

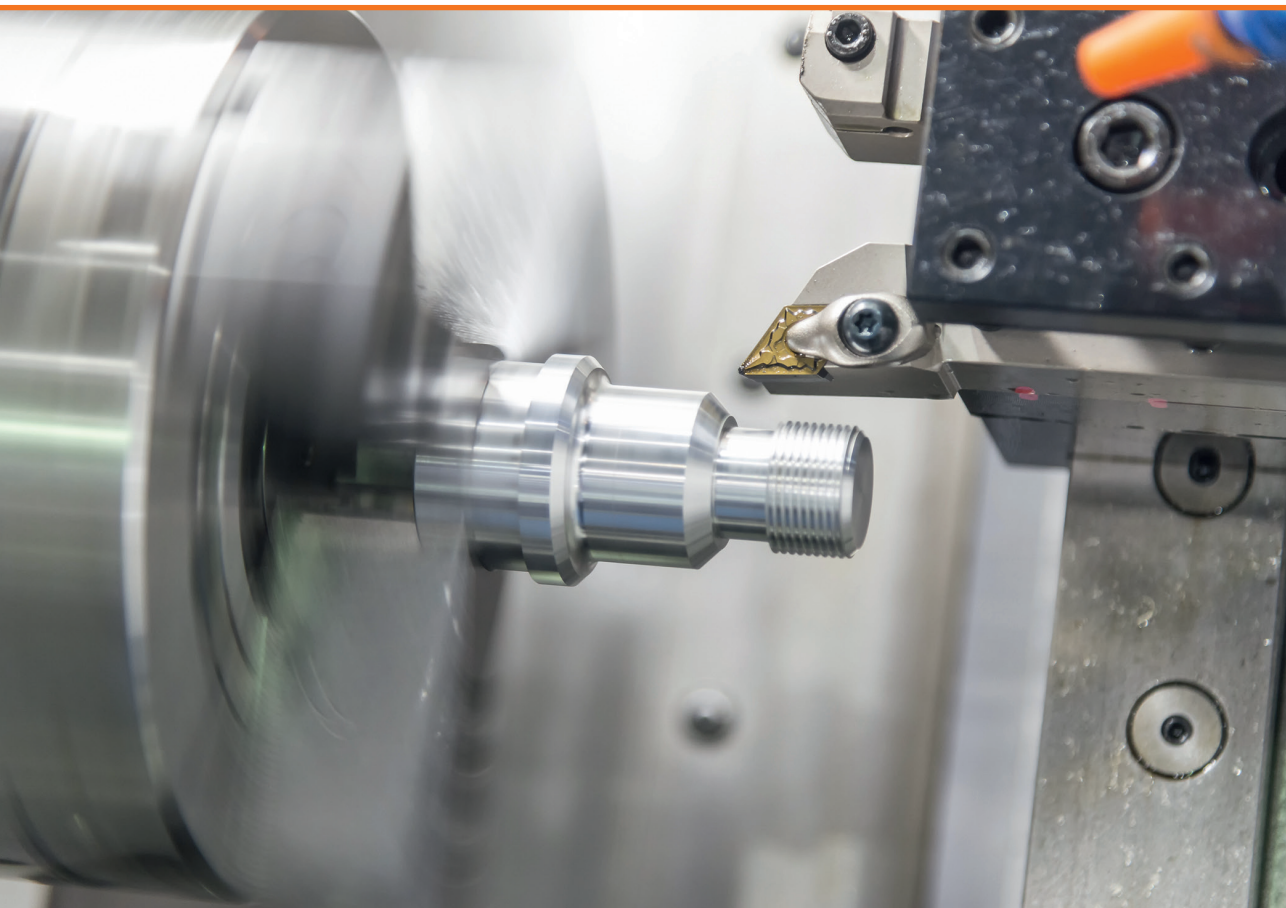


RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Viktors Gutakovskis

NERŪSĒJOŠĀ TĒRAUDA APVIRPOŠANAS PROCESA PRECIZITĀTE ATKARĪBĀ NO Al_2O_3 NANO PĀRKLĀTA GRIEZĒJINSTRUMENTA NODILUMA

Promocijas darbs



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte
Mehānikas un mašīnbūves institūts

Viktors Gutakovskis

Doktora studiju programmas “Ražošanas tehnoloģija” doktorants

NERŪSĒJOŠĀ TĒRAUDA APVIRPOŠANAS PROCESA PRECIZITĀTE ATKARĪBĀ NO Al_2O_3 NANO PĀRKLĀTA GRIEZĒJINSTRUMENTA NODILUMA

Promocijas darbs

Nozare: Mašīnbūve un mehānika
Apakšnozare: Mašīnbūves tehnoloģija

Zinātniskie vadītāji:
profesors *Dr. sc. ing.* ĒRIKS GERIŅŠ,
docente *Dr. sc. ing.* ANITA
AVIŠĀNE

Zinātniskais konsultants
profesors

Dr. sc. ing. J. RUDZĪTIS

Rīga 2023

SADARBĪBA

Promocijas darbs “Nerūsējošā tērauda apvirpošanas procesa precizitāte atkarībā no Al_2O_3 nano pārklāta griezējinstrumenta nodiluma” izstrādāts un finansēts sadarbībā ar:

SAM 8.2.2. “Stiprināt augstākās izglītības institūciju akadēmisko personālu stratēģiskās specializācijas jomās” projekts Rīgas Tehniskajā universitātē Nr.8.2.2.0/18/A/017.



ANOTĀCIJA

Promocijas darbā „NERŪSĒJOŠĀ TĒRAUDA APVIRPOŠANAS PROCESA PRECIZITĀTE ATKARĪBĀ NO Al_2O_3 NANO PĀRKLĀTA GRIEZĒJINSTRUMENTA NODILUMA” ir izstrādāta apvirpotas virsmas raupjuma noteikšanas metode grūti apstādāmam materiālām, pie palielinātiem apstrādes režīmiem, virpošanās procesa bez dzesēšanas emulsijas pielietošanu, pielietojot jaunus griezējinstrumentus, kā arī ir izpētīts griešanas process, pētot skaidu veidošanas procesu un griezējinstrumenta nodiluma rezultātu pielietojot analogiskus instrumentus. Veikts zināmās literatūras apskats un definēti pētījumu virzieni. Ir apskatītas divu nerūsējošo tēraudu struktūru grupu materiālu apvirpošanas rezultāti. Ir izstrādāti vairāki apvirpošanas procesa matemātiskie modeļi virsmas raupjuma prognozēšanai pielietojot regresijas analīzi. Pētīta materiālu leģējošo elementu ietekme uz skaidu veidošanas procesu. Izvērtētā regresijas prognozēšanas modeļu precizitāte un ir veikta eksperimentāla modeļa atbilstības pārbaude. Ir veikta apvirpošanas procesa galīgo elementu metodes modelēšana un iegūtie dati kurus nebija iespējams noskaidrot ar praktiskā eksperimenta palīdzību.

Darbs satur 130 lapas teksta, 66 attēlus, 17 tabulas un 100 informāciju avotu nosaukumus.

ABSTRACT

In the PhD thesis " Precision of stainless steel turning process depending on Al₂O₃ nano-coated cutting tool wear " a method for determining the roughness of a turned surface for hard-to-machine materials has been developed using increased processing parameters, the application of a turning process without cooling emulsion, using new cutting tools, and the cutting process has been investigated. Studying the chip formation process and the result of cutting tool wear using other manufacturer produced tools. A review of the known literature was carried out and research directions were defined. The results of material turning of two groups of stainless steel structures are reviewed. Several mathematical models of the turning process have been developed for predicting surface roughness using regression analysis. The influence of material alloying elements on the chip formation process was studied. The accuracy of the regression prediction models has been evaluated and an experimental model test has been performed. Finite element method modeling of the turning process has been represented and the obtained data, which could not be received before with the help of a practical experiment, have been obtained.

The thesis contains 130 pages of text, 66 images, 17 tables and 100 information sources.

SATURS

IEVADS.....	7
DARBĀ IZMANTOTIE APZĪMĒJUMI UN SAĪSINĀJUMI.....	8
1. INFORMĀCIJAS AVOTU ANALĪZE.....	15
1.1. Instrumentu materiālu attīstības perspektīvas	15
1.2. Griešanas procesa jēdzieni un termini.....	19
1.3. Skaidas veidošanās procesa elementi.....	22
1.4. Nerūsējošo tēraudu iedalījums.....	35
1.5. Izvēlētas apstrādes procesa raksturojums: apvirpošanas operāciju veidi.....	41
1.6. Prasības, kuras tiek izvirzītas griezējinstrumentu materiāliem.....	44
1.7. Nodilumizturīgo cietsakausējuma griezējinstrumentu materiālu raksturojums.....	44
1.8. Griezējplāsknīšu veidi, ģeometrija un skaidu lauzēju raksturojums.....	47
1.9. Instrumenta ģeometrijas ietekme uz griešanas procesu.....	51
1.10. Virsmas raupjums virpošanā.....	53
1.11. Cietsakausējuma griezējinstrumentu attīstības perspektīvas.....	54
1.12. Nodiluma elementi un nodiluma kritēriji.....	56
1.13. Faktori, kas ietekmē griezošo instrumentu izturību un nodilumu.....	63
1.14. Griezošā instrumenta nodiluma mehānisms un fiziskie cēloņi.....	65
1.15. Faktori, kas ietekmē griezošo instrumentu izturību un nodilumu.....	67
1.16. Literatūras analīzes kopsavilkums.....	68
2. GRIEŠANAS PROCESA MODELĒŠĀNA PIELIETOJOT GALĪGO	
ELEMENTU METODI.....	69
2.1. Galīgo elementu metodes (FEM) pielietošanas pamatprincipi	69
2.2. Galīgo elementu metodes pielietošana apvirpošanas procesa modelēšanā.....	86
2.3. Nodaļas kopsavilkums.....	90
3. NERŪSĒJOŠĀ TĒRAUDA APVIRPOŠANAS PROCESA	
EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI.....	91
3.1. Griezējinstrumenta ģeometrijas izvēle eksperimentālajos pētījumos.....	89
3.2. Vairāku faktoru eksperimenta iespēju analīze.....	91
3.3. Eksperimentālā modeļa izstrāde virpošanā.....	93

3.4 Objekta matemātiskā modeļa noteikšana.....	99
3.5. Dispersija, kura raksturo eksperimenta kļūdu.....	100
3.6. Dispersiju vienādības pārbaude.....	101
3.7. Modeļa koeficienta nozīmības pārbaude.....	105
3.8. Apvirpotās virsmas raupjuma veidošanās un analīze.....	109
3.9. Nodaļas kopsavilkums.....	113
4.0. INSTRUMENTA NODILUMA UN SKAIDU VEIDOŠANAS EKSPERIMENTĀLIE REZULTĀTI.....	115
4.1. Instrumenta nodiluma eksperimentālie rezultāti.....	115
4.2. Skaidu veidošanās procesa eksperimentālie pētījumi.....	118
4.3. Nodaļas kopsavilkums.....	122
SECINĀJUMI UN PIELIETOJUMS	123
IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI.....	125

IEVADS

Līdz ar nerūsējošo tēraudu pielietošanu pasaulē un griezējinstrumentu materiālu un pārklājumu attīstību ir kļuvusi aktuāla to dilšanas un temperatūras lauku sadalījuma izpēte un prognozēšana. Svarīga ir apstrādes procesa parametru pētīšana un to ietekme uz gala rezultātu. Tā kā nerūsējošais tērauds pats par sevi ir stīgrs un grūti apstrādājams materiāls un satur vairākus leģējošos elementus, kas, savukārt, apgrūtina apstrādi un rada nozīmīgas neērtības skaidas veidošanas procesam (skaida jāsalaus, jāsavērpj), ir aktuāla apstrādātās virsmas un skaidu veidošanās procesa pētīšana.

Promocijas darbā pētīts nerūsējošo tēraudu apvirpošanas procesu, pielietojot palielinātus griešanas ātrumus un padeves vērtības, izstrādāt uzlabotu apstrādes tehnoloģiju pielietojot jaunus ar ķīmiski uzklāto pārklājumu vakuumā, (tālāk tekstā- CVD) un fizikāli uzklāto pārklājumu vakuumā (tālāk tekstā – PVD) metodēm pārklātus metālkeramiskos cietskausējuma griezējinstrumentus. Apvirpošanas procesā tika salīdzināta dažādu nerūsējošo tēraudu struktūrmartensīta un austenīta un nanopārklājumu, ietekme uz griezējinstrumentu. Darba ietvaros tika izpētīti instrumenti ar Duratomic nanopārklājumu, kuru raksturo lielāka nodilumizturība pie rupjapstrādes apvirpošanas (kad noņemamā metāla kārtā pārsniedz analogiska tipa instrumenta iespējas), kā arī precīzajā apstrādē, kad tiek pielietoti lielāki griešanas ātrumi un mazāks griešanas dziļums, kad arī nozīmīgi pieaug griešanas temperatūra. Šajā pētījumā tika arī izvērtēti svarīgākie griešanas procesa elementi - skaidu veidošanās process, temperatūras lauka sadalījums griezējinstrumentā, kā arī griezējinstrumenta nodilums, kas burtiski iespaido apstrādāto virsmas raupjumu un skaidu veidošanās procesu leģējošo elementu nozīmīgās ietekmes dēļ. Eksperimentus veikti ar palielinātiem apstrādes režīmiem: paaugstinātu griešanas ātrumu, padevi un griezējinstrumenta iestatīšanas leņķi. Pētījuma ideja ir, pielietojot vairāku faktoru eksperimentu, sastādīt griešanas procesa matemātisko modeli un novērtēt eksperimentu atbilstības precizitāti. Veiktajos eksperimentos ir labi redzami rezultāti kuri attēlo griešanas režīmu ietekmi uz gala rezultātu. Tāpat ir noskaidrots, ka dažādu ražotāju instrumenti kuri domāti identiskam apstrādes operācijām nenodrošina vajadzīgo apstrādātās virsmas rezultātu. Aktuāla problēma ir analogisku instrumentu ietekme uz apstrādes procesu un apstrādātās virsmas pētīšana un uzlabošana. Līdz ar to izvēlētā promocijas darba tēma ir aktuāla.

DARBĀ IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI

CVD – Chemical Vapour Deposition, latv.: ķīmiskā uzklāšana vakuumā

PVD – Physical Vapour Deposition, latv.: fiziskā uzklāšana vakuumā

CNC – Computer Numerical Control latv.: Cīparu programmas vadība, programm vadība

FEM – Finite Element Method

GEM – Galīgo elementu metode

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba “Nerūsējošā tērauda apvirpošanas procesa precizitāte atkarībā no Al_2O_3 nano pārklāta griezējinstrumenta nodiluma” izpētīt nerūsējošā tērauda apvirpošanas procesa precizitāte atkarībā no Al_2O_3 nano pārklātu griezējinstrumentu nodiluma. Tas ļaus noskaidrot palielinātu tehnoloģisko apstrādes režīmu (griešanas ātrumu, padevi un griezējinstrumenta iestatīšanas leņķi) ietekmi uz divu nerūsējošā tērauda AISI420 un AISI304 – ferīta un martensīta struktūras apstrādājamības apvirpošanas rezultātu – virsmas raupjuma parametru R_a , pielietojot ar Duratomic- tehnoloģiju pārklātus jaunus griezējinstrumentus, salīdzināt to līdz šīm pielietojamiem instrumentiem un izstrādāt apstrādātas virsmas raupjuma R_a noteikšanas matemātisko modeli.

Promocijas darba mērķa sasniegšanai ir noteikti šādi uzdevumi:

- veikt izvēlētas apstrādes tehnoloģijas un pielietojamo instrumentu vispusīgu analīzi;
- veikt apvirpošanas procesa eksperimentus un rezultātu analīzi, noskaidrojot apvirpotas virsmas raupjuma R_a atkarību no palielinātiem apstrādes režīmiem: griešanas ātruma, padeves un griezējasmēņa iestatīšanas leņķa;
- salīdzināt divu nerūsējošā tēraudu markas AISI420 un AISI304 apvirpotās virsmas rezultātus.
- izstrādāt apvirpošanas procesa tehnoloģijas matemātisko modeļi virsmas raupjuma R_a noteikšanai, salīdzināt to ar eksperimenta rezultātiem;
- veikt dažādu instrumentu ražotāju ietekmes salīdzinājumu apstrādājot divu nerūsējošā tēraudu markas AISI420 un AISI304 sagataves pie palielinātiem griešanas ātrumiem;
- veikt instrumenta nodiluma mehānisma analīzi pielietojot palielinātus apstrādes režīmus;
- veikt skaidu veidošanas procesa analīzi pielietojot palielinātus griešanas ātrumus;

Hipotēze

Pieņemot apvirpotās detaļas uzdoto virsmas raupjuma R_a vērtību, ir iespējams izveidot apvirpošanas procesa ar nodilumizturīgo Duratomic- tehnoloģiju pārklāto griezējinstrumentu modeļi, kas ļauj pēc uzdotā virsmas raupjuma izvēlēties tehnoloģiski sasniedzamos apstrādes režīmus: griešanas ātrumu, padevi vai griezējinstrumenta iestatīšanas leņķi.

Pētījuma metodes

Lai sasniegtu izvirzīto mērķi un izpildītu dotos uzdevumus, promocijas darba izstrādes procesā pielietotas šādas pētījumu metodes: pirms praktiskā eksperimenta tiek īstenota apvirpošanas procesa simulācija pielietojot galīgo elementu metodes analīzi, jeb GEM (no Angļu: FEM - Finite Element Method). Lai realizētu eksperimentālo daļu, tika izmantota virpa, AISI304 nerūsējošā tērauda sagatave ar austenīta un AISI420. nerūsējošā tērauda sagatave ar martensīta struktūru. Tika pielietoti SECO, Walter, Sumitomo un Kennametal jaunie griezējinstrumenti, kurus raksturo plašs pielietošanas apgabals dažādu nerūsējošo tēraudu markām un struktūrām. Praktiskā eksperimentā iegūto apstrādāto virsmas raupjuma profila R_a vērtības rezultātu datu apstrāde tika izpildīta datorizēti, realizējot 3-faktoru eksperimenta plānu.

Pielietotais programnodrošinājums

Izvēlētais programnodrošinājums dod iespēju skaitliski modelēt metāla griešanas procesu, ņemot vērā griezējinstrumenta pārklājumu kombināciju un to biežumu. Apvirpošanas procesa datormodelēšana tiek veikta sadarbībā ar Aalto Universitāti, Somija, izmantojot programmu *Third Wave Advantedge*, kurā ar GEM pielietošanu divām tērauda markām tika nomodelēts apvirpošanas process ar dažādām apstrādes režīmu kombinācijām.

Zinātniskā novitāte

Pirmo reizi:

- 1) Ir izpētīta nerūsējošā tērauda apvirpošanas procesa precizitāte atkarībā no ar Al_2O_3 nano pārlata griezējinstrumentu nodiluma;
- 2) Ir izveidots skaitliski modelēts AISI304 un AISI420 nerūsējošo tēraudu apvirpošanas process, veicot apstrādi ar palielinātu griešanas ātrumu bez dzesēšanas, izveidojot precīzu griezējinstrumentu skaidu laužēja ģeometriju, pielietojot jaunu galīgo elementu metodes analīzes programmatūru *Third Wave Advantedge*, ņemot vērā griezējinstrumentu pārklājumu biežumus un to kombinācijas. TM4000 Duratomic pārklājuma dati tika saņemti tieši no ražotāja, ražošanas vietas apmeklējuma laikā. Rezultātā tika noteiktas griešanas temperatūru minimālās – 700 °C un maksimālās vērtības 1150 °C bez dzesēšanas emulsijas un to sadalījums griezošā instrumenta asmiņā ;

- 3) Ir noteiktas apvirpošanas procesa apstrādātas virsmas raupjuma R_a vērtību atkarībā no apstrādes režīmiem- griešanas ātruma, padeves, iestatīšanas leņķa, un instrumenta nodiluma;
- 4) Ir izstrādāti vairāki apvirpošanas procesu raksturojoši apstrādes režīmu prognozēšanas matemātiskie modeļi, kas ļauj pēc uzdotā virsmas raupjuma (R_a) izvēlēties tehnoloģiskus apstrādes režīmus: griešanas ātrumu, padevi vai griezējinstrumenta iestatīšanas leņķi divām nerūsējošo tēraudu AISI304 un AISI420 markām ar dažādu struktūru;
- 5) Izmantojot modeļus tika parādīts, kā mainās apstrādes procesa matemātiskais modelis atkarībā no griešanas ātruma palielinājuma.

Aizstāvēšanai izvirzītas pētījuma tēzes

- 1) Nerūsējošā tērauda apvirpošanas procesa precizitātes izpētes rezultāti atkarībā no ar Al_2O_3 nano pārklāta griezējinstrumentu nodiluma;
- 2) Izveidots skaitliski modelēts AISI304 un AISI420 nerūsējošo tēraudu apvirpošanas process, veicot apstrādi ar palielinātu griešanas ātrumu bez dzesēšanas, izveidojot precīzu griezējinstrumentu skaidu laužēja ģeometriju, pielietojot jaunu galīgo elementu metodes analīzes programmatūru Third Wave Advantedge, ņemot vērā griezējinstrumentu pārklājumu biežumus un to kombinācijas. Ir noteikts, ka griešanas temperatūras vērtības ir diapazonā no minimālās – 700 °C līdz maksimālai vērtībai 1150 °C bez dzesēšanas emulsijas. Griešanas temperatūras lauka sadalījums griezošā zonā un instrumenta ;
- 3) Apvirpošanas procesa apstrādātas virsmas raupjuma R_a vērtību atkarībā no apstrādes režīmiem- griešanas ātruma, padeves, iestatīšanas leņķa, un instrumenta nodiluma;
- 4) Vairāki apvirpošanas procesu raksturojoši apstrādes režīmu prognozēšanas matemātiskie modeļi, kas ļauj pēc uzdotā virsmas raupjuma (R_a) izvēlēties tehnoloģiskus apstrādes režīmus: griešanas ātrumu, padevi vai griezējinstrumenta iestatīšanas leņķi divām nerūsējošo tēraudu AISI304 un AISI420 markām ar dažādu struktūru;
- 5) Pielietojot modeļus tika parādīts, kā mainās apstrādes procesa matemātiskais modelis atkarībā no griešanas ātruma palielinājuma.

Praktiskais pielietojums

Dotā pētījumā rezultāti ir nepieciešami “Seco Tools AB “instrumentu ražotāju vajadzībām un šīs kompānijas vietējiem pārstāvjiem.

Eksperimentālie dati tiek izmantoti vairāku zinātnieku publikācijās un promocijas darbu izstrādē, (par ko secina citēšanas dati).

Ir pierādīts, ka dotajā darbā ar Duratomic tehnoloģiju pārklātie griezējinstrumenti var kalpot ilgāk, nekā ir norādīts katalogos, kas rāda lielu potenciālu ražotspējas palielināšanai.

Darba rezultāti ir pielietojami nākamās paaudzes instrumentu un tehnoloģisko procesu izstrādē attīstoties ražošanas procesam Industija 4.0 ietvaros, pielietojot adaptīvo ciparvadības apstrādes procesu monitoringu nolasot apstrādātas virsmas vērtības un veicot korekcijas lai to uzlabot pielietojot matemātisko modeļi.

Promocijas darba izstrādes laika zinātniskie raksti tiek izmantoti vairāku zinātnieku publikācijās un promocijas darbu izstrādē, par ko secina citēšanas dati.

Darba aprobācija

Par promocijas darba galvenajiem rezultātiem sniegti ziņojumi sekojošās konferencēs:

- 1) 6-th ICCSM International Congress of Croatian Society of Mechanics, Sept 30 – Oct 2, Dubrovnik, Croatia.
- 2) 7-th International DAAAM Baltic Conference "INDUSTRIAL ENGINEERING" 22-24 April 2010, Tallinn.
- 3) “16th International Conference "Mechanika-2011”, 6 - 9 April 2011, Lithuania, Kaunas, KTU.
- 4) 10-th international conference VIBROENGINEERING – 2011, October 13-14, Kaunas, Lithuania.
- 5) 8-th International DAAAM Baltic Conference "INDUSTRIAL ENGINEERING" 19-21 April 2012, Tallinn.
- 6) “17th International Conference "Mechanika-2012”, 7- 8 April 2012, Lithuania, Kaunas, KTU.
- 7) 9 th International DAAAM Baltic Conference “INDUSTRIAL ENGINEERING” 24 - 26th April 2014, Tallinn, ESTONIA

- 8) 12-th International Conference “Mechatronic Systems and Materials 2016” , Bialystok, Poland.
- 9) “17th International Conference “Mechanika-2019”, 7- 8 April 2012, Lithuania, Kaunas, KTU.
- 10) Industrial Engineering-2019 , 7- 8 April 2012, Lithuania, Kaunas, KTU.
- 11) 28th International Baltic Conference, MATERIALS ENGINEERING AND MODERN MANUFACTURING 2020, October 22-23, 2020, Kaunas, Lithuania
- 12) 32nd DAAAM International Symposium, 28-29th October 2021, Vienna, Austria
- 13) APMAS 2021, 11th INTERNATIONAL ADVANCES IN APPLIED PHYSICS & MATERIALS. OCTOBER 17-23, 2021, Turkey
- 14) 21st International Scientific Conference Engineering for Rural Development, 25.-27.05.2022. Jelgava, 25.-27.05.2022.Latvia

Publikācijas

- 1) Gutakovskis V., Bunga G., “TURNING WITH HIGH FEEDING”, Proceedings of the 2009 6-th ICCSM International Congress of Croatian Society of Mechanics ISBN 978-953-7539-11-5, Book of abstracts, 156 p, 2009.
- 2) Gutakovskis V., Bunga G., Niemi E., Laakso S., “FINITE ELEMENT METHOD MODELING OF THE STAINLESS STEEL CUTTING PROCESS USING DIFFERENT MACHINING PARAMETERS” RTU ZINĀTNISKIE RAKSTI, TMF, sērija 6, sējums 31, izdevniecība ‘RTU’, 51-55 lpp., 2009.g.
- 3) Gutakovskis, V.; Torims, T., Bunga, G.; STAINLESS STEEL MACHINING WITH NANOCOATED DURATOMIC CUTTING TOOLS, proceedings of the 7th International DAAAM Baltic Conference "INDUSTRIAL ENGINEERING" 22-24 April 2010, Tallinn University of technology, Tallinn, Estonia, 171-176 p.
- 4) V. Gutakovskis, G. Bunga, G. Pikurs., Cutting tool vibration in the metal cutting process, JOURNAL OF VIBROENGINEERING. DECEMBER 2011. VOLUME 13, ISSUE 4. ISSN 1392-8716, Kaunas university of technology, Lithuania, 676-681 pages.,
- 5) Gutakovskis V., Bunga G., Pikurs G., Brutāns V., Ratkus A. An Experimental Study of the Cutting Forces in the Metal Cutting Process // Proceedings of the 8th International DAAAM Baltic Conference "Industrial Engineering", Igaunija, Tallinn, 19.-21. aprīlis, 2012. - 140.-145. lpp.

- 6) V. Gutakovskis, E. Gerins, J. Rudzitis, A. Kromanis, "The Effect of the Cutting Parameters on the Machined Surface Roughness", *Solid State Phenomena*, Vol. 260, pp. 219-226, 2017. (SCOPUS)
- 7) Gutakovskis, V., Geriņš, Ē. Adaptive Control for the Metal Cutting Process. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 2020, Vol. 51, 1.-7.lpp. ISSN 1663-3571. e-ISSN 1663-4144. Pieejams: doi:10.4028/www.scientific.net/JERA.51.1 (SCOPUS)
- 8) Gutakovskis, V., Šteklējns, A., Avišāne, A., Muižnieks, G., Varma-Buddaraju, A. Study and Analysis of Machine and Tool Parameters of Stainless Steel Turning Using Multi Coated Tools. *32nd DAAAM International Symposium: Proceedings*, 2021, Vol. 32, No. 1, 555.-565.lpp. ISSN 1726-9679. (SCOPUS)
- 9) Gutakovskis, V., Avišāne, A, I., Mozga, N. Finite Element Analysis of the Stainless Steel AISI 420 Cutting Process Using Different Machining Parameters to Predict Cutting Forces and Temperature Distribution in the Duratomic-Coated Cutting Tool. In: *21st International Scientific Conference "Engineering for Rural Development": Proceedings. Vol.21*, Latvia, Jelgava, 25-27 May, 2022. Jelgava: LLU Izdevniecība, 2022, ISSN 1691-5976. (SCOPUS)

1. INFORMĀCIJAS AVOTU ANALĪZE

1.1. Instrumentu materiālu attīstības perspektīvas

Materiālu apstrāde ar griešanu sagataves formas izmaiņai ir zināms jau ļoti sen. Tā pielietošanas prakse ir vairāk nekā trīs tūkstošus gadu sena. Mūsdienās griešanas process ir visizplatītākais detaļu izgatavošanas veids. Neskatoties uz to, ka tiek attīstītas un plaši ieviestas tādas precīzu sagatavju iegūšanas metodes, kā liešana, apstrāde ar spiedienu, pulvera metalurģija utt., griešanas pielietošanas apjoms paliek visai liels: 80-85% detaļu sagatavju tiek pakļautas apstrādei ar griešanu. Griešanas operāciju darbietilpība sasniedz aptuveni 50-60% un vairāk no kopējās mašīnbūves izstrādājumu izgatavošanas darbietilpības [1].

Griešanas process pieskaitāms pie formas izmaiņas tehnoloģisko procesu grupas, kuru raksturo materiāla noņemšana no sagataves. Šos procesus pieņemts saukt par izmēra ieguves apstrādes procesiem. To skaitā ietilpst fizikāli-ķīmiskās apstrādes procesi: elektroķīmiskā, elektroerozijas, ultraskaņas apstrāde ar elektronisko un lāzera staru palīdzību u.c. Šīs metodes aizvien biežāk tiek pielietotas mašīnbūvē. Griešanas procesi, salīdzinājumā ar citiem izmēra apstrādes procesiem ir efektīvāki ražīguma, enerģijas patēriņa, ekoloģiskuma, apstrādes precizitātes un kvalitātes ziņā. Pagaidām neviens no zināmajiem materiāla noņemšanas veidiem nespēj konkurēt ar griešanu minētajos raksturojumos.

Prognozes liecina, ka tuvākajās desmitgadēs griešana paliks izmēra ieguves apstrādes galvenā tehnoloģiskā metode mašīnbūvē. Šādas prognozes balstās uz mūsdienu mašīnbūves attīstības tendencēm pilnveidotāku mašīnu izveides virzienā ar paaugstinātiem ekspluatācijas raksturojumiem. Pieaug izmantošanas apjomi materiāliem ar īpašām vai uzlabotām ekspluatācijas īpašībām- karstumizturīgi un grūti apstrādājami sakausējumi, izturīgi pret koroziju, magnētiski, pusvadītāju, dielektriskie un citi konstrukciju materiāli. Jaunie materiāli parasti ir grūti apstrādājami ar griešanu un prasa papildus izdevumus detaļu izgatavošanai. Apstrādājamo materiālu detaļu konfigurācija kļūst sarežģītāka, vienlaicīgi pieaugot prasībām attiecībā uz prasīto virsmu formas precizitāti, izmēru precizitāti un kvalitāti.

Griezējinstrumentu tehniskās iespējas turpina atpalikt no mūsdienu darbagaldu aprīkojuma tehnoloģiskā potenciāla. Kopējā mehāniskās apstrādes procesu darbietilpība palielinās

nestacionāru griešanas apstākļu īpatsvaru. Griešanas apstākļu nestacionaritāte paredz ne tikai nepārtrauktu režīma parametru izmaiņu, piemēram, griešanas ātruma un dziļuma izmaiņas, apstrādājot detaļas ar sarežģītu virsmas formu, bet arī griezošā instrumenta ekspluatāciju dažādos režīmos, kad mainās nogriežama materiāla skaidas šķērsriezuma forma un griešanas ātrums. Visbiežāk praksē sastopama griezošā instrumenta darbs apstākļos, kad nav iespējams apriori izvērtēt tā iespējamus resursus un tā uzvedības statistiskos raksturojumus [1,3,98,99].

Apstrāde ar griešanu, atkarībā no pielietojamā instrumenta, dalās divos pamatveidos: apstrāde ar asmeni (apstrāde ar asmens instrumentu) un abrazīvā apstrāde (apstrāde ar abrazīvo instrumentu). Šo apstrādes veidu pamatā ir materiāla noņemšanas shēma griezošā ķīļa iespiešanas un savstarpējas sagataves un instrumenta pārvietošanās ceļā. Principiāla asmens un abrazīvās apstrādes atšķirība ir sekojoša.

Apstrādē ar asmens instrumentu izpaužas instrumenta un sagataves savstarpējās kustības determinētais raksturs, kuru nosaka griezošā instrumenta ģeometrijas reglamentēto parametru un apstrādājamajā materiālā pārvietošanās savstarpēja kustība. Abrazīvajā apstrādē izpaužas abrazīvā instrumenta darba virsmas un apstrādājamās sagataves savstarpējās iedarbības stohastiskais raksturs. To nosaka abrazīvo graudu griezošo malu ģeometrisko parametru, to orientācijas un izvietošanās, un instrumenta darba virsmas izmaiņu gadījuma raksturs.

Cita asmens un abrazīvās apstrādes principiāla atšķirība ir iespējama nogrieztā slāņa biezums. Minimālais slāņa biezums ar griezošā ķīļa (ar noapaļošanās rādiusu r) iegriešanos var sasniegt lielumus $(0,2 \pm 0,05)r$.

Abrazīvo graudu griezošo malu noapaļošanās rādiusi mainās no 2 līdz 36 μm un, minimālais nogrieztā slāņa biezums ir 1 μm un mazāk. Asmens apstrādē mazākais nogrieztā slāņa biezums virpošanā, piemēram, ar dimanta griežņiem sasniedz lielumus 0,01-0,02 mm, t.i. lielumi ir 10 un vairāk reizes lielāki, nekā abrazīvajā apstrādē.

Atšķirības instrumenta un detaļas apstrādājamās virsmas mijiedarbības mehānismos asmens un abrazīvās apstrādes procesos ir iemesls griešanas zonas termodinamiskā stāvokļa būtiskām atšķirībām norādītajos procesos. Tā rezultātā rodas siltuma vai spēka faktoru pārsvars apstrādes laikā [21,22,].

Neskatoties uz to, ka griešanas process ir zināms un tiek pielietots jau ļoti sen, griešanas teorijas attīstības vēsturei ir tikai mazliet vairāk nekā simts gadu. Griešanas procesa izpētē pašlaik

var iedalīt divus darbu pamatvirzienus: darbi, kas saistīti ar griezošā instrumenta uzvedību (nodilums, izturība, darbaspējas paaugstināšanas metodes u.c.), un pētījumi, kas saistīti ar apstrādājamā materiāla uzvedību griešanas apstākļos (skaidu veidošanās mehānisms, detaļas virsslāņa īpašību veidošanās u.c.). Griešanas teorijas uzdevums ir apvienot šos virzienus vienotā instrumenta un apstrādājamās detaļas materiāla mijiedarbības kompleksā.

Griešanas process – tas ir prevalējošas plastiskās deformācijas process. No plastiskās deformācijas atkarīgs siltuma režīms un instrumenta darba virsmu kontaktslodze, kā arī to nodiluma intensitāte un raksturs. No plastiskās deformācijas un materiāla uzkaldes mehānisma noritēšanas rakstura ir atkarīga apstrādājamās detaļas virsslāņa precizitāte, raupjums un kvalitāte. Vienotas griešanas teorijas izveide, pamatojoties uz plastiskās deformācijas analīzi tomēr sastopas ar zināmu duālismu: tās teoriju pamatā ir divas dažādas pieejas: mikroskopiskā un makroskopiskā [71,72,73,76].

Mikroskopiskās metodes pamatā ir cieta ķermeņa fizikas stāvokļi, konkrēti, dislokāciju teorija un tā pēta deformējamo materiālu kā ķermeņi ar diskretu struktūru, ko nosaka tā atommolekulārā uzbūve.

Makroskopiskā pieeja, kura balstās uz nepārtrauktas vides mehānikas stāvokļiem. Šeit attiecināmi tā saucamie ideālie stingri plastiskie un uzkaldināmie cietie ķermeņi, katram no tiem raksturīga sava funkcionālā saikne starp spriegumu un deformāciju, ko apskata dažādas matemātiskās plastiskuma teorijas.

Griešanas teorijas vēsture ļauj izdalīt divus savas attīstības etapa un principiālos aspektus. Pēc metodoloģiskā aspekta, no savas izveides brīža līdz 80-tajiem gadiem griešanas teorija veidojusies un attīstījusies uz determinisma principu bāzes, t.i. uz stingras visu notiekošo procesu savstarpējās atkarības principiem. Pie sapratnes, ka ir nepieciešams noteikt statistiskās vai iespējamās saiknes starp parādībām, kas notiek apstrādes zonā, griešanas jomas pētnieki nonāca ievērojami vēlāk nekā fiziķi. Un jau tagad ir skaidrs, ka kopējā griešanas instrumenta nodilšanas teorija, ieskaitot tā atteikumu un drošības jautājumus, var tikt veidota tikai kā statistiskā teorija. Pašlaik uz varbūtības principiem attīstās arī priekšstati par apstrādājamā materiāla uzvedību griešanas apstākļos.

Pēc teorētiskā aspekta, griešanas teorija ir vienmēr bijusi vērsta uz mašīnbūves ražošanas praktisko problēmu risināšanu, un šajā sakarā tā ir attīstījusies kā lietīšķā teorija uz fizikas, ķīmijas,

termodinamikas u.c. fundamentālo zināšanu bāzes. Aktuāla ražošanas problēma iepriekš un pašlaik paliek darba ražīguma paaugstināšana griešanas operācijās. Pie pastāvīga nogriežamā slāņa šķēluma vai pastāvīgas noņemšanas materiāla daudzuma par dominējošo griešanas procesa ražīguma paaugstināšanas faktoru kļūst griešanas ātrums.

Griešanas ātrums spēlē galveno lomu arī kā procesa teorijas parametrs. No tā izmaiņām atkarīgs griezošā instrumenta nodiluma raksturs un intensitāte, temperatūra apstrādes zonā utt. Pamatpasākums griešanas ātruma un, sekojoši, arī procesa ražīguma palielināšanai līdz 50-60-jiem gadiem bija jaunu griezējinstrumentu materiālu izveide: oglekļa instrumentālie tēraudi, ātri griezošie tēraudi, metālkeramiskie cietie sakausējumi, keramika, īpaši cietie materiāli, kā arī instrumenta darbaspējas paaugstināšanas metožu izstrāde: nostiprināšanas ceļā un instrumentus pārklājot ar nodilumizturīgiem pārklājumiem.

Detalju izgatavošanas tehnoloģisko procesu projektēšanas automatizēto sistēmu izveide un ieviešana, kā arī pašu izgatavošanas procesu automatizācija, pielietojot elektroniskās skaitļošanas mašīnas, griešanas teorijai izvirza sarežģītus uzdevumus. Uz padziļinātu fizisko pētījumu pamata jāformalizē visas griešanas procesa likumsakarības, kuras nosaka tā ražīgumu, precizitāti, kvalitāti un, visaktuālāk, tā drošību.

Veidojamajiem matemātiskajiem modeļiem jāatšķiras ar augstu precizitāti un universālumu dažādas klases izskaitļojamās tehnikas izmantošanai. Saskaņā ar speciālistu ekspertu novērtējumiem, tuvāko 5-10 gadu mašīnbūves attīstības [1 - 6] ir gaidāms, ka mehāniskās apstrādes tehnoloģija attīstīsies sekojošos virzienos:

- griešanas procesa precizitātes un ražīguma paaugstināšana vismaz par 5..10 reizēm;
- metālapstrādes darbapdevu izveide kombinētai apstrādei (asmens, abrazīvā, virsmas uzkalšanas, plastiskā deformēšana, termiskā, elektroķīmiskā) un automatizētai sagataves padevei;
- dažāda tipa tehniskā aprīkojuma izveide uz agregātmoduļu pamata (kalšanas, frēzēšanas, slīpēšanas, urbšanas, zobapstrādes);
- ar adaptīvu izgatavojamo izstrādājumu kvalitātes vadību tehnoloģisko sistēmu plašs pielietojums.

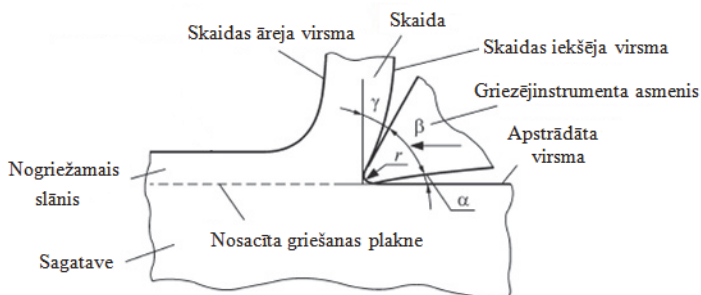
Saskaņā ar minēto prognozi griešanas teorijas attīstībā prioritāri akcentēta ir apstrādes tehnoloģisko uzdevumu automatizāciju.

