



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

Andrius Juodsnukis

ŠALTOJO FORMAVIMO PROCESO TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Sigitas Kilikevičius

KAUNAS, 2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

ŠALTOJO FORMAVIMO PROCESO TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Gamybos inžinerija (621H70004)

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Sigitas Kilikevičius
(data)

Recenzentas

(parašas) Prof. Povilas Krasauskas
(data)

Projektą atliko

(parašas) Andrius Juodsnukis
(data)

KAUNAS, 2018



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

(Fakultetas)

Andrius Juodsnukis

(Studento vardas, pavardė)

Gamybos inžinerija (621H70004)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Šaltojo formavimo proceso tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Andriaus Juodsnukio**, baigiamasis projektas tema „Šaltojo formavimo proceso tyrimas“ 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**

Tvirtinu:
Gamybos inžinerijos
katedros vedėjas

(parašas, data)
Kazimieras Juzėnas

(vardas, pavardė)

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS
Studijų programa GAMYBOS INŽINERIJA

Magistrantūros studijų, kurias baigus įgyjamas magistro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis projektas yra mokslinio tiriamojo ar taikomojo pobūdžio darbas, kuriam atlikti ir apginti skiriama 30 kreditų. Šiuo darbu studentas turi parodyti, kad yra pagilinęs ir papildęs pagrindinėse studijose įgytas žinias, yra įgijęs pakankamai gebėjimų formuluoti ir spręsti aktualią problemą, turėdamas ribotą ir (arba) prieštaringą informaciją, savarankiškai atlikti mokslinius ar taikomuosius tyrimus ir tinkamai interpretuoti duomenis. Baigiamuoju projektu bei jo gynimu studentas turi parodyti savo kūrybingumą, gebėjimą taikyti fundamentines mokslo žinias, socialinės bei komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansinių galimybių išmanymą, informacijos šaltinių paieškos ir kvalifikuotos jų analizės įgūdžius, skaičiuojamųjų metodų ir specializuotos programinės įrangos bei bendrosios paskirties informacinių technologijų naudojimo įgūdžius, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžius, gebėjimą tinkamai formuluoti išvadas.

1. Projekto tema - „Šaltojo formavimo proceso tyrimas“

Patvirtinta 2017 m. gruodžio 11 d. dekanų įsakymu Nr. V25-11-12

2. Projekto tikslas - ištirti šaltojo formavimo proceso parametrus ir jų įtaką formuotų plieninių detalių kokybei.

3. Projekto struktūra – santrauka lietuvių ir anglų kalbomis, įvadas, literatūros apžvalga, šampavimo parametrų nustatymas, šampavimo proceso parametrų tyrimai, kintamųjų regresijos analizė, išvados, literatūros sąrašas.

4. Reikalavimai ir sąlygos

5. Projekto pateikimo terminas 2017 m. gruodžio mėn. 21 d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo projekto dalis

Studentas _____
(studento vardas, pavardė)

(parašas, data)

Vadovas _____
(pareigos, vardas, pavardė)

(parašas, data)

TURINYS

ĮVADAS	8
1 LITERATŪROS APŽVALGA	10
1.1 Štampų konstrukcijos ir veikimo principas	12
1.2 Defektai, atsirandantys štapavimo metu.....	13
1.3 Formavimo proceso parametrai	15
1.4 Literatūros apžvalgos išvados.....	16
2 ANALITINIS PIRMINIŲ ŠTAPAVIMO PARAMETRŲ NUSTATYMAS	17
3 ŠTAPAVIMO PROCESO PARAMETRŲ TYRIMAI	20
3.1 Metodologija baigtinių elementų pagrindu	20
3.1.1 Formavimo galimybės	20
3.1.2 Medžiagos sukietėjimo modelis.....	21
3.2 Pirminio skaičiavimo rezultatų patikrinimas	24
3.3 Valcavimo krypties įtakos tyrimas.....	24
3.4 Matricos spindulio tyrimas	26
3.5 Ruošinio prispaudimo jėgos tyrimas.....	29
3.6 Trinties koeficiento tyrimas.....	32
3.7 Štapavimo proceso parametrų tyrimo išvados.....	35
4 KELIŲ KINTAMŲJŲ REGRESIJOS ANALIZĖ	36
4.1 ANOVA minimaliam storiui nustatyti	36
4.2 ANOVA minimaliam galimam nuokrypiui nustatyti	38
IŠVADOS	40
LITERATŪRA.....	41

Andrius, Juodsnukis. Šaltojo formavimo proceso tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Sigitas Kilikevičius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: gamybos inžinerija, technologijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: *šaltasis formavimas, suplonėjimas.*

Kaunas, 2018. 42 p.

SANTRAUKA

Apžvelgus literatūros šaltinius išsiaiškinti svarbiausi proceso parametrai. Sukurtas skaičiuojamasis formavimo proceso modelis. Šio modelio pagrindu atlikti proceso parametrų (ruošinio prispaudimo jėgos, matricos spindulio ir trinties koeficiento) tyrimai ir nustatytos priklausomybės. Atlikta regresinė rezultatų analizė. Darbo pabaigoje pateiktos išvados.

Andrius, Juodsnukis. *Analysis of the cold forming process*: Master's Final Project / supervisor assoc. prof. Sigitas Kilikevičius. The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Production Engineering, Technological sciences.

Key words: the cold forming, thinning.

Kaunas, 2018. 42 p.

SUMMARY

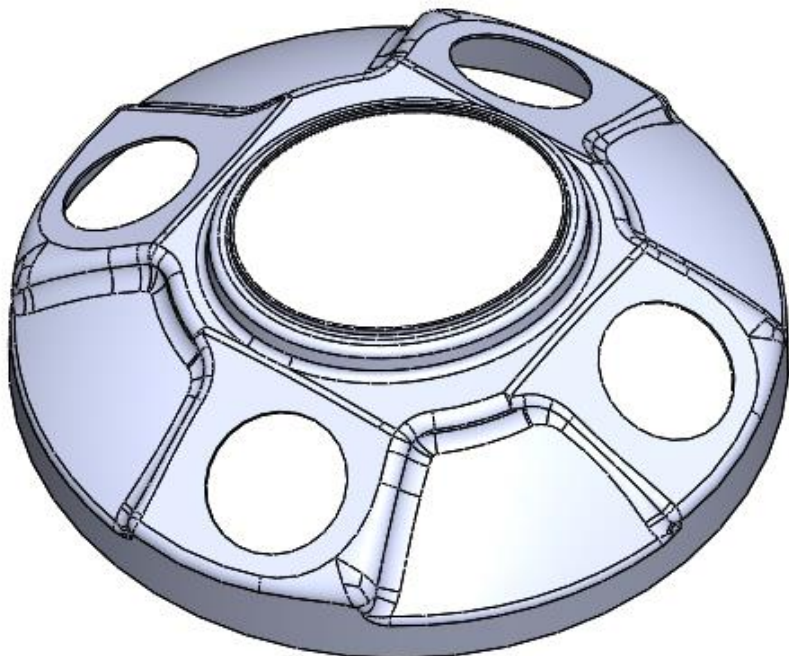
An overview of the literature sources revealed the most important parameters of the process. The computational model of the formation process was created. On the basis of this model, the investigation of the process parameters (workpiece press force, matrix radius and friction coefficient) was carried out and determined dependencies. Regression analysis of results was performed. Conclusions are presented at the end of the work.

ĮVADAS

Sudėtingėjant detalių geometrijai bei kylant reikalavimams, apdirbimo technologijos taip pat tobulėja. Štampuotų detalių gamyboje ruošinys yra plastiškai deformuojamas tarp šampo elementų darbinių paviršių, kol detalė įgauna galutinę formą bei jai keliamus geometrijos reikalavimus. Detalių gamyba štampuojant yra labai efektyvi: didelis medžiagos panaudojimo koeficientas, trumpas detalių gamybos laikas, kadangi vienu ar keliais preso darbo ciklais yra pagaminama detalė. Apdirbant šiuo būdu galima mažinti medžiagos bei energijos sąnaudas [1].

Norint išlikti konkurencingais gamintojais nuolat augančioje rinkoje, reikia rasti būdų kaip sutaupyti. Vienas iš jų – štampavimo proceso modeliavimas naudojant baigtinių elementų metodu veikiančią programinę įrangą. Tai leistų tinkamai konstruoti, gaminti ir surinkti štampus pirmuoju bandymu patiriant mažesnes išlaidas.

Darbo objektas – viena iš alaus statinės dalių – dangtelis (1 pav.). Šio darbo metu analizuojama detalės forma neatitinka galutinės detalės formos, kadangi po formavimo operacijos bus atliekamas 3D plovimas lazeriu. Jo metu bus išpjautos keturios skylės ir nupjauti abu detalės galiniai paviršiai. Detalės medžiaga yra nerūdijantis plienas – 1.4301, o storis 1 mm. Kadangi statinės viduje bus pasiekiamas didelis slėgis, todėl svarbu, jog detalė formavimo metu nesuplonėtų iki kritinės ribos – 0,8 mm.



1 pav. Dangtelis

Darbo tikslas – ištirti šaltojo formavimo proceso parametrus ir jų įtaką formuotų plieninių detalių kokybei.

Darbo uždaviniai:

- Apžvelgti su darbo tema susijusią literatūrą ir išsiaiškinti svarbiausius proceso parametrus;
- Sukurti skaičiuojamąjį formavimo proceso modelį baigtinių elementų pagrindu;
- Atlikti formavimo proceso parametrų tyrimus;
- Nustatyti tinkamiausias parametrų reikšmes;
- Atlikti tyrimų rezultatų sklaidos analizę ANOVA.

1 LITERATŪROS APŽVALGA

Gamyboje yra įvairių apdirbimo būdų, tačiau jų esmė yra ta pati – pagaminta detalė turi būti reikiamos formos, tikslumo ir atitikti reikalaujamas tolerancijas bei kitas savybes. Yra 5 gamybos procesų tipai:

- Pirminis ruošinio formavimas: liejimas, ištempimas, metalo miltelių spaudimas.
- Formavimo procesai: valcavimas, šaltasis ir karštasis šlampavimai, lenkimas, gilusis tempimas. Šių procesų metu medžiaga yra plastiškai deformuojama.
- Medžiagos šalinimo procesai, jų metu medžiagos perteklius yra pašalinamas norint gauti norimą geometriją. Šie procesai yra: tekinimas, frezavimas, grėžimas, pjovimas, pjovimas elektros iškrova.
- Detalių apdorojimas nekeičiant jos formos: įvairūs terminiai apdorojimai, anodavimas.
- Detalių sujungimo procesai: suvirinimas, litavimas, kniedijimas, presavimas.

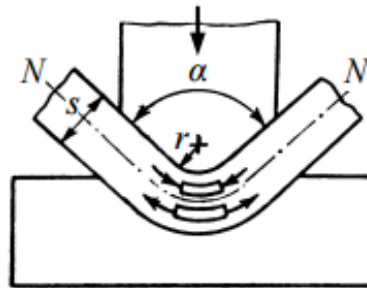
Šaltasis šlampavimas yra populiarus gamybos būdas, kai reikia gaminti dideles detalių partijas, kurios amortizuoja išlaidas įrangai. Taip pat spaudimo būdu apdirbtos detalės pasižymi geromis mechaninėmis savybėmis, todėl smūgine apkrova apkrautos detalės (automobilių, lėktuvų važiuoklių ir kt.) dažnai apdirbamos spaudimo būdu. Detalės yra sukietinamos (padidėja stipris) šaltai formuojant, tačiau sumažėja plastiškumas. Šaltojo formavimo operacijos skirstomos į atskyrimo operacijas: atkirpimas, iškirtimas, pramušimas, įkirtimas, apkirtimas.

Formos keitimo operacijas:

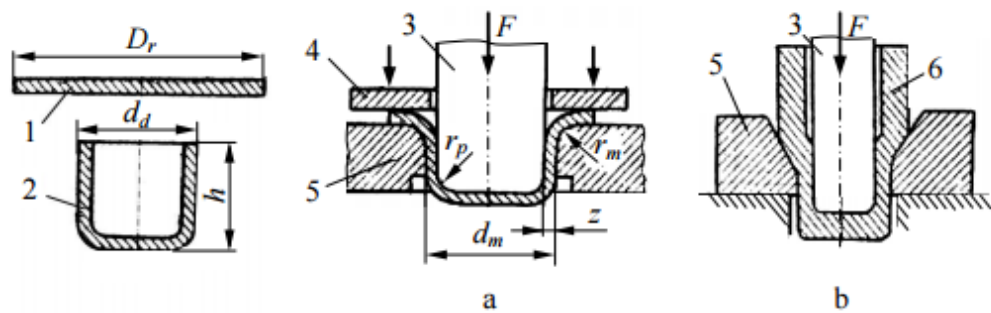
- Lenkimas (1.1 pav.). Lenkimo štampu keičiama ruošinio ašies kryptis. Lenkimo metu ruošinio išoriniai sluoksniai yra tempiami, o vidiniai – gniuždomi. Ruošinio matmenys nustatomi pagal neutralų sluoksnį N-N, kadangi lenkiant jo matmenys praktiškai nekinta. Tačiau veikiant tampriosioms jėgoms detalė pakeičia savo geometriją, po slėgio panaikinimo, atkėlus puansoną nuo detalės. Tai vadinama atspyruokliavimu. Tokį detalės spyruokliavimą galima kompensuoti didinant lenkimo kampą ar perspaudžiant visą lenkimo spindulio paviršių („bottoming the punch“).
- Ištempimas. Cilindro formos detalė gaunama puansonui įstūmus plokščią ruošinį į matricos skylę. Dėl spinduline kryptimi veikiančių gniuždymo įtempimų susidaro raukšlės. Jų išvengiama naudojant žiedo tipo prispaudiklį, kuris prispaudžia ruošinį prie matricos. Siekiant neprakirsti lakšto, puansono ir matricos briaunos suapvalinamos. Matricos ir prispaudiklio kontaktiniai paviršiai yra tepami alyva. Operacijos metu metalas sukietinamas. Kai norima ištempti neploninant sienelių, tarpas tarp puansono ir matricos

yra 1,1–1,3 karto didesnis nei metalo storis. Kai šis tarpas mažesnis už pradinį lakšto storį, ištempinama ploninant sienelės. Taip ištempiamos ilgos plonasienės detalės.

