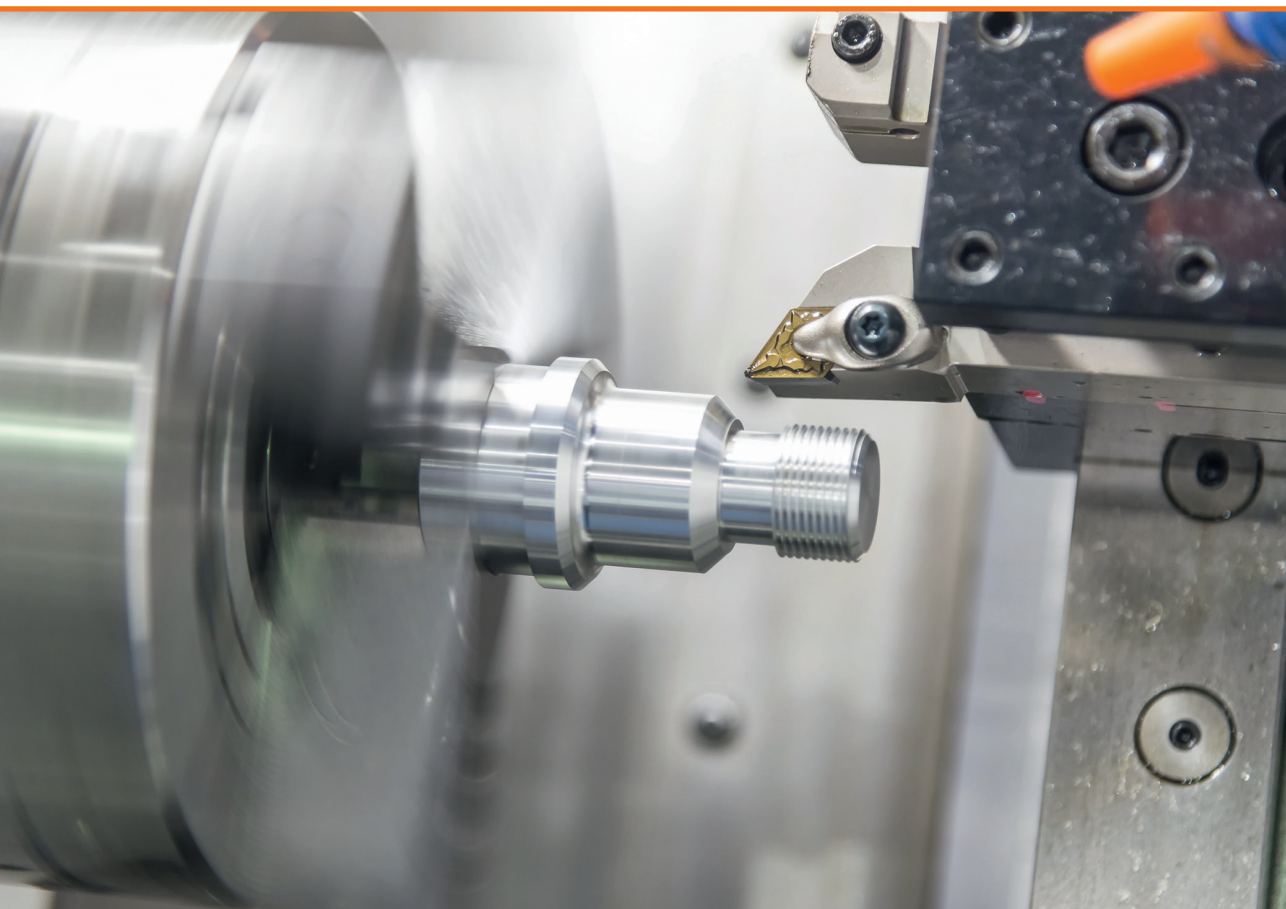


**Viktors Gutakovskis**

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

Promocijas darba kopsavilkums



# 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

Mašīnbūves un mehānikas nozare  
Mašīnbūves tehnoloģijas apakšnozare

### Promocijas darba kopsavilkums

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

Zinātniskais konsultants  
profesors

*Dr. sc. ing.* J. RUDZĪTIS

RTU Izdevniecība  
Rīga 2023

Gutakovskis V. Nerūsējošā tērauda apvirpošanas procesa precizitāte atkarībā no Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano pārklāta griezējinstrumenta nodiluma. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU, 2023. 42 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-16” 2022. gada 29. jūnija lēmumu, protokols Nr. 4.

Promocijas darbs izstrādāts Eiropas Sociāla fonda projektā “Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.

<https://doi.org/10.7250/9789934228735>  
ISBN 978-9934-22-873-5 (pdf)

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2023.gada 22. februārī plkst. 16.00 Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B, 417. auditorijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Aleksejs Kataševs,  
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesore *Dr. sc. ing.* Regita Bendikiene,  
Kauņas Tehnoloģiju universitāte, Lietuva

Profesors *Dr. sc. ing.* Tauno Otto,  
Tallinas Tehnoloģiju universitāte, Igaunija

## APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Viktors Gutakovskis..... (paraksts)

Datums:.....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 66 zīmējumi un ilustrācijas, kopā 130 lappuses. Literatūras sarakstā ir 100 nosaukumu.

## Saturs

|  |           |
|--|-----------|
| PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS .....                                | 5         |
| Tēmas aktualitāte .....  | 5         |
| Darba mērķis un uzdevumi .....   | 6         |
| Pētījuma metodes .....   | 7         |
| Zinātniskā novitāte .....  | 7         |
| Aizstāvēšanai izvirzītās pētījuma tēzes .....                                | 8         |
| Praktiskais lietojums .....  | 9         |
| Darba aprobācija .....   | 9         |
| Publikācijas .....   | 10        |
| <b>1. nodaļa. INFORMĀCIJAS AVOTU APSKATS .....</b>                           | <b>12</b> |
| 1.1. Griešanas procesa raksturojums un novērtējums.....                      | 12        |
| 1.2. Cietsakausējuma griezējinstrumentu attīstības tendences .....           | 13        |
| 1.3. Instrumentālie metālkeramiskie cietsakausējumi. ....                    | 13        |
| <b>2. nodaļa. GRIEŠANAS PROCESA MATEMĀTISKĀ MODELĒŠĀNA .....</b>             | <b>16</b> |
| 2.1. Galīgo elementu metodes .....   | 16        |
| 2.2. Apstrādes procesa, griešanas temperatūras un spēku simulācija.....      | 16        |
| 2.3. Galīgo elementu metodes lietošana apvirpošanas procesa modelēšanā ..... | 16        |
| <b>3. nodaļa. NERŪSĒJOŠĀ TĒRAUDA APVIRPOŠANAS PROCESA</b>                    |           |
| <b>EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI .....</b>  | <b>20</b> |
| 3.1. Griezējinstrumenta ģeometrijas izvēle eksperimentālajos pētījumos.....  | 20        |
| 3.2. Vairāku faktoru eksperimenta iespēju analīze .....                      | 22        |
| 3.3. Eksperimentāla modeļa izstrāde virpošanā.....                           | 22        |
| 3.4. Objekta matemātiskā modeļa noteikšana.....                              | 24        |
| 3.5. Apvirpotas virsmas raupjuma veidošanās un analīze .....                 | 30        |
| 3.6. Instrumenta izdiluma eksperimentālie pētījumi.....                      | 33        |
| <b>SECINĀJUMI UN LIETOJUMS .....</b>   | <b>37</b> |
| <b>IZMANTOTIE INFORMĀCIJAS AVOTI .....</b>                                   | <b>39</b> |

## PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

### Tēmas aktualitāte

Līdz ar nerūsējošā tērauda lietošanas pieaugumu pasaulē, jaunu apstrādes tehnoloģiju un instrumentu izmantošanu, kā arī griezējinstrumentu materiālu un pārklājumu attīstību ir kļuvusi aktuāla dilšanas un temperatūras lauku sadalījuma izpēte un prognozēšana. Svarīga ir apstrādes procesa režīmu pētīšana un to ietekme uz galarezultātu. Nerūsējošais tērauds ir stigrs un grūti apstrādājams materiāls un satur vairākus leģējošos elementus, un tas savukārt aprūtinā apstrādi un rada nozīmīgas neērtības skaidu veidošanas procesā (skaida jāsalaūz, jāsavērpj), jo šie leģējošie elementi palielina tērauda plasticitāti, cietību, kas savukārt rada grūtības apstrādei ar griešanu. Rezultātā tiek iegūtas plūstošas skaidas, kas nav pieļaujams mūsdienīgā automatizētā lielu detaļu sēriju ražošanā, līdz ar to var secināt, ka ir ļoti aktuāla skaidu veidošanās procesa pētīšana. Viena no problēmām ir tā, ka vienas grupas materiālam paredzētie dažādu ražotāju instrumenti sniedz atšķirīgu apvirpotās virsmas kvalitāti. Virpošanas procesā tādu faktoru kā dažādu sagataves materiāla struktūras ietekme var radīt nederīgu apstrādes rezultātu. Šajā gadījumā tika salīdzināts *AISI 304* un *AISI 420* markas nerūsējošais tērauds ar martensīta un austenīta struktūru. Pirmo reizi ar *Duratonic* tehnoloģiju nodilumizturīgais nano pārklājums ir pētīts palielinātā griešanas ātrumā un citos mainīgos apstrādes režīmos, kas parasti ietekmē apstrādes rezultātu. Šo pārklājumu raksturo augstāka nodilumizturība.

Šajā darbā pētīti galvenie apstrādes procesa elementi – skaidu veidošanās process, temperatūras lauka sadalījums griešanas instrumenta asmenī, vibrācijas un instrumenta nodilums. Šie elementi kopā ar materiāla struktūru atšķirību atstāj nopietnu ietekmi uz apvirpošanas procesa rezultātu. Apvirpošanas procesa matemātiskais modelis (vienādojums) vairākiem apstrādes režīmiem un materiāliem ir izstrādāts ar n-faktora eksperimentu palīdzību.

Veiktajos eksperimentos ir labi redzami rezultāti, kas attēlo griešanas režīmu ietekmi uz galarezultātu. Tāpat ir noskaidrots, ka dažādu ražotāju instrumenti, kas domāti identiskam apstrādes operācijām, nenodrošina vajadzīgo apstrādātas virsmas rezultātu. Aktuāla problēma ir analogisku instrumentu ietekme uz apstrādes procesu un apstrādātas virsmas pētīšana un uzlabošana. Līdz ar to izvēlētā promocijas darba tēma ir aktuāla.

## Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba “Nerūsējošā tērauda apvirpošanas procesa precizitāte atkarībā no  $Al_2O_3$  nano pārklāta griezējinstrumenta nodiluma” mērķis ir 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 *AISI 420* un *AISI 304* – ferīta un martensīta struktūras apstrādājamības apvirpošanas rezultātu – virsmas raupjuma parametru  $R_a$ , lietojot ar *Duratomic* tehnoloģiju pārklātus jaunus griezējinstrumentus, salīdzināt to līdz šīm lietotajiem instrumentiem un izstrādāt apstrādātas virsmas raupjuma  $R_a$  noteikšanas matemātisko modeli.