1.2. Griešanas procesa jēdzieni un termini

Jebkuras problēmas risināšanas zinātniskā pieeja attīstās tad, kad ir noformulēts pētīšanas priekšmets, tā termini un apzīmējumi, uzdevumi, pētījuma mērķis un tā sasniegšanas metodes. Šajā ziņā griešanas teorija ir harmoniska jēdzienu, skaidrojumu, terminu utt. Sistēma, skaidrojumi, termini u.c. sākuši veidoties jau pirmajos teorētiskajos darbos, un šis process turpina norisināties arī pašlaik.

Zemāk minēti griešanas procesa jēdzieni un termini, kuri tiek izmantoti šajā promocijas darbā un ir nepieciešami izklāstīto tajā teorētisko un eksperimentālo pētījumu rezultātu izpratnei.

Materiālu apstrāde ar griešanu – tas ir tehnoloģisks detaļas izveidošanas process, ievērojot uzstādīto formu, izmērus un virsējā slāņa kvalitāti, nogriežot uzlaidi no sagataves kā skaidu. Principiāla griešanas procesa shēma ir parādīta att. 1.1.



1.1.att. Griešanas procesa shēma [Autora attēls].

Kā apstrādājamo virsmu saprot sagataves virsmu, kura daļēji vai pilnībā tiek atdalīta griešanas laikā. Apstrādātā virsma ir virsma, kas veidojas uz sagataves pēc materiāla slāņa atdalīšanas. Uzlaides novirzīšana no sagataves griešanas procesā notiek, iedziļinot griezošo instrumentu apstrādājamajā materiālā un relatīvi abiem pārvietojoties. Līdz laika brīdim, kamēr apstrādājamais materiāls virzās uz instrumenta griezošās malas pusi, tā materiāla daļa, kura atrodas augstāk par nosacīto griešanas plakni, tiek saukta par nogriežamo slāni. Zemāk būs atainots, ka nogriežamā slāņa daļai jeb apstrādājamai virsmai (ne visai precīzs apzīmējums) ir būtiska loma griešanas zonas plastiskajā deformācijā.

No brīža, kad nogriežamais slānis šķērso nosacīto līniju, kas tiek saukta par novirzes plakni, tas kļūst par skaidu. Skaidu apzīmēšanā izmanto tādus jēdzienus, kā ārējā vai ārpusē virsmas, kā arī iekšējā vai griezumā virsma.

Instrumenta griezošā asmens leņķis β ir pamatleņķis kas nodrošina labvēlīgus tā iegriešanās apstākļu apstrādājamajā materiālā. To nosaka priekšējais γ un aizmugures leņķis α . Liela ietekme uz griezošā instrumenta izturību, iespējamo griešanas dziļumu un, īpaši, uz apstrādājamā materiāla pretošanos griezošā ķīļa iegriešanai ir griezošās šķautnes noapaļojuma rādiusam r .

Griešanas zona – tā ir apstrādājama materiāla daļa, kurā norisinās fizikāli ķīmiskie procesi un parādības, kas nepieciešamas jaunu virsmu izveidei. Kontaktā ar griešanas zonu atrodas instrumenta asais ķīlis. Griešanas zonas konfigurāciju ierobežo nogriežamā slāņa ārējā virsmas, skaidu balsta daļa un plastisko un elastīgo deformāciju izplatība instrumenta kustības virzienā un zem tā aizmugurējās daļas. Kā tehnoloģisko griešanas sistēmu izprot visu tās sastāvdaļu pamatelementus – darbgaldus, ierīci, instrumentu un detaļu, kuri atbild par efektīvu griešanas procesa realizāciju un tiek pētīti mijiedarbībā, izmantojot statisko un dinamisko stingumu, tehniskās iespējas nodrošināt noteiktās ražīguma, ekonomiskuma, precizitātes, kvalitātes prasības, un citas īpašības [7].

Tehnoloģiskie griešanas apstākļi iekļauj griešanas procesa efektīvas realizācijas nepieciešamo nosacījumu kompleksu. Tas ir komplekss jēdziens, kurš apvieno vadāmos apstrādes parametrus, kuri tiek noteikti konkrētai griešanas tehnoloģiskajai sistēmai. Pie tiem pieder: instrumenta materiāls un tā konstruktīvi ģeometriskie parametri, griešanas režīma parametri, dzesēšanas emulsijas sastāvs, nodiluma veids un intensitāte u.c.

Zināmo griešanas procesu pamatā ir trīs relatīvi dažādi uzlaides nogriešanas mehānismi, kas ļauj tos klasificēt:

- kvazinepārtrauktā griešana (virpošana, ēvelēšana), kurā materiāla atdalīšana notiek nepārtraukti noteiktā laika periodā;
- diskrēti determinētā griešana (frēzēšana, caurvilkšana, urbšana u.c.), kurā uzlaides atdalīšana notiek determinētos griešanas apstākļos ar ģeometriski noteiktiem griezošajiem asmeņiem;
- diskrēti stohastiskā griešana (slīpēšana un visas citas abrazīvās apstrādes metodes) ar materiāla atdalīšanu ar abrazīvā instrumenta statistiski nenoteiktiem griezošajiem elementiem.

Realizējot griešanas procesu, saskaņā ar tā vadības strukturshēmu metāla atdalīšana kā tehnoloģiskais process iegūst jaunas īpašības, kuras dod pamatu griešanu saukt par optimālu.

Jēdziens “optimāla griešana” speciālistu vidū netiek izmantots un, tāpat, netiek izmantots arī literatūrā. Tiek apspriests, piemēram, griešanas procesa optimālums tā realizācijas izvēlēto kritēriju atbilstības ziņā vai tā saucamie optimāluma kritēriji: materiāla atdalīšanas maksimālais ražīgums, minimāla griezošā instrumenta izmēra nodiluma intensitāte, operācijas pašizmaksas u.c.

Griešanas optimālums kā speciālas optimizācijas procedūras rezultāts ir konkrēts optimālas griešanas gadījums, kurš orientēts uz vienu no iespējamajiem optimalitātes kritērijiem.

Optimāla griešana – ir apstrādājamās virsmas izveide ar noteiktām ģeometriskajām un fizikāli mehāniskajām īpašībām (ieskaitot detaļas virsslāņa stāvokli) ar minimāli iespējamu, paredzamu un stabilu laika ziņā griešanas pretestību, ar noteiktiem atdalīšanas ātruma vai ražīguma, resursa un griezošā instrumenta drošības parametriem. Šajā skaidrojumā atainotas mūsdienu prasības attiecībā uz griešanu kā uz svarīgu detaļu izmēra formizveides tehnoloģisko procesu, t.i. tiek ņemta vērā paaugstināta ekspluatācijas drošība. Šajā skaidrojumā ir domāts, ka procesa funkcionālo parametru noteiktība un to gala rezultāts kā nepieciešamais to izpildes nosacījums – materiāla atdalīšanas vadība plašā izpratnē. Ņemot vērā apstrādājamā materiāla, griezošā instrumenta nodilšanas un visas griešanas tehnoloģiskās sistēmas kopumā uzvedības stohastisko dabu, nodrošināt optimālas griešanas norādītos teorētiskos un praktiskos priekšnoteikumus ir ļoti grūts uzdevums. Nepieciešams vienot vienā veselumā dažādas polaritātes apstrādājamā materiāla un griezošā instrumenta reakcijas mehānismus griešanas sistēmā ar konkrētām īpašībām.

Nozīmīga pielietojuma detaļās paredzama tādu materiālu izmantošana, kuru ķīmiskais sastāvs, struktūra un fizikāli mehāniskās īpašības ievērojami izceļas kopējajā konstrukciju materiālu vidū. Tos izceļ augsti izturības, cietības, korozijas izturības u.c. rādītāji, turklāt, bieži novērojamas minēto rādītāju kombinācijas.

Šī promocijas darba vispusīgas izpētes priekšmets ir griešanas procesa ar asmens instrumenta fizika un tā modelēšana ar apstrādes tehnoloģisko režīmu kombināciju.

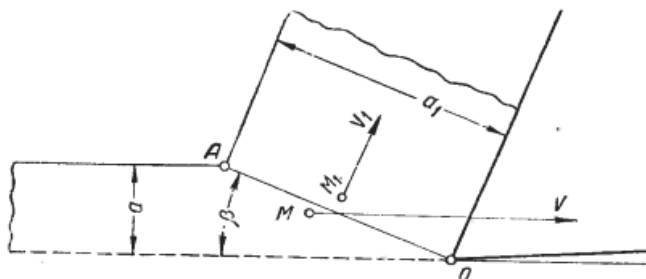
Griešana ar asmens instrumenta izmantošanu ir īpatnēja, tai ir atšķirības, ar kurām tā principiāli atšķiras no citām formas izveides metodēm un kuras nepieciešams ņemt vērā tās analizē:

- instrumenta un apstrādājamās sagataves mijiedarbības ģeometriski nosakāmie apstākļi; šos apstākļus pietiekami precīzi nosaka gan statikā, gan procesa dinamikā, ieskaitot iespējamās griezošās asmeņa svārstības griešanas laikā;
- nepārtraukta, noteiktā laika ilguma spēka iedarbība uz apstrādājamo materiālu un griezošā ķīļa pārvietošanās attiecībā pret sagataves apstrādājamo virsmu ar raksturīgu slodzes sadali pa griezošā ķīļa iespiežamo virsmu;
- formas izveide, noņemot lieko materiālu skaidu izskatā – ciets ķermenis ar izejmateriālu principiālo īpašību saglabāšanu (atšķirībā no, piemēram, fizikāli ķīmiskajiem apstrādes veidiem, kuros liekais materiāls izšķīst vai iztvaiko);
- apstrādājamā materiāla uzturēšana stabilā struktūrstāvoklī griešanas laikā, kas nodrošina tā sagraušanas vadāmību.

1.3. Skaidas veidošanās procesa elementi

Skaidas veidošanas process pie brīvās griešanas ir vienkāršākais griešanas piemērs. Ir zināms [8], ka šāda veida procesu var apskatīt kā plakanās deformācijas gadījumu, ja metāla griešanas slāņa platums ir ievērojami lielāks par viņa biezumu. Nosacīti sauksim tādu procesu par “plakanās skaidas veidošanas procesu”, jo šāds termins precīzāk apraksta dotā procesa specifiku.

Pirmo reizi plakanās skaidas veidošanas procesu ieteica krievu zinātnieks Time . Time shēma guva tālāku attīstību Zvorikina [7] darbos. Time – Zvorikina shēma att.1.2., kur griešanas ātruma virziens ir rasējuma plaknē. Balstoties uz šo shēmu, nogrieztais metāla slānis a pārvēršas par skaidu ar biezumu a_1 , nobīdoties no plaknes OA , noliekta pie griešanas plaknes zem leņķa β .



1.2.att. Time – Zvorikina skaidas veidošanas procesa shēma [7].

Time – Zvorikina shēma savā laikā bija visai noderīga, jo tā ļāva spert pirmo soli skaidas veidošanās procesa izpratnē. Tomēr tā nevar tikt izmantota skaidu veidošanās mehānisko vienādojumu sastādīšanai, kurus varētu izmantot skaitliskiem aprēķiniem.

Pēdējos gados Time – Zvorikina shēma un analītiskās atkarības, kas iziet no tās, tika izmantota vairāku autoru literatūrā (piem. Merčents [8], Kristofs [8]) veidojot skaidas veidošanas mehānisko procesu pamatus.

Pie galvenajiem Time – Zvorikina shēmas trūkumiem pieskaita: nogriežama slāņa un skaidas saskarsmes punkta vienmērīgas pārējas neesamību (punkts A att.1.2.) un tikai vienu bīdes plakni OA.

Turklāt, reāli nevar pastāvēt tikai viena nobīdes plakne, jo tas ir pretrunā ar plastiskuma, kā arī elementārās mehānikas likumiem.

Apskatot apstrādāta materiāla mazas daļiņas pārvietošanu rasējumu plaknē (skat. att.1.2.) no punkta M, kas atrodas zemāk par bīdes plakni, punktā M1, kas atrodas augstāk par bīdes plakni.

Punktā M, kas atrodas tuvu pie bīdes plaknes, daļiņu pārvietošanas ātrums, attiecībā pret griezes elementu, tiks virzīta paralēli griešanas plaknei un skaitliski būs vienāda ar griešanas ātrumu. Punktā M1, atrodoties tuvu bīdes plaknei, daļiņu pārvietošanās ātruma, attiecībā pret griezes elementu būs paralēls to priekšējai virsmai un pēc lieluma ξ reizes mazāk nekā griešanas ātrums (ja ξ – skaidas sarukums).

Ja pieņem, ka apstrādājamajam materiālam nav pretestības spēku plastiskai deformācijai, t.i. viņš uzvedas kā ideāls šķidrums, tad arī pie šādiem nosacījumiem bīdes spriegumi uz plakni AO būs bezgalīgi lieli, jo bezgalīgi lieli ir apstrādājamā materiāla daļiņu ātrumi, kas iziet caur bīdes plakni.

Tātad, ja mēs apskatītu ideāla materiāla griešanu, tās reālās īpašības būtu nepārtrauktība un inerce, tad arī šajā gadījumā būtu nepieciešams atteikties no vienas plaknes shēmas un pāriet pie paralēlas bīdes plakņu shēmas. Citiem vārdiem sakot, ir nepieciešams pieņemt, ka „nogriežtais slānis” un „skaida” ir daļīti ar īpašo pārējas deformācijas zonu ar noteiktu biezumu. Vēršoties pie gadījuma, kad tiek griezts reālais materiāls, kuram piemīt noteiktā plastiskās deformācijas pretestība un sacietēšana, var redzēt, ka šajā gadījumā pārējas zona ir vairāk acīmredzama, pat ja neievēro masu spēku efektu. Vienas bīdes plaknes shēma, kas izplatās uz doto gadījumu, noved

pie secinājuma par bezgalīgi lielu tangenciālo spriegumu esamību bīdes plaknē. To var secināt no plastiskuma nosacījumiem, ja apstrādājamo materiālu sacietēšanas transformācijā skaidā ir to gala vērtība.

Līdz ar to, plastiskuma nosacījumi un bezgalīgi liela spriegumu gradienta pastāvēšanas neiespējamība pie plastiskās deformācijas nosaka plastisko gala biezuma parējās zonas esamību, neatkarīgi no masu spēka efekta.

Analoģisko analīžu rezultātā varētu parādīt, ka galējā biezuma parējās plastiskas zonas esamība ir nepieciešama arī tajā gadījumā, kad apstrādājamajam materiālam nepiemīt uzkalde, kurš uzvedas kā viskozs šķidrums.

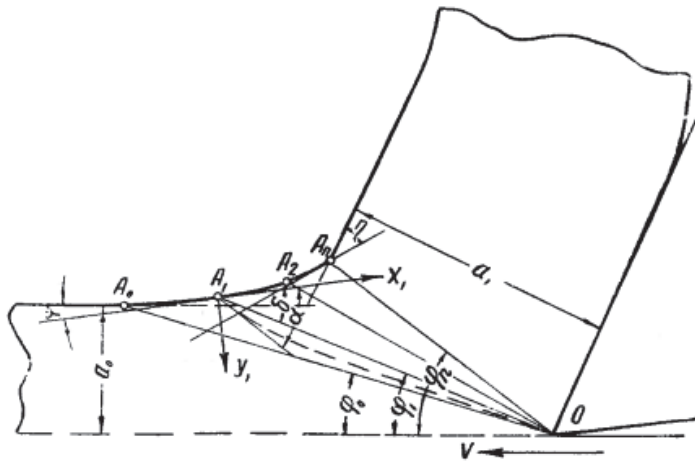
No iepriekš sacītā ir skaidrs, ka skaidas veidošanas mehānisko procesu izstrādāšanā nevar balsīties tikai uz Time – Zvorikina shēmas, jo tā ir pretrunā ar bāzes elementārās un plastiskās mehānikas likumiem, neatkarīgi no tā, kādas ir apstrādājamā materiāla īpašības. Tāpēc nevar piekrist amerikāņu autoru [9] centieniem paskaidrot Merčena darbos izteikto domu, par īpašām apstrādājamo materiālu plastiskām īpašībām, kas it kā parādās griešanas laikā [90].

Tādā veidā, izejot no kopīgiem apsvērumiem, ir jāpieņem, ka elastīgi saspringtam nogrieztajam metāla slānim un skaidai jāatrodas plastiski saspringtā pārejas zonā, kuras biezums pielīdzināms nogrieztā slāņa biezumam.

Briks izteica domu [10], ka plastiskās nobīdes nogrieztajā slānī notiek pēc plakņu līdzības, kas ir izvietotas vādekļveidīgi un kuras iziet caur griešanas elementa asmeni. Briks parādīja, ka ārējās nogriežamā slāņa virsmas un skaida nekrustojas un ir atdalītas ar pārejas virsmu A_0A_n .

Tādā veidā, Briksa shēma pārvarēja divus galvenos Time-Zvorikina shēmas trūkumus, kuri tika minēti iepriekš. Bet Briksa shēmai bija citi trūkumi. No šiem trūkumiem ir jāmin trīs.

Pirmkārt, Briks pieļāva, ka pārejas virsma līdzieni nesaskaras ar ārējo skaidas platību, bet krustojās ar to tā, ka saskarsmes plakne pie parējās virsmas punktā A_n veido ar ārējo skaidu leņķi η (att.3.), kurš ir aptuveni vienāds ar griešanas pusleņķi.



1.3.att. Briksa plakanā skaidu veidošanas procesa shēma [10].

Tādā veidā, apstrādājamo materiālu daļiņām, izejot plakni A_nO , vajadzētu būt ar bezgalīgi lieliem pātrinājumiem un ar izrietošajām sekām.

Otrkārt, Briks neņēma vērā spriegotā stāvokļa grūtības faktoru, kas atrodas pretrunā ar bīdes plakņu izvietojumu, kuru viņš pats bija piedāvājis.

Treškārt, Briks apgalvoja, ka vienādas tangenciālo spriegumu virsmas īstenībā ir plaknes. Tāds apgalvojums ir pretrunā ar acīmredzamiem robežu nosacījumiem parējās virsmā. Lai pārliecinātos par to, ir pietiekami apskatīt elementa sprieguma stāvokli parējās virsmā.

Apskatot parējās plaknes un caurejošās plaknes krustojuma līkni (līkne A_0A_n), vienmēr var atrast tādu punktu A_1 , kur leņķis δ starp tangenciālo līkni un taisni OA_1 būs mazāks par $\pi/4$.

Savienojot taisnstūra koordinātu sākumu X_1Y_1 ar punktu A_1 un orientējot asi X_1Y_1 tangenciālā un normālā virzienā caurejas līknē, apskatīsim plakanā elementa sprieguma stāvokli.

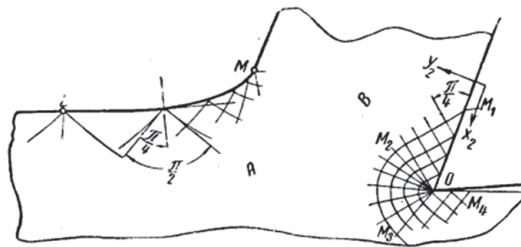
Ir viegli pamanīt, ka šajā gadījumā galvenie spriegumi būs σ_{x1} un σ_{y2} . Tik tiešām, spriegumi σ_{y1} un τ_{x1y1} ir vienādi ar nulli, jo nekādi spēku ārējā parējās virsmā nav pielikti. Bet ja tas ir tā, tad maksimālo tangenciālo spriegumu līnijas punktā A_1 veidos leņķi a^* ar koordinātu asīm, kas būs vienāds ar $\pi/4$. Tādā veidā, maksimālo tangenciālo spriegumu līnijas nesakrītīs ar taisni OA_1 , kā to ir apgalvojis Briks, tie pieņems līknes izskatu, kura tiks vērsta ar izliekumu apakšā, kā tas tiek parādīts att.1.3. ar pārtrauktu līniju.

Neskatoties uz minētiem trūkumiem, Briksa piedāvāta skaidu veidošanas procesu shēma tiek uzskatīta par veiksmīgu.

Zināšanu līmenis par plastiskām īpašībām, kas eksistēja Briksa laikā, neļāva viņam, analizējot savu shēmu, izmantot visas esošās faktorus. (Piem., viņš pieņēma, ka starp spriegumiem un bīdes plastisko deformāciju ir lineāra atkarība). Turklāt, Briks savos secinājumos nevarēja ievest korektīvas, kas ieviestu labojumus viņa shēmās.

No visā teiktā var secināt, ka griešanas procesu mehānikas uzbūves uzdevums ir jārisina ar tālāku skaidas veidošanas shēmas attīstību balstoties uz Briksa hipotēzi. Zemāk tiks aprakstīta viens no šī virziena mēģinājumiem [10].

Ja pieņem, ka ideāli plastisks materiāls berzes spēku neesamības gadījumā, ar sprieguma stāvokli zonās, kuras pievienojas parējās līknei (zona A) un griešanas apmalei (zonā B), var aprakstīt ar slīdes līnijām, kā attēlots att.1.4.



1.4.att. Slīdēšanas līnijas zonā A, kura saskaras ar parējās virsmu un kura pievienojas griešanas apmalei zonā B, pieņemot, ka kontakta virsmas berzes koeficients ir vienāds ar nulli. [10].

Slīdes zonā A izskatās, kā abpusēju ortogonālu līkņu pāris, turklāt to tangenciālais pāra leņķis ir nemainīgs kustības laikā gar šīm līnijām.

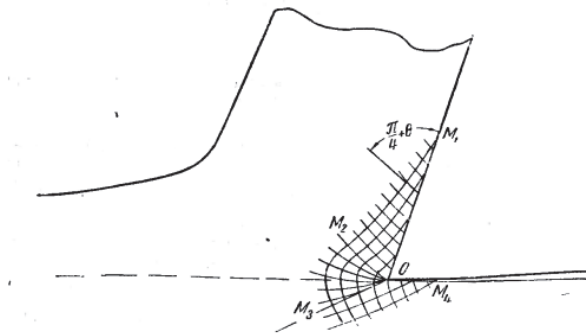
Krustpunktā ar parējās līkni tangenciālie leņķi pie slīd līnijām un normālie pie parējās līknes veido $\pi/4$ leņķi. Tas ir saistīts ar to, ka normāles pie pārejas līknēm pēc virziena sakrīt ar vienu no galvenajiem spriegumiem.

Tuvojoties L un M punktiem, kur parējās līkne savienojas ar noņemamā slāņa un skaidas taisnvirziena robežām, slīdēšanas līnijas samazina savu liekumu un tiecas pārvērsties taisnās līnijās.

Slīdlīnijas šajā gadījumā būtu logaritmiskās spirāles, jo tās šķērsotu vektorus-rādiusus, kuri ir vilkti no riņķa līnijas centra zem konstantiem leņķiem. Zonā B var apskatīt trīs apgabalus. Apgabals M_1OM_2 tiek raksturots ar divām taisņu kopām, savstarpēji ortogonālām slīdēšanas līnijām, kuras šķērso priekšējo skaldni ar $\pi/4$ leņķiem. Apgabals M_2OM_3 ar īpašo punktu O , caur kuru iziet slīdēšanas līniju kopa, izskatās, ka taisņu kūlis. Otra kopa sastāv no koncentriskiem riņķa līnijas lokiem. Apgabalā M_3OM_4 slīdēšanas līnijas ir taisnas un tās šķērso aizmugurējo skaldni ar leņķi $\pi/4$, ja iedomājas, ka aizmugurējās skaldnes un apstrādājamās virsmas kontakts eksistē. Protams, kontaktu virsmās berzes esamības gadījumā, kopu raksturlielumi atšķirsies, jo mainās robežnosacījumi. Tā, piemēram, zonā M_1OM_2 berzes spēki starp skaidu un priekšējo skaldni izraisīs slīdēšanas līniju pagriezienu virzienā, kas pretējs pulksteņrādītāja virzienam. Berzes spēki aizmugurējā skaldnē, attiecīgi izraisīs slīdēšanas līniju pagriezienu pulksteņrādītāja virzienā zonā M_3OM_4 . Tādā veidā, berzes spēku iedarbība izraisīs apgabala M_2OM_3 sašaurināšanos.

Atzīmēsim to, ka apgabala M_2OM_3 sašaurināšana dotajā gadījumā ir veikta saskaņā ar novērojumiem par berzes spēku ietekmi uz skaidas sarukšanu.

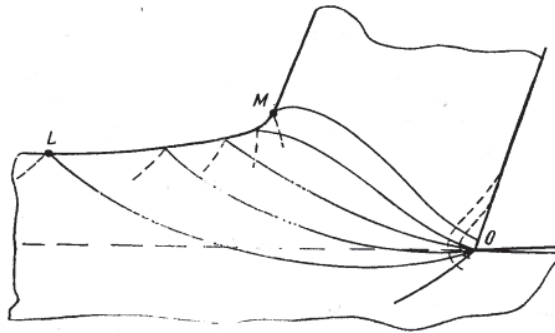
Sarukšana tiešām palielinās līdz ar berzes koeficienta palielinājumu, bet, tā kā ar sarukšanas palielinājumu samazinās slīdēšanas līniju slīpums, ir acīmredzams fakts, ka zona M_2OM_3 sašaurināšanās (att.1.5.). Nav nepieciešamības pierādīt, ka slīdēšanas līniju orientācija zonā B ar perpendikulāra leņķa samazinājumu mainīsies tāpat, kā tā mainījās līdztekus berzes koeficienta pieaugumam.



1.5.att. Slīdēšanas līnijas zonā, kura tieši saskaras ar griešanas apmali, pieļaujot, ka berzes koeficients kontakta virsmā nav vienāds ar nulli [11].

Ievērojot sacīto, var iztēloties bīdes līniju izvietojumu uz visās plastiskās zonas apmērām tādā veidā, kā tiek atainots att.1.6.

Vienlaidus bīdes līnijas, kas iet caur plastisko zonu LOM , tiek atainotas tā, ka to sākums un beigas sakrīt ar attiecīgām slidinājām zonās A un B.



1.6.att. Shematiskais slīdēšanas līniju attēlojums plastiskajā zonā pie plakano skaidu veidošanās [11].

Lai pārbaudītu, cik tieša ir plastiskuma apgabala forma un bīdes trajektorija, kas tiek atainotas 1.5.att., tika veikti eksperimenti [10 -14].

Eksperiments tika veikts apstākļos, kas praktiski izslēgtu to faktoru iedarbību, kuru loma netika apskatīta, t.i. ātrums, temperatūra un plakana uzķepuma veidošanās. Tāpēc tika izmantota eļļošana ar ūdeni un griešanas ātrums bija tikai 0.002 m/min. Tik lēns ātrums tika panākts ar diferenciālo palēnināšanas mehānismu, kas tika iekļauts galvenās piedziņas mehānismā.

Pirmā eksperimentu daļa beidzās ar to, ka griešanas procesā tika novērotas bīdes līnijas uz apvirpotā diska sānu pulētās virsmas.

Bīdes līnijas diezgan skaidri bija pamanāmas tikai zemākajā plastiskā apgabala skaldnē. Bīdes līnijas plastiskā apgabala iekšienē un pie tā ārējās skaldņu robežas nevarēja vērot tieši, jo šajās vietās plastiskās zonas sānu virsma zaudēja savu sākotnējo gludumu un kļuva plakana. Slīdēšanas trajektorijas plastiskās zonas centrā varēja iztēloties, tikai nosakot iepriekš apzīmēto punktu nobīdi.

Apakšējā plastiskā zonas skaldne tika izteikta tik precīzi, ka tās orientāciju varēja fiksēt ar okulār-mikrometra palīdzību, apstādinot griešanas procesu.

Darbam ar 0,002 m/min ātrumu bija lielas priekšrocības arī tajā sakarā, ka, apstādinot galveno piedziņu, nebija nekādu redzamu izmaiņu plastiskās zonas formā. Tādējādi, katrs griešanas procesa brīdis tika fiksēts sīkākai analīzei, bez jebkādiem iegūto rezultātu zaudējumiem.

Ir arī jāatzīmē, ka apakšējā plastiskā apgabala robeža pie reāla polikristāliskā metāla griešanas nav stabila. Sakarā ar atsevišķu kristālu dažādu kristalografisko plakņu orientāciju, bīdes parādās pie dažādiem spriegumiem. Tā kā atsevišķi kristāli ieņem ievērojamu daļu plastiskā apgabala apakšējā robežā, tas izraisa vietējo deformāciju uz vienu vai otru pusi, vai arī pat kopīgo nobīdi. Tādā veidā var runāt tikai par ticamāko plastiskās zonas robežas novietojumu, kas var tikt noteikts vairāku novērojumu rezultātā. Šādas līklīnijas robežas noteikšana pat vienam īpašam griešanas gadījumam ir visai darbietilpīgs darbs, kura rezultāti ietvers sevī apraksta vērtību. Tāpēc dotajos eksperimentos vērojumiem bija kvalitatīvs raksturs: Noteikt plastiskās zonas apakšējās robežas liekuma zīmi, kā arī noteikt – vai šī robeža šķērsos griešanas virsmu.

Vērojumi parādīja [15-20], ka visos gadījumos liekumam bija pozitīva zīme un plastiskās zonas apakšējā robeža šķērsoja griešanas virsmu, t.i. tika apstiprināts tas, kas tiek atainots 1.5. attēlā Novērošanas laikā tika fiksēts punkts M, mērot attālumus OM un skaidas sarukšanu, kā arī noteiktas divas griešanas spēku projekcijas. Ja pieņemt, ka to ir darījis Briks, pieņemot, ka slīdēšanas līnijas ir taisnas un iziet caur punktu O, tad balstoties uz datiem, varētu noteikt tangenciālos spriegumus gar OM līniju pēc formulas [20] (1.1):

$$\tau_1 = \frac{R \cdot \cos \left(\arccos \cdot \frac{\alpha \xi}{\rho_1} + \operatorname{arctg} \cdot \mu \right)}{\rho_1} \quad (1.1)$$

kur τ_1 – tangenciālie spriegumi gar taisno līniju, kas savieno punktus OM;

R – priekšējās robežas spēks, kas iedarbojas uz nogrieztā slāņa platuma vienību;

ξ – skaidas sarukums;

μ – skaidas un priekšējās skaldnes berzes koeficients;

α – nogrieztā slāņa biezums;

ρ_1 – OM attālums.

Ņemot vērā datus par skaidas sarūkšanu, ar formulas 1.1 palīdzību var noteikt relatīvo nobīdi gar OM līniju un tālāk, izmantojot nobīdes diagrammu, var atrast attiecīgo tecēšanas robežu ar nobīdi τ_s .

Formula (1.1.), kura tika iegūta, saskaņā ar pieņēmumiem par taisnvirziena maksimālām tangenciālām sprieguma līnijām, dod pārmērīgi paaugstinātus lielumus. Interesanti atzīmēt, ka atšķirība starp τ_s un aprēķināto vērtību τ_1 ir lielāka, ja lielāks ir priekšējais leņķis un mazāks ir nogrieztais slānis.

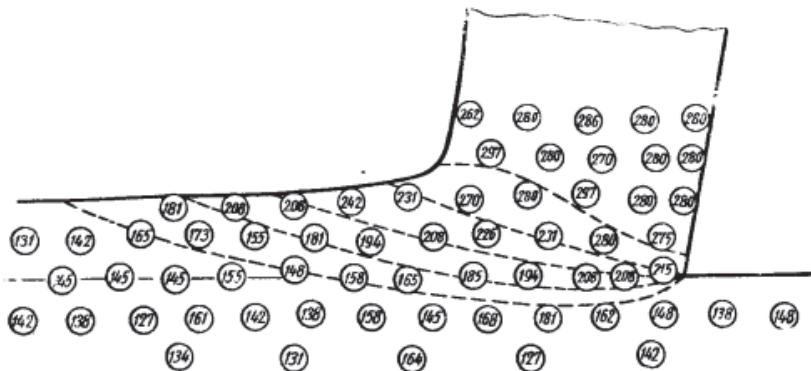
Citos eksperimentos [15-20] , tika noteikts, ka starpība starp šiem lielumiem augs, samazinot berzes koeficientu. No šejienes varam secināt, ka visi faktori, kas samazina attālumu starp zonām A un B, palielina atšķirību starp aprēķināto vērtību τ_1 un faktisko τ_s . Tas ir loģiski, jo elementārā formula (1.1.), pēc kuras tiek aprēķināta vērtība τ_1 , neuzskata mijiedarbības specifiku starp A un B. Ir acīmredzami, ka mijiedarbība un šo zonu krustošanās būtiski apgrūtina sprieguma stāvokli. Tāpēc aprēķinātās τ_1 vērtības pieaug, pieaugot norādītajam efektam.

Atgriežoties pie skaidas veidošanas procesa shēmas, kas tiek piedāvāta 1.6.att., ir jāatzīmē, ka tā apstiprinās ne tikai vērojot griešanas procesu zem mikroskopa.

Līdzvērtīgus rezultātus var iegūt, veicot mikrociētības mērījumus uz skaidas šlifa, kas ir izgriezts kopā ar veidņa daļu. Mikro-cietības mērījumi bieži dod nestabilus rezultātus, sakarā ar dažādu atsevišķu graudu cietību, kā arī saistībā ar iepriekšminēto nestabilitāti plastiskās deformācijas procesā.

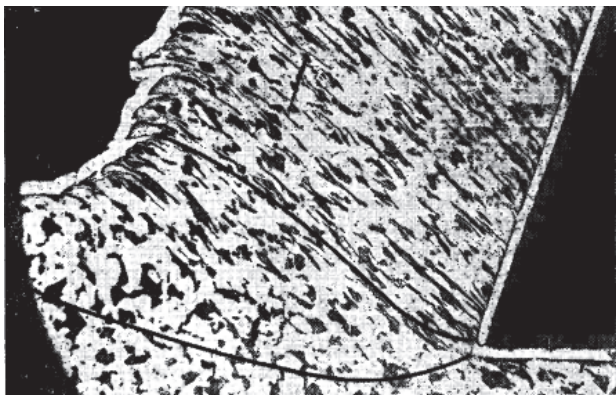
Att.1.7. tiek atainota viena parauga shēma ar mikro-cietības izmēru rezultātiem. Paraugs izgatavots no tērauda 20X , dzesēšanas šķidrums – ūdens, griešanas ātrums $v = 0,002$ m/min. Nogrieztā metāla slāņa biezums $a = 0,525$ mm, priekšējais leņķis $\gamma = 10^0$. Att.1.7. līknes, kas savieno punktus ar apmēram vienādu cietību, var uzskatīt kā bīdes līnijas. Šo bīdes līniju raksturs atbilst shēmai, kas atainota uz att.1.6. Analógisks priekšstats par bīdes līniju raksturu izriet arī no dažādu atsevišķu deformēto graudu analīzes plastiskajā apgabalā.

Par graudu deformāciju plastiskajā zonā var secināt, balstoties uz mikro šlifu fotogrāfijām plastiskajā zonā.



1.7.att. Mikrociētības mērījumu rezultāti plastiskajā zonā pie brīvas tērauda griešanas [21].

Tā kā izmaiņas mikrostrukturā radās plastiskās deformācijas rezultātā, tad ievadītās līklīnijas uz 1.8.att., var apskatīt tā plastiskās deformācijas zonas robežas. Paraugs iegūts ar nosacījumu, ka tas sakrīt ar iepriekšējiem, ar atšķirību: $a=0,294$ mm; $\gamma=20^0$. Mikrofotogrāfijā (1.8.att) ir vilktas divas līklīnijas, kas norobežo redzamo mikrostrukturā izmaiņu zonu.



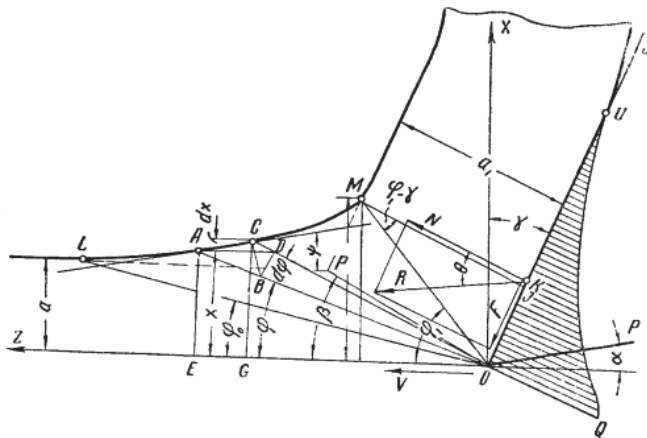
1.8.att. Plastiskās zonas mikrofotogrāfija pie tērauda griešanas ūdenī. (Ar melnām līnijām tiek parādītas kreisā un labā plastiskās zonas robeža) Palielinājums X100 [21].

Plakanās skaidas veidošanās process apmierinoši tiek raksturots ar shēmu, kas tiek piedāvāta att.1.9. Labākā no zināmajām sīkāka pētījuma rezultātā ir Briksa [10] shēmām (sk. 1.3.att.). Briksa shēma neievēro plastiskās zonas sarežģīto sprieguma stāvokļa īpatnības un tāpēc rada iedomas par paaugstinātu bīdes spriegumu.

Skaidas veidošanas procesa uzdevumu risinājums var notikt divos veidos:

1. Precīza uzdevumu atrisināšana saistībā ar spriegotu plastiskās zonas stāvokli, saskaņā ar 1.6.att.;
2. Tuvinātais tā paša uzdevuma atrisinājums ar uzlabotu Briksa shēmu.;

Pievilcīgāks izskatās pirmais veids, bet tajā ir lielas grūtības, vismaz tāpēc, ka plastiskās zonas robežas nav precizētas un tās jānoskaidro. Turklāt, spriegumu komponentes plastiskajā apgabalā mainās neproporcionāli viena otrai. No tā izriet, ka šis uzdevums neattiecas uz parastā sloģojuma gadījumu un to nevar precīzi aprēķināt ar zināmām plastiskās mehānikas metodēm.



1.9.att. Plakana skaidas veidošanas procesa shēma, kurā ir pieņemts, ka parējās virsmai kontakta punktos ir kopīgi tangenciāli ar nogrieztā slāņa un skaidas augšējām virsmām. [9].

Otrs veids pašlaik ir vairāk pieejams. Te vajadzēs ievest korekcijas tangenciālo spriegumu funkcijā un pieļaut, ka parējās virsma un ārējā skaidas virsma pakāpeniski savienojas.

Shēma (att.1.9.) attiecas uz nepārtrauktas saplūdes skaidas veidošanās gadījumu, uzauguma neesamības gadījumā. Griežņa elements pieņemts kā absolūti ciets un raupjš.

Apstrādājamais materiāls pieņemts kā izotropš, plastisks, izturīgs, stings un ar ideālu siltumvadības spēju.

Tātd noņemama slāņa transformācijas process skaidā notiek tikai ar priekšējās skaldnes iedarbību. Skaidas un priekšējās skaldnes *OU* kontakta platums tiek noteikts ar griešanas šķautni un skaidu atrašanās punkta attālumu no asmeņa virsotnes.

Normālu spriegumu izvietošana uz priekšējās skaldnes virsmas kontakta tiek raksturota ar epīru *OQU* [5]. Ja figūru *OQU* pirmajā palielinājumā pieņem par trijstūri, tad normālu spriegumu kopspēks – spēks *N* – būs pielikts attālumā no *OK* griezējasmaņa virsotnes, kas būs vienāds ar vienu trešdaļu no kontakta *OU* platumā.

Saskaņā ar iepriekš apskatīto, var teikt, ka *OU* kontakta platums ir ap 4-6 reizes lielāks par nogrieztā slāņa biezumu. Tātd *OK* attālums ir ap 1,3 – 2,0 nogrieztā slāņa biezuma.

Apstrādājamā materiālā, griezējelementa priekšā, iedarbojoties spēkam *R*, rodas tāds sprieguma stāvoklis, kas plastiskās deformācijas ceļā transformē nogrieztu slāni ar biezumu *a*, skaidā ar biezumu *a₁*, kas pārvietojas paralēli priekšējai skaldnei.

Izveidotais sprieguma stāvoklis tiek raksturots ar to, ka pastāvīgo tangenciālo spriegumu līnijas tiek aprakstītas kā taisns posms, kas iziet caur griezējšķautni.

Tiek uzskatīts, ka plastisko deformāciju zonā, uz pastāvīgo tangenciālo spriegumu līnijām tiek apmierināts plastiskuma nosacījums $\tau = \tau_s$, kur τ – tangenciālais spriegums un τ_s – materiāla bīdes tecēšanas robeža, ņemot vērā uzkaldi. Tādā veidā, atkarībā no plastiskuma nosacījumiem, tiek noteikta labā un kreisā plastiskās zonas skaldnes – *OL* un *OM*. Eksperimentāli ir pierādīts, ka plastisko deformāciju rezultātā, pārveidojot nogriežamo slāni skaidā, apstrādājamais materiāls gūst stiprinājumu no 2 līdz 4 reizi apmērā (piem., skat. 1.7.att.).

