



Tallinna Tehnikakõrgkooli toimetised nr 26

2020



Tallinna Tehnikakõrgkooli toimetised nr 26

Koostaja ja toimetaja: Anne Kraav

Tehnilised toimetajad: Heleri Michalski ja Mari-Leen Treimann

Väljaandja: Tallinna Tehnikakõrgkool

Pärnu mnt 62, 10135 Tallinn

ISSN 1406-7641



Sisukord

- 4 Saateks
- 4 Foreword

Martti Kiisa, PhD, Tallinna Tehnikakõrgkooli professor
Karin Lellep, MSc, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor

- 5 Lihtsustatud arvutusmeetod sildade kandevõime hindamiseks
- 11 A Simplified Calculation Method to Evaluate the Carrying Capacity of Bridges

Vitali Retšnoi, PhD, Tallinna Tehnikakõrgkooli dotsent
Erki Lember, PhD, Tallinna Tehnikakõrgkooli professor

- 13 Korrelatsioon- ja regressioonanalüüs: empiirilise uuringu näide
- 20 Correlation and Regression Analysis: an Example of an Empirical Study

Kati Nõuakas, MA, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor
Eduard Ševtšenko, PhD, Tallinna Tehnikakõrgkooli kaasprofessor
Lea Murumaa, MA, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor
Oliver Kallas, MSc, Tallinna Tehnikakõrgkooli logistikainstituudi direktor

- 22 Koostöö raamistik ühiste õppemoodulite arendamiseks koostöös ettevõtjatega ning väliskõrgkoolidega
- 28 Framework for Common Learning Blocks Development in Collaboration with Companies and Universities

Kristo Vaher, MSc, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor
Tavo Kangru, MSc, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor

- 30 Tööstusroboti mobiilsus
- 36 The Mobility of Robotised Work Cells in Manufacturing

Ada Traumann, PhD, Tallinna Tehnikakõrgkooli professor
Merje Beilmann, MA, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor
Diana Tuulik, MBA, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor

- 38 Digitrükitud spordirõivaste materjalide õhuläbilaskvuse ning venivuse määramine enne ja pärast hooldust
- 42 Determination of Air Permeability and Elongation of Digitally Printed Sportswear Materials Before and After Domestic Maintenance

Toomas Pihl, PhD, Tallinna Tehnikakõrgkooli professor

- 44 Keemiliste pinnete valmistamise tehnoloogia
- 52 The Technology of Chemical Coatings

Saateks

Hea lugeja!

Käesolevad 2020. aasta toimetised annavad ülevaate meie kõrgkooli teadus-, arendus- ja loometegevusest. TTK toimetised nr 26 annab ülevaate uurimistööde rühmade teostatud uuringutest.

Kõik artiklid on uurimistööde rühmade juhtide vastastikku retsenseeritud.

Karin Lellep ja Martti Kiisa on artiklis käsitlenud ja analüüsinud lihtsustatud arvutusmeetodit sildade kandevõime hindamiseks.

Vitali Retšnoi ja Erki Lember jõuavad oma artiklis „Korrelatsioon- ja regressioonanalüüs: empiirilise uuringu näide“ tõdemuseni, et korrelatsioonanalüüs on tõhus abivahend olukordades, kus uurija soovib leida statistilist seost arvuliste tunnuste vahel.

Kati Nõuakas, Eduard Ševtšenko, Lea Murumaa ning Oliver Kallas käsitlevad oma artiklis koostöö raamistikku ühiste õppemoodulite arendamiseks koostöös ettevõtjatega ning väliskõrgkoolidega.

Kristo Vaher ja Tavo Kangru analüüsivad tööstusroboti mobiilsust ja selle võimalusi.

Ada Traumann, Merje Beilmann ja Diana Tuulik on seadnud oma artiklis „Digitrükitud spordirõivaste materjalide õhuläbilaskvuse ning venivuse määramine enne ja pärast hooldust“ käsitletava uuringu eesmärgiks analüüsida mõõtmistulemusi kolmest erinevast perspektiivist.

Toomas Pihl selgitab põhjalike näidete varal keemiliste pinnete valmistamise tehnoloogiat.

Anne Kraav
arendusprorektor

Foreword

Dear reader,

The proceedings of 2020 provide an overview of our institution's research, development and creative activities. The Proceedings of TTK University of Applied Sciences no 26 gives an overview of the applied research conducted at TTK UAS. All the articles have been peer-reviewed by the research group leaders of TTK UAS.

The article A Simplified Calculation Method to Evaluate the Carrying Capacity of Bridges by Karin Lellep and Martti Kiisa focuses on the analysis of the method, describing the method based on examples.

In the article „Correlation and Regression Analysis: an Example of an Empirical Study“ by Vitali Retšnoi and Erki Lember will come to the conclusion that the Correlation Analysis is an effective statistical method used to evaluate the strength of relationship between two quantitative variables.

The article by Kati Nõuakas, Eduard Ševtšenko, Lea Murumaa ning Oliver Kallas addresses on the aim of the headline: Framework for Common Learning Blocks Development in Collaboration with Companies and Universities.

Kristo Vaher and Tavo Kangru are analyzing the possibilities and the Mobility of Robotised Work Cells in Manufacturing.

In the article Determination of Air Permeability and Elongation of Digitally Printed Sportswear Materials Before and After Domestic Maintenance, the authors Ada Traumann, Merje Beilmann and Diana Tuulik analyze the collected data of sportswear materials from three different perspectives.

Toomas Pihl explains by profound examples the Technology of Chemical Coatings.

Anne Kraav
Vice-Rector for Development

Lihtsustatud arvutusmeetod sildade kandevõime hindamiseks

Autorid:

Martti Kiisa (PhD, Tallinna Tehnikakõrgkooli professor)

Karin Lellep (MSc, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor)

Sissejuhatus

Vabariigi Valitsuse tegevusprogrammis aastateks 2015–2019 oli püstitatud eesmärgiks suurendada investeringuid riigimaanteedesse, et tõsta veoautode massipiiranguid ja seeläbi parandada Eesti maanteetranspordi- ja kaubavedude konkurentsivõimet. Sellest tulenevalt kavatakse diferentseerida massipiiranguid, lähtudes sõidukite tegelikust mõjust teedele ja uurida ümarpuiduveol katseliselt rakendatud 52 t täismassipiirangu laiendamise võimalusi teistele veoliikidele. Eesti teedel liigub järjest rohkem raskeid veokeid, kus veost optimeerides on kogumassid lubatu/mittelubatu piiril, sest enamiku veokite kandevõime ületab Eesti teedele (sh sildadele) lubatud koormusi (foto 1).

Sagenenud on ka märkimisväärselt ülekaalulised raskeveosed (foto 2), sest veokite kontroll on puudulik. Seetõttu võib esineda olukordi, kus ülekaaluliste veokite tõttu on ohus ka sildade kandevõime.



▲ Foto 1 | 55 t tegeliku massiga veok Türi-Alliku silla katsetamisel 2019. a, mille poolhaagis oli pooltühi ja võimaldanuks ka oluliselt suuremat koormust [9]

Riigiteedel asub praegu orienteeruvalt 1000 silda, millest 93% on ehitatud pärast teist maailmasõda. Lisaks asub kohalikel teedel hinnanguliselt 800 silda. Selleks, et teha kaalutletud otsuseid teedesse investeerimise vajaduste ja massipiirangute leevendamise võimaluste kohta, on Eestis alates 2010. aastast läbi viidud üheksa vastavasisulist suuremat uurimistööd, mis puudutavad suurendatud massiga veokeid või sildade kandevõimet [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9].

Nendest uurimistöödest kõige viimane näitas, et

kui võtta eesmärgiks 52-tonniste veokite lubamine kõikidele riigiteedel asuvatele sildadele, läheb see 2020. a seisuga maksma orienteeruvalt 43,6 mln eurot. Kokku on probleemseid silda 52, mis moodustavad riigiteedel asuvatest sildadest umbes 5%. Nendest 11 on sellised, kus tuleb täielikult välistada 52-tonniste veokite kasutamine, kuid ülejäänutel on võimalik lubada 52 t veokid sillale ühes kolonnis. Probleemsetest sildadest üheksa paiknevad põhi- maanteedel.



▲ Foto 2 | 2018. a Sanga viaduktil iBWIMi mõõtmiste käigus fikseeritud veok tegeliku massiga 82,8 t [8]

Artiklis on välja töötatud üleminekutegurid liikluskooormuste võrdlemiseks, mida on pärast teist maailmasõda Eesti territooriumil projekteerimisel rakendatud [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16]. Seejuures keskendutakse 52 t täismassiga veokitele, kuna see on Eesti sildadega seonduvalt kõige aktuaalsem teema. Meetodika esimest varianti on artikli autorid tutvustanud uurimistöös [9] raames, kuid siin on seda edasi arendatud.

