

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

**Jānis KANDIS**

**JAUNA METODE EKSTRŪDĒTO ŠUVJU KVALITĀTES  
PĀRBAUDEI**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Nozare: Mašīnzinātne

Apakšnozare: Mašīnbūves tehnoloģija

**Rīga 2013**



**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Transporta un Mašīnzinību fakultāte  
Mašīnbūves tehnoloģijas institūts

**Jānis KANDIS**

Doktora studiju programmas “Aparātu inženierija” doktorants

**JAUNA METODE EKSTRŪDĒTO ŠUJVU KVALITĀTES  
PĀRBAUDEI**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Nozare: Mašīnzinātne

Apakšnozare: Mašīnbūves tehnoloģija

Zinātniskais vadītājs

Dr. sc. ing., docente

N.MOZGA

**Rīga 2013**

UDK 621.9.08

Kandis J. Jauna metode ekstrūdēto  
šuvju kvalitātes pārbaudei.  
Promocijas darba kopsavilkums.-  
R.:RTU, 2012.-37 lpp.

Iespiests saskaņā ar MTI Padomes 2012. gada  
30. augusta lēmumu, protokols Nr. 5.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».

**PROMOCIJAS DARBS**  
**IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI**  
**RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2013. gada....., plkst. .... Rīgas Tehniskās universitātes Transporta un mašīnzinību fakultātē, Ezermalas ielā 6, .....auditorijā.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

Prof. Juris Krisbergs  
Rīgas Tehniskā Universitāte, Latvija

Prof. Zbigniew Zimniak  
Wrocław University of Technology, Polija

Prof. Dijs Sergejevs  
Rīgas Tehniskā Universitāte, Latvija

**APSTIPRINĀJUMS**

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Jānis Kandis .....(Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur 4 nodaļas, secinājumus, izmantoto informācijas avotu sarakstu, 53 attēlus, kopā 108 lapaspuses. Literatūras sarakstā ir 66 informācijas avoti. Pievienoti 3 pielikumi.

## Saturs

Promocijas darba vispārējs raksturojums .....	8
Tēmas aktualitāte .....	8
Darba mērķis un uzdevumi .....	8
Pētījuma metodes .....	8
Zinātniskā novitāte .....	9
Galvenie pētījumu rezultāti .....	9
Praktiskais pielietojums .....	9
Autors šajā darbā aizstāv .....	9
Darba aprobācija .....	9
Publikācijas .....	10
Darba struktūra un apjoms .....	10
1.nodaļa. Problēmas pamatnostādne .....	11
1.1.Ekstrūzija .....	11
1.2.Ekstrūzijas procesā metināto šuvju pārbaudes metodes .....	12
1.3.Problēmas nostādne .....	13
1.4.Nodaļas secinājumi .....	13
2.nodaļa. Alumīnija bīdes pētījumi .....	15
2.1. Bīdes process .....	15
2.2. Eksperimenti .....	15
2.3. Galīgo elementu analīze .....	16
2.4. Galīgo elementu analīzes rezultāti .....	17
2.5. Eksperimentu un galīgo elementu analīzes rezultāts .....	18
2.6. Nodaļas secinājumi .....	19
3.nodaļa. Ekstrūzijas formas ģeometrijas ietekme uz šuvju kvalitāti .....	21
3.1.Gāzes kameras veidošanās un spiediens metināšanas kamerā .....	21
3.2.Citi ekstrūzijas šuvju kvalitātes ietekmējošie faktori .....	23
3.3.Galīgo elementu modelis .....	25
3.4.Sagataves materiālu plūsma ekstrūzijas formas metināšanas kamerā .....	25
3.5.Ekstrūzijas formas ģeometrijas ietekme uz ekstrūzijas metinājuma šuvju kvalitāti .....	26
3.6.Ekstrūzijas formas ģeometrijas limita robežu diagramma .....	28
3.7. Ekstrūzijas formas ģeometrijas limita robežu diagrammas praktiskais pielietojums .....	29
3.8.Nodaļas secinājumi .....	30

4.nodaļa. Jauna ekstrūzijas šuvju testēšanas metode.....	31
4.1.Metodes koncepts .....	31
4.2.Rezultātu apkopošana .....	32
4.3.Rezultātu analīze.....	32
4.5.Metodes mehānika .....	34
4.6.Nodaļas secinājumi .....	35
Secinājumi un pielietojums .....	36
Kopsavilkumā izmantotās literatūras un avotu saraksts.....	37

# PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

## Tēmas aktualitāte

Mūsdienās metālapstrādes uzņēmumiem, lai paliktu konkurētspējīgi ražošanas jomā, ir jāpiedāvā preces par viszemāko cenu, saglabājot nevainojamu kvalitāti. Zemu cenu līmeni un augstu kvalitātes standartu ir iespējams panākt tikai samazinot darba izmaksas, padarot ražošanas tehnoloģijas efektīvākas un piesaistot jaunas kvalitātes pārbaudes tehnoloģijas.

Par vienu no tagadnes un nākotnes progresīvākajiem metāliem ir kļuvis alumīnijs. Tas ir viegls, izturīgs, nepakļaujas korozijai, viegli apstrādājams un formējams un videi draudzīgs, kā arī tas ir pārstrādājams. Tā kā alumīniju plaši pielieto tādās jomās kā autobūve, ēku būve, gaisa transporta būvniecība, tad par svarīgu prasību ir kļuvusi alumīnija formēšanas defektu identificēšana un novēršana. Šādas kvalitātes pārbaudes nosaka profila tālāko ekspluatācijas gaitu un drošumu.

Šobrīd esošās alumīnija ekstrūzijas metinājumu testēšanas tehnoloģijas defektu identificēšanai ir dārgas, laiktīlpīgas un galvenais – neprecīzas [14, 15], kā rezultātā kompānijas visā pasaulē zaudē laiku un līdzekļus. Līdz ar to ir nepieciešams izstrādāt precīzāku metodi, kas aizvietotu līdzšinējās un dotu precīzāku informāciju par ekstrudēto profilu metinājumu kvalitāti.

Pētījumu aktualitāti nosaka nepieciešamība izstrādāt kvalitātes pārbaudes metodi ekstrudēto metinājumu kvalitātes pārbaudei, kas tieši koncentrēta uz metinājuma šuves pārbaudi, nevis kopēju profila pārbaudi, līdz ar to tēma ir aktuāla.

## Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt precīzu un praktiski pielietojamu metodi ekstrudēto alumīnija metinājuma šuvju pārbaudei un defektu identificēšanai.

Dotā mērķa sasniegšanai ir izvirzīti sekojoši uzdevumi:

1. Esošo ekstrūzijas metinājumu šuvju kvalitātes pārbaudes metožu analīze un situācijas izpēte;
2. Izmantojot mehānisko presi, spēka un gājiena mērīšanas indikatorus, veikt alumīnija parauga bīdes izpēti;
3. Veikt ekstrūzijas metināšanas šuvju defektu veidošanās analīzi atkarībā no formas ģeometriskajiem lielumiem.

## Pētījuma metodes

Lai sasniegtu izvirzītos mērķus un realizētu dotos uzdevumus, promocijas darba izstrādes procesā pielietotas šādas pētījumu metodes: salīdzinošās, analītiskās un grafiskās metodes. Lai realizētu eksperimentālo daļu, tika izmantotas mehāniskās preses ar jaudām 60 un 2 tonnas un ekstrūzijas prese ar jaudu līdz 180 tonnām. Eksperimentu datu nolasīšanai izmantots spēka un ātruma nolasīšanas indikators. Datu apkopošanai un vizualizācijai izmantota programma BLACK CAT®. FEM (Finite element method – galīgo elementu metode) un FE-analīzei (finite element analysis – galīgo elementu analīze) izmantotas grafiskās programmas DEFORM® 2D un DEFORM® 3D. Pētījumu rezultātu uzskatāmības nodrošināšanai izmantotas diagrammas un attēli.

## Zinātniskā novitāte

Promocijas darba zinātniskā novitāte ir šāda:

1. Izstrādāta *jauna metode ekstrudēto šuvju kvalitātes pārbaudei*, kas identificē defektus ekstrūzijas procesā metinātām šuvēm;
2. Izstrādāta *ekstrūzijas formas ģeometrijas robežu diagramma* ekstrūzijas formu metināšanas kameras ģeometrijas minimālo parametru noteikšanai.

## Galvenie pētījumu rezultāti

Promocijas darba galvenie pētījuma rezultāti ir šādi:

Konstatēts, ka:

1. Esošās ekstrūzijas metināšanas šuves kvalitātes pārbaudes metodes neidentificē metināto šuvju defektus;
2. Pēc 1/5 testā izmantotā alumīnija parauga bīdes, paraugam veidojas lūzums. Pēc 3/5 testā izmantotā alumīnija parauga bīdes novērojams „plato” efekts;
3. Ekstrūzijas metinājuma šuvju kvalitāte ir atkarīga no ekstrūzijas formas ģeometrijas;

Izstrādāta jauna metode ekstrūzijas procesā metināto šuvju kvalitātes pārbaudei.

Visi augstākminētie rezultāti ir jauns ieguldījums mašīnzinātnē.

## Praktiskais pielietojums

Pētījumi, kuri veikti dotajā promocijas darbā „*Jauna metode ekstrudēto šuvju kvalitātes pārbaudei*” salīdzinājumā jau ar esošām pārbaudes metodēm, ļauj pārbaudi koncentrēt uz ekstrūzijas procesā metinātām šuvēm un dod rekomendācijas ekstrūzijas tehnoloģijas pilnveidei. Izstrādātā metode ir universāla.

Izstrādātā metode ļauj paaugstināt pārbaudes produktivitāti un tā no 2012. gada ir ieviesta ražošanā (pielikums Nr. 1).

Izstrādātā diagramma *ekstrūzijas formas ģeometrijas robežu noteikšanai* dod rekomendācijas ekstrūzijas formu ražotājiem - ievērot ekstrūzijas formu ģeometriskos parametrus.

## Autors šajā darbā aizstāv

1. Ekstrūzijas procesā metināto šuvju kvalitātes pārbaudes metodi;
2. „*Jaunas metodes ekstrudēto šuvju kvalitātes pārbaudei*” praktisko pielietojumu;
3. Diagrammas “Ekstrūzijas formu ģeometrijas robežu noteikšanai” praktisko pielietojumu.

## Darba aprobācija

Par galvenajiem promocijas darba rezultātiem ziņots sekojošās konferencēs un semināros ar augstu reputācijas līmeni, saņemot atzinīgus novērtējumus no citu universitāšu mācībspēkiem

un industrijas pārstāvjiem:

#### Ārvalstīs:

1. J. Kandis, H.Valberg and Wu Wenbin; "Use of Axisymmetric Shearing as Technological Test Method to Gather Flow Stress Data for Metals", AMPT Paris, Oct., 2010;
2. J. Kandis, Wu Wenbin and H. Valberg; "The Mechanics of the Shearing Process Studied by FEM-Analysis with Experiments", AMPT Paris, Oct., 2010;
3. J. Kandis, H. Valberg and Wu Wenbin; "On the Mechanics of the Shearing Process in Bar Shearing", ESAFORM Belfast, April, 2011;
4. J. Kandis, H. Valberg and Wu Wenbin; "On the Deformation Mechanism in Shearing with Concurrent Crack Growth Over the Cut Section", ESAFORM Belfast, April, 2011;
5. J. Kandis, H. Valberg; „Metal Flow in Two-hole Extrusion of Al-alloys Studied by FEA with Experiments”, ESAFORM Germany, March, 2012;
6. Henry Valberg, Tony Melkild and Janis Kandis: "Determining the Weld Quality in Extrusion Welding", Italy, 2011;
7. Patenta pieteikums.

#### **Publikācijas**

Par veiktajiem pētījumiem un rezultātiem ir publicēti seši zinātniskie raksti un iesniegts viens pieteikums metodes patentēšanai:

1. J. Kandis, H.Valberg and W. Wu; „Use of Axisymmetric Shearing as Technological Test Method to gather Flow Stress Data for Metals”, Advances in Materials and Processing Technologies, Paris, France, Oct., 2010, pp.352.- 356.;
2. J.Kandis, W. Wu and H. Valberg; "The Mechanics of the Shearing Process studied by FEM-Analysis with Experiments", Advances in Materials and Processing Technologies, Paris, France, Oct., 2010, pp.108.- 112.;
3. J.Kandis, H. Valberg and W. Wu; „On the Mechanics of the Shearing Process in Bar Shearing”, Submitted to: European Scientific Association for Material Forming, Belfast, United Kingdom, April, 2011, pp.615.- 620.;
4. J.Kandis, H. Valberg and W. Wu; „On the Deformation Mechanism in Shearing with concurrent Crack Growth over the Cut Section”, European Scientific Association for Material Forming, Belfast, United Kingdom, April, 2011, pp.615.– 620.;
5. J. Kandis, H. Valberg, T. Melkild; „Determining the Weld Quality in Extrusion Welding” // International Conference on Extrusion and Benchmark, Bologna, Italy, 2011.pp.461.– 466.;
6. J. Kandis, H. Valberg; „Metal flow in two-hole extrusion of Al-alloys studied by FEA with experiments”, European Scientific Association for Material Forming, Erlangen, April, Germany 2012.pp.493.- 498.

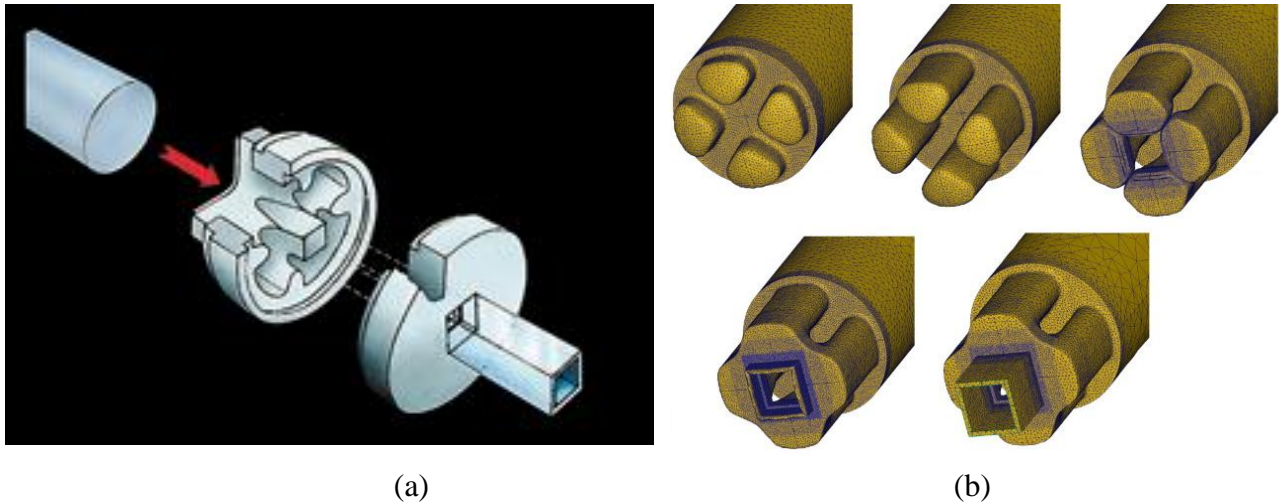
#### **Darba struktūra un apjoms**

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur 4 nodaļas, secinājumus, izmantoto informācijas avotu sarakstu, 53 attēlus, kopā 108. Literatūras sarakstā ir 66 informācijas avoti. Pievienoti 3 pielikumi.

