

Vibraciniais signalais grindžiamas tekinamo paviršiaus šiurkštumo vertinimas: metodikos adaptacija ir taikymo ribos tekinant aliuminio lydinius

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 analizuojama, kokiomis sąlygomis žemo dažnio normalinės krypties vibracinis poslinkis gali būti taikomas kaip tekinamo paviršiaus šiurkštumo proceso būsenos indikatorius. Darbas parengtas kaip metodinė-taikomoji analizė, paremta anksčiau publikuoto eksperimentinio tyrimo atveju, kuriame EN AW-2011 aliuminio lydinio baigiamojo tekinimo metu buvo sinchroniškai vertinti normalinės krypties *peak-to-peak* poslinkio ir paviršiaus šiurkštumo R_a bei R_z rodikliai. Straipsnio tikslas nėra pateikti universalų šiurkštumo prognozavimo modelį, siekiama kritiškai susisteminti, kada tokia mažo sudėtingumo vibracinės stebėsenos schema yra metodiškai pagrįsta, kokių ribų ji turi ir kaip ji turėtų būti siejama su profilometrine validacija. Konkrečioje EN AW-2011 sąrankoje, taikant 190 sinchronizuotų stebinių porų analitinę imtį, gauta vidinė kalibracija parodė stiprų ryšį su R_a ir R_z : R_a modeliui $R^2 = 0,9929$ ir $RMSE = 0,052 \mu m$, R_z modeliui $R^2 = 0,9905$ ir $RMSE = 0,264 \mu m$. Parodoma, kad patikimiausia taikymo logika yra sąrankai būdinga kalibracija: vibracinis rodiklis interpretuojamas atsižvelgiant į medžiagą, įrankį, jutiklio kryptį, staklių standumą ir duomenų diskretizavimo ribas.

Pagrindiniai žodžiai: tekinimas; paviršiaus šiurkštumas; R_a ; R_z ; vibracija; aliuminio lydiniai; proceso stebėseną; žemo dažnio matavimai

Įvadas

Tekinimas išlieka viena svarbiausių apdirbimo technologijų, kai reikia tiksliai suformuoti sukimosi paviršius, išlaikyti geometrinius matmenis ir užtikrinti funkciškai tinkamą paviršiaus būklę. Paviršiaus šiurkštumas paprastai siejamas ne tik su estetinė paviršiaus kokybe, bet ir su trintimi, sandarumu, nuovargio stipriu, dangų sukibimu, sandarinimo elementų darbu ir vėlesnėmis surinkimo operacijomis. Dėl šios priežasties R_a ir R_z rodikliai technologijos moksluose išlieka svarbūs galutinės kokybės kriterijai [1],[4].

Tradicinėje gamybos kontrolėje šiurkštumas dažniausiai vertinamas jau pasibaigus pjovimo eigai. Toks metodas yra metrologiškai patikimas, tačiau reaktyvus: nukrypimas nustatomas tada, kai detalė jau pagaminta arba beveik pagaminta. Todėl proceso metu registruojami netiesioginiai signalai, ypač vibracija, yra svarbūs kaip ankstyvieji būsenos pokyčių indikatoriai [2], [5], [6].

Vis dėlto vien ryšio tarp vibracijos ir paviršiaus būklės buvimas dar nereiškia, kad bet koks vibracinis matmuo savaime tinka šiurkštumui prognozuoti. Matavimo rezultatas priklauso nuo jutiklio krypties, montavimo vietos, dažnių juostos, staklių ir įrankio sistemos standumo, ruošinio medžiagos, pjovimo režimų ir pasirinkto signalo apdorojimo būdo [3], [4], [7]. Ši aplinkybė ypač svarbi, kai laboratorinė aukštos spartos matavimo sistema keičiama paprastesniu jutikliu, skirtu taikomajai ar mokymo laboratorijų aplinkai.

Ankstesni paviršiaus šiurkštumo stebėsenos tyrimai tekinime daugiausia plėtojami trimis kryptimis: vibracijos signalų ir šiurkštumo rodiklių koreliacijos nustatymu, laiko arba laiko-dažnio požymių taikymu ir duomenų valdomais prognozavimo modeliais. Vibracinių signalų analizė leidžia proceso metu stebėti paviršiaus būklės pokyčius, tačiau tokio ryšio tikslumas priklauso nuo jutiklio krypties, tvirtinimo vietos, duomenų diskretizavimo, įrankio geometrijos, ruošinio medžiagos ir pjovimo režimų [5], [6], [7]. Todėl ankstesnių tyrimų rezultatai neturi būti automatiškai perkelti kitoms tekinimo sąrankoms be papildomos validacijos.