1. Analüüsi alused

Küllalt sageli on vaja otsustada, kas mõne silla kandevõime on tagatud lubatavat täismassi ületava veoki korral. Kõige täpsema tulemuse annavad seejuures kontrollarvutused kande- ja kasutuspiiriseisundis, kus võetakse täpselt arvesse kõiki silla (nt konstruktsioonide moodud, materjalide tugevus- ning jäikusomadused) ja veoki (telgede koormused, paiknemine jne) parameetreid. Niimoodi toimitakse näiteks juhtudel, kui silda peab ületama erakorraline raskeveok, mille täismassid ületavad sageli ka 200 t.

Kui eesmärgiks on hinnata suurt hulka sildu korraga, siis täpne arvutusmeetod ei ole suure arvutusmahu ja ulatuslike sillauuringute tõttu paraku rakendatav ja trendide väljaselgitamiseks tuleb kasutada lihtsustatud arvutusmeetodeid.

Siinkohal on kirjeldatud praktikas lihtsalt rakendatavat seost sillale lubatava veoki täismassi hindamiseks. Meetodika lihtsat kasutatavust kompenseeritakse mõõduka konservatiivsusega, mistõttu täpsemaid arvutusi tehes võidakse saada ka mõnevõrra suurem lubatav kandevõime.

Meetodi põhialuseks on valitud silla peakandjate (talad ja plaadid) sisejõudude võrdlemise meetod, mis aitab välistada eri ajastu standardite meetodilistest iseärasustest tulenevaid arvutustulemusi mõjutavaid erinevusi, sest viimase enam kui 70 aasta jooksul on Eestis kasutatud väga erinevaid norme ja standardeid.

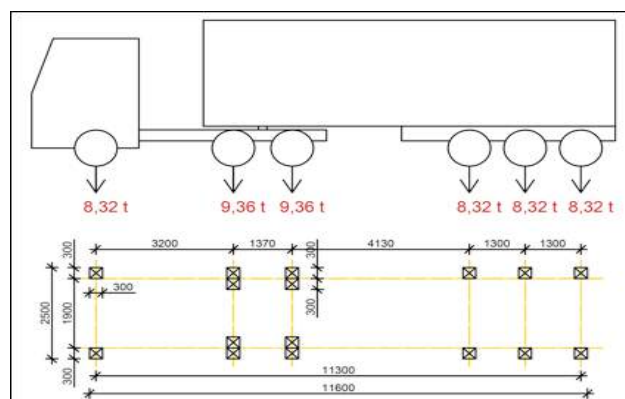
Lihtsustatud arvutusmeetod baseerub eeldusel, et kui silla projekteerimisel kasutatud eriveokitest tekkivad sillateki peakandjate sisejõud ületavad vaadeldavast veokist tekkivaid sisejõudusid, on sillateki kandevõime tagatud. Sisejõududest kasutatakse siinkohal paindemomente ja põikjõude, mis on talade ja plaatide üks kõige tähtsamad sisejõududega seonduvad parameetrid.

Analüüsis kasutatakse järgmisi eelduseid ja lihtsustusi:

- 1) vaadeldakse ainult lihttala skeemi järgi töötavaid tekikonstruktsioone, kuna see kajastab kõige suuremat hulka Eesti sildadest;
- 2) analüüsis käsitletakse sildepikkuseid vahemikus 5 kuni 25 m;
- 3) eeldatakse, et veokite laiused on põhimõtteliselt võrdsed (v.a 240 kN teljekoormusega LM3 veokid) – seetõttu ei oma suurt tähtsust, kuidas üksinda sillatekil paiknevad koormused sillateki peakandjate vahel jagunevad, sest nad teevad seda kõikide koormuste juures sarnaselt;
- 4) veokite rataste koormused on rakendatud vertikaalsete punktkoormustena;
- 5) vaadeldakse tähtsamaid alates 1945. a Eestis projekteerimisel kasutatud eriveokeid, mis saavad reeglina dimensioonimisel määravaks ja mida võrreldakse 52 t etalonveokiga (tabel 1).

Arvutusmeetodi rakendamiseks on vajalik nn etalonveoki defineerimine. Etalonveokiks on valitud 52 t raskeveok, mis koosneb 3-teljelisest vedukist ja 3-teljelisest poolhaagisest (joonis 1 ja foto 3). Veok valiti välja uurimistö [9] raames (tähistega „tüüp 5“, sest selle pikkus on teiste analoogsete veokitega võrreldes väiksem ja koormuse toime konstruktsioonelementidele reeglina ohtlikum.

Seega sobib veok hästi iseloomustamiseks nn tüüpilist raskeveokit Eesti teedel.



▲ Joonis 1 | Etalonveok [9]



▲ Foto 3 | Etalonveok [9]

| Selgitus | Koormuse tähis | Veokite tähtsamad parameetrid | | | Osavarutegur (γ) × dünaamikategur (ϕ) |
|------------------------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------------|---|
| | | Täismass [t] | Pikkus ¹⁾ [m] | Laius ¹⁾ [m] | |
| Eurokoodeksi koormused | LM3 1200/150 | 122,3 | 10,65 | 3,00 | 1,35 |
| | LM3 1200/200 | 122,3 | 7,65 | 3,00 | |
| | LM3 2400/200 | 244,6 | 16,65 | 3,00 | |
| | LM3 2400/240 ³⁾ | 244,6 | 13,65 | 4,50 | |
| | LM3 2400/200/200 | 244,6 | 27,15 | 3,00 | |
| | LM3 3600/200 | 367,0 | 25,65 | 3,00 | |
| | LM3 3600/240 ³⁾ | 367,0 | 21,15 | 4,50 | |
| NLI ajal kasutatud koormused | HF-30 | 30,0 | 4,00 | 3,00 | 1,00 |
| | HF-60 | 60,0 | 5,00 | 3,30 | 1,10 ²⁾ |
| | HK-80 | 80,0 | 3,80 | 3,50 | |
| 52 t etalonveok | „Tüüp 5“ | 52,0 | 11,60 | 2,50 | 1,50 |

Märkused:
1) Mõõdud on esitatud koos rataste/roomikute kokkupuutealaga.
2) Kuni 1962. aastani olid nii koormuse osavarutegurid kui ka dünaamikategurid 1,0.
3) Koormused ei ole lihtsustatud arvutusmeetodi korral kasutatavad, kuna nende laius ületab etalonveoki laius arvestatavalt, mis mõjutab arvutustulemusi ebasoodsas suunas.

▲ Tabel 1 | Artiklis analüüsitud liikluskoormused [9]

Analüüsi aluseks on tabelites 2 ja 3 esitatud sillateki peakandjate normatiivsed paindemomendid ja põikjõud eri veokitest, mis on arvatud ehitusmehaanika reeglite kohaselt. Selle tarbeks koostasid artikli autorid tabelarvutustarkvara MS Excel abil algoritmi, kus veokeid vaadeldakse liikuvate koormustena. Tabelis näidatud normatiivsed sisejõud on määratud pea-

kandjate samaaegselt esinevate suurimate sisejõudude summana (teisisõnu – koormuse jagunemist peakandjate vahel ei ole selles etapis arvesse võetud). Tabelite koostamisel on eeldatud, et korruga paikneb sillal ainult üks veok, mis on silla pikisuunas paigutatud vastava sisejõu suhtes kõige ebasoodsamasse asukohta.

| Silldepikkus | Normatiivne paindemoment M_{EK} [kNm] | | | | | | | | | Etalonveok |
|--------------|---|----------|----------|--------------|----------|--------------|----------------------|-------|-------|------------|
| | Kaasaegsed eurokoodeksi koormused LM3 | | | | | | NLI-aegsed koormused | | | |
| | 1200/150 | 1200/200 | 2400/200 | 2400/200/200 | 3600/200 | 3600/200/200 | HF-30 | HF-60 | HK-80 | |
| 5 | 338 | 450 | 450 | 450 | 450 | 450 | 213 | 350 | 524 | 200 |
| 6 | 464 | 618 | 618 | 618 | 618 | 618 | 287 | 496 | 718 | 261 |
| 7 | 638 | 850 | 850 | 850 | 850 | 850 | 360 | 643 | 912 | 322 |
| 8 | 825 | 1100 | 1100 | 1100 | 1100 | 1100 | 434 | 790 | 1107 | 384 |
| 9 | 1025 | 1367 | 1367 | 1367 | 1367 | 1367 | 507 | 937 | 1302 | 445 |
| 10 | 1275 | 1667 | 1700 | 1667 | 1700 | 1700 | 581 | 1084 | 1498 | 506 |
| 11 | 1538 | 1963 | 2050 | 1963 | 2050 | 2050 | 654 | 1231 | 1692 | 593 |
| 12 | 1813 | 2263 | 2417 | 2263 | 2417 | 2417 | 728 | 1379 | 1888 | 700 |
| 13 | 2113 | 2563 | 2850 | 2563 | 2850 | 2850 | 802 | 1526 | 2084 | 804 |
| 14 | 2411 | 2861 | 3300 | 2861 | 3300 | 3300 | 875 | 1673 | 2281 | 912 |
| 15 | 2711 | 3161 | 3768 | 3161 | 3768 | 3750 | 949 | 1820 | 2477 | 1020 |
| 16 | 3009 | 3459 | 4300 | 3459 | 4300 | 4200 | 1022 | 1967 | 2672 | 1146 |
| 17 | 3308 | 3758 | 4850 | 3758 | 4850 | 4650 | 1096 | 2114 | 2868 | 1273 |
| 18 | 3608 | 4058 | 5417 | 4058 | 5417 | 5100 | 1170 | 2262 | 3064 | 1400 |
| 19 | 3908 | 4358 | 6017 | 4358 | 6050 | 5550 | 1243 | 2409 | 3260 | 1525 |
| 20 | 4208 | 4658 | 6617 | 4658 | 6700 | 6000 | 1317 | 2556 | 3456 | 1652 |
| 21 | 4506 | 4956 | 7213 | 4956 | 7366 | 6450 | 1390 | 2703 | 3652 | 1779 |
| 22 | 4806 | 5256 | 7812 | 5256 | 8100 | 6900 | 1464 | 2850 | 3848 | 1905 |
| 23 | 5106 | 5556 | 8412 | 5556 | 8850 | 7350 | 1537 | 2997 | 4044 | 2033 |
| 24 | 5406 | 5856 | 9012 | 5856 | 9616 | 7800 | 1611 | 3144 | 4240 | 2160 |
| 25 | 5706 | 6156 | 9612 | 6156 | 10 450 | 8250 | 1685 | 3292 | 4437 | 2286 |