Tādā veidā, kreisās plastiskās zonas robežai *OL* pēc nosacījumiem ir jābūt 2-4 reizes garākai par labo robežu *OM*.

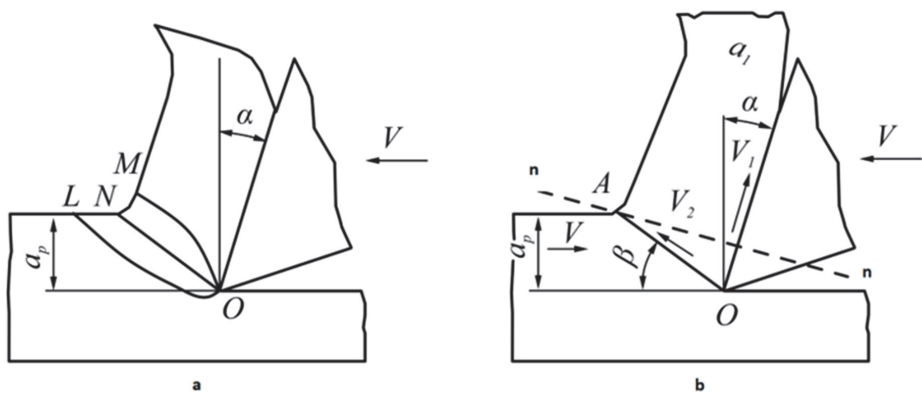
Augšējā plastiskās zonas robeža *LM* punktā *L* saskaras ar augšējo nogriežamā slāņa skaldni, un punktā *M* – ar augšējo izveidoto skaidas skaldni.

Ir redzams, ka nogrieztā slāņa transformācija skaidā notiek pakāpeniskā nobīdē virzienos, kuri sakrīt ar pastāvīgām tangenciālām spriegumu līnijām.

Tālāk plastiskās zonas robeža tiek noteikta ar pastāvīgo tangenciālo spriegumu nobīžu līniju intensitātes palīdzību.

Apskatītas skaidu atdalīšanas shēmas ļauj izveidot vienkāršotu shēmu (1.10.att. a un b.). Apvirpošanas procesam, deformācijas ātrums un deformācijas pakāpe ir vairākas reizes lielāka nekā citos plastiskās deformācijas veidos [21, 22,23, 24]. Šajā gadījumā deformācija notiek augstā temperatūrā un zem lielu griešanas spēku iedarbes uz griešanas asmeņa priekšējo virsmu.

No tā var secināt, ka metālu griešanas process ir dziļas plastiskas deformācijas process, kas notiek ekstremālos apstākļos, kas pie lielākiem apstrādes režīmiem prasa dzesēšanas emulsijas pielietošanu lai samazināt griešanas temperatūru kura iedarbojas uz instrumentu, un sagatavi.



1.10. att. Metāla griešanas procesa rezultējošā shēma: a- skaidu veidošanas process, b – aprēķinu shēma. Uz attēla: a_p – griešanas dziļums; a_1 – skaidas biezums; V – griešanas ātrums; V_1 – skaidas kustības ātrums pa instrumenta plakni; V_2 – skaidas kustības ātrums pa bīdes plakni; OL – sākotnējā skaidu veidošanas procesa robeža; OM – galīgā skaidu veidošanas procesa robeža; LOM – skaidu veidošanās zona; NOM – šaura skaidu veidošanās zona; OA - bīdes plakne; α – griezējinstrumenta leņķis (pozitīvs, neitrāls vai negatīvs) ; β - bīdes plaknes slīpuma leņķis; $n-n$ - instrumenta priekšējās virsmas normāle [Autora attēls].

1.4. Nerūsējošo tēraudu iedalījums

Leģējošo elementu ietekme

Lai uzlabotu tērauda fizikālas, ķīmiskas un stiprības īpašības tā sastāvā ievada dažādus leģējošos elementus, piemēram, hromu, niķeli un citus. Tēraudi var saturēt vienu vai vairākus leģēšanas elementus, pateicoties kuriem tēraudiem piemīt dažādas speciālas īpašības. Tādus elementus iekļauj tēraudu ķīmiskajā sastāvā, lai uzlabotu tā konstrukcijas stiprumu. Nerūsējoša tērauda pamatstruktūrā ir ferīts, kas no kopējā tilpuma aizņem 90 %. Leģējošie elementi, sajaucoties, pastiprina to. Ferīta cietību visvairāk paaugstina niķelis, mangāns un silīcijs. Molibdēns, volframs un hroms to ietekmē mazāk. Lielākā leģējošo elementu daļa pastiprina ferītu un mazāk ietekmē tērauda plastiskumu, samazina tā stingrību (tabula 1.) [25,26,27,28].

Leģēšanas galvenais uzdevums: tērauda stiprības paaugstināšana, lai papildus nepielietotu termisko apstrādi un tāda veidā stiprinātu ferītu.

Atkarībā no pielietojuma var izdalīt trīs leģēšanas elementu grupas[28,29]:

- 1) Mangāns (Mn), Silīcijs (Si), Hroms (Cr);
- 2) Niķelis (Ni), Molibdēns (Mo);
- 3) Vanādijs (V), Titāns (Ti), Niobijs (Nb), Volframs (W) ;

Atkarībā no iedarbības mehānisma uz nerūsējošo tēraudu īpašībām, leģēšanas elementus var iedalīt trīs grupās:

- 1) Ietekme uz polimorfem pārveidojumiem (alfa- Fe -> gamma-Fe);
- 2) Karbīdu radīšana kopā ar oglekli (Cs,Fe)7C3; (Cs,Pe)23C6; Mo2C un citi;
- 3) Intermetālīdu veidošana kopā ar dzelzi Fe7Mo6; Fe3Nb.

1. tabulā ir atainota leģējošo elementu ietekme uz tēraudu.

Leģējošo elementu ietekme

Leģējošais elements	Apvienojoties ar Fe pastiprina to	Palielina stingrību	Palielina austenīta saturu	Samazina austenītu	Veido karbīdus	Palielina korozijas pretestību
Ni	+	+	+	-	-	+
Cr	+	-	-	+	+	+
Mn (vairāk par 1%)	+	+	+	-	+	+
Si (vairāk par 0,8%)	+	+	-	+	-	-
W	-	-	-	-	+	-
Cu (0,3 — 0,5%)	+	-	-	-	-	+

Kopumā, leģējošie elementi samazina tērauda jutību pret pārkarsēšanu termiskās apstrādes gaitā (izņemot Mn), palielina caurrūdamību (izņemot Co), palielina tērauda noturību pret atlaidināšanos, bet samazina tērauda siltumvadāmību [30]. Būtiski tērauda īpašības izmaina vienlaicīga tā leģēšana ar vairākiem ķīmiskajiem elementiem un to ietekme vislabāk jūtama pēc termiskās apstrādes. Saskaņā ar tērauda sastāvu, var noteikt tā lietošanas nozāri, tērauda īpašības un pielietojumu .

Mangāns (Mn) veido karbīdus $(FeMn)_3C$, līdz ar to paaugstinot tērauda cietību, izturības un elastības robežu. Mangāns palielina tērauda dziļrūdamību, nodilumizturību un stigrību, kā arī saista sēru, samazina rūdīšanas deformācijas un karstlūstamību. Mangāns tomēr samazina elektrovadītspēju.

Silīcijs (Si) veido silicīdus (Fe_3Si) un samazina plastiskumu. Silīcijs uzlabo tērauda caurrūdamību un stabilizē to pret atlaidināšanos, kā arī palielina cietību, korozijas un skābju noturību. Silīcijs palielina tērauda atogļošanos, elektropretestību un samazina paliekošo magnētismu.

Hroms (Cr) veido karbīdus (Cr_3C_2) un nitrīdus (Cr_2N) un nodrošina augstu un vienmērīgu tērauda cietību. Hroms palielina tēraudu izturību, dziļrūdamību, nodilumizturību, korozijas

noturību, pretoksidēšanas īpašības un stabilizē tēraudu pret atlaidināšanos. Hroms samazina graudu augšanu, magnētismu, plastiskumu un stingrību.

Molibdēns (Mo) veido karbīdus (Mo_2C) un nitrīdus (Mo_2N) un veicina karbīdu veidošanos. Kā vienas grupas elements radniecīgs volframam, molibdēns uzlabo tērauda dziļrūdamību, izturību, stigrību, karbīdu nevienmērību un cietību, samazina tērauda jutību pret pārkaršanu un graudu augšanu, stabilizē tēraudu atlaidināšanas gaitā, palielina karstumnoturību un elektropretestību.

Niķelis (Ni) veido niķelīdus (FeNi_3). To pielieto kā cietkausējumu un kermetu karbīdu sasaistītāju. Niķelis paaugstina cietību, izturību, stigrību un caurrūdamību. Veicina oglekļa vienmērīgu sadali cementējamajā slānī. Stabilizē tērauda izturību pie paaugstinātām temperatūrām. Samazina rūdītu un atlaidinātu tēraudu trauslumu, karbīdu nevienmērību un to oksidēšanas karsēšanas gaitā.

Volframs (W) veido cietus karbīdus (WC) un nitrīdus (W_2N) un paaugstina cietību, izturības robežu, elastības robežu, dziļrūdamību un stabilizē tēraudu pret atlaidināšanos. Volframs paaugstina karstumnoturību un elektropretestību. Volframs samazina plastiskumu, siltumvadāmību, stingrību un graudu augšanu.

Titāns (Ti) veido cietus karbīdus (TiC) un nitrīdus (TiN) un paaugstina izturību, korozijnoturību, skābju noturību un karstumnoturību. Titāns veicina karbīdu veidošanos, samazina gaudainību un kavē graudu palielināšanos karsēšanas gaitā un to pielieto kā stabilizējošu elementu.

Vanādijs (V) veido ļoti cietus karbīdus (V_2C) un nitrīdus (VN) un paaugstina izturību, karstumnoturību un nodilumizturību. Vanādijs veicina karbīdu veidošanos. Atlaidināšanās gaitā vanādijs nodrošina paaugstinātu cietību. Vanādijs samazina dziļrūdamību un veido smalkgraudainu struktūru, bet samazina stigrību.

Alumīnijs (Al) veido ferīdus (Al_2Fe), karbīdus (Al_4C_3) un stabilus nitrīdus (Al_4C_3) un nodrošina smalkgraudainu struktūru. Alumīnijs paaugstina stigrību pie zemām temperatūrām.

Kobalts (Co) veido kobaltīdus (FeCo) un to pielieto kā cietkausējuma karbīdu saistvielu. Augstlējētos tēraudos kobalts nodrošina cietības saglabāšanos pie augstām temperatūrām, bet veicina atogļošanos. Kobalts ir magnētisks, uzlabo siltumvadāmību, bet samazina stingrību.

Niobijs (Nb) kā vienas grupas elements ir radniecīgs tantālam. Niobijs paaugstina tērauda karstumnoturību, noturību pret neorganisko un organisko skābju iedarbību un uzlabo plastiskumu, bet samazina elektrisko pretestību [30,31,32].

Nerūsējošajiem mazoglekļa augstleģētajiem tēraudiem ir speciālas īpašības, kuras tos aizsargā pret apkārtējās vides kaitīgo ķīmisko un elektroķīmisko iedarbību. Apkārtējās vides iedarbību var sadalīt atmosfēras, augsnes, šķidrums un sāļu iedarbībā. Nerūsējošos tēraudus galvenokārt raksturo vidēji neliels oglekļa saturs ($C \sim 0,02 \dots 0,25\%$) kā arī palielināts mangāna ($Mn = 1 \dots 2\%$) un silīcija ($Si \sim 1\%$) daudzums. Noteicošie leģējošie elementi ir hroms ($Cr = 12 \dots 20\%$) un niķelis ($Ni = 1,5 \dots 15\%$), bet sastāvā sastopams arī titāns, molibdēns un niobijs. Tēraudi ir arī daļēji karstumizturīgi, jo no tiem izgatavotās detaļas var strādāt līdz pat $400 \dots 550^\circ C$ (1.2. un 1.3. tabula.) [33].

Biežāk pielieto termiski apstrādātus nerūsējošos hroma tēraudus [9;12]. To samazinātais oglekļa saturs pavājina materiāla mehāniskās īpašības, bet paaugstina pretošanās spēju korozijai. Hroma niķeļa tēraudi ir ar paaugstinātu izturību un ar augstu korozijas noturību, kura pieaug materiālu termiski apstrādājot. Hroma niķeļa titāna tērauds labi pretojas slāpekļa iedarbībai. Tērauds X6CrNiNb18-10 (EN), X10CrNiNb18-9 (DIN) satur $0,8 \dots 1,1\%$ niobija, bet tērauds X4CrNiMo 16-5-1 (EN), X2CrNiMo18 12 (DIN) satur $2,5 \dots 3\%$ molibdēna un labi pretojas organisko skābju iedarbībai.

Karstumizturīgos mazoglekļa augstleģētos tēraudus pielieto tādu detaļu izgatavošanai, kuras strādā pie $600 \dots 800^\circ C$ gāzveidīgā un ķīmiski korodējosā vidē pie noteiktas mehāniskas slodzes. Materiālu karstumnoturību paaugstina hroms, alumīnijs, niķelis un titāns. Tēraudus raksturo neliels oglekļa saturs ($0 = 0,1 \dots 0,2\%$), paaugstināts mangāna ($Mn = 1 \dots 2\%$) un silīcija ($Si = 0,7 \dots 2,5\%$) saturs. Noteicošie leģējošie elementi ir hroms ($Cr = 12 \dots 26\%$) un niķelis ($Ni = 9 \dots 22\%$).

Alumīniju ($Al = 0,7 \dots 1,2\%$) saturošie karstumizturīgie tēraudi tiek nitrēti, tādējādi veidojot detaļu virskārtā cieto alumīnija nitrīdu (AlN) un hroma nitrīdu (CrN), līdz ar to šie tēraudi netiek rūdīti (1.4. tab.). Karstumizturīgajos tēraudos leģējošie elementi veido karbīdus (CrC_2), niķelīdus ($FeNi_3$) un silicīdus ($FeSSi$), kuri attiecīgi paaugstina tērauda karstumizturību [34].

Augstleģētajiem nerūsējošiem un karstumizturīgajiem tēraudiem vispirms norāda augstleģētību X (EN, DIN), vidējo oglekļa saturu procenta simtdaļās un vidējo galveno leģējošo elementu saturu

procentos. Apzīmējumā ķīmisko elementu simbolus izkārto, sākot ar nozīmīgākajiem un tālāk sniedz elementu vidējā satura skaitļus, atbilstoši simbolu izkārtojumam.

No nerūsējošā mazoglekļa augstleģētā tērauda X6Cr17 (EN), X7Cr13 (DIN), tērauda X12Cr13 (EN), X10Cr13 (DIN) izgatavo vājām skābēm, korozijai un triecieniem pakļautas detaļas, sūkņu korpusus, sūkņu vārstus, naftas iekārtu armatūru, naftas vadu uzmavas, karburatoru detaļas, turbīnu lāpstiņas, bīdītājus, vārpstas u.c.. No X20Cr14 (EN), X20Cr14 (DIN) izgatavo nerūsējošas noslogotas detaļas, karburatoru sastāvdaļas, turbīnu lāpstiņas, vārstu atsperes u.c.. No X30Cr13 (EN), X46Cr13 (DIN) izgatavo nerūsējošas paaugstinātas izturības, nodilumizturīgas detaļas, mērinstrumentus, ķirurģiskos instrumentus, zobārstniecības instrumentus, medicīnā pielietojamus spoguļus, karburatoru adatas, atbalsta prizmas, atsperes, nažus u.c.. No XI 7CrNi 16-2 (EN), X22CrNi17 (DIN) izgatavo nerūsējošas, paaugstinātas mehāniskās izturības, sarežģītas un sametināmas detaļas, detaļas ar cietu, iepriekš cementētu, virskārtu u.c.. No X5CrNi 18-10 (EN), X5CrNi18 9 (DIN), X2CrNi19-II (EN), X12CrNi17 7 (DIN) izgatavo augstikorozijizturīgas, sarežģītas, nemagnētiskas, sametināmas detaļas, ķīmiskās ražošanas iekārtu sastāvdaļas, siltumpārvades iekārtu sastāvdaļas, ķīmisko vielu maisītājus un centrifūgas, galvanisko iekārtu sastāvdaļas, lidaparātu karkasus un gondolas, atsperes, dekoratīvas detaļas u.c.. No X6CrNiTi18-10 (EN), X7OCrNiTi18 9 (DIN), izgatavo nerūsējošas, triecienslodzē strādājošas, sarežģītas, sametināmas detaļas, pārtikas ražošanas iekārtu sastāvdaļas, korodējošus cauruļvadus un to savienojumus, laku un krāsu ražošanas iekārtu sastāvdaļas, dekoratīvas detaļas u.c.. No X6CrNiNbl8-10 (EN), X10CrNiNbl8 9 (DIN), izgatavo ar ķīmiskām vielām, organiskām un pārtikas vielām, krāsvielām un sāļu atmosfēru saistītas detaļas, autoklāvu detaļas, dzinēju gāzu izplūdes iekārtu detaļas, gāzes ģeneratoru detaļas u.c.. No X2CrNi18-9 (EN), X2CrNi 18 9 (DIN) izgatavo ķīmiski ļoti izturīgas, sametināmas un slogotas detaļas, ķīmiskās ražošanas iekārtu sastāvdaļas, slāpekļskābes ražošanas iekārtu sastāvdaļas u.c.. No tērauda X4CrNiMol6-5-I (EN), X2CrNiMol8 12 (DIN) izgatavo organisko skābju iedarbei pakļautu iekārtu sastāvdaļas, iekārtas, kuras strādā sāļu šķīdumos, jūras ūdenī u.c..

No karstumizturīgā mazoglekļa augstleģētā, nitrējamā tērauda X6CrA113 (EN), X10CrA113 (DIN), tērauda X10CrA118 (DIN) izgatavo pie ļoti augstām temperatūrām strādājošu siltumenerģētisko iekārtu sastāvdaļas u.c..

No tērauda XI5CrNiSi20 12 (DIN), tērauda XI CrNi25-21 (EN), X15CrNiSi25 20 (DIN) vai tērauda, izgatavo detaļas, kuras ir saskarē ar ķīmiskām un organiskām vielām, pārtikas vielām un jūras

ūdeni, siltumenerģētisko iekārtu sastāvdaļas, ķēdes rullīšus, diskus, iepļūdes un izplūdes vārstus, augstām temperatūrām pakļautas sastiprināšanas detaļas u.c.[35].

1.2. tabula

Nerūsējošo tēraudu apzīmējumi

EU EN	BRD DIN	France AFNOR	Italia UNI	UK BS	Sverige SS	PΦ ГОСТ	USA AISI/ SAE	Japan JIS	BRD W.- NR.
X30Cr13	X46Cr13	Z40CM	X40Cr14	420S45	2304	40X13	420	SUS420J2	1.4034
X5CrNi18-10	X5CrNi18 9	Z6CN18.09	X5CrNi18 10	304S31	2332	08X18H10	304	SUS304	1.4350

1.3. tabula

Nerūsējošo tēraudu sastāvs

EU EN	BRD DIN	PΦ ГОСТ	C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	Ti
X30Cr13	X46Cr13	40X13	0,36.. .0,46	12,5-14,5	-	1	1	0,045	0,03	-
X5CrNi18-10	X5CrNi18 9	08X18H10	0,05.. .0,1	17... 19	8,5...10,5	2	1	0,045	0,03	-

1.4. tabula

Nerūsējošo un karstumizturīgo tēraudu īpašības

EU EN	BRD DIN	PΦ ГОСТ	HB	Rūdišanas temperatūra. °C	Dzesējošā vide	Atlaidināšanas temper. °C un vide	Rm. N/mm ²	R _{0,2} , N/mm ²	A%	Karstum- izturība. ^o C
X30Cr13	X46Cr13	40X13	250	1000... 1050	eļļa	200... 300 gaiss; eļļa	800	650	10	400
X5CrNi18-10	X5CrNi189	08X18H10	180.. .207	1050... 1100	gaiss; eļļa; H ₂ O	700, gaiss	520...700	210	45	400

Austenīta, vai 300 (304) sēriju nerūsējošie tēraudi sastāda apmēram 70% no visiem saražotajiem nerūsējošiem tēraudiem. Saturā ir maksimāli 0,15 % oglekļa, minimāli 16 % hroma un niķeļa vai mangāna, pietiekams daudzums, lai saglabātu austenīta struktūru pie dažādām temperatūrām. Tipisks saturs ir 18 % hroma, 10 % niķeļa, kas parasti ir zināms kā 18/10 nerūsējošais tērauds, līdzīgi arī pastāv 18/0 un 18/8.

Zema oglekļa satura tēraudi, piemēram, ir 316L vai 304L, kas labi pārdzīvo koroziju pēc metināšanas darbiem. Burts „L” nozīmē oglekļa saturu mazāk par 0,03%.

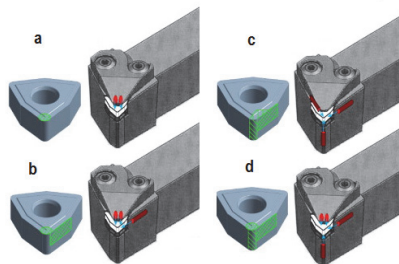
Martensīta struktūras nerūsējošais tērauds nav tikpat izturīgs, kā citu divu struktūru nerūsējošie tēraudi, bet tie ir cietāki, ka arī ir augsti apstrādājami, un var kļūt cietāki ar termiskās

apstrādes palīdzību. Martensīta nerūsējošais tērauds satur hromu (12-14%), molibdēnu (0,2-1%), niķeli (0-<2%) un oglekli (apmēram 0,1-1%) [35].

1.5. Apstrādes procesa raksturojums: apvirpošanas operāciju veidi

Mūsdienās apstrāde ar apvirpošanas paņēmieni veidi rodas aizvien vairāk, pateicoties jauniem griezējinstrumentiem un darbmašīnām. Piemēram, pēdējos gados attīstoties CNC-darbmašīnām jau vienmēr komplektācijā nāk ne tikai revolvergalvas standarta instrumenti, gan arī rotējošie turētāji, tā saucamie aktīvie instrumenti, kuri daļēji jau veic dažādus frēzēšanas un urbšanas operāciju veidus, kas savukārt dod iespēju ekonomēt un neturēt divas vai pat vairāk darbmašīnas un to operatorus, bet tikai vienu ar automātisku sagataves padevi. Ražojot lielu sēriju izstrādājumus tas nozīmīgi samazina apstrādes laiku un detaļas pašizmaksu [36, 37, 38, 39, 40].

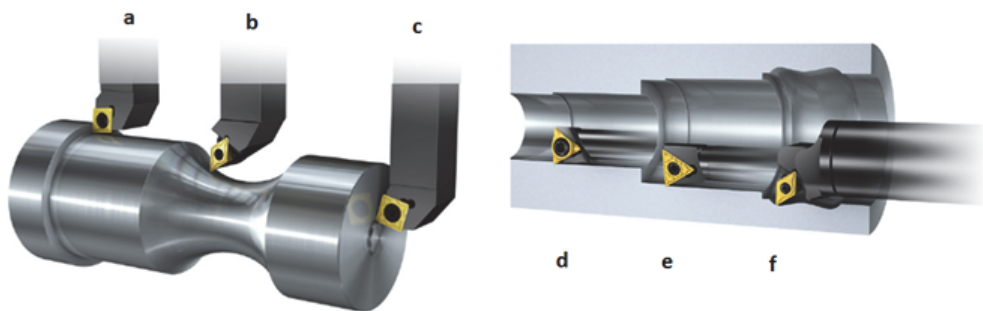
Attīstot instrumentus, tiem palielinās kalpošanas laiks, nodilumizturība un precizitāte. Vibrāciju samazināšanai pastāv speciālie pārklājumi un griezejplāksnīšu turētāji, kuri pat sarežģītājās operācijās nodrošina precīzu gaisa vai dzesēšanas emulsijas padevi griešanas zonā atkarībā no operāciju veida (att.1.11).



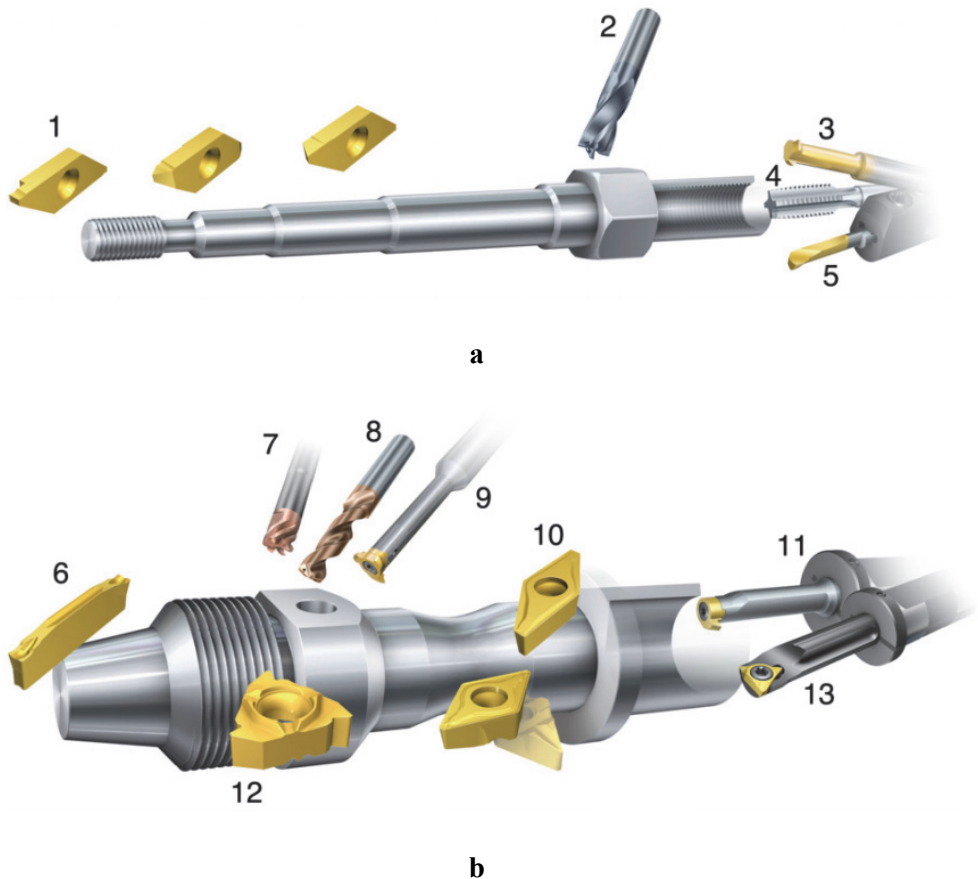
1.11.att. a- tīrapstrādei, b- vidējai apstrādei, c – vidējai apstrādei (grūti apstādāmajiem materiāliem), d – rupjapstrādei [43].

Pastāv dažādi apvirpošanas veidi, kuriem piemīt savas īpatnības. Attēlā 1.12 ir parādīti vairāki apvirpošanas operāciju veidi: a – rupja / vidēja apvirpošana, raksturojas ar liela nogriežamā metāla daudzumu pie lielākiem griešanas dziļumiem un mazākiem griešanas ātrumiem, kā arī palielinātām vibrācijām; b – kāda sarežģīta profila izveidošana, var arī pielietot smalkai apstrādei, raksturojas ar mazāku nogriežamā metāla daudzumu pie mazākiem griešanas dziļumiem un lielākiem griešanas ātrumiem un mazākām vibrācijām; c – sānu apvirpošana, var būt izpildāma ar

diviem iepriekšējiem instrumentiem, maināms vai arī konstants griešanas ātrums, ja to paredz CNC virpas mašīnkods; d – dziļā izvirpošana, parasti tiek veikta ar dzesēšanas emulsiju pievadīšanu, lai nodrošinātu skaidas izvadišanu no kontaktzonas un samazinātu vibrācijas; e – parasta iekšējā izvirpošana, var būt veikta kā pielietojot dzesēšanas emulsiju, tā arī nepielietojot to, parasti notiek pie lielākiem apstrādes parametriem; f – iekšēja sarežģīta profila veidošana. Citi operāciju veidi tiek attēloti 1.12.att. [40, 41,42,43]



1.12.att. Virpošanas operāciju veidi : a- cilindriskās virsmas apvirpošana, b- noapaļojumu apvirpošana, c- gala virsmas virpošana, d – dziļā maza diametra izvirpošana, e – parastā izvirpošana, f – sarežģīta profila izvirpošana [43].



1.12.att. Virpošanas operāciju veidi detaļu diametram 1-8 mm (a) un 6-32 mm (b): 1- Precīza virpošana, atdalīšana rienu iegriešana un vītņu iegriešana; 2 – cietsakausējuma dažādu izmēru frēžu pielietošana dažādu ārējo formu veidošanai; 3,4,5,- pārklāto cietsakausējuma griezējinstrumentu pielietošana iekšējo urbuma apstrādei: izvirpošanai, vītņu iegriešanai; 6 – Lielāku gabarītu atdalīšanas/ rienu veidošanas; 7,8, - Ātri maināmie rotējošie instrumenti ar diametru no 0.3 mm līdz 10 mm urbuma apstrādei; 9 – iekšējo urbuma rievas veidošana; 10 – Precīza gala apstrāde un sarežģīta profila veidošana; 11,12 – Precīza iekšējo urbuma izvirpošana un vītņu iegriešana. [43].

1.6. Prasības, kuras tiek izvirzītas griezējinstrumentu materiāliem

Griezējinstrumentu materiālu nozīmīgums mūsdienu mašīnbūvē pieaug, jo mūsdienu automatizēto darbagaldu augstā ražotspēja var tikt nodrošināta tikai ar augstas kvalitātes instrumentu palīdzību. Pieredze rāda, ka turpmākā griešanas režīmu līmeņa celšana ir atkarīga, pirmām kārtām, no griezējinstrumenta materiālu īpašību pilnveidošanas.

Griezējinstrumenti strādā sarežģīta faktoru kopuma ietekmē, tie ir tādi faktori, kā augsts spriegums un kontakta temperatūra, kā arī fizikālo un ķīmisko procesu norisināšanās apstākļi (adhēzija, oksidēšanās, difūzija u.c.). Kontaktspriegumi, kas iedarbojas uz instrumentu priekšējo un aizmugurējo virsmu mazlēģētā tērauda apstrādes laikā mainās 700...1000 MPa robežās uzasinātiem instrumentiem, apstrādājot sarežģītu mazlēģētu tēraudu un sakausējumus, tie var sasniegt 4000 MPa un vairāk. Griešanas zonā un instrumenta/apstrādājamās detaļas kontakta robežās vienlaicīgi rodas temperatūra 200...1100 °C. Šajā procesā instrumentu kontaktvirsmas intensīvi nodilst. Tāpēc darbarīku materiāliem jāpiemīt īpašām fizikāli-mehāniskām īpašībām (FMĪ) un jāatbilst noteiktām prasībām, kas saistītas ar apstrādes procesa apstākļiem, apstrādājamā materiāla īpašībām un stāvokli:

1. Augstas mehāniskās īpašības (HRC, pieļaujama spriegums).
2. Spēja pretoties nodilumam griešanas procesa laikā.
3. Augsta siltumizturība (sarkankvēles izturība) – darbarīku materiālu spēja saglabāt savu cietību, tādējādi, nezaudējot savas griešanas spējas arī augstas griešanas temperatūras apstākļos.
4. Tehnoloģiskums (apstrādāšana ar griešanas palīdzību, metināmība, slīpējamība, nav tieksmes plīsumu izveidei pielodēšanas procesa laikā, rūdīšana u.c.).
5. Mūsdienās pielietojamie instrumentu materiāli tiek iedalīti sekojošās grupās: instrumentālie tēraudi, cietie sakausējumi, keramiskie materiāli, dimanti un sintētiskie materiāli [44,45,46].

1.7. Nodilumizturīgo cietsakausējuma griezējinstrumentu materiālu raksturojums

Cietie sakausējumi ir grūtkūstošu metālu karbīdu sakausējumi ar kobaltu, kas ir savdabīga saistviela. Cietajiem sakausējumiem ir augsta cietība, nodilumizturība un siltumizturība līdz 1000 °C. Taču, tiem ir mazāka triecienstīgrība un siltumvadība, salīdzinājumā ar ātrigriezgriezēju tēraudiem. Cietos sakausējumus ražo dažādu formu un izmēru plāksnītes izskatā, kuras iegūst ar pulvera metalurģijas metodi.

Rūpniecībā ražo trīs volframa cieto sakausējumu grupas : volframa, titāna-volframa un titāna-tantala-volframa. Turklāt, ir vēl bezvolframa cieto sakausējumu grupa uz karbīdu vai citu titāna savienojumu pamata ar molibdēna, niķeļa un citu grūtkūstošu metālu piejaukumiem [52].

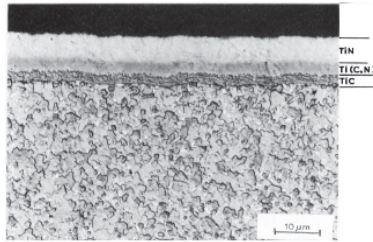
Vienkarbīda sakausējumus ražo uz volframa karbīda bāzes un sauc par volframa sakausējumiem). Kobaltu apzīmē ar **Co**, cipars rāda tā saturu procentos, pārējais – volframa karbīds **WC**. Sakausējuma piemērs: 20% Co + 80% WC. Šīs grupas sakausējumi ir visizturīgākie. Palielinot kobalta saturu, paaugstinās sakausējuma triecienizturības pretestība, bet samazinās tā nodilumizturība. Vienkarbīda sakausējumi tiek pielietoti čuguna, krāsaino metālu, to sakausējumu un nemetālisku materiālu apstrādē ar virpošanu, frēzēšanu utt. Šo materiālu galējo siltumizturību nosaka karbīdu intensīvas oksidēšanās sākums, t.i. temperatūra 950–1000 °C.

Divkarbīdu cietie sakausējumi satur volframa un titāna karbīdus un tiek dēvēti par titāna-volframa sakausējumiem . Burti TiC ataino titāna karbīda procentuālo saturu, cipars pēc burta C – kobalta saturu, pārējais – WC. Sakausējuma atšifrējuma piemērs: 5% TiC + 10% Co + 85% WC. Šīs grupas sakausējumiem ir lielāka nodilumizturība, bet tie ir mazāk izturīgi, nekā vienkarbīda grupas sakausējumi. Tiek pielietoti apstrādājot oglekļa tēraudu un legētos konstrukciju tēraudus ar virpošanas, frēzēšanas u.c. palīdzību. Šo materiālu robežsiltumizturība tiek noteikta pēc karbīdu intensīvas oksidēšanās sākuma, t.i. temperatūras 1100–1150 °C.

Trīskarbīdu cietie sakausējumi, salīdzinājumā ar divkarbīdu grupas sakausējumiem satur vēl tantala karbīdus un tiek dēvēti par titāna-tantala-volframa sakausējumiem .Pirms burtiem TiC un TaC nosaka titāna un tantala karbīdu saturu, pēc burtiem **Co** – kobalta saturu, pārējais – **WC**.

Sakausējuma atšifrējuma piemērs: 8% (TiC + TaC) + 6% Co ++ 86% WC. Šīs grupas sakausējumiem ir augsta izturība, tos izmanto, apstrādājot karstumizturīgos tēraudus un sakausējumus, titāna sakausējumus. Īpaši sīkgraudaina struktūra veicina materiāla nodilumizturības pieaugumu bez būtiskas tā izturības samazināšanās. Šajos sakausējumos graudu pamatmasa ir mazāka nekā 1µm. [47,48,49]

Saskaņā ar Starptautisko Standartizācijas Organizāciju standartu (ISO 513) [50] cietie sakausējumi tiek dalīti trīs grupās – K, M un P (tab.1.5.) [51,52]. Vairāku slāņu tipu un biežumu kombināciju pārklājums ir demonstrēts 1.13. attēlā.



1.13. Att. Vairāku slāņu tipu un biezumu kombināciju pārklājums [52].

1.5. Tabula .

Cieto sakausējumu sastāvs, mehāniskās īpašības un pielietojanas joma

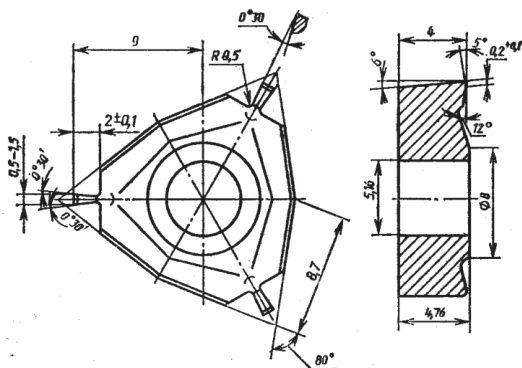
Ķīmiskais sastāvs, %				Fizikāli mehāniskās īpašības		Pielietošana
TiC	TaC	WC	Co	σ , MPa	Cietība, HRA	
-	-	98	2	981	90	Pārtraukta griešana, trauslu materiālu, siltumizturīgu un titāna sakausējumu tīrapstrāde.
-	-	97	3	1079	91	
-	-	96	4	1275	89,5	
-	-	94	6	1324	88,5	Pārtraukta griešana, trauslu materiālu, siltumizturīgu un titāna sakausējumu pustīrapstrāde.
-	-	94	6	1275	90	
-	-	92	8	1373	87,5	Pirmapstrāde; austenīta tēraudu apstrāde
-	-	85	15	1618	86,0	Ēvelgriezņi un kalšanas griezņi
-	-	80	20	1863	85,0	
30	-	66	4	883	92	Tērauda tīrapstrāde procesā
15	-	79	6	1079	90	Tērauda tīrapstrāde un pustīrapstrāde.
14	-	78	8	1128	89,5	
5	-	85	10	1275	88,5	Pirmapstrāde; apstrādāšana ar mainīgu griešanas spēku
5	-	83	12	1472	87	
4	3	81	12	1520	87	Ēvelgriezņi un kalšanas griezņi; pārtraukta griešana
4	3	78	15	1570	88	

1.8. Griezējplāksnīšu veidi, ģeometrija un skaidu laužēju raksturojums.

Griezējinstrumenti, kuri ir aprīkoti ar daudzskaldņu cieta sakausējuma plāksnēm, kuras ir mehāniski piestiprinātas pie instrumenta korpusa, ir plaši izplatīti, jo tiem ir būtiskas priekšrocības, salīdzinājumā ar saliktas konstrukcijas cieta sakausējuma instrumentiem, kuros plāksnes ir pielodētas pie korpusa. Pastāv daudz griezējplāksnīšu veidi un to ģeometrijas. Skaidu laužēja ģeometrijas ir vizuāli atšķirīgas. Atšķiras arī plāksnīšu stiprināšanas veids uz turētāja [51] (att.14. un15).



1.14.att. Dažādu griezējplāksnīšu formas [51]



1.15. att. un skaidu laužēja ģeometrijas piemērs [51].

Griezņiem, kuri ir aprīkoti ar vairāku griezējasmēņu plāksnēm, priekšrocības ir sekojošas:

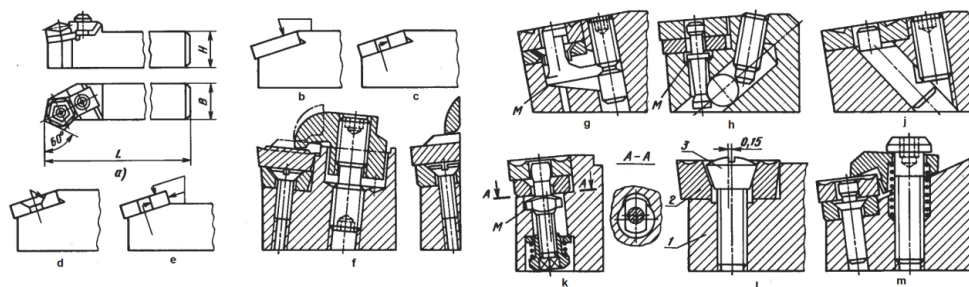
- 1) Asmens izturības palielināšanās, jo nav iekšējie spriegumi, kas rodas salodējuma gadījumā.
- 2) Drošības un ilgmūžības pieaugums, jo balsta virsma zem plāksnes griežņa korpusā var būt ļoti cieta. Šajā gadījumā griežņa korpusā var tikt izmantotas līdz 100 plāksnēm. Lai palielinātu korpusa mūža ilgumu, zem griezošās plāksnes uzstāda balsta cieta sakausējuma plāksni, kā rezultātā korpusā var izmantot līdz 150 plāksnēm.
- 3) Konstrukciju tērauda ietaupījums, jo griežņa korpus tiek izmantots vairākkārtēji.
- 4) Nav vajadzīga griežņu asināšanas operācija. Pēc kārtējā asmeņa plāksnīti var pagriezt, vai nomainīt.