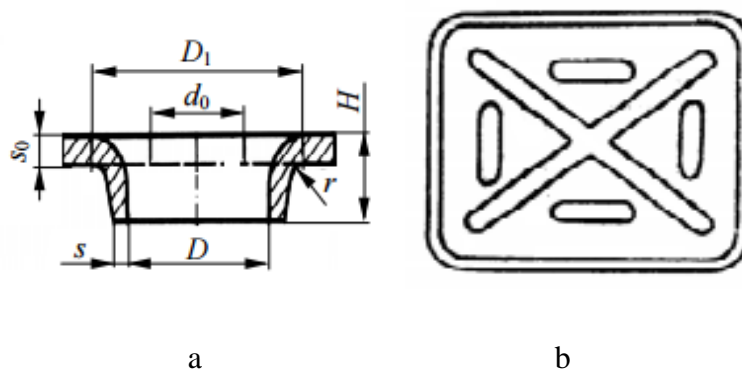
- Bortelio atrietaimas. Borteliai (reikalingi sriegiui sudaryti, virinti, surinkti) gaunami stumiant puansoną į ruošinio dalį su skylė. Kad skylės kraštai neištrūktų, rekomenduojamas santykis $D/d_0 = 1,2-1,8$.
- Formavimas. Kai ruošinyje daromos standumo briaunos, įdubos, iškylos ir kiti elementai.



1.1 pav. Lenkimo schema [2]



1.2 pav. Ištempimo schemas: a – neploninant sienelės; b – ploninant sienelę; 1, 6 – ruošinys; 2 – detalė; 3 – puansonas; 4 – prispaudiklis; 5 – matrica [2]



1.3 pav. Atrietaimas (a), reljefinis formavimas (b) [2]

Projektuojant ir konstruojant sudėtingiausia iš užduočių yra optimalios šampavimo operacijų eigos analizė. Šios analizės metu reikia įvertinti:

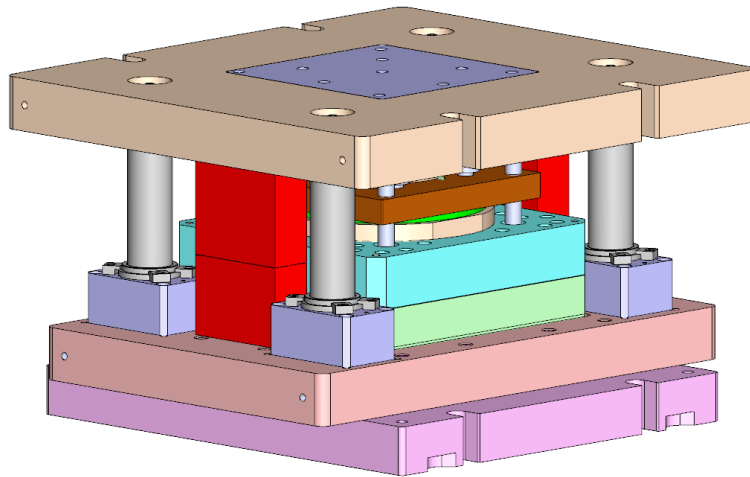
- numatomą medžiagos tekėjimo kryptį, atsižvelgiant į detalės formą, tūrį, deformacijų būvį bei deformacijas;
- nustatyti formavimo galimybes, kad metalas proceso metu neplyštų bei nesiraukšlėtų;
- nustatyti reikalingą preso jėgą.

1.1 Šampų konstrukcijos ir veikimo principas

Yra 3 šampų konstrukcijų bei šampavimo technologijų tipai:

- individualūs šampai – tai pavieniai šampai, kurių pirmoji iš operacijų yra detalės kontūro iškirtimas. Vėliau atliekama lenkimo, formavimo ar skylių kirtimo operacijos.
- progresiniai šampai – tai dažniausiai didesnių gabaritų šampai, kadangi juose atliekamos kirtimo, lenkimo ir formavimo operacijos. Medžiaga - juosta tiekama rulonais. Taip vyksta nepertraukiamas šampavimo procesas.
- Kombinuoto (perkeliamojo, „transfer“) tipo šampai – tai progresinio ir pavienių šampų kombinacija, kadangi procesas gali vykti nepertraukiamai, tačiau ruošinius tarp šampavimo operacijų perdeda robotas, o ne žmogus. Detalės dažniausiai perkeliamos pneumatiniiais ar mechaniniais čiuptuvais.

Individualų šampą (1.4 pav.) sudaro: matrica ir puansonas, kai kuriuose papildomai yra pakėliklis ir prispaudiklis. Šie elementai atkartoja detalės išorinį ir vidinį paviršius. Visi šie elementai yra tvirtinami apatinėje ir viršutinėje plokštėse, kurios tarpusavyje juda kreipiančiosiomis kolonomis. [3].



1.4 pav. Individualus štampas

1.2 Defektai, atsirandantys štampavimo metu

Gaminant detales štampavimo metu galimi įvairūs defektai: plyšimas, raukšlėjimas, spyruokliavimas.

Plyšimas atsiranda tiek trapiuose, tiek plastinėse medžiagose. Plastinėse medžiagose šis defektas įvyksta po suplonėjimo, kurio metu suformuojamas kakliukas. Nuokrypa nuo vienodos deformacijos dėl tempimo nestabilumo vadinama kakliuku. Nestabilumas formavimo metu atsiranda, kai medžiaga negali išlaikyti apkrovos, nes medžiagos kietumo koeficiento reikšmė negali kompensuoti skerspūvio sumažėjimo. Taip pat labai svarbu, jog briaunos būtų nukirstos kuo glotniau, be pradinių įtrūkimų, kurie tolesnėse formavimo operacijose gali didėti.



1.5 pav. Detalė su įtrūkimu, atsiradusiu kirštoje briaunoje

Raukšlėjimas atsiranda, kai ruošinį veikia gniuždymo įtempimai tempimo operacijos metu. Viršutinis ištraukto cilindro kraštas dažnai nėra lygus ir paprastai patiria tam tikras deformacijas, panašias į bangas. Jos primena viršūnes ir įdubas. Viršūnių ir įdubų atsiradimą padidina medžiagos

anizotropiškumas – fizikinių savybių nevienodumas įvairiomis kryptimis. Dauguma pramonėje naudojamų medžiagų yra anizotropinės, todėl svarbu tinkamai įvertinti šios savybės įtaką. Anizotropiškumas apibrėžiamas r koeficientu. Šis koeficientas nurodomas kaip santykis tarp ilgio ir pločio pokyčių priimant, jog tūris nekinta [4] :

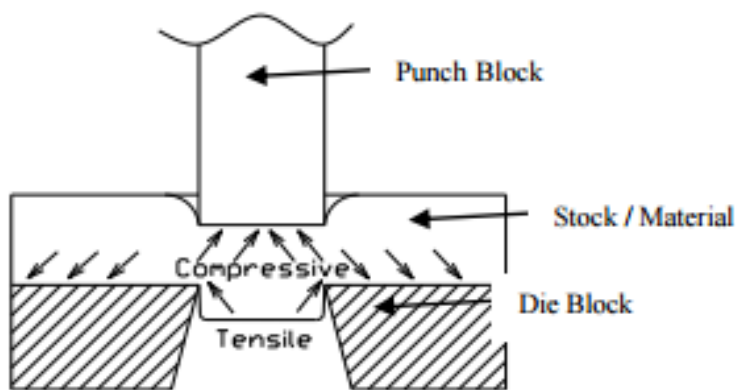
$$r = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{w_0 l_0}{wl}\right)} \quad (1)$$

čia w – plotis, w_0 – pradinis plotis, l – ilgis, l_0 – pradinis ilgis.

Anizotropiškumas dažniausiai matuojamas keliomis kryptimis: 0° , 45° ir 90° . Jeigu gautos reikšmės skiriasi, tuomet naudojamas plokščio anizotropiškumo koeficientas Δr :

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90} - 2r_{45}}{2} \quad (2)$$

Užvartos susidaro atliekant atskyrimo operacijas. Užvartos dydis priklauso nuo medžiagos mechaninių savybių bei tarpelio tarp puansono ir matricos. Kuo šis tarpelis mažesnis, tuo mažesnė galima užvarta.



1.6 pav. Kirtimo schema [1]

Atspyruokliavimas. Metalo formavimo metu pasireiškia dvi deformacijų rūšys: tampriosios ir plastinės. Formuojant detalę metalas teka ir patiria plastines deformacijas, kurios iššaukia didelius įtempimus. Tačiau detalės geometrija po formavimo puansono pašalinimo gali pakisti dėl tampriųjų deformacijų. Šios deformacijos nėra didelės, tačiau turi didelę įtaką galutinei detalės formai.

Atspyuokliavimas charakterizuojamas kaip galutinio detalės kampo po formavimo ir nominalaus lenkimo kampų skirtumas:

$$\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_0; \quad (3)$$

čia α_1 – galutinis detalės kampas, α_0 – nominalus lenkimo kampas. Taip pat atspyuokliavimą galima charakterizuoti kaip neutralaus sluoksnio lenkimo spindulio pokytį:

$$\Delta\rho = \rho_1 - \rho_0; \quad (4)$$

čia ρ_1 – lenkimo spindulys po atspyuokliavimo, ρ_0 – lenkimo spindulys prieš atspyuokliavimą. Šis defektas gali būti kompensuojamas atitinkamais puansono bei matricos formos pakeitimais. Tai reiškia, jog darbiniai šampo paviršiai nebūtinai atitiks detalės paviršius [5], [6].

1.3 Formavimo proceso parametrai

Proceso parametrų optimizavimas bet kokiame procese yra svarbu, kadangi tai leidžia ne tik tinkamai pagaminti detalę bet ir sumažinti gamybos sąnaudas. Tačiau nevisi parametrai turi vienodą įtaką formavimo procesui. Savo darbe autoriai [7] modeliavo cilindrinio indelio formavimo procesą ir tyrė trijų parametrų įtaką detalės kokybei. Buvo nustatyta, jog didžiausią įtaką turi matricos spindulys (89,2%), toliau sekė ruošinio prispaudimo jėga ir trinties koeficientas. Kito tyrimo metu [8] autoriai nustatė, jog didžiausią įtaką turi ruošinio prispaudimo jėga (56,98%). Šio tyrimo metu taip pat buvo formuojama cilindrinė detalė. Buvo atlikti tyrimai [9] modeliuojant, kūginės prizmės tipo, detalės formavimo procesą. Tyrimo metu buvo nustatyta, jog didžiausią įtaką formavimo procesui turi matricos spindulys.

Svarbūs detalės kokybiniai parametrai yra šie: detalės minimalus storis, maksimalių raukšlių dydis ir atspyuokliavimo reikšmės. Literatūroje teigiama, kad didinant ruošinio prispaudimo jėgą detalės minimalus storis mažėja. Didesne jėga prispaudžiant ruošinį, medžiaga patiria didesnes deformacijas, todėl labiau suplonėja. Taip pat teigiama, jog mažinant formavimo matricos spindulį minimalus storis mažėja. Mažinant trinties koeficientą minimalus storis taip pat mažėja. [1] [10]

Autorius [6] savo darbe atliko nemažai bandymų: nustatė ribinio formavimo kreives, sudarė ribinio formavimo diagramas, matavo liekamųjų įtempimų vertes prieš ir po atspyuokliavimo, nustatė suplonėjimo bei detalės standumo pokyčio kreives. Taip pat sukurta šampavimo metodika naudojant kintamą prispaudimo jėgą. Tai įgalina geresnes medžiagos

formavimo savybes. Visų bandymų metu buvo naudojama z formos plokštelė. Taip pat ištirtos skirtingų medžiagų formavimo savybės: AW 6082-T6, L63, AISI 304.

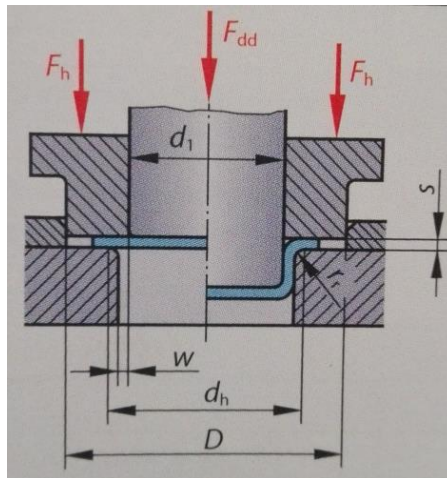
1.4 Literatūros apžvalgos išvados

Išanalizavus literatūrą, aptarus šampų konstrukcijas, šampavimo procesą ir jo metu galinčius atsirasti defektus, galima teigti, jog yra nemažai parametrų turinčių įtaką formavimo procesui. Svarbiausi proceso parametrai yra matricos spindulys, ruošinio prispaudimo jėga ir trinties koeficientas. Svarbūs kokybiniai formavimo proceso parametrai yra detalės minimalus storis, maksimalių raukšlių dydis ir atspyuokliavimo reikšmės. Išanalizavus atliktus bandymus galima teigti, jog proceso parametrų įtaka yra nevienoda detalės kokybei priklausomai nuo detalės formos.