▲ Tabel 2 | Lihttalade suurim summaarne normatiivne paindemoment eri veokite ja silla sildepikkuste korral (korruga paikneb avas ainult üks veok) [9]

| | Normatiivne põikjõud $Q_{Ek}^{1)}$ [kN] | | | | | | | | | |
|----|---|----------|----------|--------------|----------|--------------|----------------------|-------|-------|------------|
| | Kaasaegsed eurokoodeksi koormused LM3 | | | | | | NLI-aegsed koormused | | | Etalonveok |
| | 1200/150 | 1200/200 | 2400/200 | 2400/200/200 | 3600/200 | 3600/200/200 | HF-30 | HF-60 | HK-80 | |
| 5 | 330 | 440 | 440 | 440 | 440 | 440 | 177 | 294 | 502 | 181 |
| 6 | 375 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 196 | 343 | 549 | 192 |
| 7 | 429 | 571 | 571 | 571 | 571 | 571 | 210 | 378 | 583 | 203 |
| 8 | 478 | 638 | 638 | 638 | 638 | 638 | 221 | 405 | 608 | 220 |
| 9 | 525 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 229 | 425 | 628 | 242 |
| 10 | 578 | 750 | 770 | 750 | 770 | 770 | 235 | 441 | 644 | 260 |
| 11 | 627 | 791 | 836 | 791 | 836 | 836 | 241 | 455 | 656 | 276 |
| 12 | 675 | 825 | 900 | 825 | 900 | 900 | 245 | 466 | 667 | 293 |
| 13 | 715 | 854 | 969 | 854 | 969 | 969 | 249 | 475 | 676 | 310 |
| 14 | 750 | 879 | 1036 | 879 | 1036 | 1029 | 252 | 483 | 684 | 324 |
| 15 | 780 | 900 | 1100 | 900 | 1100 | 1080 | 255 | 491 | 691 | 337 |
| 16 | 806 | 919 | 1169 | 919 | 1169 | 1125 | 258 | 497 | 697 | 347 |
| 17 | 829 | 935 | 1235 | 935 | 1235 | 1165 | 260 | 502 | 702 | 357 |
| 18 | 850 | 950 | 1300 | 950 | 1300 | 1200 | 262 | 507 | 706 | 366 |
| 19 | 868 | 963 | 1358 | 963 | 1368 | 1232 | 263 | 511 | 710 | 373 |
| 20 | 885 | 975 | 1410 | 980 | 1435 | 1260 | 265 | 515 | 714 | 380 |
| 21 | 900 | 986 | 1457 | 1000 | 1500 | 1286 | 266 | 519 | 718 | 386 |
| 22 | 914 | 995 | 1500 | 1027 | 1568 | 1309 | 268 | 522 | 721 | 392 |

▲ Tabel 3 | Lihttalade suurim summaarne normatiivne põikjõud eri veokite ja silla sildepikkuste korral (korraga paikneb avas ainult üks veok) [9]

2. Lihtsustatud arvutusmeetod

Eespool kirjeldatud arvesse võttes on võimalik määrata üleminekutegureid, mis võimaldavad võrrelda koormuste mõju sillale. Praegusel juhul annab etaloniks valitud veokist pikemate ja rohkema telgede arvuga veokite korral arvutuskäik vea tagavara kasuks.

Kui vaadeldava veoki konfiguratsioon vastab (või on ligilähedane) etalonveokile, on veoki lubatav täismass ligikaudselt arvutatav järgmiselt [9]:

$$m_{\max} = 52 \times \frac{k}{p} \times \frac{\gamma_1 \times \varphi_1}{\gamma_2 \times \varphi_2},$$

▲ Valem 1 |

kus:
 k – silla peakandjate paindemomente ja põikjõudusid arvesse võtten üleminekutegur;
 p – kõrvuti paiknevate veokite arvu arvesse võtten tegur;
 γ_1 – projekteerimisel kasutatud eriveoki koormuse osavarutegur;
 γ_2 – vaadeldava veoki koormuse osavarutegur;
 φ_1 – projekteerimisel kasutatud eriveoki koormuse dünaamikategur;
 φ_2 – vaadeldava veoki koormuse dünaamikategur.

Üleminekutegur sõltub projekteerimisel kasutatud eriveokist, etalonveokist ja silla arvutuslikust sildepikkusest. Piisava täpsusega võib üleminekuteguri määrata joonise 2 abil. Tegur arvutatakse lähtuvalt nii paindemomendist kui ka põikjõust ja on põhimõtteliselt avaldatav järgmiselt:

$$k = \min \left\{ \frac{M_1/M_2}{Q_1/Q_2} \right\}$$

kus:
 M_1 – normatiivne paindemoment projekteerimisel kasutatud eriveokist;
 M_2 – normatiivne paindemoment etalonveokist;
 Q_1 – normatiivne põikjõud projekteerimisel kasutatud eriveokist;
 Q_2 – normatiivne põikjõud etalonveokist.

Kõrvuti paiknevate veokite arvu arvesse võtten tegur arvutatakse põhimõttel, et mitu korda suureneb koormatuima peatala sisejõud veokite arvu korral võrreldes ühe veokiga. Kui veokite arv sillal on 1, siis $p = 1,00$. Mitme kõrvuti paikneva veoki korral on antud tegur igal konkreetsel sillal ka suhteliselt lihtsalt arvutatav, kui silla parameetreid täpselt arvesse võtta.

Siin on lihtsustatud arvutuste jaoks ühte konkreetset väärtust raske esile tuua, kuna see sõltub silla tüübist ja koormuse jaotusest peatalade vahel.

