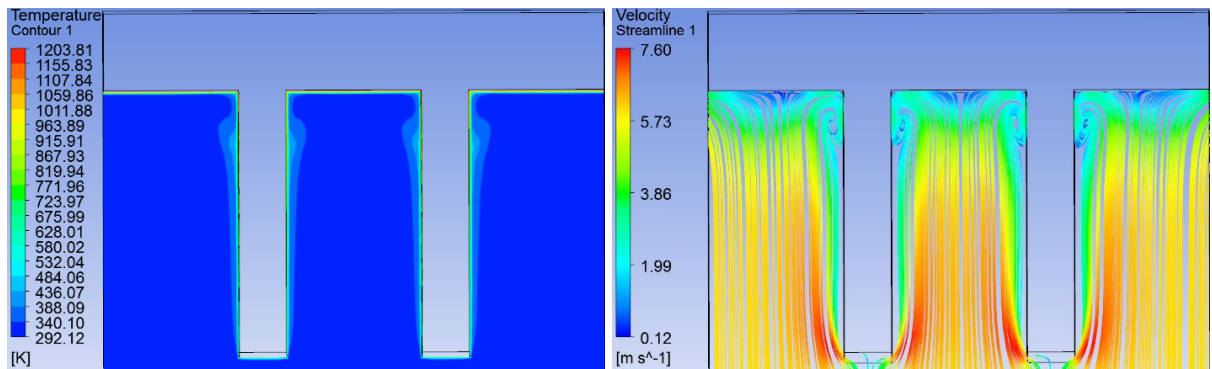
Trečias modeliavimas $15\text{W}/(\text{m}^*\text{K})$ metalas šiluminis laidumas s, oras 6m/s 19C Iteracijų 176, laikas 9 min.

Metalo domene šilumos srauto ir temperatūros pasiskirstymo duomenys pateikiami žemiau esančiuose paveikslėliuose:



3.18 pav. Metalo domeno šilumos srautas ir temperatūra

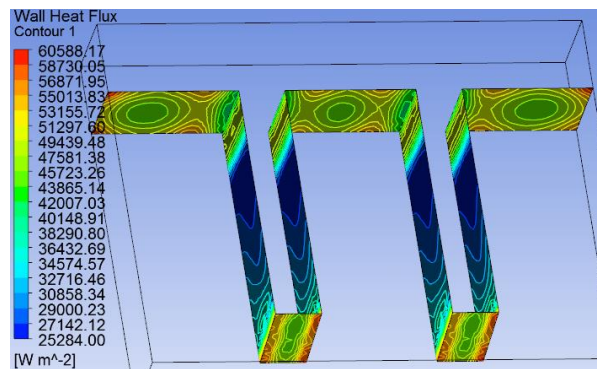
Maksimalus šilumos srautas kontakto vietoje 72kW/m^2 , maksimali kaitinamo paviršiaus temperatūra esanti kraštuose siekia 1264.94°K . Pirminio oro srauto domene gauti duomenys pateikiami žemiau esančiuose paveikslėliuose:



3.19 pav. Pirminio oro srauto temperatūra ir greitis

Pirminio oro srauto temperatūra ties metalo paviršiumi pasiekia maksimalią 1203.81°K , srauto greitis pasiekia 7.6 m/s .

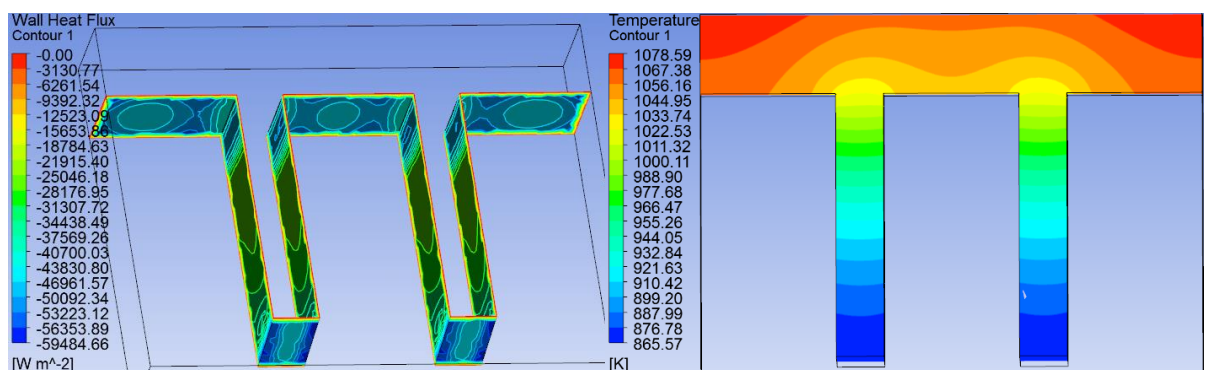
Ketvirtas modeliavimas $50\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{K})$ šiluminis laidumas, oras 6m/s 60C Iteracijų 176, laikas 9 min.



