

## RADIALINĖS KRYPTIES *PEAK-TO-PEAK* POSLINKIO INTERVALAI KAIP PROCESINIS PAVIRŠIAUS ŠIURKŠTUMO PRIEŽIŪROS KRITERIJUS BAIGIAMAJAME EN AW-2011 ALIUMINIO LYDINIO TEKINIME

Renata Jackuvienė

<https://orcid.org/0009-0004-1208-4982>

*Lietuvos jūreivystės akademija, Laivų inžinerijos katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas*

Rimas Karpavičius

<https://orcid.org/0009-0003-0477-250X>

*Klaipėdos valstybinė kolegija, Transporto, elektros ir mechanikos inžinerijos katedra*

**Anotacija.** Straipsnyje pateikiama platesnės žemadažnio radialinės krypties *peak-to-peak* poslinkio ir paviršiaus šiurkštumo sąsajos analizės praktinė interpretacija. Vertinama, ar baigiamajame EN AW-2011 aliuminio lydinio tekinime vienas paprastai registruojamas poslinkio rodiklis gali būti naudojamas kaip vietinis procesinės priežiūros kriterijus. Analizei naudotas 190 sinchronizuotų įrašų poskyris, kuriame kiekvienai radialinio poslinkio  $V$  reikšmei priskirtos profilometru nustatytos  $R_a$  ir  $R_z$  reikšmės. Papildomai pateikiami pagrindiniai vidinės kalibracijos rodikliai:  $R_a$  modeliui gauta  $R^2 = 0,9929$  ir  $RMSE = 0,052 \mu\text{m}$ , o  $R_z$  modeliui –  $R^2 = 0,9905$  ir  $RMSE = 0,264 \mu\text{m}$ . Remiantis empirinės pasiskirstymo struktūros pagrindu sudarytomis trimis  $V$  juostomis nustatyta monotoniška šiurkštumo didėjimo tendencija. Vienfaktorinė dispersinė analizė parodė, kad trijų juostų  $R_a$  ir  $R_z$  vidurkių skirtumai yra statistiškai reikšmingi ( $p < 0,001$ ). Rezultatai pagrindžia tokių juostų taikymą kaip konkrečiai sąrankai kalibruotą perspėjimo schemą, tačiau jos nelaikytinos universaliomis ribomis kitoms staklėms, medžiagoms ar įrankių sistemoms.

**Pagrindiniai žodžiai:** tekinimas; paviršiaus šiurkštumas; EN AW-2011; *peak-to-peak* poslinkis; vibracijų stebėseną; procesinė priežiūra.

### Įvadas

Baigiamasis tekinimas yra vienas svarbiausių cilindrinų detalių apdirbimo būdų, kai vienu technologiniu veiksmu siekiama užtikrinti matmenų tikslumą ir reikiamą funkcinę paviršiaus būklę. Paviršiaus šiurkštumas tokiame procese nėra vien teorinė padavos ir įrankio viršūnės spindulio pasekmė. Jį veikia staklių, laikiklio, pjovimo briaunos, ruošinio ir drožlės susidarymo sistemos sąveika, todėl net stabilus pjovimo metu naujai formuojamas paviršius gali jautriai reaguoti į nedidelius standumo, apkrovos perdavimo ar santykinio judėjimo pokyčius.

Pramoninėje praktikoje šiurkštumas dažniausiai įvertinamas po pjovimo, naudojant profilometrą arba galutinę kokybės kontrolę. Toks matavimas yra patikimas, tačiau jis reaktyvus: kai nuokrypis nustatomas, konkretus perėjimas jau būna baigtas. Todėl išlieka aktualūs netiesioginiai procesinės stebėsenos metodai, galintys laiku parodyti, kad paviršiaus kokybė pradeda blogėti.

Vibraciniai signalai paviršiaus kokybės stebėsenai nagrinėjami seniai, nes jie atspindi įrankio ir ruošinio sistemos būseną, apkrovos perdavimą ir kontaktines sąlygas pjovimo zonoje [2], [6]. Vis dėlto būtina skirti didelio dažnio, kelių kanalų ir sudėtingų modelių tyrimus nuo paprastesnių gamybinių sprendimų. Universaliose staklėse, mokomosiose laboratorijose ar mažose dirbtuvėse dažnai svarbiau ne maksimali prognozės tikslumo metrika, o aiškus, lengvai kalibruojamas indikatorius, kurį galima susieti su praktiniu sprendimu.