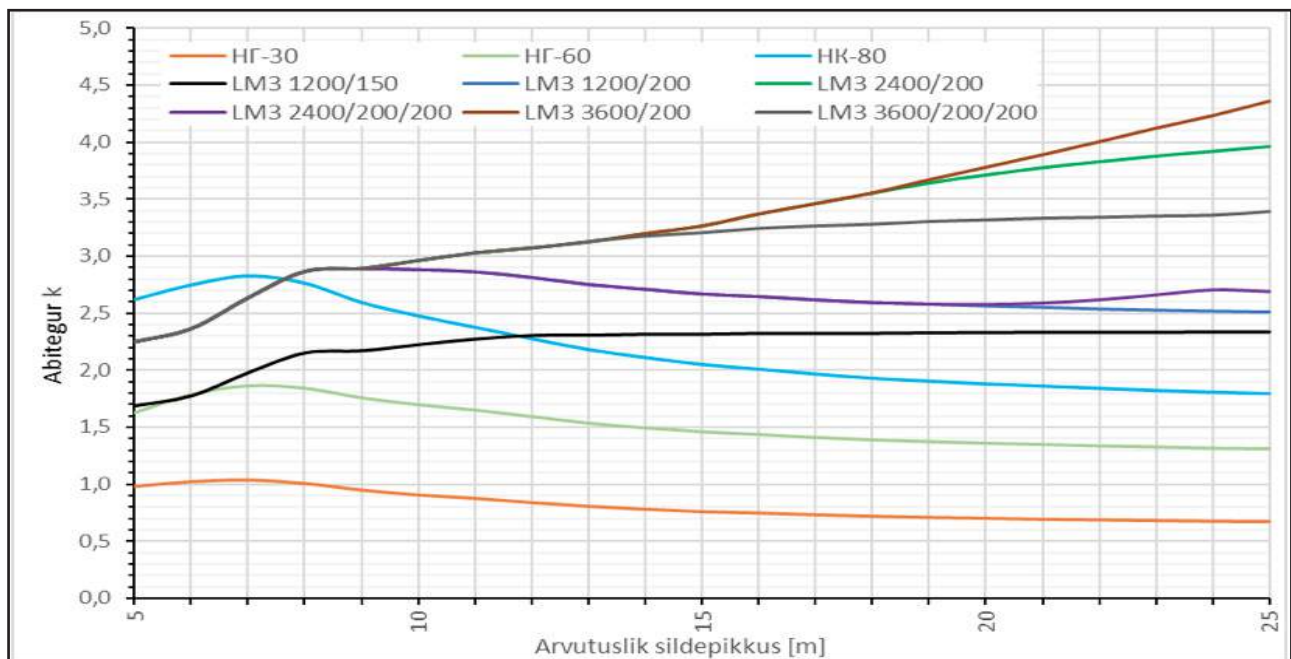
Uurimistöös [9] katsetatud sildade analüüs näitas, et kui lisada võimalikult serva lähedal paikneva veoki kõrvale veel teinegi, siis koormatuima tala/paneeli sis-ejõud suurenesid vahemikus 1,15...1,78 korda, olles keskmiselt 1,45. Kõige ekstreemsemaid (st suuremaid) väärtusi ei ole põhjust kasutada, kuna tavaliikluses paiknevad veokid silla põiklõikes mõnevõrra soodsamalt (ehk teineteisest veidi kaugemal ja rohkem tee pikitelje piirkonnas) kui uurimistöö analüüsis vaadeldud juhtudel (võimalikult serva lähistel). Seetõttu on mõistlik arvutustes kahe kõrvuti paikneva veoki korral kasutada tabeli 4 väärtuseid: talasildadel $p = 1,4$ ja paneelsildadel $p = 1,6$.

Koormuse osavarutegurid γ jäävad üldjuhul vahemikku 1,00...1,50. Projekteerimisel kasutatud eriveoki osavarutegur sõltub koormuse tüübist ja projekteerimisel aluseks võetud standardist või normist ning on vahemikus $\gamma_1 = 1,00...1,35$ (vt tabel 5). Vaadeldava veoki korral võib täpsema info puu-

dumisel osavaruteguriks võtta $\gamma_2 = 1,50$; sest eurokoodeks [16] defineerib ebastandardseid veokeid „muu muutuvkoormusena“, millele tuleb rakendada just seda osavarutegurit. Kui ülesõit on n-õ kontrollitud ehk sõiduki liikumiskiirus on väike ja tegelik mass täpselt teada, võiks koormuse osavarutegurit vähendada ka kuni väärtuseni 1,10.

Koormuse dünaamikategorigid φ on üldjuhul vahemikus 1,00...1,10. Projekteerimisel kasutatud eriveokitel võib teguri φ_1 võtta tabelist 5 ning vaadeldaval veokil $\varphi_2 = 1,00$ (eurokoodeksi soovitus). NB! Varasemate uurimisandmete põhjal võivad ebasoodsate asjaolude kokkulangemisel dünaamikategorigid kasvada kuni väärtuseni 1,50 (harvem ka üle selle), kuid selliseid olukordi peaks vaatlema erijuhumitena.

Dünaamikategurit on põhjust suurendada, kui tee on ebatasane (nt pealesõiduplaadid on tuntavalt vajunud). Sellistel juhtudel on täpseid arväärtusi raske kirjeldada, kuna dünaamikategur on määratav juhtumipõhiselt, kuid üldiselt kasutatakse 1,5-st suuremat väärtust väga harva.



▲ Joonis 2 | Abiteguri k määramine eri projektkoormuste korral, kui silda ületab üks etalonveok

| Peakandja tüüp | Kahe kõrvuti paikneva veoki arvu arvesse võttev tegur | | | | |
|----------------|---|-------------|----------|---------|-------------|
| | Minimaalne | Maksimaalne | Keskmine | Mediaan | Soovituslik |
| Talasillad | 1,15 | 1,55 | 1,35 | 1,36 | 1,4 |
| Paneelsillad | 1,42 | 1,78 | 1,58 | 1,55 | 1,6 |

▲ Tabel 4 | Kõrvuti paiknevate veokite arvu (2 tk) arvesse võttev tegur, mis on saadud varasemate sildade proovikoormamiste analüüsil [9]

| Selgitus | Koormus | Osavarutegur γ / dünaamikategur ϕ | | | | |
|---|--------------------|---|-----------|-----------|-------------------------|-----------|
| | | 1944–1953 | 1953–1962 | 1962–1985 | 1986–2000 | 2000–... |
| Eurokoodeksi koormused | Kõik LM3 koormused | – | | | | 1,35/1,00 |
| Nli ajal kasutatud koormused | HГ-30 | 1,00/1,00 | | – | | |
| | HГ-60 | 1,00/1,00 | | 1,10/1,00 | 1,00/1,10 ¹⁾ | – |
| | HK-80 | – | 1,00/1,00 | | | |
| Märkused: 1) Dünaamikategur 1,10 kehtib sildeavadele, mis ületavad 5 m. Kui sildeava on alla 1 m, on dünaamikategur 1,30. Vahemikus 1...5 m leitakse dünaamikategur interpoleerimise teel. | | | | | | |

▲ Tabel 5 | Projekteerimisel kasutatud eriveokite soovituslikud osavaru- ja dünaamikategurid [9]

3. Arvutusnäide

Arvutada silda ületava veoki maksimaalne täismass, kui

- lihttala arvutusskeemi järgi töötava talasilla arvutuslik sildepikkus on 18 m;
- sild on projekteeritud aastal 1970 koormusele HГ-60;
- vaadeldava veoki telgede konfiguratsioon vastab etalonveokile (vt joonis 1).

Lahenduskäik.

1) Üleminekuteguri k saab määrata joonise 2 abil: $k \approx 1,4$.

2) Kõrvuti paiknevate veokite arvust sõltuv tegur:

- kui sillal on 1 veok, siis: $p = 1,0$;
- kui kõrvuti paikneb 2 veokit, siis $p = 1,4$ (tabel 4).

3) Projektkoormuse HГ-60 osavaru- ja dünaamikateguri määramisel tuleb arvesse võtta ka silla projekteerimise aastat, kuna aastate normid erinesid selles osas. Praegusel juhul on kasutatud projekteerimisel normi CH 200-62 [12], mille alusel $\gamma_1 = 1,1$, ja $\phi_1 = 1,0$ (tabel 5).

4) Vaadeldava veoki korral tuleks rakendada osavarutegurit $\gamma_2 = 1,5$, kuna tegu on eurokoodeksis kirjeldatud nn muu muutuvkoormusega, mistõttu ei ole osavaruteguri 1,35 kasutamine põhjendatud. Samuti võtab see suhteliselt suur koormuse osavarutegur arvesse asjaolu, et veoki teljed ei pruugi olla täpselt samade vahekauguste ja koormusjaotusega nagu etalonveokil. Dünaamikateguri võib võtta $\phi_2 = 1,0$; kuna tavaolukorras sisaldab koormuse osavarutegur juba ka dünaamikateguri komponenti.

5) Veoki lubatav täismass, kui sillal paikneb 1 veok (valem 1):

$$m_{\max} = 52 \times \frac{1,4}{1,0} \times \frac{1,1 \times 1,0}{1,5 \times 1,0} \approx 53 \text{ t}$$

6) Veokite lubatavad täismassid, kui sillal paikneb 2 veokit kõrvuti (valem 1):

$$m_{\max} = 52 \times \frac{1,4}{1,4} \times \frac{1,1 \times 1,0}{1,5 \times 1,0} \approx 38 \text{ t}$$

▲ Lahenduskäik |

■ Kokkuvõte

Artikkel on jätkuks 2019. a valminud põhjalikule uurimistöole [9], mis käsitleb raskeveokite mõju sildadele. Artiklis on edasi arendatud algoritmi, mille abil saab kontrollida lihtsustatud arvutusmetoodikat, kasutades sillale lubatava raskeveoki täismassi. Arvutusmetoodika ei vaja eraldi kontrollarvutusi kande- ja kasutuspiiriseisundites, sest baseerub eri projektkoormustest tekkivate sisejõudude võrdlemisel.

Seejuures võrreldakse projekteerimisel kasutatud eriveokite ja kaasaegse tüüpilise raskeveoki (ehk etalonveoki) tekitatud sisejõudusid. See arvutusmeetod ei ole võrdsustatav täpse analüüsiga, kus tegelikke silla omadusi ja veoki konfiguratsiooni arvesse võttes on painde- ja põikjõukandevõime määramisel võimalik saavutada täpsem lõpptulemus. Kuid siinkohal väljapakutud algoritm on piisav selleks, et määrata korraga suure hulga sildade orienteeruv kandevõime.