### Promocijas darba mērķa sasniegšanai ir noteikti šādi uzdevumi:

- veikt izvēlētās apstrādes tehnoloģijas un lietojamo instrumentu vispusīgu analīzi;
- veikt apvirpošanas procesa eksperimentus un rezultātu analīzi, noskaidrojot apvirpotās virsmas raupjuma  $R_a$  atkarību no apstrādes režīmiem: palielinātā griešanas ātruma, griezējinstrumenta padeves un griezējasmaņa iestatīšanas leņķa;
- salīdzināt divu nerūsējošā tērauda marku *AISI 420* un *AISI 304* 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 tērauda marku *AISI 420* un *AISI 304* sagataves palielinātā griešanas ātrumā;
- veikt instrumenta nodiluma mehānisma analīzi, lietojot dažādas apstrādes režīmu kombinācijas;
- veikt skaidu veidošanās procesa analīzi, izmantojot palielinātu griešanas ātrumu.

### Hipotēze

Pieņemot apvirpotās detaļas iestatīto virsmas raupjuma  $R_a$  vērtību, ir iespējams izveidot apvirpošanas procesa ar nodilumizturīgo *Duratomic* tehnoloģiju pārklāto griezējinstrumentu

modeļi, kas ļauj pēc iestatītā virsmas raupjuma izvēlēties tehnoloģiski sasniedzamos apstrādes režīmus: griešanas ātrumu, padevi vai griezējinstrumenta iestatīšanas leņķi.

## **Pētījuma metodes**

Lai sasniegtu promocijas darba mērķi un izpildītu uzdevumus, darba izstrādes gaitā lietotas šādas pētījumu metodes: pirms praktiskā eksperimenta tiek īstenota apvirpošanas procesa simulācija, izmantojot galīgo elementu metodes analīze jeb GEM (angļu val. *FEM – Finite Element Method*). Lai realizētu eksperimentālo daļu, tika izmantota virpa, *AISI 304* nerūsējošā tērauda sagatave ar austenīta un *AISI 420* nerūsējošā tērauda sagatave ar martensīta struktūru. Tika izmantoti *SECO*, *Walter*, *Sumitomo* un *Kennametal* jaunie griezējinstrumenti, ko raksturo plašs lietošanas apgabals dažādu nerūsējošā tērauda markām un struktūrām. Praktiskā eksperimentā iegūto apstrādāto virsmas raupjuma profila  $R_a$  vērtības rezultātu datu apstrāde tika izpildīta datorizēti, realizējot trīs faktoru eksperimenta plānu.

## **Lietotais 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 Ālto Universitāti, Somija, izmantojot programmu *Third Wave Advantedge*, kurā, izmantojot GEM, divām tērauda markām tika modelēts apvirpošanas process dažādās apstrādes režīmu kombinācijās.

## **Zinātniskā novitāte**

Pirmo reizi:

- 1) izpētīta nerūsējošā tērauda apvirpošanas procesa precizitāte atkarībā no ar  $Al_2O_3$  nano pārklāta griezējinstrumentu nodiluma;
- 2) izveidots skaitliski modelēts *AISI 304* un *AISI 420* nerūsējošā tērauda apvirpošanas process, veicot apstrādi ar palielinātu griešanas ātrumu bez dzesēšanas, izveidojot precīzu griezējinstrumentu skaidu lauzēja ģeometriju, lietojot 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 ;

- 3) noteikta apvirpošanas procesā apstrādātas virsmas raupjuma  $R_a$  vērtību atkarība no apstrādes režīmiem – griešanas ātruma, padeves, iestatīšanas leņķa un instrumenta nodiluma;
- 4) izstrādāti vairāki apvirpošanas procesu raksturojoši apstrādes režīmu prognozēšanas matemātiskie modeļi, kas ļauj pēc iestatītā virsmas raupjuma ( $R_a$ ) izvēlēties tehnoloģiskus apstrādes režīmus: griešanas ātrumu, padevi vai griezējinstrumenta iestatīšanas leņķi divām nerūsējošā tērauda AISI 304 AISI 420 markām – *AISI 304* un *AISI 420* – ar dažādu struktūru;
- 5) izmantojot modeļus, parādīts, kā mainās apstrādes procesa matemātiskais modelis atkarībā no griešanas ātruma palielinājuma.

#### **Aizstāvēšanai izvirzītās pētījuma tēzes**

- 1) Nerūsējošā tērauda apvirpošanas procesa precizitātes izpētes rezultāti atkarībā no ar  $Al_2O_3$  nano pārklāta griezējinstrumentu nodiluma.
- 2) Izveidots skaitliski modelēts *AISI 304* un *AISI 420* markas nerūsējošā tērauda apvirpošanas process, veicot apstrādi palielinātā griešanas ātrumā bez dzesēšanas, izveidojot precīzu griezējinstrumentu skaidu lauzēja ģeometriju, lietojot jaunu galīgo elementu metodes analīzes programmatūru *Third Wave Advantedge*, ņemot vērā griezējinstrumentu pārklājumu biežumu un to kombinācijas. Noteikts, ka griešanas temperatūras vērtības ir diapazonā no minimālās – 700 °C līdz maksimālai – 1150 °C bez dzesēšanas emulsijas, kā arī izpētīts griešanas temperatūras lauka sadalījums griezošā zonā un instrumentā ;
- 3) Apvirpošanas procesā apstrādātas virsmas raupjuma  $R_a$  vērtību atkarība no apstrādes režīmiem – griešanas ātruma, padeves, iestatīšanas leņķa un instrumenta nodiluma.
- 4) Vairāki apvirpošanas procesu raksturojoši apstrādes režīmu prognozēšanas matemātiskie modeļi, kas pēc iestatītā virsmas raupjuma ( $R_a$ ) ļauj izvēlēties tehnoloģiskos apstrādes

režīmus: griešanas ātrumu, padevi vai griezējinstrumenta iestatīšanas leņķi divām nerūsējošā tērauda *AISI 304* un *AISI 420* markām ar dažādu struktūru.

- 5) Izmantojot modeļus, tika parādīts, kā mainās apstrādes procesa matemātiskais modelis atkarībā no griešanas ātruma palielinājuma.

## **Praktiskais lietojums**

Pētījuma rezultāti ir nepieciešami “*Seco Tools AB*” instrumentu ražotāju vajadzībām un šīs kompānijas vietējiem pārstāvjiem.

Ekspimentālie dati tiek izmantoti vairāku zinātnieku publikācijās un promocijas darbu izstrādē, (par to liecina citēšanas dati).

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

Darba rezultātus var izmantot nākamās paaudzes instrumentu un tehnoloģisko procesu izstrādē, attīstoties ražošanas procesam “Industrija 4.0” ietvaros, lietojot adaptīvo ciparvadības apstrādes procesu monitoringu, nolasot apstrādātas virsmas vērtības un veicot korekcijas, lai to uzlabotu, lietojot matemātisko modeli.

Promocijas darba izstrādes laikā zinātniskie raksti tiek izmantoti vairāku zinātnieku publikācijās un promocijas darbu izstrādē.

## **Darba aprobācija**

Par promocijas darba galvenajiem rezultātiem sniegti ziņojumi vairākās konferencēs.

- 1) 6-th ICCSM International Congress of Croatian Society of Mechanics, 30 Sept.–2 Oct, Dubrovnik, Croatia. 2009.
- 2) 7-th International DAAAM Baltic Conference “INDUSTRIAL ENGINEERING” 22–24 April 2010, Tallinn.
- 3) “16<sup>th</sup> International Conference “Mechanika-2011”, 6–9 April 2011, Lithuania, Kaunas, KTU.
- 4) 10-th international conference VIBROENGINEERING – 2011, 13–14 October, Kaunas, Lithuania.

- 5) 8-th International DAAAM Baltic Conference “INDUSTRIAL ENGINEERING” 19–21 April 2012, Tallinn.
- 6) “17-th International Conference “Mechanika-2012”, 7–8 April 2012, Lithuania, Kaunas, KTU.
- 7) 9-th International DAAAM Baltic Conference “INDUSTRIAL ENGINEERING” 24–26 April 2014, Tallinn, ESTONIA.
- 8) 12-th International Conference “Mechatronic Systems and Materials 2016” , Bialystok, Poland.
- 9) “17-th International Conference “Mechanika-2019”, 7–8 April 2012, Lithuania, Kaunas, KTU.
- 10) Industrial Engineering-2019, 7–8 April 2012, Lithuania, Kaunas, KTU.
- 11) 28-th International Baltic Conference, MATERIALS ENGINEERING AND MODERN MANUFACTURING 2020, 22–23 October, 2020, Kaunas, Lithuania.
- 12) 32-nd DAAAM International Symposium, 28–29th October 2021, Vienna, Austria.
- 13) APMAS 2021, 11-th INTERNATIONAL ADVANCES IN APPLIED PHYSICS & MATERIALS. OCTOBER 17–23, 2021, Turkey.
- 14) 21-st International Scientific Conference Engineering for Rural Development, 25.–27.05.2022. Jelgava, Latvia.

### **Publikācijas**

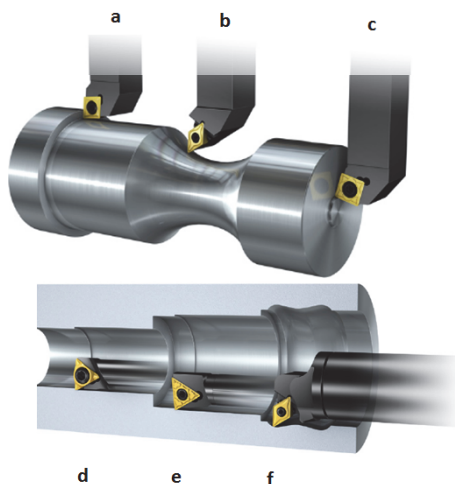
- 1) Gutakovskis V., Bunga G., “TURNING WITH HIGH FEEDING”, Proceedings of the 2009 6-th ICCSM International Congress of Croatian Society of Mechanics ISBN 978-953-7539-11-5, Book of abstracts, 156 p, 2009.
- 2) Gutakovskis V., Bunga G., Niemi E., Laakso S., “FINITE ELEMENT METHOD MODELING OF THE STAINLESS STEEL CUTTING PROCESS USING DIFFERENT MACHINING PARAMETERS” RTU ZINĀTNISKIE RAKSTI, TMF, 6. sērija, 31. sējums RTU izdevniecība 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. Rudzītis, 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., Štekleins, 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. nodaļa. INFORMĀCIJAS AVOTU APSKATS

### 1.1. Griešanas procesa raksturojums un novērtējums

Mūsdienās pastāv daudz apvirpošanas operāciju ārējo un iekšējo virsmu tipu, piemēram, parastās cilindriskās virsmas apvirpošana (1. a att.), kāda sarežģīta profila veidošana (izpildāms tikai uz CNC darbgaldiem; 1. b att.), sagataves apvirpošana no malas, (1. c att.), dziļa iekšēja izpirpošana (1. d att.), parasta iekšēja izvirpošana (1. e att.), iekšēja sarežģīta profila izvirpošana (1. f att.). Visas šīs operācijas vieno griezējinstrumenta – mobila (ātrmaināma) plāksnīte ar speciālu ģeometriju un nodilumizturīgu pārklājumu atbilstoši materiālu grupai – un turētājs, kas nodrošina konkrētu griešanas asmeņa leņķi. Katra no griezējinstrumenta ģeometrijām nodrošina stabilu, augstražīgu apstrādes procesu, pateicoties stabilam skaidu formēšanas procesam (2. att.) konkrētajā apstrādes parametru apgabalā (3. att.). Gadījumā, ja šis process nav stabils, var rasties nopietnas problēmas, sākot no apstrādātās virsmas kvalitātes pasliktināšanās līdz pat darbgalda bojājumam.