5) Vairākumam plākšņu veidu ir skaidas virsmas fasonforma, kura nodrošina skaidu tīšanos vai laušanu.

6) Nodilušās plāksnes pārstrādā, atdalot volframu un citus dārgus elementus, kurus vēlāk atkal izmanto cieto sakausējumu izgatavošanā.

Griežņu konstrukcijas, kuras ir aprīkotas ar daudzskaldņu plāksnēm atšķiras ar lielu pielietojamo stiprināšanas veidu daudzveidību. Šos stiprinājumu veidus var apkopot dažāds shēmās (att.1.16., b,d,). Stiprinājumu ar aizķeri izmanto plāksnēm bez atvērumiem, tajā skaitā no keramikajiem materiāliem. Plāksni novieto aizvērtā rievā un bāzē uz balsta un sānu virsmām. Tādējādi tiek nodrošināta augsta plākšņu bāzēšanas precizitāte un stiprinājuma drošība. Tērauda sagatavju apstrādes griežņiem var izmantot speciālu skaidu laužēju.

Iespējama arī pagriešanas elementa izmantošana (kloķis, svārsta tapa) izmantošana (att.1.16, c, j - m), kas nodrošina plāksnes piespiešanu korpusa aizvērtās rievas sānu virsmām. Šo metodi izmanto, lai stiprinātu plāksnes ar atvērumiem, tas nodrošina augstu bāzēšanas precizitāti, bet negarantē plāksnes balsta virsmas precīzu kontaktu korpusa balsta virsmai. Spraugu var novērst piespiežot plāksni manuāli stiprinājuma pievilkšanas laikā. Šīs metodes priekšrocība – nav izvirzītu stiprinājuma detaļu. Plākšņu stiprināšanas veids, kas atainots att.16, k, izslēdz nepieciešamību griežņa konstrukcijā izmantot skrūvi. Lai pagrieztu un nomainītu plāksni, pietiek saspīest atsperi (att.16, j un k punkts, attiecībā pret kuru pagriežas plāksnes stiprinājuma detaļa, kas apzīmēta ar burtu M).



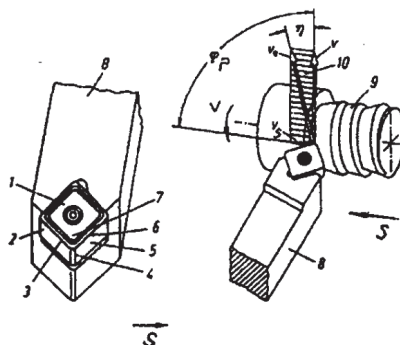
1.16.att. Griežņu turētāji, aprīkoti ar cietsakausējuma ātri maināmām vairāku griezējasmaņu plāksnītēm un to nostiprināšanas veidi [52].

Stiprināšanas shēma, kas atainota att.1.16, d, paredz plākšņu pielietošanu ar konisku stiprināšanas atvērumu stiprināšanai ar skrūvēm, kurām ir koniska galviņa. Skrūves ass 3 ir novirzīta par 0,15 mm attiecībā pret plāksnes atvērumu (att.16, l), kas nodrošina plāksnes 2 piespiešanos pie aizvērtās rievas balsta un sānu pusēm 1. Stiprinājums ir vienkāršs un pēdējo gadu laikā ir plaši izplatīts. To izmanto arī kāta frēzēs un virpošanas instrumentos.

Plāksnes stiprināšana starp tapu un ķīli-aizķeri (att.16, f, m) piespiež plāksni pie balsta virsmas. Griežņa konstrukcija ir mazāk darbietilpīga, kā augstāk minētās, un to būtu vēlams izmantot tikai universālā aprīkojumā. Konstrukcijas, kas atainotas att.16, c, d, var pielietot gan universālā aprīkojumā, gan automātiskajās līnijās un darbgaldos ar skaitlisko programmvadību ar nosacījumu, ka tiks izmantotas paaugstinātas precizitātes plāksnes. Paaugstinātas precizitātes plāksnes kopā ar stiprinājumu, kas nodrošina precīzu plākšņu uzstādīšanu pie to pagriešanas vai nomaiņas, ļauj izvairīties no atkārtotas griežņa izmēra uzstādīšanas [52].

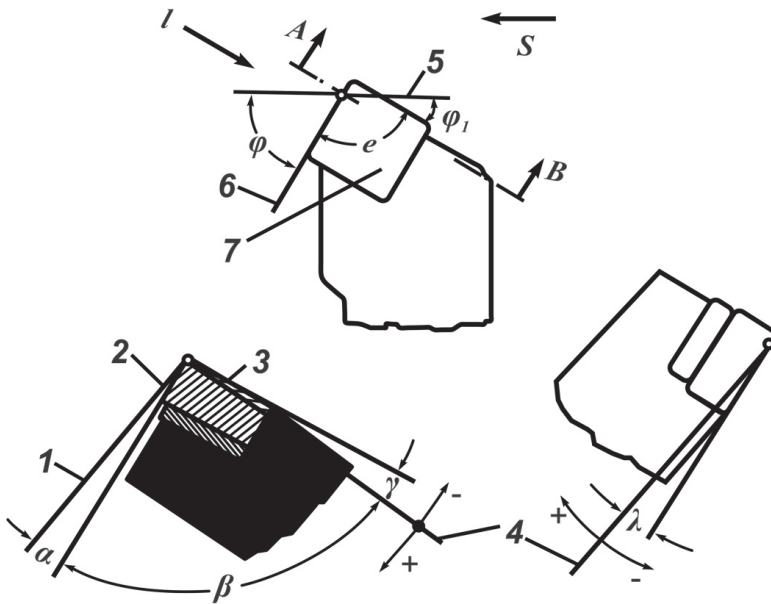
Daudzskaldņu plākšņu izmantošana ļauj samazināt to griežņu nomenklatūru, kuri atšķiras ar dažādiem leņķiem φ , izveidojot speciālas konstrukcijas, kas nodrošina plāksnes pagriešanos griežņa korpusā [53].

Apvirpošanas griezējinstrumenta un apvirpošanas procesa parametri ir parādīti uz 1.17. Ir parādīti sagataves un griežņa parametri: 1-mehāniski stiprināta griezējplāksnīte, 2 - palīgmugurvirsmas, 3-palīgriezējšķautne, 4-griežņa virsotne, 5-galvenā mugurvirsmas, 6-galvenā griezējšķautne, 7-skaidvirsmas, 8-griežņa kāts, 9-sagatave, 10-darba plakne, v_c -apstrādes efektīvais ātrums, v_s -padeves ātrums, φ_p -padeves kustības leņķis, η -apstrādes ātruma leņķis.



1.17.att. Apvirpošanas instrumenta un apvirpotās sagataves parametri [53].

Attēlā 1.18 attēlotie leņķi kalpo instrumenta stāvokļa un formas definēšanai telpā. Uz attēla: 1 instrumenta griezējšķautnes plakne, 2 mugurvirsmas, 3 skaidvirsmas, 4 instrumenta pamatplaknei paralēla plakne, 5 darba plakne, 6 galvenās griezējšķautnes iestatīšanas plakne, 7 ātrmaināma griezējplāksnīte, λ skaidleņķis, α mugurleņķis, β ķīlleņķis, φ galvenais iestatīšanas leņķis, ε virsotnes leņķis, λ galvenā griezējasmaņa slīpuma leņķis, φ_1 palīgiestatīšanas leņķis *Apstrādes iestatīšanas leņķis* φ ir leņķis starp galveno griezējšķautni un darba plakni. *Virsošnes leņķis* ε ir leņķis starp galveno un palīggriezējšķautni, un to nosaka griezējšķautņu ģeometrija. Ir spēkā summa $\varphi + \varepsilon + \varphi_1 = 180^\circ$. Mazs palīgiestatīšanas leņķis φ_1 būtiski samazina virsmas raupjumu R_a . *Galvenās griezējšķautnes slīpuma leņķis* λ , ir leņķis starp griezējšķautni un pamatplaknei paralēlu plakni un tas ir redzams, skatoties sānskatā uz galveno griezējšķautni. *Mugurleņķi* α , *ķīla leņķi* β un *skaidleņķi* γ mēra griezējšķautnes normālplaknē, un to kopējā summa parasti ir 90° [53].



1.18.att. Griezējplāksnītes ģeometrijas raksturojošie leņķi [53].

1.9. Instrumenta ģeometrijas ietekme uz griešanas procesu

Griežņa, kā arī jebkura cita instrumenta, griezējdaļas leņķi ievērojami ietekmē apstrādātās virsmas kvalitāti un apstrādes ražīgumu, griežņa nodiluma intensitāti, griešanas spēkus un virpošanas jaudu. Aizmugurējais leņķis α samazina virpošanas un griežņa mugurvirsmas darbu. Atkarībā no darba apstākļiem leņķi α izvēlas 6...12° robežās (att.1.18). Mazākus leņķus α izvēlas, apstrādājot mīkstus materiālus, lielākus – cietus un trauslus materiālus, kā arī lielas griezuma virsmas gadījumā [54,55].

Skaidas leņķis γ kalpo skaidu veidošanās procesa atvieglošanai. Palielinot leņķi γ , samazinās darbs, kas saistīts ar griešanas procesu, uzlabojas skaidu novākšanas apstākļi un paaugstinās apstrādātās virsmas kvalitāte. Tomēr, leņķa γ palielināšana noved pie griezošā ķīļa izturības samazināšanās un veicina tā nodilumu mazāk intensīvas siltumnovades un izdrupšanas. Leņķi γ izvēlas atkarībā no apstrādājamās detaļas un instrumenta materiāla īpašībām, griešanas apstākļiem un daudziem citiem faktoriem. Izvirpošanas griežņiem, piemēram, tas var mainīties robežās no -10 līdz +20 °C. Apstrādājot cietus un trauslus materiālus, izvēlas griežņus ar mazāku leņķi γ , mīkstus – ar lielāku leņķi γ . Apstrādājot rūdīto tēraudu ar griezni, kas aprīkots ar cieto sakausējumu, kā arī pārtrauktas griešanas apstākļos izvēlas negatīvu leņķi γ [56,57].

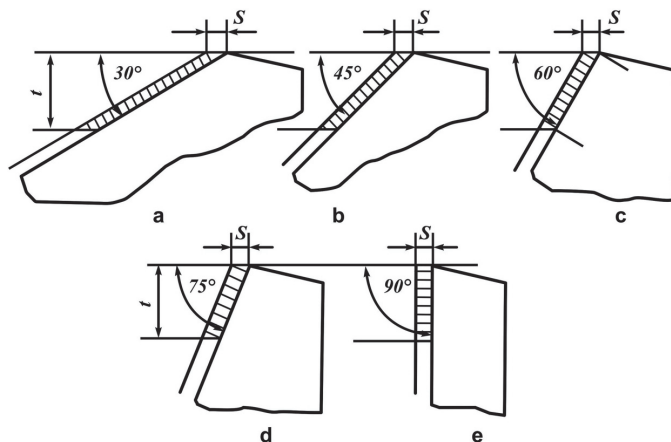
No leņķu α un γ lielumiem ir atkarīga griežņa griezējdaļas izturība, griešanas spēki, griešanas zonas temperatūra, izlietojamā jauda u.c. Plāna galvenais leņķis φ ietekmē virsmas izturību un gludumu. Samazinot leņķi φ , samazinās mikronelīdzenumu augstums, palielinās griežamā slāņa platums un samazinās tā biezums, pazeminās griežņa siltuma un spēka slodze un, sekojoši, samazinās tā nodilums. Tomēr, leņķa φ samazināšanas rezultātā krasi pieaug griešanas spēks P_y , kas ir perpendikulārs sagataves asij, kas izsauc tās izliekumu un iespējamās vibrācijas, kuras, savukārt, palielina virsmas raupjumu un instrumenta nodilumu. Leņķi φ izvēlas robežās 30...90° atkarībā no apstrādes veida, griežņa tipa, sagataves un instrumenta cietības. Apstrādājot mazas cietības sagataves, pielieto griežņa balsta caurlaides ar $\varphi = 90^\circ$.

Griežņa plāna palīgleņķis φ_1 kalpo virsmas berzes samazināšanai starp aizmugurējo palīgvirsmu un sagataves apstrādāto virsmu. Samazinot šo leņķi, samazinās apstrādātās virsmas raupjums un griežņa nodilums. Apvirpošanas griežņiem, kuri apstrādā cietas sagataves bez

iegriešanās, $\varphi = 30 \dots 45^\circ$. Iegriešanās – tā ir griešana ar šķērspadevi sagataves dziļumā, kas ir vienāda ar šī griežņa gareniskās padeves apstrādes dziļumu.

Galvenās griezošās malas slīpuma leņķa λ lielums ietekmē skaidu noslīdes virzienu no instrumenta skaidas virsmas. Ja leņķis λ ir pozitīvs, skaidas tiek virzītas no kreisās puses uz labo. Ja leņķis λ ir negatīvs, nogrieztās skaidas virzās uz kreiso pusi – uz pusi, kur atrodas darbmašīnas vadības kloķi. Lai izvairītos no apkalpojošā personāla savainošanās ar skaidām, labāk būtu izvēlēties pirmo gadījumu, t.i. griezni ar pozitīvu leņķi λ . Pastāv arī citas galvenās griezošās malas slīpuma leņķa zīmes motivācijas. Noslēdzošai neiesaka pieņemt pozitīvu leņķi λ , jo skaidas var sagriezties ap sagatavi un skrāpēt apstrādāto virsmu. Tāpēc tīrapstrādē leņķis $\lambda = 0 \dots -5^\circ$, sākotnējā apstrādē $\lambda = 0 \dots +5^\circ$.

Pozitīvs leņķis λ kalpo arī griezošās malas stiprināšanai, jo griežņa iegriešanās brīdī triecienspēks ir virzīts nevis uz asmeņa augšdaļu, bet uz izturīgāku vietu, kas attālināta no virsotnes. Leņķu α un γ lielumi mainās, ja griežņa virsotne tiek uzstādīta augstāk vai zemāk par sagataves rotācijas asi (centru līnijas), bet plāna leņķu φ un φ' lielumi mainās atkarībā no griežņa ass izvietojuma attiecībā pret sagataves asi [58]. Citi φ leņķa vērtību atšķirības ir labi redzamas 1.19.att.



1.19.att. Dažādu φ leņķa vērtības ietekme uz nogriežama materiāla skaidas formu [autora attēls].

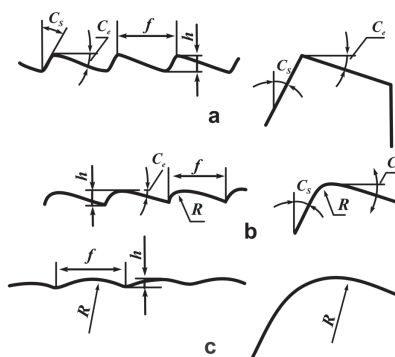
1.10. Virsmas raupjums virpošanā

Virsmas raupjums mehāniskās apstrādes laikā ir atkarīgs no izveidojušos skaidu tipa, griežoša instrumenta profila un no tā optimālajiem ģeometriskajiem parametriem.

Pārtraukta skaidu veidošanās var novest pie plaisām uz detaļas virsmas, griešanas spēka svārstībām, griežņa vibrācijas. Tas viss negatīvi ietekmē apstrādātās virsmas raupjumu. Analogisks rezultāts rodas arī nepārtrauktas skaidu veidošanās apstākļos, ja ir konstatēta uzauguma veidošanās, nogulsnes. Uzaugums periodiski tiek norauts no griežņa un bojā apstrādāto virsmu. Vispārīgi griešana apstākļos, kad skaidas nepārtraukti tiek novirzītas un uzaugums neveidojas, ir labāka, jo šādi samazinās vai pilnībā nav spēka svārstību un ar tām saistīto apstrādes grūtību.

Pārtrauktas skaidas var tikt pārveidotas nepārtrauktās, ja tiek palielināts priekšējais leņķis, vai tiek izmantoti eļļošanas-dzesēšanas šķīdumi. Šādi var likvidēt arī uzaugumu, kurš saistīts ar berzi un priekšējās virsmas spēkiem (ar eļļošanas-dzesēšanas šķīdumu palīdzību vai ar griešanas ātruma palielināšanas starpniecību) [56].

Ja nav uzķepuma, uz apstrādātās sagataves virsmas veidojas instrumenta profils. Apstrādātās virsmas mikronelīdzenumu formu virpošanas laikā nosaka griežņa virsotnes ģeometriskā forma (1.20.att.). Apstrādātās virsmas raupjuma apzīmēšanai tiek izmantotas divas standarta metodes.



1.20.att. Griežņa ģeometrijas ietekme uz apstrādātās virsmas mikronelīdzenumiem (attēlotas padeves pēdas) [autora attēls].

Pirmā metode balstās uz mikronelīdzenumu augstuma mērīšanu no virsotnes līdz iedobei (Rz), otra – uz attāluma mērīšanu no virsotnes un iedobēm līdz profila viduslīnijai (apzīmējums Ra). Kā viduslīniju pieņem līniju, kas ir paralēla profila pamatvirzienam un daļa profila tā, ka profila laukumi, kuri atrodas virs un zem šīs līnijas, ir vienādi savā starpā [59].

1.11. Cietsakausējuma griezējinstrumentu attīstības perspektīvas

Uz evolūcijas raksturu norāda dažādu darbarīku materiālu grupu griešanas ātrumi, kuri parasti rūpniecībā tiek izmantoti tērauda apstrādei, (tab. 1.6.) [60].

Tabula 1.6.

Dažādu griezējinstrumentu materiālu grupu griešanas ātrumi

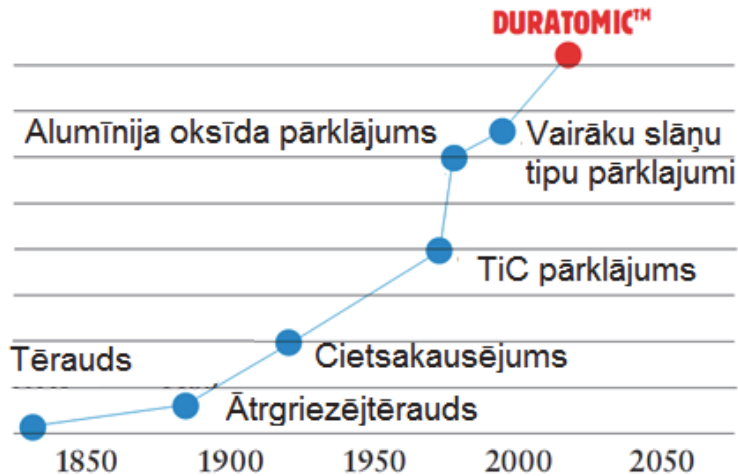
№	Griezējinstrumentu materiāls	Griešanas ātrums, m/min
1.	Oglekļa tērauds	5...20
2.	Leģētais tērauds	15...30
3.	Ātrgriezēja tērauds	30...50
4.	Cietais sakausējums	150...250
5	Jaunās paaudzes pārklātie cietsakausējumi	250...500

Šīs salīdzinājums dod mums iespēju nākotnē paredzēt it kā pārāk vienkāršu attīstību. Varētu domāt, ka efektīvāks instrumentu materiāls ātri izslēgs no saraksta mazāk efektīvo. Tomēr, ievērojot lielo metālgriešanas apstākļu daudzveidību, daudzi instrumentu materiāli neizzudīs un tos turpinās pielietot.

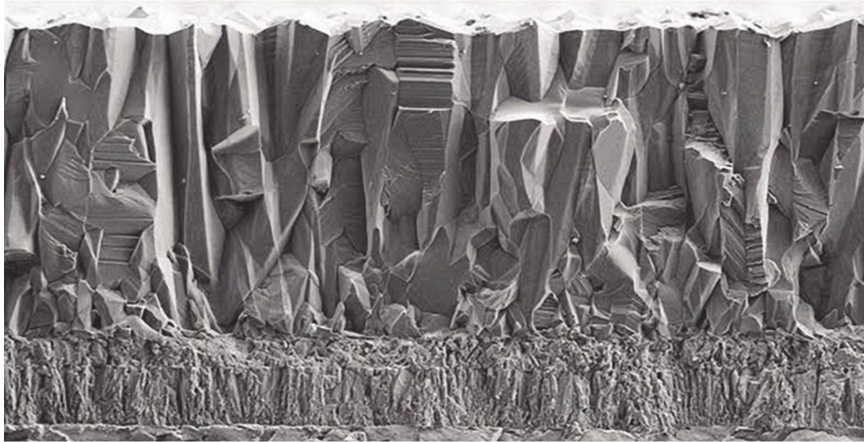
Katras griezējinstrumentu materiālu grupas pielietošanas īpatsvars ir dažāds. Tomēr, neskatoties uz pēdējo gadu tendencēm, ātrgriezēja tēraudi ir viens no pamatmateriāliem griezējinstrumentu izgatavošanai, it īpaši to instrumentu izgatavošanai, kuriem ir fasona vai ievērojama garuma griezošās daļas (vītņu griešanas, zobratu griešanas instrumenti, caurvilces, fasongriezņi utt.). Universālie instrumenti (urbji, paplašinātāurbji, rīvurbji, zāģi, diskfrēzes un kāta frēzes), kuri tiek plaši pielietoti rūpniecībā, pārsvarā arī tiek izgatavoti no šiem tēraudiem.

Ievērojami piekāpjoties cietajiem sakausējumiem siltumizturības un nodilumizturības ziņā, ātrgriezēja tēraudi ir visizturīgākie pie lieces slodzes (σ_i līdz 400 MPa) un triecienizturībā, šajā ziņā pārējie materiāli nav spējīgi ar tiem konkurēt. Turklāt, instrumenti no ātrgriezēja tērauda var tikt noasināti līdz maksimāli iespējamajam griezošās malas asumam, kas ir ļoti svarīgi tīrapstrādes procesos; tiem ir augsta griešanas īpašību stabilitāte un drošība darbā, kam, savukārt, ir liela nozīme, ja tie tiek izmantoti automātiskā aprīkojumā ar vairāku instrumentu iestatījumiem [61].

Ar CVD, pielietojot Duratomic tehnoloģiju metodi uzklāts alumīnija oksīds Al_2O_3 (1.21., 1.22. att.) parāda, ka materiāla lielākie graudi ir pozicionēti vertikāli, kas padara to cietāku un stingrāku, kā arī efektīvāk izklidē siltumu. Tieši šī modificētā struktūra ļāva kompānijai “Seco Tools” apgalvot, ka Duratomic- pārklājums ir "pasaulē pirmais atomiski modificētais pārklājums".



1.21.att. Grizējinstrumentu kopēja attīstība [61].



1.22 att. Ar Duratomic- tehnoloģiju pārklātais griezējinstrumenta, ir redzama Al_2O_3 pārklājuma vertikālā kristālu pozicionēšanas struktūra [61].

1.12. Nodiluma elementi, liknes un instrumenta nodiluma kritēriji.

Griešanas procesā apstrādājamā un rīka materiālu mijiedarbības rezultātā instrumenta skaidas un aizmugurējās virsmas kontaktaukumi nodilst. Griezējinstrumenta kontaktaukumu nodilums notiek nepārtraukti visa griešanas procesa laikā praktiski visos iespējamajos griešanas apstākļos. To ietekmē gan rīka, gan apstrādājamā materiāla fiziski-mehāniskās īpatnības. Griezējinstrumenti darba laikā tiek pakļauti intensīvam nodilumam. Instrumenta kontaktēšanās ar skaidām un apstrādājamo sagatavi notiek ļoti augsta spiediena un temperatūras apstākļos. Instrumenta darbības apstākļus vēl jo vairāk sarežģī tas, ka griešanas zonā ir augsti spiediena un temperatūras gradienti.

Griezējinstrumenti iziet no ierindas priekšējās un aizmugurējās virsmas izdīšanas rezultātā, kā arī griezošās šķautnes izdīšanas rezultātā. Uz skaidas virsmas griezošās malas tuvumā bieži veidojas iedobe vai bedrīte

Instrumenta nodilumu izsauc samērā lielu instrumentālā materiāla daļiņu aiznešana ar skaidu. Instrumenti, kas tiek izmantoti pārtrauktā griešanā ir īpaši pakļauti sadrupšanai. Instrumenta sadrupšana pastiprinās griešanas apstākļos ar atbilstīgu uzķepumu. Uzķepums uz

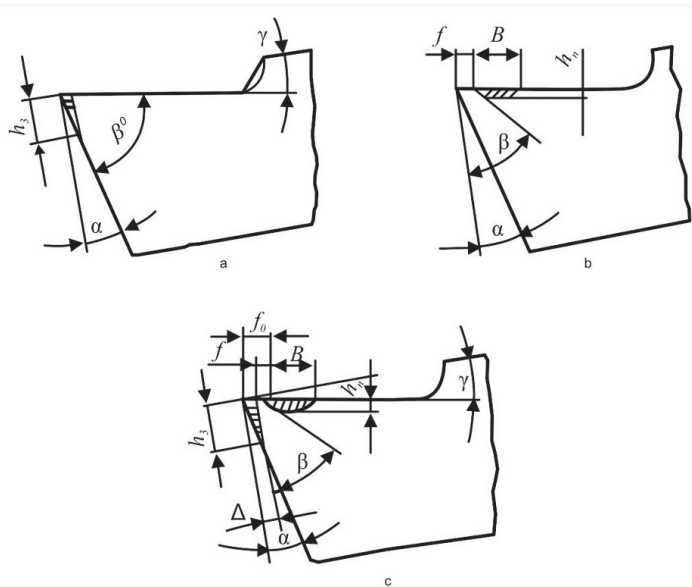
griežņa nav absolūti stabils, tas periodiski iznīcinās. Kopā ar uzķepumu var atdalīties arī griezošā asmens daļiņa, kura ir pielipusi uzaugumam. Tas noved pie griezošās malas sadrupšanas.

Griežņa skaidas un aizmugurējās virsmas nodilums, kā arī griezošās šķautnes sadrupšana maina instrumenta ģeometriju. Darbā ar nodilušu instrumentu griešanas spēki parasti pieaug. Dažos gadījumos priekšējās virsmas bedrītes veidošanās var veicināt spēku sarukšanu, ievērojami palielinot skaidas lenķi. Aizmugurējās virsmas nodilums un griezošās šķautnes sadrupšana gandrīz vienmēr palielina griešanas spēku. Palielinoties instrumenta nodilumam, pasliktinās apstrādātās virsmas kvalitāte, īpaši, ja instruments drūp un nodilst pa aizmugurējo skaldni. Atsevišķos gadījumos aizmugurējās virsmas nodilums var veicināt apstrādātās virsmas tīrību, ja nodiluma laukumam ir nogludinošs efekts. Aizmugurējās virsmas nodilums ietekmē griežņa plāna ģeometriju. Rezultātā, var mainīties apstrādājamo detaļu izmēri vai to forma (piemēram, izmantojot fasongriežņus). Instrumenta nodilums var izsaukt vibrāciju [61,62].

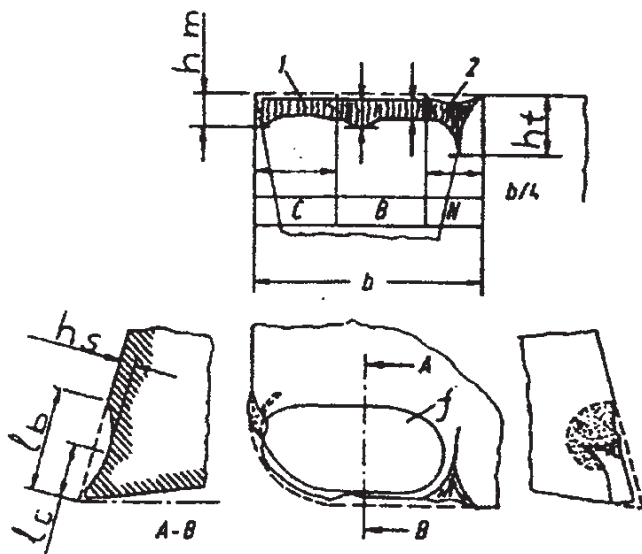
Nodiluma rezultāts ir pilnīga griežņa virsotnes iznīcināšana. Tas var notikt palielinoties temperatūrai, kura atļaidina instrumenta virsotni un noved pie plastiskas deformācijas, ja ir mazs rīka materiāla tecēšanas spriegums. Atlaidināšanas process sākas ar griezošo šķautni, pēc tam izplatās visā instrumentā. Papildus izskatītajam instrumenta pilnīgas bojāšanas mehānismam, rīks var iziet no ierindas trauslas virsotnes bojāšanās rezultātā, ko pavada instrumentālā materiāla lielu daļu atdalīšanās. Bojājumi vai plastiskās deformācijas dēļ biežāk sastopami ātrgriezējūtēraudam un oglekļa tērauda instrumentiem. Trauslā sagraušana raksturīga cieta sakausējuma un keramiskajiem instrumentiem.

Atkarībā no griešanas apstākļiem, instrumentālā un apstrādājamā materiāla īpatnībām dominējošais nodilums ir vērojams uz galvenās aizmugurējās virsmas (att. 1.23., *a*), uz skaidas virsmas (att. 1.23., *b*) un uz papildus aizmugurējās virsmas (att. 1.23., *c*). Dažreiz skaidas un aizmugurējās virsmas nodiluma apmērs vienlaikus sasniedz dominējošā līmeni (att. 1.23., *b*). Instrumentu nodilšanas gadījumā mainās arī griezošās malas noapaļošanās rādiuss (att. 1.24.). Dominējošais nodilums uz instrumentu aizmugurējās virsmas visbiežāk rodas gadījumā, ja ir mazs griezuma biezums, it īpaši mazplastisku materiālu tīrapstrādes gadījumā. Dominējošais nodilums uz instrumenta skaidas virsmas ir vērojams tad, ja aizmugurējā virsma tiek pasargāta no nodiluma pateicoties uzķepumam vai kad skaidas virsmas temperatūra ievērojami pārsniedz aizmugurējās virsmas temperatūru.

Priekšējās virsmas nodiluma īpatnība ir tāda, ka noteiktā attālumā no griezošās malas veidojas bedre. Pieaugot nodilumam apmēra izmaiņām, bedres platums un dziļums palielinās, tās liekuma rādiuss samazinās. Ja ir nodilums uz aizmugurējās virsmas, tad parādās pastāvīga vai mainīga platuma fāzītē. Ja vienlaikus nodilst gan skaidas, gan aizmugurējā virsma, tad tā skaidas virsmas laukuma daļa, kura atrodas starp nodiluma bedri un griezošo malu, pakāpeniski no abām pusēm samazinās un griezošās malas izturīgums, attiecīgi, samazinās [63].

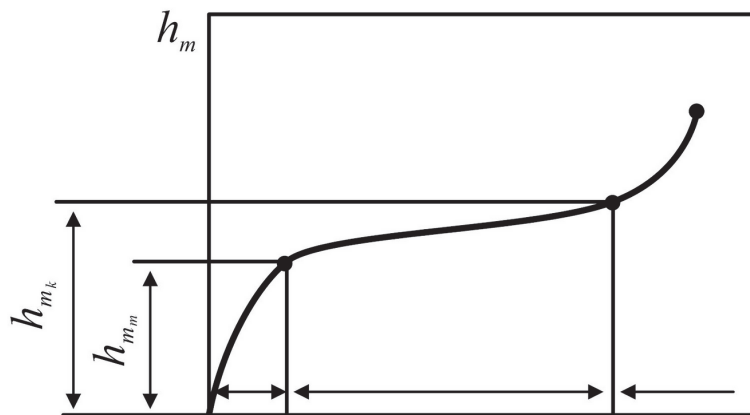


1.23.att. Griezējinstrumenta nodiluma ģeometrija pa virsmām: a – pa galveno aizmugurējo; b – pa aizmugurējo un priekšējo; c – pa skaidas; d – pa papildus aizmugurējo [autora attēls].



1.24att. Griezošās malas nodilšana ar vienkāršoto apzīmējumu [54] : C, B, N – nodiluma apgabali; l_b – nodiluma bedrītes garums; l_c – attālumš līdz nodiluma bedrītes centram, h_s – nodiluma bedrītes dziļums; h_m – mugurvirsmas nodilums; h_t – triecienslodzes nodilums; f – bedrītes nodiluma forma.

Instrumenta darbības pārtraukšana, lai varētu to nomainīt, var būt vairāku cēloņu gadījumā: liela nodiluma intensivitātes paaugstināšanās, apstrādātās virsmas raupjuma, nelīdzenuma pieaugums, izmēra zudums, griešanas spēka pārmērīga paaugstināšana utt. Pieļaujamā nodiluma lieluma skaitliskā vērtība, pie kura instrumenta darbību jāpārtrauc, tiek saukta par instrumenta truluma kritēriju. Instrumenta darbības laiks, kurš ir starp divām viens pēc otra sekojošām asināšanām, raksturo tā izturības periodu (1.25.att.).



1.25att. Izmēra nodiluma izmaiņas griešanas laikā [autora attēls].

Kad priekšējās virsmas nodilumam ir dominantes nozīme, par truluma kritēriju kļūs bedres izmēri. Tomēr, ja orientēties uz kādu noteiktu vienu lineāru bedres izmēru, tad vienā un tajā pašā absolūtā nodilumā priekšējās virsmas nodiluma pakāpe krīt līdz ar padeves pieaugumu. Tāpēc lietderīgi būtu ieviest priekšējās virsmas relatīvā nodiluma jēdzienu (1), kurš būtu izteikts attiecībā:

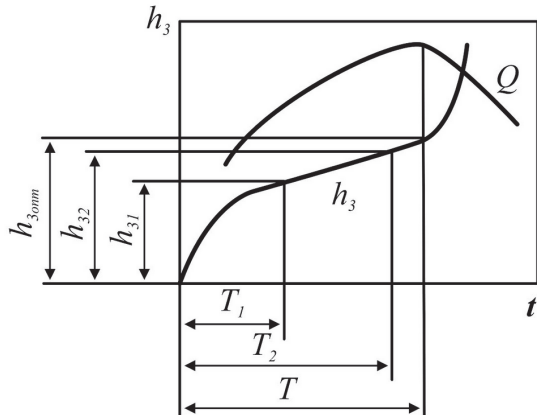
$$K = \frac{h_l}{\frac{B}{2} + f}, \quad (1.2)$$

kur h_l – ir bedres dziļums; $\frac{B}{2} + f$ – attālums no griezošās malas līdz bedres centram (sk. Att.1.23., b).

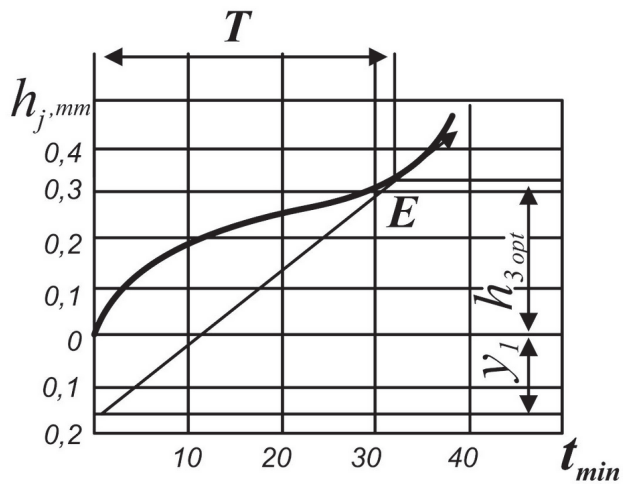
Priekšējās virsmas pieļaujamais relatīvais nodilums ir saistīts ar faktiskā griezošā ķīļa izturību, tāpēc ir atkarīgs no instrumenta materiāla. Cieta sakausējuma griežņiem pieļaujamais nodilums $K=0,3 - 0,4$, ātrgriezējtaurdam $K=0,1 - 0,2$ [64].

Aizmugurējās virsmas pieļaujamais nodilums h_3 var būt sasniegts, ja aizmugures virsmā ir dominējošais nodilums. Šajā gadījumā izšķir optimālo h_{3opt} un tehnoloģisko h_{3tehn} nodiluma

kritēriju. Nodiluma kritērija h_{3opt} gadījumā tiek nodrošināta maksimālā summārā instrumenta noturība vai ilgmūžīgums.



1.26.att. Griešanas laika ietekme uz griešanas instrumenta nodilumu un noturību



1.27.att. Griešanas nodiluma optimālā kritērija noteikšana pēc nodiluma līknes (autora attēls)

Piedāvātajā piemērā (1.26., 1.27.att.) $h_{3opt} = 32\text{mm}$ un attiecīga h_{3opt} izturība $T=31$ min. Ir noteikts, ka $T = 31$ min., lielums ir atkarīgs no griešanas režīma, apstrādājamā materiāla,

instrumenta ģeometrijas u.c. Bieži, lai atvieglotu h_{3opt} konstatēšanu, uzskata, ka tas atbilst nodilumam, kurš ir vienāds ar katastrofiskā nodiluma zonas sākumu. Šādi dabū h_{3opt} lielumu, kurš ir mazliet mazāks nekā faktiskais. Nodiluma kritērijs h_{3opt} tiek izmantots tajā gadījumā, ja griešanas procesam nav piemērotas papildus prasības (virsmas līdzenums, raupjums, precīzums u.c.), t.i. pamatā detaļu pirmapstrādes apstākļos. Cieta sakausējuma griežņiem tērauda pirmapstrādes procesā pieļaujamais aizmugurējās virsmas nodiluma lielums ir amplitūdā $h_{3opt}=0.8...1.0\text{ mm}$ [65].

Tehnoloģiskais nodiluma kritērijs h_{3tehn} ir saistīts ar svarīgu prasību izpildi precizitātes un apstrādātās virsmas kvalitātes ziņā, tāpēc to izmanto beigu operācijās. Pieņemtā h_{3tehn} lielums ir atkarīgs no apstrādājamās detaļas tīrības klases, pieļaujamā palieku sprieguma, metāla izmaiņām, apstrādājamā un instrumentālā materiāla īpatnībām, no tā, cik stingri darbojas sistēma: darbmašīna – ierīce – instruments – detaļa u.c. Pie tam ir nepieciešams pievērst uzmanību tam, ka h_{3tehn} lielumi nedrīkst būt uztverti kā pastāvīgi, kuri ir, piemēram, saistīti ar noteiktu apstrādājamās virsmas tīrības klasi un neatkarīgi no griešanas režīma, instrumenta ģeometrijas u.c., kā tas tiek bieži darīts (3). No vairāku pētnieku darbiem [4] izriet, ka griešanas režīma elementu (s, t, un v) savstarpējā mijiedarbība uz to intervālu ar vienādu kritisko griežņa nodilumu atrašanās vietu un lielumu ir samērā sarežģīta (I – režīmu zona, kur $h_3 < 0.4\text{ mm}$, strādājot tajos, normāla asināšana tiek pārtraukta griežņa nošķelšanās dēļ, uz apstrādātās virsmas rodas vibrācijas un nelīdzenumi; II – zona, kur var tikt sasniegts $h_3 = 0.4\text{ mm}$; III – režīmu zona, kur $h_3 < 0.4$, kuri izraisa griezošā asmeņa disfunkciju, jo uz priekšējās virsmas veidojas kritisks nodilums). Var tikai norādīt, ka, ja palielina padeves un griešanas dziļumu, griešanas ātruma intervāls, darbā ar kuru normāla griešana iespējama līdz maksimālam nodilumam griežņa aizmugurējā daļā, pakāpeniski sašaurinās.

Tas viss ievērojami apgrūtina izturības perioda T noteikšanu, ja plašā diapazonā tiek mainīti griešanas parametri, un stimulē pastāvīgi izvērtēt nodiluma pakāpi, vadoties pēc relatīvajiem raksturojumiem, kuri var tikt ielietoti nodiluma procesa izvērtēšanai jebkurā izturības perioda brīdī.

1.13. Faktori, kas ietekmē griezošo instrumentu izturību un nodilumu.

Griezošo instrumentu nodilums ir sarežģīta fiziska parādība, kura noris smagos berzes apstākļos: instrumenta un apstrādājamās detaļas virsmas kontaktējošās daļas slīd viena gar otru paaugstinātas slodzes, temperatūras un ātruma apstākļos.

Instrumenta kontaktvirsmas berzes spēku iedarbībā var dažādā veidā sagrūt (izdilt). Viens vai otrs sagrūšanās veids ir atkarīgs no berzē iesaistīto ķermeņu īpatnībām, gan no ārējiem apstākļiem, slodzes, temperatūras u.c. Slodze un temperatūra, kā arī kontaktvirsmu savstarpējās pārvietošanās ātrums zināmā mērā nosaka frikcionāro sakarību pārkāpšanas veidu. Slīdes procesā virsmu ārējais slānis sakarst, kā rezultātā mainās virsmu īpatnības. Noteiktā slodzes un temperatūras intervālā frikcionālo sakarību pārkāpšanas veids paliek nemainīgs, tipisks dotajiem apstākļiem. Sakarā ar to rodas iespēja atšķirt dažādus nodiluma veidus.