■ Summary

A Simplified Calculation Method to Evaluate the Carrying Capacity of Bridges

This article is a continuation to a thorough research done in 2019 [9], that deals with the effects of heavy vehicles on bridges. Herewith, the methodology of how to perform a simplified check on which is the maximum load of a vehicle, that can be allowed on a bridge, is elaborated on. The calculation methodology does not require separate calculations in the ultimate or serviceability limit state, because it is based on the comparison of internal forces from different design loads. It compares the internal forces resulting from the special vehicle used in the initial design with those, resulting from a typical vehicle (the so-called benchmark vehicle) used today. This calculation method cannot be equalized with an accurate analysis, where precise results for the bending moment and shear force are obtained by using the actual properties of the bridge and exact vehicle configuration. But the algorithm proposed here is sufficient enough to determine the approximate carrying capacity for a large amount of bridges at the same time.

▣ Viidatud allikad

- [1] Ülekaaluliste (52 t) veoste võimalike marsruutide kaardistamine riigimaanteedel (Maanteeamet, 2010).
- [2] Puidutranspordi makromajanduslik uuring (Tallinna Tehnikakõrgkool, 2010).
- [3] Töötlemata ümarpuidu veoks eriveosena vajaliku muldkehade läbikülmumise ilmastikutingimuste ja erinevate teede kandevõime seose uuring (AS Teede Tehnokeskus, 2011).
- [4] Riigimaanteedel ja sildade tugevdamise maksu- ja hindamise tulenevalt 52 t veoste aastaringse liikumise võimalusest (Ramboll Eesti AS, 2011).
- [5] Tallinn-Narva mnt asuva Loobu silla katsekoormamine (Tallinna Tehnikaülikool, 2013).
- [6] Vana Säreveere silla koormuskatsetused ja teaduslikud analüüsid ning hüdroisoleerivate betoonide ja betoon-pinna hüdrofoobsete pinnakaitsevahendite teaduslik uuring. Lõpparuanne. Osa 1 (Tallinna Tehnikaülikool, 2015).
- [7] Nõukoguaegsete tüüpsildade kandevõime viimise vastavusse euronõuetega ja võimalike tugevdamise meetodite analüüs (Tallinna Tehnikaülikool, 2016).
- [8] Sõidukite masside ja teljekoormuste seire (AS Viacon Eesti, Tallinna Tehnikakõrgkool, Skepast&Puhkim OÜ, 2018). [eng.pdf?ua=1](#). [Kasutatud 25. veebruar, 2018].
- [9] Raskeveokite mõju sildadele. Nende koormuste valideerimine reaalsel koormustel ning mõju analüüs (Tallinna Tehnikakõrgkool, 2019).
- [10] ГОСТ 2775-44 Нагрузки временные вертикальные для расчета искусственных сооружений на автомобильных дорогах (1944).
- [11] Н 106-53 Нормы подвижных вертикальных нагрузок для расчета искусственных сооружений на автомобильных дорогах (1953).
- [12] СН 200-62 Технические условия проектирования железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб (1962).
- [13] СНиП 2.05.03-84 Мосты и трубы (1985).
- [14] СНиП 2.05.03-84* Мосты и трубы (2005).
- [15] EPN-ENV 1.3A Projekteerimise alused. Koormused. Osa 3 Sildade liikluskoormused. Üldeeskirjad, maantee- ja jalgteesildade liikluskoormused (1998).
- [16] EVS-EN 1991-2:2004+NA:2007 Eurokoodeks 1: Ehituskonstruksioonide koormused. Osa 2: Sildade liikluskoormused (2007).

Korrelatsioon- ja regressioonanalüüs: empiirilise uuringu näide

Autorid:

Vitali Retšnoi, PhD, Tallinna Tehnikakõrgkooli dotsent

Erki Lember, PhD, Tallinna Tehnikakõrgkooli professor

Sissejuhatus

Statistilise andmeanalüüsi teadmised on kasulikud iga inseneri jaoks, kelle igapäevatöö sisaldab andmetega tegelemist. Statistiline andmeanalüüs on tõhus abivahend uue toote kujundamisel ja tehnoloogiliste lahenduste arendamisel.

Tänapäeval peavad statistikud ja praktikud kvaliteetse uurimistöö õnnestumiseks tegema tihedalt koostööd, st statistik ei tegele ainult praktiku nõustamisega, aga on huvitatud konkreetsest teemast, tutvub selle spetsiifilise terminoloogiaga, loeb valdkonna teadusajakirju jne. Samal ajal eeldab sujuv koostöö, et valdkonna spetsialist tunneks huvi statistilise analüüsi küsimuste vastu, ainult nii saab tekkida efektiivne sünergia.

Andmeanalüüs on andmete süstemaatilise uurimise protsess, mille eesmärk on esitada kasulik teave. Terviklik statistiline analüüs on teadusliku uurimistöö alus, mis võimaldab kindlaks teha planeeritava töö mõju, hinnata kvaliteeti ja edastada tulemused sidusrühmadele.

Artiklis antakse lühiülevaade statistilise analüüsi teostamise etappidest 2018. a ilmunud teadusartikli [2] näitel. Artikli ettevalmistamise käigus analüüsiti raskmetallide kombineeritud mõju töötava reoveepuhastusjaama bioloogilisele puhastusele. Uuritud raskmetallideks olid Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Cr, Co ja Mn. Mõju hindamiseks koostati matemaatilised mudelid, mis arvestasid protsessi viibeajaga, raskmetallide koormusega, temperatuuriga ning bioloogilises puhastuses tarbitud õhukuluga. [2]

Andmete kogumine

Artiklis teostatud uuringu jaoks koguti andmeid töötavast reoveepuhastist, mille koormus on ca 450 000 inimekvivalenti. Analüüsiks vajalikud raskmetallide proovid koguti 2,5 aasta jooksul (2014–2017) iga kahe nädala tagant. Tegemist oli 24 h keskmistatud proovidega, mis võeti reoveepuhasti sisendist enne bioloogilist puhastust ning väljundist.

Analüüsid teostati akrediteeritud laboris, kus kasutati raskmetallide määramiseks ISO 17294-2:2003 standardit. [2]

Uuringuks vajalikud protsessiparameetrid logis automaatselt VeRa joogi- ja reoveepuhastite informatsiooni tarkvara. Vajalikud parameetrid olid: vooluhulk (m^3 ööpäevas), reovee temperatuur, bioloogilise puhastuse viibeag, pH, N_{tot} ja NH_4 eemaldamise efektiivsus, bioloogilise puhastuse õhukulu (m^3 ööpäevas). [2]

Tarkvara valimine

Andmeanalüüsi teostamiseks kasutati statistika-tarkvara R, [4]. R on nii programmeerimiskeel kui ka keskkond, kus arendatakse ja rakendatakse statistiliseks andmetöötluseks sobivaid tehnikaid.

R-i populaarsuse taga on vaba ligipääs, lai valik lisapakette ja kvaliteetsete graafikute tegemise lihtsus. R-iga on saadaval kaheksa statistikapaketti ning CRANi (Comprehensive R Archive Network) veebisaitide pere kaudu on saadaval veel palju muid lisapakette, mis pakuvad laia valikut kaasaegsetest statistikameetoditest, sh lineaarset ja mittelineaarset modelleerimist, klassikalisi statistilisi teste, aegridade analüüsi, klasteranalüüsi jne. R-i on mugav kasutada lisamooduli Rcmdr (R Commander) abil, mis pakub avatud lähtekoodiga graafilist kasutajaliidest (GUI – graphical user interface), [1].

Andmete kirjeldamine

Klassikaline andmeanalüüs algab kirjeldavast statistikast, mille põhiülesandeks on statistilise informatsiooni kompaktne ja ülevaatlik esitamine. Selleks kasutatakse põhilisi arvarakteristikuid, mis iseloomustavad uuritavat tunnust võimalikult kompaktselt ja annavad aluse tunnuste võrdlemiseks kogumites või nende osades. Arvarakteristikud annavad informatsiooni tunnuse väärtuste paiknemise kohta arvteljel, iseloomustavad tunnust keskmise väärtuse seisukohalt ja näitavad, kui tugevasti

tunnuse väärtused hajuvad keskväärtuse ümber.