1. att. Griešanas operāciju veidi uz virpas [20].



2. att. *SECO* mobilo griezējplāksnīšu formas un skaidu laužēju tipi [22].

Mūsdienās līdz ar tehnoloģisko procesu attīstās arī datorizēta jeb simulācijas pētīšana. Ar katru gadu tā kļūst arvien precīzāka. Līdz šim, lai precizētu modelēšanas rezultātus, vajadzēja veikt praktisku eksperimentu vismaz dažos kontrolpunktos, lai salīdzinātu iegūtos datus un uzzinātu,

kāda ir neprecizitāte modelēšanā ar datoru. Tagad pat sarežģīto metālapstrādes procesa pētīšanu iespējams veikt, pateicoties dažādām programmām: *Ansys*, *Abaqus*, *ADINA*, *Ls-Dyna*, *CosmosWorks*, *Third Wave Advantedge*. Viss balstās uz parastiem galīgo elementu modeļiem, ko izstrādāja daudzi pētnieki. Mūsdienās, pateicoties dažādām programmām, procesu simulatīva modelēšana ieņem arvien nozīmīgāku vietu projektēšanā un salīdzinošajā pētījumā, kad pirms praktiskā eksperimenta veic modelēšanu un prognozē rezultātus, kas var tikt iegūti eksperimentāli, vai iegūt datus, ko grūti izmērīt, tieši veicot praktisko eksperimentu. Lai palielinātu ražošanu un apstrādāto virsmas kvalitāti, vairāki zinātnieki visā pasaulē veic daudz pētījumu, piemēram *V. P. Astachov* [18], *A. V. Sharma* [19] un citi. Tomēr visi šie pētnieki veic gan simulācijas, gan praktiskos eksperimentus vai nu ar parastiem, jau sen lietotiem griezējinstrumentiem un materiāliem, vai nu viegli apstrādājamiem materiāliem, kas jau tiek plaši lietoti ražošanā, vai pēta grūti apstrādājamus titāna un citu piemaisījumu karstumizturīgos materiālus un to skaidu laušanas procesu [1–17]. Par nerūsējošā tērauda apstrādi ar jauniem griezējinstrumentiem un jaunām modelēšanas programmām (šajā gadījumā – *Third Wave Advantedge*) līdz šim nekas nav publicēts.

## **1.2. Cietsakausējuma griezējinstrumentu attīstības tendences**

Apskatot citu instrumentu ražotāju attīstības tendences, ir redzams, ka vairākums no tiem izmanto klasisko pārklājumu veidus. To nosaka gan tehnoloģiskie parametri, gan darbmašīnu iespējas. Patlaban metālapstrādes jomā tiek izmantotas klasiskās metodes – lieto TiC un Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pārklātus instrumentus un dzesēšanas emulsiju, nepārsniedzot klasiskos apstrādes parametrus. Analizējot situāciju, var secināt, ka tuvāko gadu laikā kļūs aktuāla jaunāko nodilumizturīgu griezējinstrumentu pārklājumu attīstība un palielināsies apstrādes parametru lietojums, lai palielinātu ražotspējas.

## **1.3. Instrumentālie metālkeramiskie cietsakausējumi un to pārklājumi**

Cietsakausējumus lieto vairāk nekā 40 % gadījumu no visiem instrumentu materiāliem.

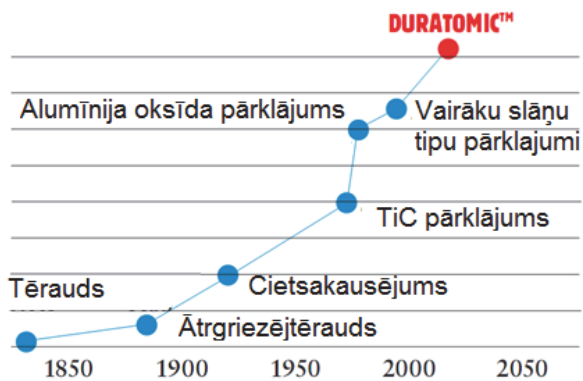
Saskaņā ar *ISO 513* priekšrakstiem metālkeramiskos cietsakausējumus iedala sešās grupās (P, M, K, N, S un H) atkarībā no tā, kā sagataves materiāls pretojas apstrādei un kāda veida skaida rodas apstrādes gaitā. M grupas materiālu apstrādes cietsakausējumus lieto nerūsējošo tēraudu un to lējumu apstrādei, kad apstrādē veidojas plūstoša skaida. Jo lielāks ir skaitlis aiz attiecīgās grupas burta cietsakausējuma apzīmējumā, jo mazāka ir tā noturība, bet lielāka stigrība. Lai uzlabotu

cietsakausējumu griešanas spēju un samazinātu berzi, uz to virsmas vakuumā ar *PVD* (*Physical vapour deposition*) metodi, t. i., fizikāli ar jonu triecieniem pie 500 °C nogulsnē plānu materiāla plazmas iztvaicējumu. Retāk lieto *CVD* (*Chemical vapour deposition*) metodi, t. i., veicot ķīmiski termisko nogulsnēšanu pie 900 °C materiāla iztvaicējuma. Līdz ar to uz cietsakausējuma virsmas veido cietus un nodilumizturīgus trīs līdz piecu slāņu nanopārklājumus ar kristalīnu izmēriem ap 5–10 nm. Nanopārklājumu kopējais slāņa biezums sasniedz 3–10 μm, 87 % gadījumos to veido no TiN. Stingru materiālu, piemēram, leģētā tērauda apstrādei uz cietsakausējuma virsmas veido TiN (2200 HV) nanopārklājumu. Nerūsējošā tērauda apstrādei uz cietsakausējuma virskārtas ar *CVD* metodi veido Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2500 HV) nanopārklājumu. Rūdīta tērauda apstrādei uz cietsakausējuma virsmas veido TiAlN (3300 HV), Ti (C, N) (3000 HV) starpslāņa nanopārklājumu vai dimanta (8000 HV) nanokristalīnu slāni. Pārklājumu pamatslāni biežāk veido no TiC, Ti (C, N) un TiN [20, 21, 22]. Pēdējo 10 gadu laikā ir veikti pētījumi, kas vērsti uz tehnoloģijas attīstību, un to rezultātā izstrādāta *Duratomic* tehnoloģija nodilumizturīgiem pārklājumiem. Ar izsmalcinātu graudainību un *Duratomic* tehnoloģiju ir izveidoti plaša lietojuma instrumenti, kas optimizēti, lai nodrošinātu augstu un uzticamu veiktspēju konkrētos griešanas materiālos un lietojumos. Kopā ar palielinātu stingrību tas nodrošina veiktspēju, kas pārsniedz tradicionālo nodilumizturīgo Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pārklājumu iespējas. Turklāt jaunie pārklājumi uzlabo siltuma pretestību, ķīmiskās inerciālās īpašības un samazina apstrādājamo materiālu tendenci pieķerties instrumentam (ir minimizēts uzķepums). Pirmo griezējinstrumentu *TM4000* un *TP2500* ar *Duratomic* tehnoloģiju ieviešana izrādījās ļoti veiksmīga, un pārklājumiem tika ieviesti jauni standarti. Apskatītajos literatūras avotos nav atrodama informācija, ka ir pētītas vairāku pārklājumu kombinācijas un to biežumu variantu ietekme uz apstrādāto virsmas kvalitāti metālapstrādes procesā.

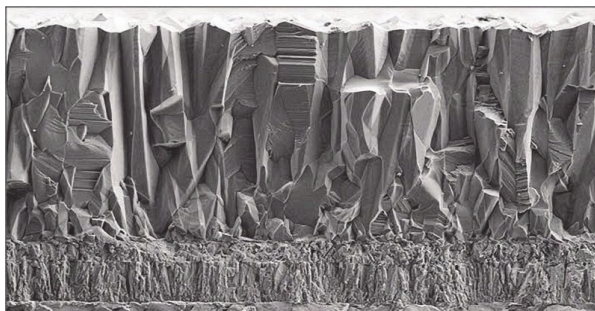
Ievērojami piekāpjoties cietajiem sakausējumiem siltumizturības un nodilumizturības ziņā, ātrgriezēja tēraudi ir visizturīgākie pie lieces slodzes ( $\sigma_f$  līdz 400 MPa) un triecienizturībā, šajā ziņā pārējie materiāli nav spējīgi ar tiem konkurēt. Turklāt instrumenti no ātrgriezēja tērauda var tikt noasināti līdz maksimāli iespējamajam griezošās malas asumam, kas ir ļoti svarīgi tīrapstrādes procesos; tiem ir augsta griešanas īpašību stabilitāte un drošība darbā, un tam savukārt ir liela nozīme, ja tie tiek izmantoti automātiskā aprīkojumā ar vairāku instrumentu iestatījumiem [22].

Ar *CVD* metodi uzklāts alumīnija oksīds Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3., 4. att.) parāda, ka materiāla lielākie graudi ir pozicionēti vertikāli, kas padara to cietāku un stingrāku, kā arī efektīvāk izkļiedē siltumu. Tieši

šī modificētā struktūra ļāva kompānijai “Seco Tools” apgalvot, ka *Duratomic* pārklājums ir “pasaulē pirmais atomiski modificētais pārklājums”.



3. att. Griezējinstrumentu kopējā attīstība [22].



4. att. Ar *Duratomic* tehnoloģiju pārklātais griezējinstrumenta, ir redzama  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pārklājuma vertikālā kristālu pozicionēšanas struktūra [22].