Griezošais instruments atkarībā no griešanas apstākļiem ir pakļauts dažādas dabas nodiluma veidiem – adhēzijas, abrazīvajam, difūzajam, ķīmiskajam u.c. Atkarībā no griešanas apstākļiem, instruments var tikt pakļauts vairākiem nodiluma veidiem, vai viens no tiem var kļūt par dominējošo. Viena no nodiluma un berzes īpatnībām griešanas procesā ir tā, ka viens no darbības pāram – apstrādājamais materiāls ir noteikts ar izgatavojamās detaļas konstrukciju.

Tehnologa uzdevums ir atrast vislabvēlīgāko kontrapāri (instrumentālo materiālu) un izveidot tādas kontaktēšanas apstākļus (regulējot pārējos parametrus), lai instrumenta nodilums būtu pēc iespējas mazāks, bet apstrādājamās detaļas virsmas kvalitātes rādītāji atbilstu noteiktajām prasībām [66].

1.14. Griezošā instrumenta nodiluma mehānisms un fiziskie cēloņi

Griezošo instrumentu nodiluma mehānisms un fiziskie cēloņi vienmēr ir bijuši un paliks saistoši pētniekiem, kuri darbojas metālu griešanas jomā. Izvirzītās hipotēzes un nodiluma teorijas sākumā vairākumā tika attiecinātas uz ogļūdeņraža un ātri griezošā tērauda instrumentiem, vēlāk uz cietajiem sakausējumiem, dimantiem, minerālkeramiku un citiem instrumentālajiem materiāliem.

Dotajā laikā vairākums pētnieku [67,68] uzskata, ka griezošais instruments tiek pakļauts dažādas dabas nodiluma veidiem – adgizīvajam, abrazīvajam, difūzajam, ķīmiskajam u.c. Atkarībā

no griešanas apstākļiem dominējošs var būt viens nodiluma veids, vai arī instruments vienlaicīgi var tikt pakļauts dažāda veida nodilumu veidu iedarbībai.

Lai noteiktu summārā nodiluma izmaiņu likumsakarības, nepieciešams gūt priekšstatu par visu nodilumu pamatveidu mehānismiem .

Vairāku pētnieku [69,70,71] veiktie pētījumi liecina, ka cieta sakausējuma instrumenta intensīvais nodilums var rasties apstrādājamā un instrumentālā materiāla savstarpējās difūzijas dēļ.

Saskaņā ar mūsdienu uzskatiem, metāli cietā stāvoklī ir sistēma ko veido pareizi telpā izvietoti pozitīvi joni un relatīvi brīvi elektroni, kuri virzās noteiktās enerģētiskās zonās. Joni veic lielākas vai mazākas amplitūdas siltuma svārstības, saskaņā ar kristāla režģa enerģijas izvietojšanās statistisko likumu.

Svārstības ar lielu amplitūdu noved pie tā, ka joni nespēj atgriezties savā iepriekšējā svārstību centrā, bet ieņem enerģētiski „ērtāku” vietu. Šādus atomu pārvietojumus, kuri pārsniedz vidējos atomu savstarpējos attālumus, pieņemts saukt par difūziju. Ja paaugstinās temperatūra, notiek strauja difūzijas paātrināšanās jo tiek palielināta kristāliskā režģa jonu svārstību amplitūda.

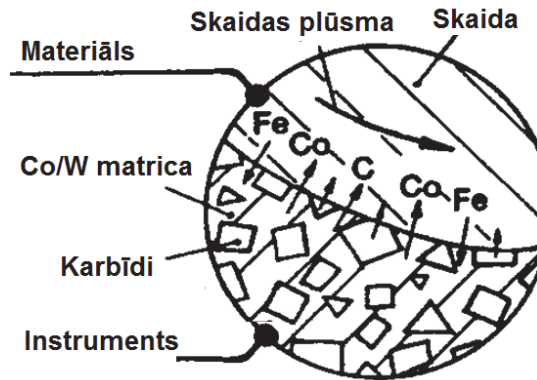
Atomu migrāciju kristāliskajā režģī, iedala: a) atomu migrāciju tīrā metālā vai šķīdinātāja atomu migrāciju cietā sastāvā (šis process tiek saukts par pašdifūziju), b) izšķīdinātā elementa atomu migrāciju šķīdinātāja režģī – heterodifūzija. Reaktīvā difūzija (5) saistīta ar sarežģītu ķīmisku savienojumu rašanos.

Daliņu robežām ir ļoti daudz kristāliskā režģa nepilnību (īpaši pēc plastiskās deformācijā), tāpēc difūzija daļiņu robežu zonā noris lielākā ātrumā (robeždifūzija). Metāla virsmas slāņa liels bojājumu blīvums, kurš saistīts ar dislokāciju izeju, nepiesātinātu saikņu esamību utt., nosaka virsmas difūzijas parādīšanos, kuras ātrums, ir lielāks, nekā robeždifūzijai (1.28.att).

Difūzijas pētījumi cietos ķermeņos parādīja, ka metālos ir spējīgi difundēt tikai tie elementi, kuri tajos izšķīst .

Skaidas un griešanas virsma lielā ātrumā pārvietojas attiecībā pret griezošā instrumenta virsmām. Apstrādājamā materiāla un instrumenta virsmas kontakta laiks ir mērāms ar sekundes simtdaļām un tūkstošdaļām. Kontaktā nepārtraukti iekļaujas aizvien jaunas apstrādājamā materiāla zonas, un kontaktēšanas laikā tās nepārtraukti tiek pakļautas plastiskajai deformācijai. Sakarā ar to griešanas laikā uz instrumenta kontakta virsmām izšķīšanas ātrums ir ļoti liels un atbilst difūzijas sākuma periodam.

Difūzijas nodiluma procesi vislielākajā mērā ir atkarīgi no reaģējošo materiālu pāru īpašībām. Minerālkeramisks instruments nav pakļauts difūzijas nodilumam. Iemesls ir tā inertums attiecībā pret tēraudu. Zināms, ka korunds neizšķīst tēraudā pat tā kušanas temperatūrā. Tas izskaidro keramiskā instrumenta priekšrocības tērauda apstrādāšanā sasildītā stāvoklī.



1.28.att. Atomu difūzijas nodiluma gadījuma mehānisms [69]

1.15. Faktori, kas ietekmē griezošo instrumentu izturību un nodilumu

Nevienmērīgs griežņa skaidas virsmas nodilums, kurš izraisa bedru veidošanos, saistīts ar uzķepuma un dīkstāves zonas aizsargājošo iedarbību, spriegojumu un temperatūras nevienmērību.

Uzķepuma un zonas zem tā iedarbības ietekme parādās saistībā ar skaidu kontaktslāņu kustības ātruma samazinājumu attiecībā pret griežņa skaidas virsmu. Saistībā ar to uz instrumenta skaidas virsmas samazinās nodiluma intensitāte. Jo plastiskāks ir apstrādājamo materiāls, jo lielāks ir aizsargātās zonas garums un jo tālāk no griezošās malas sākas bedru veidošanās uz priekšējās virsmas.

Samērā trausliem apstrādājamiem materiāliem aizsargātā zona ir maza, bedru veidošanās zona koncentrējas šaurā zonā blakus griezošajai malai. Pēc tam, kad skaidas šķērso aizsargāto zonu, kustības ātrums strauji pieaug, kā arī palielinās nodiluma intensitāte. Vēlāk iedarbojas kontaktsprieguma samazinājums, nodiluma intensitāte atkal samazinās un nokrīt līdz nullei punktā, kur skaidas tiek atrautas no skaidas virsmas.

Difūzijas nodiluma apstākļos skaidas virsmas nodilumam arī raksturīga bedru veidošanās. To nosaka nevienmērīgs temperatūras izvietojums un difūzijas ātrums, kā arī kontaktspriegumu nevienmērīgs izvietojums. Nevienmērīgu skaidas virsmas nodilumu ietekmē arī nevienmērīga sakaršana, ko izsauc skaidu novirzes berzes rezultāts.

Aizmugurējo virsmu nodilums notiek arī apstrādājamā materiāla kontaktslāņu plastiskās bremsēšanas apstākļos. Tomēr bedre šajā gadījumā parasti neveidojas, jo aizmugurējās virsmas nodiluma forma pēc kontakta noteikumiem nevar ievērojami atšķirties no griešanas virsmas formas.

Aizmugurējo virsmu nodiluma intensitātei lielākajā daļā gadījumu jābūt lielākai, nekā priekšējā virsmā, jo griešanas virsmas kustības ātrums attiecībā pret instrumenta aizmugurējo virsmu parasti ir lielāks nekā skaidu kustības ātrums gar skaidas virsmu (skaidu sarukuma dēļ).

Svarīgs faktors, kurš nosaka skaidas un aizmugurējās virsmas nodiluma intensitātes attiecību, ir uzķepuma un aizsargātās zonas attīstības pakāpe, kuras atbrīvo instrumenta aizmugurējo zonu no stingrās apstrādājamā materiāla reakcijas un dažos gadījumos novērš aizmugurējās virsmas kontaktu ar apstrādājamo materiālu. Līdztekus liela loma ir arī uzauguma cietības līmenim. Samazinoties nogrieztā slāņa biezumam, uzķepums un aizsargātā zona samazinās, to aizsargājošā nozīme kļūst mazāka, un tāpēc instrumenti, kuri strādā ar mazu nogriežamā slāņa biezumu (izrīvētāji, cilindriskās frēzes, griežņi tīrapstrādei u.c.), nodilst galvenokārt uz aizmugurējās virsmas. Cietsakausējuma instrumenti parasti strādā ar augstu griešanas ātrumu (kad uzķepuma nav), tāpēc šiem instrumentiem aizmugurējās virsmas nodilumam ir noteicošā loma.

Ir zināms, ka uzķepums un aizsargātā zona kontakta malās strauji samazinās, tāpēc bieži var pamanīt gar griezošās malas malām strauju nodiluma koncentrāciju gan uz skaidas, gan aizmugurējās virsmas. To intensificē apstrādājamā materiāla virsmas slāņu uzkalde; uzkaldes slānis nākamajā darbības etapā iesaistās kontaktā un tiek nogriezts ar galvenās griezošās malas palīdzību. Papildus griezošās malas robeždaļa divreiz piedalās griešanā, kas pastiprina tās nodiluma intensitāti [72,73].

1.16. Literatūras analīzes kopsavilkums

Lai atrisinātu iepriekš minētās problēmas darbā " Nerūsējošā tērauda apvirpošanas procesa precizitāte atkarībā no Al_2O_3 nano pārklāta griezējinstrumenta nodiluma ", ar mērķi uzlabot apstrādātās virsmas Ra veiktspēju, tiek ierosināts:

- Pielietot GEM metodi, lai iegūtu griešanas temperatūras vērtības un tās sadalījumu pa instrumentu un sagatavi dažādos griešanas apstākļos.
- Veikt eksperimentālos pētījumus uz eksperimentālās iekārtas, izmantojot 16K20 darbagaldu ar mērinstrumentu sistēmu.
- Tika pētīts virpošanas process, kurā tika izmantots: divu struktūru nerūsējošais tērauds, izmantojot vairāku veidu instrumentus ar dažādu griezēja ģeometriju un nodilumizturīgu pārklājumu.
- Apstrādāt datus, kas iegūti ar skaitliskām un eksperimentālām metodēm, lai izveidotu virsmas raupjuma matemātisko modeli, izmantojot dažādas apstrādes režīmu kombinācijas.
- Veikt mehāniski apstrādāto virsmu rezultātu salīdzinājumu, izmantojot dažādu ražotāju instrumentus ar dažādu griezēju ģeometriju un nodilumizturīgiem pārklājumiem.
- Salīdzināt instrumentu nodilumu, kas pārklāti ar jauno Duratomic tehnoloģiju ar nodilumizturīgiem pārklājumiem.
- Analizēt skaidu veidošanās procesu, griežot dažādus nerūsējošos tēraudus ar lielu griešanas ātrumu, lai noteiktu optimālos apstrādes apstākļus.

2. GRIEŠANAS PROCESA MODELĒŠANA PIELIETOJOT GALĪGO ELEMENTU METODI

2.1. Galīgo elementu metodes (FEM) pielietošanas pamatprincipi

Līdz ar jaunu instrumentu un apstrādājamo materiālu rašanos, produktivitāte paaugstināšanos un metālapstrādes precizitātes prasību pieaugumu metālgriešanas darbaldū un instrumentu izstrādē arvien vairāk tiek izmantota skaitliskā modelēšana.

Starp dažādiem simulāciju modelēšanas rīkiem svarīgu vietu ieņem galīgo elementu metode [74,75]. Šī metode tiek plaši izmantota, pateicoties tās daudzpusībai, uzskatāmībai un informatīvam. Attiecībā uz griešanas procesa modelēšanu GEM [Galīgā elementa metode] ļauj atrisināt visdažādākās problēmas. Starp šiem uzdevumiem būtu jāatzīmē plastiskās deformācijas procesa modelēšanas uzdevumi, griešanas procesa dinamikas izpēte, spriegumu novērtēšana griezējinstrumentā un sagatavē, atlikušo spriegumu prognozēšana apstrādātajā virsmā un daudzi citi.

Vispērtākais griešanas veids ir taisnstūrveida brīvās griešana ar vienlaidu plūstošo skaidu veidošanos [76]. Matemātiskās atkarības, kas iegūtas taisnstūra brīvās griešanas procesam, var tikt attiecinātas uz lielāko daļu zināmo metālapstrādes metožu (virpošana, caurvilkšana, īpaši frēzēšanas gadījumi, urbšana, izrīvēšana un daudzas citas).

Metāla griešanas modelēšana nav viegls uzdevums. Modelēšanas grūtības galvenokārt ir saistītas ar asmeņu apstrādi pavadošo fizisko procesu ārkārtējo sarežģītību, berzi, plastisko deformāciju, metāla sagraušanas apstākļiem. Daudz nopietnu darbu tiek vēltīti griešanas procesa modelēšanai kā tādai [76]

Mūsdienās ir zināmas vairākas pieejas, lai apraksītu deformējamās nepārtrauktas vides kustību. Pie tām attiecināmas: Lagranža pieeja (Lagrangian formulation), Eilera pieeja (Eulerian formulation) un apvienotā Lagranža-Eilera (Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) formulation) pieeja [76].

Lagranža pieejā materiāla daļiņas ir stingri savienotas ar tīkla mezgliem. Materiālās daļiņas raksturotas ar nezināmajiem, kas tiek meklētas risināšanas procesā. Nezināmie, pirmkārt, ir materiāla daļiņu pārvietošanās un ātrumi, spriegumi un deformācijas to iekšienē.

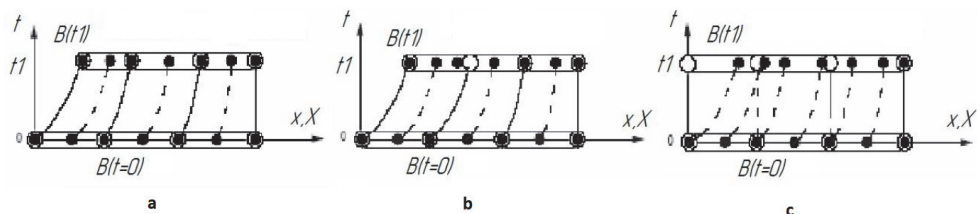
Griešanas procesā apstrādājamā detaļā notiek relatīvas novirzes, kuru vērtība pārsniedz galīgo elementu izmērus. Tāpēc, ja no risinājuma netiek izslēgti šie pārmērīgi deformējamie

elementi, tad materiāla uzvedība tiek aprakstīta neadekvāti. Tādu funkciju izmantošana kā pārmērīgi deformētu elementu izņemšanas no tīkla (elementu dzēšana), adaptīvo tīklu izmantošana ļauj veikt deformācijas procesa skaitlisko modelēšanu no kodola veidošanās sākuma līdz pilnīgai skaidu atdalīšanai.

Otrā grupa ir algoritmi, kuru pamatā ir sagataves materiāla sagraušanas fizikālie kritēriji. Šie kritēriji var būt spriegumu, deformāciju un deformācijas enerģijas kritiskās vērtības. Parasti šīs vērtības var iegūt no materiālu testu rezultātiem. Šie algoritmi diezgan ticami apraksta fizikālos procesus, kas notiek skaidu veidošanās zonā.

Eilera pieeja ir visērtākā problēmu, kas saistītas ar superplastiskumu vai ar gāzes vai šķidrās vides kustību, risināšanai. Izmantojot Eilera pieeju, materiāla daļiņas nav savienotas ar tīkla mezgliem, kas ļauj materiālam plūst caur tīklu. Nezināmie, kas galvenokārt ir vides ātrumi, spriegumi un deformācijas, ir saistīti ar tīkla mezgliem. Tas ļauj izmantot retākus tīklus, kas ievērojami samazina problēmas risināšanas laiku. Griešanas process tiek modelēts kā stacionārs. Eilera pieeja neprasa izmantot skaidu atdalīšanas kritēriju – griešana tiek modelēta kā plastiskas deformācijas process, un līdz ar to griešanas zonā sprieguma-deformācijas stāvoklis tiek aprakstīts nekorekti.

Eilera pieejas trūkumi ietver nepieciešamību noteikt primārās skaidas robežas un formu. Skaidas biežums, kā arī tās saskares laukums ar instrumentu simulācijas laikā paliek nemainīgs. Eilera pieeja nav piemērojama nestacionāra griešanas procesa modelēšanai, piemēram, griešanai pašierosmes svārstību apstākļos. Lagranža un Eilera pieejas neatbilstība slēpjās faktā, ka pirmajā gadījumā tiek novērota katra atsevišķā nepārtrauktas vides daļa, kas kustas, bet otrajā gadījumā – novēro katru telpas punktu, kurā pārvietojas nepārtrauktā vide. No problēmas galīgo elementu formulējuma viedokļa neatbilstības starp Lagranža (a) un Eilera (b) pieejām ir skaidri redzamas tīkla mezglu uzvedībā. Ja tīkls ir Eilera tīkls, tad tā mezglu koordinātas ir fiksētas, proti, mezgli sakrīt ar punktiem telpā. Ja tīkls ir Lagranža tīkls, tad mezgli pārvietojas kopā ar vides daļām, kuras tiek deformēta [76] (2.1.att.).

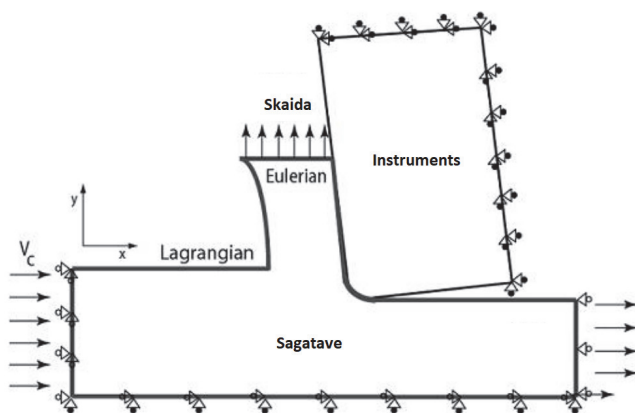


2.1.att.: Pieejas modelēšanas sistēmām, kas pakļautas ievērojamām plastiskām deformācijām, kur a – Lagranža , b – Eilera un c- Lagranža-Eilera formulējums [76].

Eilera tīklā materiālie punkti iekļūst caur elementu robežām. Lagranža tīklā mezglu trajektorijas sakrīt ar vides punktu materiālajām trajektorijām un materiāla apmaiņa starp elementiem nenotiek.

Lagranža-Eilera pieeja, angļiski - Arbitrary Lagrangian-Eulerian Formulation (ALE) jeb patvaļīgo Lagranža-Eilera formulējums (2.1.att., c), apvieno abu aplūkoto pieeju iezīmes. Šīs pieejas koncepts ir precīza mezglu pārvietošana tā, lai savienotu Lagranža un Eilera galīgo elementu tīklu priekšrocības. Šajā gadījumā tīkla mezglu kustību var ieprogrammēt patvaļīgi, un parasti tā nav saistīta ar vides kustību.

Attēla 2.2 ir parādīti modeļa robežnosacījumi, izmantojot Lagranža-Eilera pieeju: mezgli uz robežām tiek pārvietoti tā, lai tie paliktu uz šīm robežām, un iekšējie mezgli tiek pārvietoti tā, lai samazinātu galīgo elementu tīkla deformāciju intensīvo deformāciju zonā.



2.2.att.: Lagranža-Eilera pieejas attēlošana [76].

Netiešās (Implicit) metodes aprēķiniem izmanto Nūmarka shēmu. Aprēķins reducējas uz virkni kvazistatisku problēmu risinājumiem ar slodzēm, kas atkarīgas no laika. Šajā gadījumā laika solis var būt diezgan liels, jo katrā solī tiek atrisināta vienādojumu sistēma un tiek veiktas balansēšanas iterācijas, kas saistītas ar matricas operācijām. Lineārai stinguma matricai integrēšana ir beznosacījumu stabila. Liela ātruma procesiem (parasti notiek dažās milisekundēs) un ar ļoti lielām deformācijām, lai izsekotu slodzes un sistēmas uzvedības izmaiņām, ir jāveic ļoti mazi soļi. Inerciālās slodzes šajā gadījumā ir lielas, un tās nosaka sistēmas paātrinājumi. Lai tos aprēķinātu precīzāk, būs lietderīgi mezglu brīvības pakāpju skaitā ieviest paātrinājumus (un ātrumus) un aprēķināt tos tieši, nevis divreiz diferencēt pārvietojumus [76]. Noklusējuma konverģences kritēriji ir pielāgoti kvazistatiskām problēmām, tāpēc to izvēle ir ļoti laikietilpīga (un dažreiz neiespējama). Tādējādi ātrgaitas deformācijas problēmu risināšana ar mazu risinājuma soli var būtiski izlietot datora resursus. Par tiešām (Explicit) metodēm dēvē metodes dinamikas vienādojuma risināšanai, kas nav saistītas ar vienādojumu sistēmu atrisināšanu, bet izmanto atkārtotās attiecības, kas izsaka pārvietojumus, ātrumus un paātrinājumus noteiktā solī caur to vērtībām iepriekšējos soļos. Ja tiek izmantota diagonāla masas matrica (standarta, konsekventas retās matricas vietā), to ir iespējams apgriezt, tādējādi vienkāršojot aprēķinu un ievērojami samazinot vienas iterācijas laiku (aizstājot matricu triangulāciju ar risinājumiem pie mainīgām balansēšanas slodzēm ar matricu reizināšanu). Šis paņēmieni paredz mazus soļus un pietiekami precīzu sadalījumu, lai pareizi aprakstītu masas sadalījumu ar diagonālo matricu. No otras puses, neliels solis ļauj izsekot visām izmaiņām sistēmas īpašībās un tās uzvedībā. Visas nelinearitātes (ieskaitot kontaktu) tiek ņemtas vērā iekšējo spēku vektorā. Lielāko daļu laika aizņem nevis matricu veidošana un inversija, bet gan šī vektora aprēķins. Ļoti mazā soļa dēļ (praksē 10^{-7} - 10^{-8} s), atklātās metodes parasti izmanto tikai īstermiņa nestacionāru procesu aprēķiniem. Lai modelētu dinamiskos procesus metāla griešanā, tiek izmantotas atklātās (Explicit) metodes dinamikas vienādojumu integrēšanai.

Griešanas procesa matemātiskajā modelēšanā tiek izmantotas šādas fundamentālas fiziskās attiecības:

1. Masas nezūdamības likums;
2. Enerģijas nezūdamības likums;
3. Impulsa nezūdamības likums;

4. Līdzsvara vienādojumi;
5. Furjē siltuma vadīšanas likums;
6. Vienādojumi, kas attiecas uz ķermeņa spriegumiem un deformācijām.

Sprieguma un deformācijas stāvokļa aprēķins

Masas nezūdamības likumu izsaka vienādojums [76]:

$$\rho J = \rho_0, \quad (2.1)$$

kur:

$J = \det \left(\frac{dx_i}{dX_i} \right)$ – jakobiāns, skaitliski vienāds ar relatīvajām tilpuma izmaiņām noteiktā laika brīdī.

ρ , ρ_0 - materiāla esošais un sākotnējais blīvums. Enerģijas nezūdamības likumu, ja nav siltuma vadīšanas un siltuma avotu, var uzrakstīt kā vienādojumu:

$$\rho_0 \dot{w} = \dot{\epsilon} \sigma, \quad (2.2)$$

kur

\dot{w} - īpatnējā deformācijas jauda,

σ - spriegums,

$\dot{\epsilon}$ - deformācijas ātrums.

Šo vienādojumu, aprēķinot izotermiskos un adiabātiskos procesus, izmanto tikai, lai noteiktu visas sistēmas enerģijas bilanci. Impulsa nezūdamības likumu (kustības vienādojumu) var uzrakstīt kā [76]:

$$\rho \ddot{u}_i = \rho f_i + \sigma_{j,j}, \quad (2.3)$$

kur:

f_i – spēks uz masas vienību;

σ_{ij} - Koši sprieguma tenzora komponenti σ_{ij}

No līdzsvara stāvokļa izriet :

$$f = f_{load} + f_{contact} - I \quad (2.4)$$

kur:

f_{load} - slodze - samazināti tilpuma un ārējie spēki, kas iedarbojas uz ķermeni;

$f_{contact}$ - spēki, kas samazināti līdz galīga elementa tīkla mezgliem pie ķermeņa kontakta robežas;

I - iekšējie spēki.

Robežnosacījumi ir matemātiski izteikti:

$$\text{spēkos pie ķermeņa robežas } \sigma_{ij} \cdot n_i = P(t); \quad (2.5)$$

pārvietojumos pie ķermeņa robežas $u = U$;

spēkos pie kontakta robežas $(\sigma^+ - \sigma^-) \cdot n = 0$ pie $u^+ = u^-$, kur σ^+ - stiepes spriegumi,

σ^- - spiedes spriegumi, t – laiks.

Pamatojoties uz šiem pamatvienādojumiem, stingra ķermeņa mezglu nobīdes skaitlisku aprēķinu var veikt, izmantojot procedūru, kas paredzēta kustības vienādojuma tiešai integrēšanai laikā, pamatojoties uz galīgo elementu metodi. Tiek formulēti sākotnējie nosacījumi visiem modelējamā ķermeņa mezgliem [76]:

$$\ddot{u}|_{\tau=0} = 0, \dot{u}|_{\tau=0} = 0, u|_{\tau=0} = 0, f_{load}|_{\tau=0} = 0, f_{contact}|_{\tau=0} = 0, I|_{\tau=0} = 0, \varepsilon_{ij}^p|_{\tau=0} = 0 \quad (2.6)$$

kurs u – mezglu nobīde.

Lai atrastu ķermeņa mezglu nobīdi caur bezgalīgi mazu laika intervālu $\Delta\tau$, tiek uzdoti kinemātiskie robežnosacījumi un slodzes, ko nosaka uzdevuma apstākļi noteiktā laikā [76]:

$$\ddot{u}|_{\tau=0} = \ddot{U}(\tau), \dot{u}|_{\tau=0} = \dot{U}(\tau), u|_{\tau=0} = U(\tau), f_{load}|_{\tau=0} = P(\tau) \quad (2.7)$$

Tiek aprēķināts paātrinājums vektoru ķermeņa mezglos:

$$\ddot{u}_i|_{\tau} = (M_{ij}^{-1}) (f_{load_i}|_{\tau} + f_{contact_i}|_{\tau} - I_i|_{\tau}), \quad (2.8)$$

kur: M_{ij} – masas matrica.

Ātruma vektors mezglos, veicot integrēšanu, izmantojot galīgās starpības metodi, izskatās šādi:

$$\dot{u}_i \Big|_{\tau+\frac{\Delta\tau}{2}} = \dot{u}_i \Big|_{\tau-\frac{\Delta\tau}{2}} + \Delta\tau \ddot{u}_i \Big|_{\tau}. \quad (2.9)$$

Līdzīgi, tiek aprēķināts mezglu nobīdes vektors:

$$u \Big|_{\tau+\Delta\tau} = u \Big|_{\tau} + \Delta\tau \dot{u} \Big|_{\tau+\frac{\Delta\tau}{2}}. \quad (2.10)$$

Mezglu nobīdes izraisa reakciju iekšējo spēku I formā. Lai tos noteiktu, tiek aprēķināts deformācijas ātruma tenzors [76]:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} \Big|_{\tau+\frac{\Delta\tau}{2}} = \frac{1}{2} \left(\frac{d\dot{u}_i}{dx_j} + \frac{d\dot{u}_j}{dx_i} \right) \Big|_{\tau+\frac{\Delta\tau}{2}}. \quad (2.11)$$

Pēc dekompozīcijas:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p, \quad (2.12)$$

kur:

$\dot{\varepsilon}_{ij}^e$ - elastīgās deformācijas ātruma tenzors;

$\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ - plastiskās deformācijas ātruma tenzors.

Tad jebkuras deformācijas sastāvdaļas pieaugums:

$$d\varepsilon_{ij} \Big|_{\tau+\Delta\tau} = \Delta\tau \dot{\varepsilon}_{ij} \Big|_{\tau+\frac{\Delta\tau}{2}}. \quad (2.13)$$

Kopējais deformācijas apjoms sastāda:

$$\varepsilon_{ij} \Big|_{\tau+\Delta\tau} = \varepsilon_{ij} \Big|_{\tau} + d\varepsilon_{ij} \Big|_{\tau+\Delta\tau}. \quad (2.14)$$

Temperatūru griešanas zonā var aprēķināt, izmantojot šādu formulu [76]:

$$T \Big|_{\tau+\Delta\tau} = T \Big|_{\tau} + \eta \frac{\sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p}{\rho C_v} \Big|_{\tau} \Delta\tau, \quad (2.15)$$

kur:

η - siltuma mehāniskais ekvivalents;

C_v – siltumietilpība.

Izmantojot deformētā Džonsona-Kuka ķermeņa materiāla reoloģisko modeli, tiek aprēķināts spriegums galīgā elementa integrēšanas punktos [76]:

$$\sigma_{ij}|_{\tau+\Delta\tau} = \sigma \left(\sigma_{ij}|_{\tau}, \varepsilon_{ij}|_{\tau+\Delta\tau}, \dot{\varepsilon}_{ij}|_{\tau+\Delta\tau}, T|_{\tau} \right) \quad (2.16)$$

un tiek veikta iekšējo spēku pievienošana mezgliem $I|_{\tau+\Delta\tau} = I \left(\sigma_{ij}|_{\tau+\Delta\tau} \right)$

Kontakta problēmas risinājums un normālo spēku noteikšana uz kontakta virsmas f_{contact} tiek veikta vairākos posmos, izmantojot izvēlēto berzes modeli. Tiek aprēķināti normālie spēki uz saskares virsmas f^{contact} . No tiem, izmantojot pieņemto berzes modeli, tiek aprēķināti kontaktspriegumi τ_n un σ_n :

$$\sigma_n = f_{\sigma} \left(f_{\text{contact}}^n \right), \quad (2.17)$$

$$\tau_n = f_{\text{max.}} \left(\sigma_n, \sigma_s \right), \quad (2.18)$$

kur: σ_s - apstrādājamā materiāla plastiskās plūsmas spriegums skaidas piegriešanas slānī.

Pēdējā posmā tiek noteikti tangenciālie spēki uz saskares virsmas $f^{\tau}_{\text{contact}} = f(\tau_n)$.

Materiāla plūsmas iespēja uz skaidas griešanas virsmas tiek noteikta saskaņā ar līdzsvara vienādojumu pie kontakta robežas[76]:

$$V_k = \begin{cases} 0, & \text{jā } \left(f^{\tau}_{\text{contact}}|_{\tau} - I|_{\tau} \right) = 0 \\ V_k > 0, & \text{jā } \left(f^{\tau}_{\text{contact}}|_{\tau} - I|_{\tau} \right) > 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

Tālāk tekošo laiku τ palielina par integrēšanas soli $\Delta\tau$ un aprēķinus atkārto.

Maksimālo integrēšanas soli izsaka ar formulu:

$$\Delta\tau_{\text{max.}} = L/c, \quad (2.20)$$

kur L – GE raksturīgais izmērs, $c = \sqrt{E/\rho}$ – gareniskā viļņa ātrums izstrādājuma materiālā.

GE raksturīgo lielumu aprēķina attiecīgi divdimensiju un trīsdimensiju problēmai pēc formulām:

$$L = \frac{A}{\max(a_1, a_2, a_3, a_4)} \quad (2.21)$$

$$L = \frac{A}{\max(D_1, D_2)},$$

kur:

a_i – galīga elementa sānu garums;

D_i – galīga elementa diagonāles garums;

A – galīga elementa laukums;

E – elastības modulis;

ρ – materiāla blīvums.

Galvenā metode integrēšanas soļa palielināšanai un līdz ar to problēmas dimensijas samazināšanai ir elementa masas mērogošana (mass scaling). Lai iegūtu noteiktu soli, ir jāmaina materiāla blīvums elementā tā, lai attiecība būtu izpildīta, piemēram, četrstūra elementam [76]:

$$\Delta\tau_{uzdotais} = L/c, c = \frac{L}{\Delta\tau_{uzdotais}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \rho = \frac{(\Delta\tau_{uzdotais})^2 E}{L^2}. \quad (2.22)$$

Jāņem vērā, ka šīs tehnikas izmantošana rada kļūdu dinamiskās problēmas risinājumā. Temperatūras lauka aprēķins griešanas zonā ir balstīts uz Furjē siltuma vadīšanas diferenciālvienādojuma integrēšanu:

$$\rho C_v \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q, \quad (2.23)$$

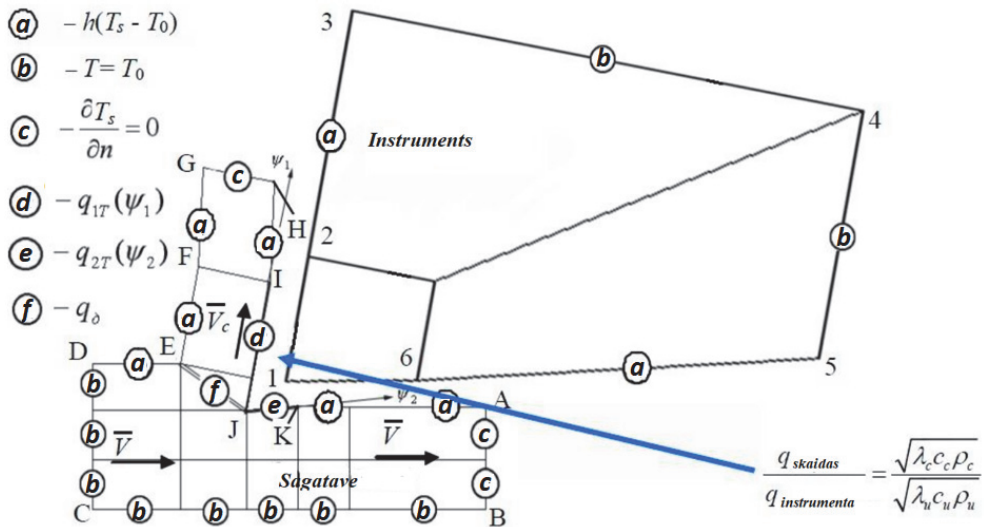
ņemot vērā robežnosacījumus un sākuma nosacījumus.

$Q = \eta \cdot \sigma_{ij} \cdot \dot{\epsilon}^p_{ij}$ - tilpuma siltuma avota jauda. Robežnosacījumi (2.3. att.):

- dotā temperatūra pie ķermeņa robežas $T=T_s$;

- dotā siltuma plūsma pie robežas:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} n_i = q_s, \text{ kur } q_s = \tau_n \dot{u}. \quad (2.24)$$

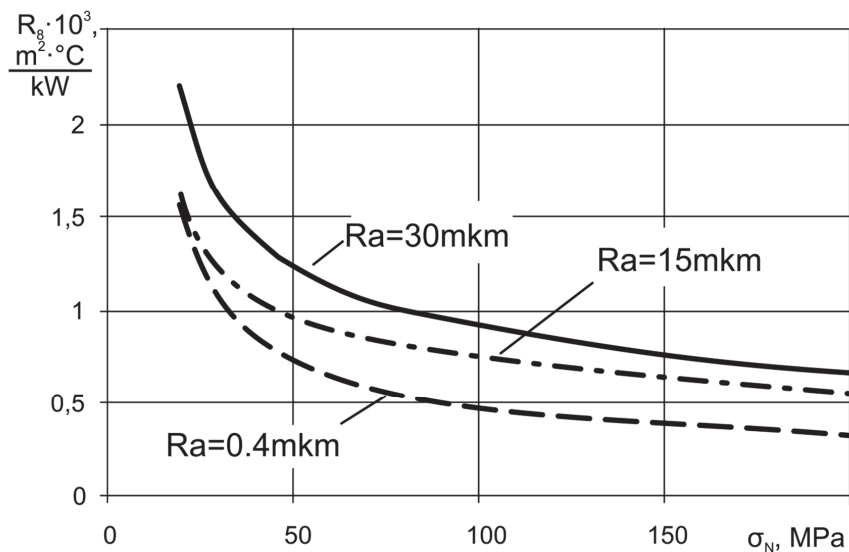


2.3.att. Termodinamiskie robežnosacījumi[76].

Siltuma plūsma tiek sadalīta starp skaidām, sagatavi un instrumentu proporcionāli to termodinamiskajām īpašībām [76]:

$$\frac{q_{skaidas}}{q_{instrumenta}} = \frac{\sqrt{\lambda_c c_c \rho_c}}{\sqrt{\lambda_u c_u \rho_u}} \tag{2.25}$$

Turklāt ir jāņem vērā siltuma apmaiņa starp skaidu un instrumentu. Ir zināms [76], ka starp skaidu un instrumenta priekšējo virsmu ir noteikta termiskā pretestība, kas ir atkarīga no kontaktsprieguma normālās komponentes vērtības σ_N un kontaktvirsmas raupjuma Ra (2.4.att.).



2.4.att. Kontakta termiskās pretestības atkarība no saskares virsmu raupjuma [76].

Mezglios uz kontakta robežās jāievēro nosacījums:

$$q_i \cdot A_e \cdot R = T_{skaidas} - T_{instrumenta}, \quad (2.26)$$

kur:

A_e - GE kontaktvirsmas laukums;

q_i - siltuma plūsmas vērtība starp skaidām un instrumentu,

R - kontakta pretestība.

Uz sagataves, skaidas un instrumenta brīvajām virsmām tiek veikts siltuma pārnese process, ko matemātiski izsaka Ņūtona-Rihmaņa likums:

$$q_i = -h \cdot (T_0 - T_1), \quad (2.27)$$

kur

h - siltuma pārnese koeficients;

T_0 - apkārtējās vides temperatūra;

T_i - uz brīvās robežas esošā mezgla temperatūra.

Sākotnējie nosacījumi:

$$T|_{\tau=\tau_0} = T_0 \quad (2.28)$$

Pareizam problēmas risinājumam ļoti svarīga ir pareiza apstrādājamā materiāla uzvedības modeļa izvēle pie lieliem deformācijas ātrumiem. Šim modelim parasti ir šāda forma:

$$\sigma_s = \sigma_s(q, \dot{\varepsilon}, T), \quad (2.29)$$

kur:

σ_s – plastiskās plūsmas spriegums;

q - ar sacietēšanu saistītais parametrs;

$\dot{\varepsilon}$ - plastiskās deformācijas ātrums;

T – temperatūra.

Deformācijas mehānismu sarežģītība neļauj izveidot vienkāršu un universālu apstrādājamā materiāla modeli. Pašlaik visplašāk izmantoto pielietojumu ir ieguvuši empīriskie un daļēji empīriskie vienādojumi. Apstrādātā materiāla uzvedību griešanas laikā vislabāk raksturo Džonsona-Kuka vienādojums [76]:

$$\sigma_s = [A + B\varepsilon^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_k - T_0} \right)^m \right] \quad (2.30)$$

kur:

A - tecēšanas robeža;

B un n - koeficienti, kas atspoguļo sacietēšanas efektu. Otrais reizinātais-atspoguļo slodzes ātruma ietekmi.

$\dot{\varepsilon}$ - deformācijas ātrums,

$\dot{\varepsilon}_0$ - deformācijas ātrums statistiskajos testos.

C - deformācijas ātruma jutīguma koeficients. Trešais reizinātais - faktors, kas atbilst siltuma izdalīšanās fenomenam.