Apžvelgus literatūrą matyti, jog yra įvairių sąlygų, kurios įtakoja formavimo procesą. Norint sėkmingai suprojektuoti šampą būtina atlikti tyrimus, leisiančius išsiaiškinti kaip vyksta šaltojo formavimo procesas tam tikromis sąlygomis. Tyrimo skyriuje bus modeliuojamas šampavimo procesas ir nustatomos kokybinių parametrų priklausomybės nuo matricos spindulio, ruošinio prispaudimo jėgos ir trinties koeficiento. Taip pat statistiniu būdu bus nustatoma šių parametrų tarpusavio įtaka formavimo procesui. Gaminant šampą ir atliekant gamybinius bandymus bus žinoma, kurį parametą pirma reikia koreguoti, norint gauti kokybišką detalę.

2 ANALITINIS PIRMINIŲ ŠTAMPAVIMO PARAMETRŲ NUSTATYMAS

Šioje dalyje nustatomi pirminiai štampavimo parametrai. Jie bus naudojami kaip baziniai tolesniame tyrimo skyriuje.

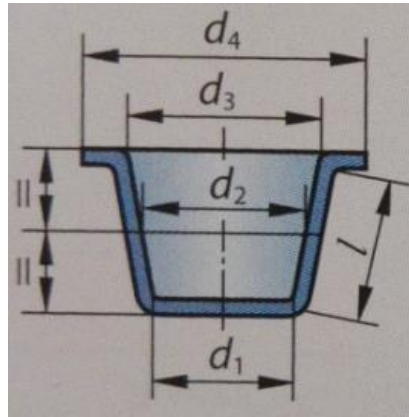


2.1 pav. Štampavimo parametrai [11]

Formuojama detalė nėra idealiai simetriška, tačiau pirminiame etape priimama, jog detalė yra apskrita su kūgine dalimi. Reikalingi parametrai priklauso nuo detalės dydžio: skersmuo d – 229 mm; aukštis – 76 mm. Apskaičiuojamas išsklotinės skersmuo (2.2 pav.):

$$D = \sqrt{d_1^2 + 4 \cdot d_2 \cdot l} \quad (5)$$

čia d_1 – detalės dugno skersmuo, d_2 - detalės vidurio skersmuo, l – detalės kūgio sudaromosios ilgis. Metodika plačiau aprašyta [11] šaltinyje.



2.2 pav. Eskizas išklotinei apskaičiuoti [11]

$$D = \sqrt{d_1^2 + 4 \cdot d_2 \cdot l} = \sqrt{100^2 + 4 \cdot 178 \cdot 104} = 289,9 \text{ mm}$$

Patikrinama ar medžiagos ištempimo santykis neviršija leistinos ribos:

$$\beta_1 = \frac{D}{d} \quad (6)$$

$$\beta_1 = \frac{D}{d_2} = \frac{289,9}{178} = 1,629$$

Gauta 1,629 reikšmė yra mažesnė nei maksimalus ištempimo santykis 1,8. Galima teigti, jog 1 formavimo operacijos pakaks detalei saugiai išformuoti.

Apskaičiuojama giliojo ištempimo jėga (2.1 pav.):

$$F_{ad} = \pi \cdot (d_2 + s) \cdot s \cdot R_m \cdot 1,2 \cdot \frac{\beta - 1}{\beta_{max} - 1} \quad (7)$$

čia \$s\$ – lakšto storis, \$R_m\$ – tempimo stipris.

$$\begin{aligned} F_{ad} &= \pi \cdot (d_2 + s) \cdot s \cdot R_m \cdot 1,2 \cdot \frac{\beta - 1}{\beta_{max} - 1} = 3,14(178 + 1) \cdot 1 \cdot 750 \cdot 1,2 \cdot \frac{1,629 - 1}{1,8 - 1} \\ &= 397 \cdot 10^3 \text{ N} \end{aligned}$$

Toliau apskaičiuojama lakšto prispaudimo jėga (2.1 pav.):

$$F_h = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d_h^2) \cdot p \quad (8)$$

čia p – lakšto laikymo slėgis (plienui $2,5 \text{ N/mm}^2$). Apskaičiuojamas lakšto prispaudimo jėgos veikimo skersmuo:

$$d_h = d_2 + 2 \cdot (r_r + w) \quad (9)$$

čia r_r – formavimo matricos spindulys, w - formavimo tarpas. Apskaičiuojamas formavimo tarpas:

$$w = s + k \cdot \sqrt{10 \cdot s} = 1 + 0,07\sqrt{10 \cdot 1} = 1,221 \text{ mm} \quad (10)$$

čia k – medžiagos faktorius. Apskaičiuojamas formavimo matricos spindulys (2.1 pav.):

$$r_r = 0,035 \cdot (50 + (D - d_2)) \cdot \sqrt{s} = 0,035 \cdot (50 + (289,9 - 178)) \cdot \sqrt{1} = 5,67 \quad (11)$$

$$d_h = d_2 + 2 \cdot (r_r + w) = 178 + 2 \cdot (5,67 + 1,221) = 191,8$$

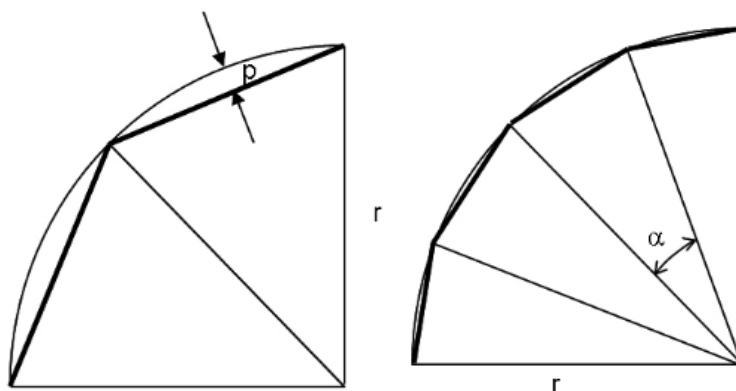
$$F_h = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d_h^2) \cdot p = \frac{3,14}{4} \cdot (289,9^2 - 191,8^2) \cdot 2,5 = 92,7 \cdot 10^3 \text{ N}$$

3 ŠTAMPAVIMO PROCESO PARAMETRŲ TYRIMAI

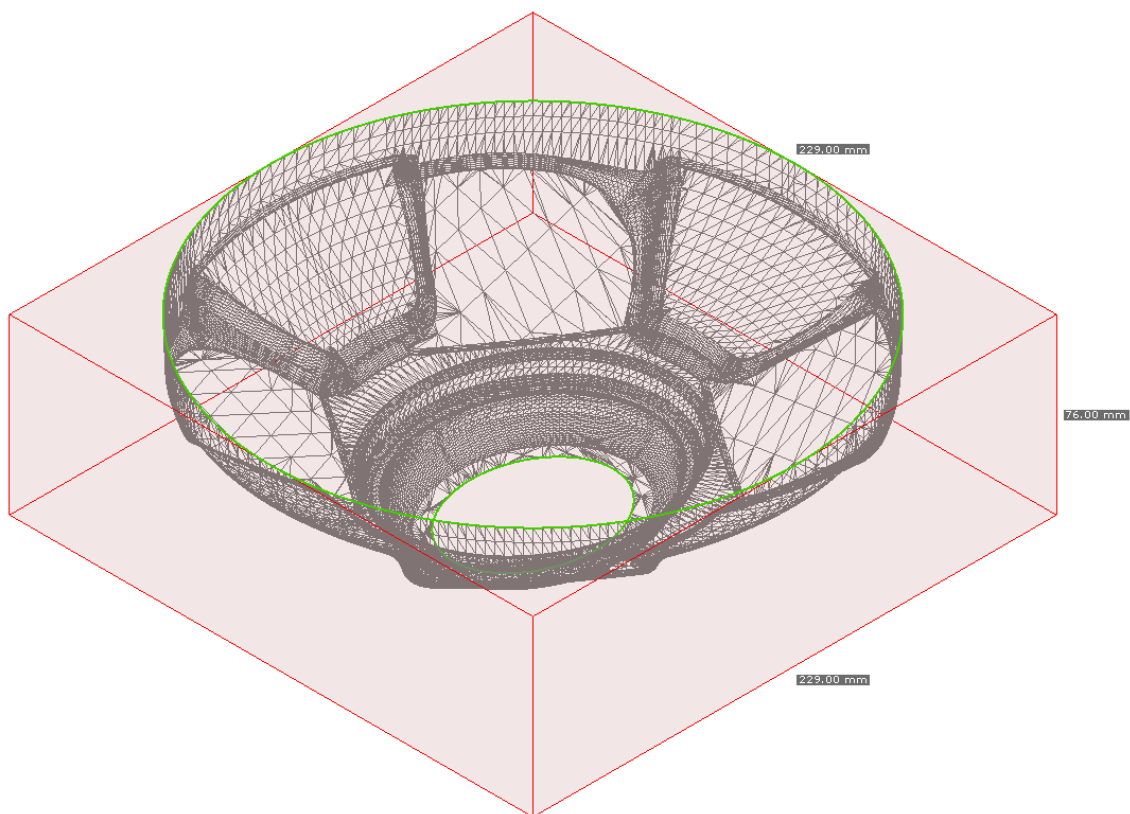
3.1 Metodologija baigtinių elementų pagrindu

Formavimo galimybės

Formavimo galimybės tiriamos pasitelkiant „AutoForm“ programinę įrangą. Ši programa pritaikyta lakštinio metalo formavimo procesams modeliuoti bei tirti. Ji veikia baigtinių elementų metodo principu. Pasirinktas elasto-plastinis kevalo tipo elementas. Tokio tipo elementas turi 5 laisvės laipsnius: 3 tiesialinijinio judėjimo ir 2 sukimosi. Štampuojamos detalės modelis suskaidomas baigtinių elementų tinkleliu (3.2 pav.). Programoje naudojamas adaptyvusis tinklelis, leidžiantis taupyti resursus. Elementas yra trikampio formos ir pagal h-metodą, jis yra smulkinamas į mažesnius trikampius, pagal kreivumo ir deformacijos kriterijus (3.1 pav.). Kreivumas nustatomas pagal elemento nuokrypį nuo tikrosios formos – p ir didžiausią leidžiamą elemento kampą tarp linijų – α . Pirminiams skaičiavimams parenkama: $p = 0,22$ mm, $\alpha = 30^\circ$. Detalės medžiaga yra nerūdijantis plienas – 1.4301. Pasirenkama medžiaga su jai būdingomis mechaninėmis savybėmis.



3.1 pav. Elemento dydžio nustatymo kriterijai



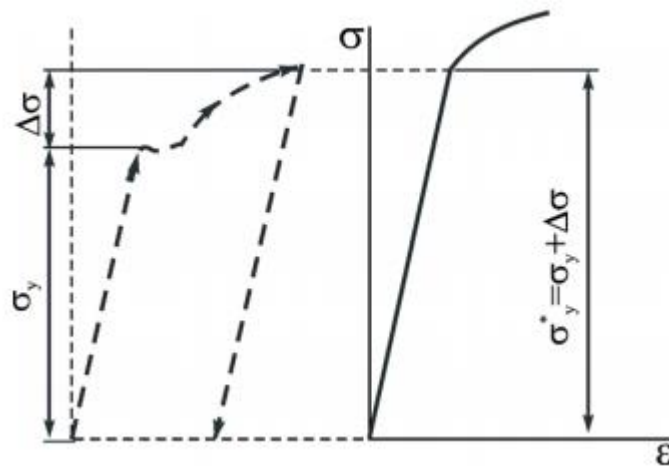
3.2 pav. Štampuojamos detalės modelis suskaidytas baigtinių elementų tinkleliu