## 2. nodaļa. GRIEŠANAS PROCESA MATEMĀTISKĀ MODELĒŠANA

### 2.1. Galīgo elementu metodes (GEM) pamatprincipi

Programmatūra “*AdvantEdge*” ar GEM metodiku tika izstrādāta speciāli apstrādes procesu pētījumiem, tajā iekļaujot vairākas iespējas: automātiski programmētu rīku kustību dažādiem apstrādes procesiem, pielāgotam instrumentam un sagataves ģeometrijas importam, automātiski noteiktiem un lietotiem galīgo elementu pētījumiem un pēcapstrādes rezultātu apstrādes funkcijām, kas ļauj viegli analizēt un veikt vairāku simulāciju salīdzinājumu.

“*AdvantEdge*” ir primārais datoru simulācijas rīks, galīgo elementu analīzes (*FEA*) simulācijas programma, ko izmanto, lai izprastu metāla griešanas procesu bez faktiski veiktiem eksperimentiem. Ar “*AdvantEdge*” ir iespēja veikt pilnu pētījuma komplektu analīzei, ieskaitot mikrostruktūras sadalījuma veidošanos, temperatūru kontaktzonā, kontaktspriegumus un spēkus, kas rodas instrumentam un sagatavei. Programmai ir izstrādāti un realizēti materiāla modeļi, kas iebūvēti programmas bibliotēkā, kas dot iespēju iegūt maksimāli augstu ticamības vērtību un pārliecināties par galarezultātu bez fiziskas pārbaudes [23–37].

### 2.2. Apstrādes procesa, griešanas temperatūras un spēku simulācija

Izvēlētā programma “*AdvantEdge*” ļauj lietotājiem analizēt apstrādes procesus 2D un 3D vidē. Ražotāji visā pasaulē uzskata, ka “*AdvantEdge*” ir vērtīgs instruments virpošanas, frēzēšanas, urbšanas, zāģēšanas un stiepšanas procesa simulācijai un pētījumiem. “*AdvantEdge*” lietotājiem ir iespēja arī analizēt temperatūru un spriegumus kontaktzonā, lai prognozētu instrumenta nodiluma izturību un veiktspēju. Salīdzinot katra atsevišķa parametra ietekmi, lietotājs var viegli noteikt un ieviest optimālos parametrus. Arī svarīgi, ka pastāv iespēja izveidot jebkuru instrumenta ģeometriju un izvēlēties nodilumizturīgus pārklājumus, to īpašības un biežumu.

### 2.3. Galīgo elementu metodes lietošana apvirpošanas procesa modelēšanā

Lai modelētu nerūsējošā tērauda griešanas procesu, tika izmantota programma “*Third Wave Advantedge*”, kuras pamatā ir galīgo elementu matemātiskā analīze (*FEM analysis*). Tika izvēlēts 420. markas nerūsējošais tērauds un *TNMG 160412 TM-4000-MF4 Duratomic* grīzējinstrumenti. Šajā gadījumā ir precīzi izveidots 2D grīzējinstrumenta ģeometrijas šķērsgrīzuma profils, kā arī

tika ievadīti TiN un Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pārklājumu biezumi (ko norāda šo instrumentu ražotāja). Mērķa sasniegšanai tiek noformulēti vairāki uzdevumi.

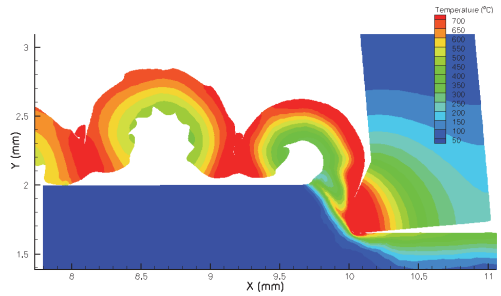
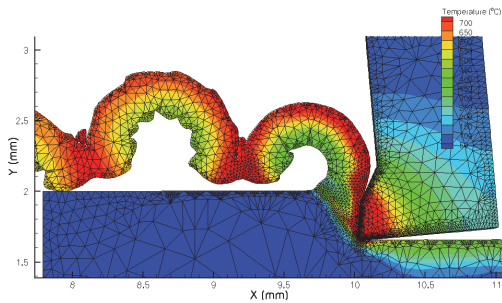
- 1) Griezējplāksnītes precīzas ģeometrijas un pārklājumu kombinācijas un biezuma izveide.
- 2) Virpošanas procesa simulācijas modelēšanas veikšana bāzes apstrādes režīmos (griešanas ātrums 90 m/min, bez dzesēšanas emulsijas) un palielinātos apstrādes režīmos (griešanas ātrums 150 m/min, bez dzesēšanas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

Lai modelētu nerūsējošā tērauda griešanas procesu, tika izmantota 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* griezējinstrumentis. Modelēšanas griešanas režīmi (minimālās un maksimālās vērtības) apkopoti 1. tabulā.

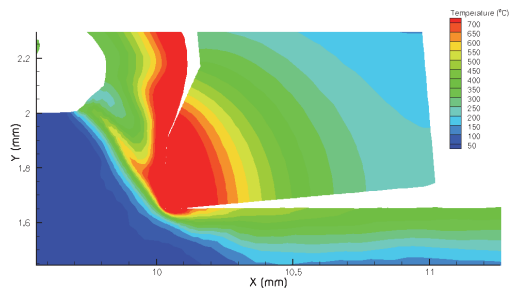
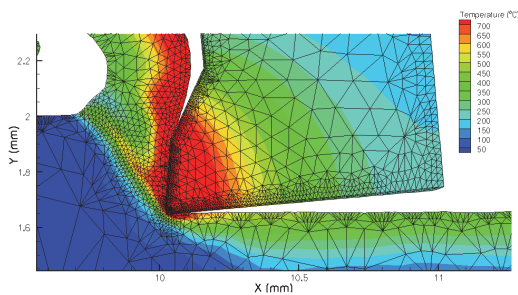
1. tabula

Griešanas režīmi modelēšanas variantiem

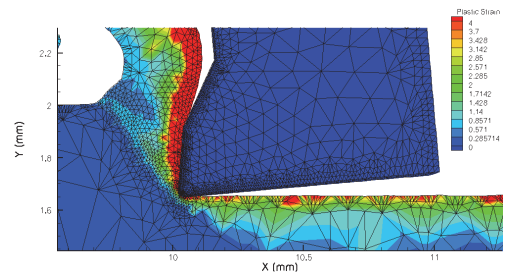
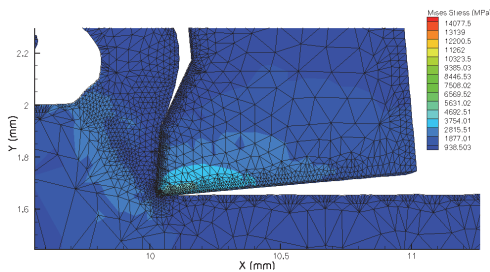
| Modelēšanas varianta numurs     | 1               | 2               |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|
| Padeve, mm/apgr                 | 0,1             | 0,35            |
| Griešanas dziļums, mm           | 0,5             | 0,5             |
| Griešanas ātrums, m/min         | 90              | 150             |
| Temperatūra, °C                 | 20              | 20              |
| Materiāls, nerūsējošais tērauds | <i>AISI 420</i> | <i>AISI 420</i> |



5. att. Skaidu veidošanās process un siltuma sadalījuma lauka kopējais skats.



6. att. Griešanas procesā modelētais siltuma sadalījuma lauks palielinātā mērogā ar satīklojumu un bez tā.

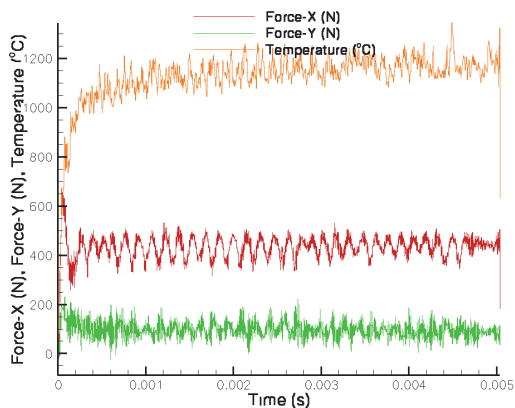


7. att. Griešanas procesā modelētais kontakspriegumu sadalījums.

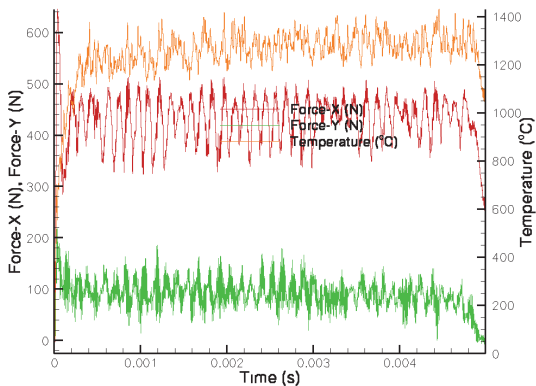
8. att. Griešanas procesā modelētais plastisko deformāciju sadalījums.

Modelēšanas rezultātā ir iegūts atbilstošais eksperimentālajiem rezultātiem skaidu veidošanās process, ko nodrošināja griezējinstrumenta ģeometrijas profils (MF 4), tika noteiktas griešanas temperatūru minimālās (700 °C) un maksimālās vērtības (1150 °C) bez dzesēšanas emulsijas un to sadalījums griezējinstrumentā. Griešanas spēku vērtības pa X un Y asīm ir minimālas

vidējā/finiša apstrādes režīmā, nepārsniedz definētās sakarības un Px diapazonā ir 100–150 N/mm<sup>2</sup>, Py diapazonā – 250–400 N/mm<sup>2</sup>. Modelēšanas rezultāti redzami 5.–8. attēlā. Modelēšanas rezultātā maksimāli precīzi un atbilstoši praktiskajam eksperimentam ir redzams skaidru veidošanās process. Griešanas spēka un temperatūras vērtības redzamas 9. un 10. attēlā.



9. att. Griešanas spēku (Force -X , Force - Y) un temperatūras (Temperature) vērtības attēlojums no laika (Time) pirmajam modelēšanas gadījumam [autora attēls].



10. att. Griešanas spēka (Force -X , Force - Y) un temperatūras (Temperature) vērtības attēlojums no laika (Time) otrajam modelēšanas gadījumam [autora attēls].