Šio straipsnio indėlis siejamas ne su naujo universalaus prognozavimo algoritmo sukūrimu, o su praktinės taikymo ribos suformulavimu. Straipsnyje parodoma, kada paprastas žemo dažnio normalinės krypties poslinkio rodiklis gali būti naudojamas kaip sąrankinis šiurkštumo tendencijos indikatorius, kokį skaitinį tikslumą jis pasiekia konkrečioje EN AW-2011 tekinimo sąrankoje ir kodėl tokia schema turi būti siejama su tiesiogine profilometrine patikra.

Straipsnyje keliama problema formuluojama taip: kokie metodiniai sprendimai leidžia žemo sudėtingumo vibracinius signalus naudoti ne deklaratyviai, o patikimai, kai siekiama vertinti tekinamo paviršiaus šiurkštumo kitimo tendenciją? Straipsnio tikslas – kritiškai išanalizuoti vibraciniais signalais grindžiamo šiurkštumo vertinimo metodiką ir suformuluoti jos taikymo ribas aliuminio lydinių tekinimo atveju.

Uždaviniai: 1) paaiškinti šiurkštumo ir normalinės krypties vibracinio poslinkio fizinių ryšių; 2) kritiškai palyginti jutiklių ir signalo apdorojimo metodų tinkamumą skirtingoms stebėsenos užduotims; 3) įvertinti žemo dažnio matavimų taikymo ribą aliuminio lydinių tekinimo atveju; 4) pateikti metrologinio susiejimo ir praktinio taikymo rekomendacijas.

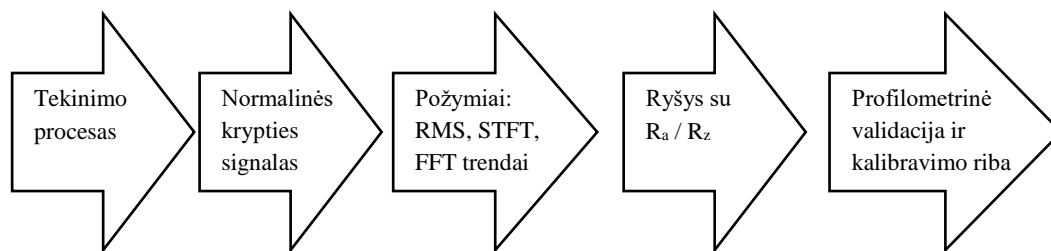
Šiame tekste vartojamos santrumpos pirmą kartą paaiškinamos jų paminėjimo vietoje: FFT – greitoji Furjė transformacija, STFT – trumpalaikė Furjė transformacija, EMD – empirinė modų dekompozicija, CEEMDAN – pilno ansamblio empirinė modų dekompozicija su adaptyviu triukšmu, GPR – Gauso procesų regresija, RMS – kvadratinis vidurkis, RMSE – šaknies iš vidutinės kvadratinės paklaidos rodiklis, MAE – vidutinė absoliutinė paklaida. Angliškas terminas *chatter* šiame straipsnyje vartojamas tik paaiškinus jį kaip savaiminius arba regeneracinius pjovimo virpesius.

1. Tyrimo pobūdis ir metodinis pagrindas

Straipsnis parengtas kaip metodinė-taikomoji analizė, o ne kaip bendra literatūros apžvalga. Jo analizės pagrindas yra anksčiau atliktas eksperimentinis EN AW-2011 aliuminio lydinių tekinimo tyrimas, kuriame buvo nagrinėtas normalinės krypties *peak-to-peak* poslinkio ryšys su R_a ir R_z rodikliais [10]. Minėtame tyrime naudota CQ6230 tekinimo staklių sąranka, SCLCR 2020K12 laikiklis su CCGT 120404-AL plokšte, VB-8206SD poslinkio registratorius, pritvirtintas radialine kryptimi ant įrankio laikiklio, ir kontaktinė profilometrija.