# 1. nodaļa. PROBLĒMAS PAMATNOSTĀDNE

## 1.1. Ekstrūzija

Ekstrūzija (no latīņu valodas - extrusio — izstumšana) ir materiāla veidošana, izspiežot to caur ekstrūzijas formu, lai iegūtu noteikta profila konstrukcijas. Kā redzams 1.1 attēlā, izejmateriālam vienmēr ir stieņa forma – šajā darbā cilindrisks alumīnija bloks, kas tiek karsēts indukcijas krāsnī līdz 450–500°C temperatūrai (atkarībā no alumīnija sērijas numura). Sakarsētais stienis tiek ar lielu spēku (atkarīgs no temperatūras un sagataves lieluma) izspiests caur ekstrūzijas formu, kas piešķir profilam formu.



1.1.att. Ekstrūzijas formas skice (a) un sagataves materiāla plūsma ekstrūzijas formā (b).

Profilu garums parasti ir no 25 līdz 45 metriem – atkarībā no formas un vajadzībām. Tiklīdz profils ir atstājis ekstrūzijas formu, tas tiek atdzesēts ar gaisu vai ūdeni. Lai novērstu spriegumu veidošanos un iegūtu pilnīgi taisnu izstrādājumu, profils tiek izstiepts (līdz tas iegūst taisnu formu) pirms visu svarīgo izmēru nolaišanās un vizuālas virsmas kvalitātes pārbaudes.

Ja ekstrūzijas metināšanas procesam sākotnējie parametri nav pareizi iestatīti, piemēram, netiek ievērota stabila, nemainīga temperatūra, ekstrūzijas formas ģeometrija ir nepareiza, ekstrūzijas forma netiek kvalitatīvi iztīrīta no iepriekšējās ekstrūzijas laikā radušajiem saķepumiem, ekstrūzijas forma ir bojāta, nepietiekams daudzums eļļojošās vielas u.c., tad atsevišķām ekstrūzijas profila daļām vai visam profilam var būt nepietiekama metinājuma šuvju kvalitāte.

Lai izpētītu ekstrūzijas metināšanas laikā notiekošos procesus, gadu gaitā ir ticis veikts ievērojams skaits pētījumu. 2002. gadā tika publicēts darbs [15], kura ietvaros tika apkopotas svarīgākās zināšanas par ekstrūzijas metināšanu visa 20. gadsimta garumā. Agrīnie pētījumi [15] galvenokārt tika veikti eksperimentu ceļā; neskatoties uz to, tie veicināja labu izpratni par ekstrūzijas metināšanas pamata procesiem, uzmanību pievēršot arī ekstrūzijas metinājumam, kad ekstrūzijas formās notiek materiāla plūsmu dalīšana ar tiltiņa palīdzību. Šuvju testēšanas un pārbaudes tehnikas ir novecojušas, ļoti dārgas, laiktīlpīgas un neprecīzas [15, 17].

21. gadsimta gaitā ar spēcīgiem un ātriem datoriem, kā arī, izmantojot jaudīgas FEA programmas, bija iespēja metāla plūsmu pētīt FEM simulācijā [2]. Šobrīd FEA galveno uzmanību

ekstrūzijas metināšanas izpētes ietvaros pievērš eksperimentējot un pētot mainīgos nosacījumus (ekstrūzijas caurspiešanas ātrums, ekstrūzijas procesā izmantotā temperatūra, formas ģeometrija), ekstrūzijas metināšanas kamerā notiekot metāla plūsmas dalīšanai ar tiltiņa palīdzību [16].

Ekstrūzijas metināšanas procesā svarīgi ir piemērot pareizus metāla plūsmu nosacījumus ekstrūzijas formā, lai iegūtu nepieciešamo metāla plūsmas spiedienu metināšanas kamerā, kas nodrošinātu šuvju pietiekamu metinājuma kvalitāti. Svarīgākie nosacījumi ir sagataves materiāla pietiekama uzkaršēšana, caurspiešanas ātrums un ekstrūzijas formas ģeometrija. 21. gadsimta gaitā pārsvarā uzmanība tika vērsta uz divu pirmo nosacījumu pētīšanu.

## 1.2. Ekstrūzijas procesā metināto šuvju pārbaudes metodes

Mūsdienās ekstrūzijas metināšanas kvalitātes novērtēšanai visbiežāk izmantotā testēšanas metode ir stiepes tests, ko nosaka Eiropas standarts EN ISO 6892-1:2010. Paraugi testam tiek izgatavoti pēc Eiropas standarta EN ISO 2740:2009. Testējamie paraugi stiepes iekārtas satvērējā mehānismā tiek novietoti taisnā leņķī pret šuvi un tad tie tiek stiepti līdz paraugi deformējas lūstot. Ja plaisa tiek novērota šuves vietā, tad šuves izturība tiek noteikta pēc paraugam pieliktās slodzes un tā deformācijas lielumiem. Stiepes iekārta zīmē diagrammu, ko sauc par stiepes diagrammu.

Pārbaudot vairākus ekstrudētus alumīnija profilus, secinām, ka deformācijas pakāpe (parauga izmēru izmaiņa) ir labāks kvalitātes rādītājs nekā stiepes pārbaude, jo eksperimentu gaitā tika novērots, ka pateicoties sagataves metāla atkārtotai kristalizācijai materiāls dažādos posmos ir ar atšķirīgu cietību. Līdz ar to sagataves materiāls dažādos posmos var būt ar mazāku cietību nekā ekstrūzijas procesā radušās šuves ar defektu cietību. Tādejādi stiepes diagramma nesniedz informāciju par ekstrūzijas metinājuma laikā radušos šuvju kvalitāti. Nekvalitatīvas šuves daudz labāk var tikt identificētas, balstoties uz deformācijas pakāpes mērījumiem. Deformācijas pakāpe tiek noteikta pēc parauga izmēru izmaiņas.

Materiāla deformācija pēc savas būtības var būt elastīga, kas izzūd pēc slodzes noņemšanas un detaļas atgriešanās sākuma stāvoklī. Palielinot spēka iedarbību uz paraugu sākas plastiska deformācija, kas saglabājas pēc slodzes noņemšanas. Šo materiāla deformāciju – izmēra maiņu raksturo deformācijas pakāpe:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100, \quad (1.1.)$$

kur

$\varepsilon$  – deformācijas pakāpe (%);

$\Delta l$  – parauga izmērs pēc pārraušanas (mm);

$l$  – parauga izmērs pirms pārraušanas (mm).

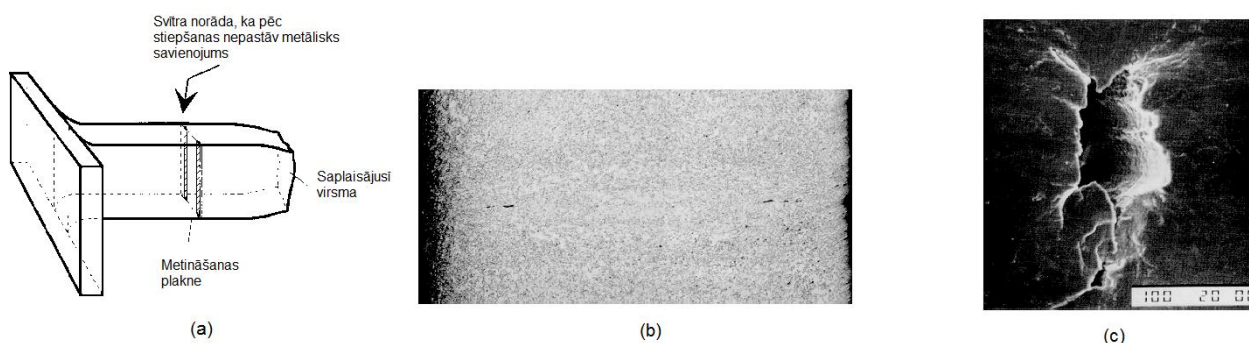
Lai noteiktu ekstrūzijas metināšanas rezultātā iegūtās šuves kvalitāti, bez stiepes testa metodes tiek izmantotas arī citas statistiskās testēšanas metodes, t.i., lieces, vērpes un dažādi mikroplaisu pārbaudes testi (mikroanalīze, materiāla struktūras pētīšana un tml.).

Rūpnieciskajā ražošanā sarežģītiem profiliem ekstrūzijas metināšanas šuvju kvalitāte parasti tiek pārbaudīta ar spiedes vai stiepes testiem. Šajos testos visbiežāk pārbaudes procesa laikā uz ekstrudētā profila galiem tiek spiests ar speciālām iekārtām, vai arī profils tiek stiepts hidrauliski. Ja profilu iespējams pietiekami saspiest vai paplašināt līdz tas deformējas plaisājot, tad tiek uzskatīts, ka profila kvalitāte ir pietiekama un profilam nav ievērojamu defektu. Nozarē nav pārbaudes metodes, ar kuru palīdzību būtu iespējams noteikt ekstrūzijas metināšanas laikā iegūto šuvju kvalitāti. Visas pārbaudes metodes izmantojamas kopējai profila pārbaudei, bet nav

tādu, ar kuru palīdzību varētu veikt tikai metināto šuvju pārbaudi.

### 1.3. Problēmas nostādne

Ja plaša tiek novērota ārpus šuves apgabala, tad tiek uzskatīts, ka šuves kvalitāte (datus nolasot pēc spēka (kN) – deformācijas (mm) līknes) ir labāka par paša metāla kvalitāti. Bet vai tas tiešām tā ir? Diemžēl tas tā nav vienmēr. 1.2. (a) attēlā tiek parādīta stiepes iekārtā pārrauta ekstrūzijas procesā sametināta alumīnija profila skice, kas iegūta no alumīnija profila ar šuvi tam vidū. Kā 1.2 (b) un (c) attēlā redzams, šuves apgabalā sākotnēji tika novērotas mikroplaisas, kas norāda uz nekvalitatīvu šuves metinājumu. Mikroplaisas radušās no nepietiekama spiediena metināšanas kamerā. Ir redzams, ka paraugs pārtrūkst ārpus nekvalitatīvā ekstrūzijas metinājuma apgabala, neskatoties uz to, ka šuvei bija skaidri novērojams defekts. Šis piemērs parāda, ka paraugs ar ekstrūzijas šuvi var uzrādīt labu rezultātu (t.i. paraugs nepārtrūkst šuves zonā) stiepes testā pat tad, ja šuves kvalitāte nav pietiekama.



1.2.att. Stiepes iekārtā deformēts paraugs; (a) stiepes testa rezultātā pārrauts paraugs; b) šuves defekts ekstrūzijas metinājumam un (c) mikroplaisas šuves apgabalā palielinājumā.

Šādu parauga uzvedību var skaidrot ar to, ka nereti materiāls dažādos posmos nav ar vienādu cietību. Ekstrūzijas procesā sagatave un ekstrūzijas forma no ārpuses tiek karsēta līdz pat 500 grādu augstai temperatūrai, kā rezultātā var būt temperatūras atšķirības starp materiāla centra daļu un ārpusi, kas pārkristalizācijas procesā sacietē atšķirīgi. Tā rezultātā 1.2. attēlā redzamajā gadījumā materiāls tālāk no metinājuma vietas ir mīkstāks par pašu šuvi. Veicot stiepes testu, mīkstākais materiāla apgabals sāks deformēties ātrāk par cieto jeb ekstrūzijas metinājuma šuves zonu. Spriegums nepilnīgi sametinātajā parauga daļā nav pietiekams, lai identificētu nekvalitatīvo ekstrūzijas metinājuma šuvi. Turpinoties stiepšanai, deformācija lokalizējas un pieņemas spēkā tikai jau deformētajā daļā, neskatoties uz to, ka materiālam ir ievērojamas nepilnības netālu esošajā ekstrūzijas metināšanas šuves apgabalā. Rezultātā nekvalitatīvais ekstrūzijas metinājums netika identificēts.

Lai novērstu nodaļā aprakstītos trūkumus, tika izstrādāta ekstrūzijas metinājumu šuvju pārbaudes metode, koncentrējot kvalitātes pārbaudi tieši uz ekstrūzijas metinājuma vietām. Jaunā pārbaudes metode tiek balstīta uz deformācijas mērījumiem metinājuma zonā, un parauga kvalitāte tiks noteikta pēc deformācijas pakāpes parametriem.

#### **1.4. Nodaļas secinājumi**

Ņemot vērā, ka pastāv liela varbūtība, ka, veicot alumīnija parauga stiepes testus, pārrāvums radīsies ārpus šuves apgabala un nereti šuves kvalitāte ir labāka par paša metāla kvalitāti, un to, ka materiāls tiek karsēts tikai no ārpuses un procesa laikā daļēji veidojas atkārtots kristalizācijas process, ir nepieciešamība pēc precīzākiem testiem ekstrudēto metinājumu pārbaudei.

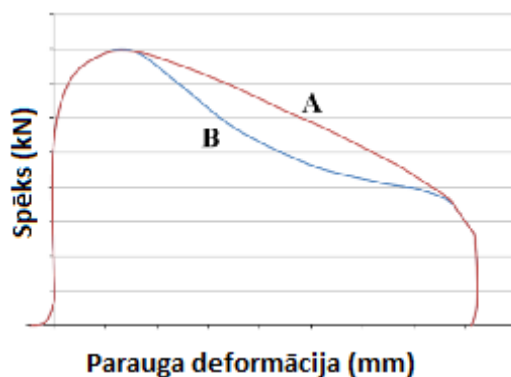
Lai izveidotu vienkāršotu un precīzu - uz ekstrūzijas metinājuma šuvēm koncentrētu testa metodi, sākotnēji ir jāveic pētījumi par materiāla deformācijām un uzvedību tos laužot.