3.20 pav. Šilumos srautas oro domene

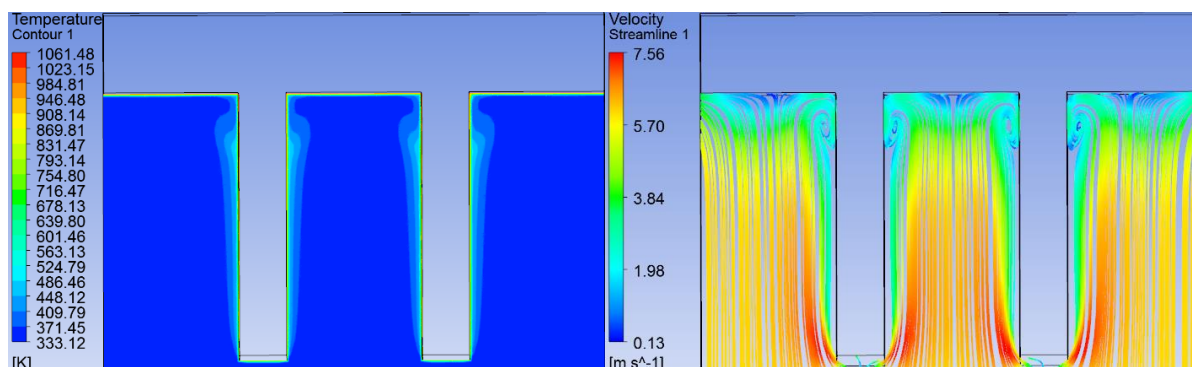
Sudarius pirminio oro srauto kontūrą, kuris atvaizduoja šilumos srautas modelio zonose siekia $60,6\text{kW}/\text{m}^2$

Naudojantis programinio paketo skaičiavimo funkcija gautos viso paviršiaus vidutinės šiluminės varžos ir šiluminio srauto vertės kurios siekia: Vidutinė šiluminė varža $78,189\text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$, vidutinis šilumos srautas $38757,8\text{W}/\text{m}^2$.



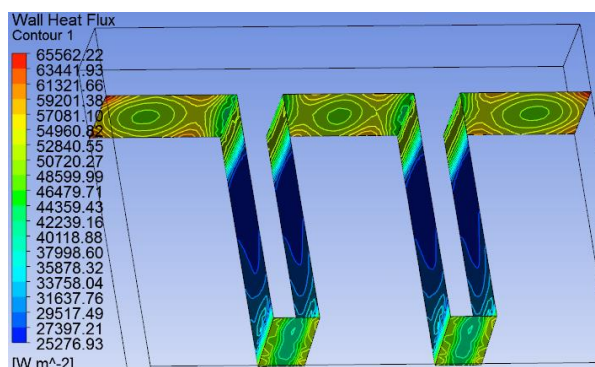
3.21 pav. Metalo domeno šilumos srautas ir temperatūra

Maksimalus šilumos srautas kontakto vietoje $59,5\text{kW/m}^2$, maksimali kaitinamo paviršiaus temperatūra esanti kraštuose siekia $1078,59$. Pirminio oro srauto domene gauti duomenys pateikiami žemiau esančiuose paveikslėliuose:



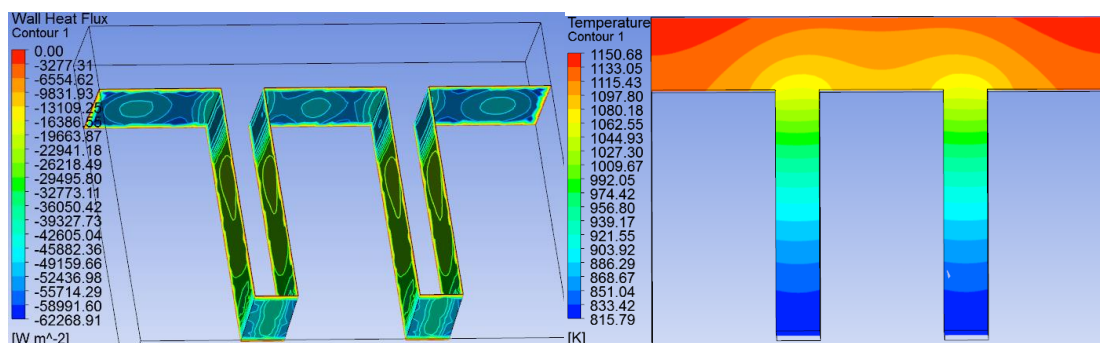
3.22 pav. Pirminio oro srauto temperatūra ir greitis

Pirminio oro srauto temperatūra ties metalo paviršiumi pasiekia maksimalią $1061,48^\circ\text{K}$, srauto greitis pasiekia $7,56\text{ m/s}$. Penktas modeliavimas $30\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ metalas plienas, oras 6m/s 60C Iteracijų 176, laikas 9 min.



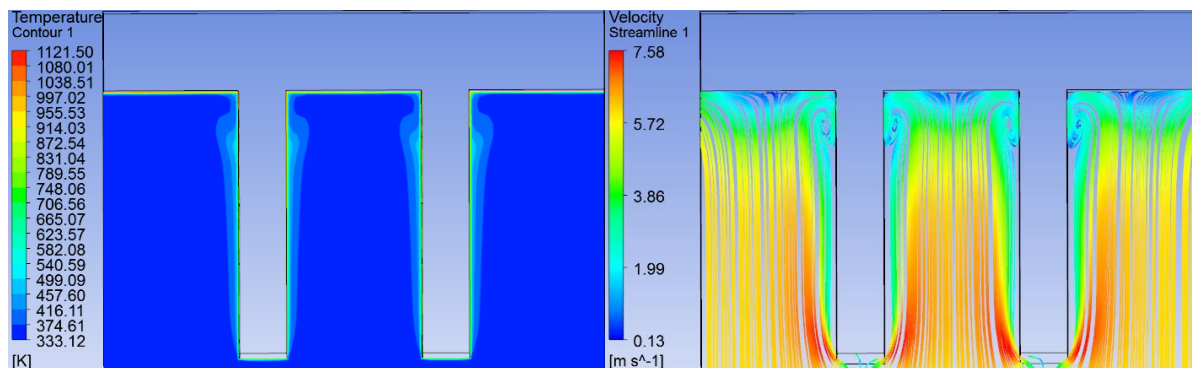
3.23 pav. Šilumos srautas oro domene

Sudarius pirminio oro srauto kontūrą, kuris atvaizduoja šilumos srautas modelio zonose siekia $65,6\text{kW/m}^2$. Naudojantis programinio paketo skaičiavimo funkcija gautos šiluminio srauto vertės kurios siekia $38832,9\text{W/m}^2$



3.24 pav. Metalo domeno šilumos srautas ir temperatūra

Maksimalus šilumos srautas kontakto vietoje 62.2kW/m^2 , maksimali kaitinamo paviršiaus temperatūra esanti kraštuose siekia 1150.68°K . Pirminio oro srauto domene gauti duomenys pateikiami žemiau esančiuose paveikslėliuose:

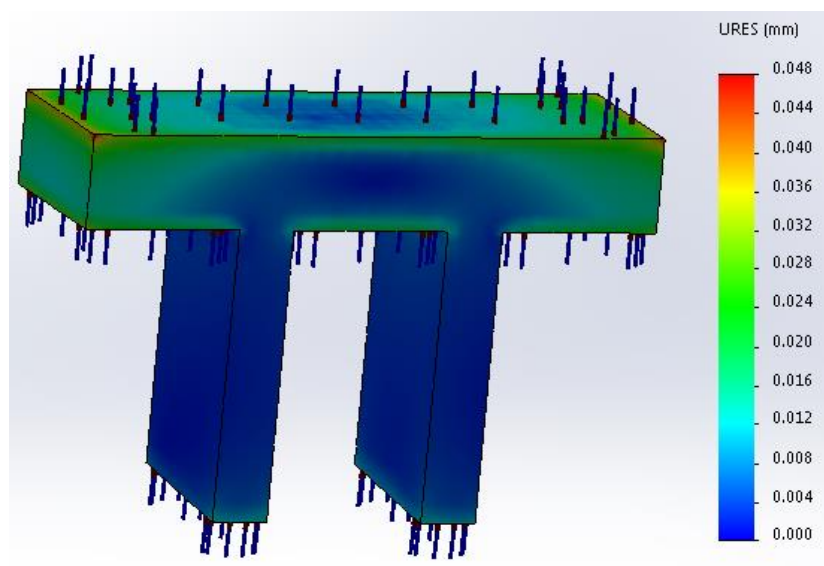


3.25 pav. Pirminio oro srauto temperatūra ir greitis

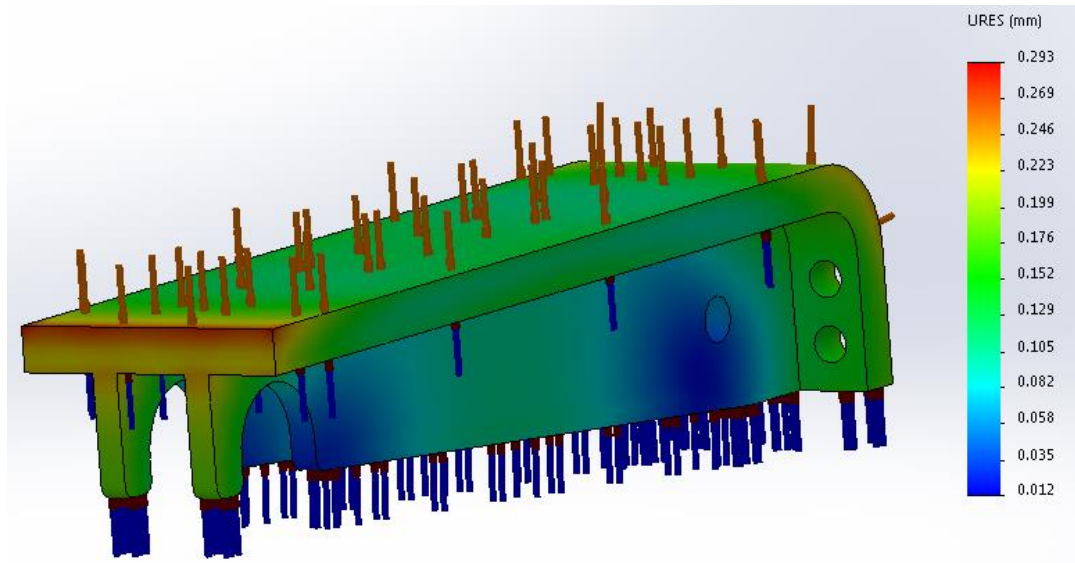
Pirminio oro srauto temperatūra ties metalo paviršiumi pasiekia maksimalią 1121.50°K , srauto greitis pasiekia 7.58m/s .

3.4. Metalų šiluminio plėtimosi rezultatai

Gauti šiluminio plėtimosi rezultatai parodė, kad didžiausios plėtimosi zonos yra kraštuose ir siekia $0,048\text{mm}$ esant paviršiaus temperatūrai 1200°K , aušinamam paviršiuje 1150°K , žemiausioje konstrukcijos vietoje 690°K , metalo laidumas atitinkantis chromu legiruotą ketų.