Šiame straipsnyje nagrinėjamas radialinės krypties *peak-to-peak* poslinkis  $V$ . Šis dydis suprantamas kaip registratoriaus pateikiama normalinės arba radialinės krypties poslinkio amplitudė nuo mažiausios iki didžiausios reikšmės stebimame segmente. Tekinimo atveju ši kryptis yra fiziškai reikšminga, nes ji tiesiogiai keičia momentinį įrankio ir formuojamo paviršiaus tarpą.

Straipsnis parengtas kaip į praktinę procesinę priežiūrą orientuota ankstesnės išplėstinės kalibracinės analizės interpretacija [1]. Todėl čia nesiekama pakartotinai pristatyti viso signalo apdorojimo ar universalaus prognozavimo modelio. Pagrindinis dėmesys skiriamas tam, ar ištinis regresinis ryšys tarp  $V$ ,  $R_a$  ir  $R_z$  gali būti paverstas paprastesnėmis poslinkio juostomis, patogiomis technologiniam vertinimui.

Tyrimo problema formuluojama taip: ar žemadažnio radialinės krypties *peak-to-peak* poslinkio intervalai gali būti naudojami kaip vietinis paviršiaus šiurkštumo procesinės priežiūros kriterijus baigiamajame EN AW-2011 aliuminio lydinio tekinyje? Tyrimo tikslas – įvertinti, kaip iš 190 sinchronizuotų įrašų sudarytos  $V$  juostos susijusios su  $R_a$  ir  $R_z$  reikšmėmis, ir apibrėžti tokio kriterijaus taikymo ribas.

Uždaviniai: 1) apibūdinti eksperimentinę sąranką ir duomenų atrankos aplinką; 2) paaiškinti, koku principu sudarytos radialinio poslinkio juostos; 3) pateikti  $V$ ,  $R_a$  ir  $R_z$  aprašomąsias charakteristikas; 4) pateikti regresinės kalibracijos ir paklaidų rodiklius, pagrindžiančius  $V$  sąsają su  $R_a$  ir  $R_z$ ; 5) palyginti juostoms būdingas šiurkštumo reikšmes, įskaitant procentinius skirtumus ir ANOVA patikrą; 6) aptarti praktinį taikymą ir metodo ribotumus.

## 1. Teorinis ir metodinis pagrindimas

Paviršiaus šiurkštumo prognozavimo tyrimuose taikomi įvairūs metodai – nuo empirinių lygčių iki mašininio mokymosi modelių. Apžvalginiai darbai rodo, kad šiurkštumo kitimą lemia ne tik pjovimo greitis, padava ar gylis, bet ir įrankio būklė, sistemos standumas, vibroaktyvumas, kontaktinės sąlygos [2], [3]. Todėl vibracijų informacija laikoma tinkama proceso būsenai vertinti.

Tekinant paviršius formuojamas santykinė pjovimo briaunos trajektorija ruošinio atžvilgiu. Klasikiniai darbai parodė, kad įrankio virpesiai gali tiesiogiai veikti gautą paviršiaus profilį [4]. Normalinės arba radialinės krypties poslinkis ypač svarbus todėl, kad ši dedamoji keičia efektyvų įrankio ir paviršiaus atstumą. Jeigu tokio poslinkio lygis didėja, tikėtinas ir šiurkštumo parametru didėjimas.

Naujesni tyrimai patvirtina, kad paviršiaus šiurkštumas gali būti vertinamas iš vibracinių signalų taikant signalų skaidymą, statistinius požymius arba regresinius modelius [5], [6]. Tačiau tokiems metodams dažnai reikia tankesnio duomenų surinkimo ir didesnio požymių skaičiaus. Šiame tyrime pasirinktas siauresnis klausimas: kiek naudingas gali būti vienas žemadažnis, fiziškai interpretuojamas poslinkio indikatorius.

Šiame kontekste galima išskirti tris metodų grupes. Pirmoji remiasi geometrinėmis ir technologinėmis šiurkštumo priklausomybėmis, kai pagrindinis dėmesys skiriamas padavai, pjovimo greičiui, pjovimo gyliui ir įrankio viršūnės spinduliui. Antroji grupė paviršiaus būseną sieja su vibraciniais arba akustiniais signalais, kurie jautriai reaguoja į įrankio, ruošinio ir laikiklio sistemos dinaminę elgseną [4], [6], [10]. Trečioji grupė taiko statistinius arba mašininio mokymosi modelius, kuriems paprastai reikia didesnio požymių skaičiaus, platesnio duomenų rinkinio ir nepriklausomos validacijos [6], [11]. Šio straipsnio vieta šioje literatūroje yra siauresnė: čia vertinamas ne universalus prognozavimo modelis, o vieno žemadažnio ir fiziškai interpretuojamo radialinio poslinkio rodiklio taikymas kaip vietinės procesinės priežiūros kriterijus.