Eksperimentiniame atvejuje skaitinė analizė grindžiama 190 sinchronizuotų vibracijos ir šiurkštumo stebinių porų. Būtent ši $n = 190$ analitinė imtis naudojama regresijos koeficientams, determinacijos koeficientams ir paklaidų rodikliams interpretuoti šiame straipsnyje. Kiekvienas įrašas buvo registruojamas kas 2 s, todėl diskretizavimo dažnis sudarė 0,5 Hz, o Nyquist riba – 0,25 Hz [10]. Tai reiškia, kad tokia sistema negali būti interpretuojama kaip aukšto dažnio virpesių ar savaiminių pjovimo virpesių diagnostikos priemonė. Jos metodinė paskirtis siauresnė: aprašyti lėtą proceso būsenos kitimą ir susieti jį su konkrečios sąrankos paviršiaus šiurkštumo rodikliais.

Toliau straipsnyje šis eksperimentinis atvejis naudojamas kaip metodinis pagrindas ir taikymo ribų iliustracija. Visa analizė grindžiama prielaida, kad vibracinis rodiklis tampa technologiniu indikatoriumi tik tada, kai jis aiškiai susietas su matavimo kryptimi, paviršiaus segmentu, kalibravimo sąlygomis ir tiesioginiu šiurkštumo matavimu. Ši logika apibendrinta 1 paveiksle.



1 pav. Vibracinės šiurkštumo stebėsenos metodinė schema ir interpretavimo riba

1 paveiksle parodyta, kad vibracinis signalas nėra savarankiškas paviršiaus šiurkštumo matas. Jis tampa prasmingas tik kaip tarpinis proceso būsenos rodiklis, kuris turi būti paverčiamas signalo požymiais, siejamas su R_a ir R_z bei periodiškai tikrinamas profilometru. Tokia schema leidžia atskirti proceso stebėseną nuo galutinės metrologinės kontrolės ir nepervertinti žemo dažnio matavimo galimybių.

2. Paviršiaus šiurkštumo ir vibracijos ryšio fizinė logika

Paviršiaus šiurkštumas tekiant nėra vien geometrinė pastūmos ir įrankio viršūnės spindulio pasekmė. Idealizuotu atveju paviršiaus profilis gali būti siejamas su teoriniu tiekimo pėdsaku, tačiau realioje procese jį keičia elastingos deformacijos, įrankio svyravimai, drožlės formavimosi nestabilumai, lokali medžiagos plastinė deformacija ir šiluminiai efektai [1],[4]. Todėl išmatuotas R_a ar R_z rodiklis visuomet yra ne tik geometrijos, bet ir proceso dinamikos rezultatas.

Tekinimo atveju ypač svarbi radialinė arba normalinė judesio dedamoji. Kai įrankio laikiklis arba ruošinio–įrankio sistema pasislenka normaline kryptimi, keičiasi faktinis atstumas tarp pjovimo briaunos ir jau formuojamo paviršiaus. Net jei toks poslinkis nėra didelis, jis gali pakeisti lokalią profilio aukščio struktūrą ir atsispindėti šiurkštumo parametruose [4], [9].

R_a ir R_z į vibracinį poveikį reaguoja nevienodai. R_a apibūdina vidutinį profilio nuokrypį ir yra tinkamas bendrai paviršiaus būklei vertinti. R_z labiau atspindi viršūnių ir įdubų mastą, todėl gali jautriau reaguoti į lokalius profilio iškraipymus. Dėl šios priežasties vibracinio rodiklio ryšys su R_z kai kuriais atvejais gali būti didesnis arba aiškiau interpretuojamas negu ryšys su R_a [1], [5], [10].

Svarbu atskirti dvi sąvokas. Savaiminiai arba regeneraciniai pjovimo virpesiai (angl. *chatter*) yra aukšto dažnio nestabilumo reiškinys, dažniausiai reikalaujantis didesnės diskretizavimo spartos ir platesnės dažnių juostos. Žemo dažnio poslinkio signalas, registruojamas kas kelias sekundes, tokio reiškinio tiesiogiai neaprašo. Vis dėlto jis gali būti informatyvus kaip lėtos būsenos kaitos indikatorius: pavyzdžiui, kai keičiasi kontakto sąlygos, įrankio apkrova, standumo panaudojimas ar medžiagos – įrankio sąveika.