Medžiagos sukietėjimo modelis

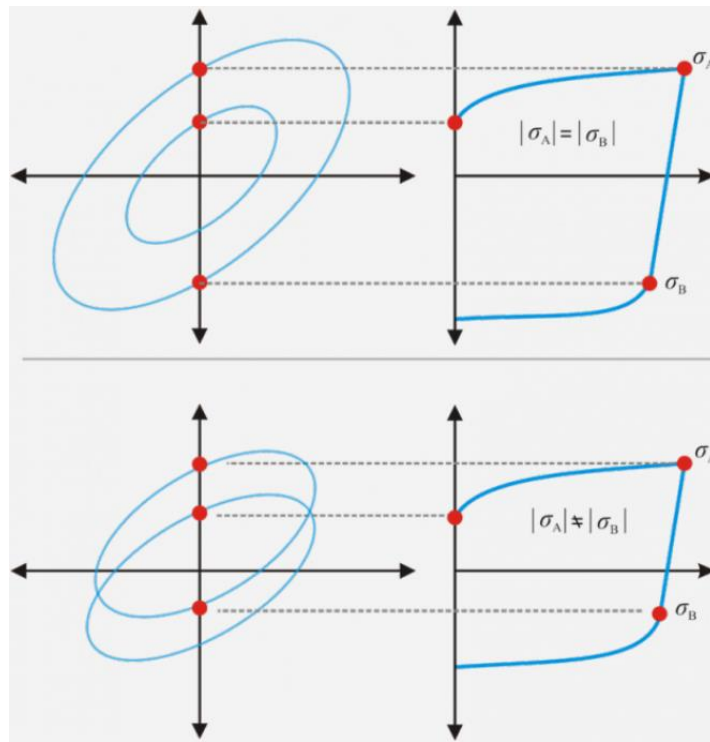
Yra du pagrindiniai pramonėje patvirtinti medžiagos sukietėjimo modeliai: izotropinis ir kinematinis. Izotropinio kietėjimo atveju įtempimų laukas pasikeičia dydžiu įtempimų skalėje, atliekant vienašio įtempimo bandymą lygiagrečiai valcavimo kryptčiai. Įtempimų lauko išsiplėtimas arba susitraukimas yra apibrėžiamas įtempimų kreive. Kai medžiaga deformuojasi, sukietėjimo lygis su sukaupta plastine deformacija persislenka tekėjimo kreivėje ir to pasekoje matyti įtempimų lauko prasiplėtimas izotropiškai, visomis kryptimis. Tekėjimo kreivės apibrėžiamos kaip funkcijos nuo plastinių deformacijų, plastinių deformacijų greičio. Daugeliu atvejų tekėjimo kreivės nustatomos atliekant vienašį tempimo bandymą. Šaltojo formavimo metu pasiekiami didesni įtempimų ir deformacijų lygiai, nei vienašio tempimo metu. Aprašant šiuos galimai didesnius įtempimų ir deformacijų lygius reikalinga ekstrapoliacija. Todėl tekėjimo kreivės nustatytos eksperimentiškai yra praplečiamos matematiniais modeliais (Ludwik, Swift, Hockett-Sherby). Šie modeliai sutalpina empirinius duomenis į kreivę, kuri tuomet ekstrapoliuojama iki didesnių deformacijų, kurios gali įvykti šaltojo formavimo metu. [12] [13] [14]

Vienas iš izotropinio sukietėjimo modelio trūkumų yra tai, jog jo negalima naudoti Baušingerio (angl. *Bauschinger*) efektui įvertinti. Baušingerio efektas – kai bandinys yra pakartotinai apkrautas ir naujoje tempimo diagramoje (3.3 pav.) takumo įtempimas fiksuojamas

didesnis. Jis padidėja būtent tuo intervalu, kuriuo buvo viršytas takumo įtempimas per pirminį deformavimą. Tokio paties dydžio pokytis numatomas tempiant ir gniuždant. Žemiau pateiktame 3.4 pav. matyti vienašio tempimo-gniuždymo skersine kryptimi bandymas. Izotropinio sukietėjimo atveju pirmasis įtempimas gniuždant yra lygus paskutiniam įtempimui tempiant. O kinematinio sukietėjimo atveju įtempimų lokalė pasislenka prieš tai buvusio įtempimo kryptimi. Taigi, įtempimai sumažėja pakeitus apkrovos kryptį. Kadangi nagrinėjama detalė nėra idealiai cilindrinė ir turi kreivų paviršių, tai formavimo metu bus ir tempimo, ir gniuždymo įtempimų. Priimame naudoti kinematinio sukietėjimo modelį, nes jis labiau atitiks realias sąlygas.

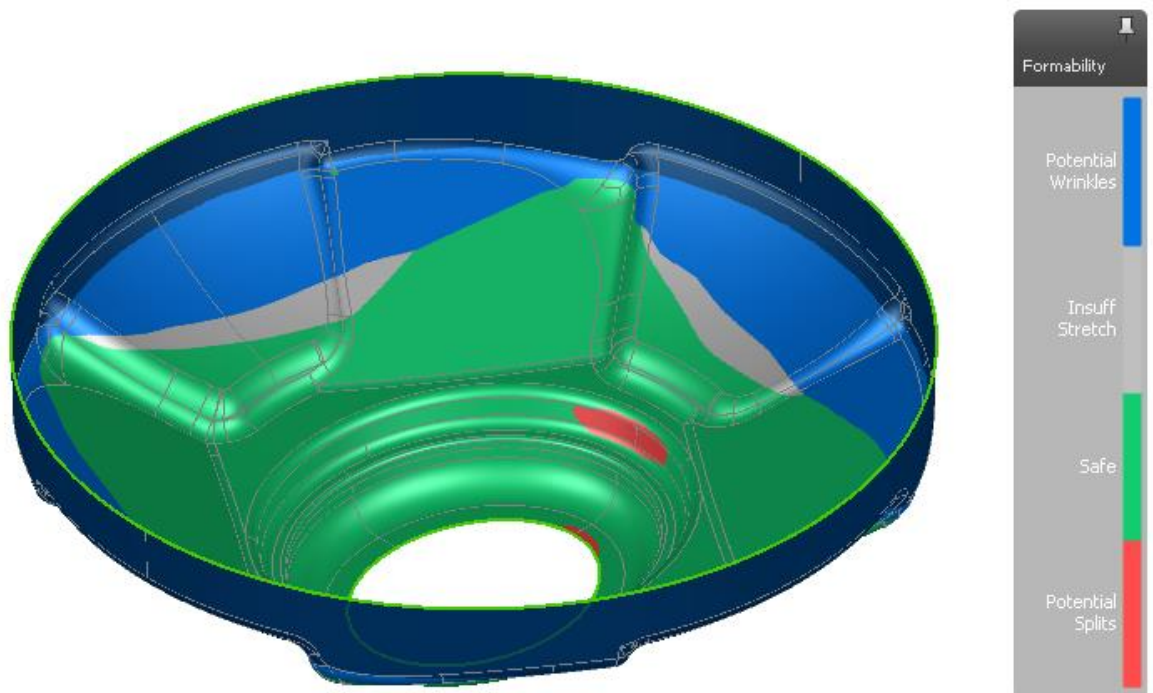


3.3 pav. Tempimo diagrama prieš ir po tempimo



3.4 pav. Viršuje izotropinio, apačioje kinematinio sukietėjimo kreivės

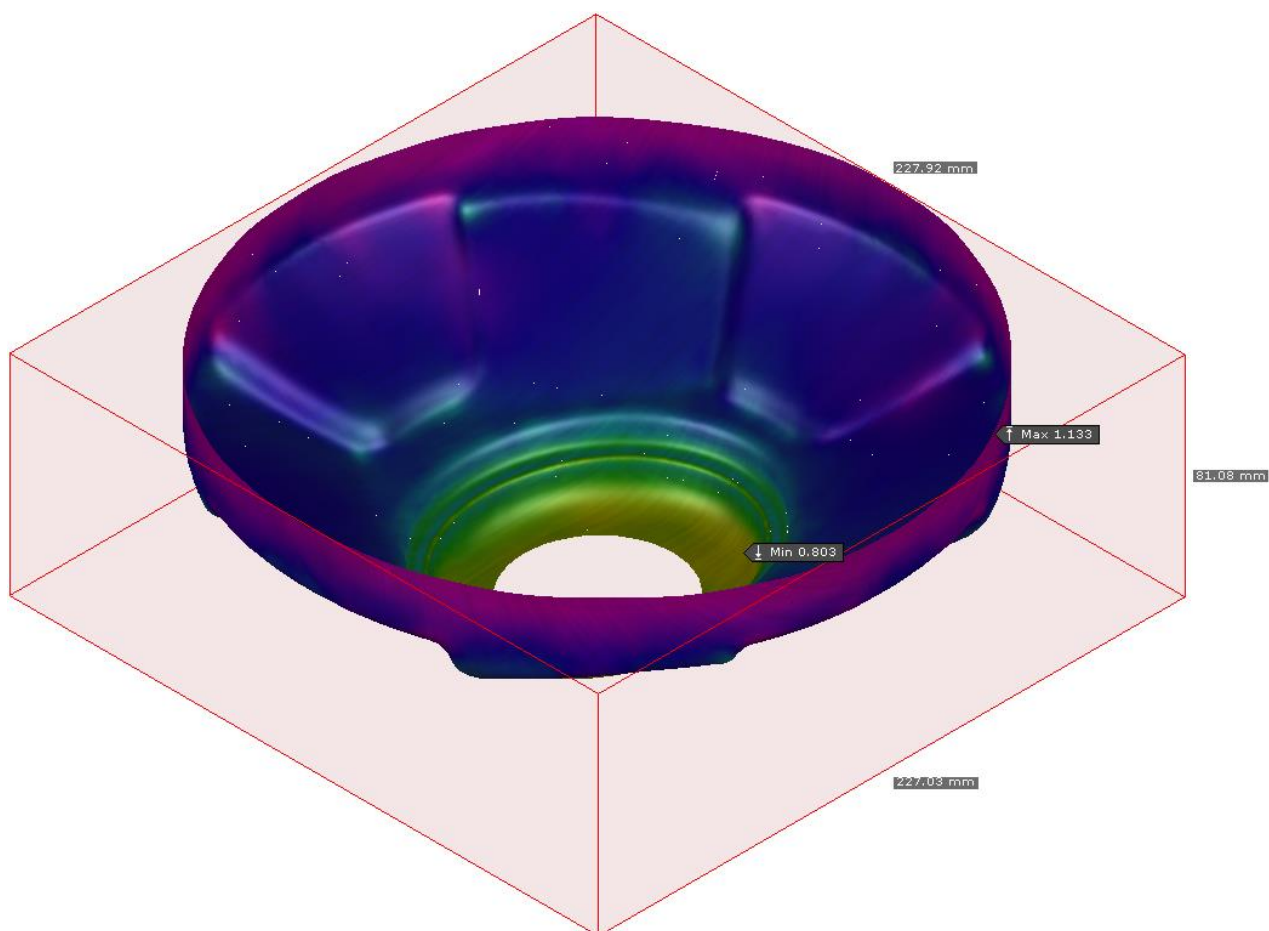
Tik importavus detalės geometriją, programa atlieka formavimo galimumo analizę ir pateikia potencialių medžiagos plyšimų (raudonai) bei susiraukšlėjimų (mėlynai) vietas (3.5 pav.).



3.5 pav. Pirminė formuojamumo analizė

3.2 Pirminio skaičiavimo rezultatų patikrinimas

Pirminio skaičiavimo rezultatai yra tikrinami, kad nustatyti reikalingą ruošinio išsklotinės skersmenį ir reikalingą ruošinio prispaudimo jėgą. Išsklotinės skersmuo $D = 289,9$ mm; $F_h = 92,7$ kN. Atlikus šių duomenų patikrinimą programa, detalėje neatsiranda jokių plyšimų (3.6 pav.). Suformuotos detalės aukštis (81,08 mm) gaunamas kiek didesnis nei reikalinga (76 mm). Priimame išvadą, jog išsklotinės skersmuo ir ruošinio prispaudimo jėga yra tinkami tolimesniam modeliavimui.



3.6 pav. Suformuotos detalės gabaritiniai matmenys ir kraštutinės storio reikšmės

3.3 Valcavimo krypties įtakos tyrimas

Šiame tyrime naudojamas tas pats skaičiuojamasis modelis kaip ir pirminiame tyrime. Valcavimo krypties įtaką reikia nustatyti, norint sužinoti ar ruošinio orientavimas bus reikalingas tolesniame modeliavime ir projektuojamame štampe.

Medžiagos 1.4301 anizotropiškumo koeficientai buvo nustatyti eksperimentiškai [15]. Jie pateikiami 3.1 lentelėje. Šios reikšmės naudojamos modeliuojant šampavimo procesą.

3.1 lentelė. 1.4301 medžiagos anizotropiškumo koeficientai

Valcavimo kryptis	Anizotropiškumo koeficientai r	Normalinio anizotropiškumo koeficientas \bar{r}	Plokščio anizotropiškumo koeficientas Δr
0°	0,815	1,051	-0,454
45°	1,278		
90°	0,834		

Šio tyrimo metu stebimi detalės storio pokyčiai, galimų raukšlių aukštis, detalės geometrijos atspyrūkliavimo nuo nominalo reikšmės. Rezultatai pateikiami 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Valcavimo krypties tyrimo rezultatai

	Valcavimo kryptis		
	0°	45°	90°
Minimalus storis, mm	0,799	0,793	0,801
Maksimalus storis, mm	1,129	1,133	1,126
Storio pokyčio amplitudė, mm	0,330	0,340	0,325
Maksimalus raukšlių dydis, mm	0,09	0,103	0,098
Minimalus atspyrūkliavimas normaline kryptimi, mm	0,506	0,389	0,51
Maksimalus atspyrūkliavimas normaline kryptimi, mm	0,292	0,244	0,321
Galimas formos nuokrypis, mm	0,798	0,633	0,831

Didžiausias storio pokytis ir raukšlių dydis gaunamas ruošinius orientuojant 45° kampu. Tačiau taip orientuoti ruošiniai mažiausiai atspyrūkliuoja, to pasėkoje gaunamas mažiausias detalės formos nuokrypis 0,633 mm. Didžiausias detalės formos nuokrypis yra 0,831 mm orientuojant 90° kampu, tačiau jis neviršija leistino formos nuokrypio 1 mm. Darome išvadą, jog valcavimo kryptis didelės įtakos formavimo procesui neturi ir numatome, jog ruošinio orientavimas nereikalingas.