Aliuminio lydinių apdirbimo atveju papildomą reikšmę turi medžiagos specifiškumas. Aliuminio lydiniai skiriasi nuo plienų jėgų lygiu, drožlės formavimusi, sukibimo tendencijomis ir šiluminiu elgesiu, todėl vienoje medžiagoje gauta priklausomybė negali būti mechaniškai perkeliama kitai [7]. Dėl to straipsnyje sąmoningai išlaikoma siaura galiojimo sritis – EN AW-2011 lydinio baigiamasis tekinimas konkrečioje staklių, įrankio ir jutiklio sąrankoje.

Metodiniu požiūriu poslinkio juostos nelaikomos savarankiškai validuotu klasifikavimo modeliu. Jos traktuojamos kaip ištisinės regresinės kalibracijos diskretizavimas į tris technologui lengviau interpretuojamas būsenas: mažesnės, pereinamosios ir padidėjusios šiurkštumo rizikos. Toks pateikimas yra praktiškas, tačiau privalo būti siejamas su kalibracijos rodikliais ir aiškiai nurodyta taikymo riba.

## 2. Tyrimo metodika

Šiame skyriuje naudojama autorių anksčiau surinkta ir išplėstinėje kalibracinėje analizėje aprašyta eksperimentinė medžiaga [1]. Dabartinis straipsnis nėra visos pirminės analizės pakartojimas; jame ta pati sinchronizuotų  $V$ ,  $R_a$  ir  $R_z$  įrašų bazė interpretuojama siauresniu praktiniu aspektu – kaip trijų radialinio poslinkio juostų taikymo procesinei paviršiaus šiurkštumo priežiūrai schema. Skaičiavimai atlikti pagal autorių sudarytą duomenų valymo, aprašomosios statistikos, koreliacijos, tiesinės regresijos ir juostinio grupavimo eigą, remiantis bendraisiais inžinerinės statistikos principais [9].

### 2.1. Eksperimentinė bazė

Analizuojamas duomenų masyvas gautas tekinant EN AW-2011 aliuminio lydinio ruošinius CQ6230 precizinėmis universaliosiomis tekinimo staklėmis. Įrankio sistemą sudarė laikiklis SCLCR 2020K12 su plokšte CCGT 120404-AL. Ruošinio vardinis skersmuo buvo 40 mm, ilgis – 120 mm, o išsikūlimas iš griebtuvo – 70 mm. Eksperimentinė sąranka traktuojama kaip viena kontroliuojama baigiamojo tekinimo kampanija, todėl rezultatai neinterpretuojami kaip platus nepriklausomų režimų palyginimas.

Radialinės krypties *peak-to-peak* poslinkis  $V$  matuotas nešiojamuoju VB-8206SD analizatoriumi, tvirtintu prie įrankio laikiklio ir orientuotu radialiai ruošinio atžvilgiu. Toks jutiklio orientavimas pasirinktas todėl, kad radialinė kryptis tekinime atitinka originalioje kalibracinėje analizėje vartotą normalinės krypties interpretaciją ir geriausiai apibūdina įrankio bei formuojamo paviršiaus santykinį judėjimą. Paviršiaus kokybę vertinta kontaktine profilometrija, naudojant  $R_a$  ir  $R_z$  parametrus.

Duomenys registruoti kas 2 s, todėl nominalus diskretizavimo dažnis buvo 0,5 Hz, o Nyquist riba – 0,25 Hz. Dėl šios priežasties signalas netinka aukštadažnių *chatter* reiškinių diagnostikai. Šiame straipsnyje jis interpretuojamas tik kaip žemadažnis proceso būsenos ir lėto poslinkio lygio kitimo indikatorius.

### 2.2. Duomenų atranka ir kokybės kontrolė

Analizei naudotas 190 sinchronizuotų įrašų poskyris. Kiekvieną įrašą sudarė viena  $V$  reikšmė milimetrais ir jai priskirtos  $R_a$  bei  $R_z$  reikšmės mikrometrais. Šie įrašai traktuojami kaip laiko atžvilgiu išdėstyta sinchronizuota seka, o ne kaip 190 visiškai nepriklausomų pjovimo bandymų. Į analizę neįtraukti įrašai už šio sinchronizuoto intervalo ribų, todėl toliau pateikiamos aprašomosios

statistikos, regresijos, paklaidų ir juostų ribos apskaičiuotos tik iš šių 190 įrašų. Šis apribojimas svarbus vertinant statistinių rodiklių interpretaciją.