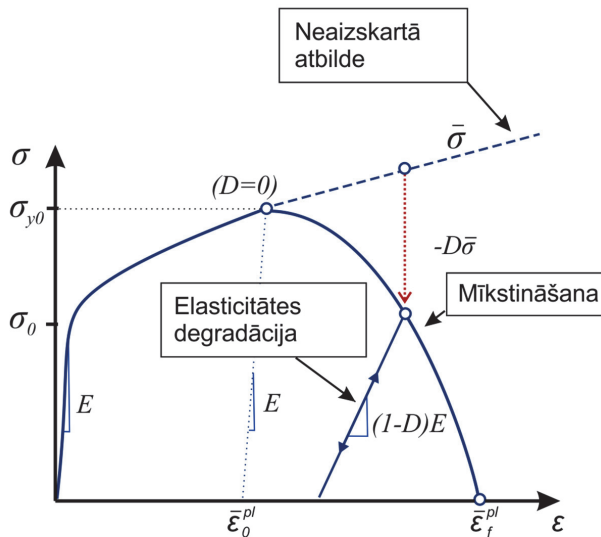
T – tekošā temperatūra,

T_0 - temperatūra, kurā tika veikti statistiskie testi,

T_k – noteiktā materiāla kušanas temperatūra,

m – pakāpes rādītājs, kas raksturo materiāla mīkstināšanas pazīmes, palielinoties temperatūrai.

Koeficientus A , B , C , n , m nosaka, izmantojot testus, kuru metodika arī dota darbā [76]. Tur arī ir norādītas noteiktu konstantu vērtības dažiem materiāliem. Instrumenta un sagataves elastīgās deformācijas izsaka ar vispārināto Huka likumu. Apstrādājamā materiāla sagraušana ir griešanas procesa neatņemama sastāvdaļa. Apstrādājamā materiāla sagraušanas raksturs lielā mērā nosaka griešanas spēkus, iegūto skaidu veidu, apstrādes precizitāti utt. Sagraušanas kritērijs viskoziem materiāliem parasti tiek formulēts vai nu kā plastiskās deformācijas robežvērtība, vai arī kā plastiskās deformācijas enerģijas robežvērtība (laukums zem “sprieguma-deformācijas” līknes (2.5. att.).



2.5. att. Sprieguma un deformācijas diagramma viskozam elastīgam materiālam[autora attēls].

Diagrammā (2.5. att.) parādīta viskoza elastīga materiāla uzvedība nospieģojumā līdz pilnīgai sagraušanai: Pie spriegumiem no 0 līdz σ_0 materiāls tiek elastīgi deformēts, sprieguma diapazonā no σ_0 līdz σ_{y0} materiāls tiek nostiprināts. Sagraušana sākas punktā σ_{y0} . Izejot cauri šim punktam, spriegumu apraksta ar formulu:

$$\sigma = (1 - D) * Re , \quad (2.31)$$

D - vērtība, kas svārstās no 0 līdz 1, kas norāda bojājumu uzkrāšanās pakāpi. Ja D=1, materiāls tiek sagrauts un elements atdalās no tīkla, σ - spriegums, kas rastos šajā punktā, ja nenotiktu sagraušana, t.i. tālākas sacietēšanas rezultātā. Materiāliem, kas sagrūst trausli, pagarinājums pārrāvuma brīdī ir diezgan mazs, savukārt σ vērtība var būt nozīmīga. Tāpēc izvēloties plastiskās deformācijas vērtību kā trausla materiāla sagraušanas kritēriju, radīsies būtiska kļūda, savukārt kritērija pielietošana spriegumos nodrošinās precīzu problēmas risinājumu. Materiāliem, kas sagrūst trausli, kā sagrūšanas kritēriju var izvēlēties nosacījumu:

$$\sigma > \sigma_b \quad (2.32)$$

Sagrūšanas procesu var īstenot dažādos veidos, bet visizplatītākā ir sagrūšanas simulācija, noņemot elementus, ja ir izpildīts sagrūšanas kritērijs. Tajos FE, kur īstenojas sagrūšanas kritēriji, Koši sprieguma tenzors tiek iestatīts kā nulle, un šie elementi atdalās no tīkla. Fiziskais sagrūšanas kritērijs ne vienmēr nodrošina aprēķina skaitlisko stabilitāti. Lai palielinātu skaitlisko stabilitāti, FE siets tiek rekonstruēts pēc noteikta laika posma. Berzes process starp apstrādājamā instrumenta priekšējo virsmu un skaidām un instrumenta un sagataves aizmugurējo virsmu ir vissarežģītākais un mazāk pētītais fiziskais process, kas izpaužas metālu apstrādē ar griešanu. Pašlaik tiek izmantoti dažādi modeļi, lai aprakstītu berzes procesu starp instrumentu, skaidu un sagatavi [9].

Kulona berzes modelis ir visplašāk izmantotais:

$$\tau = \mu * \sigma \quad (2.33)$$

kur:

τ - kontakta bīdes spriegums,

σ - normāls kontaktspriegums,

μ - Kulona berzes koeficients.

Šāda pieeja kļūst iespējama, ja izmantojam skaidas un instrumenta saskares virsmas vidējā berzes koeficienta μ jēdzienu, kas kopumā raksturo šajā zonā notiekošos procesus. Matemātiskās atkarības vienkāršība, šī rādītāja skaidrība un integrālo rādītāju (piemēram, griešanas spēku)

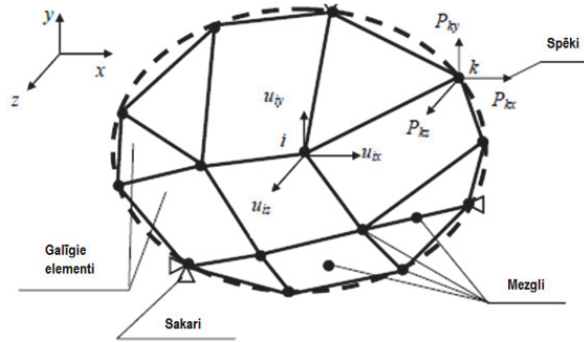
prognozēšanas rezultāti, kas diezgan labi atbilst eksperimentam, nodrošināja vidējā berzes koeficienta plašu izmantošanu gan analītiskajos, gan galīgo elementu griešanas procesu modeļos.

Galīgā elementa (GE) tipa, formas un izmēra izvēle atkarīga no ķermeņa formas un sprieguma-deformētā stāvokļa veida. Serdes GE tiek izmantots, lai modelētu vienas ass saspringuma stāvokli stiepes (spiedes), kā arī bīdes vai lieces uzdevumos. Plakanais divdimensiju GE, trijstūra jeb četrstūra plāksnes izskatā, tiek izmantots plakana spriegotā vai plakana deformēta stāvokļa modelēšanai. Apjomīgs trīsdimensiju GE, piemēram, tetraedra, sešstūra vai prizmas izskatā, kalpo telpisko spriegotā stāvokļa analīzei. GE gredzena formā tiek pielietots aksiāli simetriska sprieguma stāvokļa gadījumā. Lai aprēķinātu plāksnes izliekumu, tiek ņemts attiecīgs plakans GE, apvalka aprēķinam tiek izmantots apvalka GE, kā arī plakans elements ar izliekšanas spēju. Deformējamā ķermeņa zonās, kur ir gaidāmi ievērojami spriegumu gradienti, jāizmanto sīkāki GE jeb arī lielākas kārtas elementi.

Galīgajiem elementiem ir dažādas īpašības, kuras nosaka konstantes un opcijas. Piemēram, serdes GE tiek norādīts šķērsriezuma laukums, bet, ja tiek modelēta trose, kuras uzdevums būs tikai stiepšana, tiek izvēlēta attiecīga opcija. Plakaniem GE bez liekšanās spējas var tikt norādīts biezums un noteikts sprieguma stāvokļa veids: plakani spriegots, plakani deformēti vai aksiālsimetriski. Plakaniem, lokamiem GE un apvalka GE nepieciešams noteikt biezumu.

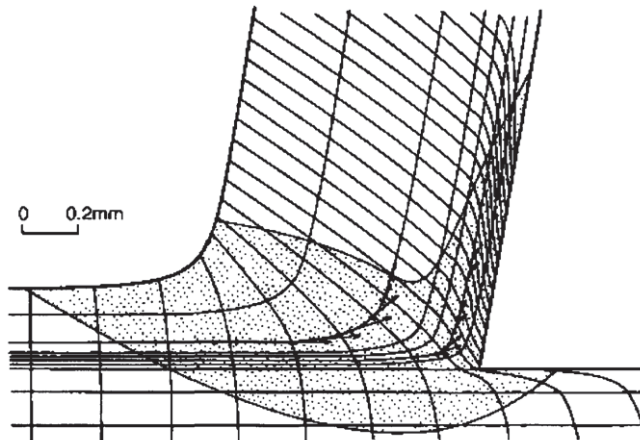
Visi elementi un mezgli tiek numurēti. Mezglu numerācija var būt kopēja (globāla) visam galīgo elementu modelim un vietēja (lokāla) elementu vidū. Elementu numerāciju un kopējo mezglu numerāciju vēlamā realizēt tā, lai aprēķina darbietilpība būtu pēc iespējas mazāka. Pastāv šīs numerācijas optimizācijas algoritmi. Jānosaka saikņu masīvi starp elementu numuriem un kopējiem mezglu numuriem, kā arī starp vietējiem un kopējiem mezglu numuriem.

Dažādu fizisko lielumu laukumu aprēķinam, izmantojot galīgo elementu metodi pētāmajā jomā, nepieciešams noteikt elementu materiālus un to īpašības. Deformācijas uzdevumos, pirmkārt, jānosaka elastīgas īpašības – elastības modulis un Puasona koeficients. Ja tiek plānota plastiska deformācija, nepieciešams noteikt īstās deformēšanas diagrammas, kuras aproksimējas ar bilineāru vai multilineāru līnijas palīdzību.

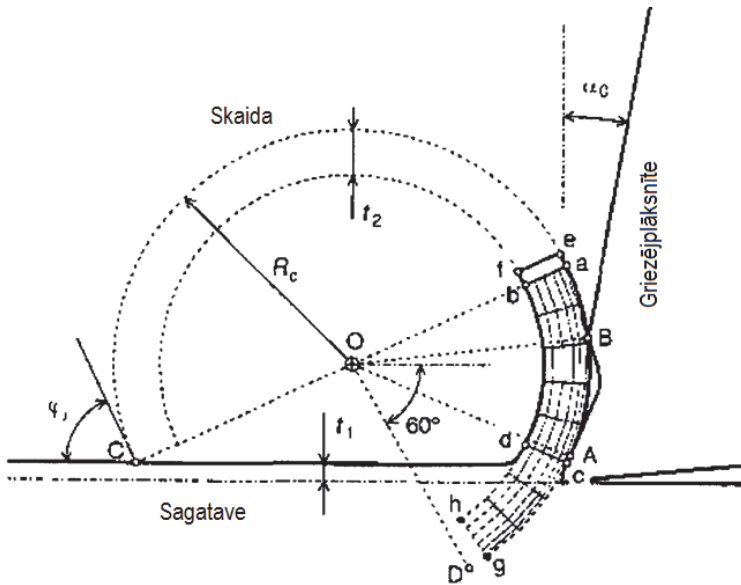


2.6 att. Galīgo elementu attēlojums [autora attēls]

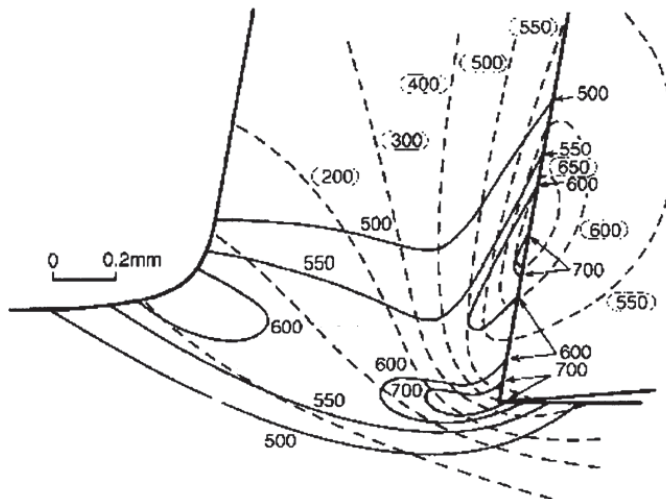
Veicot 2-D analīzi ir iespējams izveidot vajadzīgo griezējinstrumenta ģeometriju šķērsgriezumā un ievadīt visas materiāla īpašības. Galīgo elementu metodes analīzes pamatprincips ir sadalīt sarežģīto uzdevumu vairākos vienkāršos (2.6, 2.7..att.) un atrisināt to ar maksimālu precizitāti. GEM pielieto skaidu veidošanas procesa (2.8.att.), temperatūras lauka (2.9.att.), griešanas spēku, spriegumu un paliekošo deformāciju sadalījuma pētījumiem [77-88].



2.7.att. Griešanas procesa modelēšana un sagataves sadalījums elementārajos elementos [77].



2.8.att. Skaidu veidošanās procesa modelis [78].



2.9.att. Griešanas temperatūras sadalījuma paraugs pēc analīzes veikšanas [78].

2.2 Galīgo elementu metodes pielietošana apvirpošanas procesa modelēšanā

Šīs darbības mērķis ir izpētīt nerūsējošā tērauda apvirpošanas procesu pielietojot griezējinstrumentus ar nodilumizturīgiem pārklājumiem. Izmantojot nomaināmus daudzskaldņu plāksnītes, tika pētīts griešanas temperatūras sadalījums instrumentā, skaidā un sagatavē, skaidu veidošanas process un griešanas spēku diapazons. Izvirzītā mērķa sasniegšanai tiek noformulēti šādi uzdevumi:

- 1) Griezējplāksnītes precīzas ģeometrijas un pārklājumu kombinācijas un biezuma izveide.
- 2) Virpošanas procesa simulācijas modelēšanas veikšana pie bāzes apstrādes režīmiem (griešanas ātrums 90 m/min, bez dzesēšanas emulsijas) un pie palielinātiem apstrādes režīmiem (griešanas ātrums 150 m/min, bez dzesēšanas emulsijas);
- 3) Skaidu veidošanas procesa analīze;
- 4) Griešanas temperatūras noteikšana un sadalījums;
- 5) Griešanas spēku vērtību noteikšana;
- 6) Apstrādātas virsmas deformēta stāvokļa izpēte.

Lai modelētu nerūsējošā tērauda griešanas procesu, tika pielietota programma Third Wave Advantedge, kuras pamatā ir galīgo elementu matemātiskā analīze . Tika izvēlēts AISI 420. markas nerūsējošais tērauds un TNMG 160412 TM-4000-MF4 Duratomic griezējinstrumenti. Modelēšanas griešanas parametri (minimālās un maksimālās vērtības) parādīti tabulā 2.1.

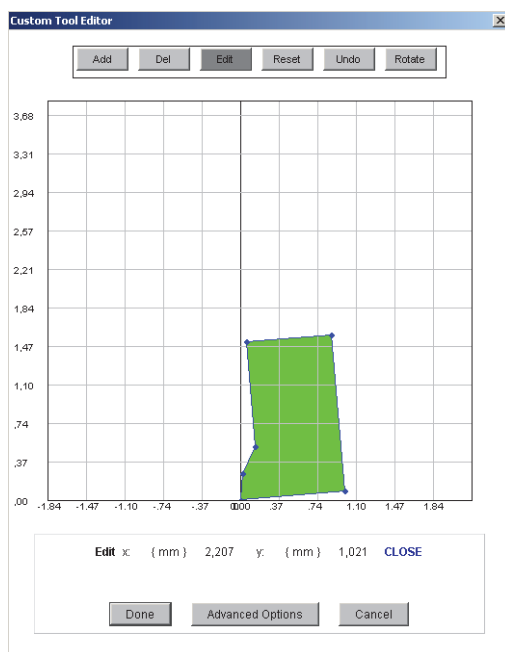
2.1. tabula

Griešanas parametri modelēšanas variantiem

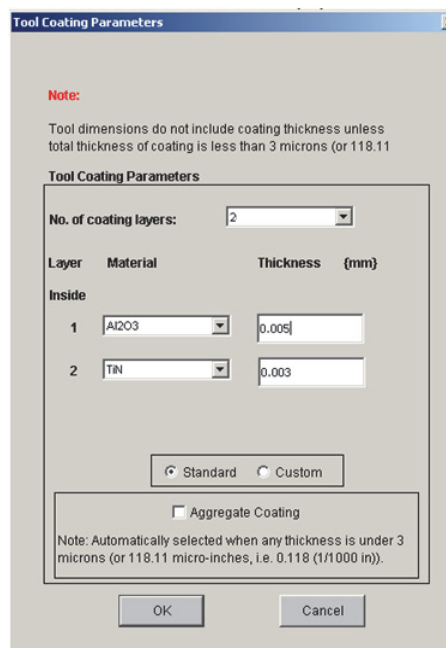
Modelēšanas varianta numurs	1	2
Padeve, mm/apgr	0,1	0,35
Griešanas dziļums,mm	0,5	0,5
Griešanas ātrums,m/min	90	150
Temperatūra, °C	20	20
Materiāls	420	420

Šajā gadījumā ir precīzi izveidots 2D griezējinstrumenta ģeometrijas šķērsriezuma profils (2.10.att), kā arī tika ievadīti TiN un Al₂O₃ pārklājumu biezumi (2.11.att.).

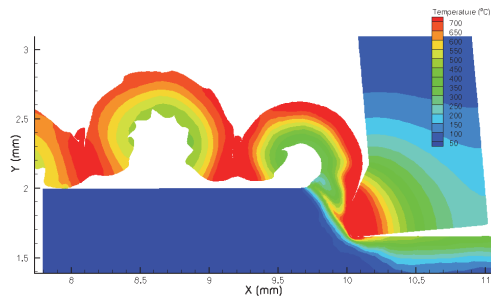
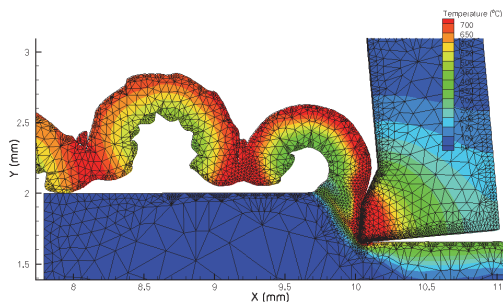
Modelēšanas rezultātā ir iegūts atbilstošais eksperimentālajiem rezultātiem skaidu veidošanas process, kuru nodrošināja griezējinstrumenta ģeometrijas profils (MF 4), tika noteiktas griešanas temperatūru minimālas – 700 °C un maksimālās vērtības 1150 °C bez dzesēšanas emulsijas un to sadalījums griezošā instrumentā. Griešanas spēku vērtības pa X un Y- asīm ir minimālās pie vidējas/ finiša apstrādes režīmiem un nepārsniedz uzdotos sakarības un ir Px diapazonā 100-150 N/mm² un Py diapazonā 250 -400 N/mm². Modelēšanas rezultāti ir attēloti 2.12. – 2.15. attēlos. Modelēšanas rezultātā maksimāli precīzi un atbilstoši praktiskajam eksperimentam ir redzams skaidu veidošanās process. Griešanas spēka un temperatūras vērtības ir attēlotas 2.16. – 2.17. attēlos.



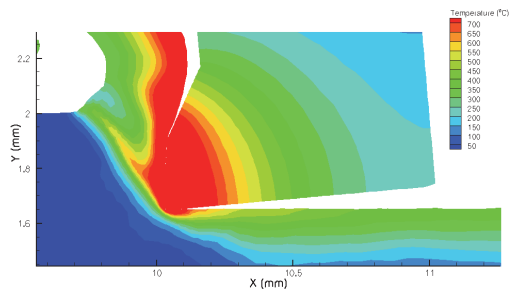
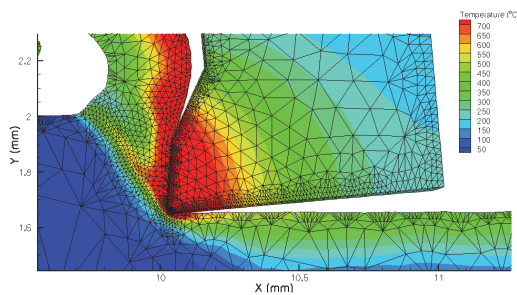
2.10.att Precīza ģeometrijas izstrāde [autora attēls].



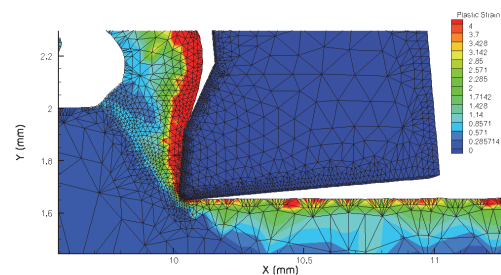
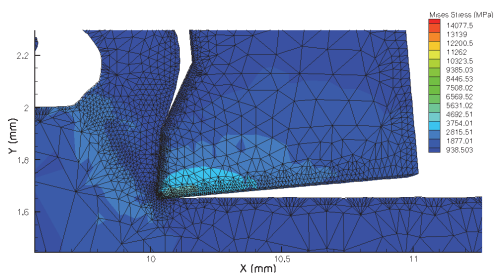
2.11.att. Pārklājumu datu ievades logs [autora attēls].



2.12.att. Skaidu veidošanās process un siltuma sadalījuma lauka kopējais skats [autora attēls].

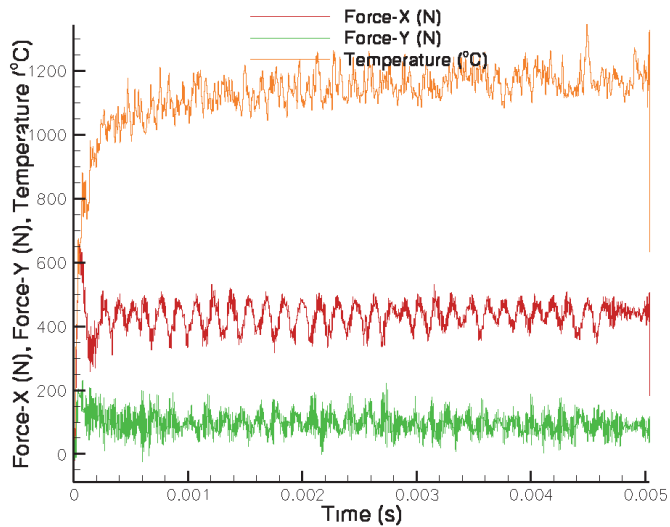


2.13.att. Griešanas procesā nomodelētais siltuma sadalījuma lauks palielinātā mērogā ar satīklojumu un bez tā. [autora attēls].

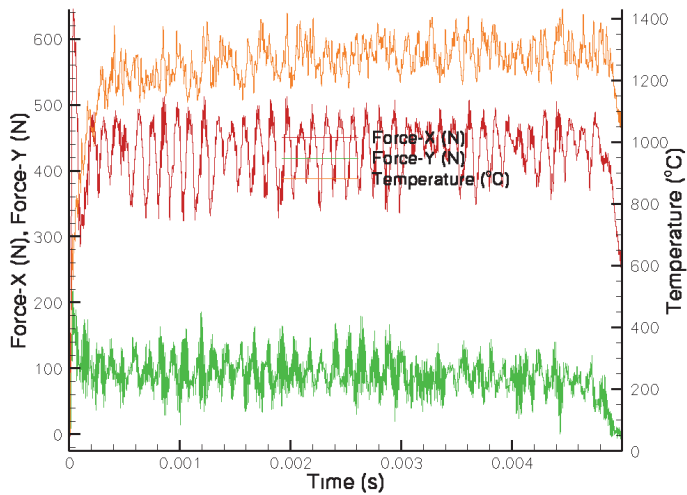


2.14.att. Griešanas procesā nomodelētais kontakspriegumu sadalījums [autora attēls].

2.15.att. Griešanas procesā nomodelētais plastisko deformāciju sadalījums [autora attēls].



2.16.att. Griešanas spēka un temperatūras vērtības ir attēlojums pirmajam modelēšanas gadījumam[autora attēls].



2.17.att. Griešanas spēka un temperatūras vērtības ir attēlojums otrajam modelēšanas gadījumam [autora attēls].

2.3. Nodaļas kopsavilkums

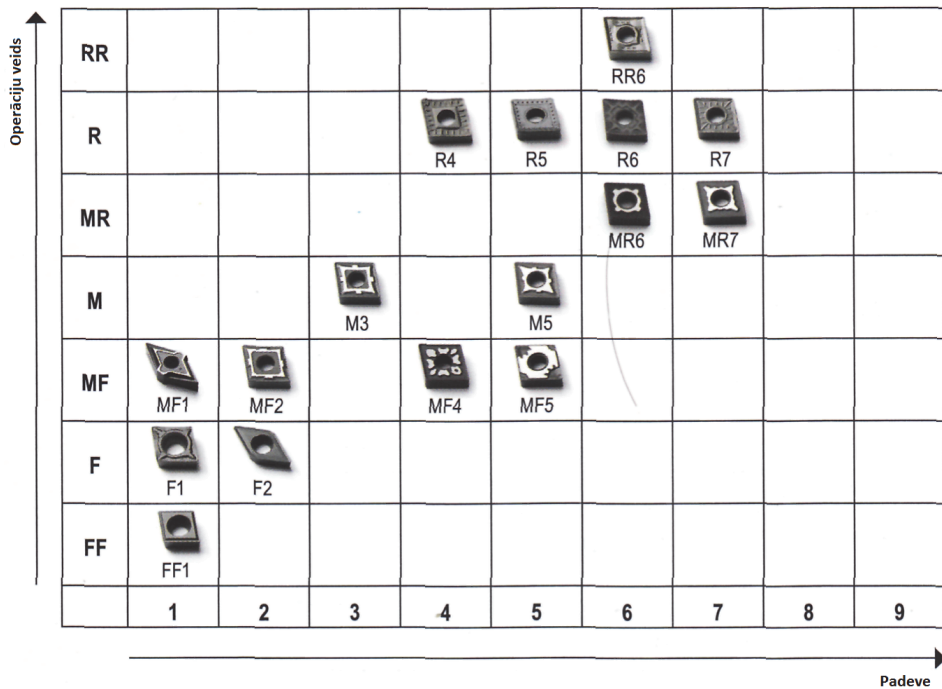
Pielietotā metode griešanas režīmu kombināciju modelēšanai ar galīgo elementu metodi ļāva:

- Pilnīgāk izpētīt nerūsējošā tērauda griešanas procesu.
- Izveidot precīzu griezējinstrumenta ģeometriju ar precīzu pārklājumu.
- Novērtēt griešanas temperatūras sadalījumu.
- Izpētīt skaidu veidošanās procesu.

3. NERŪSĒJOŠĀ TĒRAUDA APVIRPOŠANAS PROCESA EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

3.1. Griezējinstrumenta ģeometrijas izvēle eksperimentālajos pētījumos

No dažādu operāciju veidu grafika tika izvēlētas griezējinstrumenta ģeometrijas, kas ir paredzētas vidējai vai pusglūdai /tīrapstrāde operācijai - MF4 un MF5 (MF- Medium Finishing) (Att.3.1.) ar pārklājumiem CP500, TP3500 un TM4000 Duratomic, kas domāti nerūsējošo tēraudu apstrādei. Izvēlēti arī līdzīgām operācijām paredzētie analogi no citiem ražotājiem: Sumitomo, Kennametal, Walter (tabula 3.1).



3.1.att. Operāciju veidu grafiks, kur RR- (Rough Roughing) , R- Roughing, MR- Medium Rough, M-Medium, MF- Medium Finishing, F- Finishing, FF- Fine Finishing [89].

Izvēlēto griezējinstrumentu ģeometrijas un pielietošanas apgabali

Ģeometrija	Apzīmējums	Pielietošana	Griešanas dziļums, a_p / padeve, f (mm)
	TNMG 160408-NM4 WPP20 (Walter)	Nerūsējošais tērauds, vidēja apstrāde	0.25-4.5 / 0.10-0.40
	TNGP 160408 KC730 (Kennametal)	Nerūsējošais tērauds, vidēja / tīrapstrāde	0.2-4.0 / 0.10-0.30
	TNMG 160408 ESX AC2000 (Sumitomo)	Nerūsējošais tērauds, vidēja apstrāde	0.25-2.5 / 0.05-0.5
	TNMG 160412 MF4 TM4000 Duratomic (Seco)	Nerūsējošais tērauds, vidēja apstrāde	0.5-4.0 / 0.15-0.5
	TNMG 160408 MF4 CP500 (Seco)	Nerūsējošais tērauds, vidēja / tīrapstrāde	0.5-4.0 / 0.15-0.5
	TNMG 160408 MF4 TP3500 Duratomic (Seco)	Nerūsējošais tērauds, vidēja / tīrapstrāde	0.15-0.5 / 0.5-4.0
	TNMG 160408 MF5 TP2500 Duratomic (Seco)	Nerūsējošais tērauds, vidēja / tīrapstrāde	0.2-0.8 / 0.2-2.7

3.2. Vairāku faktoru eksperimenta iespēju analīze

Par pilno faktoru eksperimentu sauc eksperimentu, kurš realizē visas iespējamās un neatkārtojamās neatkarīgu faktoru līmeņu kombinācijas, kur katrs faktors mainās divos līmeņos. Šo kombināciju skaits $N=2^k$. Trīs faktoru uzdevumam regresijas vienādojumu var uzrakstīt šādā veidā [90-100]:

$$\hat{y} = \hat{M}\{y\} = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i,j} b_{ij} x_i x_j + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (3.1)$$

Pilnais faktoru eksperiments dod iespēju atrast polinoma locekļu reizinātāju b atsevišķās vērtības.

Modeļa sastādīšana ar pilno faktoru eksperimenta metodes palīdzību sastāv no:

1. Eksperimenta plānošanas un to īstenošanas;
2. Atkārtojamības pārbaudes (dispersiju vienādība);
3. Objekta matemātiskā modeļa iegūšanas un atsevišķu koeficientu nozīmības pārbaudes;
4. Matemātiskā modeļa adekvātuma pārbaudes.

Izmantojot kodētās faktoru vērtības (+1, -1), eksperimenta apstākļus var pierakstīt tabulas veidā, vai arī eksperimenta plānošanas matricas veidā, kurā rindas atbilst atsevišķam eksperimentam, bet kolonnas – faktoru vērtībām.

Plānošanas matrica trijiem faktoriem atainota tabulā 3.2.(103.lpp.)

Šeit kolonnas x_1, x_2, x_3 , sastāda plāna matricu. Šīs kolonnas nosaka plānošanu – pēc to vērtībām tiek noteikti eksperimenta apstākļi. Tālāk izvieto kolonnas ar visām iespējamajām reizinātāju kombinācijām: $x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3, x_1x_2x_3$, kuras ļauj novērtēt faktoru mijiedarbības efektus. Plānošanas matricai pievieno vēl vienu kolonnu – fiktīvo mainīgo x_0 , brīvā locekļa β_0 novērtēšanai, x_0 vērtības visās rindās ir vienādas ar +1.

Tabulu, kura satur šādas kolonnas, sauc par plānošanas matricu. Bieži šādai tabulai pievieno arī kolonnu ar optimizācijas parametru vērtībām, tas ir eksperimentu rezultātiem. Plāna matricu var arī parādīt ģeometriskā veidā. Jaunās koordinātu asis x_1, x_2, x_3 , ir novilkta paralēli faktoru naturālo vērtību asīm caur sākumpunktu O, kas atbilst faktoru $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3$ bāzes līmenim. Mērogs jaunajām asīm ir izvēlēts tā, lai variācijas intervāls katram faktoram būtu vienāds ar 1.

2^k – tipa pilnā faktoru eksperimenta īpašības.

2^k – tipa plānu sastādīšanai eksistē trīs vienkārši varianti, no kuriem viens ir bāzēts uz zīmju secības mainīšanās likumu. Pirmajā kolonnā zīmes tiek mainītas pēc kārtas, otrajā kolonnā tās maina ik pēc divām, trešajā ik pēc četrām, bet ceturtajā - ik pēc astoņām rindām, u.t.t [100].

Pilnā faktoru eksperimenta matricai ir dažas īpašības, kuras to padara par optimālu līdzekli matemātiskā modeļa sastatīšanai pēc eksperimentu rezultātiem. Divas no šīm īpašībām izriet no matricas konstrukcijas:

- Simetriskums attiecībā pret eksperimenta centru. Tas tiek definēts, kā katras vektorkolonnas algebriskā summa, neskaitot brīvā locekļa kolonnu, ir vienāda ar nulli

$$\sum_{v=1}^n x_{jv} = 0; i=1, 2, \dots, 2^k-1 \quad (3.2)$$

kur n – dažādu punktu skaits plānā; v – punkta numurs.

- Katras kolonnas elementu kvadrātu summa ir vienāda ar punktu skaitu

$$\sum_{v=1}^n x_{iv}^2 = n; i=1, 2, \dots, 2^k-1 \quad (3.3)$$

Kā vēl viena no svarīgajām īpašībām ir definēta, ka jebkuru divu matricas vektorkolonn elementu reizinājumu summa ir vienāda ar nulli

$$i \neq j; \quad i, j = 1, 2, \dots, 2^k-1 \quad (3.4)$$

Šo īpašību sauc par matricas vektorkolonn ortogonalitāti. Plāna matricas kolonnas ir ortogonālas (lineāri neatkarīgas), no tā izriet regresijas vienādojuma koeficientu novērtējumu savstarpējā neatkarība un šo koeficientu aprēķina vienkāršība.

2^3 eksperimentu plāns ļauj novērtēt astoņus regresijas koeficientus $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ [103].

3.3. Eksperimentālā modeļa izstrāde virpošanā

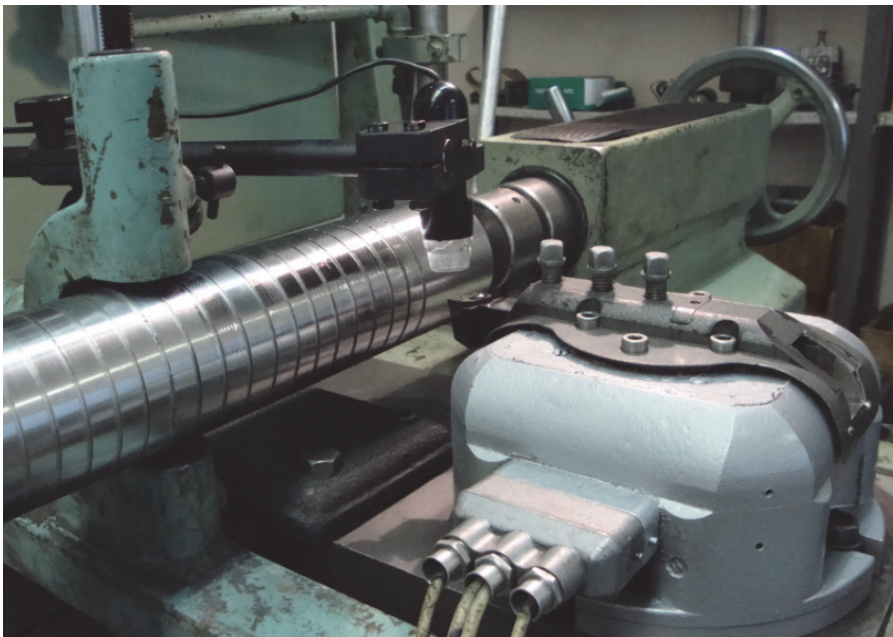
Kā piemēru tiek apskatīta pirmā eksperimenta plāna datu apstrāde ar trīs faktoru eksperimenta palīdzību. Eksperimentāla iekārta sastāv no virpas 16K20, UDM-600 dinamometra, 200x USB digitālā mikroskopa (att.3.2., 3.4.).

Saskaņā ar apstrādes režīmu padeves diapazonu vērtību (no 0,05 līdz 0,5 mm/apgr.), tiek pieņemtas padeves vērtības : 0,1 ; 0,35 mm/apgr.

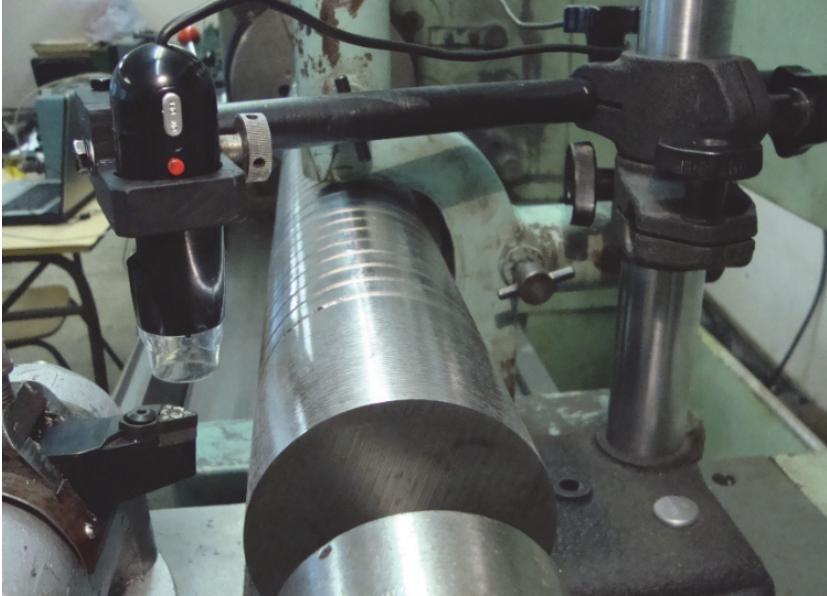
Saskaņā ar informācijas avotiem, tiek pieņemtas griešanas ātruma vērtības (bāzes vērtības) : 90...115 m/min, kā arī galvenā iestatīšanas leņķa vērtības 60° – 90°.

Materiāls: 420. Nerūsējošais tērauds, sagataves diametrs 89 mm.

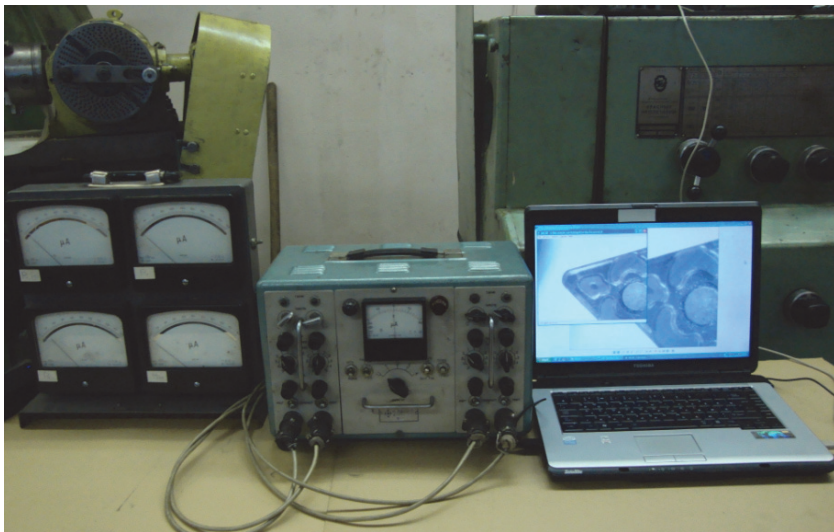
Izvēlētais instruments: griezējplāksnīte : TNMG 160412-MF4, TM4000, paredzēta vidējai līdz beigu apstrādei šai materiālu markai ātrumos no 90 līdz 115 m/min .



3.2.att. Eksperimentālā iekārta [autora attēls].

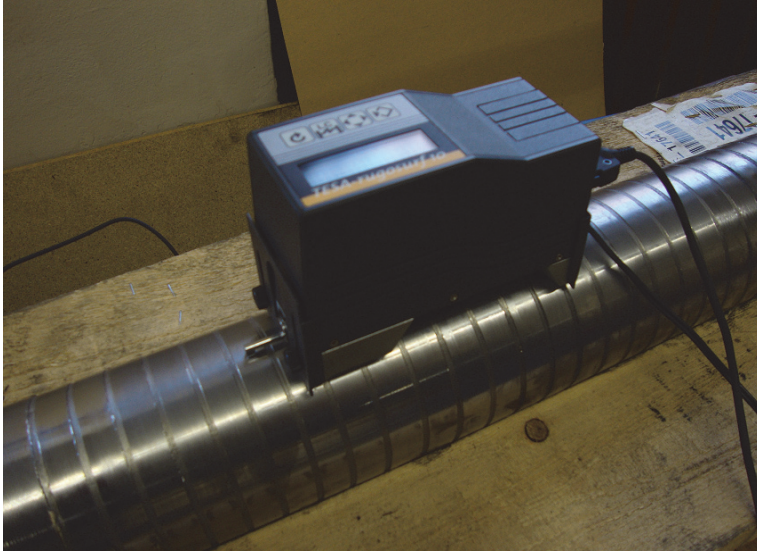


3.3.att. Eksperimentālā iekārta, skats uz X 200 digitālo mikroskopu [autora attēls].



3.4.att. Datorizēta eksperimentālās iekārtas daļa griešanas spēku mērīšanai un instrumenta nodiluma kontrolēšanai [autora attēls].

Virsmas raupjuma mērišanas iekārta un datorizētā apstrādes sistēma ir attēlota 3.5., un 3.6. att.