### 3. nodaļa. NERŪSĒJOŠĀ TĒRAUDA APVIRPOŠANAS PROCESA EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

#### 3.1. Griezējinstrumenta ģeometrijas izvēle eksperimentālajam pētījumam



No dažādu apvirpošanas operāciju veidiem tika izvēlētas griezējinstrumenta ģeometrijas, kas ir paredzētas vidējai vai vidējai/noslēdzošai (*Medium Finishing (MF)*) apvirpošanas operācijai – MF4 un MF5 ar pārklājumiem *CP500*, *TP3500* un *TM4000 Duratomic*, kas paredzēti nerūsējošā tērauda apstrādei. Izvēlēti arī citu ražotāju līdzīgām operācijām paredzētie analogi: *Sumitomo*, *Kennametal*, *Walter* (2. tab.). Kopējais eksperimentu raksturojums apkopots 3. tabulā

2. tabula

Izvēlēto griezējinstrumentu ģeometrijas un lietošanas apgabali

| Ģeometrija  | Apzīmējums   | Lietošana                                     | $a_p/f$ (mm)            |
|---|--|---|-------------------------|
|    | <i>TNMG 160408-NM4<br/>WPP20 (Walter)</i>          | Nerūsējošais tērauds,<br>vidēja apstrāde      | 0,25–4,5 /<br>0,10–0,40 |
|   | <i>TNGP 160408 KC730<br/>(Kennametal)</i>          | Nerūsējošais tērauds,<br>vidēja / tīrapstrāde | 0,2–4,0 /<br>0,10–0,30  |
|  | <i>TNMG 160408 ESX<br/>AC2000 (Sumitomo)</i>       | Nerūsējošais tērauds,<br>vidēja apstrāde      | 0,25–2,5/<br>0,05–0,5   |
|  | <i>TNMG 160412 MF4<br/>TM4000 Duratomic (Seco)</i> | Nerūsējošais tērauds,<br>vidēja apstrāde      | 0,5–4,0 /<br>0,15–0,5   |
|  | <i>TNMG 160408 MF4<br/>CP500 (Seco)</i>            | Nerūsējošais tērauds,<br>vidēja / tīrapstrāde | 0,5–4,0/<br>0,15–0,5    |

2. tabulas turpinājums

|   |  |   |                      |
|---|--|---|----------------------|
|  | <i>TNMG 160408 MF4<br/>TP3500<br/>Duratomic (Seco)</i> | Nerūsējošais tērauds,<br>vidēja / tīrapstrāde | 0,15–0,5/<br>0,5–4,0 |
|  | <i>TNMG 160408<br/>MF5TP2500 Duratomic<br/>(Seco)</i>  | Nerūsējošais tērauds,<br>vidēja / tīrapstrāde | 0,2–0,8/<br>0,2–2,7  |

3. tabula

## Kopējais eksperimentu raksturojums

| Eksp. Nr. | Nerūsējošā tērauda marka | Instruments                              | Griešanas parametri  |
|-----------|--------------------------|--|--|
| 1         | 420.                     | <i>TNMG 160412 TM4000<br/>MF4 (Seco)</i> | $a_p = 0,5$ mm, $f = 0,1$ ; 0,35 mm/apgr.,<br>$V = 90$ ; 112 m/min.  |
| 2         | 420.                     | <i>TNMG 160412 TM4000<br/>MF4 (Seco)</i> | $a_p = 0,5$ mm, $f = 0,1$ ; 0,35 mm/apgr.,<br>$V = 117$ ; 141 m/min. |
| 3         | 304.                     | <i>TNMG 160412 TM4000<br/>MF4 (Seco)</i> | $a_p = 0,5$ mm, $f = 0,1$ ; 0,35 mm/apgr.,<br>$V = 117$ ; 141 m/min. |
| 4         | 420.                     | <i>TNMG 160412 TM4000<br/>MF4 (Seco)</i> | $a_p = 0,5$ mm, $f = 0,1$ ; 0,35 mm/apgr.,<br>$V = 144$ ; 176 m/min. |
| 5         | 304.                     | <i>TNMG 160412 TM4000<br/>MF4 (Seco)</i> | $a_p = 0,5$ mm, $f = 0,1$ ; 0,35 mm/apgr.,<br>$V = 144$ ; 176 m/min. |
| 6         | 304.                     | <i>TNMG 160408 CP500<br/>MF4 (Seco)</i>  | $a_p = 0,5$ mm, $f = 0,1$ ; 0,35 mm/apgr.,<br>$V = 210$ ; 268 m/min. |
| 7         | 420.                     | <i>TNMG 160408 CP500<br/>MF4</i>         | $a_p = 0,5$ mm, $f = 0,1$ ; 0,35 mm/apgr.,<br>$V = 210$ ; 268 m/min. |
| 8         | 304.                     | <i>TNMG 160408 TP2500<br/>MF5 (Seco)</i> | $a_p = 0,5$ mm, $f = 0,1$ ; 0,35 mm/apgr.,<br>$V = 210$ ; 268 m/min. |
| 9         | 420.                     | <i>TNMG 160408 TP2500<br/>MF5 (Seco)</i> | $a_p = 0,5$ mm, $f = 0,1$ ; 0,35 mm/apgr.,<br>$V = 210$ ; 268 m/min. |
| 10        | 420.                     | <i>TNMG 160408 TP2500<br/>MF5 (Seco)</i> | $a_p = 0,5$ mm, $f = 0,1$ ; 0,35 mm/apgr.,<br>$V = 273$ ; 343 m/min. |
| 11        | 304.                     | <i>TNMG 160408 TP2500<br/>MF5 (Seco)</i> | $a_p = 0,5$ mm, $f = 0,1$ ; 0,35 mm/apgr.,<br>$V = 273$ ; 343 m/min. |
| 12        | 304.                     | <i>TNMG 160408 MF4<br/>TP3500 (Seco)</i> | $a_p = 0,5$ mm, $f = 0,1$ ; 0,35 mm/apgr.,<br>$V = 210$ ; 268 m/min. |
| 13        | 420.                     | <i>TNMG 160408 MF4<br/>TP3500 (Seco)</i> | $a_p = 0,5$ mm, $f = 0,1$ ; 0,35 mm/apgr.,<br>$V = 210$ ; 268 m/min. |

### 3.2. Vairāku faktoru eksperimenta iespēju analīze

#### 2<sup>k</sup> tipa pilnā faktoru eksperimenta īpašības

2<sup>k</sup> tipa plānu izveidošanai ir trīs vienkārši varianti, no kuriem viens ir bāzēts zīmju secības mainīšanās likumā. Pirmajā kolonnā zīmes tiek mainītas pēc kārtas, otrajā kolonnā tās maina ik pēc divām, trešajā ik pēc četrām, ceturtajā – ik pēc astoņām rindām utt.

Pilnā faktoru eksperimenta matricai ir dažas īpašības, kas to padara par optimālu līdzekli matemātiskā modeļa sastādīšanai, ņemot vērā eksperimentu rezultātus [38–45]. 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, kas ir vienāda ar nulli (1. vienādojums).

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

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

- Katras kolonnas elementu kvadrātu summa ir vienāda ar punktu skaitu (2. vienādojums).

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

### 3.3. Eksperimentāla modeļa izstrāde virpošanā

Kā paraugs tika apskatīta pirmo eksperimentālo datu apstrāde ar trīs faktoru eksperimenta palīdzību. Saskaņā ar iepriekšējiem eksperimentiem tiek pieņemtas padeves vērtības: 0,1 mm/apgr.; 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°. Eksperimenta plānošanas matrica, faktoru līmeņi un variāciju intervāli apkopoti 4. un 5. tabulā. Iegūtās apvirpotās virsmas vērtības  $R_a$  – 6. tabulā.

Materiāls: 420. markas nerūsējošais tērauds, sagataves diametrs 89 mm.

Izvēlētais instruments: griezējplāksnīte *TNMG 160412-MF4, TM4000*, kas paredzēta vidējai līdz noslēdzošai apstrādei šai materiālu markai ātrumos no 90 m/min. līdz 115 m/min. (pēc aprēķiniem plānā ir noapaļotās vērtības 90 un 110).

4. tabula

**2<sup>n</sup> plānošanas matrica**

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

5. tabula

**Faktoru līmeņi un variāciju intervāli**

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

6. tabula

**R<sub>a</sub> vidējās vērtības (Y<sub>i</sub>)**

| Nr. | V   | s    | φ  | Y1   | Y2   | Y3   | Y4   | Y5   | Yv   | S2v   |
|-----|-----|------|----|------|------|------|------|------|------|-------|
| 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 ortogonalitāte ļauj vienkāršot regresijas vienādojuma koeficientu aprēķinu. Tā ir viena no šādas eksperimenta plānošanas priekšrocībām. Koeficientus aprēķina pēc 3. formulas [45]:

$$b_i = \frac{\sum_{v=1}^n x_{jv} \bar{y}_v}{n}, \quad (3)$$

kur  $i = 0, 1, 2, k$  – faktora numurs;  $Y_v$  – vidējais rezultāts pēc  $r$  izmēģinājumiem punktā ar numuru  $v$  (4. vienādojums):

$$y_j = \frac{\sum_{j=1}^r y_{jv}}{r}, \quad (4)$$

Rezultātā dalīšana ar plāna punktu skaitu dod meklējamo koeficientu (5. vienādojums):

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

Līdzīgi aprēķina 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 pārveidotiem mainīgajiem  $x$  veidojas šādi [45]:

$$Y = 5,04 - 0,49x_1 + 0,176x_2 - 0,25x_3 + 0,36x_1x_2 - 0,33x_1x_3 + 0,12x_2x_3 + 0,03x_1x_2x_3, \quad (6)$$

kur  $Y$  – virsmas profila negludums

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

Eksperimenta plānošanā ievēro sakarību statistisko raksturu, tāpēc iegūtie vienādojumi tika rūpīgi statistiski analizēti. Šādai analīzei ir divi mērķi:

- 1) iegūt maksimāli daudz informācijas no eksperimenta rezultātiem;
- 2) pārliecināties par iegūto sakarību drošumu un precizitāti.

## Dispersija, kas raksturo eksperimenta kļūdu

Katrs eksperiments ietver kādu kļūdu. Kļūdu skaita mazināšanai ir jāveic eksperimentu atkārtošana vienādos apstākļos, t. i., katrā plānošanas rindā. Rindu dispersijas var aprēķināt pēc 7. formulas [45]:

$$s_v^2 = \frac{\sum_{v=1}^n (y_{vj} - \bar{y}_v)^2}{r-1}, \quad (7)$$

kur  $r$  – atkārtotu eksperimentu skaits plāna punktos (8. vienādojums).

$$s_{v1}^2 = \frac{\sum_{v=1}^n (y_{vj} - \bar{y}_v)^2}{r-1} = 2,45 \quad (8)$$

Līdzīgi aprēķina:  $S^2_{v2} = 0,58$ ;  $S^2_{v3} = 0,51$ ;  $S^2_{v4} = 2,69$ ;  $S^2_{v5} = 2,79$ ;  $S^2_{v6} = 0,045$ ;  $S^2_{v7} = 0,92$ ;  $S^2_{v8} = 0,83$ .

Optimizācijas parametra dispersija  $s(y)$  ir vidējais aritmētiskais no visu atsevišķo eksperimentu variantu dispersijas. Aprēķina optimizācijas parametra dispersiju pēc 9. formulas:

$$s^2 \{y\} = \frac{\sum_{v=1}^n s_v^2}{n} = \frac{\sum_{v=1}^n \sum_{j=1}^r (y_{vj} - \bar{y}_v)^2}{n(r-1)} = 1,35 \quad (9)$$

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 lietot formulas koeficientus, kas ir parādīti iepriekš. Pirms dispersiju apvienošanas ir jāpārbauda to atkārtojamība.