Prieš analizę buvo patikrinta duomenų struktūra: tuščios ar netaisyklingos eilutės, privalomų laukų buvimas, dešimtainės skirties formatai, akivaizdūs artefaktai ir galimi nulinių reikšmių ruožai. Šios patikros neparodė tokios klaidos būsenos, kuri paneigtų pagrindinius skaičiavimus. Aprašomosios statistikos ir regresijos skaičiavimams nebuvo taikomas papildomas glodinimas ar rankinis išskirčių šalinimas.

Atskiras nepriklausomas validacijos rinkinys šiame straipsnyje nenaudotas. Todėl toliau pateikiami regresijos rodikliai suprantami kaip vidinės, konkrečiai sąrankai būdingos kalibracijos kokybės rodikliai, o ne kaip įrodymas, kad modelis be naujos kalibracijos veiktų kitomis staklėmis, kitomis medžiagomis ar kitame pjovimo lange.

### 2.3. Statistinė analizė ir poslinkio juostų sudarymas

Pirmiausia apskaičiuotos  $V$ ,  $R_a$  ir  $R_z$  aprašomosios charakteristikos: vidurkis, standartinis nuokrypis, minimumas ir maksimumas. Toliau taikyta *Pearson* koreliacija ir mažiausių kvadratų tiesinė regresija, formuluojant kalibracines lygtis  $R_a = b_0 + b_1V$  ir  $R_z = c_0 + c_1V$ . Modelių kokybę apibūdinta koreliacijos koeficientu  $r$ , 95 proc. pasikliautinuoju intervalu, determinacijos koeficientu  $R^2$ , vidutine kvadratine paklaida RMSE ir vidutine absoliučiąja paklaida MAE.

Čia  $V$  reiškia radialinės krypties *peak-to-peak* poslinkį, mm;  $R_a$  – aritmetinį vidutinį paviršiaus šiurkštumo nuokrypį,  $\mu\text{m}$ ;  $R_z$  – didžiausių profilio aukščių parametą,  $\mu\text{m}$ ;  $b_0$  ir  $c_0$  – regresijos laisvuosius narius;  $b_1$  ir  $c_1$  – regresijos nuolydžio koeficientus. Koreliacijos koeficientas  $r$  apibūdina tiesinio ryšio kryptį ir stiprumą,  $PI$  reiškia pasikliautinąjį intervalą,  $R^2$  – determinacijos koeficientą, RMSE – vidutinę kvadratinę paklaidą, MAE – vidutinę absoliučiąją paklaidą,  $F$  – ANOVA statistikos reikšmę,  $p$  – statistinio reikšmingumo lygmenį, o  $\eta^2$  – efekto dydžio rodiklį.

Papildomai vertinta liekanų elgsena, siekiant patikrinti, ar stiprus tiesinis ryšys nėra aiškios kreivės, kelių izoliuotų taškų ar sistemingos paklaidos pasekmė. Ši diagnostika nepakeičia išorinės validacijos, tačiau padeda pagrįsti, kad nagrinėjamame duomenų intervale tiesinė kalibracija yra tinkama aprašomajam vertinimui.

Praktiniam taikymui  $V$  reikšmės suskirstytos į tris juostas pagal empirinę pasiskirstymo struktūrą. Žemoji juosta apima apatinę reikšmių dalį, vidurinė – centrinę dalį, o aukštoji – viršutinę reikšmių dalį. Taip gauti intervalai: 0,001–0,023 mm, 0,024–0,060 mm ir 0,061–0,112 mm. Tokia schema naudojama kaip regresinės kalibracijos supaprastinimas į tris procesines būsenas, o ne kaip universalus klasifikatorius. Juostų vidurkių atskyrimui papildomai taikyta vienfaktorinė dispersinė analizė (ANOVA), nes ji leidžia patikrinti, ar trijų procesinių būsenų šiurkštumo vidurkiai skiriasi daugiau, negu būtų paaiškinama bendra duomenų sklaida.

## 3. Tyrimo rezultatai

### 3.1. Bendra duomenų charakteristika

Analizuojamame 190 įrašų poskyryje radialinės krypties *peak-to-peak* poslinkis  $V$  kito nuo 0,001 iki 0,112 mm. Vidutinė  $V$  reikšmė buvo 0,0446 mm, o standartinis nuokrypis – 0,0256 mm. Tuo pačiu

laikotarpiu  $R_a$  reikšmės kito nuo 14,154 iki 16,906  $\mu\text{m}$ , o  $R_z$  – nuo 63,159 iki 74,961  $\mu\text{m}$ . Vidutinės reikšmės sudarė atitinkamai 15,283 ir 67,902  $\mu\text{m}$ .