3. Jutiklių ir signalo apdorojimo metodų kritinis palyginimas

Vibracinių signalų taikymas šiurkštumo stebėsenai priklauso ne tik nuo pasirinkto algoritmo, bet pirmiausia nuo to, kokią fizikinę reiškinį matuoja jutiklis. Dėl to jutiklio pasirinkimas turi būti siejamas su konkrečiu klausimu: ar siekiama aptikti savaiminius pjovimo virpesius, ar stebėti lėtą šiurkštumo kitimo tendenciją, ar vertinti įrankio dėvėjimosi požymius [8]. 1 lentelėje pateiktas ne bendras jutiklių pranašumų sąrašas, o jų taikymo ribų palyginimas.

1 lentelė. Jutiklių ir modelių taikymo ribos šiurkštumo stebėsenos užduotyse

Metodinis sprendimas	Kada tinkamas	Pagrindinė riba	Taikymo išvada
Aukštadažnis akselerometras	Kai reikia tirti rezonansus, savaiminius pjovimo virpesius ir greitus dinaminius reiškinius.	Reikia didesnės duomenų spartos, filtravimo ir sudėtingesnės interpretacijos.	Tinka diagnostikai, bet ne visada racionalus mažos infrastruktūros stebėsenai.
Greičio arba poslinkio jutiklis	Kai siekiama aiškiai interpretuojamo proceso būsenos indikatorius.	Ribota dažnių juosta; negalima daryti išvadų apie nematomus aukšto dažnio reiškinius.	Tinka šiurkštumo tendencijai, jei kryptis ir kalibravimo riba aiškiai apibrėžtos.
Jėgos matuoklis	Kai reikia tiesiogiai vertinti pjovimo apkrovą.	Brangesnis ir sudėtingiau integruojamas į įprastą tekinimo aplinką.	Vertingas kaip tyriminis etalonas, bet ne visada praktiškas kasdieniam taikymui.
Akustinė emisija	Kai svarbūs kontaktiniai mikroįvykiai ir ankstyvi įrankio dėvėjimosi požymiai.	Reikia aukštos kokybės duomenų rinkimo ir triukšmo kontrolės.	Gali papildyti vibraciją, bet didina sistemos sudėtingumą.
Duomenų valdomi modeliai, pvz., GPR, SVM, neuroniniai tinklai	Kai turima pakankamai duomenų ir nepriklausoma validacija.	Perkalibravimo, pertaikymo vienai sąrankai ir paaiškinamumo rizika.	Naudotini tik tada, kai papildomas tikslumas viršija sudėtingumo kainą.

1 lentelės palyginimas rodo, kad metodas neturėtų būti vertinamas vien pagal teorinį tikslumą. Aukštadažnė sistema gali būti būtina nestabilumui diagnozuoti, tačiau paprastesnis normalinės krypties poslinkio jutiklis gali būti racionalesnis tada, kai užduotis yra lėtos šiurkštumo tendencijos stebėseną. Ši skirtis yra esminė, nes ji neleidžia riboto dažninio diapazono signalo interpretuoti plačiau, negu leidžia matavimo grandinė.

Signalų apdorojimo požiūriu laiko srities rodikliai, tokie kaip RMS, standartinis nuokrypis ar *peak-to-peak* amplitudė, yra lengvai palaikomi ir aiškiai susiejami su praktiniais slenksčiais. FFT ir STFT metodai leidžia aprašyti dažninę struktūrą ir jos kitimą laike, tačiau jų prasmė tiesiogiai priklauso nuo diskretizavimo dažnio. Kai duomenys registruojami kas 2 s, FFT ir STFT gali būti naudojami tik lėtos moduliacijos aprašymui, o ne aukštadažnių virpesių diagnostikai. Sudėtingesni metodai, tokie kaip EMD, CEEMDAN ar GPR, gali pagerinti modelio atitikimą duomenims, tačiau jų taikymas turi būti grindžiamas nepriklausoma validacija, kitaip kyla perkaliibravimo vienai sąrankai rizika [6], [7].