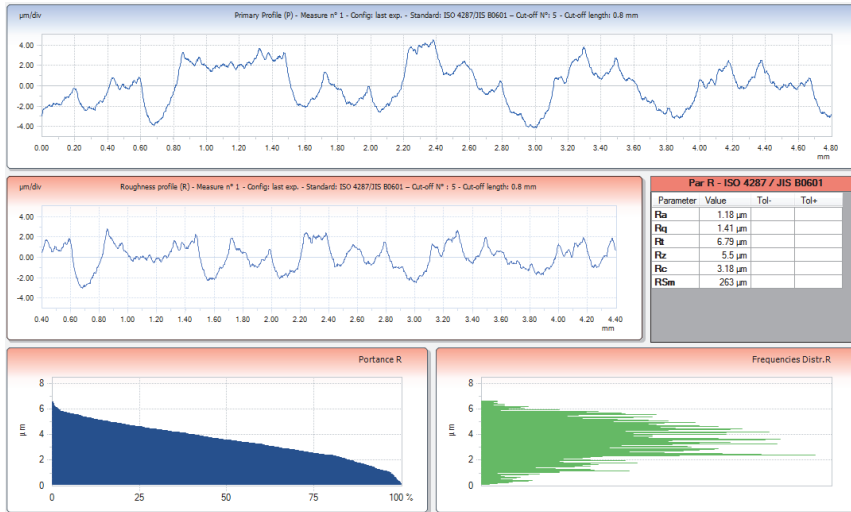


3.5.att. R_a virsmas raupjuma mērišanu iekārta un sagatave [autora attēls].

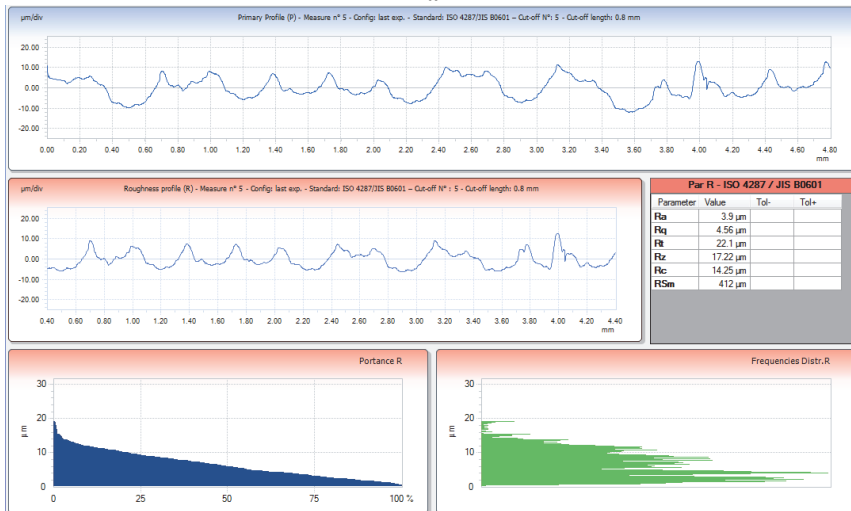


3.6.att. Mērišanu iekārta datorizētā daļa [autora attēls].

Ekspimentāli iegūtie R_a vērtībās (Y_i) dati attēloti tabulā 3.4. pēc iegūto mērījumu profilogrammas (3.7.att.) analīzes.



a



b

3.7.att. Iegūtās profilogrammas paraugs katram mērījumam ar minimālo (a) un maksimālo vērtību (b).

Tiek aprēķināts virpas apgriezību skaits atbilstoši griešanas ātrumam:

$$n_{90} = \frac{90 * 1000}{89 * \pi} = 321 \frac{apgr}{min} \quad (3.6)$$

$$n_{115} = \frac{115 * 1000}{89 * \pi} = 411 \frac{apgr}{min} \quad (3.7)$$

Rezultējošie apgriezieni tiek salīdzināti ar faktiskiem virpas pases datiem:

Apgriezību vērtības tiek pieņemtas 315 apgr/min un 400 apgr/min. pēc darbgalda 16K20 tehnoloģiskiem pases datiem.

Tiek aprēķināts faktiskais griešanas ātrums [8, 9]:

$$V_{315} = \frac{315 * \pi * 89}{1000} = \frac{88 \text{ m}}{min} \quad (3.8)$$

$$V_{400} = \frac{400 * \pi * 89}{1000} = \frac{111,8 \text{ m}}{min} \quad (3.9)$$

Pēc aprēķinu rezultātiem tiek pieņemts:

$$V_{315} = 90 \text{ m/min}$$

$$V_{400} = \frac{112 \text{ m}}{min}$$

Tiek rēķinātas teorētiskās virsmas raupjuma R_a (μm) vērtības [5]:

$$R_{a_{0,1}} = \frac{50 * 0,1^2}{1,2} = 0,41 \text{ } \mu m \quad R_{t_{0,1}} = \frac{3000 * 0,1^2}{8 * 1,2} = 3,125 \text{ } \mu m \quad (3.10)$$

$$R_{a_{0,35}} = \frac{50 * 0,35^2}{1,2} = 5,1 \text{ } \mu m \quad R_{t_{0,35}} = \frac{3000 * 0,35^2}{8 * 1,2} = 38,28 \text{ } \mu m$$

3.2. Tabula

2ⁿ plānošanas matrica

Plāna numurs	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁ x ₂	x ₁ x ₃	x ₂ x ₃	x ₁ x ₂ x ₃	Optimizācijas parametrs
1	+	-	-	-	+	+	+	-	Y1
2	+	+	-	-	-	-	+	+	Y2
3	+	-	+	-	-	+	-	+	Y3
4	+	+	+	-	+	-	-	-	Y4
5	+	-	-	+	+	+	-	+	Y5
6	+	+	-	+	-	-	-	-	Y6
7	+	-	+	+	-	+	+	-	Y7
8	+	+	+	+	+	-	+	+	Y8

3.3. Tabula

Faktoru līmeņi un variāciju intervāli pirmām eksperimentam

Faktoru līmeņi	Apzīmējums	V (m/min)	f (mm/apgr)	φ °
		\tilde{x}_1	\tilde{x}_2	\tilde{x}_3
Nomināls	0	100	0,225	75°
Variācijas intervāls	ΔXi	10	0,125	15°
Augšējais	+1	110	0,35	90°
Apakšējais	-1	90	0,1	60°

3.4. Tabula

Ra (Y_i) mērijumu dati.

	V, m/min.	f, mm/ apgr.	φ, °	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y _v	S2 _v
1	90	0,1	90	7.08	6.85	6.12	6.35	3.2	5.92	2.45
2	90	0,35	90	5.44	4.25	5.16	4.48	3.52	4.57	0.58
3	90	0,1	60	5.48	5.8	4.38	5.67	4.29	5	0.51
4	90	0,35	60	3.47	7.08	6.63	6.95	4.48	5.71	2.69
5	112	0,1	90	3.84	7.72	4.2	6.81	5.16	5.54	2.79
6	112	0,35	90	3.29	3.33	3.1	3.52	4.06	3.46	0.045
7	112	0,1	60	5.16	4.2	5.16	5.67	6.85	5.4	0.92
8	112	0,35	60	5.12	4.71	3.33	4.93	4.34	4.49	0.83

3.4. Objekta matemātiskā modeļa noteikšana

Plānošanas matricas ortogonālītāte ļauj vienkāršot regresijas vienādojuma koeficientu aprēķinu. Tā ir viena no šādas eksperimenta plānošanas priekšrocībām. Koeficientus aprēķina pēc formulas:

$$b_i = \frac{\sum_{v=1}^n x_{jv} \bar{y}_v}{n}, \quad (3.11)$$

Kur $i = 0, 1, 2, \dots, k$ – faktora numurs; Y_v – vidējais rezultāts pēc r izmēģinājumiem punktā ar numuru v :

$$y_j = \frac{\sum_{v=1}^r y_{jv}}{r}, \quad (3.12)$$

Nulle ir pierakstīta koeficienta b_0 aprēķināšanai. Tā kā katrs faktors (izņemot x_0) mainās divos līmeņos $+1$ un -1 , tad visi aprēķini reducējas uz atbilstoša faktora stabiņa zīmes pierakstīšanu stabiņam y , kā arī iegūto vērtību algebriskās summēšanas. Rezultātā dalīšana ar plānā punktu skaitu dod meklējamo koeficientu:

$$b_0 = \frac{\sum_{v=1}^n x_{0v} \bar{y}_v}{n}, = \frac{1}{8} * (5.92 + 4.57 + 5 + 5.71 + 5.54 + 3.46 + 5.7 + 4.49) = 5.04 \quad (3.13)$$

Līdzīgi aprēķinām pārējos koeficientus: $b_1 = -0.49$; $b_2 = 0.176$; $b_3 = -0.25$; $b_{12} = 0.36$; $b_{13} = -0.33$; $b_{23} = 0.12$; $b_{123} = 0.03$

Vienādojums ar normalizētiem mainīgumiem x veidojās sekojoši:

$$Y = 5.04 - 0.49x_1 + 0.176x_2 - 0.25x_3 + 0.36x_1x_2 - 0.33x_1x_3 + 0.12x_2x_3 + 0.03x_1x_2x_3$$

kur Y - virsmas profila negludums (R_a – negluduma vidēja aritmētiska novirze);

x_1, x_2, x_3 - attiecīgi griešanas ātrums, padeve, galvenais iestatīšanas leņķis.

Ekspierimenta plānošanā ievēro sakarību statistisko raksturu, tāpēc iegūtie vienādojumi tika statistiski analizēti. Tādai analīzei ir divi mērķi:

1. Iegūt maksimāli daudz informācijas no eksperimenta rezultātiem.
2. Pārlicināties par iegūto sakarību ticamību un precizitāti.

3.5. Dispersija, kura raksturo eksperimenta kļūdu

Katrs eksperiments satur sevī kādu kļūdu. Kļūdu samazināšanai ir jāveic eksperimentu atkārtošana vienādos apstākļos, t.i. katrā plānošanas rindā. Rindu dispersijas var aprēķināt pēc formulas (14):

$$s_v^2 = \frac{\sum_{v=1}^n (y_{vj} - \overline{y_v})^2}{r - 1}, \quad (3.14)$$

Kur r - atkārtotu eksperimentu skaits plāna punktos.

$$\begin{aligned} s_{v1}^2 &= \frac{\sum_{v=1}^n (y_{vj} - \overline{y_v})^2}{r - 1} \\ &= \frac{(7.08 - 5.92)^2 + (6.85 - 5.92)^2 + (6.12 - 5.92)^2 + (6.35 - 5.92)^2 + (3.2 - 5.92)^2}{4} \\ &= 2.45 \end{aligned}$$

Līdzīgi aprēķinām: $S^2_{v2} = 0.58$; $S^2_{v3} = 0.51$; $S^2_{v4} = 2.69$; $S^2_{v5} = 2.79$; $S^2_{v6} = 0.045$; $S^2_{v7} = 0.92$; $S^2_{v8} = 0.83$

Optimizācijas parametra dispersija $s(y)$ ir vidējais aritmētiskais no visu atsevišķo eksperimentu variantu dispersijas. Aprēķina optimizācijas parametra dispersiju pēc formulas [103];

$$s^2\{y\} = \frac{\sum_{v=1}^n s_v^2}{n} = \frac{\sum_{v=1}^n \sum_{j=1}^r (y_{vj} - \overline{y_v})^2}{n(r - 1)} = \frac{10.81}{8} = 1.35 \quad (3.15)$$

Ja atkārtotu eksperimentu skaits ir atšķirīgs, tad jāizmanto formula:

$$s^2\{y\} = \frac{\sum_{v=1}^n f_v s_v^2}{\sum_{v=1}^n f_v} = \frac{\sum_{v=1}^n f_v s_v^2}{f_E}, \quad (3.16)$$

Kur s_v^2 - rezultātu dispersija plāna punktā v , kur tiek veikti r_v atkārtoti eksperimenti; $f_v = r_v - 1$, - tādas dispersijas brīvo pakāpju skaits; f_E - brīvo pakāpju kopskaits apvienotai dispersijai $s^2\{y\}$. Šeit nedrīkst pielietot formulas koeficientus, kuri ir parādīti iepriekš. Pirms dispersiju apvienošanas ir jāpārbauda to atkārtojamība.

3.6. Dispersiju vienādības pārbaude

Dispersiju vienādības pārbaude ir veikta ar dažādu statistisko metožu palīdzību: piem., ar Fišera, Kohrena, Bartleta metodi. Fišera F- kritērija izmantošana ir neefektīva, ja dispersiju skaits ir lielāks par divi, jo tādā gadījumā novērtējumā piedalās tikai vismazākā un vislielākā dispersija. Kohrena G kritēriju izmanto gadījumos, kad eksperimentu atkārtojumu skaits ir vienāds visos plāna punktos. No visām s_v^2 dispērsijām ir jāizvelas vislielāko $s_v^2_{max}$, kura dalās ar visu dispersiju summu. Kohrena kritērijs G – maksimālās dispersijas attiecība pret visu dispersiju summu (3.17.):

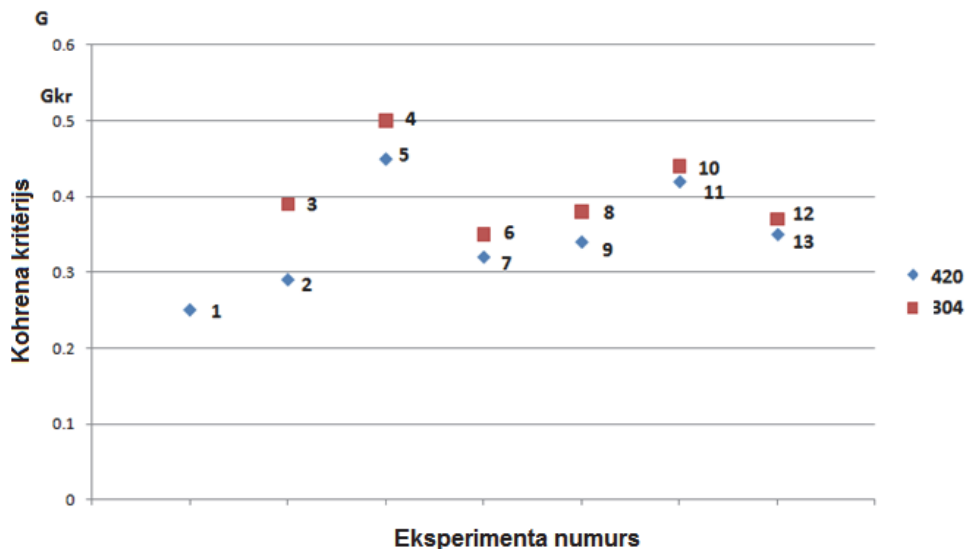
$$G = \frac{s_v^2_{max}}{\sum s_v^2} = \frac{2.79}{10.81} = 0.26 \quad (3.17)$$

Kritiskā Kohrena kritērija vērtība ir $G_{kr} = 0,52$ (pie nozīmības līmeņa $\alpha=0.05$). Dispersiju vienādības hipotēze ir pareiza, jo Kohrena kritērija eksperimentāla vērtība ir mazāka par tabulas vērtību (3.18.) (3.4.att.) un kopējais eksperimentu raksturojums tabulā 3.5.:

$$0.26 < 0.52$$

Kopējais eksperimentu raksturojums

Eksp. Nr.	Nerūsējoša tērauda marka	Instruments	Griešanas parametri
1	420.	TNMG 160412 TM4000 MF4 (Seco)	$a_p = 0.5$ mm, $f = 0.1$; 0.35 mm/apgr., $V = 90, 112$ m/min.
2	420.	TNMG 160412 TM4000 MF4 (Seco)	$a_p = 0.5$ mm, $f = 0.1$; 0.35 mm/apgr., $V = 117, 141$ m/min.
3	304.	TNMG 160412 TM4000 MF4 (Seco)	$a_p = 0.5$ mm, $f = 0.1$; 0.35 mm/apgr., $V = 117, 141$ m/min.
4	420.	TNMG 160412 TM4000 MF4 (Seco)	$a_p = 0.5$ mm, $f = 0.1$; 0.35 mm/apgr., $V = 144, 176$ m/min.
5	304.	TNMG 160412 TM4000 MF4 (Seco)	$a_p = 0.5$ mm, $f = 0.1$; 0.35 mm/apgr., $V = 144, 176$ m/min.
6	304.	TNMG 160408 CP500 MF4 (Seco)	$a_p = 0.5$ mm, $f = 0.1$; 0.35 mm/apgr., $V = 210, 268$ m/min.
7	420.	TNMG 160408 CP500 MF4	$a_p = 0.5$ mm, $f = 0.1$; 0.35 mm/apgr., $V = 210, 268$ m/min.
8	304.	TNMG 160408 TP2500 MF5 (Seco)	$a_p = 0.5$ mm, $f = 0.1$; 0.35 mm/apgr., $V = 210, 268$ m/min.
9	420.	TNMG 160408 TP2500 MF5 (Seco)	$a_p = 0.5$ mm, $f = 0.1$; 0.35 mm/apgr., $V = 210, 268$ m/min.
10	420.	TNMG 160408 TP2500 MF5 (Seco)	$a_p = 0.5$ mm, $f = 0.1$; 0.35 mm/apgr., $V = 273, 343$ m/min.
11	304.	TNMG 160408 TP2500 MF5 (Seco)	$a_p = 0.5$ mm, $f = 0.1$; 0.35 mm/apgr., $V = 273, 343$ m/min.
12	304.	TNMG 160408 MF4 TP3500 (Seco)	$a_p = 0.5$ mm, $f = 0.1$; 0.35 mm/apgr., $V = 210, 268$ m/min.
13	420.	TNMG 160408 MF4 TP3500 (Seco)	$a_p = 0.5$ mm, $f = 0.1$; 0.35 mm/apgr., $V = 210, 268$ m/min.



3.8.att. Kohrena kritērija grafiskais attēlojums atbilstoši eksperimenta numuram un materiālam

3.7. Modeļa koeficienta nozīmības pārbaude

Katra koeficienta nozīmības pārbaude ir veikta neatkarīgi. Pārbaudei var izmantot Studenta t – kritēriju. Pilna faktoru eksperimenta izmantošanas gadījumā visu koeficientu ticamības intervāli ir vienādi. Vispirms tika aprēķināta $s^2\{b_1\}$ regresijas koeficienta dispersija. To var aprēķināt pēc šādas formulas [100] :

$$s^2\{b_i\} = \frac{s^2\{y\}}{n*r} = \frac{1.34}{8*5} = 0.0337$$

$$s\{b_i\} = \sqrt{0.0337} = 0.184$$

Tagad izskaitļoju t – kritērija vērtības pēc formulas (3.19.):

$$t_i = \frac{|b_i|}{s\{b_i\}} \tag{3.19.}$$

Šīm eksperimentam tās izskatās šādi:

$$t_0 = \frac{|b_0|}{s\{b_0\}} = \frac{5,04}{0,184} = 27,39 ; \quad t_1 = \frac{|b_1|}{s\{b_1\}} = \frac{0,49}{0,184} = 2,66 ; \quad t_2 = \frac{|b_2|}{s\{b_2\}} = \frac{0,176}{0,184} = 0,96 ;$$

$$t_3 = \frac{|b_3|}{s\{b_3\}} = \frac{0,25}{0,184} = 1,36 ; \quad t_{12} = \frac{|b_{12}|}{s\{b_{12}\}} = \frac{0,36}{0,184} = 1,95 ; \quad t_{13} = \frac{|b_{13}|}{s\{b_{13}\}} = \frac{0,33}{0,184} = 1,79 ;$$

$$t_{23} = \frac{|b_{23}|}{s\{b_{23}\}} = \frac{0,12}{0,184} = 0,65 ; \quad t_{123} = \frac{|b_{123}|}{s\{b_{123}\}} = \frac{0,3}{0,184} = 1,63$$

Kritisko vērtību t_{kr} atrodam pēc tabulām pie $n(r-1)=32$ brīvības pakāpēm un pie nozīmības līmeņa $\alpha=0,05$:

$$t_{kr}=2,04$$

Ja $t_i > t_{kr}$, tad hipotēze tiek atmesta un koeficients b_i tiek uzskatīts par nozīmīgu. Pretējā gadījumā b_i tiek uzskatīts par statistiski nenozīmīgu, t.i. $b_i=0$. Tā kā kritēriju t_2 , t_{23} un t_{123} vērtības ir mazākas par t_{kr} tas nozīmē, ka atbilstoši koeficienti b_2 , b_{23} , b_{123} ir vienādi ar nulli.

Sekojoši, var sastādīt ticamības intervālu ar garumu $2\Delta b_i$ kur:

$$\Delta b_i = t_{kr} * s\{b_i\} = 2,04 * 0,0919 ;$$

$$2\Delta b_i = 2 * 0,187 = 0,374$$

Koeficients ir nozīmīgs, ja tā absolūtā vērtība arī ir lielāka par uzticības intervāla garuma pusi. Ortogonālā plānošana ļauj noteikt ticamības robežas atsevišķi katram no regresijas koeficientiem. Ja kāds no koeficientiem izrādās nenozīmīgs, to var atstāt bez citu koeficientu pārrēķināšanas. Pēc tam objekta matemātiskais modelis tiek sastādīts vienādojuma veidā, kurā ierakstīti tikai nozīmīgie koeficienti. Dotajam eksperimentam tika iegūts sekojošs vienādojums (3.20.):

$$Y=5.04-0.49x_1 \tag{3.20.}$$

Lai iegūtu modeli ar naturālajiem mainīgajiem lielumiem, vienādojumā (3.20.) jāieliek x_i izteiksmes no pārveidošanas formulām:

$$\begin{aligned}x_1 &= \frac{\tilde{x}_1 - 100}{10} \\x_2 &= \frac{\tilde{x}_2 - 0.225}{0.125}; \\x_3 &= \frac{\tilde{x}_3 - 75}{15};\end{aligned}$$

Rezultātā tiek iegūts vienādojums (3.21.):

$$R_a = 5.04 - 0.49 \left(\frac{\tilde{x}_1 - 100}{10} \right) \quad (3.21.)$$

Kur: \tilde{x}_1 - Griešanas ātrums, V m/min;

\tilde{x}_2 - padeve, f mm/ apgr;

\tilde{x}_3 - griešanas leņķis, ϕ°

Pēc analogiskā paņēmiena ir sastādīti citu eksperimentu plāni. Visu eksperimentu apkopotie dati ir attēloti tabulā 3.5.

Eksperimentam Nr. 2. (3.5. tabula), pielietojot instrumentu ar Duratomic pārklājumu TM-4000 un griešanas ātruma diapazonu 117/141 m/min., tēraudam AISI420 eksperimenta plāns attēlots tabulā 3.6. un iegūtais vienādojums 3.22.

Eksperimentam Nr. 3. (3.5. tabula), pielietojot instrumentu ar Duratomic pārklājumu TM-4000 un griešanas ātruma diapazonu 117/141 m/min., tēraudam AISI304 eksperimenta plāns attēlots tabulā 3.6. un iegūtais vienādojums 3.23.

Faktoru līmeņi un variāciju intervāli

Faktoru līmeņi	Apzīmējums	V (m/min)	f (mm/apgr.)	φ °
		\tilde{x}_1	\tilde{x}_2	\tilde{x}_3
Nomināls	0	129	0,225	75°
Variācijas intervāls	ΔXi	12	0,125	15°
Augšējais	+1	141	0,35	90°
Apakšējais	-1	117	0,1	60°

$$R_a = 2.0 + 0.96 \left(\frac{\tilde{x}_1 - 129}{12} \right) + 0.04 \left(\frac{\tilde{x}_2 - 0.225}{0.125} \right) + 0.14 \left(\frac{\tilde{x}_3 - 75}{15} \right) \quad (3.22.)$$

$$+ 0.11 \left(\frac{\tilde{x}_1 - 129}{12} \right) \left(\frac{\tilde{x}_2 - 0.225}{0.125} \right) + 0.45 \left(\frac{\tilde{x}_1 - 129}{12} \right) \left(\frac{\tilde{x}_2 - 0.225}{0.125} \right) \left(\frac{\tilde{x}_3 - 75}{15} \right)$$

$$R_a = 1.12 + 0.25 \left(\frac{\tilde{x}_1 - 129}{12} \right) + 0.06 \left(\frac{\tilde{x}_2 - 0.225}{0.125} \right) + 0.17 \left(\frac{\tilde{x}_3 - 75}{15} \right) + \quad (3.23.)$$

$$0.7 \left(\frac{\tilde{x}_1 - 129}{12} \right) \left(\frac{\tilde{x}_2 - 0.225}{0.125} \right) + 0.35 \left(\frac{\tilde{x}_1 - 129}{12} \right) \left(\frac{\tilde{x}_2 - 0.225}{0.125} \right) \left(\frac{\tilde{x}_3 - 75}{15} \right)$$

kur: \tilde{x}_1 - Griešanas ātrums , V m/min;

\tilde{x}_2 - padeve, f mm/ apgr;

\tilde{x}_3 - griešanas leņķis , ϕ °

Ekspperimentam Nr. 4. (3.5. tabula), pielietojot instrumentu ar Duratomic pārklājumu TM-4000 un griešanas ātruma diapazonu 144/176 m/min., tēraudam AISI420 eksperimenta plāns attēlots tabulā 3.7. un iegūtais vienādojums 3.24.

Ekspperimentam Nr. 5. (3.5. tabula), pielietojot instrumentu ar Duratomic pārklājumu TM-4000 un griešanas ātruma diapazonu 144/176 m/min., tēraudam AISI304 eksperimenta plāns attēlots tabulā 3.7. un iegūtais vienādojums 3.25.

Faktoru līmeņi un variāciju intervāli

Faktoru līmeņi	Apzīmējums	V (m/min)	f (mm/apgr.)	ϕ °
		\tilde{x}_1	\tilde{x}_2	\tilde{x}_3
Nomināls	0	160	0,225	75°
Variācijas intervāls	ΔX_i	16	0,125	15°
Augšējais	+1	176	0,35	90°
Apakšējais	-1	144	0,1	60°

$$R_a = 4,14 - 1,76 \left(\frac{\tilde{x}_1 - 160}{16} \right) - 0,41 \left(\frac{\tilde{x}_2 - 0,225}{0,125} \right) - 0,07 \left(\frac{\tilde{x}_1 - 160}{16} \right) \left(\frac{\tilde{x}_3 - 75}{15} \right) \quad (3.24.)$$

$$R_a = 2,17 - 1,18 \left(\frac{\tilde{x}_1 - 160}{16} \right) - 0,29 \left(\frac{\tilde{x}_2 - 0,225}{0,125} \right) - 0,12 \left(\frac{\tilde{x}_1 - 160}{16} \right) \left(\frac{\tilde{x}_3 - 75}{15} \right) \quad (3.25)$$

kur: \tilde{x}_1 - Griešanas ātrums, V m/min;

\tilde{x}_2 - padeve, f mm/ apgr;

\tilde{x}_3 - griešanas leņķis, ϕ °

Ekspperimentam Nr. 10. (3.5. tabula), pielietojot instrumentu ar Duratomic pārklājumu TP-2500 un griešanas ātruma diapazonu 273/343 m/min., tēraudam AISI420 eksperimenta plāns attēlots tabulā 3.8. un iegūtais vienādojums 3.26.

Ekspperimentam Nr. 11. (3.5. tabula), pielietojot instrumentu ar Duratomic pārklājumu TP-2500 un griešanas ātruma diapazonu 273/343 m/min., tēraudam AISI304 eksperimenta plāns attēlots tabulā 3.8. un iegūtais vienādojums 3.27.

Faktoru līmeņi un variāciju intervāli

Faktoru līmeņi	Apzīmējums	V (m/min)	f (mm/apgr.)	ϕ°
		\tilde{x}_1	\tilde{x}_2	\tilde{x}_3
Nomināls	0	308	0,225	75°
Variācijas intervāls	ΔX_i	35	0,125	15°
Augšējais	+1	343	0,35	90°
Apakšējais	-1	273	0,1	60°

$$R_a = 7.11 - 3.03 \left(\frac{\tilde{x}_1 - 312}{35} \right) - 2.1 \left(\frac{\tilde{x}_2 - 0.225}{0.125} \right) - 0.74 \left(\frac{\tilde{x}_1 - 312}{35} \right) \left(\frac{\tilde{x}_2 - 0.225}{0.125} \right) \left(\frac{\tilde{x}_3 - 75}{15} \right) \quad (3.26.)$$

$$R_a = 5.17 - 2.161 \left(\frac{\tilde{x}_1 - 312}{35} \right) - 1.28 \left(\frac{\tilde{x}_2 - 0.225}{0.125} \right) - 0.62 \left(\frac{\tilde{x}_1 - 312}{35} \right) \left(\frac{\tilde{x}_2 - 0.225}{0.125} \right) \left(\frac{\tilde{x}_3 - 75}{15} \right) \quad (3.27.)$$

kur: \tilde{x}_1 - Griešanas ātrums, V m/min;

\tilde{x}_2 - padeve, f mm/ apgr;

\tilde{x}_3 - griešanas leņķis, ϕ°

3.8. Apvirpotās virsmas raupjuma veidošanās analīze pielietojot citu ražotāju instrumentus.

Grafiskie rezultāti (3.9. un 3.10.att) parāda, cik nozīmīgi atšķiras apvirpotās virsmas rezultāts (R_a) pielietojot instrumentus no dažādiem ražotājiem, kuri it kā domāti līdzīgam operācijām ar tādiem pašiem aprēdes režīmiem (3.9., 3.10.tabula).

3.9. Tabula

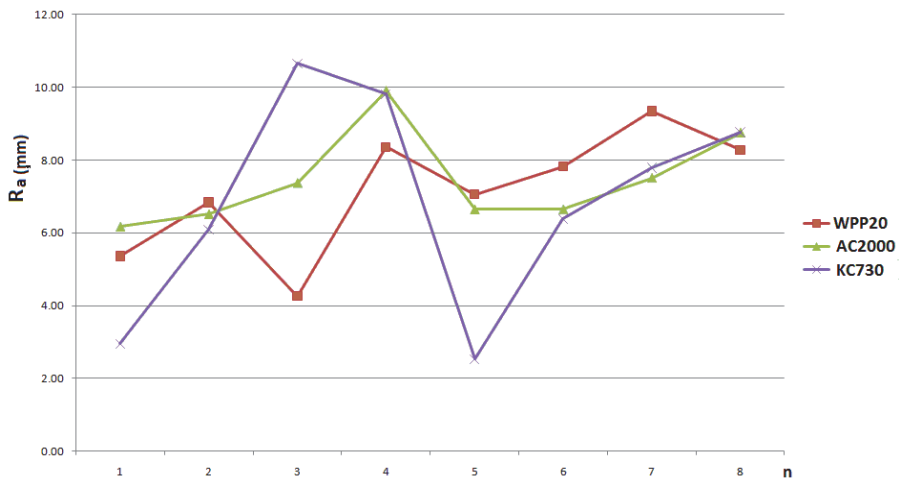
Kopējais eksperimentu raksturojums

Eksp. Nr.	Nerūsējoša tērauda marka	Instruments	Griešanas parametri
14	304.	TNMG 160408-NM4 WPP20 (Walter)	$a_p = 0.5$ mm, $f = 0.1$; 0.35 mm/apgr., $V = 210, 268$ m/min.
15	420.	TNMG 160408-NM4 WPP20 (Walter)	$a_p = 0.5$ mm, $f = 0.1$; 0.35 mm/apgr., $V = 210, 268$ m/min.
16	304.	TNMG 160408 ESX AC2000 (Sumitomo)	$a_p = 0.5$ mm, $f = 0.1$; 0.35 mm/apgr., $V = 210, 268$ m/min.
17	420.	TNMG 160408 ESX AC2000 (Sumitomo)	$a_p = 0.5$ mm, $f = 0.1$; 0.35 mm/apgr., $V = 210, 268$ m/min.
18	304.	TNMG 160408 KC730 (Kennametal)	$a_p = 0.5$ mm, $f = 0.1$; 0.35 mm/apgr., $V = 210, 268$ m/min.
19	420.	TNMG 160408 KC730 (Kennametal)	$a_p = 0.5$ mm, $f = 0.1$; 0.35 mm/apgr., $V = 210, 268$ m/min.

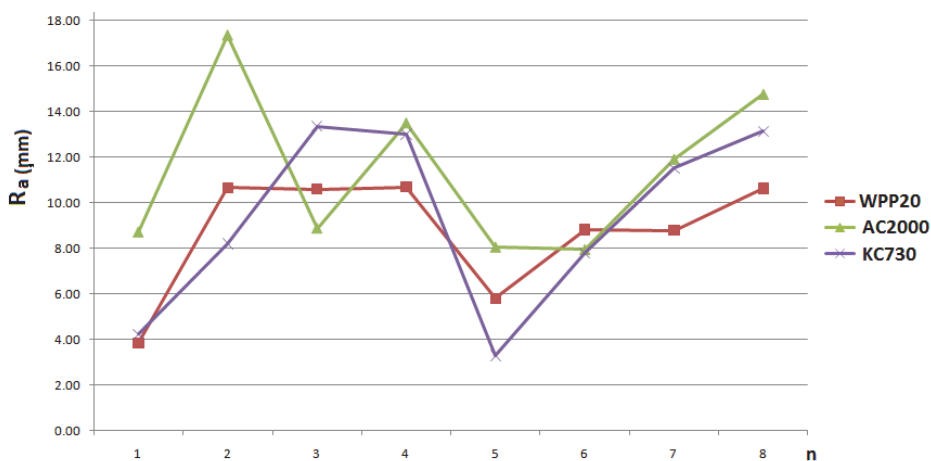
3.10. Tabula

Virsmas negludumu vidējās vērtības ($R_{a\text{ vid}}$) dažādiem sagataves materiāliem un instrumentiem

n	304			420		
	WPP20	AC2000	KC730	WPP20	AC2000	KC730
1	5.36	6.17	2.95	3.85	8.72	4.23
2	6.83	6.51	6.09	10.67	17.35	8.20
3	4.26	7.37	10.65	10.61	8.89	13.37
4	8.36	9.89	9.81	10.69	13.50	13.01
5	7.05	6.65	2.53	5.80	8.06	3.29
6	7.83	6.64	6.38	8.81	7.95	7.81
7	9.34	7.51	7.79	8.80	11.91	11.52
8	8.32	8.75	8.76	10.63	14.75	13.14



3.9.att. 304. Nerūsējošā tērauda ar dažāda materiāla instrumentu apvirpotas virsmas vidējā raupjuma vērtību grafiskais attēlojums.



3.10.att. 420. Nerūsējošā tērauda ar dažāda materiāla instrumentu apvirpotas virsmas vidējā raupjuma vērtību grafiskais attēlojums.

Izvēlētajos vairākus citu ražotāju instrumentus saskaņā ar standartu ISO 513 ar griešanas ģeometrijas, kura bija paredzēta identiskai operācijai konkrētai materiālu grupai (AISI 304, AISI 420), veicot virpošanas procesu ar palielinātiem apstrādes režīmiem un apstrādātas virsmas mērījumus tika noskaidrots, ka citu ražotāju instrumenti nenodrošina identisku apstrādātas virsmas

kvalitāti. Dažādos gadījumos, pielietojot apstrādes režīmu kombinācijas, apstrādātas virsmas raupjuma vērtību R_a diapazona vērtību izkliede sasniedza 100% pie identiskiem apstrādes režīmiem (piem., no 3.0 līdz 6.0 μm) (3,9., 3.10., att.) .

Griešanas procesā pie maināmiem režīmiem instrumenta leņķu vērtības mainās salīdzinājumā ar standartizēto stāvokli. Normālos griešanas apstākļos šīs izmaiņas ir nenozīmīgas un tās parasti tiek ignorētas, bet pie lielām padevēm galvenais leņķis ϕ ir nepieciešams palielināt par 3 ... 5 ° un, ja nepieciešams, ņemt vērā citu režīmu izmaiņas.

Instrumenta ģeometrisko elementu optimālā vērtība un priekšējās virsmas forma ir atkarīgi no vairākiem faktoriem un, pirmkārt, no apstrādājamā materiāla, materiāla fizikālās un mehāniskās īpašības instrumenta griešanas daļa, apstrādājamās sagataves forma un izmēri, griešanas režīmi.

Stūru izmēri (griezējplāksnītes malas ģeometrija) tiek izvēlēti atbilstoši atbilstošajam uzziņu grāmatām, nodrošina instrumentu projektēšanu un izgatavošanai sasniegtu uzdoto rezultātu. Apstrādājot ar asmeņu instrumentu, tiek pievērsta liela uzmanība skaidu formas un tās noiešanas virziena kontrole. Ir vairāki veidi, kā kontrolēt skaidu plūsmu, piemēram, mainot leņķus un griezējinstrumenta orientāciju, mainot griešanas ātrumu, padevi un griešanas dziļums, mainīgas vai periodiskas padeves izmantošana. Griezējinstrumenta leņķu maiņa ietekmē skaidu trajektoriju.

3.9. Nodaļas secinājumi

Veiktie eksperimentālie pētījumi ļāva izveidot vairākas griešanas procesa matemātiskus modeļus, izmantojot dažādus detaļas apstrādes režīmus atbilstoši virsmas raupjuma parametra R_a labāko vērtību iegūšanas kritērijam, kā arī optimālam skaidu veidošanas procesam.

Sākotnējo trajektoriju nosaka griezējinstrumenta leņķis un galvenās griešanas malas slīpuma leņķis. Instrumenta priekšējās virsmas formas maiņa, sliekšņi un robi (griezējinstrumenta ģeometrija) ietekmē skaidu formu, to noiešanas virzienu un sasmalcināšanu pa segmentiem.

Mainot griešanas apstākļus, mainās arī griezējinstrumenta ģeometrija griešanas zonā un skaidu veidošanas parametri, kas ietekmē skaidu veidošanās procesu, izraisa papildus vibrācijas, kas atspoguļojas uz apstrādātas virsmas kvalitātes.

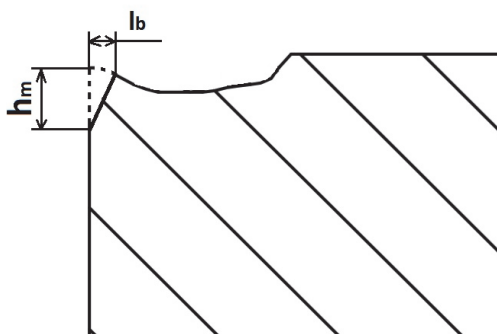
Izpētot visus veikto eksperimentus rezultātus var redzēt, ka dažādu ražotāju instrumenti nav paredzēti pielietošanai pie palielinātiem griešanas režīmiem.

4.0. INSTRUMENTA NODILUMA UN SKAIDU VEIDOŠANĀS EKSPERIMENTĀLIE REZULTĀTI

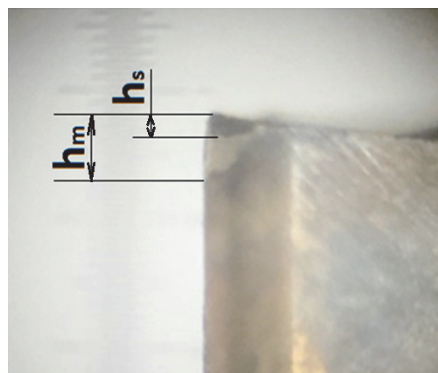
4.1. Instrumenta nodiluma eksperimentālie rezultāti

Instrumenta nodilums tika mērīts pēc katra apvirpošanas parametru kombinācijas griešanas procesa un pēc pilnā apstrādes cikla ar 8 režīmu kombinācijām un 5 atkārtojumiem. Tika pielietots instrumentālais mikroskops ar palielinājumu $\times 24$ un USB digitālais mikroskops ar palielinājumu $\times 200$. griezējplāksnīte bāzēta savā turētājā kurš pielietojās apstrāde. No iegūtiem datiem var secināt, ka Duratomic pārklātie griezējinstrumenti ir vairāk nodilumizturīgi, bet, savukārt, cietāka ārēja Al_2O_3 pārklājuma dēļ izraisa vibrācijas, kas gan pasliktina apvirpoto virsmu, gan veicina to, ka griezējinstrumentam ātrāk veidojas nodilums. Pielietojot lielākus griešanas ātrumus, bez dzesēšanas emulsijām, tika sasniegts lielākais kalpošanas laika variants ar Duratomic TM4000 pārklājumu, kurš pie 50% palielinātiem griešanas ātrumiem parādīja minimālu griezējasmaņņa nodilumu (tādā stāvoklī ar instrumentu vēl varētu turpināt strādāt).

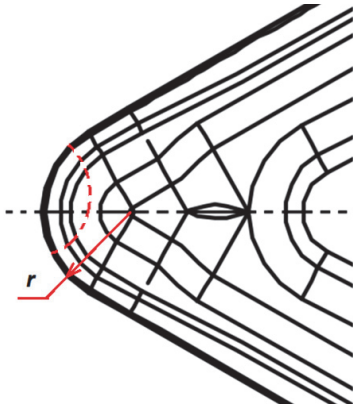
Eksperimentu rezultātā noskaidrots, ka atkarībā no griešanas apstākļiem, dažādām instrumentu ģeometrijām un pārklājumu veidiem un apstrādājamā materiāla īpatnībām (304. un 420. markas nerūsējošais tērauds) dominējošais nodilums ir vērojams uz galvenās mugurvirsmas h_m , un uz skaidvirsmas redzams 4.1.-4.4. attēlos. Instrumentu nodilšanas gadījumā mainās arī griezošās malas noapaļošanās rādiuss Δr (att. 4.4.).