Andmetöötlaste hõlbustamiseks kasutati järgmisi lühendeid:

O₂ – bioloogilise puhastuse õhukulu, 1000 m³/p (ööpäevas);

HeM – raskmetallide koormus, kg/p (ööpäevas);

NH₄ – NH₄ eemaldamise efektiivsus, %;

N_{tot} – N_{tot} eemaldamise efektiivsus, %;

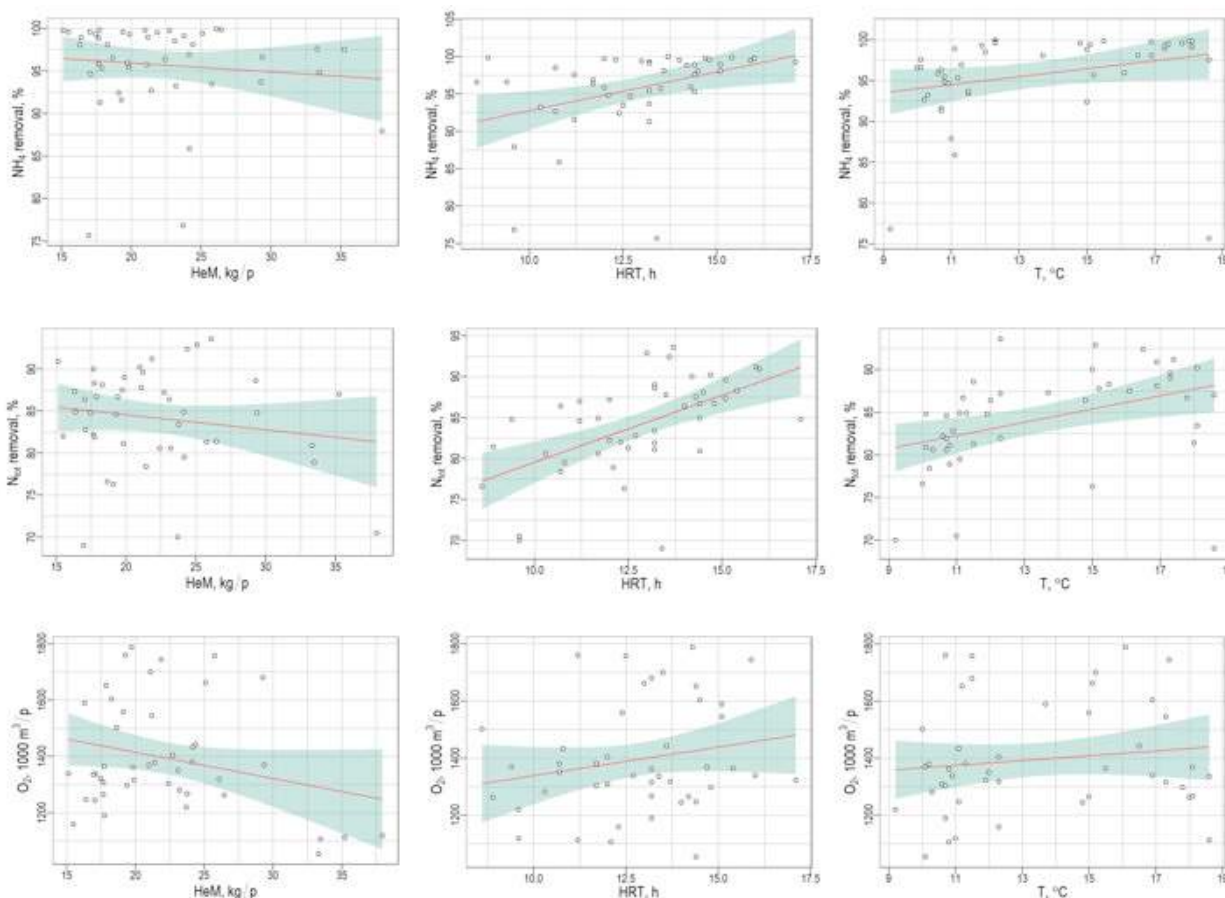
HRT – viibeaeg, h;

T – temperatuur, °C.

Tabelis 1 on uuritud parameetrid ning nende statistilised põhinäitajad. Uuritud perioodil oli bioloogiliseks puhastuseks vajalik maksimaalne õhukulu 1 787 797 m³ ööpäevas ning minimaalne 1 053 780 m³ ööpäevas. Maksimaalne nitrifikatsiooni efektiivsus oli 99,95% ning minimaalne 75,66%, mis näitab, et reoveepuhasti toimis uuritud perioodil hästi. Raskmetallide kogu koormus oli keskmiselt 22,116 kg ööpäevas.

| Parameeter | keskväärtus | standardhälve | Min | 25%, Q1 | mediaan | 75%, Q3 | Max |
|--|-------------|---------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| O₂, 1000 m³/p | 1395,43 | 193,55 | 1053,78 | 1267,36 | 1349,99 | 1544,61 | 1787,797 |
| HeM, kg/p | 22,116 | 5,398 | 15,136 | 17,773 | 21,109 | 24,181 | 37,946 |
| NH₄, % | 95,71 | 5,36 | 75,66 | 94,65 | 97,52 | 99,28 | 99,95 |
| N_{tot}, % | 84,204 | 5,79 | 69 | 81,1 | 84,9 | 88,1 | 93,6 |
| HRT, h | 12,84 | 2,002 | 8,6 | 11,7 | 13,2 | 14,4 | 17,1 |
| T, °C | 13,48 | 3,03 | 9,2 | 10,8 | 12,3 | 16,5 | 18,6 |

▲ Tabel 1 | Uuringu parameetrite kvantitatiivsed põhinäitajad (n = 45)



▲ Joonis 1 | Hajuvusdiagrammid koos regressioonisirgetega ning 95%-lise usaldusvahemiku laiust näitavate piirkondadega

■ Korrelatsioonianalüüs

Korrelatsioonianalüüsi alustatakse statistiliste seoste visualiseerimisest hajuvusdiagrammi abil, vt joonis 1. Hajuvusdiagramm sobib hästi korrelatsiooni tugevuse visuaalseks hindamiseks, kuid joonise põhjal saab anda ainult subjektiivse hinnangu. Objektiivse hinnangu saamiseks tuleb kasutusele võtta lineaarne ehk Pearsoni korrelatsioonikordaja r , mis mõõdab arvuliselt tunnuste vahelise seose tugevust.

Kahe arvulise tunnuse X ja Y hajuvuse mõõtmiseks ümber keskvaartuse kasutatakse standardhälbeid S_X ja S_Y ning tunnuste ühise hajuvuse mõõtmiseks – kovariatsiooni $\text{cov}(X, Y)$. Pearsoni korrelatsioonikordajat r saadakse kovariatsiooni normeerimise käigus:

$$r = \frac{\text{cov}(X, Y)}{S_X S_Y}, \quad |r| \leq 1.$$

Korrelatsioonikordaja r näitab korrelatiivse seose suunda ($r < 0$ – kahanev seos, $r > 0$ – kasvav seos) ja tugevust (skaalal $|r| = 0$ – ei ole seost, kuni $|r| = 1$ – tugev seos). [3]

Lisaks korrelatiivse seose suuna ja tugevuse mõõtmisele vajab kontrollimist ka leitud seose statistiline olulisus. Pearsoni korrelatsioonikordaja olulisuse testimisel kasutatakse t-testi. [3]

Standardne statistiliste hüpoteeside kontrollimise meetod: püstitatakse nullhüpotees H_0 ja sisukas hüpotees H_1 , seejärel leitakse teststatistiku empiiriline ja selle kriitiline väärtus, tuginedes teoreetilisele jaotusele ning otsuse vastuvõtmiseks neid võrreldakse. Kontrollimist vajav hüpoteesipaar:

sõltumatuse nullhüpotees $H_0: \rho = 0$ – tunnused X ja Y ei ole korrelatsioonis;

sõltuvuse sisukas hüpotees $H_1: \rho \neq 0$ – tunnused X ja Y on korrelatsioonis, kus on Pearsoni korrelatsioonikordaja teoreetiline väärtus. Teststatistiku empiirilist väärtust leitakse valemiga

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

kus r on Pearsoni kordaja empiiriline väärtus ja n on valimi suurus. T-statistikud alluvad Studenti t-jaotusele vabadusastmega $n - 2$, [3]. Enamasti kasutatakse t-statistikute asemel aga olulisuse tõenäosust p , mis näitab, kas arvutatud t-statistik on kriitilisest teoreetilisest väärtusest väiksem või suurem (t-statistikute kriitilised väärtused kirjanduses esitatakse tavaliselt tabuleeritud kujul).

Otsuse vastuvõtmiseks võrreldakse olulisuse tõenäosust p ja olulisuse nivood α , mis on tavaliselt kas 0,1; 0,05 või 0,01. Kui osutub, et $p < \alpha$, siis on tõestatud sisukas hüpotees H_1 . Vastasel juhul, kui $p \geq \alpha$, jäädakse nullhüpoteesi H_0 juurde. Statistikapaketi R vastav protseduur väljastab Pearsoni korrelatsioonikordajat koos selle olulisuse tõenäosusega p ning uurijal jääb üle ainult p väärtust võrrelda olulisuse nivooaga α ja sõnastada järeldus.