4. Aliuminio lydinių tekinimo specifika ir žemo dažnio matavimų validumas

Aliuminio lydinių tekinimas negali būti laikomas tik lengvesne plienų apdirbimo versija. Šios medžiagos paprastai pasižymi mažesniais pjovimo jėgomis, tačiau paviršiaus būklei didelę įtaką turi įrankio aštrumas, prilipimo ir briaunos susidarymo reiškiniai, šilumos sklaida, plastiškumas ir lokali kontaktinės sąlygos [11], [12], [13]. Todėl kalibracija, gauta vienam aliuminio lydiniui ar vienai įrankio geometrijai, negali būti automatiškai perkeliama kitam lydiniui ar kitai staklių sąrankai.

Šiuo požiūriu EN AW-2011 atvejis yra naudingas kaip metodikos iliustracija, bet ne kaip universali medžiagų grupės taisyklė. Ankstesniame eksperimentiniame tyrime nustatyta, kad

konkrečioje sąrankoje normalinės krypties *peak-to-peak* poslinkis V turėjo stiprų vidinį ryšį su šiurkštumo rodikliais: $R_a = 14,204 + 24,191 V$ ir $R_z = 63,207 + 105,253 V$, atitinkamai su $R^2 = 0,9929$ ir $R^2 = 0,9905$ [10]. Šie rezultatai rodo labai aiškią kalibravimo priklausomybę konkrečioje sąrankoje, tačiau jie neturi būti pateikiami kaip universali prognozinė formulė. Skaitinis šios kalibracijos tikslumas ir paklaidų interpretavimo riba pateikiami 4.1 poskyryje.

Šio atvejo metodinė vertė yra ne vien aukštas determinacijos koeficientas, bet aiškiai įvardyta interpretavimo riba. 190 įrašų sudarė sinchronizuotą laiko seką, o ne 190 nepriklausomų pjovimo bandymų [10]. Be to, nebuvo atskiro išorinio validavimo rinkinio. Todėl toks modelis turi būti suprantamas kaip aprašomoji konkrečios sąrankos kalibracija, tinkama proceso būsenos indikacijai ir perspėjimo slenksčiams, bet ne kaip universaliai perkeliamas prognozavimo modelis.

Žemo dažnio signalų taikymas yra pagrįstas tada, kai klausimas formuluojamas atitinkamai siaurai: ar procesas juda į didesnio poslinkio, todėl tikėtina didesnio šiurkštumo, būseną? Jeigu klausimas būtų kitas – pavyzdžiui, ar vyksta aukštadažniai regeneraciniai virpesiai – tokia matavimo grandinė būtų nepakankama. Būtent šis klausimo ir matavimo grandinės suderinimas lemia metodo patikimumą.

4.1. Kalibravimo rezultatai ir paklaidų vertinimas

Kadangi recenzuojamo straipsnio paskirtis yra metodinė-taikomoji, skaitinis rezultatas pateikiamas kaip vidinė konkrečios sąrankos kalibracija, o ne kaip išorinio prognozavimo modelio validacija. Paklaidos vertintos pagal tą pačią 190 sinchronizuotų poslinkio ir šiurkštumo stebinių porų analitinę imtį. Ši interpretacija svarbi todėl, kad stebiniai sudaro laiko seką, o ne atskirų nepriklausomų pjovimo bandymų rinkinį.

2 lentelė. EN AW-2011 sąrankos vidinės kalibracijos skaitiniai rezultatai ir paklaidų įvertis, kai $n = 190$

Rodiklis	Kalibravimo lygtis	R^2	RMSE	Santykinė RMSE nuo vidurkio	Interpretacija
R_a	$R_a = 14,204 + 24,191 V$	0,9929	0,052 μm	apie 0,34 %	Tinkama sąrankinei šiurkštumo tendencijos indikacijai
R_z	$R_z = 63,207 + 105,253 V$	0,9905	0,264 μm	apie 0,39 %	Tinkama sąrankinei šiurkštumo tendencijos indikacijai

2 lentelėje pateikti rodikliai rodo, kad normalinės krypties *peak-to-peak* poslinkis konkrečioje sąrankoje gali būti naudojamas kaip ankstyvas šiurkštumo tendencijos indikatorius. R_a modeliui RMSE sudarė 0,052 μm , o R_z modeliui – 0,264 μm ; santykinai tai sudaro apie 0,34 proc. ir 0,39 proc. nuo vidutinių atitinkamų šiurkštumo reikšmių. Vis dėlto šios paklaidos apibūdina vidinę sąrankinę kalibraciją, todėl jų negalima laikyti universaliu tikslumu, pasiekiamu pakeitus medžiagą, įrankį, stakles, jutiklio tvirtinimą ar pjovimo režimų intervalą.