Šie duomenys rodo pakankamą signalo ir šiurkštumo parametrų sklaidą, kad būtų prasminga vertinti jų tarpusavio sąsają. Kartu ši sklaida neperžengia vienos technologinės sąrankos ribų, todėl rezultatai toliau interpretuojami kaip vietinė kalibracija.

**1 lentelė. Analizuojamo 190 sinchronizuotų įrašų poskyrio aprašomoji statistika**

Rodiklis	Vidurkis	SD	Min.	Maks.
Radialinis poslinkis V, mm	0,0446	0,0256	0,001	0,112
$R_a$ , $\mu\text{m}$	15,283	0,622	14,154	16,906
$R_z$ , $\mu\text{m}$	67,902	2,708	63,159	74,961

### 3.2. Regresinė kalibracija

Stipriausias rezultatų pagrindas yra tiesinis ryšys tarp V ir paviršiaus šiurkštumo parametrų.  $R_a$  modeliui gauta lygtis  $R_a = 14,204 + 24,191V$ , o  $R_z$  modeliui –  $R_z = 63,207 + 105,253V$ . Determinacijos koeficientai atitinkamai siekė 0,9929 ir 0,9905. Tai rodo labai stiprią vidinę sąsają tarp radialinio poslinkio ir šiurkštumo nagrinėjamame duomenų rinkinyje.

Modelių paklaidos buvo mažos nagrinėjamo diapazono atžvilgiu:  $R_a$  modeliui RMSE = 0,052  $\mu\text{m}$ , MAE = 0,0419  $\mu\text{m}$ , o  $R_z$  modeliui RMSE = 0,264  $\mu\text{m}$ , MAE = 0,2091  $\mu\text{m}$ .  $R_a$  modelio RMSE sudarė apie 0,34 proc. nuo vidutinės  $R_a$  reikšmės, o  $R_z$  modelio RMSE – apie 0,39 proc. nuo vidutinės  $R_z$  reikšmės. Kadangi  $R_z$  jautriau reaguoja į profilio ekstremumus, jo absoliuti paklaida yra didesnė, tačiau santykis su V išlieka monotoniškas ir aiškus. Šie paklaidų dydžiai apibūdina vidinę kalibraciją 190 įrašų poskyryje, o ne išorinės validacijos tikslumą.

Praktiniu požiūriu regresijos nuolydžiai leidžia interpretuoti poslinkio pokytį technologine kalba: kiekvienas papildomas 0,01 mm V padidėjimas šiame duomenų rinkinyje siejosi maždaug su 0,242  $\mu\text{m}$   $R_a$  ir 1,053  $\mu\text{m}$   $R_z$  padidėjimu. Šis ryšys pagrindžia, kodėl V gali būti naudojamas kaip paprastas šiurkštumo būsenos indikatorius.

**2 lentelė. Tiesinės kalibracijos rodikliai**

Atsakas	Modelis	r	95 % PI r	R <sup>2</sup>	RMSE	MAE
$R_a$	$R_a = 14,204 + 24,191V$	0,9964	0,9953 – 0,9973	0,9929	0,052 $\mu\text{m}$	0,0419 $\mu\text{m}$
$R_z$	$R_z = 63,207 + 105,253V$	0,9952	0,9936 – 0,9964	0,9905	0,264 $\mu\text{m}$	0,2091 $\mu\text{m}$

Liekanų diagnostika papildomai parodė, kad  $R_a$  modelio liekanos kito maždaug nuo – 0,137 iki 0,149  $\mu\text{m}$ , o  $R_z$  modelio – nuo – 0,761 iki 0,925  $\mu\text{m}$ . Durbin-Watson statistika buvo 1,888  $R_a$  modeliui ir 2,024  $R_z$  modeliui, o Breusch-Pagan testo p reikšmės atitinkamai siekė 0,636 ir 0,346. Šie rodikliai nerodo stiprios pirmos eilės liekanų struktūros ar ryškios heteroskedastiškumo problemos, tačiau jie vis tiek turi būti suprantami kaip vidinės kalibracijos diagnostika, o ne išorinė validacija.

### 3.3. Poslinkio juostos ir šiurkštumo būsenos

Kad regresinį ryšį būtų lengviau taikyti procesinei priežiūrai,  $V$  reikšmės suskirstytos į tris praktines juostas. Žemojoje juostoje buvo 48 įrašai, vidurinėje – 94 įrašai, o aukštojoje – 48 įrašai. Toks suskirstymas atitinka empirinę reikšmių struktūrą ir leidžia išskirti apatinę, centrinę bei viršutinę poslinkio lygio dalį.