3.4 Matricos spindulio tyrimas

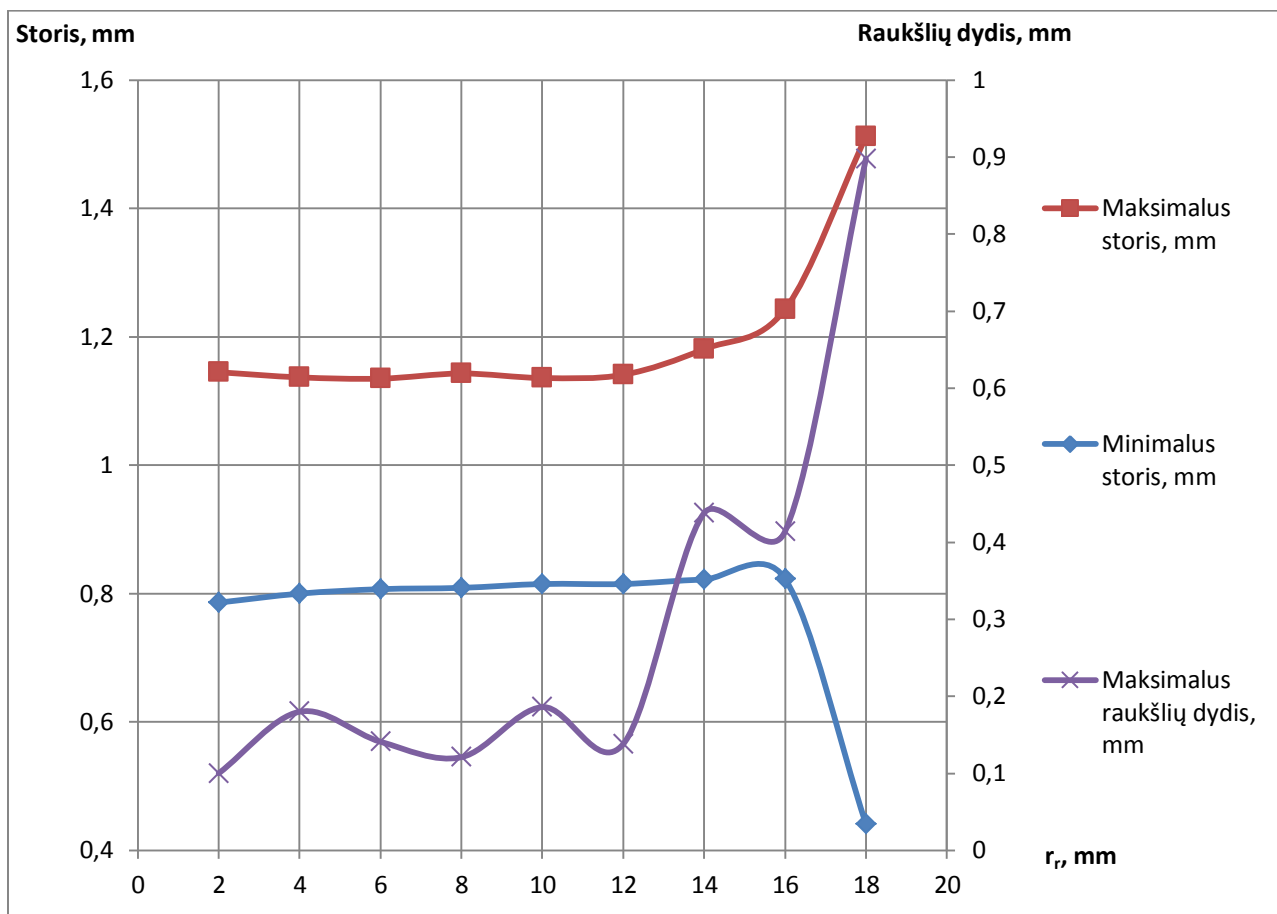
Pradinė teoriškai apskaičiuota matricos spindulio reikšmė $r_r = 5,67$ mm. Suapvaliname iki artimiausio sveikojo skaičiaus – 6 mm. Kitas reikšmes parenkame besikeičiančias kas 2 mm. Tyrimo metu stebimi detalės storio pokyčiai, galimų raukšlių aukštis, detalės geometrijos atspyrūkliavimo nuo nominalo reikšmės. Rezultatai pateikiami 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. Matricos spindulio tyrimo rezultatai

	Matricos spindulys r_r , mm								
	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Minimalus storis, mm	0,786	0,800	0,807	0,809	0,815	0,815	0,822	0,823	0,441
Maksimalus storis, mm	1,145	1,137	1,135	1,143	1,136	1,141	1,181	1,243	1,512
Storio pokyčio amplitudė, mm	0,359	0,337	0,328	0,334	0,321	0,326	0,359	0,420	1,071
Maksimalus raukšlių dydis, mm	0,100	0,180	0,141	0,121	0,186	0,138	0,438	0,414	0,898
Minimalus atspyrūkliavimas normaline kryptimi, mm	-0,904	-0,563	-0,557	-0,594	-0,513	-0,690	-0,647	-0,711	-0,556
Maksimalus atspyrūkliavimas normaline kryptimi, mm	0,339	0,343	0,323	0,314	0,324	0,353	0,337	0,341	0,489
Galimas formos nuokrypis, mm	1,243	0,906	0,880	0,908	0,837	1,043	0,984	1,052	1,045

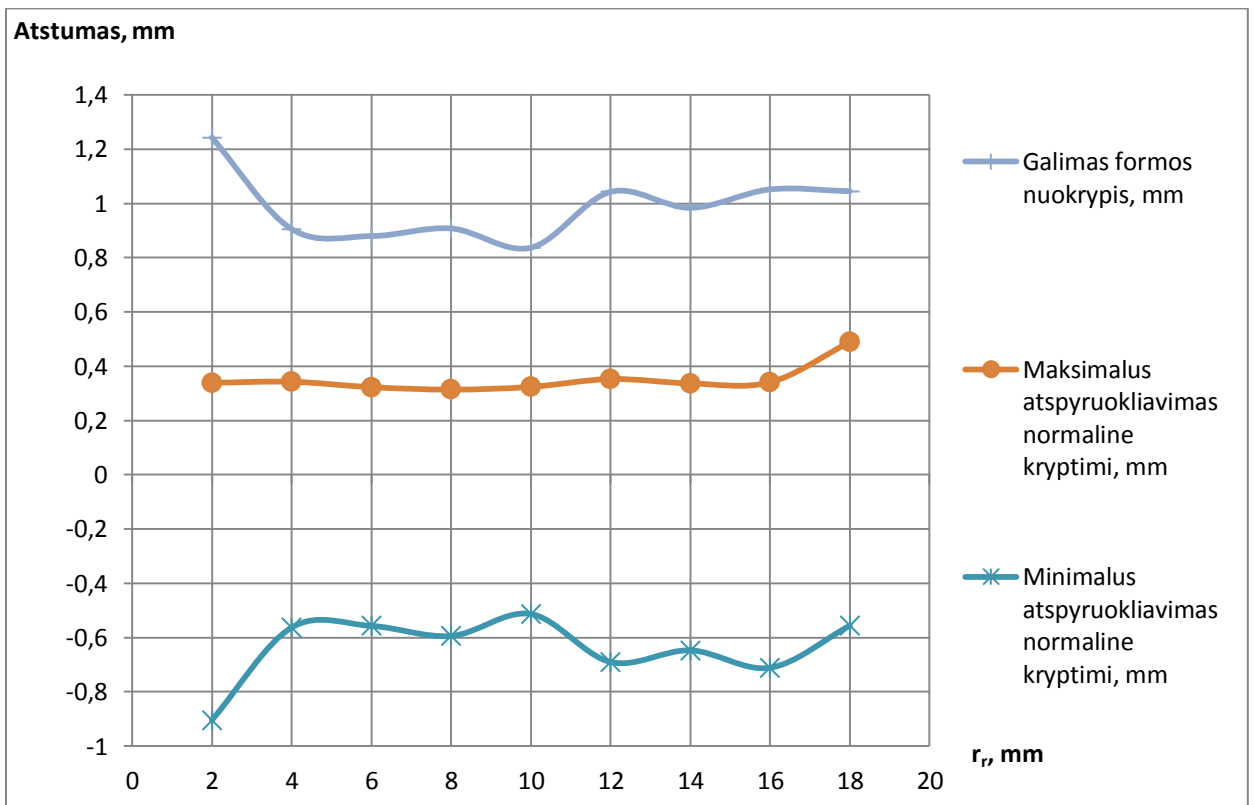
Pagal žemiau pateiktą grafiką (3.7 pav.) matyti „šuo“ visuose nagrinėjamuose rezultatuose, kai matricos spindulys 18 mm. Panagrinėjus šio modeliavimo eigą matyti, jog vykstant formavimo procesui formuojamas ruošinys pradeda raukšlėtis, nes nėra prispaustas tarp matricos ir prispaudiklio (3.9 pav.). Didelis matricos spindulys neleidžia tinkamai prispausti ruošinio. Štampui toliau formuojant detalę, pradinė raukšlė dar labiau susiraukšlėja ir persilenkia po savimi (3.10 pav.). Kai galutinai užsidaro štampas tokia raukšlė yra tik suspaudžiama, bet neišlyginama. Todėl šis 18 mm matricos spindulys, yra netinkamas štampui.

Matyti tendencija, jog minimalus detalės storis tiesiogiai priklauso nuo matricos spindulio dydžio. Esant didžiausiam matricos spinduliui 16 mm, detalė mažiausiai suplonėja 0,823 mm. Taip pat galime išvelgti tendenciją tarp maksimalaus detalės storio ir matricos spindulio dydžio. Galiausiai matyti, jog storio pokyčio amplitudė išlieka pastovi apie 0,35 mm.

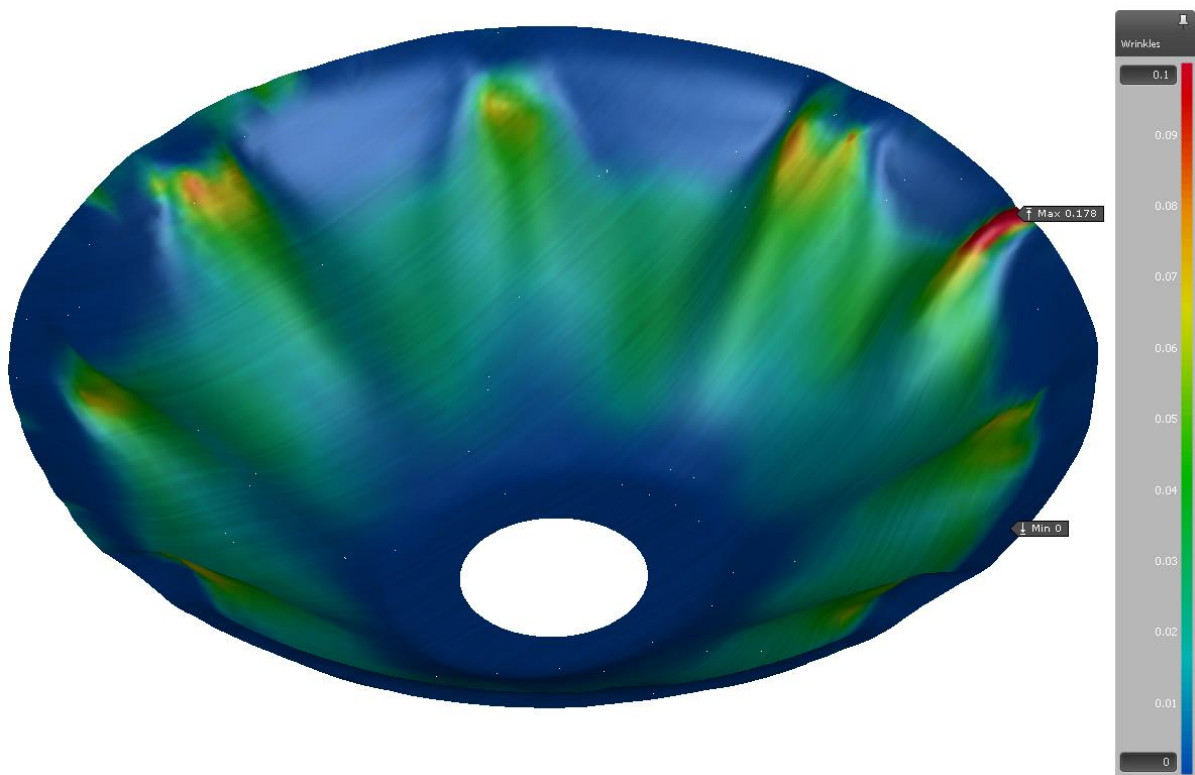


3.7 pav. Detalės storio ir raukšlių reikšmių priklausomybė nuo matricos spindulio