5. Metrologinis susiejimas, validacija ir praktinės rekomendacijos

Netiesioginis vibracinis rodiklis tampa paviršiaus kokybės stebėsenos priemone tik tada, kai jo ryšys su tiesioginiu matavimu yra patikrintas profilometrija. Dėl to negalima teigti, kad vibracija pakeičia šiurkštumo matavimą. Tiksliau sakant, vibracija gali sumažinti akląją zoną tarp pjovimo proceso ir pooperacinės kontrolės, tačiau metrologinis patvirtinimas turi išlikti. Tai ypač svarbu taikomojoje aplinkoje, kur sprendimai turi būti ne tik patogūs, bet ir atsekami.

Validuojant tokį metodą būtina įvardyti bent keturias sąlygas: kuri šiurkštumo metrika laikoma atskaitos kintamuoju, kokia yra profilometro matavimo procedūra, kokia signalo atkarpa siejama su paviršiaus segmentu ir kokiose medžiagos – įrankio – staklių ribose galioja kalibracija. 3 lentelėje šios sąlygos susistemintos kaip praktinės rekomendacijos.

3 lentelė. Praktinės žemo dažnio vibracinės stebėsenos taikymo rekomendacijos

Praktinis klausimas	Rekomenduojamas sprendimas	Kodėl tai svarbu
Kaip pradėti mažos infrastruktūros aplinkoje?	Naudoti vieną kryptinį poslinkio arba greičio jutiklį ir vieną aiškų požymį, pvz., <i>peak-to-peak</i> arba RMS.	Mažina metodo sudėtingumą ir leidžia lengviau patikrinti fizinę prasmę.
Kaip atskirti šiurkštumo stebėseną nuo savaiminių virpesių diagnostikos?	Žemo dažnio signalą naudoti tik lėtai proceso būsenos kaitai, o aukštadažnei diagnostikai taikyti akselerometrą ir platesnę dažnių juostą.	Apsaugo nuo nepagrįstų išvadų apie reiškinius, kurių jutiklis nemato.
Kada reikia pakartotinės kalibracijos?	Pakeitus medžiagą, įrankį, įrankio laikiklį, jutiklio tvirtinimą, staklių sąranką ar pjovimo režimų langą.	Ryšys tarp vibracijos ir šiurkštumo yra sąrankinis, todėl koeficientai nėra universalūs.
Kaip palaikyti metrologinį patikimumą?	Periodiškai lyginti vibracinio rodiklio prognozuojamą tendenciją su kontaktine profilometrija.	Užtikrina, kad netiesioginė stebėseną neprarastų ryšio su realiu paviršiaus matavimu.
Kada verta taikyti sudėtingesnius modelius?	Tik turint pakankamą duomenų kiekį, nepriklausomą validavimo rinkinį ir aiškų veikimo kriterijų.	Padedą išvengti situacijos, kai statistiškai geras modelis nėra patikimas perkėlimo sąlygomis.

3 lentelėje pateiktos rekomendacijos rodo, kad metodo patikimumas priklauso ne nuo vieno algoritmo, o nuo visos matavimo ir interpretavimo grandinės. Paprasta sistema gali būti pakankama, jei ji skirta aiškiai apibrėžtai užduočiai. Tačiau ta pati sistema tampa nepatikima, jei ja bandoma daryti išvadas apie aukšto dažnio reiškinius arba taikyti vienos sąrankos regresijos koeficientus kitoms medžiagoms.

6. Diskusija: metodinės reikšmės ir taikymo ribos

Literatūros ir EN AW-2011 atvejo analizė leidžia išskirti tris metodines įžvalgas. Pirma, vibracijos ir šiurkštumo ryšys nėra universali koreliacija. Jis atsiranda dėl konkretaus fizinio mechanizmo – įrankio ir ruošinio santykinio judesio, kuris tam tikromis sąlygomis keičia formuojamo paviršiaus profilį. Todėl stipresnę aiškinamąją vertę turi tie signalai, kurių kryptis sutampa su paviršiaus formavimo logika, ypač normalinė arba radialinė dedamoji [4], [9], [10].