Zinot temperatūras [16, 2] un ātruma [15, 2] ietekmi uz šuves veidošanās kvalitāti darba gaitā veikt pētījumus par ekstrūzijas formas ģeometrijas ietekmi uz šuvju veidošanos.

## 2. nodaļa. ALUMĪNIJA BĪDES PĒTĪJUMI

### 2.1. Bīdes process

Lūzuma vietas struktūras veidošanās ir atkarīga no tā, vai bīdei pakļautais metāls ir mīksts vai ciets. Laužot mīkstus metālus, lūzuma virsma veidosies metāla bīdes rezultātā, bet cietiem materiāliem lūzuma struktūra veidosies materiālam plaisājot. Pirms plaisāšanas metāla iekšējais slānis tiek pakļauts bīdes procesam apgabalā starp augšējo un apakšējo bīdes stūri (vieta, kur aizsākas parauga bīde). Tā kā promociju darba mērķis ir metodes izstrāde ekstrudētā alumīnija profila kvalitātes pārbaudei, pētnieciskais darbs tiek veikts izmantojot mīkstu metālu - alumīniju. Jaunā kvalitātes pārbaudes metode balstās uz metāla bīdi un šajā nodaļā pētījumi veikti, lai izprastu alumīnija materiāla plaisāšanas nosacījumus cirpes zonā un analizēta bīdes veidošanās struktūra.



2.1.att. Parauga deformācijas līknes

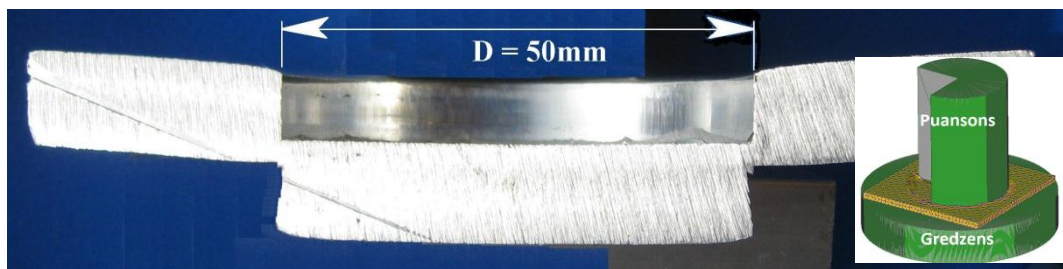
Tehniskajā literatūrā ir atrodams liels skaits pētījumu par bīdes procesiem deformācijas zonā. Eksperimenti, kuru ietvaros bīde ir tikusi pētīta, veicot mērījumus pēc stiepes pārbaudes metodes, ir atrodami [4, 5, 9, 12] informācijas avotā. Šie eksperimenti tika veikti ar stiepes pārbaudes iekārtām vai arī ar mehānisko presi palīdzību.

Kā redzams 2.1. attēlā, pētījumam pakļaujot alumīnija profilu, deformācijas līknēm ir iespējami divi dažādi scenāriji, kas atkarīgi no bīdes procesā izmantotās iekārtas. Visos gadījumos ir novērojams, ka bīdei pieliktais spēks strauji pieaug procesa sākumā, bet vēlāk tas izlīdzinās. Bīdei turpinoties, bīdes procesam nepieciešamais spēks samazinās, veidojot izteiktas pieliktā spēka maksimālās vērtības. Sasniedzot maksimālās vērtības, pazemināšanās daļā grafiks ir taisns ar lejupejošu tendenci vai arī ar izliekumu uz augšu (A) vai uz leju (B). Līknes izliekšanās uz augšu tiek iegūta materiālu pārbaudot pēc stiepes metodes, un bīdes pētījumi tiek veikti izmantojot stiepes testa iekārtas [4, 5], savukārt līknes liekšanās uz leju raksturīga pētījumiem, kad materiāls tiek testēts izmantojot mehānisko presi [5, 9, 12]. Jaunais ekstrūzijas šuves tests tiks veikts, tajā iespējot konusveidīgu puansonu, tādējādi eksperimentiem tiks izmantota mehāniskā prese, un tiek prognozēts, ka deformācija grafiski attēlosies kā (B) tipa līkne.

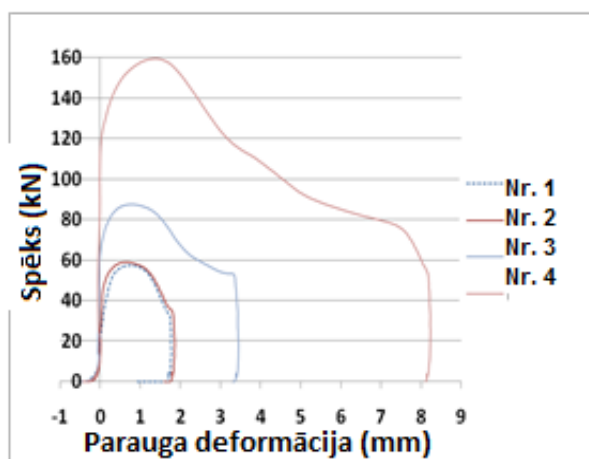
### 2.2. Eksperimenti

Ar mehāniskās presi palīdzību tika veikti eksperimenti, kuru ietvaros četri paraugi trīs dažādos biezumos tika pakļauti daļējai bīdei, neatstājot atstarpi starp puansonu un gredzenu ("0"

spēle). Sākotnējais materiāla biezums bija 3,5 mm (1. un 2. paraugs), 5,6 mm (3. paraugs) un 10,4 mm (4. paraugs). Bīde tika apstādināta puansonu iespiežot paraugā 1,9, 3,5 un 8,3 mm. Gan puansonam, gan gredzenam bija asas malas.



2.2.att. Bīdes procesā daļēji deformētā parauga šķērs griezum



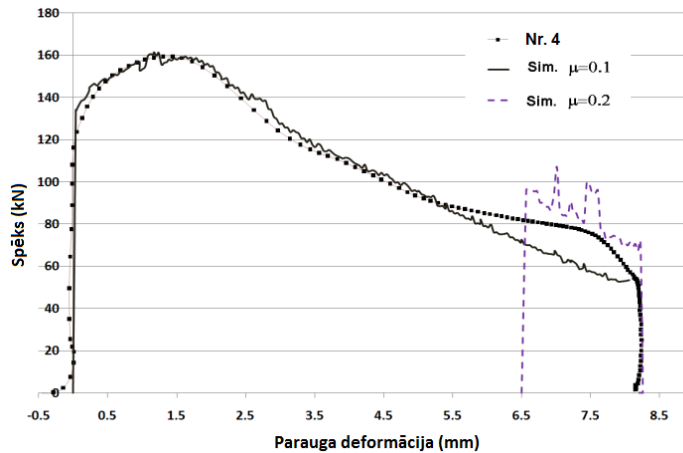
2.3.att. Paraugu deformācijas līknes

2.2. attēlā ir redzams bīdes procesā daļēji sagrieztā parauga šķērs griezum. Eksperimentā tika mērīts puansonam pieliktais bīdes spēks. Iegūtie dati ir parādīti 2.3. attēlā. Kā redzams grafikos, uz leju ejošā līknes daļa pēc maksimālās vērtības sasniegšanas izliecas uz leju, t.i., tiek iegūta “B” tipa parauga deformācijas līkne (skatīt 2.1. attēlu). Tā kā mehāniskajā presē tika veikta tikai daļēja bīde, tad ātrums mainījās visa gājiena laikā, tam esot lielam sākumā un sinusoidāli samazinoties, līdz tas sasniedza nulles vērtību daļējās griešanas darbības beigās. Puansona ātrums gājiena sākumā bija  $20\text{mm s}^{-1}$ .

### 2.3. Galīgo elementu analīze

Izmantojot DEFORM-2D programmatūru, tiek izveidots eksperimentam identisks galīgo elementu modelis (turpmāk tekstā - FEM). Pilns FEM-modeļa apraksts ir atrodams informācijas avotā Nr. [8]. FEM-modelis tika izveidots pēc 4. parauga ģeometrijas un bīdes apstākļiem, kā arī modeļa ietvaros tika izmantots eksperimentā izmantotais bīdes ātrums. Maksimāli precīzai bīdes procesa modelēšanai cirpes zonā tika izmantots smalks FEM režģis, kurš tika koncentrēts parauga slānī starp bīdes stūriem.

Lai iegūtu materiālu plūsmas datus, tika izmantota īpaša simulācijas programmas iespēja, kur simulācijas rezultātā tika iegūti spēka un gājiena dati puansonam, skatīt 2.4. attēlu. Plūsmas datu iegūšanai tika izmantoti alumīnija sakausējuma Al99.7 dati no DEFORM-2D datubāzes.



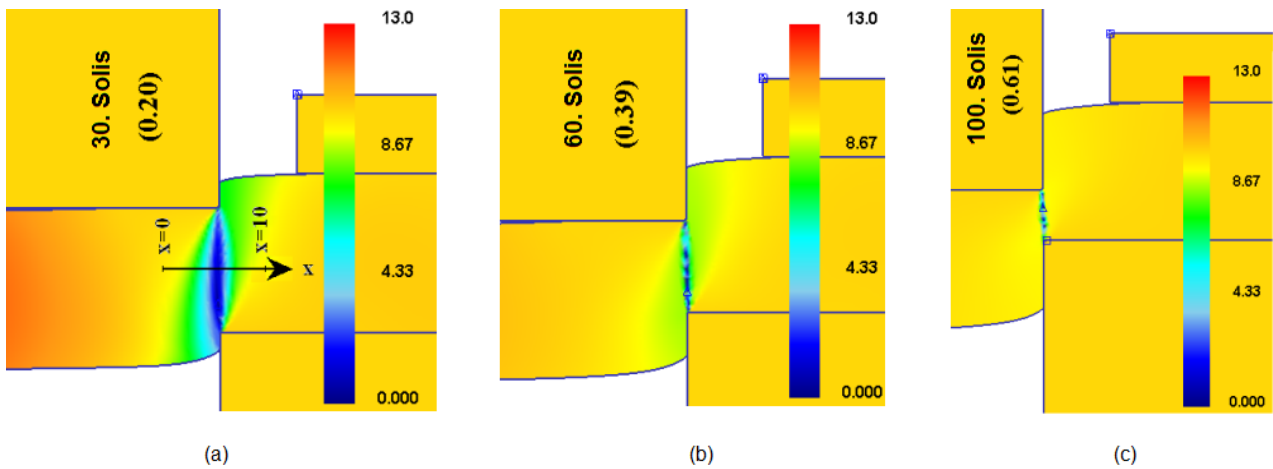
2.4.att. Eksperimentālā un FEM prognozētā deformācijas līknes

## 2.4. Galīgo elementu analīzes rezultāti

2.4. attēlā ir redzams eksperimentā iegūtās deformācijas līknes salīdzinājums ar FEM simulācijā prognozēto parauga deformācijas līkni. Kā rāda grafiks, deformācijas līknes ir gandrīz identiskas, un ar galīgo elementu metodi ir iespējams prognozēt puansona gājienu un bīdes procesam pielikto spēku.

Analīzei tika izmantots modelis, kur gredzena ātrums un lejupejošā puansona ātrums bija  $10 \text{ mms}^{-1}$ . Tas atbilst eksperimenta ātruma līknei, kur puansons virzās ar ātrumu  $20 \text{ mms}^{-1}$ . Šī taktika ir skaidrojama ar programmatūras DEFORM 2D specifiku, tomēr šādas taktikas priekšrocība ir tāda, ka bīdes laikā horizontālā viduslīnija starp abām bīdes malām saglabājas nekustīga, kā rezultātā vidusdaļā datus var iegūt daudz precīzākus, izslēdzot papildus spēka iedarbību - pārbaudāmā parauga abiem galiem spiežot uz puansonu iedarbotos berzes spēks.

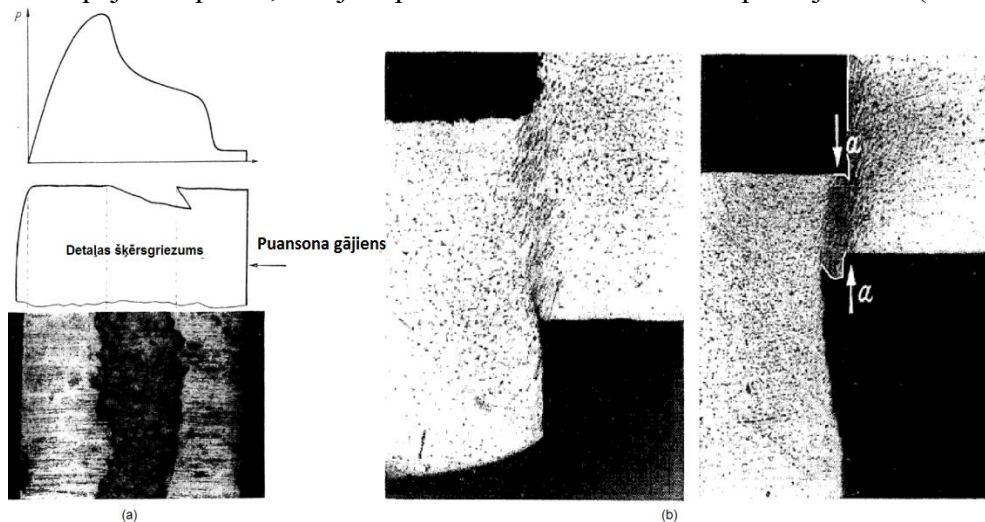
2.5. attēlā redzams, ka bīdes procesa sākumā ātruma ietekmei pakļautais apgabals ir salīdzinoši biezs slānī pa visu bīdes zonu. Bīdei turpinoties, materiāla iekšējo spriegumu apgabals koncentrējas cirpes zonā un materiālu iekšējais spriegums koncentrējas daudz šaurākā slānī nekā iepriekš. Materiālu iekšējo spriegumu koncentrācijas pakāpi iespējams skaitliski izteikt ar ātruma atvasinājuma maksimālo vērtību pret simulācijas soli, sīkāk skatīt 2.5. attēlu. Šis parametrs nosaka bīdes intensitāti slānī (mm/s). 2.5. attēlā parādīts, ka šī parametra vērtība sākumā bija zemāka. Bīdei sasniedzot simulācijas soli 60, kur tika nogriezti ~30% kopējā parauga, minētais parametrs attiecīgi sāka pieaugt (skat. attēlā parametru iekavās). Parametrs turpina pieaugt līdz bīde ir pilnībā pabeigta.