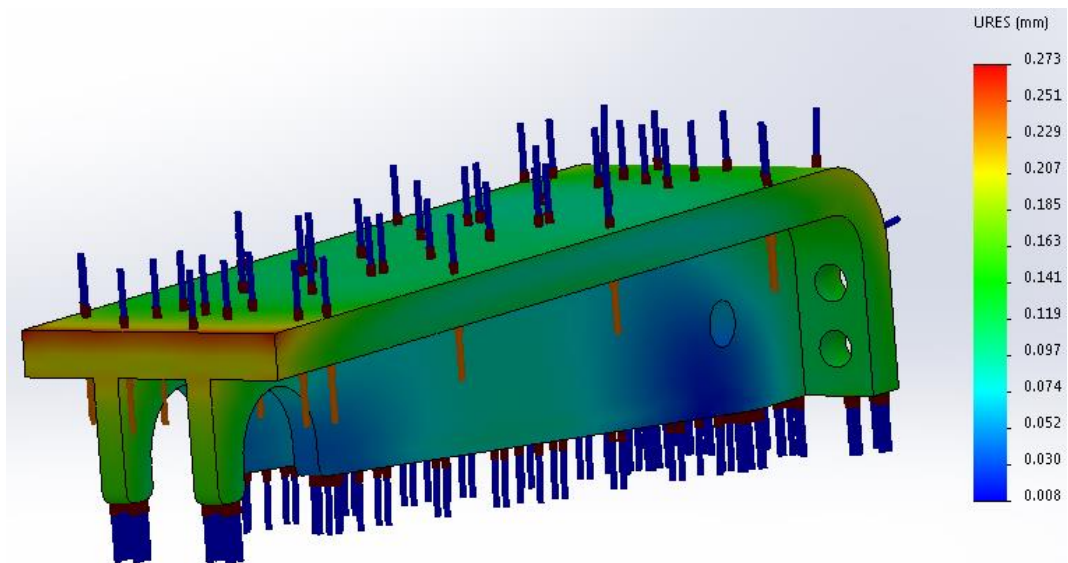


3.26 pav. Šiluminio plėtimosi testas ardelės elemente



3.27 pav. 15W/(m*K) šiluminio plėtimosi testas ardelėje

Gauti rezultatai SolidWorks programiniu simuliacijos paketu išskyrė vietas ardelės konstrukcijoje, kurios, esant užduotoms paviršių temperatūroms, plėsis daugiausiai. Nustatyta, kad legiruoto plieno konstrukcijos paviršius pailgėja 0,293 milimetru.

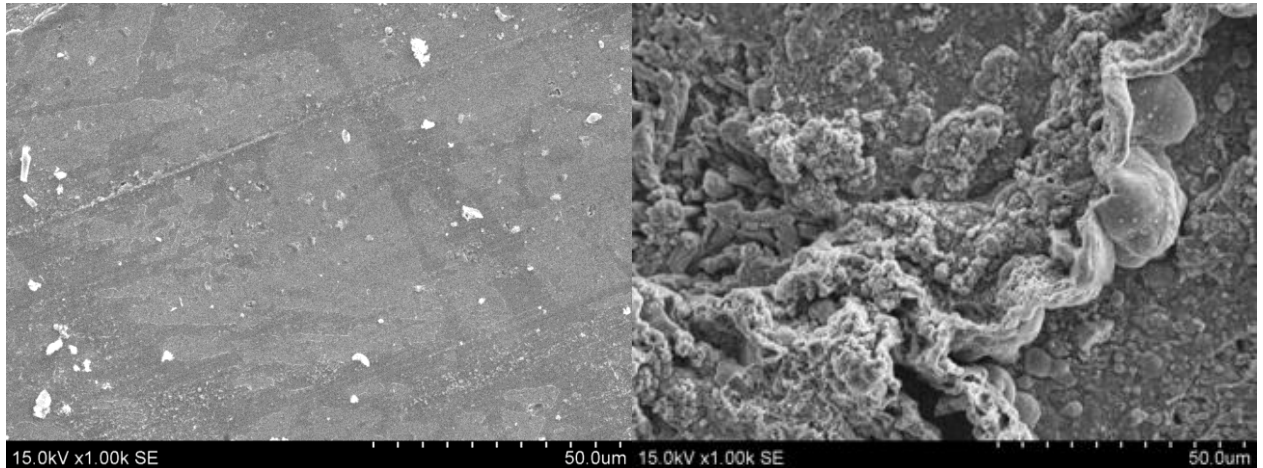


3.28 pav. 50W/(m*K) šiluminio plėtimosi testas ardelėje

Gauti šiluminio plėtimosi rezultatai parodė, kad didžiausios plėtimosi zonos yra ardelės gale ir siekia 0,273mm esant paviršiaus temperatūrai 1019°K, aušinamam paviršiuje 950°K, žemiausioje konstrukcijos vietoje 825°K, metalo laidumas atitinkantis įprastinį plieną.