Antra, didesnis modelio sudėtingumas savaime nėra pranašumas. Modernūs duomenų valdomi metodai gali duoti gerus statistinius rodiklius, tačiau jie reikalauja pakankamai duomenų, nepriklausomos validacijos ir aiškių perkėlimo taisyklių [6], [7]. Mažos infrastruktūros aplinkoje paprastesnis ir fiziškai suprantamas rodiklis gali būti naudingesnis už sudėtingą modelį, jei jis aiškiai kalibruotas ir prižiūrimas.

Trečia, žemo dažnio signalų ribotumas turi būti traktuojamas ne kaip trūkumas savaime, o kaip interpretavimo sąlyga. Jeigu jutiklis registruoja tik lėtus pokyčius, išvados turi būti formuluojamos

apie lėtą proceso būsenos kaitą. Tokiu atveju galima pagrįstai kalbėti apie šiurkštumo tendencijos indikaciją, tačiau negalima teigti, kad signalas aprašo visą pjovimo dinamiką ar savaiminius virpesius.

Praktinis šio straipsnio rezultatas yra mažos infrastruktūros stebėsenos taikymo schema: vienas normalinės krypties poslinkio rodiklis, sąrankinė kalibracija pagal R_a ir R_z , perspėjimo slenksčių taikymas ir periodinė profilometrinė patikra. Taikomoji straipsnio vertė yra metodinė. Jis parodo, kaip supaprastinta vibracinė stebėseną gali būti pagrįsta ne vien literatūros teiginiais, bet ir aiškia sąrankos, matavimo krypties, duomenų dažnio, kalibravimo, paklaidų įvertinimo ir metrologinio patvirtinimo grandine. Tokia logika tinka mokymo laboratorijoms, nedidelės automatizacijos dirbtuvėms ir pradiniam proceso stebėsenos sprendimams, kai siekiama ne pakeisti profilometrą, o anksčiau pastebėti galimą paviršiaus kokybės blogėjimą.

Išvados

1. Įgyvendinus pirmąjį uždavinį nustatyta, kad paviršiaus šiurkštumo ir vibracijos ryšys tekinyje turi fizinį pagrindą tik tada, kai vibracinis signalas siejamas su paviršiaus formavimui reikšminga kryptimi. Normalinė arba radialinė poslinkio dedamoji yra metodiškai pagrįsta, nes ji tiesiogiai keičia įrankio ir formuojamo paviršiaus santykinę padėtį.

2. Įgyvendinus antrąjį uždavinį parodyta, kad skirtingi jutikliai ir signalo apdorojimo metodai tinka skirtingoms stebėsenos užduotims. Aukštadažniai akselerometrai ir dažninė analizė reikalingi savaiminių pjovimo virpesių diagnostikai, o žemo dažnio poslinkio ar greičio rodikliai gali būti tinkami lėtai šiurkštumo tendencijai stebėti, jei jų taikymo riba aiškiai apibrėžta.

3. Įgyvendinus trečiąjį uždavinį nustatyta, kad EN AW-2011 aliuminio lydinio tekinyje atveju normalinės krypties *peak-to-peak* poslinkis konkrečioje sąrankoje turėjo stiprų vidinį ryšį su šiurkštumo rodikliais: R_a modeliui gauta $R^2 = 0,9929$ ir $RMSE = 0,052 \mu\text{m}$, o R_z modeliui $R^2 = 0,9905$ ir $RMSE = 0,264 \mu\text{m}$. Šie rezultatai pagrindžia sąrankinę kalibraciją, tačiau dėl laiko sekos pobūdžio ir išorinio validavimo rinkinio nebuvimo neturi būti interpretuojami kaip universalus prognozavimo modelis.

4. Įgyvendinus ketvirtąjį uždavinį suformuluota praktinė taikymo schema: vibracinis rodiklis naudojamas kaip proceso būsenos ir perspėjimo indikatorius, o jo ryšys su paviršiaus kokybe periodiškai tikrinamas tiesioginiais šiurkštumo matavimais. Pakeitus medžiagą, įrankį, įrankio laikiklį, jutiklio tvirtinimą, staklių sąranką ar pjovimo režimų intervalą, būtina pakartotinė kalibracija.