## Dispersiju vienādības pārbaude

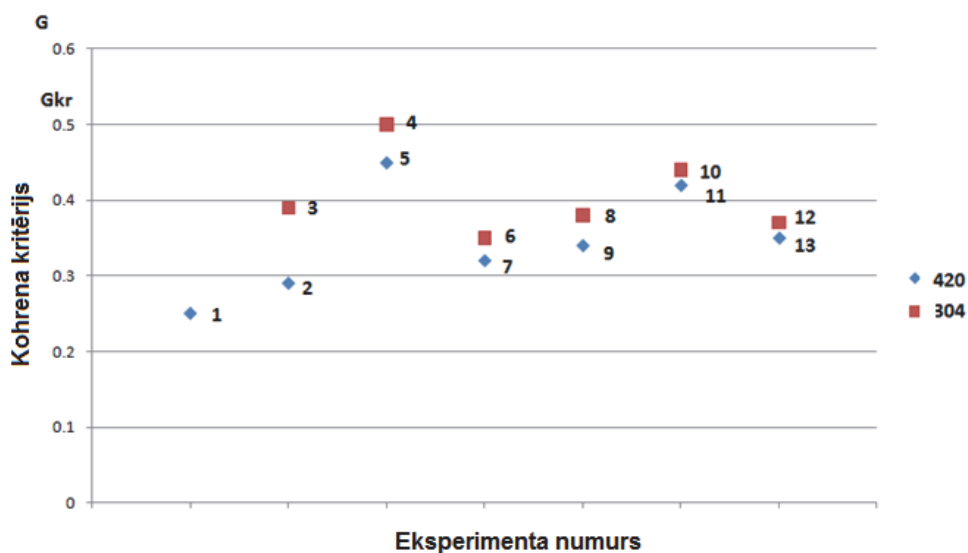
Dispersiju vienādības pārbaude ir veikta ar dažādu statistisko metožu palīdzību, piemēram, ar Fišera, Kohrena, Bartleta metodi. Fišera  $F$  kritērija izmantošana ir neefektīva, ja dispersiju skaits ir lielāks par divi, jo tādā gadījumā novērtējumā piedalās tikai vismazākā un vislielākā dispersija. Kohrena  $G$  kritēriju izmanto gadījumos, kad eksperimentu atkārtojumu skaits ir vienāds visos plāna punktos. No visām  $s_v^2$  dispersijām ir jāizvēlas vislielāko  $s_{v \max}^2$ , kas dalās ar visu dispersiju

summu. Kohrena kritērijs  $G$  – maksimālās dispersijas attiecība pret visu dispersiju summu [45] (10. vienādojums):

$$G = \frac{s_v^2 \max}{\sum s_v^2} = \frac{2.79}{10.81} = 0.26 \quad (10)$$

Kritiskā Kohrena kritērija vērtība  $G_{kr} = 0,52$  (pie nozīmības līmeņa  $\alpha = 0,05$ ). Dispersiju vienādības hipotēze ir pareiza, ja Kohrena kritērija eksperimentālā vērtība ir mazāka par tabulas kritisko vērtību (11. att.):

$$0,26 < 0,52.$$



11. att. Kohrena kritērija grafiskais attēlojums atbilstoši eksperimenta numuram.

### Modeļa koeficienta nozīmības pārbaude

Katra koeficienta nozīmības pārbaude ir veikta neatkarīgi. Pārbaudei var izmantot t kritēriju jeb Stjūdenta kritēriju. Pilna faktoru eksperimenta izmantošanas gadījumā visu koeficientu uzticamības intervāli ir vienādi. Vispirms atrod  $s^2\{b_1\}$  regresijas koeficienta dispersiju. To var aprēķināt pēc 11. un 12. formulas:

$$s^2\{b_1\} = \frac{s^2\{y\}}{n \cdot r} = \frac{1.34}{8 \cdot 5} = 0.0337 \quad (11)$$

$$s\{b_i\} = \sqrt{0.0337} = 0.184 \quad (12)$$

Formulā ir redzams, ka visu koeficientu dispersijas ir vienādas, jo tie ir atkarīgi tikai no eksperimenta kļūdas un izmēģinājumu skaita. Pēc tam aprēķina  $t$  kritērija vērtības pēc 13. formulas:

$$t_i = \frac{|b_i|}{s\{b_i\}} \quad (13)$$

Šim eksperimentam tās izskatās šādi:

$$t_0 = 27,39; t_1 = 2,66; t_2 = 0,96; t_3 = 1,36; t_{12} = 1,95; t_{13} = 1,79; t_{23} = 0,65; t_{123} = 1,63.$$

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 atņemt bez citu koeficientu pārrēķināšanas. Pēc tam objekta matemātiskais modelis tiek sastādīts vienādojuma veidā, kurā tiek ierakstīti tikai nozīmīgie koeficienti.

Kritisko vērtību  $t_{kr}$  atrod pēc tabulām pie  $n(r-1) = 32$  brīvības pakāpēm un pie nozīmības līmeņa  $a = 0,05$ :  $t_{kr} = 2,04$ .

Konkrētajam eksperimentam tika iegūts 15. vienādojums:

$$Y = 5,04 - 0,49x_1. \quad (14)$$

Lai iegūtu modeli ar naturālajiem mainīgajiem lielumiem, 15. vienādojumā jāieliek  $x_i$  izteiksmes no pārveidošanas formulām (15., 16. un 17. formula):

$$x_1 = \frac{\tilde{x}_1 - 100}{10}; \quad (15)$$

$$x_2 = \frac{\tilde{x}_2 - 0,225}{0,125}; \quad (16)$$

$$x_3 = \frac{\tilde{x}_3 - 75}{15}. \quad (17)$$

Rezultātā tiek iegūts 18. vienādojums:

$$R_a = 5,04 - 0,49 \left( \frac{\tilde{x}_1 - 100}{10} \right), \quad (18)$$

kur  $\tilde{x}_1$  – griešanas ātrums, m/min.

Pēc analogiskā paņēmiena ir veidoti citu eksperimentu plāni. Visu eksperimentu dati ir apkopoti 3. tabulā.

Otrais eksperiments (3. tab.) veikts, lietojot instrumentu ar *Duratonic* pārklājumu *TM-4000* un griešanas ātruma diapazonu 117/141 m/min., tēraudam *AISI 420*, tā plāns redzams 7. tabulā, iegūts 19. vienādojums.

Trešais eksperiments (3. tab.), veikts, lietojot instrumentu ar *Duratonic* pārklājumu *TM-4000* un griešanas ātruma diapazonu 117/141 m/min., tēraudam *AISI 304*, tā plāns redzams 7. tabulā, iegūts 20. vienādojums.

7. tabula

### 2. un 3. eksperimenta faktoru līmeņi un variāciju intervāli

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

$$R_a = 2.0 + 0.96 \left( \frac{\tilde{x}_1 - 129}{12} \right) + 0.04 \left( \frac{\tilde{x}_2 - 0.225}{0.125} \right) + 0.14 \left( \frac{\tilde{x}_3 - 75}{15} \right) \quad (19)$$

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

$$R_a = 1.12 + 0.25 \left( \frac{\tilde{x}_1 - 129}{12} \right) + 0.06 \left( \frac{\tilde{x}_2 - 0.225}{0.125} \right) + 0.17 \left( \frac{\tilde{x}_3 - 75}{15} \right) + \quad (20)$$

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

Ceturtais eksperiments (3. tab.) veikts, lietojot instrumentu ar *Duratomic* pārklājumu *TM-4000* un griešanas ātruma diapazonu 144/176 m/min., tēraudam *AISI 420*, tā plāns redzams 8. tabulā, iegūts 21. vienādojums.

Piektais eksperiments (3. tab.) veikts, lietojot instrumentu ar *Duratomic* pārklājumu *TM-4000* un griešanas ātruma diapazonu 144/176 m/min., tēraudam *AISI 304*, tā plāns redzams 8. tabulā, iegūts 22. vienādojums.

8. tabula

#### 4. un 5. eksperimenta faktoru līmeņi un variāciju intervāli

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

$$R_a = 4,14 - 1,76 \left( \frac{\tilde{x}_1 - 160}{16} \right) - 0,41 \left( \frac{\tilde{x}_2 - 0,225}{0,125} \right) - 0,07 \left( \frac{\tilde{x}_1 - 160}{16} \right) \left( \frac{\tilde{x}_3 - 75}{15} \right) \quad (21)$$

$$R_a = 2,17 - 1,18 \left( \frac{\tilde{x}_1 - 160}{16} \right) - 0,29 \left( \frac{\tilde{x}_2 - 0,225}{0,125} \right) - 0,12 \left( \frac{\tilde{x}_1 - 160}{16} \right) \left( \frac{\tilde{x}_3 - 75}{15} \right) \quad (22)$$

10. eksperiments (3. tab.) veikts, lietojot instrumentu ar *Duratomic* pārklājumu *TP-2500* un griešanas ātruma diapazonu 273/343 m/min., tēraudam *AISI 420*, tā plāns redzams 9. tabulā, iegūts 23. vienādojums.

11. eksperiments (3. tab.) veikts, lietojot instrumentu ar *Duratomic* pārklājumu *TP-2500* un griešanas ātruma diapazonu 273/343 m/min., tēraudam *AISI 304*, tā plāns redzams 9. tabulā, iegūts 24. vienādojums.

## 10. un 11. eksperimenta faktoru līmeņi un variāciju intervāli

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

$$R_a = 7.11 - 3,03 \left( \frac{\tilde{x}_1 - 312}{35} \right) - 2.1 \left( \frac{\tilde{x}_2 - 0.225}{0.125} \right) - 0.74 \left( \frac{\tilde{x}_1 - 312}{35} \right) \left( \frac{\tilde{x}_2 - 0.225}{0.125} \right) \left( \frac{\tilde{x}_3 - 75}{15} \right) \quad (23)$$

$$R_a = 5.17 - 2,161 \left( \frac{\tilde{x}_1 - 312}{35} \right) - 1.28 \left( \frac{\tilde{x}_2 - 0.225}{0.125} \right) - 0.62 \left( \frac{\tilde{x}_1 - 312}{35} \right) \left( \frac{\tilde{x}_2 - 0.225}{0.125} \right) \left( \frac{\tilde{x}_3 - 75}{15} \right) \quad (24)$$

kur  $\tilde{x}_1$  – griešanas ātrums,  $V$  m/min;

$\tilde{x}_2$  – padeve,  $f$  mm/ apgr.;

$\tilde{x}_3$  – griešanas leņķis,  $\phi$ °.

### 3.5. Apvirpotās virsmas raupjuma veidošanās analīze, lietojot citu ražotāju instrumentus

Grafiskie rezultāti (12. un 13. att) parāda, cik nozīmīgi atšķiras apvirpotās virsmas rezultāts ( $R_a$ ), lietojot dažādu ražotāju instrumentus, kas paredzēti līdzīgam operācijām tādos pašos apstrādes režīmos. Kopējais eksperimentu raksturojums apkopots 10. tabulā.