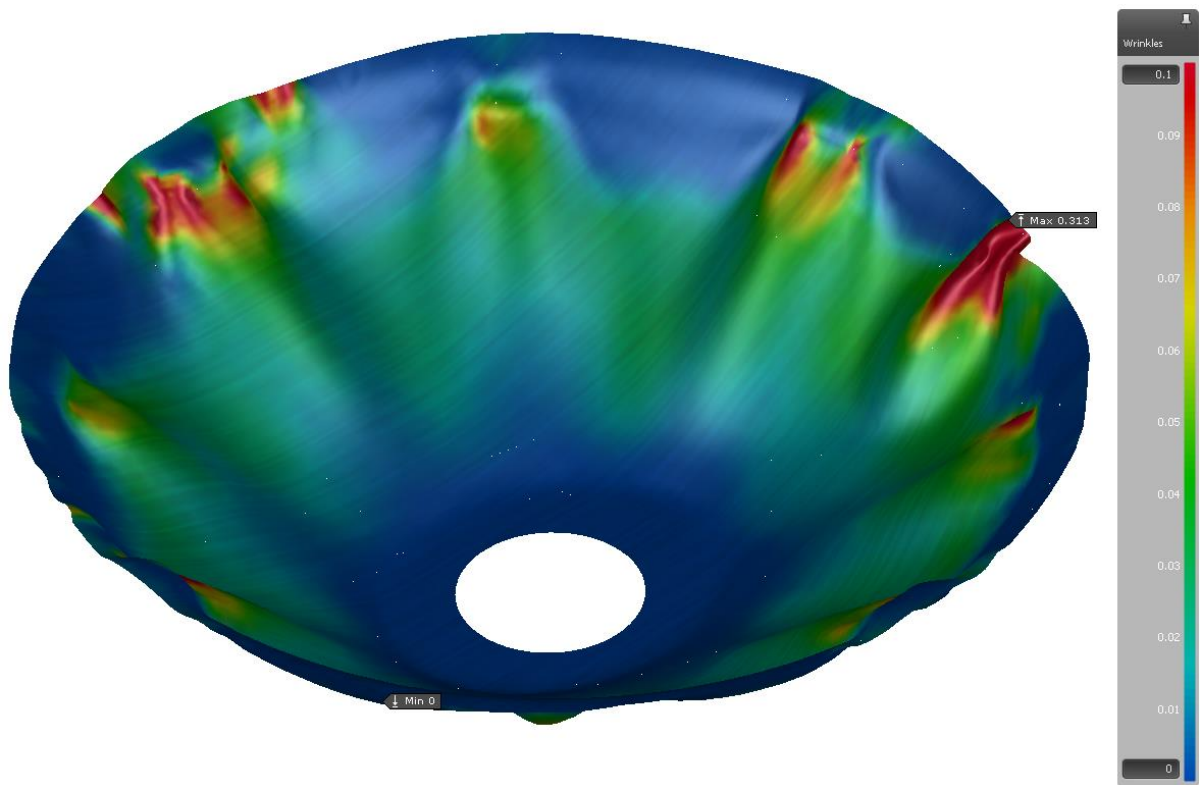
Pagal grafiką (3.8 pav.) matyti, jog maksimalus atspūduokliavimas nepriklauso nuo matricos spindulio ir išlieka pastovus apie 0,33 mm. Galimas formos nuokrypis neturi aiškios tendencijos priklausomybei nuo matricos spindulio, bet mažiausi formos nuokrypiai gauti, kai matricos spindulys 10 mm. Todėl priimta naudoti šį matricos spindulį kaip pastovų dydį kitiems tyrimams.



3.8 pav. Atspyrkliavimo ir formos nuokrypio priklausomybė nuo matricos spindulio



3.9 pav. Formavimo eiga likus 51,67 mm iki šampo užsidarymo



3.10 pav. Formavimo eiga likus 48,66 mm iki štampo užsidarymo

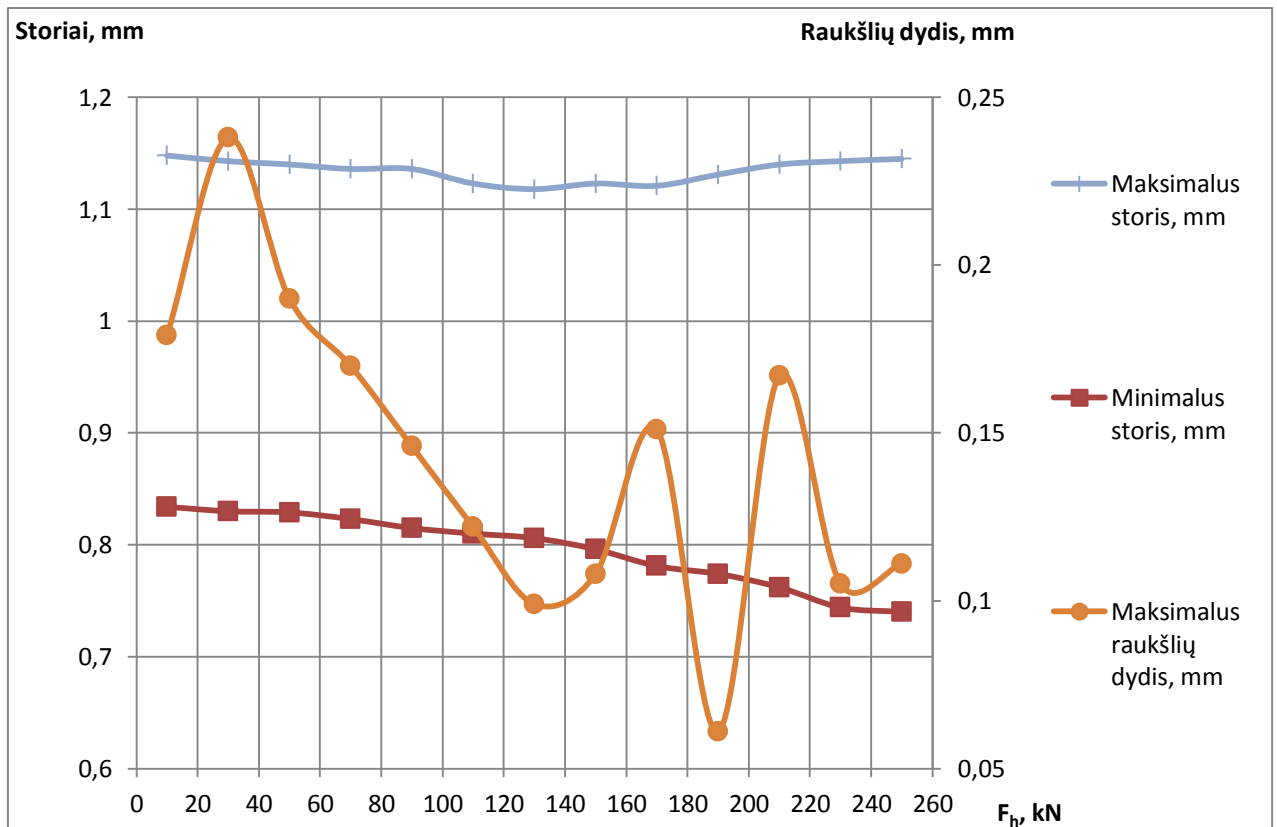
3.5 Ruošinio prispaudimo jėgos tyrimas

Pradinė teoriškai apskaičiuota prispaudimo jėga $F_h = 92,7$ kN. Suapvaliname iki artimiausios sveikosios dešimčių reikšmės – 90 kN. Kitas reikšmes parenkame besikeičiančias kas 20 kN. Tyrimo metu stebimi detalės storio pokyčiai, galimų raukšlių aukštis, detalės geometrijos atspyrūkliavimo nuo nominalo reikšmės. Rezultatai pateikiami 3.4 lentelėje.

3.4 lentelė. Ruošinio prispaudimo jėgos tyrimo rezultatai

	Ruošinio prispaudimo jėga F_h , kN												
	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250
Minimalus storis, mm	0,834	0,830	0,829	0,823	0,815	0,810	0,806	0,796	0,781	0,774	0,762	0,744	0,740
Maksimalus storis, mm	1,148	1,143	1,140	1,136	1,136	1,123	1,118	1,123	1,121	1,131	1,140	1,143	1,145
Storio pokyčio amplitudė, mm	0,314	0,313	0,311	0,313	0,321	0,313	0,312	0,327	0,340	0,357	0,378	0,399	0,405
Maksimalus raukšlių dydis, mm	0,179	0,238	0,190	0,170	0,146	0,122	0,099	0,108	0,151	0,061	0,167	0,105	0,111
Minimalus atspyrūkliavimas normaline kryptimi, mm	-0,626	-0,587	-0,602	-0,517	-0,509	-0,580	-0,634	-0,659	-0,710	-0,726	-0,901	-0,941	-0,936
Maksimalus atspyrūkliavimas normaline kryptimi, mm	0,31	0,318	0,315	0,322	0,321	0,325	0,334	0,334	0,354	0,358	0,367	0,375	0,373
Galimas formos nuokrypis, mm	0,936	0,905	0,917	0,839	0,830	0,905	0,968	0,993	1,064	1,084	1,268	1,316	1,309

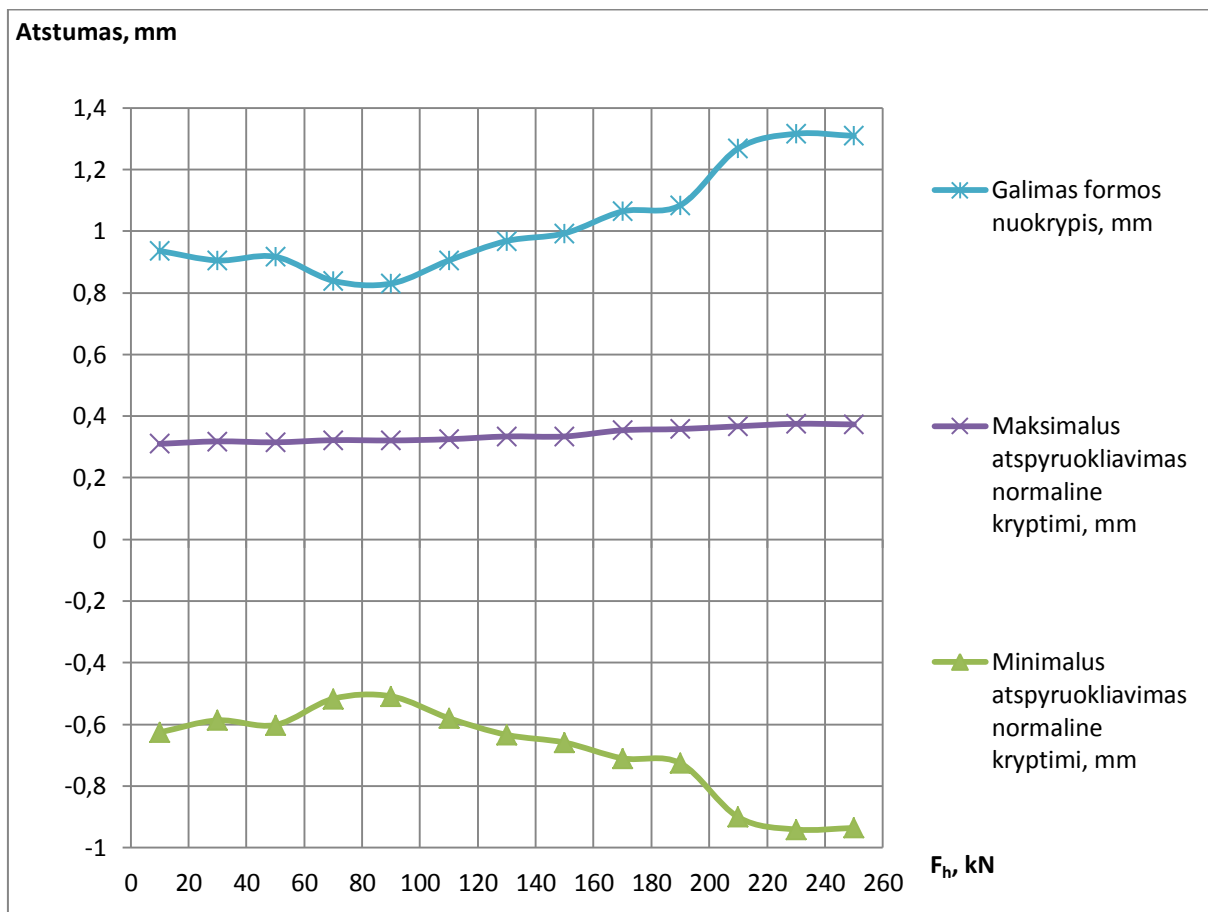
Žemiau pateiktame grafike (3.11 pav.) matyti tendencija, jog minimalus detalės storis yra atvirkščiai proporcingas ruošinio prispaudimo jėgai. Esant didžiausiai prispaudimo jėgai 250 kN, detalė daugiausiai suplonėja 0,74 mm. Maksimalaus detalės storio atveju aiškios tendencijos nematyti. Esant kraštinėms prispaudimo jėgos reikšmėms, maksimalus detalės storis pasiekia didžiausias reikšmes. Prispaudimo jėgai esant 110-150 kN, maksimalus detalės storis pasiekia mažiausias reikšmes. Pakankamai aiški tendencija matoma maksimalių raukšlių priklausomybės kreivėje. Esant didesnei prispaudimo jėgai, detalė mažiau raukšlėjasi.



3.11 pav. Detalės storio ir raukšlių reikšmių priklausomybė nuo prispaudimo jėgos

Pagal grafiką (3.12 pav.) matyti, jog maksimalus atspyrūkliavimas turi nežymią tendenciją didėti, didėjant prispaudimo jėgai. Galimas formos nuokrypis turi tendenciją didėti, didėjant prispaudimo jėgai. Tačiau ties 170 kN prispaudimo jėga, galimas formos nuokrypis peržengia leistiną formos nuokrypį – 1 mm, todėl prispaudimo jėgos esančios 170-250 kN ribose negalima naudoti štampei.

Apibendrinant abu tyrimo grafikus matyti dvi tinkamiausios prispaudimo jėgos reikšmės 70 ir 90 kN. Ties šia reikšme galimas formos nuokrypis yra mažiausias – 0,83 mm kaip ir maksimalus raukšlių dydis yra mažiausias iš dviejų - 0,146 mm. Tačiau minimalus detalės storis yra kiek mažesnis nei ties 70 kN reikšme. Priimama, jog tinkamiausia prispaudimo jėga šios detalės formavimui yra 90 kN.