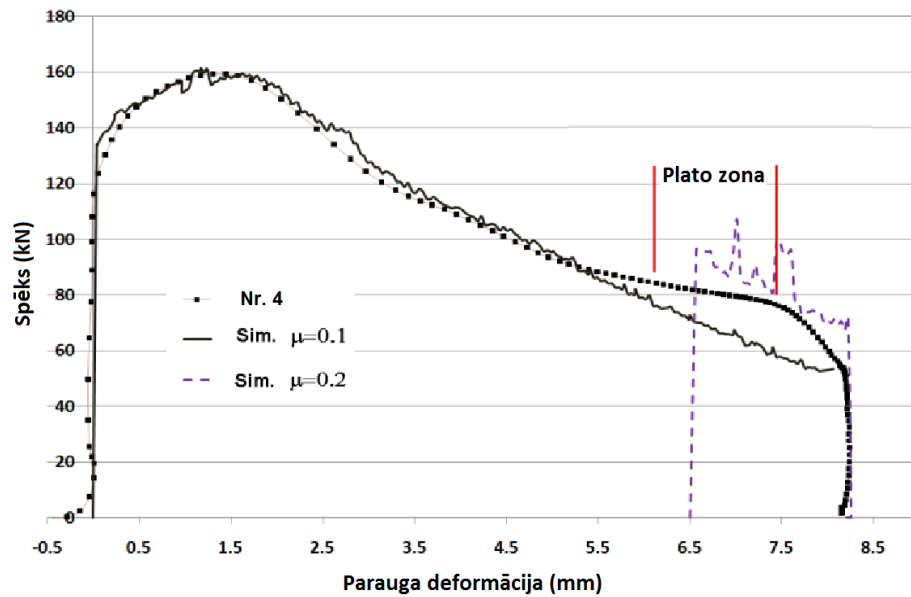
2.5.att. Ātruma izmaiņas bīdes zonā dažādos simulācijas soļos.

## 2.5. Eksperimentu un galīgo elementu analīzes rezultāts

Lai gan par šķietami pēc būtības vienkāršo bīdes procesu ir veikti zinātniskie pētījumi, tomēr deformācijas procesi vēl joprojām nav pilnībā izprasti. Maz pētījumu ir veikti attiecībā uz mīkstajiem metāliem. Pētījumos [6, 13] tika atklāts, ka, pakļaujot bīdei stieņa veida vai plākšņu veida paraugus un izmantojot gredzenu un puansonu ar asiem stūriem, griešanas rezultātā arī mīksts un plastisks materiāls var sākt plaisāt gan no augšpuses, gan apakšpuses. Tādējādi pēc sākotnējās plaisu parādīšanās, turpinoties materiālu griešanai, plaisas attīstās visā materiāla biezumā. Atsevišķos gadījumos plaisas parādīšanos un attīstīšanos visā parauga platumā no augšpuses ir iespējams apturēt, tādējādi plaisāšana sāktos tikai no apakšējā stūra (2.6 att.).



2.6.att. Plaisu izplatīšanās bīdes laikā; (a) stiepes līkne un paraugs šķērs griezumā bīdes procesā; (b) daļēji un gandrīz pilnībā sagriezta parauga šķērs griezumā [6].



2.7.att. Parauga deformācija bīdes procesā

Veicot bīdi, iegūtajai parauga deformācijas diagrammai tās beigu daļā ir redzams „plato” efekts, skatīt 2.7. attēlu. Pirmajos pētījumos [11] tika izveidots bīdes procesa FE-modelis, lai pētītu apstākļus bīdes zonā. Veicot procesa FEM modelēšanu, tika pieņemts, ka alumīnijs ir plastisks materiāls, un ka mīksto metālu laužuma process notiks tikai bīdes veidā, t.i., bez plaisu veidošanās un attīstības. Modelis paredzēja bīdes zonas izveidošanos visas metāla detaļas biezumā taisnā līnijā, sākoties no augšējā stūra virzienā uz apakšējo stūri (cirpes zona). Griešanai turpinoties, tika novērota izteikta bīdes parametru koncentrācija (ātruma un materiālu iekšējo spriegumu) cirpes zonā.

Taču šajā gadījumā visi mēģinājumi iegūt (B) tipa parauga deformācijas līknes “plato” zonu bija nesekmīgi. Tālākajos eksperimentos tika pieņemts, ka pastāv materiāla temperatūras izraisīta mīkstināšanās vai arī ievērojams berzes pieaugums starp puansonu un paraugu. FEM simulāciju prognozētajās līknēs “plato” efekta apgabalu izdevās iegūt tikai izmainot parametru vērtības, kas augstākas par realitātē sastopamajām. Tas norāda uz FEM-simulāciju neprecizitātēm.

## 2.6. Nodaļas secinājumi

Literatūras apskata ietvaros tika prognozēts, ka bīdes zona paliks diezgan bieza visa parauga platumā un lūzums nekonzentrēsies taisnā līnijā. Tomēr pēc pārejas uz otro fāzi (1/5 no materiāla biezuma), apstākļi mainījās un bīdes zona sāka kļūt šaurāka un materiāls sāka deformēties lūstot. Plaisa izveidojās un attīstījās visā pārbaudāmā parauga platumā – bīdei pieliktais spēks ievērojami samazinājās.

Tas pierāda, ka parauga deformācijas un tā bīdei pieliktā spēka līknes forma ir atkarīga no plaisas veidošanās un attīstības. Plaisa, kas attīstās paraugā (materiālā), samazina tā nogriežamo biezumu, kā dēļ samazinās bīdei pieliktais spēks, salīdzinājumā ar to bīdei nepieciešamo spēku, kas būtu nepieciešams, ja plaisa neveidotos. Kad plaisa izveidojas visā parauga platumā (pēc 1/5 no materiāla biezuma), puansons paraugu lēnām izspiež no bīdes zonas. Šajā posmā atlikušais materiāls (pēc 3/5 no materiāla biezuma) koncentrējas bīdes gājiena apakšējā daļā, kā rezultātā

veidojas aizcietējums, un šī iemesla dēļ līknē ir novērojams bīdes procesam pieliktā spēka pieaugums jeb “plato” efekts.

Pakļaujot alumīnija paraugu bīdes procesam novērojams izteikts lūzums. Tas norāda, ka bīdes metode var tikt izmantota ekstrudēto alumīnija profila šuves kvalitātes pārbaudes testiem.

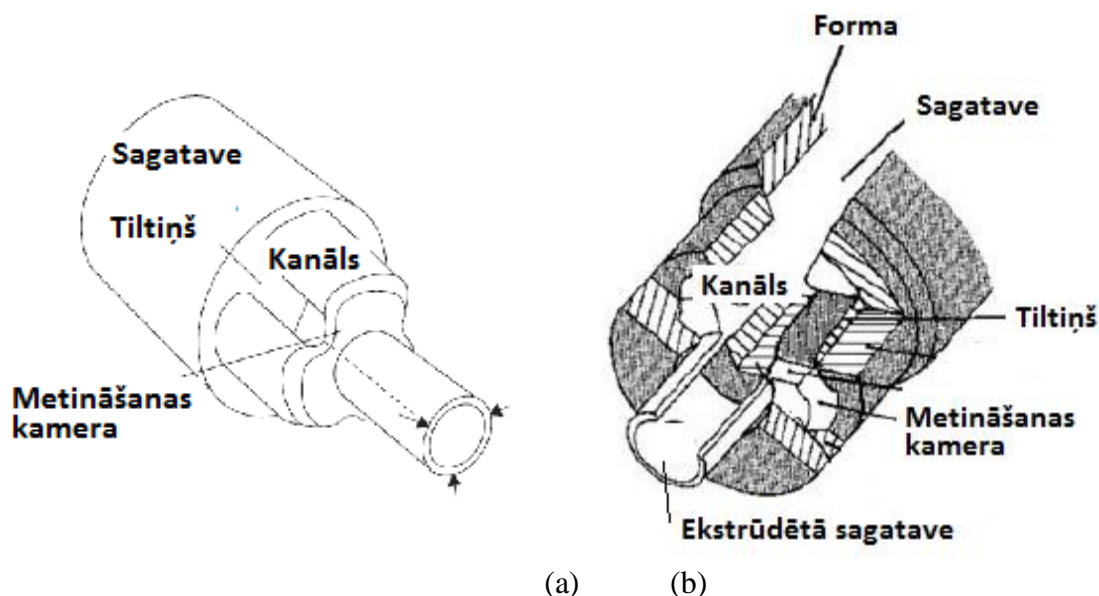
### 3. nodaļa. EKSTRUZIJAS FORMAS ĢEOMETRIJAS IETEKME UZ ŠUVJU KVALITĀTI

#### 3.1. Gāzes kameras veidošanās un spiediens metināšanas kamerā

Lai izprastu un analizētu ekstrūzijas metināšanas šuves veidošanās mehāniku, šajā nodaļā veikti pētījumi par ekstrūzijas metināšanas procesu.

Sarežģītu profilu izgatavošanai tiek izmantotas ekstrūzijas formas, kur ekstrudējama materiāls ar tiltiņu palīdzību tiek sadalīts vairākās plūsmās, kuras tālāk plūst pa kanālu uz metināšanas kameru, kur sagataves materiāla plūsma atkārtoti savienojas un caur ekstrūzijas formas izejas urbumu profilam tiek piešķirta forma. Industriālā ražošanā metinājuma šuvju kvalitāte ekstrudētajiem profiliem tiek testēta bieži (Benteler – ik pēc 20 min.). Nepareizi izvēlēts ekstrūzijas ātrums, temperatūra un ekstrūzijas formas ģeometriskie parametri ietekmē metinājuma šuves veidošanos un profila virsmas kvalitāti [7].

Ekstrūzijas metināšanas shēma ir parādīta 1(b) attēlā un materiāla plūsma caur formu – 1(a) attēlā. Ekstrūzijas procesā sagatave, pateicoties tiltiņam, sākotnēji tiek sadalīta vairākās atsevišķās plūsmās. Plūsmu daudzums ir atkarīgs no ekstrudētā profila sarežģītības. Jo vairāk izliekumu, kontūru un ģeometriski apjomīgāks ir profils, jo vairāk kanālu ir nepieciešams pilnai ekstrūzijas formas noseigšanai. Metināšanas kamerā plūsmas tiek atkal savienotas, kur tās tiek pakļautas spiedienam un kā rezultātā rodas šuves jeb metinājumi. Procesā beigu posmā materiāls tiek izspiests caur ekstrūzijas formu, tādējādi ieņemot nepieciešamo profila formu. Šuvju skaits, kas ir radies ekstrūzijas procesā, ir atkarīgs no sadalošajām daļām jeb tiltiņiem ekstrūzijas formā.



3.1.att. Trīsdimensionāla, vienkāršota ekstrūzijas shēma.

(a) Materiālu plūsma. (b) Ekstrūzijas forma.

Atkarībā no ekstrūzijas formas ģeometriskajiem parametriem ir iespējama, ka, materiālam savienojoties aiz metināšanas kameras, veidosies gāzes kameras, un tās var saglabāties visā ekstrūzijas procesa garumā. Veidojoties gāzes kamerai, metinājumu šuves tiek pakļautas nepietiekamam spiedienam, kā rezultātā metinājuma kvalitāte ir zema. Ja šajā ekstrūzijas procesa posmā aiz ekstrūzijas tiltiņa ieplūst nepieciešamais sagataves materiāla daudzums, tad metināšanas kamera tiek pilnībā aizpildīta un gāzes kamera izzūd.

Lai nodrošinātu nepieciešamo spiedienu metināšanas kamerā, sagataves materiāls tiek iespiests metināšanas kamerā ar puansonam pieliktā spēka palīdzību. 3.2. attēlā parādīts, ka ekstrūzijas procesam pielikto spēku ietekmē četri dažādi spēki un to aprēķina pēc sekojošas formulas:

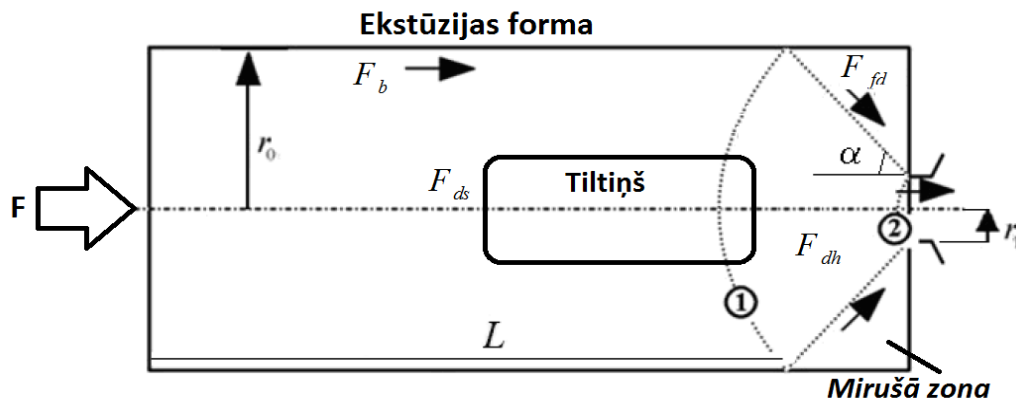
$$F = F_b + F_{dh} + F_{fd} + F_{ds}, \quad (3.1)$$

kur  $F_s$  - berzes spēks, kas veidojas starp sagatavi un ekstrūzijas formu;

$F_{dh}$  - spēks, kas nepieciešams, lai pārvarētu materiāla pretestību pie ekstrūzijas formas izejas;

$F_{fd}$  - berzes spēks, kas rodas starp *mirušo zonu* un sagataves materiālu;

$F_{ds}$  - spēks, kas tiek pielikts sagataves materiālu plūsmas maiņai (primārā deformācijas zona pirms tiltiņa).