Žemojoje  $V$  juostoje vidutinės  $R_a$  ir  $R_z$  reikšmės buvo mažiausios – 14,512  $\mu\text{m}$  ir 64,547  $\mu\text{m}$ . Vidurinėje juostoje jos padidėjo iki 15,271  $\mu\text{m}$  ir 67,848  $\mu\text{m}$ . Aukštojoje juostoje gautos didžiausios reikšmės – 16,076  $\mu\text{m}$  ir 71,362  $\mu\text{m}$ . Taigi abiem šiurkštumo parametrams būdinga nuosekli didėjimo kryptis.

Procentinis juostų palyginimas papildomai parodo skirtumų mastą. Vidutinis  $R_a$ , pereinant iš žemosios  $V$  juostos į vidurinę, padidėjo nuo 14,512 iki 15,271  $\mu\text{m}$ , t. y. apie 5,23 proc. Pereinant iš vidurinės į aukštąją juostą  $R_a$  padidėjo dar apie 5,27 proc., o bendras skirtumas tarp žemosios ir aukštosios juostos sudarė apie 10,78 proc. Analogiška tendencija gauta ir  $R_z$  parametru: nuo žemosios iki vidurinės juostos  $R_z$  padidėjo apie 5,11 proc., nuo vidurinės iki aukštosios – apie 5,18 proc., o nuo žemosios iki aukštosios – apie 10,56 proc. Tai patvirtina, kad juostos atskiria ne tik statistiškai reikšmingas, bet ir technologiškai interpretuojamas šiurkštumo būsenas.

Ši monotoniška eiga yra svarbiausia juostinio vertinimo prielaida. Ji rodo, kad  $V$  juostos nėra tik atsitiktinis duomenų suskirstymas; jos atitinka skirtingus šiurkštumo lygius nagrinėjamoje sąrankoje. Vis dėlto šios ribos neturi būti perkeliamos į kitas sąlygas be naujos kalibracijos.

Papildomas vienfaktorinės dispersinės analizės patikrinimas patvirtino, kad trijų  $V$  juostų vidutinės  $R_a$  ir  $R_z$  reikšmės statistiškai reikšmingai skiriasi.  $R_a$  atveju gauta  $F(2,187) = 381,6$ ,  $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,803$ , o  $R_z$  atveju  $F(2,187) = 385,1$ ,  $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,805$ . Šie rodikliai rodo, kad juostų skirtumą lemia ne vien atsitiktinė sklaida; vis dėlto tai išlieka vidinės kalibracijos patikra, o ne išorinės klasifikacijos validacija.

**3 lentelė. Radialinio poslinkio juostos ir joms būdingos vidutinės šiurkštumo reikšmės**

Juosta	$V$ intervalas, mm	n	Vidutinis $R_a$ , $\mu\text{m}$	Vidutinis $R_z$ , $\mu\text{m}$
Žemoji	0,001 - 0,023	48	14,512	64,547
Vidurinė	0,024 - 0,060	94	15,271	67,848
Aukštoji	0,061 - 0,112	48	16,076	71,362

### 3.4. Reprezentatyvūs poslinkio lygiai

Papildomai kalibracinės lygtys pritaikytos keliems reprezentatyviems  $V$  lygiams. Kai  $V = 0,02$  mm, prognozuojamos reikšmės yra  $R_a = 14,687$   $\mu\text{m}$  ir  $R_z = 65,312$   $\mu\text{m}$ . Kai  $V = 0,10$  mm, jos padidėja iki  $R_a = 16,623$   $\mu\text{m}$  ir  $R_z = 73,732$   $\mu\text{m}$ . Šis skaičiavimas padeda operatoriui ar technologui susieti matuojamą poslinkį su tikėtinu šiurkštumo pokyčio mastu.

**4 lentelė. Pagalbinės prognozuotos šiurkštumo reikšmės esant reprezentatyviems radialinio poslinkio lygiams**

V, mm	Prognozuotas $R_a$ , $\mu\text{m}$	Prognozuotas $R_z$ , $\mu\text{m}$
0,02	14,687	65,312
0,04	15,171	67,417
0,06	15,655	69,522
0,08	16,139	71,627
0,10	16,623	73,732

#### 4. Rezultatų aptarimas

Gauti rezultatai rodo, kad vienas žemadažnis radialinės krypties *peak-to-peak* poslinkio rodiklis gali turėti praktinės informacijos apie paviršiaus šiurkštumo būseną, kai ši sąsaja patvirtinama vidinės kalibracijos ir formaliai patikrintų juostų lygmeniu konkrečioje baigiamojo tekinimo sąrankoje. Svarbu tai, kad šis teiginys remiasi ne tik trijų grupių vidurkių palyginimu, bet ir labai stipria vidine regresine kalibracija, mažomis paklaidomis, liekanų diagnostika.