3.12 pav. Atspyrkliavimo ir formos nuokrypio priklausomybė nuo prispaudimo jėgos

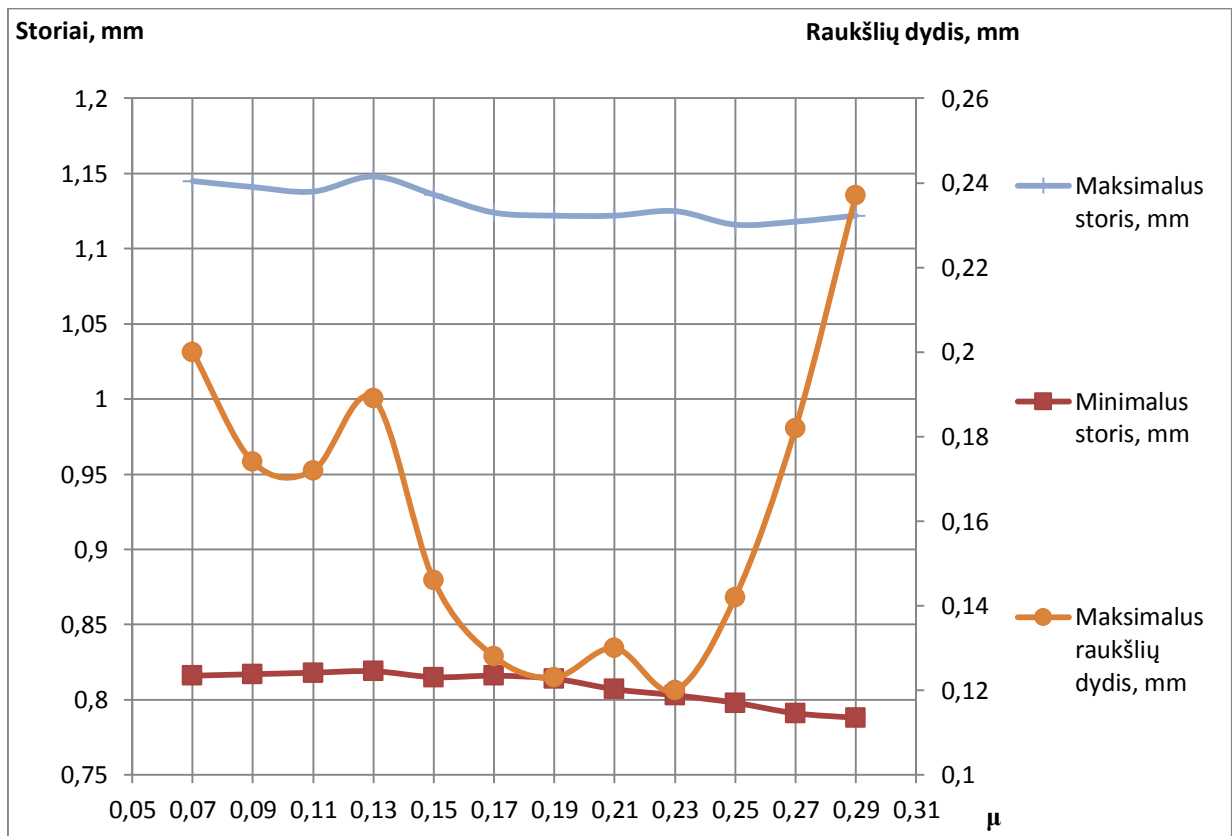
3.6 Trinties koeficiento tyrimas

Ankstesniuose tyrimuose naudota trinties koeficiento reikšmė $\mu = 0,15$. Kitas reikšmes parenkame besikeičiančias kas 0,02. Tyrimo metu stebimi detalės storio pokyčiai, galimų raukšlių aukštis, detalės geometrijos atspyrkliavimo nuo nominalo reikšmės. Rezultatai pateikiami 3.5 lentelėje.

Žemiau pateiktame grafike (3.13 pav.) matyti tendencija, jog minimalus detalės storis yra atvirkščiai proporcingas trinties koeficientui. Esant didžiausiam trinties koeficientui, detalė daugiausiai suplonėja. Maksimalaus detalės storio atveju aiškios tendencijos nematyti. Maksimalių raukšlių atveju aiškios tendencijos taip pat nematyti. Esant kraštinėms trinties koeficiento reikšmėms, raukšlių dydis pasiekia didžiausias reikšmes. Trinties koeficientui esant 0,17-0,23 kN, raukšlių dydis pasiekia mažiausias reikšmes.

3.5 lentelė. Trinties koeficiento tyrimo rezultatai

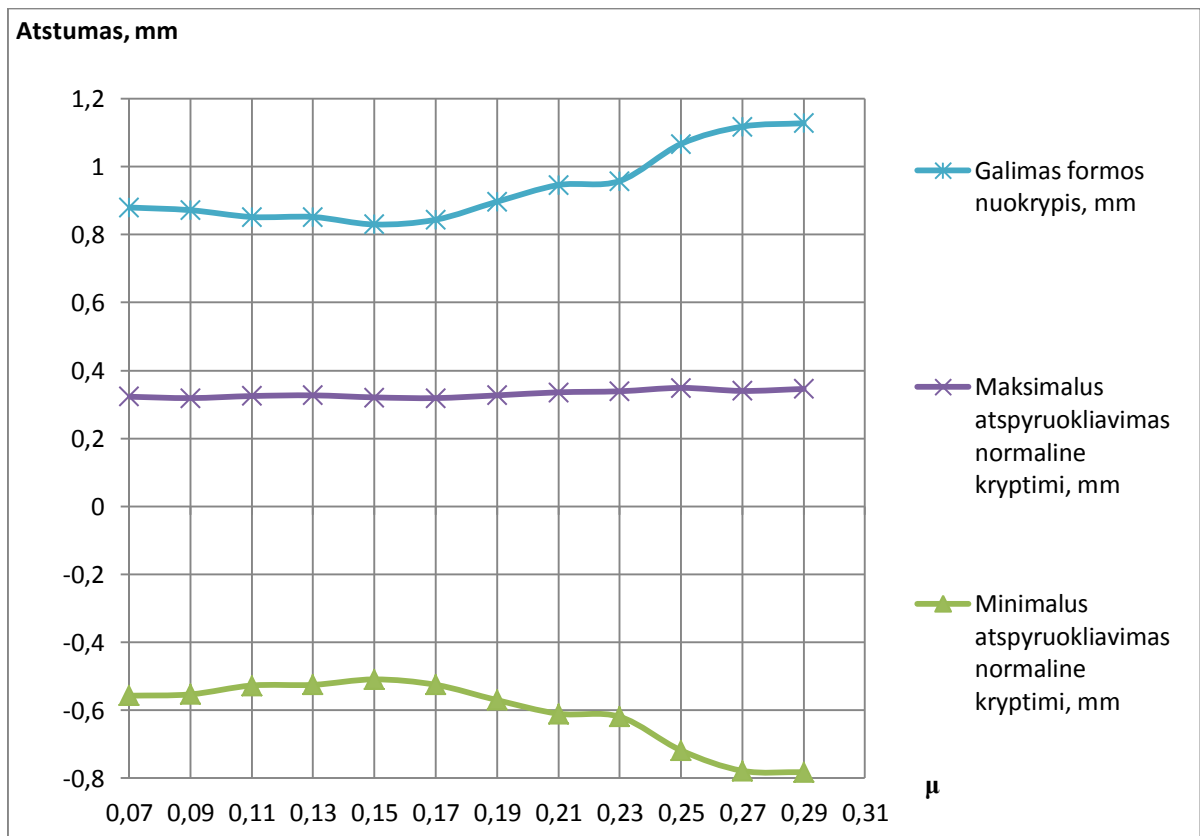
	Trinties koeficientas μ											
	0,07	0,09	0,11	0,13	0,15	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25	0,27	0,29
Minimalus storis, mm	0,816	0,817	0,818	0,819	0,815	0,816	0,814	0,807	0,803	0,798	0,791	0,788
Maksimalus storis, mm	1,145	1,141	1,138	1,148	1,136	1,124	1,122	1,122	1,125	1,116	1,118	1,122
Storio pokyčio amplitudė, mm	0,329	0,324	0,32	0,329	0,321	0,308	0,308	0,315	0,322	0,318	0,327	0,334
Maksimalus raukšlių dydis, mm	0,2	0,174	0,172	0,189	0,146	0,128	0,123	0,13	0,12	0,142	0,182	0,237
Minimalus atspyrūkliavimas normaline kryptimi, mm	-0,557	-0,553	-0,527	-0,525	-0,509	-0,525	-0,57	-0,61	-0,619	-0,718	-0,778	-0,782
Maksimalus atspyrūkliavimas normaline kryptimi, mm	0,323	0,319	0,325	0,327	0,321	0,319	0,327	0,336	0,339	0,349	0,340	0,346
Galimas formos nuokrypis, mm	0,88	0,872	0,852	0,852	0,83	0,844	0,897	0,946	0,958	1,067	1,118	1,128



3.13 pav. Detalės storio ir raukšlių reikšmių priklausomybė nuo trinties koeficiento

Pagal grafiką (3.14 pav.) matyti, jog maksimalus atsparykliavimas turi nežymią tendenciją didėti, trinties koeficientui. Galimas formos nuokrypis turi tendenciją didėti, trinties koeficientui. Tačiau ties 0,25 trinties koeficiento reikšme, galimas formos nuokrypis peržengia leistiną formos nuokrypį – 1 mm, todėl trinties koeficientas esantis 0,25-0,29 ribose negalimas naudoti šampui. Mažiausi formos nuokrypiai gaunami naudojant 0,15-0,17 trinties koeficientus.

Apibendrinant abu tyrimo grafikus matyti tinkamiausia trinties koeficiento reikšmė 0,17. Ties šia reikšme galimas formos nuokrypis yra vienas mažiausių – 0,844 mm, kaip ir maksimalus raukšlių dydis yra vienas mažiausias - 0,128 mm.



3.14 pav. Atspyrkliavimo ir formos nuokrypio priklausomybė nuo trinties koeficiento

3.7 Štampavimo proceso parametrų tyrimo išvados

Atlikus štampavimo parametrų tyrimus galima teigti, jog detalės kokybė priklauso nuo štampavimo parametrų. Galima teigti, kad didinant ruošinio prispaudimo jėgą detalės minimalus storis mažėja. Taip pat galima teigti, jog mažinant formavimo matricos spindulį minimalus storis mažėja. Lyginant bandymų metu gautus duomenis parinkti tinkamiausi parametrai, norint gauti kokybiškiausią detalę: matricos spindulys – 10 mm, ruošinio prispaudimo jėga – 90 kN ir trinties koeficientas 0,17. Projektuojant šampą rekomenduojama naudoti minėtas parametrų reikšmes.

4 KELIŲ KINTAMŲJŲ REGRESIJOS ANALIZĖ

Statistinis metodas panaudojamas tyrimų rezultatų sklaidos analizei atlikti. Atliekant kelių kintamųjų regresijos analizę galima nustatyti parametru įtaką formavimo procesui [16].

4.1 Anova minimaliam storiui nustatyti

Šios analizės metu nustatyta matricos spindulio, ruošinio prispaudimo jėgos bei trinties koeficiento įtaka detalės minimaliam storiui.

Pagal 3 faktorių ANOVA, regresijos modelis aprašomas tokia lygtimi:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 \quad (12)$$

čia X_1 , X_2 ir X_3 – nepriklausomi kintamieji, a_0 , a_1 , a_2 ir a_3 regresijos koeficientai

4.1 lentelė. Sklaidos duomenys

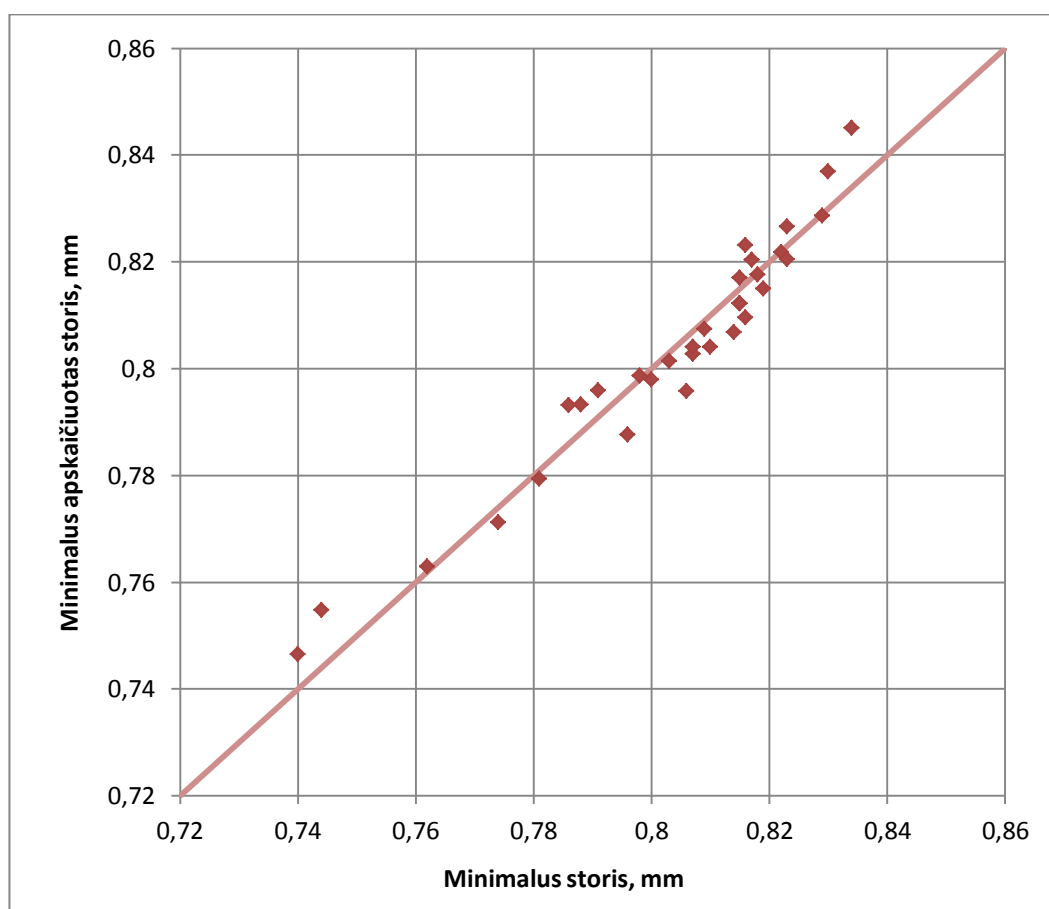
R	0,972172337
R kvadratas	0,945119052
Patikslintas R kvadratas	0,939441713
Standartinė nuokrypa	0,005595504
Bandymai	33