## Kopējais eksperimentu raksturojums citu ražotāju instrumentiem

| Eksp. Nr. | Nerūsējoša tērauda marka | Instrumenti                              | Griešanas parametri   |
|-----------|--------------------------|--|---|
| 14        | 304.                     | <i>TNMG 160408-NM4 WPP20 (Walter)</i>    | $a_p = 0,5 \text{ mm}, f = 0,1; 0,35 \text{ mm/apgr.}, V = 210; 268 \text{ m/min.}$ |
| 15        | 420.                     | <i>TNMG 160408-NM4 WPP20 (Walter)</i>    | $a_p = 0,5 \text{ mm}, f = 0,1; 0,35 \text{ mm/apgr.}, V = 210; 268 \text{ m/min.}$ |
| 16        | 304.                     | <i>TNMG 160408 ESX AC2000 (Sumitomo)</i> | $a_p = 0,5 \text{ mm}, f = 0,1; 0,35 \text{ mm/apgr.}, V = 210; 268 \text{ m/min.}$ |
| 17        | 420.                     | <i>TNMG 160408 ESX AC2000 (Sumitomo)</i> | $a_p = 0,5 \text{ mm}, f = 0,1; 0,35 \text{ mm/apgr.}, V = 210; 268 \text{ m/min.}$ |
| 18        | 304.                     | <i>TNMG 160408 KC730 (Kennametal)</i>    | $a_p = 0,5 \text{ mm}, f = 0,1; 0,35 \text{ mm/apgr.}, V = 210; 268 \text{ m/min.}$ |
| 19        | 420.                     | <i>TNMG 160408 KC730 (Kennametal)</i>    | $a_p = 0,5 \text{ mm}, f = 0,1; 0,35 \text{ mm/apgr.}, V = 210; 268 \text{ m/min.}$ |

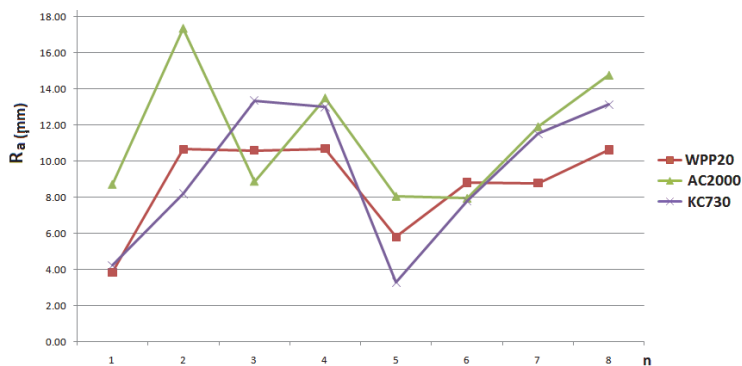
Virsmas negludumu vidējās vērtības ( $R_{a \text{ vid}}$ ) dažādiem sagataves materiāliem un instrumentiem

| <i>n</i> | 304          |               |              | 420          |               |              |
|----------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
|          | <i>WPP20</i> | <i>AC2000</i> | <i>KC730</i> | <i>WPP20</i> | <i>AC2000</i> | <i>KC730</i> |
| 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        |





12. att. 304. markas nerūsējošā tērauda, kas apvirpots ar dažāda materiāla instrumentu, virsmas vidējā raupjuma vērtību grafiskais attēlojums.



13. att. 420. markas nerūsējošā tērauda, kas apvirpots ar dažāda materiāla instrumentu, virsmas vidējā raupjuma vērtību grafiskais attēlojums.

Izvēloties vairākus citu ražotāju instrumentus saskaņā ar standartu *ISO 513* ar griešanas ģeometriju, kas paredzēta identiskai operācijai konkrētai materiālu grupai (*AISI 304*, *AISI 420*), veicot virpošanas procesu palielinātā apstrādes režīmā un apstrādātās virsmas mērījumus, tika noskaidrots, ka citu ražotāju instrumenti nenodrošina identisku apstrādātās virsmas kvalitāti. Dažādos gadījumos, lietojot apstrādes režīmu kombinācijas, apstrādātās virsmas raupjuma vērtību  $R_a$  diapazona vērtību izkliede sasniedza 100 % identiskos apstrādes režīmos (piemēram, no 3,0  $\mu\text{m}$  līdz 6,0  $\mu\text{m}$ ).

### 3.6. Instrumenta izdiluma eksperimentālie pētījumi

Griešanas procesā maināmos režīmos instrumenta leņķu vērtības mainās, salīdzinot ar standartizēto stāvokli. Normālos griešanas apstākļos šīs izmaiņas ir nenozīmīgas, un tās parasti tiek ignorētas, taču pie lielām padevēm galveno leņķi  $\phi$  ir nepieciešams palielināt par  $3^\circ \dots 5^\circ$  un, ja nepieciešams, ņemt vērā citu režīmu izmaiņas.

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

Stūru izmēri (griezējplāksnītes malas ģeometrija) tiek izvēlēti atbilstoši uzziņu grāmatām, nodrošina instrumentu projektēšanu un izgatavošanas 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 dziļumu, mainīgas vai periodiskas padeves izmantošanas. Griezējinstrumenta leņķu maiņa ietekmē skaidu trajektoriju.

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 veidošanās parametri, kas ietekmē skaidu veidošanās procesu, izraisa papildu vibrācijas, kas atspoguļojas apstrādātās virsmas kvalitātē.

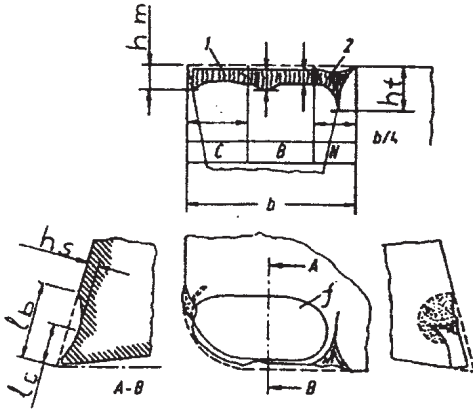
Izpētot visus veikto eksperimentus rezultātus, var redzēt, ka dažādu ražotāju instrumenti nav paredzēti lietošanai palielinātos griešanas režīmos.

Veicot griezējinstrumenta nanopārklājumu pētījumus, svarīgi ir salīdzināt griezējinstrumentu nodilumizturību. Nodiluma salīdzināšanas eksperimentam tika izvēlēti šādi griezējinstrumenti ar pārklājumiem: *KC 730*, *TM 4000*, *AC 200*, *CP500*, *WPP200*, *TP3500*. Instrumenta nodilums tika mērīts uz plāksnītes virsotnes skaidvirsmas un mugurvirsmas pēc katra apvirpošanas parametru kombinācijas griešanas procesa (1. tab.).

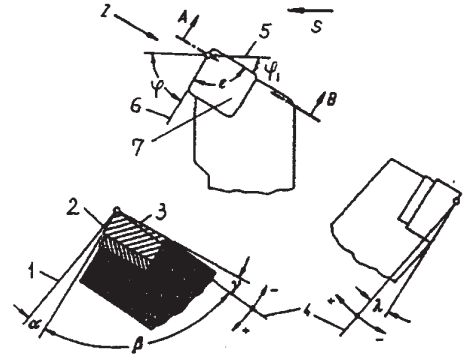
Griezošās malas nodiluma parametri un apzīmējumi redzami 14. attēlā.

15. attēlā redzami griezējplāksnītes ģeometrijas leņķi.

Galvenās griezējšķautnes slīpuma leņķis  $\lambda$  ir leņķis starp griezējšķautni un pamatplaknei paralēlu plakni, un tas ir redzams, skatoties sānskatā uz galveno griezējšķautni.



14. att. Griezošās malas nodiluma parametri un apzīmējumi: C, B, N – nodiluma apgabali;  $l_b$  – nodiluma bedrītes garums;  $l_c$  – attālums līdz nodiluma bedrītes centram;  $h_s$  – nodiluma bedrītes dziļums;  $h_m$  – mugurvirsmas nodilums;  $h_t$  – triecienslodzes nodilums;  $f$  – bedrītes nodiluma forma. [19].

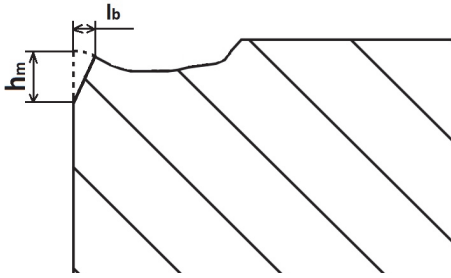


15. att. Griezējplāksnītes ģeometrijas raksturojošie leņķi: L – instrumenta griezējšķautnes plakne; 2 – mugurvirsmas; 3 – skaidvirsmas; 4 – instrumenta pamatplaknei paralēlā plakne; 5 – darba plakne; 6 – galvenās griezējšķautnes iestatīšanas plakne; 7 – ātrmaināma griezējplāksnīte;  $\alpha$  – mugurleņķis;  $\beta$  – ķīļleņķis;  $\varphi$  – galvenais iestatīšanas leņķis;  $\varepsilon$  – virsotnes leņķis;  $\lambda$  – galvenā griezējasmaņa slīpuma leņķis;  $\varphi_1$  – palīgiestatīšanas leņķis. [21].

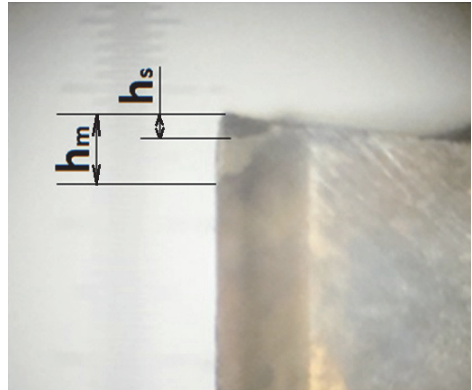
Eksperimentu rezultātā noskaidrots, ka atkarībā no griešanas apstākļiem, dažādām instrumentu ģeometrijām, pārklājumu veidiem un apstrādājamā materiāla īpatnībām (304. un 420. markas nerūsējošais tērauds) dominējošais nodilums ir vērojams uz galvenās mugurvirsmas  $h_m$ , uz skaidvirsmas tas redzams 16, 17, 18, 19. attēlā. Instrumentu nodilšanas gadījumā mainās arī griezošās malas noapaļošanās rādiuss  $\Delta r$  (18., 19. att.).