Tabelis 2 on Pearsoni korrelatsioonikordajad r koos olulisuse tõenäosusega p . Juhul kui $p < 0,1$ ($< 0,05$; $< 0,01$), loetakse seost statistiliselt oluliseks usaldusnivool 90% (95%, 99%). Tabelis on tärnidega tähistatud statistilise seose olulisuse taset.

| | HeM, kg/p | | HRT, h | | T, °C | |
|--|-----------|--------|--------|-------------|-------|----------|
| | r | p | r | p | r | p |
| NH₄, % | -0,11 | 0,494 | 0,39 | 0,009*** | 0,28 | 0,065 |
| N_{tot}, % | -0,17 | 0,272 | 0,56 | < 0,0001*** | 0,41 | 0,006*** |
| O₂, 1000 m³/p | -0,26 | 0,085* | 0,21 | 0,173 | 0,13 | 0,389 |

* < 0,1 ** < 0,05 *** < 0,01

▲ Tabel 2 | Tunnuste vahelised Pearsoni korrelatsioonikordajad r koos olulisuse tõenäosustega p

Kõige tugevamini on seotud NH_4 ja N_{tot} eemaldamise efektiivsus viibeajaga HRT ja temperatuuriga T – korrelatsioonikordaja absoluutväärtus on kõige suurem ja olulisuse tõenäosus p on kõige väiksem. Tegemist on positiivse korrelatsiooniga: temperatuuri suurenemisel ja viibeaja pikenemisel kasvab ka NH_4 ja N_{tot} eemaldamise efektiivsus. Bioloogilise puhastuse õhukulu O_2 ja raskmetallide koormuse HeM vahel on nõrk negatiivne seos usaldusnivool 90%, st raskmetallide koormuse suurenemisel õhukulu üldiselt väheneb.

□ Lihtne lineaarne regressioonanalüüs

Matemaatiline käsitlemine algab mudeli koostamisest (matemaatiline mudel on vaadeldava nähtuse või protsessi formaalne kirjeldus funktsioonide abil) ja lõpeb arvuliste tulemuste saamisega.

Kui mudel on koostatud, siis on ülesande konkreetseks formuleerimiseks vaja see mudel täita algandmetega. Viimased saadakse tavaliselt mõõtmise või vaatluste teel ning võivad sisaldada vigu.

Olenevalt nähtuse või protsessi jälgimise või eksperimendi iseloomust võivad taolised vead olla kas süsteemilised (deterministlikud) või juhuslikud.

Mudel, mis põhineb tegelikel andmetel ja mille prognooside täpsust on uuritud, võib anda täpsemaid tulemusi kui toorandmed. Matemaatilist mudelit võib kasutada nii andmete genereerimiseks kui ka nende parandamiseks.

Regressioonanalüüs koosneb mitmest etapist.

Alustatakse lihtsa lineaarse regressioonimudeliga, mis võimalikult hästi kirjeldab punktisarve hajuvusdiagrammil (vt joonis 1), st üksikute punktide hälbed sirgest on võimalikult väikesed, kõik punktid on sirgele nii lähedal kui võimalik.

Lihtsa lineaarse regressioonimudeli üldkuju on:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon,$$

kus parameetrid β_0 ja β_1 määravad mudeli deterministliku osa ning ε on mudeli juhuslik viga.

Parameetreid β_0 ja β_1 leitakse vähimruutude meetodi abil, mille idee seisneb selles, et otsitakse selline sirge, millest kõikide üksikpunktide ruutkauguste summa on minimaalne. [3]

Lineaarse regressioonimudeli selgitusvõime analüüsimiseks kasutatakse eri karakteristikuid. Mudeli olulisuse hindamiseks sobib sama t-test, mida kasutatakse korrelatiivse seose olulisuse kontrollimiseks.

Lisaks kasutatakse suhet:

$$R^2 = \frac{\text{regressioonhajuvus}}{\text{koguhajuvus}},$$

mida nimetatakse determinatsioonikordajaks. Siin nimetatakse koguhajuvuseks sõltuva tunnuse Y hajuvust kirjeldava hälvete ruutude kogusummat ning regressioonhajuvuseks regressioonimudeli kirjeldatud hajuvust. Determinatsioonikordaja R^2 näitab, kui suur osa tunnuse Y hajuvusest on regressioonimudeliga ära kirjeldatud. Lineaarse regressioonimudeli korral kehtib võrdus:

$$r^2 = R^2,$$

kus r on Pearsoni korrelatsioonikordaja. Regressioonimudeli usaldusväärsust väljendab ka standardviga, mis kirjeldab sõltuva tunnuse Y väärtuste keskmist kõrvalekallet ehk erinevust mudeli põhjal saadud prognoosist. [3]
Tabelites 3 ja 4 on lineaarsed regressioonimudelid koos efektiivsuse näitajatega, mis kirjeldavad raskmetallide, viibeaja ja temperatuuri mõju N_{tot} ja NH_4 ärastuseefektiivsusele ning bioloogilise puhastuse õhukulule.

| Lineaarne regressioonimudel | Olulisuse tõenäosus p | Determinatsioonikordaja R^2 , % | Standardviga, % |
|--|-------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| $N_{tot} = 0,77 \cdot T + 73,73 + \varepsilon$ | 0,006*** | 16,6 | 5,35 |
| $N_{tot} = 1,63 \cdot HRT + 63,22 + \varepsilon$ | <0,0001*** | 31,9 | 4,84 |
| $NH_4 = 0,49 \cdot T + 89,11 + \varepsilon$ | 0,065* | 7,7 | 5,21 |
| $NH_4 = 1,04 \cdot HRT + 82,41 + \varepsilon$ | 0,009*** | 14,96 | 5,003 |

* < 0,1 ** < 0,05 *** < 0,01

▲ Tabel 3 | Lineaarsed regressioonimudelid, mis kirjeldavad temperatuuri (T) ja viibeaja (HRT) mõju N_{tot} ja NH_4 ärastusefektiivsusele

| Lineaarne regressioonimudel | Olulisuse tõenäosus p | Determinatsioonikordaja R^2 , % | Standardviga, % |
|--|-------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| $O_2 = -9,3 \cdot HeM + 1601,14 + \varepsilon$ | 0,085* | 6,7 | 189,1 |
| $O_2 = 20 \cdot HRT + 1138,59 + \varepsilon$ | 0,173 | 4,3 | 191,5 |
| $O_2 = 8,39 \cdot T + 1282,4 + \varepsilon$ | 0,389 | 1,7 | 194,1 |

* < 0,1 ** < 0,05 *** < 0,01

▲ Tabel 4 | Lineaarsed regressioonimudelid, mis kirjeldavad raskmetallide (HeM), viibeaja (HRT) ja temperatuuri (T) mõju õhukulule (O_2)

Joonisel 1 on lisaks regressioonisirgele kujutatud ka vastava regressioonimudeli parameetrite β_0 ja β_1 juhuslikkusest tingitud piirkond, kus võib paikneda 95%-lise tõenäosusega tegelik regressioonisirge. Nimelt on juhuslike parameetrite β_0 ja β_1 väärtuste varieeruvus piiritletud usaldusvahemikega, mis omakorda piiravad kogu regressioonisirge asendi võimalikku muutmist.

Vasakpoolsed diagrammid joonisel 1 kinnitavad, et raskmetallide mõju N_{tot} ja NH_4 ärastusefektiivsusele ja õhukulule ei ole statistiliselt oluline, sest tegeliku regressioonisirge üks võimalikest asenditest on horisontaalne. Sama olukord on ka paaride õhukulu ja temperatuuri ning õhukulu ja viibeaja puhul.

Viimast kinnitavad ka tabelis 4 esitatud lineaarsete mudelite madalad kirjelduse protsendid ja võrdlemisi suured standardvead. Hajuvusdiagrammid, mis illustreerivad temperatuuri ja viibeaja mõju N_{tot} ja NH_4 ärastusefektiivsusele, kinnitavad aga positiivse seose olemasolu.

Väljavõtte statistikapaketi R trükitavast väljundist (temperatuuri T mõju N_{tot} ärastusefektiivsusele kirjeldava regressioonimudeli kohta):

lm(formula = $N_{tot} \sim T$, data = data)

Coefficients:

| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
|-------------|----------|------------|---------|-------------|
| (Intercept) | 73.7295 | 3.6723 | 20.077 | < 2e-16 *** |
| T | 0.7772 | 0.2660 | 2.922 | 0.00552 ** |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 5.352 on 43 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.1657, Adjusted R-squared: 0.1463

F-statistic: 8.539 on 1 and 43 DF, p-value: 0.00552

▲ Väljavõtte | Väljavõtte statistikapaketi R trükitavast väljundist (temperatuuri T mõju N_{tot} ärastusefektiivsusele)

■ Mitmene lineaarne regressioonanalüüs

Mitme tunnuse lisamine regressioonimudelisse aitab täiendava informatsiooni abil jõuda täpsema tulemuseni. Mitme tunnusega mudelis on võimalik arvesse võtta ka tunnuste koosmõjud, st need olukorrad, kus ühe sõltumatu tunnuse mõju sõltuvale tunnusele oleneb teise sõltumatu tunnuse väärtusest. Koosmõjutegurit lisatakse mudelisse vastavate tunnuste korrutisena. Kahe muutujaga lineaarse regressioonimudeli üldkuju on:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \gamma_{12} X_1 X_2 + \varepsilon.$$