Kartu būtina pabrėžti, kad tyrimas neįrodo universalios modelio. 190 įrašų yra sinchronizuota laiko seka iš vienos kontroliuojamos kampanijos, todėl jie neturi būti interpretuojami kaip 190 nepriklausomų pjovimo bandymų. Dėl šios priežasties aukšti  $R^2$  rodikliai rodo kalibracijos glaudumą šioje sąrankoje, bet ne savaiminį perkeliamumą į kitas sąlygas.

Juostinis pateikimas turi aiškia praktinę paskirtį. Operatorius dažniausiai priima ne regresinių koeficientų, o būsenų lygmens sprendimus: procesas stabilus, pereinamasis arba reikalaujantis didesnio dėmesio. Todėl žemoji, vidurinė ir aukštoji V juostos gali būti naudojamos kaip paprasta perspėjimo logika. Žemoji juosta reikštų mažesnės šiurkštumo rizikos būseną, vidurinė – stebėtiną pereinamąjį lygį, o aukštoji – poreikį dažniau tikrinti paviršių, įrankio būklę, tvirtinimą ar režimus.

Siūloma schema nepakeičia profilometrinio šiurkštumo matavimo. Ji gali padėti nuspręsti, kada tokį matavimą atlikti dažniau arba kada verta koreguoti technologinį procesą. Taip pat ji nepakeičia aukšto dažnio vibracijų diagnostikos, nes 2 s registravimo žingsnis leidžia stebėti tik lėtus proceso būsenos pokyčius. Todėl šio signalo negalima interpretuoti kaip *chatter* dažnių ar staklių savųjų formų analizės.

Praktinė metodo vertė už konkretaus eksperimento ribų yra ne pačių skaitinių ribų universalumas, o kalibravimo principas. Kitoje darbo vietoje reikėtų surinkti sinchronizuotus V,  $R_a$  ir  $R_z$  duomenis, patikrinti monotoninį ryšį, įvertinti paklaidas ir tik tada sudaryti konkrečiai sąrankai tinkamas juostas. Toks požiūris leidžia metodą taikyti atsakingai ir neperkelti vienos sąrankos ribų ten, kur jų statistinis pagrindas dar nepatikrintas.

Tolesni tyrimai turėtų būti nukreipti į pakartojamumo ir perkeliamumo patikrą. Pirmiausia reikėtų atlikti nepriklausomas kampanijas tose pačiose staklėse po įrankio pakeitimo ar pakartotinio jutiklio tvirtinimo. Vėliau būtų prasminga lyginti kitus aliuminio lydinius, konstrukcinius plienus, skirtingas laikiklio sąrankas ir kelių kanalų signalus. Tokie bandymai parodytų, kiek stabilus išlieka V ir šiurkštumo ryšys už vieno duomenų rinkinio ribų.

## 5. Išvados

1. Tyrimas parodė, kad radialinės krypties *peak-to-peak* poslinkis  $V$  gali būti taikomas kaip vietinis paviršiaus šiurkštumo būsenos indikatorius baigiamajame EN AW-2011 aliuminio lydinio tekinyje. Analizuotame 190 sinchronizuotų įrašų poskyryje nustatyta labai stipri vidinė  $V$  sąsaja su  $R_a$  ir  $R_z$  parametrais, o tiesinės kalibracijos rezultatai patvirtino, kad poslinkio didėjimas nagrinėjamoje sąrankoje nuosekliai atspindi šiurkštumo didėjimą.

2. Praktiniu požiūriu svarbiausia tai, kad ištisinis regresinis ryšys gali būti supaprastintas į tris technologiškai interpretuojamas poslinkio juostas. Žemoji, vidurinė ir aukštoji  $V$  juostos atitiko nuosekliai didėjančias vidutines  $R_a$  ir  $R_z$  reikšmes, o statistinė patikra patvirtino šių skirtumų reikšmingumą. Todėl tokia juostinė schema gali būti naudojama kaip konkrečiai sąrankai kalibruota procesinės priežiūros priemonė, padedanti atpažinti mažesnės, pereinamosios ir padidėjusios šiurkštumo rizikos būsenas.