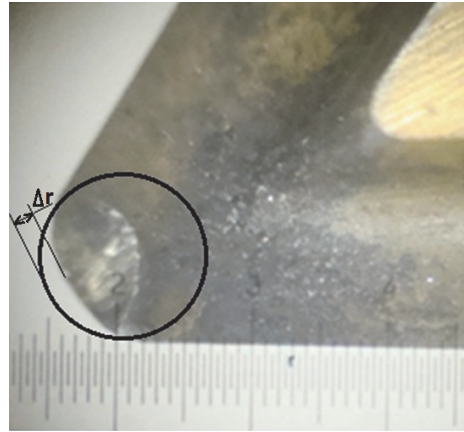
4.1. Att. Nodiluma augstuma h_m un nodiluma garuma l_b parametri uz plāksnītes griezējasmaņņa šķēlumā



4.2. Att. Nodiluma augstuma h_m un nodiluma bedrītes dziļuma h_s parametri

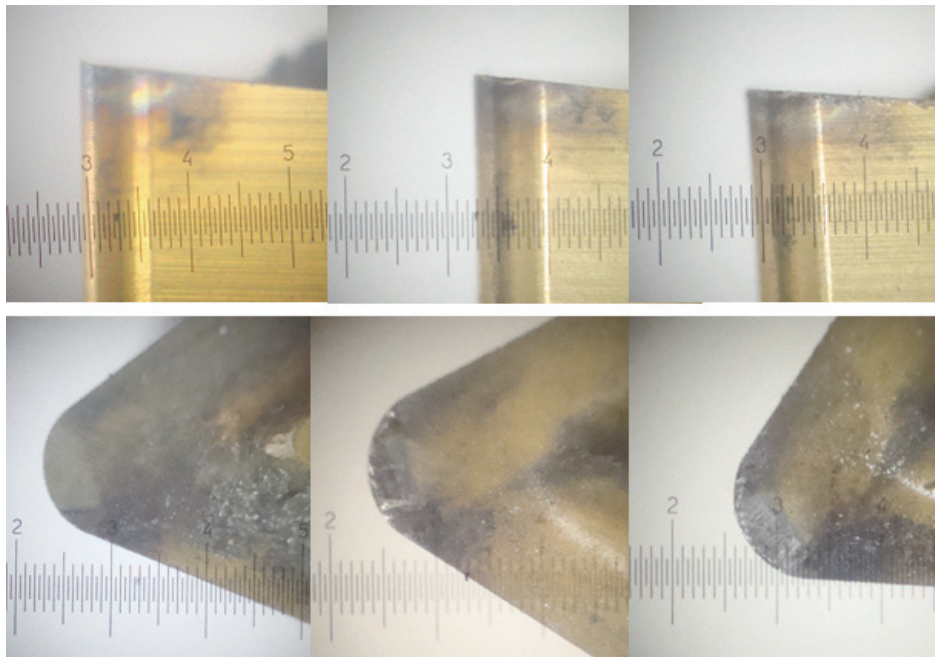


4.3. Att. Noapaļojuma rādiusa r izmaiņas uz plāksnītes virsotnes (attēlots ar pārtraukto līniju)

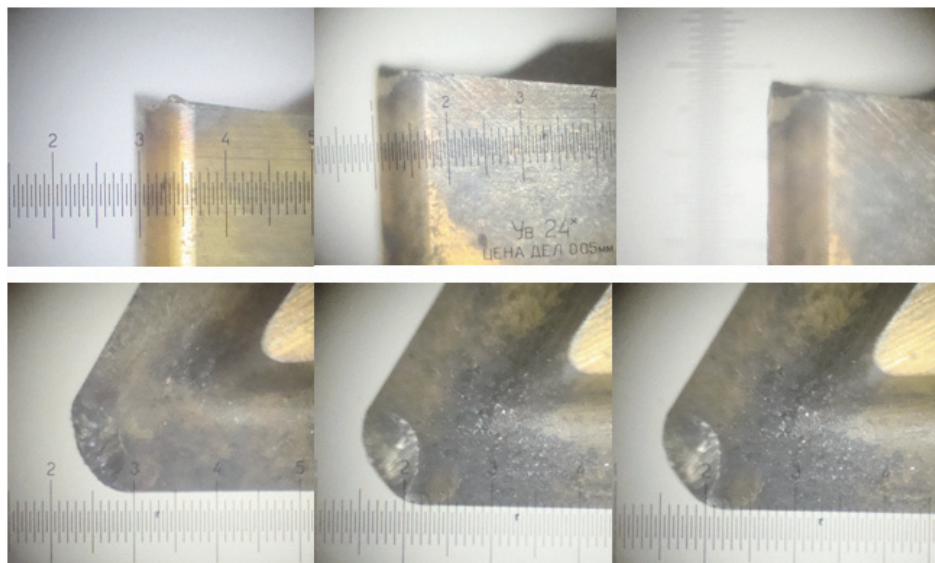


4.4. Att. Noapaļojuma rādiusa Δr izmaiņas uz plāksnītes skaidvirsmas

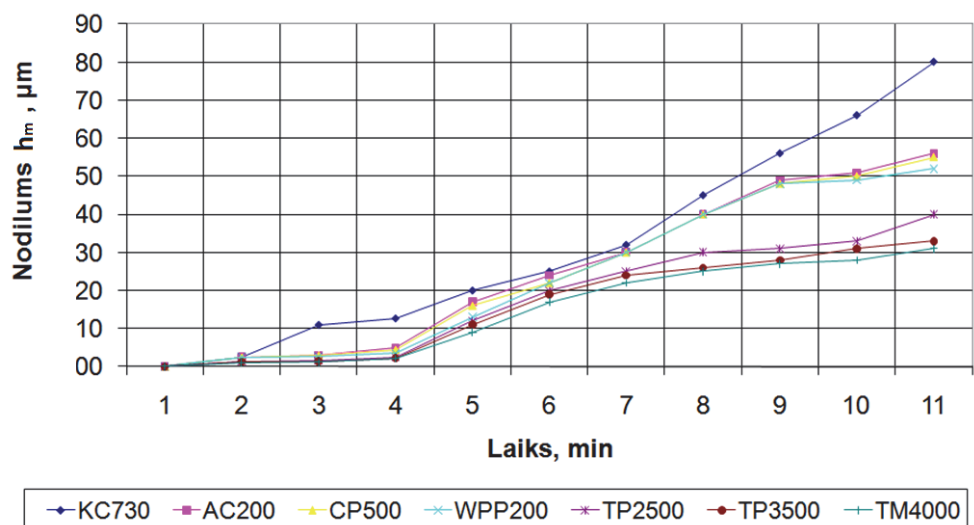
Lielāku nodiluma rezultātu parādīja KC730 (Kennametal). Šis instruments, pateicoties diezgan nesarežģītai skaidu laužēja ģeometrijai, nodemonstrēja labākus apvirpotās virsmas rezultātus nekā pārējie instrumenti, bet nodiluma vērtības bija ļoti lielas. Interesi rada tas, ka šis instruments, apvirpojot divas dažādas nerūsējošo tēraudu grupu markas, parādījis dažādu nodilumu - minimālu nodilumu, apvirpojot AISI 420. un maksimālu - apvirpojot AISI 304. nerūsējošo tēraudu. (4.5., 4.6., att.). Griezējinstrumentu nodilumu eksperimentālie rezultāti izvēlētajiem instrumentiem ir attēloti 4.7. attēlā. Dati ir iegūti, nolasot nodiluma vērtības pēc pilnā apstrādes cikla nepārsniedzot instrumenta paredzēto kalpošanas laiku (15 min.)



4.5.att. Griezējinstrumenta KC730 nodiluma variants apvirpojot AISI 420. tēraudu



4.6.att. Griezējinstrumenta KC730 nodiluma variants apvirpojot AISI 304. tēraudu



4.7.att. Instrumenta nodiluma eksperimentāli iegūtie nodiluma rezultātu attēlojumi.

4.2. Skaidu veidošanās procesa eksperimentālie pētījumi

Stabils skaidu veidošanās vai laušanas process ir ļoti svarīgs mūsdienu automatizētā ražošanā. Pielietojot mūsdienīgus instrumentus ar dažādām skaidu laužēja profila formām atbilstoši materiālu grupām, šo procesu iespējams pilnībā nodrošināt (4.8.att). Bet, kā mēs redzējam no praktiskā eksperimenta, dažreiz ir gadījumi, kad process ir nestabils (4.9.att). Praktiski iegūtie rezultāti atbilstoši apstrādes parametru kombinācijas numuram ir attēloti uz 4.10. un 4.11. attēlos.

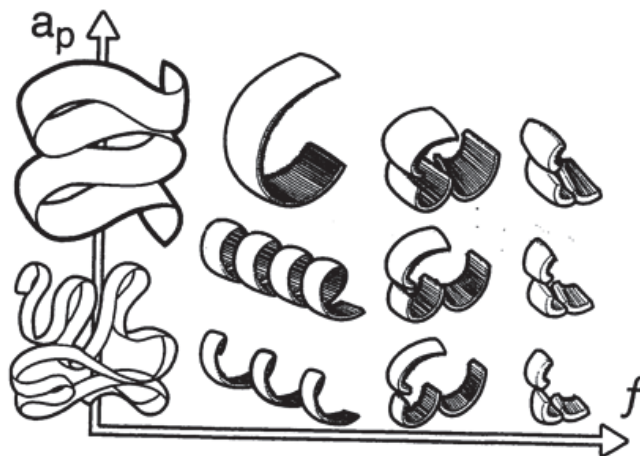
Ferīta un martensīta (AISI 420) nerūsējošajiem tēraudiem ir līdzīga apstrādājamība ar mazlēģētiem tēraudiem, martensīta nerūsējošais tērauds ir vairāk pakļauts sacietēšanai griešanas laikā un rada ļoti lielus griešanas spēkus. Lielāks griešanas ātrums un stingrāka pakāpe apvienojumā ar spēcīgāku griezējinstrumenta asmeni uzlabo stabilitāti. Daudzi instrumentu ražotāji (piem., Seco, Sandvik, Walter u.c.) ferīta un martensīta nerūsējošos tēraudus klasificē P

materiālu grupā, pamatojoties uz to apstrādes īpašību līdzību (to apstrādei būtu jāizvēlas instruments arī P grupas tēraudiem).

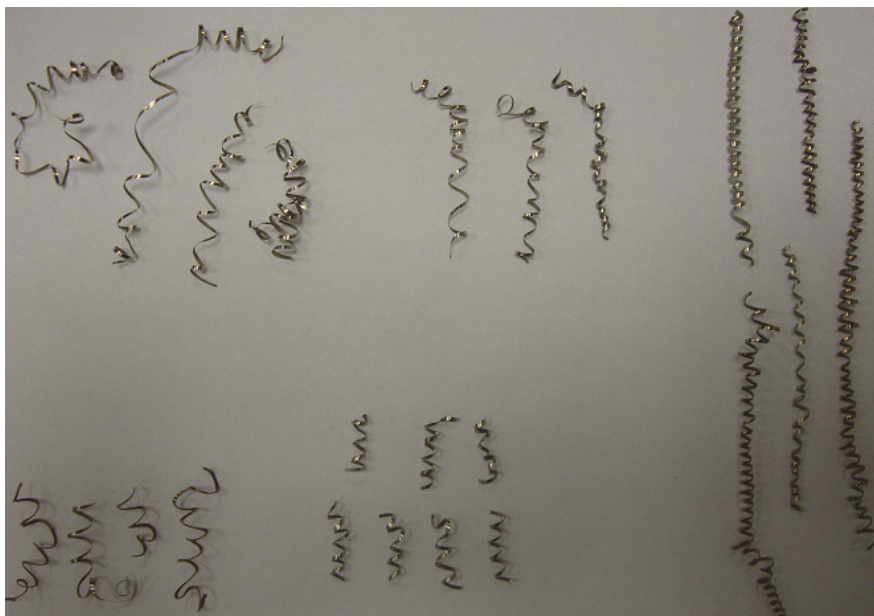
Ferīta un martensīta nerūsējošā tērauda parastais hroma saturs ir no 12 līdz 18%. Nelielos daudzumos ir arī citi legējošie elementi. Martensīta nerūsējošie tēraudi satur salīdzinoši lielu oglekļa daudzumu, kas ļauj tos sacietēt. To apstrādes procesā nodilums galvenokārt rodas aizmugurējā virsmā un retāk veidojas caurumi un nosēdumi.

Austenīta tēraudi (AISI 304) veido galveno nerūsējošā tērauda grupu. Visizplatītākais sastāvs ir 18% hroma un 8% niķeļa (piem. AISI 304).

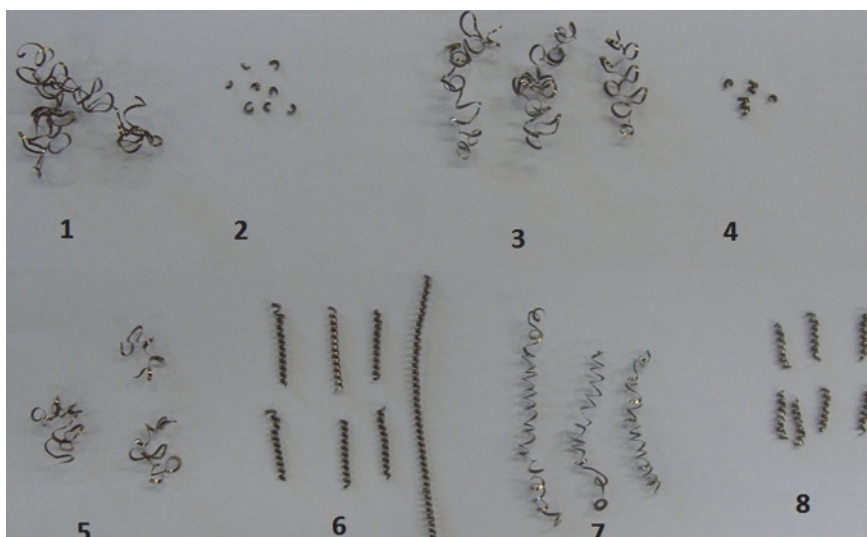
Apstrādes procesā rūdīšana palielina virsmas un skaidu cietību, kas savukārt noved pie iecirtumu veidošanās. Turklāt tas provocē adhēziju un rezultātā uzķepuma veidošanos. Relatīvā apstrādājamība ir 60%. Veicot apstrādi, skaida var atdalīties no griešanas malas, kā rezultātā var rasties šķelšanās un apstrādātās virsmas kvalitāte pasliktinās. Austenīta tēraudi rada spēcīgas un plūstošas skaidas, kas viegli neplīst. Sēra pievienošana var uzlabot apstrādājamību un tajā pašā laikā samazināt izturību pret koroziju. Palielinot griešanas dziļumu var uzlabot skaidu veidošanas procesu.



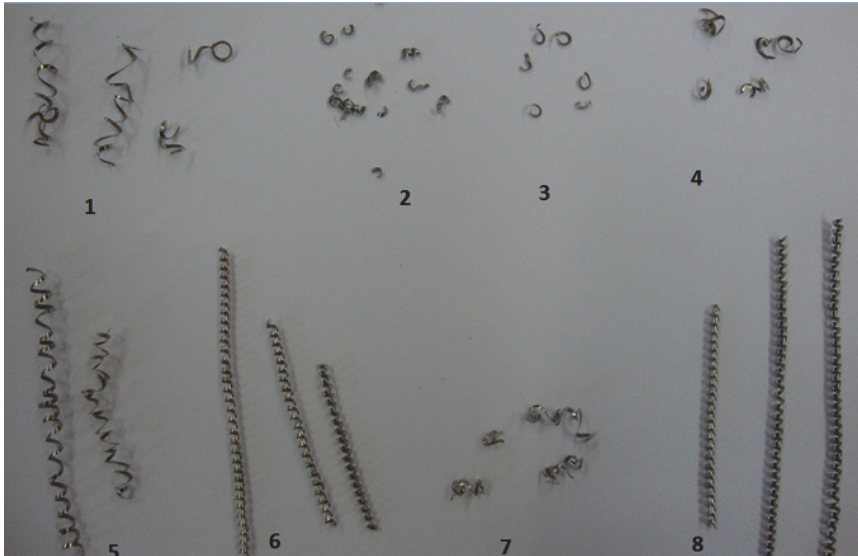
4.8.att. Skaidu veidi atkarība no griešanas parametru padeves (f) un griešanas dziļuma (a_p) [89].



4.9.att. Galvenie skaidu veidi, kas iegūti, veicot pirmo eksperimentu.



4.10.att. 420. nerūsējošā tērauda apvirpošanas ar Duratomic TM4000 pārklāto griezējinstrumentu rezultātā iegūtā skaida pie griešanas ātruma 150 m/min, ar cipariem parādīts eksperimenta plāna apstrādes režīmu kombinācijas Nr.



4.11.att. 304. nerūsējošā tērauda apvirpošanas ar Duratomic TM4000 pārklāto griezējinstrumentu rezultātā iegūtā skaida pie griešanas ātruma 150 m/min, ar cipariem parādīts eksperimenta plāna apstrādes režīmu kombinācijas Nr.

Pēc iegūtiem datiem, ir redzamas problēmas nerūsējošā tērauda apstrādē:

- viskozitāte (tipiska austenīta struktūras nerūsējošiem tēraudiem) - grūtības kontrolēt skaidu veidošanos procesu un īslaicīga uzķepuma veidošana uz griezējinstrumenta asmeņa, kas savukārt izraisa vibrācijas pie apstrādes ;
- zema siltumvadītspēja un augsta temperatūra griešanas zonā - instrumenta dzesēšanai ir nepieciešama efektīva dzesēšanas šķidrums padeves sistēma, pretējā gadījumā var rasties termiskas plaisas vai ir jāpielieto apstrādi pie zemākiem griešanas režīmiem, ir īpašas prasības attiecībā uz karstumizturību instrumentu materiāliem un pārklājumu veidiem;
- abrazīvais nodilums - karbīdu un intermetālisku savienojumu klātbūtne materiāla struktūrā izraisa palielinātu instrumentu nodilumu;
- skaidu laušana - īpaši svarīga ir skaidu laužēju izvēle, jeb griezējinstrumenta ģeometrijas pareizā izvēle, pārklājumu veidu uzklāšana uz instrumentu griešanas malām un uzklāšanas tehnoloģijas metode. Ir ļoti redzams, ka instrumenti, pārklāti ar klasisku, vecu tehnoloģiju, piem. TiN, kuriem nodilumizturīgo pārklājumu un to biezums ir ļoti mazs (3-5 μm) zaudē pēc rezultātiem mūsdienīgiem instrumentiem ar Duratomic pārklājuma tehnoloģiju.

4.3. Nodaļas kopsavilkums

Iepriekš minētie instrumentu nodiluma pētījumi norādīja uz to, ka:

- Jaunais instrumentu pārklājums ar Duratomic tehnoloģiju nodilumizturībai uzrādīja augstāku nodilumizturību salīdzinājumā ar citiem pārklājumu veidiem.
- Eksperimentālajā darbā sniegtā skaidu veidošanās procesa analīze parādīja, ka skaidu veidošanās ir atkarīga no sagataves materiāla struktūras, griezējinstrumenta ģeometrijas formas, griešanas dziļuma, griešanas ātruma un instrumenta pārklājuma.

SECINĀJUMI UN PIELIETOJUMS

1. **Izvirzītā hipotēze ir apstiprināta:** Pieņemot apvirpotās detaļas uzdoto virsmas raupjuma R_a vērtību, ir iespējams izveidot apvirpošanas procesa ar nodilumizturīgo Duratomic-tehnoloģiju pārklāto griezējinstrumentu modeļi, kas ļauj pēc uzdotā virsmas raupjuma izvēlēties tehnoloģiski sasniedzamos apstrādes režīmus: griešanas ātrumu, padevi vai griezējinstrumenta iestatīšanas leņķi.

Zinot nepieciešamo virsmas raupjumu ir iespējams precīzi iestatīt griešanas parametrus, tāds kā griešanas ātrums, padeve un griezējasmaņa iestatīšanas leņķis. Tas tika pierādīts ar konkrētiem instrumentu piemēriem un apstrādes režīmiem.

2. Izmantojot galīgo elementu metodi, kā arī metāla griešanas procesa simulācijai izstrādāto programmu "Third Wave Advantedge" tika modelēts un analizēts ar maksimālo ticamību tehnoloģiskais apvirpošanas apstrādes process, izmantojot jaunu griezējinstrumentu skaidu lauzēja ģeometriju, ņemot vērā tā pārklājuma slāņa biezumu un materiāla veidu un to kombināciju.

3. Pamatota griešanas instrumentu izvēles metodika, kas eksperimentāli pārbaudīta ar dažādiem griešanas ātrumiem un padevēm, nodrošinot stabilu griešanas procesu: konstantu griešanas spēku, temperatūru pieļaujamajā diapazonā, skaidu veidošanas un lūzuma procesu, kā arī stabilu apstrādāto virsmas raupjumu (R_a).

4. No n-faktora eksperimentu plāniem darbam ir izvēlēta trīs faktoru analīze, kas ļauj realizēt nepieciešamās eksperimenta vajadzības un izveidot jaunus apstrādātās virsmas modeļus.

5. Ir izstrādāti jaunie apstrādes procesa modeļi pielietojot paaugstinātas (no 25 % līdz 50%) griešanas ātruma vērtības.

6. Pielietojot lielākus griešanas ātrumus, bez dzesēšanas emulsijām, tika sasniegts lielākais kalpošanas laika variants ar Duratomic TM4000 pārklājumu (SECO), kurš ar 50% palielinātiem griešanas ātrumiem parādīja minimālu griezējasmaņa nodilumu, nodrošinot labu apstrādātas virsmas kvalitāti.

7. Apstrādes procesā tika pētītā dažādu griešanas instrumentu ģeometrijas ietekme uz apstrādājamās virsmas kvalitāti (rezultātā ir nodrošināts R_a bāzes parametriem līdzīgs diapazons no 3.0 līdz 10.0 μm).

8. Eksperimentu rezultātā konstatēts, ka pielietojot lielākas griešanas ātruma vērtības un mazākas padeves vērtības, var iegūt mazākas virsmas raupjuma (R_a) vērtības virpojot bez dzesēšanas emulsijas.
9. Veikti pētījumi par griešanas instrumenta galvenā iestatīšanas leņķa ietekmi uz griešanas spēku pieaugumu, virsmas raupjumu un griešanas instrumenta kalpošanas laiku. Secināts, ka optimālais iestatīšanas leņķis palielina instrumenta kalpošanas laiku par 30-45%.
10. Darbā ir salīdzināti divu nerūsējošā tērauda AISI420 un AISI304 apstrādes rezultāti un skaidu veidošanas process. Secināts, ka leģējošo elementu ietekmes dēļ, materiāliem notiek atšķirīgs skaidu veidošanās process.
11. Dažādu ražotāju instrumenti nenodrošina stabilu apstrādes procesu un skaidu veidošanas procesu pie palielinātiem apstrādes režīmiem.
12. Griešanas procesa laikā tika analizēti un modelēti pētījumi, kuros izmantotas variācijas ar griešanas leņķu kombinācijām (60° un 90°), vienlaikus ļaujot prognozēt griešanas spēku palielināšanu, izraisot lielākas vibrācijas, samazinot apstrādātās virsmas raupjumu un samazinot griezējinstrumentu kalpošanas laiku.
13. Nomodulētos rezultātus ir iespēja pielietot mūsdienu automatizētā ražošanas procesā jeb Industrija 4.0, lai iegūt uzdotās kvalitātes detaļas, pielietojot izstrādātos matemātiskos modeļus.

IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI

- [1] T. Atkins, Science and Engineering of Cutting - The Mechanics and Processes of Separating, Scratching and Puncturing Biomaterials, Metals and Non-Metals, Butterworth-Heinemann (2009) 432.
- [2] J. Paulo Davim (editor), Machining. Fundamentals and Recent Advances, London: Springer (2008) 361.
- [3] J. Paulo Davim, Modern Machining Technology. A practical guide, Woodhead Publishing, (2011), 412.
- [4] J. Paulo Davim, Machining of Hard Materials, Springer (2011) 538.
- [5] F. Klocke, Manufacturing Processes 1: Cutting, Springer-Verlag, Berlin (2011) 504.
- [6] A. L. Voroncov i dr., Razrabotka novoj teorii rezanija, Vestnik mashinostroenija (2008) #1- 12, 98.
- [7] P. I. Jashhericyn, M .L. Eremenko, E. Je. Fel'dshtejn, Teorija rezanija. Fizicheskie i teplovyje processy v tehnologicheskikh sistemah, Mn. Vysshaja shkola (1990) 512.
- [8] J. P. Davim, Mechanical and Industrial Engineering Historical Aspects and Future Directions, Materials Forming, Machining and Tribology, eBook, 2022, 65.
- [9] E. M. Trent, P. K. Wright, Metal Cutting. 4th Edition. – Boston: Butterworth–Heinemann (2000) 464.
- [10] R. A. Walsh, D. R. Cormier, McGraw-Hill Machining and Metalworking Handbook, 3rd ed. McGraw-Hill Professional (2006) 976.
- [11] I. Dzh. A. Armarego, R. H. Braun, Obrabotka metallov rezaniem, Per. s angl. V. A. Pastuhova - M.: Mashinostroenie (1977) 325.
- [12] O. I. Aver'janov, Rezhushhij instrument, M.: MGIU (2007) 144.
- [13] V. V. Evstifeev, M. S. Korytov, Obrabotka materialov rezaniem: metody, stanki, instrumenty, Omsk: SibADI (2012) 70.
- [14] Ju. M. Ermakov, Kompleksnyje sposoby jeffektivnoj obrabotki rezaniem, M.: Mashinostroenie (2005) 272.
- [15] V. I. Baranchikov, A. S. Tarapanov, G. A. Harlamov, Obrabotka special'nyh materialov v mashinostroenii, Mashinostroenie (2002) 264.
- [16] V. I. Baranchikov, A. V. Zharinov, N. V. Judina, A. I. Sadyhov, Progressivnyje rezhushhie instrumenty i rezhimy rezanija metallov, M., Mashinostroenie (1990) 400.

- [17] V. F. Bez"jazychnyj, I. N. Aver'janov, A. V. Kordjukov, Raschet rezhimov rezanija, Rybinsk: RGATA (2009) 185.
- [18] A. V. Bobrovskij, O. I. Drachev, A. V. Ryb'jakov, Rezanie cvetnyh metallov, SPb.: Politehnika (2001) 200.
- [19] S. A. Vasin, Prognozirovanie vibroustojchivosti instrumenta pri tochenii i frezerovanii, M: Mashinostroenie (2006) 384.
- [20] A. S. Vereshhaka, Rabotosposobnost' rezhushhego instrumenta s iznosostojkimi pokrytijami, M.: Mashinostroenie (1993) 336.
- [21] P. I. Jashhericyn, Osnovy rezanija materialov, Minsk: BGATU (2008) 644.
- [22] I. Jashhericyn, Teorija rezanija, 2-e izd., ispr. i dop. — Mn.: Novoe znanie (2006) 512.
- [23] E. M. Trent, P. K. Wright, Metal Cutting (4-th edition). Boston, Butterworth- Heinemann (2000).
- [24] V. P. Astakhov, S. Svetc, The assessment of plastic deformation in metal cutting: Journal of Materials Processing Technology 146 (2004) 193-202.
- [25] P. I. Jashericy, Teorija rezanija, 2-e izd., ispr. i dop. — Mn.: Novoe znanie (2006) 512.
- [26] Ju. N. Vivdenko, Rezanie metallov, Omsk: Izd-vo OmGTU (2006) 68.
- [27] D. V. Vinogradov, Vysokoproizvoditel'naja obrabotka metallov rezaniem, M.: Poligrafija (2003) 301.
- [28] Ju. N. Vnukov, A. A. Markov i dr., Nanesenie iznosostojkih pokrytij na bystrorezhushhij instrument, K.: "Tjehnika" (1992) 143.
- [29] P. R. Rodin, Metallorezhushhie instrumenty, 3-e izd, (1986) 455.
- [30] V. N. Nikiforovs. Metālu tehnoloģija un konstrukciju materiāli. Rīga, Zvaigzne 1984.g
- [31] N. A. Waterman, M. F. Ashby, "The material selector" second edition, volume 2 London, Chapman and Hall (1997) 724.
- [32] S. Kalpakjan, R. S. Schmid, „Manufacturing engineering and technology” Fifth edition. Upper saddle river, NY. Pearson Education inc. (2006) 1296.
- [33] J. F. Shackelford. Introduction to materials science for engineers, University of California, Davis - Eighth edition, Pearson 2015.
- [34] Vērdiņš G. Dukulis I.. Materiālu mācība , Jelgava 2008.
- [35] Ozoliņš J., Geriņš Ē., Muižnieks G. Inženiermateriālu īpašības un marķēšana. Rīga. 2008.
- [36] G. A. Vorob'eva i dr., Instrumental'nye materialy, SPb.: Politehnika (2005) 268.
- [37] G. A. Vorob'eva, E. E. Skladnova, A. F. Leonov, V. K. Erofeev. Instrumental'nye materialy, SPb.: Politehnika (2005) 268.

- [38] A. L. Vorontcov, Razrabotka novej teoriji rezanija, Vestnik mashinostroenija, 2008 №1- 12, 98.
- [39] A. M. Gil'man, Optimizacija rezhimov obrabotki na metallorezhushhijh stankah, Moskva, «Mashinostroenie» (1972) 188.
- [40] V. G. Greben', V. A. Gavrilov, Teplofizicheskie processy v tehnologicheskijh sistemah, Omsk, OmGTU (2008) 32.
- [41] Ja. L. Gurevich, Rezhimy rezanija trudnoobrabatyvaemyh materialov, 2- e izd., pererab. i dop. – L.: Mashinostroenie (1986) 240.
- [42] V. P. Zhed' i dr., Rezhushhie instrumenty, osnashhennye sverhtverdymi i keramicheskimi materialami, i ih primenenie, M.: Mashinostroenie (1987) 320.
- [43] Sandvik Coromant, Turning handbook, 2020, 53.p.
- [44] Ju. M. Zubarev, Sovremennye instrumental'nye materialy, Lan', (2008) 224.
- [45] B. I. Kalmin, M. S. Korytov, Fiziko-himicheskie processy pri obrabotke metallov rezaniem, Omsk: SibADI (2003) 109.
- [46] V. M. Kishurov, N. K. Krioni, Rezanie materialov. Rezhushhij instrument. 3-e izd., pererab i dop. -M.: Mashinostroenie (2009) 492.
- [47] K. S. Kolev, Voprosy tochnosti pri rezanii metallov, Moskva-Kiev, MASHGIZ, (1961) 134.
- [48] N. G. Neumoina, A. V. Belov, Teplovyje processy v tehnologicheskijh sistemah rezanija, VolgGTU, Volgograd (2006) 84.
- [49] Ju. S. Zvjagoľ'skij, V. G. Solonenko, A. G. Shirladze, Tehnologija proizvodstva rezhushhego instrumenta, M.: Vyssh. shk. (2010) 334.
- [50] ISO 513, <https://www.iso.org/standard/35207.html> skatīts 12.09.2020.
- [51] N. V. Novikov (red.) Instrumenty iz sverhtverdijh materialov, M.: Mashinostroenie (2005) 555.
- [52] K. L. Razumov-Razdolov, Sovershenstvovanie instrumental'nyh pokrytij, RITM, (2009) #2, 20-23.
- [53] G. Bunga, Ē. Geriņš, Apstrādes ar atdalīšanu tehnoloģija, RTU (2007) 85.
- [54] A. V. Cirkin, M. Ju. Smirnov, Fizicheskie osnovy processa rezanija i iznashivanija rezhushhego instrumenta s iznosostojkimi pokrytijami, Ul'janovsk: UIGTU (2007) 30.
- [55] V. K. Starkov, Obrabotka rezaniem, Upravlenie stabil'nost'ju i kachestvom v avtomatizirovannom proizvodstve, M. Mashinostroenie (1989) 296.
- [56] R. Kiffer, F. Benezovskin, Tverdye splavy. Tulkojums no vācu valodas, M.: Metallurgija (1971) 392.
- [57] A. D. Makarov, Optimizacija processov rezanija, Moskva: Mashinostroenie (1976) 278.

- [58] W. Bouzid, Cutting parameter optimization to minimize production time in high speed turning: *Journal of Materials Processing Technology* 161 (2005) 388 - 395.
- [59] Vysokoskorostnaja i Vysokoproizvoditel'naja obrabotka, Samara, SGAU (2010) 88.
- [60] Seco, Duratomic® - General Turning Inserts , <https://www.secotools.com/article/672> , skatīts 6.09.2020.
- [61] Duratomic technology from Seco, <https://www.machinery.co.uk/content/features/changing-the-game-again> , skatīts 6.09.2020
- [62] V. A. Zhilin, Subatomnyj mehanizm iznosa rezhushhego instrumenta, Izdatel'stvo Rostovskogo universiteta (1973) 168.
- [63] Ja. L. Liberman, Diagnostika sostojanija rezhushhego instrumenta, Ekaterinburg: (2007) 76.
- [64] T. N. Loladze, Prochnost' i iznosostojkost' rezhushhego instrumenta, M.: Mashinostroenie (1982) 320.
- [65] A. D. Makarov, Iznos i stojkost' rezhushhih instrumentov, M.: Mashinostroenie (1966) 264.
- [66] A. D. Makarov, Iznos instrumenta, kachestvo i dolgovechnost' detalej iz aviacionnyh materialov, Ufa: Ufimskij aviacionnyj institut im. Ordzhonikidze (1974) 372.
- [67] V. A. Ostaf'ev, V. S. Antonjuk, G. S. Tymchik, Diagnostika processa metalloobrabotki, K.: Tjehnika (1991) 152.
- [68] S. I. Petrushin, Osnovy formoobrazovanija rezaniem lezviynymi instrumentami, Tomsk: Izd. TGU (2003) 172.
- [69] Ju. V. Poljanskov, V. P. Tabakov, A. P. Tamarov, Tehnologicheskie metody povyshenija iznosostojkosti rezhushhego instrumenta i detalej mashin, Ul'janovsk: UIGU (1999) 69.
- [70] E. Je. Fel'dshtejn, M. A. Kornievich, Metallorzhushhie instrumenty, Spravochnik konstruktora, Minsk: Novoe znanie (2009) 1039.
- [71] D. G. Evseev, A. Ju. Popov, Izmerenie sil rezanija pri tokarnoj obrabotke, Moskva (2006) 34.
- [72] Y. Yung – Chang, S. Jorg, L. Blaine, A. Taylan, Estimation of tool wear in orthogonal cutting using the finite element analysis: *Journal of Materials Processing Technology* 146 (2004) 82 - 91.
- [73] N. Liu, Y. D. Xu, H. Li, M. H. Chen, J. Zhou, F. Xie, H. D. Yang, Cutting and wearing characteristics of TiC – based cermets cutters with nano – TiN addition: *Journal of Materials Processing Technology* 161 (2005) 478 - 484.

- [74] S. I. Pestrecov, Komp'juternoe modelirovanie i optimizacija processov rezanija, TambGTU (2009) 104.
- [75] S. I. Jares'ko, Rezul'taty modelirovanija processa rezanija uprochnennym instrumentom, Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk, t. 8, #2 (2006) 445-457.
- [76] G.K. Korendyasev, ON THE FINITE-ELEMENT MODELING OF THE PROCESS OF METAL CUTTING. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Moscow, Russia , № 2 (90), 2015 , 14-24 p.
- [77] Y. Dogu, E. Aslan, N. Camuscu, A numerical model to determine temperature distribution in orthogonal metal cutting: Journal of Materials Processing Technology 171 (2006) 1 - 9.
- [78] Y. Yung – Chang, J. Anurag Jain, A. Taylan, A finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries: Journal of Materials Processing Technology 146 (2004) 72 - 81.
- [79] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, Finite Element Method: Volume 2, Fifth Edition. Butterworth-Heinemann (2000) 459.
- [80] T. M. El-Hossainy; M. H. El-Shazly; M. Abd-Rabou, finite element simulation of metal cutting considering chip behavior and temperature distribution, Materials and Manufacturing Processes, 1532-2475, Volume 16, Issue 6 (2002) 803 – 814.
- [81] S. S. Rao, The finite element method in engineering. Edition 5. Butterworth-Heinemann (2005) 663 .
- [82] C. Kiliçaslan, Modelling and simulation of metal cutting by finite element method, A Thesis Submitted to the Graduate School of Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology.2009.
- [83] A. Attanasio, E. Ceretti, S. Rizzuti, D. Umbrello, F. Micari, 3D Finite Element Analysis of Tool Wear in Machining. CIRP Annals Manufacturing Technology 57 (2008) 61-64.
- [84] H. Bil, S. E. Kilic, A. E. Tekkaya, A Comparison of Orthogonal Cutting Data from Experiments with Three Different Finite Element Models, International Journal of Machine Tools and Manufacturing 44 (2004) 933-944.
- [85] G. Boothroyd, Fundamentals of Machining and Machine Tools, Washington: Scripta Book Company (1981).

- [86] E. Ceretti, P. Fallbohmer, W. T. Wu, T. Altan, Application of 2D FEM to Chip Formation in Orthogonal Metal Cutting. *Journal of Materials and Processing Technology* 59 (1996) 169-180.
- [87] T. R. Chandrupatla, A. D. Belegundu, *Introduction to Finite Element in Engineering*, New Jersey: Prentice-Hall (2002).
- [88] C. Shet, X. Deng, finite element analysis of the orthogonal metal cutting process, *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier Science Publishing Company, Inc. (2000) 95-109.
- [89] CATALOG & TECHNICAL GUIDE 2022.2 , SECO TOOLS AB, 1050 p. 2022.
- [90] V. V. Nalimov, T.I. Goshkova, *Logicheskie osnovanija planirovanija jeksperimenta*, 2-e izd, M. Metallurgija (1980) 152.
- [91] K. Djenijel, *Primenenie statistiki v promyshlennom jeksperimente pod redakciej kand teh nauk Je K Leckogo*, M. Mir (1979) 293.
- [92] V. M. Bashkov, P. P. Kacev, *Ispytanie rezhushhego instrumenta na stojkost'*, M., Mashinostroenie (1985) 135.
- [93] Je. A. Gornopol'skaja, *Metallokeramicheskie tverdye splavy (obzor inostrannyh patentov)*, M.: CNIIFI (1984) 31.
- [94] M. N. Stepnov, *Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mehanicheskikh ispytanij: Spravochnik*. Moskva, Mashinostroenie (1985) 232.
- [95] Ju. P. Adler, E. V. Makarova, *Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij*, izd. 2-e pererab i dop. Moskva, Nauka (1976) 278.
- [96] S. M. Ermakov, *Matematicheskaja teorija planirovanija jeksperimenta*, Moskva, Nauka (1983) 392.
- [97] V. A. Trudonoshin, N. V. Pivovarova, *Matematicheskie modeli tehniceskikh ob"ektov*, Minsk, Vyshejnaja shkola (1988) 158.
- [98] I. S. Solonin, *Matematicheskaja statistika v tehnologii mashinostroenija*, Moskva, Mashinostroenie (1972) 216.
- [99] V. M. Bashkov, P. G. Kacev, *Testing the cutting instrument for durability*. M. Machine building (1985).
- [100] P. G. Kacev, *Statisticheskie metody issledovanija rezhushhego instrumenta*, M.: Mashinostroenie (1974) 231.



Viktors Gutakovskis dzimis 1983. gadā Daugavpilī. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis bakalaura grādu inženierzinātnēs (2006) un maģistra grādu mehānikā un mašīnzinātnē (2008). Strādājis metāla konstrukciju ražošanas uzņēmuma SIA "BALTMET" par inženieri un SIA „*Centre Composite LNK*” par lidaparātu detaļu slogojuma testēšanas un modelēšanas inženieri, darbā izmantojot galīgo elementu metodi.

Kopš 2008. gada strādā RTU Transporta un mašīnzinību (kopš 2015 – Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātes, MTAF) Mehānikas (kopš 2018 – Mehānikas un mašīnbūves, MMI) institūta MAT katedrā, ieņemot pētnieka amatu. Patlaban ir MTAF MMI Mašīnbūves un mehatronikas katedras pētnieks. Pedagoģiskais darbs saistīts ar griešanas teoriju, mašīnbūves tehnoloģiju un CNC tematikas priekšmetu docēšanu. Zinātniskās intereses saistītas ar materiālu apstrādi ar griešanu, materiālzinātnei un aditīvām tehnoloģijām.