4.2 lentelė. ANOVA sklaidos analizė

	<i>Laisvės laipsnis</i>	<i>Kvadratų suma SS</i>	Kvadratų vidurkis MS	<i>F</i> – kriterijus	Įtaka <i>F</i>
Kintamieji	3	0,015636565	0,005212188	166,4721766	$2,26093 \cdot 10^{-18}$
Sąveika	29	0,00090798	$3,13097 \cdot 10^{-5}$		
Viso	32	0,016544545			

4.3 lentelė. Regresinės analizės koeficientų analizė

	Koeficientai	Standartinis nuokrypis	T stat	Įtaka (p - reikšmė)	Apatinė riba 95%	Viršutinė riba 95%
Riba	0,84571217	0,00588765	143,641672	$6,33981 \cdot 10^{-43}$	0,83367057	0,85775377
Kintamasis $X_1(F_h)$	-0,00041062	$1,92149 \cdot 10^{-5}$	-21,3697277	$2,70624 \cdot 10^{-19}$	-0,00044992	-0,00037132
Kintamasis $X_2(r_r)$	0,0023867	0,00042452	5,6220803	$4,51238 \cdot 10^{-6}$	0,00151845	0,00325495
Kintamasis $X_3(\mu)$	-0,13577439	0,02218006	-6,121460959	$1,14201 \cdot 10^{-6}$	-0,181137715	-0,090411069



4.1 pav. Regresinės analizės rezultatai minimaliam storiui

Regresinio modelio reikšmingumas įvertinamas lyginant F – kriterijų. Iš kriterijų lentelės pagal pasikliautinumo intervalą $\alpha = 0,05$ ir laisvės laipsnių skaičių 3 ir 29, pasirenkama $F_{0,05} = 2,92$. [16] Kadangi apskaičiuota F reikšmė yra $F_{apsk.} = 166,47$ daugiau nei pasirinkta $F_{0,05} = 2,92$, tai galima teigti, kad sudarytas modelis yra reikšmingas ir jo pagrindu galima nustatyti kitas minimalaus storio reikšmes.

4.2 Anova minimaliam galimam nuokrypiui nustatyti

Šios analizės metu nustatyta matricos spindulio, ruošinio prispaudimo jėgos bei trinties koeficiento įtaka galimam nuokrypiui.

4.4 lentelė. Sklaidos duomenys

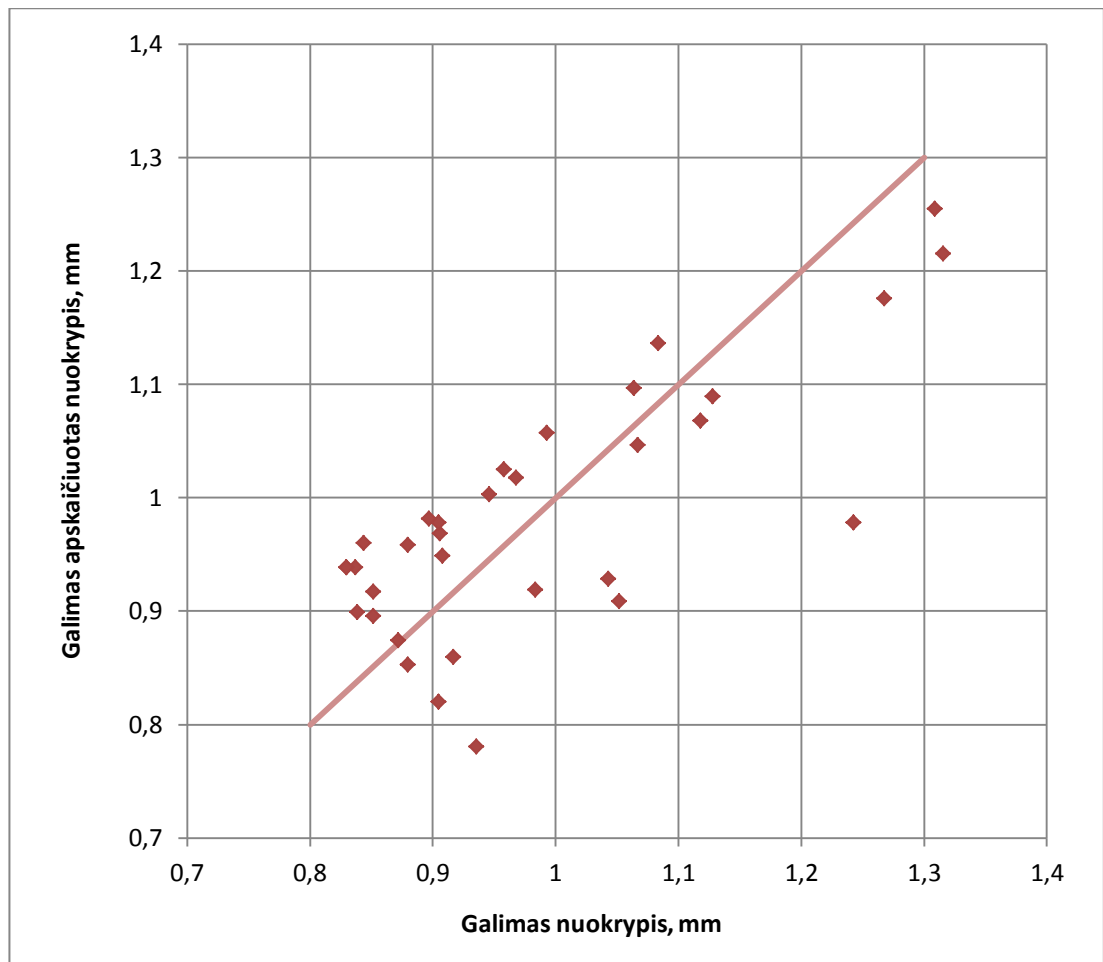
R	0,767202768
R kvadratas	0,588600087
Patikslintas R kvadratas	0,546041475
Standartinė nuokrypa	0,096282334
Bandymai	33

4.5 lentelė. ANOVA sklaidos analizė

	<i>Laisvės laipsnis</i>	<i>Kvadratų suma SS</i>	Kvadratų vidurkis MS	<i>F – kriterijus</i>	Įtaka <i>F</i>
Kintamieji	3	0,384633712	0,128211237	13,8303404	$8,81762 \cdot 10^{-6}$
Sąveika	29	0,268838349	0,009270288		
Viso	32	0,653472061			

4.6 lentelė. Regresinės analizės koeficientų analizė

	Koeficientai	Standartinis nuokrypis	T stat	Įtaka (p - reikšmė)	Apatinė riba 95%	Viršutinė riba 95%
Riba	0,64892992	0,10130935	6,40542992	$5,27059 \cdot 10^{-7}$	0,44172904	0,85613080
Kintamasis $X_1(F_h)$	0,00197663	0,00033063	5,97830828	$1,69049 \cdot 10^{-6}$	0,00130040	0,00265285
Kintamasis $X_2(r_r)$	-0,00495824	0,0073048	-0,67876490	0,50266815	-0,01989822	0,00998175
Kintamasis $X_3(\mu)$	1,07616545	0,38165431	2,81973876	0,008576731	0,295594743	1,856736159



4.2 pav. Regresinės analizės rezultatai minimaliam storiui

Kadangi apskaičiuota F reikšmė yra $F_{apsk.} = 13,83$ daugiau nei pasirinkta $F_{0,05} = 2,92$, tai galima teigti, kad sudarytas modelis yra reikšmingas ir jo pagrindu galima nustatyti kitas galimų nuokrypių reikšmes.

IŠVADOS

1. Apžvelgtas šaltojo formavimo procesas, jo metu atsirandantys detalių defektai, aptarta šampų konstrukcijos. Aptarti svarbiausi formavimo proceso parametrai: matricos spindulys, ruošinio prispaudimo jėga ir trinties koeficientas.
2. Baigtinių elementų pagrindu sukurtas skaičiuojamasis modelis. Pasirinktas elasto-plastinis kevalo tipo elementas.
3. Atlikus parametrų tyrimus buvo nustatytos tokios priklausomybės: didinant ruošinio prispaudimo jėgą detalės minimalus storis mažėja. Ruošinį prispaudus 250 kN jėga, detalė suplonėja iki 0,74 mm storio; mažinant formavimo matricos spindulį minimalus storis mažėja. Esant 2 mm matricos spinduliui, detalė suplonėja iki 0,786 mm storio. Esant matricos spindulio kritinei reikšmei 18 mm, pastebėta, jog detalė stipriai susiraukšlėja iki 0,898 mm. Pastebėta, jog šio bandymo metu ruošinys nėra tinkamai prispaudžiamas.
4. Lyginant bandymų metu gautus duomenis parinkti tinkamiausi parametrai, norint gauti kokybiškiausią detalę: matricos spindulys – 10 mm, ruošinio prispaudimo jėga – 90 kN ir trinties koeficientas 0,17. Projektuojant šampą rekomenduojama naudoti minėtas parametrų reikšmes.
5. Atlikta tyrimų rezultatų sklaidos analizė. Galima teigti, jog sudaryti regresijos modeliai yra reikšmingi ir jų pagrindu galima nustatinėti kitas minimalaus storio ir galimų nuokrypių ribas.

LITERATŪRA

- [1] T. Altan, E. Tekkaya, Sheet metal forming - Fundamentals, Ohio: ASM International, 2012, p. 267.
- [2] R. Šniuolis, Medžiagų inžinerija, Vilnius: BMK leidykla, 2014.
- [3] A. Bargelis, K. Juzėnas, R. Mankutė, M. Rimašauskas, Gamybos procesų modeliavimas, 2012.
- [4] J. Hu, Z. Marciniak, J. Duncan, Mechanics of sheet metal forming, Woburn: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [5] E. Narvydas ir G. Naujokas, „Springback of DC01, DD13 and S355MC steel plates after V shape bending,“ įtraukta *Proceedings of 13th International Conference. Mechanika*, Kaunas, 2008.
- [6] R. Bortkevičius, „Defektų, atsirandančių šampuotose lakštinėse detalėse, įtempių ir deformacijų būvio tyrimas,“ *Technologija*, Kaunas, 2012.
- [7] R. Padmanabhan, M. C. Oliveira, J. L. Alves, L. F. Menezes, „Influence of process parameters on the deep drawing of stainless steel,“ *In Finite Elements in Analysis and Design*, pp. 1062-1067, 2007.
- [8] A. C. S. Reddy, S. Rajesham, P. R. Reddy, T. P. Kumar, J. Goverdhan, „An experimental study on effect of process parameters in deep drawing,“ *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 7, No. 1, pp. 21-32, 2015.
- [9] T. Santhosh Kumar, V. Srija, A. Ravi Teja, A. Chennakesava Reddy, „Influence of Process Parameters of Single Point incremental Deep Drawing Process for Truncated Pyramidal Cups from 304 Stainless Steel using FEA,“ *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 7, Issue 6, pp. 100-105, 05 2016.
- [10] R. Ankėnas, R. Barauskas, „Finite element investigation on parameters influencing the springback during sheet metal forming,“ *Mechanika*, pp. 57-61, 2066.
- [11] U. Fischer, R. Gomeringer, M. Heinzler, R. Kilgus, F. Naehrer, S. Oesterle, H. Paetzold, A. Stephan, *Mechanikos inžinieriaus žinynas*, Kaunas: LINPRA, 2014.
- [12] „Material Matters: Sheet metal plasticity visualized (part 2 of 2),“ [Tinkle]. Available: <https://www.autoform.com/blog/sheet-metal-plasticity-visualized-part-2-of-2/>. [Kreiptasi 14 12 2017].

- [13] „Darbu vadovas,“ [Tinkle]. Available: <http://www.darbuvadovas.lt/images/Konstrukcijos/Medziagu%20mechanika.%20Knyga.%20www.remontogidas.lt.pdf>. [Kreiptasi 14 12 2017].
- [14] Paul Håkansson, Mathias Wallin, Matti Ristinmaa, „Comparison of isotropic hardening and kinematic hardening in thermoplasticity,“ *International Journal of Plasticity, Volume 21, Issue 7*, pp. 1435-1460, 7 2005.
- [15] R. Vasile, S. G. Racz, O. Bologa, „Numerical and experimental analysis of the formability of 1.4301 austenitic stainless steel sheets using hydroforming,“ *Proceedings in Manufacturing Systems, Volume 11, Issue 2*, pp. 89-94, 2016.
- [16] H. Medekšas, *Gaminių kokybė ir patikimumas*, Kaunas: Technologija, 2003, p. 264.
- [17] Marija Eidukevičiūtė, Rasa Kandrotaitė-Janutienė, Ramūnas Česnavičius, Rūta Rimašauskienė, *Guidelines for preparing master's final degree project*, Kaunas: Technologija, 2016, p. 49.