3. Kartu būtina pabrėžti, kad gautos ribos nėra universalios. Tyrimas atliktas vienoje staklių, įrankio, jutiklio ir medžiagos sąrankoje, naudojant vieną sinchronizuotą duomenų seką, todėl platesniam metodo taikymui reikalingi pakartotiniai bandymai ir nepriklausoma validacija. Be to, dėl 2 s registravimo žingsnio metodas tinkamas tik lėtiems proceso būsenos pokyčiams stebėti ir nėra skirtas aukštadažnių *chatter* reiškinių diagnostikai.

## Radial-Direction Peak-to-Peak Displacement Intervals as a Process-Supervision Criterion for Surface Roughness in Finish Turning of EN AW-2011 Aluminium Alloy

### Summary

This article presents a practical process-supervision interpretation of a broader calibration analysis that relates low-frequency radial (i.e., normal-direction) peak-to-peak displacement to surface roughness in finish turning of EN AW-2011 aluminum alloy. The study uses only a 190-record synchronized displacement-roughness analysis subset obtained in one controlled machine-tool-sensor setup. The regression calibration showed very strong within-dataset relations:  $R_a = 14,204 + 24,191V$  ( $R^2 = 0,9929$ ,  $RMSE = 0,052 \mu\text{m}$ ) and  $R_z = 63,207 + 105,253V$  ( $R^2 = 0,9905$ ,  $RMSE = 0,264 \mu\text{m}$ ). For operational interpretation, displacement values were divided into three empirical bands: low, medium, and high. Mean roughness increased monotonically across these bands, from  $R_a = 14,512 \mu\text{m}$  and  $R_z = 64,547 \mu\text{m}$  in the low band to  $R_a = 16,076 \mu\text{m}$  and  $R_z = 71,362 \mu\text{m}$  in the high band. An additional one-way ANOVA confirmed statistically significant differences between the bands ( $p < 0,001$ ). The results support the use of displacement bands as a setup-specific warning logic for roughness-related supervision. However, the bands should not be treated as universal limits, because the data represent one time-ordered calibration sequence, and no independent validation set was used.

**Keywords:** turning; surface roughness; EN AW-2011; peak-to-peak displacement; vibration monitoring; process supervision.

### Literatūra

1. JACKUVIENĖ, R.; KARPAVIČIUS, R. Normal-Direction Peak-to-Peak Displacement as a Low-Frequency Indicator of Surface Roughness in Finish Turning of EN AW-2011 Aluminum Alloy. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2026, vol. 10, art. 135. <https://doi.org/10.3390/jmmp10040135>.
2. BENARDOS, P. G.; VOSNIAKOS, G.-C. Predicting surface roughness in machining: a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, vol. 43, no. 8, p. 833-844.
3. TRINH, V.-L. A Review of the Surface Roughness Prediction Methods in Finishing Machining. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 2024, vol. 14, no. 4, p. 15297–15304. <https://doi.org/10.48084/etasr.7710>.

4. SATA, T.; LI, M.; TAKATA, S.; HIRAOKA, H.; LI, C. Q.; XING, X. G.; XIAO, X. G. Tool vibration and its influence on surface roughness in turning. *Wear*, 1975, vol. 35, no. 1, p. 149-157.
5. YAO, Z.; ZHANG, P.; LUO, M. Extreme learning machine oriented surface roughness prediction at continuous cutting positions based on monitored acceleration. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, vol. 219, art. 111633. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111633>.
6. CHEN, J.; LIN, J.; ZHANG, M.; LIN, Q. Predicting surface roughness in turning complex-structured workpieces using vibration-signal-based Gaussian process regression. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 7, art. 2117.
7. DUDZIK, K.; LABUDA, W. The influence of the machining parameters of AW-7020 aluminum alloy shafts on the surface roughness, cutting forces, and acoustic emission signal. *Materials*, 2025, vol. 18, no. 9, art. 1992.
8. ALTINTAS, Y. *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
9. MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; HUBELE, N. F. *Engineering Statistics*. 5th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.
10. BOUCHAMA, R.; BOUHALAIS, M. L.; CHERFIA, A. Surface roughness and tool wear monitoring in turning processes through vibration analysis using PSD and GRMS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, vol. 130, p. 3537–3552. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12742-x>.
11. HORVÁTH, R.; DRÉGELYI-KISS, Á.; KÖVÉR, J.; BAJCSÁK, G.; HUNGER, D. Prediction of surface roughness in turning applying the vibration sensor data and random forest. *Mathematics*, 2022, vol. 10, no. 17, art. 3214.
12. ISO 4288:1996. *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture*. Geneva: International Organization for Standardization, 1996.
13. ISO 21920-1:2021. *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile - Part 1: Indication of surface texture*. Geneva: International Organization for Standardization, 2021.