3.2.att. Dažādu spēku iedarbība ekstrūzijas procesā

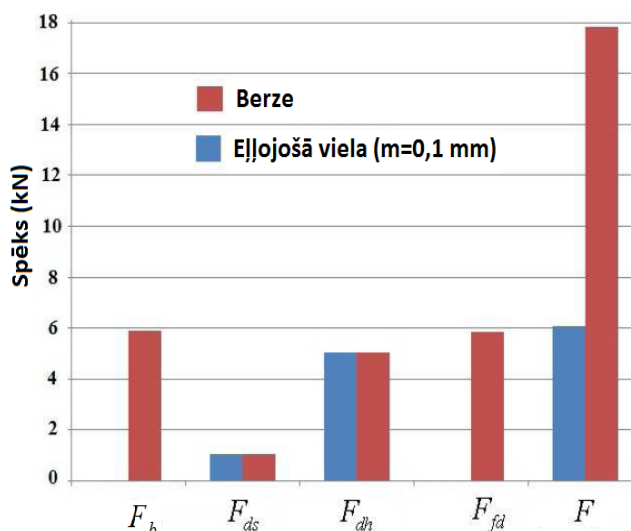
Katram no šiem spēkiem ir dažādi faktori, kas tos ietekmē. Literatūrā atrodami dažādi ekstrūzijas procesam pievienotā spēka aprēķina vienādojumi ar nelielām nepilnībām. Vienu no pilnīgākajiem ekstrūzijas procesam pieliktā spēka aprēķiniem ir izstrādājis H. Valbergs, kur spēka formula aprakstīta sekojoši:

$$F = \underbrace{F_b}_{\tau \cdot 2\pi r_0 L} + \underbrace{F_{dh}}_{\pi r_0^2 \bar{\sigma} \ln \frac{r_0^2}{r_1^2}} + \underbrace{F_{fd}}_{\pi r_0^2 \frac{\tau_1}{\sin \alpha \cos \alpha} \ln \frac{r_0^2}{r_1^2}} + \underbrace{F_{ds}}_{2\tau_2 \pi r_0^2 \left( \frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right)}, \quad (3.2)$$

kur  $\tau_1$  – spriegums, kas veidojas iedarbojoties instrumentam (puansonam),

$\tau_2$  – spriegums, kas veidojas materiāla bīdes rezultātā,  
 $\sigma$  – sagataves materiāla iekšējais spriegums,  
 pārējie formulā izmantotie parametri attēloti 3.2.attēlā.

Lai pierādītu berzes spēka ietekmi uz kopējo iznākumu, tika veiktas divas galīgo elementu simulācijas ar programmatūras DEFORM 2D palīdzību. Vienā no gadījumiem tika izmantota eļļojošā viela starp sagataves materiālu un ekstrūzijas formas sienām ( $m=0,1\text{mm}$ ), otrā - izmantota sausā berze. Rezultāts attēlots 3.3. attēlā. Redzams, ka programma prognozē, ka izmantojot eļļojošās vielas, rezultātā ekstrūzijas procesam nepieciešams 3 reizes mazāks spēks ekstrūzijas procesa nodrošināšanai.



3.3.att. Berzes spēku ietekme uz kopējo ekstrūzijas procesam nepieciešamo spēku summu

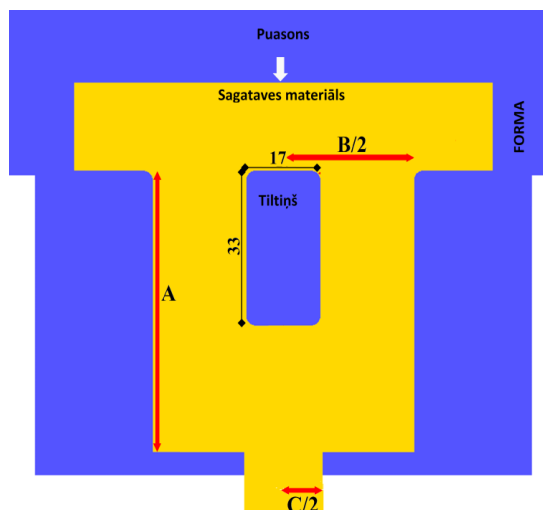
### 3.2. Citi ekstrūzijas šuvju kvalitāti ietekmējošie faktori

Ar galīgo elementu analīzi var veikt ekstrūzijas metināšanas procesa izpēti un analizēt ekstrūzijas metināšanas nosacījumus, kas veicina stabilu gāzes kameras veidošanos aiz tiltiņa un kurā brīdī gāzes kamera tiktu pilnībā aizpildīta ar sagataves materiālu. Šajā nodaļā ir veikta izpēte par ekstrūzijas šuves rašanās posmu, mainot ekstrūzijas formas ģeometriju, un tika iegūta precīza informācija par ekstrūzijas šuves metinājuma nosacījumiem. Darbam galvenokārt tika izmantota FEM-modelēšanas programma Deform 2D®.

Balstoties uz simulācijām un to sniegtajiem rezultātiem, tika izveidota *ekstrūzijas formas ģeometrijas robežu diagramma* (turpmāk tekstā - ESWLD). ESWLD sniedz informāciju par to, kāda ir ekstrūzijas formas ģeometrijas ietekme uz ekstrūzijas metināšanas procesu, un parāda to, vai procesa rezultātā ekstrūzijas formā aiz tiltiņa radīsies gāzes kamera, un norāda, kur un kādā gadījumā tā izzudīs, metināšanas kamerai piepildoties ar sagataves materiālu. Ar regresijas analīzes palīdzību šie rezultāti tika izteikti matemātiskā vienādojumā, kurš parāda gāzes kameras esamību vai neesamību ekstrūzijas procesā. Aprēķins veidots, mainot ekstrūzijas formas ģeometrijas A, B un C (skat. attēlā 3.4). Vienādojums sniedz izejas informāciju ekstrūzijas formas ražotājiem par ekstrūzijas metināšanas galvenajiem ģeometriskajiem parametriem, kuri

nodrošina pilnīgu metināšanas kameras aizpildīšanos ar sagataves materiālu, lai neveidotos gāzes kameras un spiediens metināšanas kamerā būtu pietiekams, lai šuves veidotos bez defektiem.

Veidojot ekstrūzijas metinājumu šuves, ļoti svarīgi ir saglabāt spiedienu starp metāla plūsmām metināšanas kamerā [1]. To var nodrošināt, materiālam pilnībā aizpildot metināšanas kameru. Tāpēc svarīga prasība ekstrūzijas formas izgatavošanā ir ievērot ekstrūzijas formas ģeometriskos parametrus.



3.4.att. Metināšanas kameras ģeometriskie parametri – mainīgie lielumi galīgo elementu simulācijās

Ekstrūzijas metināšanas procesā svarīgi ir piemērot pareizus metāla plūsmu nosacījumus, lai iegūtu nepieciešamo metāla plūsmas spiedienu metināšanas kamerā. Ir nepieciešams pārbaudīt vairākas ģeometrijas kombinācijas. Gadījumā, ja metināšanas kamera ir pārāk šaura, sagataves materiāla plūsmas netiek spiestas viena pret otru vienmērīgi, kā rezultātā netiek iegūta pilna profila ģeometrija. Gadījumā, ja metināšanas kamera ir pārāk plaša, sagataves materiāla plūsma iegūst *mirušo* zonu metināšanas kamerā aiz tiltiņa. Dažkārt šādā situācijā tiek novērota arī gāzes kameras izveidošanās, kas nozīmē to, ka ekstrūzijas metināšanas šuves kvalitāte ekstrudētā profilā būs nepietiekama. Metināšanas kamerai ir jābūt pietiekami plašai, lai nodrošinātu pilnīgu metāla aizpildīšanos un nodrošinātu optimālu spiedienu kvalitatīvu metināšanas šuvju veidošanai [1].

Šuves kvalitāti ietekmējošie faktori ir sagataves materiāla pietiekama uzkaršanās un ekstrūzijas ātrums, kas tālāk ietekmē metāla plūsmas ekstrūzijas formā un šuves metinājuma veidošanos [8]. 20. gadsimtā ekstrūzijas formas ģeometrijai vairāk tika piešķirta loma ekstrūzijas darba ražīguma ietekmēšanai, nevis šuves kvalitātes nodrošināšanai. Mūsdienās aizvien lielāka uzmanība tiek pievērsta ekstrūzijas formas ģeometrijas, ātruma un temperatūras komplikētai izpētei.

Pirmo pētniecisko darbu par ekstrūzijas formas ģeometrijas ietekmi uz ekstrūzijas šuvju kvalitāti veica Akeret [1], kurš veica pētījumus par maksimālo spiedienu sagataves materiālu savienošanās jeb metinājuma procesa laikā, uzskatot to par kritisko nosacījumu kvalitatīvu ekstrūzijas šuvju nodrošināšanai. Donati un Tomesani [3] kā galveno kritēriju ekstrūzijas šuvju kvalitātes nodrošināšanai uzskata ātrumu kā korekcijas faktoru, lai samazinātu ietekmi uz materiāla *mirušo* zonu jeb gāzes kameras veidošanās zonu.

Tomēr, pateicoties galīgo elementu analīzei, ir iespējams [14] samērā vienkārši un ātri izvērtēt materiāla plūsmu metināšanas kamerā. Šajā doktora darbā ir veiktas dažādas simulācijas, lai redzētu kā sagataves materiāla plūsma mainīsies aiz tiltiņa atkarībā no materiālu ģeometrijas.

### 3.3. Galīgo elementu modelis

Lai analizētu ekstrūzijas formas ģeometrijas ietekmi uz metinājuma šuves kvalitāti, pētījuma veikšanai tika izmantota galīgo elementu programma Deform 2D®, lai stimulētu sagataves materiāla spiedienu metināšanas kamerā ekstrūzijas procesā. Sākotnēji programmā tika izveidots simetrisks modelis (puse no reālā – programmas specifika). Tiltiņš tika modelēts kā taisnstūris ar noapaļotiem stūriem – pēc tādas pašas ģeometrijas, kā tas tiek izmantots rūpniecībā. Eksperimentiem tika izvēlēta alumīnija sakausējuma marka AA6082.

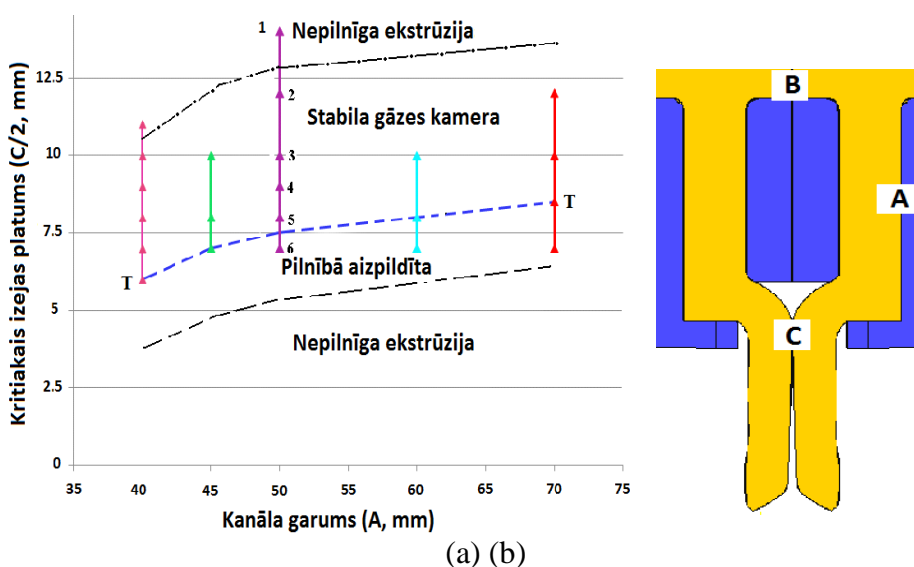
Sagataves temperatūra tika iestatīta 480° C. Tika izvēlēti ekstrūzijas metināšanas apstākļi ar eļļošanu.

### 3.4. Sagataves materiālu plūsma ekstrūzijas formas metināšanas kamerā

Analīze rāda, ka metināšanas kameras ģeometriskie parametri būtiski ietekmē materiāla plūsmu metinājuma vietā metināšanas kamerā. Galīgo elementu analīze prognozē, ka iespējami trīs dažādi rezultāti sagataves materiāla plūsmai atkarībā no metināšanas kameras ģeometriskās formas:

- sagataves materiāls pilnībā aizpilda metināšanas kameru;
- izveidojot lielāku ekstrūzijas formas izejas platumu, iespējama situācija, kad materiāla plūsma nepietiekami aizpilda metināšanas kameru un iespējama īslaicīga gāzes kameras veidošanās;
- izvēloties lielāku ekstrūzijas formas izejas platumu, novērojama stabila – procesa gaitā neizzūdoša gāzes kameras veidošanās metināšanas kamerā.

Galīgo elementu analīze prognozē, ka sagataves materiāla spiediens metināšanas kamerā atšķiras, mainot izejas platumu parametrus.



3.5.att. a) divu parametru ekstrūzijas formas ģeometrijas robežu diagramma (ESWLD) un b) gāzes kameras klātbūtne – nepilnīga ekstrūzija

### 3.5. Ekstrūzijas formas ģeometrijas ietekme uz ekstrūzijas metinājuma šuvju kvalitāti

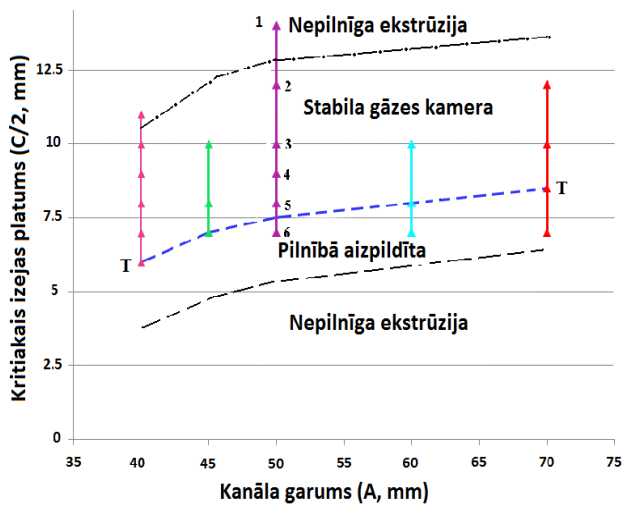
Lai izpētītu kā ekstrūzijas apstākļi ietekmē materiāla plūsmu ap un aiz materiāla sadalošā tiltiņa, tika veiktas 20 galīgo elementu simulācijas, kurās ekstrūzijas metināšanas kameras ģeometriskie parametri sistemātiski tika mainīti. Rezultāts rāda pāreju no sagataves materiāla pilnīgas aizpildīšanās metināšanas kamerā aiz materiāla sadalošā tiltiņa līdz brīdim, kad rodas stabila gāzes kamera.