Lielāku nodiluma rezultātu uzrādīja *KC730 (Kennametal)* (17., 19. att.). Šis instruments, pateicoties diezgan nesarežģītai skaidu laužēja ģeometrijai, demonstrēja labākus apvirpotās virsmas rezultātus nekā pārējie instrumenti, bet nodiluma vērtības bija ļoti lielas. Interesi rada tas, ka šis instruments, apvirpojot divas dažādas nerūsējošā tērauda grupu markas, uzrādīja dažādu nodilumu – minimālu nodilumu, apvirpojot *AISI 420*, maksimālu, apvirpojot *AISI 304* nerūsējošo

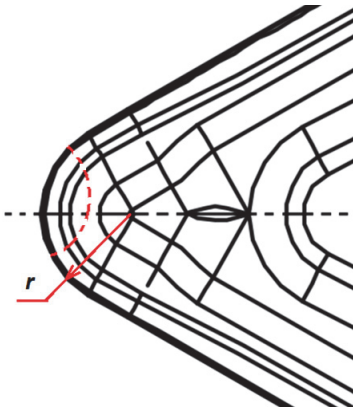
tēraudu. Dati ir iegūti, nolasot nodiluma vērtības pēc pilnā apstrādes cikla, nepārsniedzot instrumenta paredzēto kalpošanas laiku (15 min).



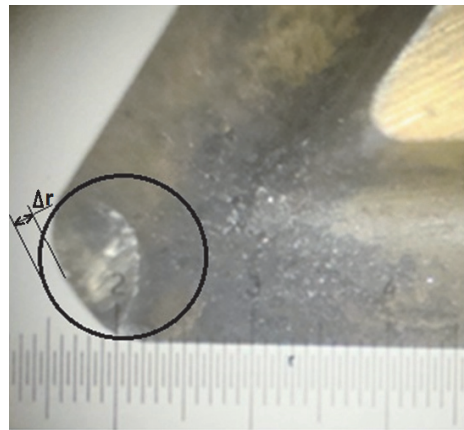
16. att. Nodiluma augstuma  $h_m$  un nodiluma garuma  $l_b$  parametri uz plāksnītes griezējasmaņa šķēlumā.



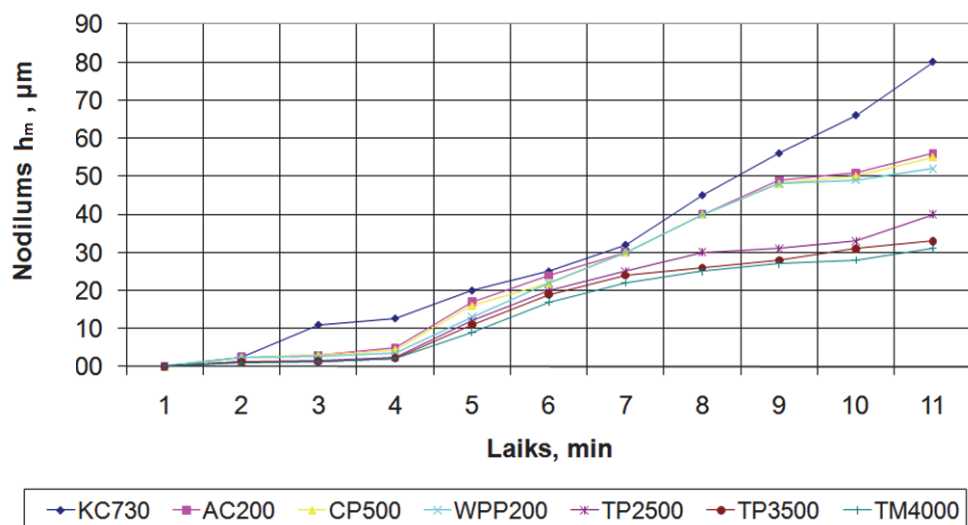
17. att. Nodiluma augstuma  $h_m$  un nodiluma bedrītes dziļuma  $h_s$  parametri.



18. att. Noapaļojuma rādiusa  $r$  izmaiņas uz plāksnītes virsotnes (attēlotas ar pārtraukto līniju).



19. att. Noapaļojuma rādiusa  $\Delta r$  izmaiņas uz plāksnītes skaidvirsmas.



20. att. Instrumenta nodiluma eksperimentāli iegūtie nodiluma rezultāti.

No iegūtiem datiem var secināt, ka ar *Duratomic* tehnoloģiju pārklātie griezējinstrumenti *TM4000* ir nodilumizturīgāki. Apstrādes procesā rodas vibrācijas, kas pasliktina apvirpotās virsmas kvalitāti.

Izmantojot lielākus griešanas ātrumus, bez dzesēšanas emulsijām tika sasniegts lielākais kalpošanas laika variants ar *Duratomic TM4000* pārklājumu (*SECO*), kas ar 50 % palielinātiem griešanas ātrumiem parādīja minimālu griezējasmaņa nodilumu (20. att.), nodrošinot labu (izrietot no iepriekšējiem aprēķiniem) apstrādātās virsmas kvalitāti (tādā stāvoklī ar instrumentu vēl varētu turpināt strādāt).

Salīdzinot izvēlētos pārklājumus, var atzīt, ka no nodiluma viedokļa par labāko uzskatāms ar *Duratomic* tehnoloģiju veiktais pārklājums, jo tas dod mazāku instrumenta nodilumu.

## SECINĀJUMI UN LIETOJUMS

1. **Izvirzītā hipotēze ir apstiprināta.** Pieņemot apvirpotās detaļas iestatīto virsmas raupjuma  $R_a$  vērtību, ir iespējams izveidot apvirpošanas procesa ar nodilumizturīgo *Duratomic* tehnoloģiju pārklāto griezējinstrumentu modeļi, kas ļauj pēc iestatīta virsmas raupjuma izvēlēties tehnoloģiski sasniedzamus apstrādes režīmus: griešanas ātrumu, padevi vai griezējinstrumenta iestatīšanas leņķi.  
Zinot nepieciešamo virsmas raupjumu, ir iespējams precīzi iestatīt griešanas parametrus, piemēram, griešanas ātrumu, padevi un griezējasmaņņa iestatīšanas leņķi. 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 tehnoloģiskais apvirpošanas apstrādes process, analizējot to ar maksimālo ticamību, izmantojot jaunu griezējinstrumentu skaidu lauzēja ģeometriju, ņemot vērā tā pārklājuma slāņa biezumu, materiāla veidu un to kombināciju.
3. Pamatota griešanas instrumentu izvēles metodika, kas eksperimentāli pārbaudīta dažādos griešanas ātrumos, izmantojot dažādas padeves, nodrošinot stabilu griešanas procesu: konstantu griešanas spēku, temperatūru pieļaujamajā diapazonā, skaidu veidošanās 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. Izstrādāti jauni apstrādes procesa modeļi, lietojot paaugstinātas (no 25 % līdz 50 %) griešanas ātruma vērtības.
6. Lietojot lielākus griešanas ātrumus, bez dzesēšanas emulsijām tika sasniegts lielākais kalpošanas laika variants ar *Duratomic TM4000*  $Al_2O_3$  pārklājumu (*SECO*), kas ar 50 % palielinātiem griešanas ātrumiem parādīja minimālu griezējasmaņņa nodilumu, nodrošinot labu apstrādātās virsmas kvalitāti.
7. Apstrādes procesā tika pētīta dažādu griešanas instrumentu ģeometrijas ietekme uz apstrādājamās virsmas kvalitāti (rezultātā ir nodrošināts  $R_a$  bāzes parametriem līdzīgs diapazons no 3,0  $\mu m$  līdz 10,0  $\mu m$ ).

8. Eksperimentu rezultātā konstatēts, ka, lietojot 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 *AISI 420* un *AISI 304* 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 veidošanās procesu palielinātos apstrādes režīmos.
12. Griešanas procesa laikā tika analizēti un modelēti pētījumi, kuros izmantotas variācijas ar griešanas leņķu kombinācijām ( $60^\circ$  un  $90^\circ$ ), vienlaikus ļaujot prognozēt griešanas spēku palielināšanu, izraisot lielākas vibrācijas, samazinot apstrādātās virsmas raupjumu un samazinot griezējinstrumentu kalpošanas laiku.
13. modulētos rezultātus ir iespējams lietot mūsdienu automatizētā ražošanas procesā jeb “Industrija 4.0”, lai iegūtu uzdotās kvalitātes detaļas, izmantojot 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, *Progressivnye rezhushhie instrumenty i rezhimy rezanija metallov*, M., Mashinostroenie (1990) 400.
- [17] V. F. Bezjazychnyj, I. N. Averjanov, A. V. Kordjukov, *Raschet rezhimov rezanija*, Rybinsk: RGATA (2009) 185.
- [18] V. P. Astakhov, S. Svetc, The assessment of plastic deformation in metal cutting: *Journal of Materials Processing Technology* 146 (2004) 193–202.
- [19] P. I. Jashericy, *Teorija rezanija*, 2-e izd., ispr. i dop. — Mn.: Novoe znanie (2006) 512.
- [20] Sandvik Coromant, *Turning handbook*, 2020, 53.p.
- [21] G. Bunga, Ē. Geriņš, *Apstrādes ar atdalīšanu tehnoloģija*, RTU (2007) 85.
- [22] Duratomic technology from Seco,  
<https://www.machinery.co.uk/content/features/changing-the-game-again>, skatīts 6.09.2020.
- [23] S. I. Pestrecov, *Komp'juternoe modelirovanie i optimizacija processov rezanija*, TambGTU (2009) 104.
- [24] S. I. Jaresko, *Rezultaty modelirovanija processa rezanija uprochnennym instrumentom*, *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, t. 8, #2 (2006) 445–457.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, *Finite Element Method: Volume 2, Fifth Edition*. Butterworth-Heinemann (2000) 459.
- [29] 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.

- [30] S. S. Rao, The finite element method in engineering. Edition 5. Butterworth-Heinemann (2005) 663.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] G. Boothroyd, *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, Washington: Scripta Book Company (1981).
- [35] 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.
- [36] T. R. Chandrupatla, A. D. Belegundu, *Introduction to Finite Element in Engineering*, New Jersey: Prentice-Hall (2002).
- [37] 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.
- [38] CATALOG & TECHNICAL GUIDE 2022.2 , SECO TOOLS AB, 1050 p. 2022.
- [39] M. N. Stepnov, *Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mehanicheskikh ispytanij: Spravochnik*. Moskva, Mashinostroenie (1985) 232.
- [40] Ju. P. Adler, E. V. Makarova, *Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimalnyh uslovij*, izd. 2-e pererab i dop. Moskva, Nauka (1976) 278.
- [41] S. M. Ermakov, *Matematicheskaja teorija planirovanija jeksperimenta*, Moskva, Nauka (1983) 392.
- [42] V. A. Trudonoshin, N. V. Pivovarova, *Matematicheskie modeli tehniceskikh obektov*, Minsk, Vyshejnaja shkola (1988) 158.
- [43] I. S. Solonin, *Matematicheskaja statistika v tehnologii mashinostroenija*, Moskva, Mashinostroenie (1972) 216.

- [44] V. M. Bashkov, P. G. Kacev, Testing the cutting instrument for durability. M. Machine building (1985).
- [45] 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, materiālzinātni un aditīvām tehnoloģijām.