Surface Roughness Evaluation of a Turned Surface Based on Vibration Signals: Adaptation of the Methodology and Application Limits in Turning Aluminum Alloys

Summary

The article analyses the methodological conditions under which low-frequency normal-direction vibration displacement can be used as an indicator of surface roughness in turning. The work is presented as an applied methodological analysis based on a previously published experimental case involving finish turning of EN AW-2011 aluminium alloy, synchronized displacement-roughness records, and contact profilometry measurements reported as R_a and R_z . The numerical analysis is based on 190 synchronized records. Within the analysed setup, the internal calibration yielded $R^2 = 0.9929$ and $RMSE = 0.052 \mu\text{m}$ for R_a , and $R^2 = 0.9905$ and $RMSE = 0.264 \mu\text{m}$ for R_z . The article emphasizes that low-rate displacement data should not be interpreted as chatter diagnostics or as a universal predictive model. Instead, such data can support setup-specific process-state monitoring when the sensing direction, sampling limitations, calibration procedure, error range and profilometric validation are explicitly defined. The analysis shows that a simple normal-direction displacement indicator can be useful in low-complexity monitoring environments, provided that it is periodically checked against direct roughness measurements and recalibrated after changes in material, tooling, machine setup or sensor mounting.

Keywords: turning; surface roughness; vibration; aluminium alloys; low-frequency monitoring; process-state assessment

Literatūra

1. BENARDOS, P. G. ir VOSNIAKOS, G.-C. Predicting surface roughness in machining: a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, t. 43, nr. 8, p. 833–844. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00059-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00059-2).
2. DIMLA, D. E. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations – a review of methods. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, t. 40, nr. 8, p. 1073–1098. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00122-4](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00122-4).
3. SIDDHPURA, M. ir PAUROBALLY, R. A review of chatter vibration research in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, t. 61, p. 27–47. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2012.05.007>.
4. ALTINTAS, Y. *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. 2-asis leid. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. ISBN 978-1-107-00148-0.
5. GARCÍA PLAZA, E. ir NÚÑEZ LÓPEZ, P. J. Surface roughness monitoring by singular spectrum analysis of vibration signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, t. 84, d. A, p. 516–530. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.07.051>.
6. CHEN, J., LIN, J., ZHANG, M. ir LIN, Q. Predicting Surface Roughness in Turning Complex-Structured Workpieces Using Vibration-Signal-Based Gaussian Process Regression. *Sensors*, 2024, t. 24, nr. 7, straipsnio nr. 2117. <https://doi.org/10.3390/s24072117>.
7. TRINH, V.-L. A Review of the Surface Roughness Prediction Methods in Finishing Machining. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 2024, t. 14, nr. 4, p. 15297–15304. <https://doi.org/10.48084/etasr.7710>.
8. KAM, M. ir DEMIRTAŞ, M. Analysis of tool vibration and surface roughness during turning process of tempered steel samples using Taguchi method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2021, t. 235, nr. 5. <https://doi.org/10.1177/09544089211001976>.
9. WANG, X. ir FENG, C. X. Development of empirical models for surface roughness prediction in finish turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2002, t. 20, nr. 5, p. 348–356. <https://doi.org/10.1007/s001700200162>.
10. JACKUVIENE, R. ir KARPAVICIUS, 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, t. 10, nr. 4. <https://doi.org/10.3390/jmmp10040135>.
11. DUDZIK, K. ir 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, t. 18, nr. 9, straipsnio nr. 1992. <https://doi.org/10.3390/ma18091992>.
12. NI, C., LU, W., WANG, Y., ZONG, C., LIU, D. ir LIU, G. An Investigation of the High-Speed Machinability of 7050 Aluminum Alloy Based on Different Prefabricated Crystal Orientations. *Lubricants*, 2023, t. 11, nr. 9, straipsnio nr. 413. <https://doi.org/10.3390/lubricants11090413>.
13. MBANGU TAMBWE, G. ir PONS, D. Optimization of Surface Roughness of Aluminium RSA 443 in Diamond Tool Turning. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2024, t. 8, nr. 2, straipsnio nr. 61. <https://doi.org/10.3390/jmmp8020061>.