Pēc iegūtajiem datiem tika izveidota diagramma, kas parāda brīdi, kad notiek pāreja no dažādiem sagataves materiāla plūsmas stāvokļiem metināšanas kamerā. Šī diagramma ir parādīta attēlā 3.5(a). Diagrammā katra taisne apzīmē vairākas ekstrūzijas metināšanas simulācijas ar dažādiem parametriem.

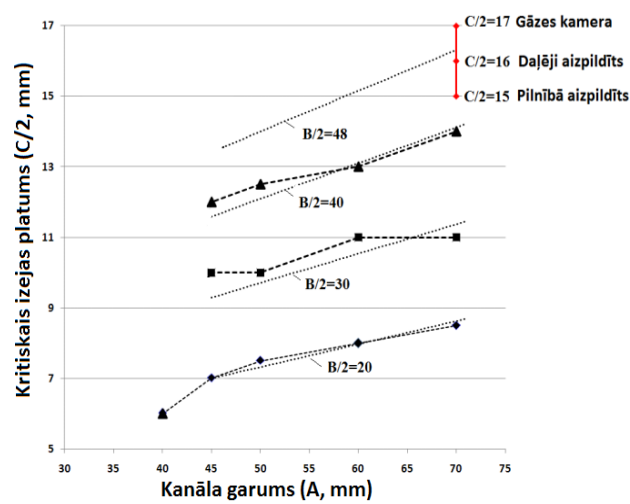
Simulācijā Nr. 1. ģeometriskie parametri tika izvēlēti ar sekojoši: metināšanas kameras platums  $B/2 = 20$  mm, ekstrūzijas formas izejas platums  $C/2 = 14$  mm un ekstrūzijas formas kanāla garums  $A/2 = 14$  mm, un diagrammā (3.5(a) attēlā) tā tiek atzīmēta ar punktu 1. Šādas ekstrūzijas formas ģeometrijas iznākums ir parādīts attēlā 3.5(b). Kā redzams, tiek iegūta nepilnīga ekstrūzija ar pastāvīgu gāzes kameru metināšanas kamerā. Vadoties pēc iegūtajiem datiem, tika veidota jauna simulācija, kur ekstrūzijas formas izejas urbuma diametrs tika veidots nedaudz mazāks, t.i.,  $C/2$  tika noteikts 12 mm. Jaunā simulācija diagrammā ir apzīmēta ar punktu 2. Izmantojot šādus ekstrūzijas formas parametrus, tika iegūts labāks ekstrūzijas metinājuma rezultāts - iegūta pilnīgi pabeigta ekstrūzija. Tomēr joprojām metinājuma kamerā neieplūda pietiekams daudzums sagataves materiāla, lai nodrošinātu gāzes kameras pazušānu. Nākamajās simulācijās Nr. 3, Nr. 4 un Nr. 5 ekstrūzijas formas izejas platums tika pakāpeniski samazināts no 10 uz 9 un 8 mm. Visos trīs gadījumos joprojām tika prognozēta gāzes kameras veidošanās metināšanas kamerā, tomēr tika arī novērots, ka, samazinot ekstrūzijas formas izejas platumu, gāzes kamera kļuva šaurāka.

Veicot simulāciju, kur ekstrūzijas formas urbuma diametrs  $C/2$  tiek samazināts līdz 6 mm, simulācija rāda, ka sagataves materiāls un spiediens metināšanas kamerā bijis pietiekams, lai gāzes kameras veidošanās tiktu pilnībā apturēta.

Iegūtie rezultāti rāda, ka, samazinot ekstrūzijas formas izejas platumu, sagataves materiāls pilnībā aizpilda metināšanas kameru, kas nodrošina spiedienu, lai veidotos kvalitatīvas metinājuma šuves.



(a)



(b)

3.6.att. (a) divu parametru ekstrūzijas formas ģeometrijas robežu diagramma (ESWLD) un (b) trīs parametru ekstrūzijas formas ģeometrijas robežu diagramma

Tika veiktas vairākas papildus simulācijas ar dažādiem kanāla garumiem ( $A$  – vērtībām). Tādējādi tika identificēta pārejas robeža no metināšanas kameras pilnas aizpildīšanās uz gāzes kameras izveidošanos, skat. attēlu 3.6(a). Tika izveidotas grafiskas līknes, kas savieno visus pārejas punktus. Kvalitatīvu metinājuma šuvju nodrošināšanai nav vēlams gāzes kameras klātbūtne metināšanas kamerā, grafikā tika iezīmēta ekstrūzijas formu ģeometrijas robežu līkne – robeža, kuru pārkāpjot gāzes kamera sāktu veidoties. Robeža grafikā iezīmēta ar “T-T” ( $B/2 = 20$  mm).

Kā redzams 3.6(b) attēlā, tādā pašā veidā simulācijas tika veiktas, arī mainot metināšanas kameras platumu  $B/2 = 30$  mm un  $B/2 = 40$  mm.

Aproximācijas rezultātā katra iegūtā līkne tika izteikta ar lineāro vienādojumu:

$$\frac{c}{2} = aA + b \quad (3.3)$$

Rezultātā nemainīgie lielumi  $a$  un  $b$  no vienādojuma tika izteikti vērtībās:

$$b = 0,1486 \frac{B}{2} + 1,0989 \quad \text{un} \quad a = 0,0018 \frac{B}{2} + 0,029 \quad (3.4)$$

Šādā veidā tika iegūts vienādojums ekstrūzijas formas izejas platuma ģeometrijas kritiskajam lielumam, t.i., parametram  $C/2$ , lai tiktu iegūts pilnīgs metināšanas kameras aizpildījums un šuves veidotos bez defektiem:

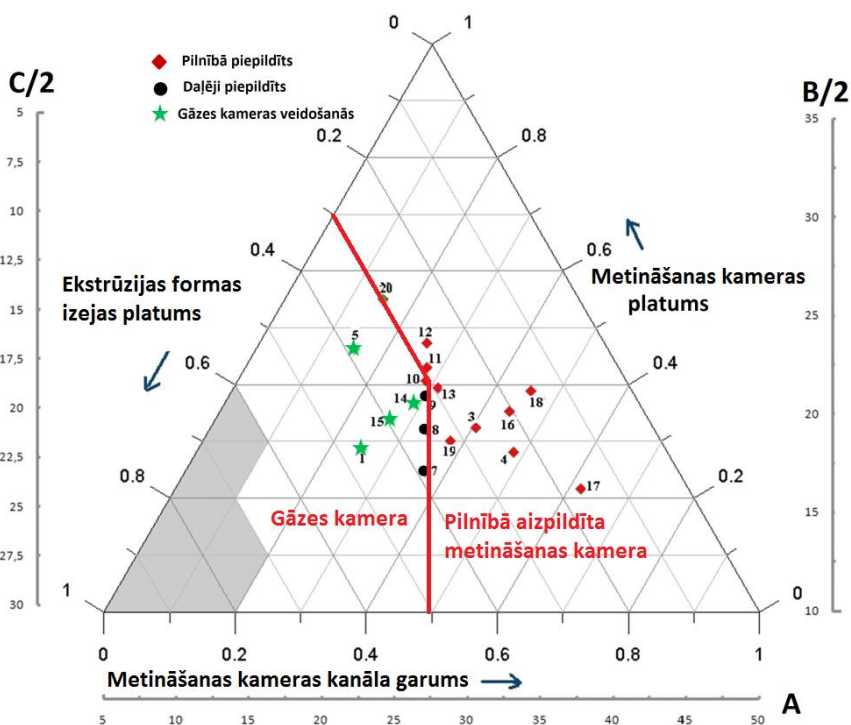
$$\frac{c}{2} = \left(0,0018 \frac{B}{2} + 0,029\right) A + 0,1486 \frac{B}{2} + 1,0989 \quad (3.5)$$

Vairākas simulācijas tika veiktas, izmantojot metināšanas kameras kanāla garumu  $A = 70$  mm un metināšanas kameras platumu  $B/2 = 48$  mm. Šādas ģeometrijas kombinācijas paredzēja, ka ekstrūzijas formas izejas platums  $C/2$  būs 16,30 mm, kas tika noapaļoti uz 16 mm. Teorijas

pārbaudei tika veiktas simulācijas, kur ekstrūzijas formas urbuma platums tika simulēts kā 15, 16 un 17 mm. Simulācijas prognoze parāda, ka vienādojuma rezultāts norāda ekstrūzijas formas ģeometrijas limita robežu, pirms ekstrūzijas kamerā veidojas gāzes kamera. Urbuma diametram esot 16 mm, gāzes kamera pazuda, tiklīdz sagataves materiāls sasniedza ekstrūzijas formas izejas urbumu. Simulācijas rezultāts ir attēlots 3.6(b) attēlā.

### 3.6. Ekstrūzijas formas ģeometrijas robežu diagramma

3.7. attēla diagramma parāda sakarību starp ekstrūzijas formas ģeometriju un ekstrūzijas metināšanas galīgo elementu analīzes prognozēto iznākumu.



3.7.att. Ekstrūzijas formas ģeometrijas limita diagramma

Diagrammā ir apkopoti trīs ekstrūzijas formas ģeometriskie parametri: metināšanas kameras kanāla garums (A), ekstrūzijas formas izejas platums (C/2) un metināšanas kameras platums (B/2). 20 galīgo elementu simulācijas, kur katra tika modelēta ar dažādiem ģeometriskajiem parametriem, tika veidotas tā, lai izpētītu sagataves materiāla plūsmas īpašības metināšanas kamerā un analizētu spiedienu, veidojoties ekstrūzijas metinājuma šuvēm. Katrs no trim metināšanas kameras ģeometriskajiem parametriem ietekmē metāla plūsmas uzvedību. Visi iegūtie rezultāti ir attēloti diagrammā. Ekstrūzijas formas ģeometrijas limita diagramma parāda katra ģeometriskā parametra ieguldījumu attiecībā uz sagataves materiāla deformāciju metināšanas kamerā. Diagrammā attēloti trīs mainīgie lielumi, kur līniju galapunktu vērtības vienmēr būs konstantas = 1. Diagrammā iezīmētie punkti ir veiktās galīgo elementu simulācijas, kuras parāda piederību zonām, kas norāda uz ģeometrijas nepilnībām un raksturo materiāla plūsmas uzvedību metināšanas kamerā - ir vai nav gāzes kamera, un kur materiāls pilnībā vai daļēji aizpilda metināšanas kameru. Pēc galīgo elementu simulācijas iznākuma var secināt par materiāla plūsmas uzvedību atkarībā no ekstrūzijas formu ģeometriskajiem parametriem.

Katrai simulācijai ir piešķirts kārtas numurs, un tā attēlota diagrammā ar punktu. Visi galīgo elementu simulācijas modeļi, kuros novērojams stāvoklis, ka materiāls pilnībā aizpilda metināšanas kameru, ir atzīmēti ar (♦). Apaļie punkti (●) apzīmē galīgo elementu simulācijas modeļus, kur ekstrūzijas metināšanas laikā metināšanas kamerā ir novērojama gāzes kameras veidošanās, vai arī materiāls ļoti lēni aizpilda metināšanas kameru pilnībā. Punkti (\*) apzīmē gāzes kameras veidošanos, kas paliek nemainīga līdz pat ekstrudēšanas beigām.

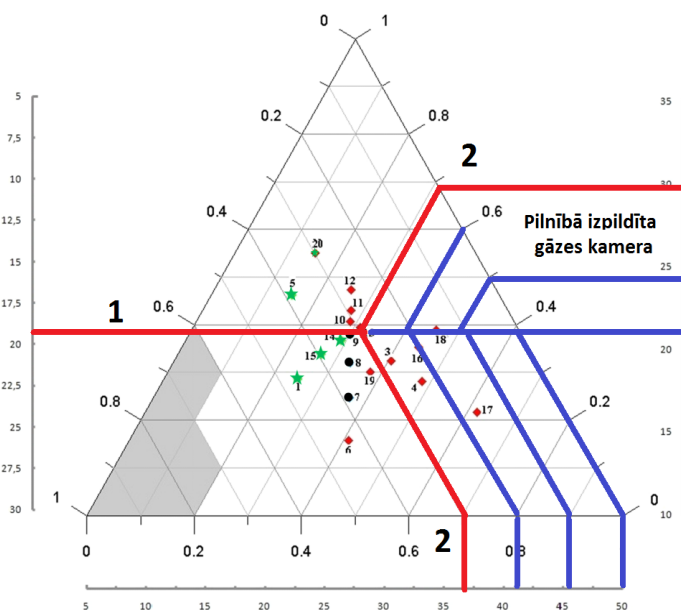
Ekstrūzijas formas ģeometrijas limita diagrammas minimālās vērtības ir  $C/2 - 10$  mm,  $B/2 - 20$  mm un  $A - 10$  mm. Mazākas vērtības un pelēkie iekrāsējumi norāda uz reģioniem, kur šāda ekstrūzijas formas ģeometrijas kombinācija nav iespējama, pielietojot ekstrūzijas metināšanas tehnoloģiju.

Atlikšie punkti (\*) ir koncentrēti vairāk uz diagrammas kreiso daļu, kas norāda uz to, ka, izvēloties šādas ģeometrijas kombinācijas ekstrūzijas formās, ekstrūzijas metināšanas procesā veidosies pastāvīga gāzes kamera un metinājums būs ar defektiem – netiks nodrošināts nepieciešamais spiediens metināšanas kamerā. Diagrammas labās puses stūrī koncentrējas galīgo elementu analīzes punkti, kas norāda uz pilnīgu metināšanas kameras aizpildīšanos ar sagataves materiālu un metinājuma kvalitāte, izvēloties šādus ģeometriskos parametrus, būs pietiekama.

### 3.7. Ekstrūzijas formas ģeometrijas robežu diagrammas praktiskais pielietojums

Sākotnējais ekstrūzijas formas ģeometrijas izvēles kritērijs ir ekstrūzijas formas izejas platums. Šo parametru nosaka ražošanas nepieciešamība. Ja ražotājam ir nepieciešams ekstrudēts profils, kura platums būs 42 mm, tad ekstrūzijas formu modelēšanā jāievēro minimālās ekstrūzijas formas ģeometrijas, un saskaņā ar ekstrūzijas formas ģeometrijas robežu diagrammu jārikojas sekojoši (skat. 3.8.attēlā):

1. Jāizvēlas ekstrūzijas formas izejas platums – 42 mm;
2. Jāizvēlas gāzes kameras platums (>60 mm) un gāzes kameras kanāla garums (>36 mm).