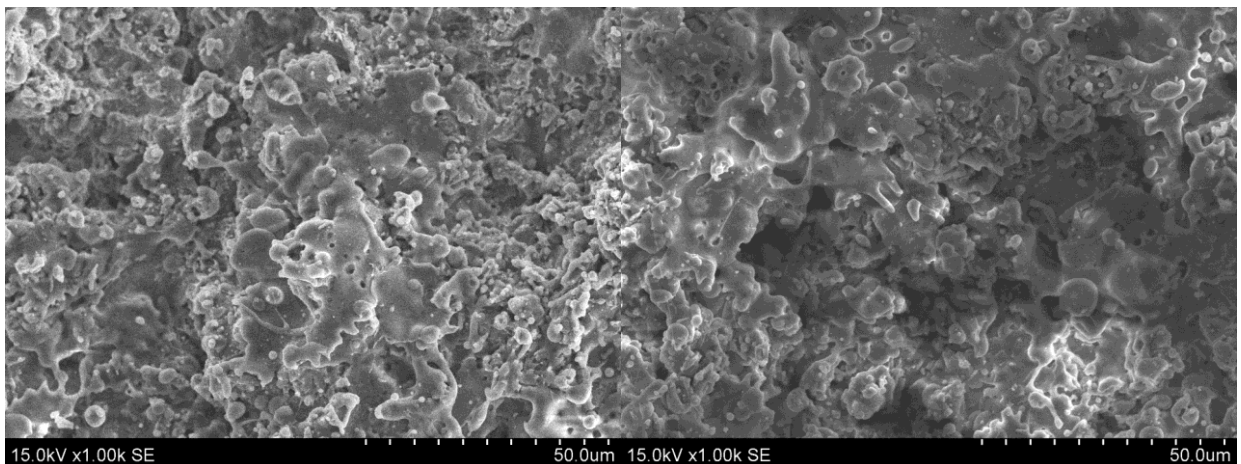
3.5. Metalo ir dangos tyrimo rezultatai

Paveikslėlyje 3.36 matomas legiruoto plieno metalo paviršius priartintas tūkstantį kartų. Dešinėje pusėje ta pati danga paveikta 50 % kalio chlorido tirpalu. Bandymas vyko prie 500° C temperatūros, užlašinant tirpalo ir laikant vieną valandą aukštoje temperatūroje.



3.29 pav. Metalo paviršiaus struktūra

Naudojant SEM programinę įrangą gauti tokių cheminių elementų koncentracija procentais. Metalo sudėtis prieš kalio chlorido poveikį sudarė O 7%, Fe 66%, Cr 24%. Po 5 ciklų KCl, 500°C O 36% Fe 38, Cr 12%. Kaip matosi danga žymiai pažeista padidėjas deguonies kiekis, sumažėjas geležies ir chromo kiekis. Žemiau pateiktame paveikslėlyje 3.37 tokiomis pačiomis sąlygomis buvo atliktas ekperimentas su Aliuminio oksido danga. Kairėje pusėje prieš ekperimentą dešinėje po.



3.30 pav. Aliuminio oksido dangos struktūra

Dangos sudėtis prieš kalio chlorido poveikį sudarė O 59% Al 36%. Po 5 ciklų 500°C O 58% Al 36%. Sudėtis rodo, kad danga cheminiam poveikiui atspari, jos struktūra nepasikeitė

IŠVADOS

1. Iširta, kad temperatūros gradientas virš 537° didžiausias metale, kurio šiluminio laidumo koeficientas $15\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.
2. Nustatyta, kad bandiniams suteikus $120\text{kW}/\text{m}^2$ šilumos srautą jų paviršiaus temperatūra aukščiausia 1216° K metale, kurio šiluminis laidumas mažiausias.
3. Modeliavimo rezultatai parodė, kad pakėlus pirminio oro srauto temperatūrą 42° aušinamo paviršiaus temperatūra pakilo 4%.
4. Ardelių gamyba iš mažai legiruotų metalų yra galima, reikalingi tolimesni tyrimai.
5. Apsauginė danga turinti aliuminio oksido savybes, metalo paviršiaus temperatūrai įtakos nedaro, dėl mažos terminės varžos.