3.8.att. Ekstrūzijas formas ģeometrijas robežu diagramma

### 3.8. Nodaļas secinājumi

Ar galīgo elementu analīzes palīdzību ir izveidota diagramma, ar kuras palīdzību var prognozēt ekstrūzijas procesā metināto šuvju kvalitāti. Ekstrūzijas formas ģeometrijas robežu diagramma norāda, pie kādas ekstrūzijas formas ģeometrijas metināšanas kamerā veidosies gāzes kamera, un kad metināšanas kamera tiks pilnībā aizpildīta.

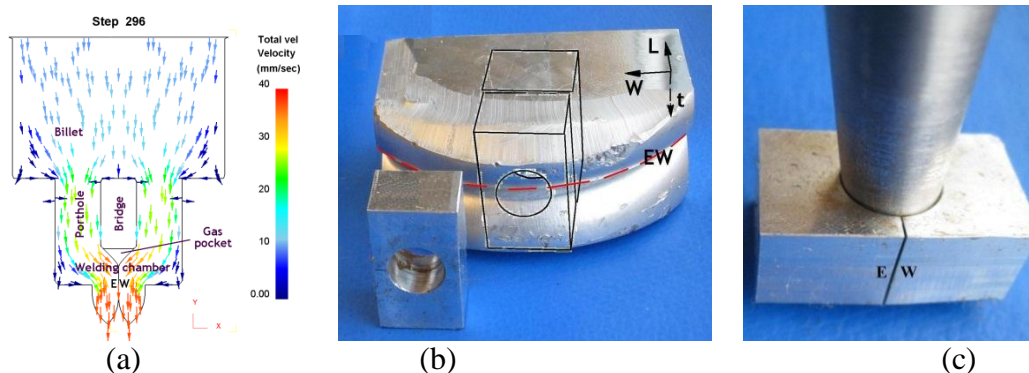
Tika izveidots vienādojums, kas norāda uz kritisko ģeometrisko parametru kombinācijām, kuras pārkāpjot metināšanas kamerā radīsies gāzes kameras, kas izraisīs metinājuma šuvju defektus.

Nekvalitatīvas šuves var veidoties ne tikai ātruma un temperatūras ietekmē, bet arī atkarībā no metināšanas kameras ģeometrijas ekstrūzijas formās.

## 4. nodaļa. JAUNA EKSTRŪZIJAS ŠUVJU TESTĒŠANAS METODE

### 4.1. Metodes koncepts

Jaunās metodes - ekstrudētu šuvju kvalitātes pārbaudes testa koncepciju izskaidro 4.1. attēli, kur 4.1. (a) attēlā ir parādīta vienkāršota 2D ekstrūzijas procesa galīgo elementu analīze, kur divas metāla plūsmas aiz ekstrūzijas metināšanas tiltiņa savienojas vienā veselā un tālāk plūst uz ekstrūzijas formas izeju, kā rezultātā veidojas profils. Metināšanas kameras apstākļi tika izvēlēti tā, lai metināšanas kamera aiz tiltiņa netiktu pilnībā aizpildīta ar sagataves materiālu, kā rezultātā aiz tiltiņa visa ekstrūzijas procesa laikā tika uzturēta gāzes kamera. 4.1. (b) attēlā redzams iegūtais ekstrūzijas produkts, kur profils tika ekstrudēts ar šuvi tam pa vidu un šuve stiepās visā profila garumā (L) un platumā (W).



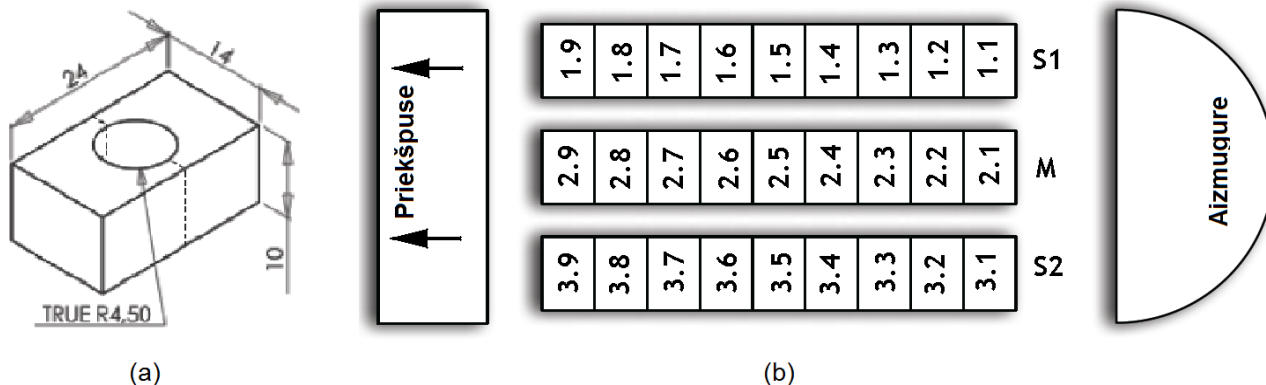
4.1. att. (a) 2-D ekstrūzijas metināšanas galīgo elementu modelis, (b) testa paraugu novietojums profilā, (c) pārbaudes metodes koncepts

Lai pārbaudītu ekstrūzijas metinājuma šuvi, no alumīnija profila tika izgriezti pārbaudei nepieciešamie paraugi ar ģeometriju - skatīt 4.2. attēlā (a) skici. Paraugs tika izgriezts kā neliels taisnstūra klucītis. Pēc tam urbums tika iestrādāts klucītim vidusdaļā. Tādējādi paredzams, ka, konusveida puansonam laužot klucīti urbuma vietā, paraugs plaisās pa plakni, uz kuras atrodas šuve. Testā tika izmantots ekstrudēts sloksnes profils ar šuvi vidū un izmēriem platumā = 40 mm, augstumā = 10 mm un garumā = 240 mm, skatīt 4.1. attēlu (b).

4.1. (c) attēlā redzama testa koncepcija, kad konusveida puansons veic ekstrudētā alumīnija profila kvalitātes pārbaudi izgrieztajam paraugam. Puansons tiek ar spēku iespiests parauga urbumā tik tālu, lai vienā no parauga malām parādās plaisa visā parauga biezumā. Tā kā šajā plaknē atrodas ekstrūzijas metināšanas šuve, plaisāšana aizsākas un turpinās pa parauga ekstrūzijas metinājuma šuves plakni. Plaisa šim paraugam ir taisna, bez izteiktām laušanas pazīmēm, kas norāda uz nepietiekamu ekstrūzijas metinājuma kvalitāti.

4.2.(b) attēlā redzams, kā no AA6082 sērijas ekstrudētā alumīnija profila tiek sagatavoti vairāki paraugi (materiāls ir ciets, jo pēc ekstrūzijas veikšanas tas tika glabāts vairākus gadus; alumīnijam stāvot istabas temperatūrā, turpinās tā pārkristalizācija, kā rezultātā palielinās cietība). Paraugi tika izgriezti no ekstrūzijas procesa sākuma un vidus posma. Testētā profila daļa atspoguļo ekstrūzijas procesa sākuma apgabalu, kura laikā ekstrūzijas formas iekšpusē alumīnija masa vēl nav piepildījusies, un metāla plūsma nav nostabilizējusies (nav vienmērīga). Kā redzams 4.2. attēlā, paraugi tika ņemti no trīs profila rindām, viena rinda vienā pusē (S1), otra – vidū (M) un trešā – otrā pusē (S2). Lielākā daļa paraugu (izņemot trīs) tika laužti ar speciāli

veidotu konusveida puansonu, līdz tie visā parauga biezumā saplaisāja pa šuvi. Pārbaude tika veikta uz mehāniskās preses, puansonu iestiprinot vienā no galvām. Laušanas ātrums tika iestatīts uz  $0,04 \text{ mms}^{-1}$ . Uz hidrauliskās preses darbvirsmas tika novietota uzgriežnim līdzīga konstrukcija tā, lai puansonu, virzoties cauri parauga urbumam, varētu brīvi kustēties.



4.2.att. (a) Parauga ģeometrija. (b) Parauga novietojums profilā un tā numerācija

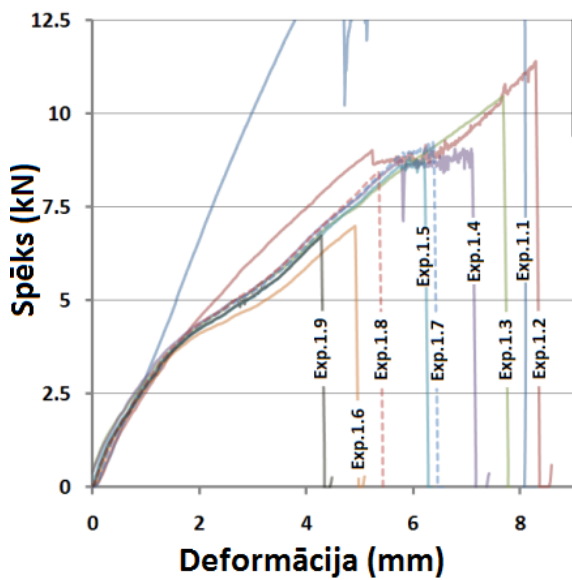
## 4.2. Rezultātu apkopošana

Testa laikā ar programmatūras palīdzību (BlackCat), spēka un gājiena indikatoriem tika nolasītas spēka - deformācijas līknes. Paraugam saplaisājot vienā tā pusē (skatīt 4.1. (c) attēlu), spēka indikators acumirkļi nokrīt līdz nulles iedaļai. Tādējādi tika identificēts konusveida puansonu gājiens parauga saplaisāšanas mirklī. Iegūtais grafiks parāda testētā parauga deformācijas pakāpi un parauga laušanai pielikto spēku.

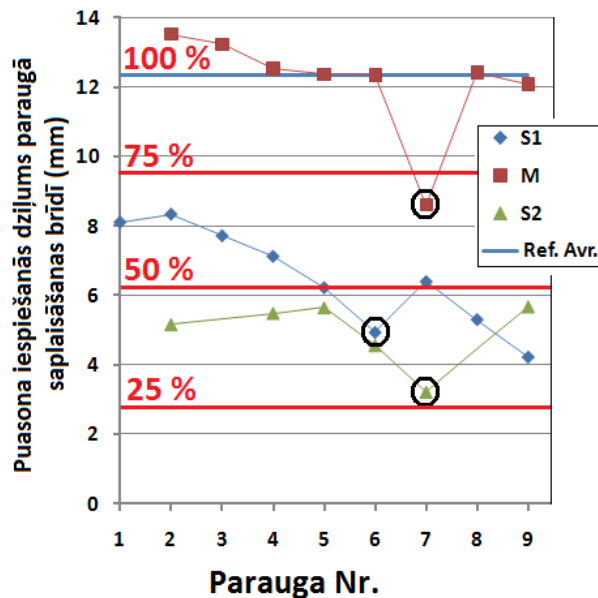
## 4.3. Rezultātu analīze

Paraugu spēka – deformācijas līknes no S1 rindas ir redzamas 4.3. (a) attēlā. Spēka rādītājs visaugstāko vērtību sasniedz, testējot paraugu 1.1. Taču šie dati netika ņemti vērā, jo puansonu un paraugu netika apstrādāti ar smērvielu, kā rezultātā uz pārbaudāmo paraugu iedarbojās papildus berzes spēks, kas radās, paraugu spiežot pret testa iekārtas darbvirsmu, kas kavēja parauga deformēšanos. Tā kā alumīnijs ir mīksts materiāls, puansonam iedarbojoties no vienas puses, paraugs tika daļēji iegremdēts (iespiests) uzgriežņa urbumā, kas paredzēts konusveida puansonu caurgājienu. Kā arī liels berzes spēks tika novērots (skat. 4.4. (a) attēlā deformācijai pieliktā spēka svārstības) starp puansonu un parauga urbumu puansonu caurgājienu laikā, kā rezultātā grafikā novērojamas nelielas, nevienmērīgas pieliktā spēka svārstības. Šādos apstākļos iegūtie dati nevar tikt uzskatīti par patiesiem. Nākamajos testos gan puansonu, gan urbuma iekšpuse, gan darbvirsmas tika noklāti ar eļļojošu smērvielu. Pateicoties smērvielai, puansonu caurgājienu pieliktais spēks tika ievērojami samazināts (apmēram divas reizes mazāks) un pieliktā spēka atšķirības deformējot dažādus paraugus bija mazas. Kā arī grafikā netika novērotas nevienmērīgas puansonu pieliktā spēka svārstības. Darba rezultātā tika novēroti divi līkņu veidi, dažos gadījumos tā novērota ar vienmērīgi pieaugošu tendenci, citos – izteiktām pieliktā spēka svārstībām. Pirmais minētais līkņu tips tika novērots gadījumos ar labu eļļojumu. Otru līkņu tipu, iespējams, radīja nepietiekams eļļojums, tādējādi šādu kontaktu vislabāk raksturot ar adhāzijas rezultātā radītām berzes svārstībām. Tomēr visos eksperimentos tika izmantota viena un tā pati smērviela, taču tika novēroti divi dažādi līkņu tipi.

4.3. (a) attēlā (grafikā) ir redzamas visu eksperimentu spēka- deformācijas līknes. Līknes uzskatāmi parāda strauju deformācijai pieliktā spēka kritumu, kad paraugs saplaisā pa šuvi vienā no urbuma pusēm. Tādējādi no līknes ir iespējams nolasīt konusveida puansona iegrimšanas dziļumu urbumā brīdī, kad parādās plaisa. Šie dati grafiski attēloti 4.3. (b) attēlā. Papildus tika izmantoti četri atsauces jeb references paraugi, kuri bija izgriezti no viendabīga materiāla bez šuvēm pa parauga šķērsriezumu vietām no tā paša materiāla.

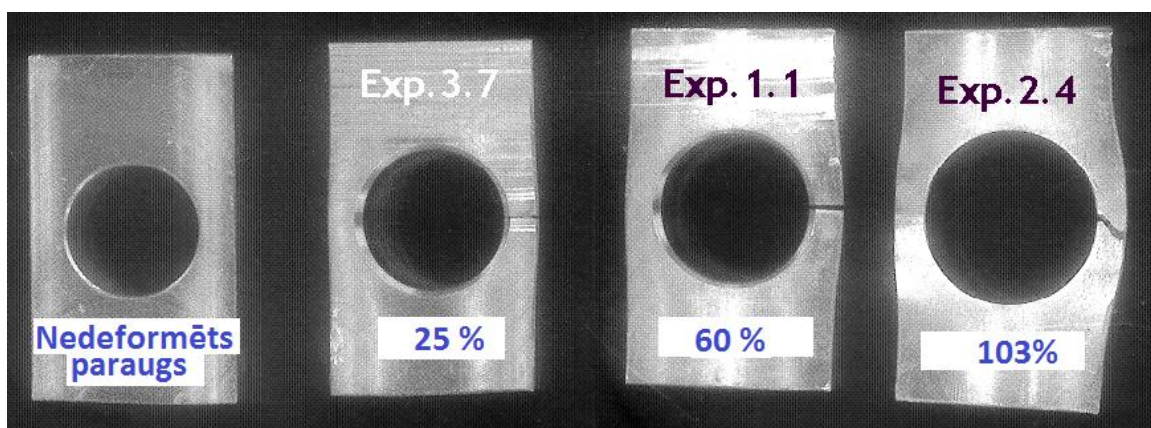


(a)



(b)

4.4. att. (a) Deformācijas grafiki S1 rindas paraugiem. (b) puansona iespiešanās dziļums paraugā, tiem deformējoties



4.4.att. Paraugu deformācijas pakāpes.

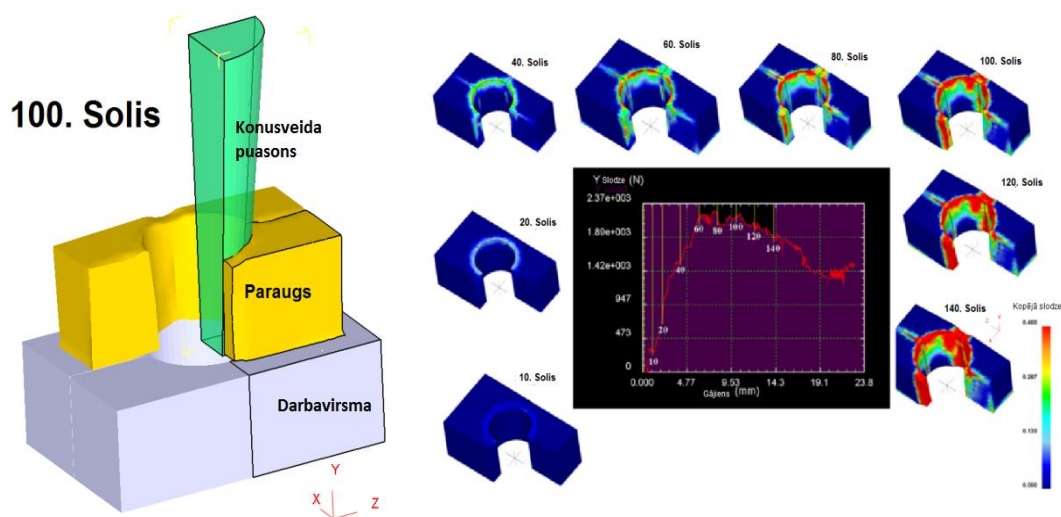
Kā redzams 4.3. (b) attēlā, pastāv ievērojamas deformācijas pakāpes atšķirības, testējot paraugus no dažādām profila vietām. Jebkurš spriegums rada detaļas, parauga izmēru maiņu –

deformāciju. Materiāla deformācija pēc sava rakstura var būt elastīga, kas izzūd pēc slodzes noņemšanas un paraugs atgriežas sākuma stāvoklī. Palielinot slodzi sākas plastiska deformācija, ka saglabājas pēc slodzes noņemšanas. Šo materiāla deformācijas izmaiņu raksturo deformācijas pakāpe. Šai darbā izmantotajos eksperimentos deformācijas pakāpi raksturo konusveida puansona iespiešanās dziļums (turpmāk tekstā – PD; mm) šuves saplaisāšanas brīdī. Dažādiem paraugiem PD veidojas trīs dažādos līmeņos. Pirmajam līmenim raksturīga zema deformācijas pakāpe (PD = 3-6 mm, 25% - 50%), otrajam – arī zema deformācijas pakāpe (PD = 7- 9 mm, 50% - 65%), bet trešais - ar augstu deformācijas pakāpi (PD = 12-14 mm, 98% - 106%). Paraugiem bez šuves (references) tika novērota augsta deformācijas pakāpe - 100%. Kā arī visiem paraugiem no vidējās rindas M (skat.4.2. (b) attēlā) tika novērota augsta deformācijas pakāpe, izņemot vienu, paraugu Nr.3.7. Augstāka deformācijas pakāpe tika novērota arī S1 rindas paraugiem, kas ņemti no profila priekšpuses, kamēr aizmugurē esošajiem paraugiem deformācijas pakāpe ir daudz zemāka. Zema deformācijas pakāpe tika novērota arī visiem S2 rindas paraugiem. Tests ļoti vienkārši un precīzi ļauj identificēt ekstrūzijas metināšanas laikā iegūtās šuves ar nepietiekamu kvalitāti.

Tests parāda, skat. 4.3. (b) attēlu, ka visiem no profila ņemtajiem paraugiem deformācijas pakāpes samazināšanās tika novērota, galvenokārt tiem paraugiem, kas ņemti no profila priekšpuses. Turklāt ievērojams deformācijas pakāpes samazinājums tika novērots vienam no paraugiem katrā paraugu rindā. Tomēr šie izņēmumi nekonzentrējas vienā apgabalā, bet arī ne tālu viens no otra, skat 4.3. (b) attēlu, kur attiecīgās vietas ir apvilktas. Sākotnēji tika pieņemts, ka šāda situācija tika novērota izmantotā profila parauga materiāla īpatnību dēļ, bet, tā kā zemas deformācijas pakāpes vērtības šuvēm koncentrējās aptuveni vienādā attālumā no profila sākuma un visās trīs rindās, tad droši var apgalvot, ka profila šuves ar kārtas numuriem 1.6, 2.7 un 3.7. tik tiešām ir ar mazāku deformācijas pakāpi.

#### 4.5. Metodes mehānika

Lai izpētītu puansona uzvedību testa paraugu paplašināšanās laikā, tika izveidots FEM-modelis, izmantojot FEM programmu – DEFORM 3D.



4.5.att. (a) Galīgo elementu modeļa skice, (b) Deformācijas izplatība paraugā dažādos deformācijas posmos.

Tika uzmodelēta viena ceturtdaļa procesa, un modelis parādīts 4.5. (a) attēlā. Modelis tika izmantots, lai pētītu, kā testa paraugi deformēsies, konusveida puansonam virzoties parauga urbumā. Kā arī galīgo elementu modelis tika izmantots, lai noteiktu pārbaudē gaidāmo spēka-deformācijas līknes prognozi.

Galīgo elementu modeļa simulācijas rezultāts ir redzams 4.5. (b) attēlā, kur spēka - deformācijas līkne ir attēlota attēla vidū. Prognozētā parauga deformācija pieliktā spēka rezultātā dažādos procesa posmos ir attēlota ar līkni - tā virzas augšup līdz sākas plaisāšana parauga plānākajā daļā, vistuvāk urbumam. Slodze sasniedz maksimālo vērtību līdz sākas parauga plaisāšana, un pēc tam tā samazinās. Paraugs deformēsies stiepjoties puansona iedarbības rezultātā vietā, kur novērojama plaisāšana.

Jaunajā ekstrudēto šuvju kvalitātes pārbaudes metodē puansona caurgājiens tiek veikts, virzot to izgrieztā taisnstūra formas parauga urbumā. Pēc tam izgrieztais paraugs tiek deformēts to paplašinot - virzot konusa veida puansonu urbumā. Šāds tests nodrošina deformācijas iedarbību uz plānāko parauga daļu, uz kuras atrodas pārbaudāmā šuve. Ja šuves kvalitāte būs nepietiekama - paraugs saplaisās ātri.

#### **4.6. Nodaļas secinājumi**

Paraugu sagatavošana šim testam ir vienkārša un lēta. Ar testa palīdzību var identificēt ekstrūzijas procesā nepilnīgi sametinātās šuves.

Šuves izturība šajos testos ir kvalitātes rādītājs. Šuves kvalitāti raksturo - par cik procentiem pārbaudāmais materiāls ir izturīgāks kā references paraugi.

Daļai šuvju bija slikta kvalitāte (deformācijas pakāpe 25% - 60%) melnā piemaisījuma dēļ, kas bija smērviena, kas iesūcās metinājuma šuvē ekstrūzijas metināšanas procesa laikā. Profila vidus apgabalā šuves kvalitāte bija pietiekama. Deformācijas pakāpe bija augtāka kā references paraugiem - līdz pat 105%. Tas norāda, ka šuve bija tikpat izturīga kā pats materiāls ārpus šuves apgabala.

Šobrīd testi jau tiek izmantoti un atzinīgi novērtēti ekstrudēto produktu ražošanas uzņēmumos „Bentelers” un „Hydro Aluminium” (skat. Pielikumu Nr. 1).

## SECINĀJUMI UN PIELIETOJUMS

1. Darba rezultātā tika secināts, ka:
  - 1.1 ir iespējami gadījumi, ka, veicot stiepes testu ekstrudētam profilam, pārrāvums radīsies ārpus šuves apgabala un ekstrūzijas procesā metinātās šuves netiks pārbaudītas, kaut arī šuvē novērojamas mikroplaisas;
  - 1.2 metāla atkārtotas jeb ilgstošas kristalizācijas ietekmē ir iespējami gadījumi, ka metinātās šuves ar defektiem (mikroplaisām) kvalitāte ir labāka par metāla kvalitāti ārpus šuves zonas;
  - 1.3 šuves deformācijas pakāpe ekstrudēto šuvju defektu identificēšanai ir labāks kvalitātes rādītājs nekā stiepes pārbaudes (sakarība starp paraugam pielikto spēku un deformācijas lielumu);
  - 1.4 veicot bīdes eksperimentus ar alumīnija paraugu:
    - 1.4.1. pēc pārejas uz otro fāzi ( $\sim 1/5$  no testam izmantotā materiāla biezuma), bīdes zona kļūst šaurāka un materiāls sāk deformēties lūstot;
    - 1.4.2. pēc  $\sim 3/5$  procesa deformācijas līknē novērojams „plato” efekts (atkārtots slodzes pieaugums), kas rodas sagataves materiālam koncentrējoties bīdes gājiena apakšējā daļā, tādējādi radot sablīvējumu;
  - 1.5 ekstrūzijas formas ģeometrijas parametri ietekmē ekstrūzijas metinājuma kvalitāti;
  - 1.6 nekvalitatīvas metināšanas šuves ekstrūzijas procesā var veidoties ne tikai ātruma un temperatūras ietekmē, kā tas tika uzskatīts līdz šim, bet arī atkarībā no ekstrūzijas formas ģeometrijas;
  - 1.7 jaunā ekstrudēto alumīnija metinājumu šuvju kvalitātes pārbaudes metode ļauj veikt ekstrudēto šuvju kvalitātes pārbaudes mērījumus daudz precīzāk, jo mērījumi tiek veikti metinātajām šuvēm, nevis profilam kopumā;
2. Pielietojums:
  - 2.1. ekstrūzijas formas ģeometrijas robežu diagramma dod rekomendācijas ražotājiem ekstrūzijas formas ģeometrijas izvēlē;
  - 2.2. jaunā ekstrudēto alumīnija metinājumu šuvju kvalitātes pārbaudes metode dod rekomendācijas ekstrūzijas metināšanas tehnoloģijas pilnveidei;
  - 2.3. jaunā ekstrudēto alumīnija metinājumu šuvju kvalitātes pārbaudes metode ir universāla - to var izmantot arī veicot kvalitātes pārbaudes mērījumus citiem metāliem;
3. Ir iesniegts patenta pieteikums Norvēģijas patentu birojā.

## KOPSAVILKUMĀ IZMANTOTĀS LITERATŪRAS UN AVOTU SARAKSTS

1. Akeret R., "Extrusion Welds-quality aspects are now center stage". 5<sup>th</sup> Int. Al Extrusion Technology Seminar, Vol. 1, 1992, pp.319.-336.
2. Ceretti E., L. and C. Kopsavilkumiardini, Int. Conf. on Sustainable Manufacturing, Canada, 2008. pp. 125.-132.
3. Ceretti E., Mazzoni L., Giardini C., "Simulation of metal flow and welding prediction in porthole die extrusion: the influence of the geometrical parameters". Int. J. Material Forming, 2009, Vol. 2 Suppl. 1:101–104 DOI 10.1007/s12289-009-0494-9 © Springer/ESAFORM 2009.
4. Chang, T. M. : "Shearing of metal blanks", J. of Inst. of Metals, Vol. 78, 1950-51, pp.393-414.
5. Chang, T. M. and Swift, H. W.: "Shearing of metal bars", J. of Inst. of Metals, Vol. 78, 1950-51, pp.119.-146.
6. Chang T. M. and H. W. Swift, J. of Inst. of Metals, 78, 1950-51, pp. 119.-146.
7. Donati L., Tomesani L., "The prediction of seam welds quality in aluminum extrusion". Journal of Materials Processing Technology, 2004, pp. 153.–154 and pp.366.–373.
8. Donati L., Tomesani L., "The effect of die design on the production and seam weld quality of extruded aluminum profiles", J. of Materials Processing Technology , 2005, 164.–165 and pp.1025.–1031.
9. Timmerbeil, C.: "Untersuchung des Schneidvorgangs beim Blech", Werkstattstechnik und Maschinenbau, Vol.47, 1957, pp. 231.- 239 and pp. 350.- 356.
10. Kandis, J., Valberg, H. and Wu, W.: "Use of axisymmetric shearing as technological test method to gather flow stress and ductility data for metals", ibid.
11. Kandis J., H. Valberg and W. Wu, Advances in Materials and Processing Technologies, October 24<sup>th</sup> to 27<sup>th</sup>, Paris, 2010.
12. Krämer, W.: "Untersuchung über das Genauschneiden von Stahl und Nichteisenmetallen", Ber. Inst. Umformtechnik, University of Stuttgart, 1969.
13. Timmerbeil C., Werkstattstechnik und Maschinenbau, 47, Germany, 1957, pp. 231.- 239 and pp. 350.- 356.
14. Valberg H. S., "Applied metal forming; including FEM analysis". 1st Ed, Cambridge University Press, NY, USA, 2010.
15. Valberg H., Int. J. of Materials & Product Technology, 17, 2002, pp. 497.- 556.
16. Xianghong W. et al., Materials Science and Engineering, 2006, pp. 435.-436 and pp. 266.-274.
17. Støren S., Andersen L.: Privāta komunikācija ar AS Hydro Aluminium un AS Bentelers.