Kolme muutujaga lineaarse regressioonimudeli üldkuju on:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \gamma_{12} X_1 X_2 + \gamma_{13} X_1 X_3 + \gamma_{23} X_2 X_3 + \gamma_{123} X_1 X_2 X_3 + \varepsilon.$$

Tunnuste lisamisel mudelisse saab determinatsioonikordaja R^2 väärtus vaid kasvada, sõltumata sellest, kas lisatud tunnused on vajalikud või mitte. Taolistes olukordades kasutatakse R^2 asemel kohandatud

determinatsioonikordajat R_{adj}^2 , mille väärtus mitte-vajalike tunnuste lisamisel jääb ligikaudu samaks. [3]

Artiklis [2] oli statistilise analüüsi põhieesmärk koostada regressioonimudelid, mis kirjeldaksid raskmetallide kombineeritud mõju bioloogilisele reoveepuhastusele, arvestades kolme sõltumatu tunnusega: temperatuuriga (°C), viibeajaga (h) ja raskmetallide koormusega (kg/p). Analüüs on näidanud, et lämmastikuärastust mõjutavad kõige rohkem temperatuuri ja protsessi viibeaeg ning raskmetallide mõju on statistiliselt väheoluline, kuid puhastusefektiivsuse seisukohalt oluline. Pärast kolme muutuja lisamist mudelisse leiti, et N_{tot} ärastusefektiivsust kirjeldab kõige paremini regressioonimudel:

$$N_{tot} = 83,69 + 1,78 \cdot HRT - 1,92 \cdot T - 1,15 \cdot HeM + 0,098 \cdot T \cdot HeM + \varepsilon. \quad (1)$$

Mudelist 1 järeldub, et raskmetallide koguse suurenemisel 1 kg/p võrra kaasneb N_{tot} puhastusefektiivsuse langus 1,052% võrra. Võttes aluseks, et uuritud reoveepuhasti keskmine lämmastikukoormus on 6750 kg/p, siis 1,052% puhastusefektiivsuse langus suurendab keskkonda jõudvat koormust keskmiselt 71,01 kg/p, lisaks mõjutab inhibeeriv toime ka reoveepuhasti tööd pikemaajaliselt, sest protsessi taastumiseks kulub olenevalt raskmetallide koormusest ja temperatuurist 1–21 päeva.

Tabelist 1 järeldub, et raskmetallide koormused varieeruvad uuritud perioodil 20,116 kg/p (standardhälve on 5,398) ehk raskmetallide kombineeritud mõju tulemusel varieerub ka lämmastiku ärastusefektiivsus 5,68%. [2] NH₄ ärastusefektiivsus on kõige paremini prognoositav järgmise regressioonimudeli abil:

$$NH_4 = 103,65 + 1,24 \cdot HRT - 2,003 \cdot T - 1,13 \cdot HeM + 0,095 \cdot T \cdot HeM + \varepsilon. \quad (2)$$

Mudelist 2 järeldub, et raskmetallide koormuse suurenemisel 1 kg/p võrra väheneb nitrifikatsiooni efektiivsus 1,035% võrra ehk raskmetallide kombineeritud mõju tulemusel leiti NH₄ ärastusefektiivsuse varieeruvuseks 5,55%. [2]

| | Olulisuse tõenäosus <i>p</i> | Determinatsioonikoordaja <i>R</i> ² , % | Kohandatud determinatsioonikoordaja <i>R</i> ² _{adj} , % | Mudeli standardviga, % |
|----------------|------------------------------|--|--|------------------------|
| Mudel 1 | < 0,001*** | 43 | 37 | 4,59 |
| Mudel 2 | 0,019** | 25 | 17 | 4,87 |

* < 0,1 ** < 0,05 *** < 0,01

▲ Tabel 4 | Mudelite 1 ja 2 efektiivsuse näitajad

Temperatuuri ja protsessi viibeaja mõju N_{tot} ja NH₄ ärastusefektiivsusele eraldi hindamiseks mudelid 1 ja 2 hästi ei sobi nende multikollineaarsuse tõttu, st kui mudelite argumendid on omavahel tugevalt seotud, on ka nende mõjud omavahel seotud ja mudelist saadud hinnangud ei pruugi olla korrektsed (nt negatiivne koordaja T juures näitab, et temperatuuri suurenemine olukorras, kus teised parameetrid on fikseeritud, põhjustab lämmastiku ärastusefektiivsuse langust, mis ei ole korrektne).

Seega temperatuuri ja viibeaja mõju eraldi hindamiseks mudelid 1 ja 2 paremat tulemust võrreldes lihtsate lineaarsete regressioonimudelitega ei anna (vt tabel 3). [2] Väljavõte statistikapaketi R regressioonimudeli 1 kohta trükitavast väljundist:

lm(formula = Ntot ~ HeM + HRT + T + T:HeM, data = data)

Coefficients:

| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
|-------------|----------|------------|---------|-----------------|
| (Intercept) | 83.69461 | 13.29039 | 6.297 | 0.000000181 *** |
| HeM | -1.14722 | 0.56304 | -2.038 | 0.048247 * |
| HRT | 1.77726 | 0.43987 | 4.040 | 0.000235 *** |
| T | -1.92408 | 1.04332 | -1.844 | 0.072570 . |
| HeM:T | 0.09798 | 0.04318 | 2.269 | 0.028738 * |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 4.586 on 40 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.4303, Adjusted R-squared: 0.3733

F-statistic: 7.552 on 4 and 40 DF, p-value: 0.0001247

▲ Väljavõte | Väljavõte statistikapaketi R regressioonimudeli 1 kohta trükitavast väljundist

```
lm(formula = NH4 ~ HeM + HRT + T + T:HeM, data = data)
```

Coefficients:

| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
|-------------|-----------|------------|---------|-------------------|
| (Intercept) | 103.65069 | 14.12643 | 7.337 | 0.00000000639 *** |
| HeM | -1.13397 | 0.59846 | -1.895 | 0.0654 . |
| HRT | 1.24087 | 0.46754 | 2.654 | 0.0114 * |
| T | -2.00334 | 1.10895 | -1.807 | 0.0784 . |
| HeM:T | 0.09534 | 0.04590 | 2.077 | 0.0443 * |

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 4.874 on 40 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.2492, Adjusted R-squared: 0.1741

F-statistic: 3.319 on 4 and 40 DF, p-value: 0.01939

▲ Väljavõte | Väljavõte regressioonimudeli 2 kohta trükitavast väljundist

☐ Kokkuvõte

Korrelatsioonanalüüs on tõhus abivahend olukordades, kus uurija soovib leida statistilist seost arvuliste tunnuste vahel.

Korrelatsioonanalüüsimeetodid on tihedalt seotud regressioonanalüüsiga, mille käigus uuritakse tunnuste vahelist põhjuslikku seost matemaatilise mudeli abil. Terviklik statistiline analüüs koosneb järgmistest osadest:

- andmete kogumine ja põhiliste arvarakteristikute abil kirjeldamine;
- esinevate tunnuste korrelatsioonide uurimine hajuvusdiagrammi ja Pearsoni korrelatsioonikordaja abil;
- leitud korrelatiivsete seoste olulisuse kontrollimine t-testi abil;
- lihtsamate lineaarsete regressioonimudelite koostamine ja nende efektiivsuse kontrollimine;
- keerulisemate mitme muutuja regressioonimudelite koostamine ja nende efektiivsuse kontrollimine;
- tulemuste tõlgendamine konkreetse uurimisprobleemi vaatenurgast.

Artiklis anti lühiülevaade korrelatsioon- ja regressioonanalüüsi põhietappidest teadusartikli [2] näitel.

☐ Summary

Correlation and Regression Analysis: an Example of an Empirical Study

Correlation analysis is a statistical method used to evaluate the strength of relationship between two quantitative variables. This technique is strictly connected to the regression analysis, which investigates the causal relationship between variables through a mathematical model. Comprehensive statistical analysis consists of the following steps:

- data collection and description using basic numerical characteristics,
- studying correlations between variables using the scatter plot and the Pearson correlation coefficient,
- checking the significance of correlations by t-test,
- development and testing of simple linear regression models,
- development and testing of multivariate linear regression models,
- interpretation of the results from the perspective of a specific research problem.

The aim of this paper is to provide a general overview of correlation and regression analysis based on the research conducted in the scientific article [2].

▣ Viidatud allikad

[1] Fox, J., Bouchet-Valat, M. (2019). Rcmdr: R Commander. R package version 2.6-1.

[2] Lember, E., Retšnoi, V., Pachel, K., Loigu, E. (2018). Combined effect of heavy metals on the activated sludge process. Proc. of the Estonian Academy of Sciences, pp. 303–312.

[3] Montgomery, D. C., Runger, G. C., Applied statistics and probability for engineers. New York: John Wiley & Sons, 2003.

[4] R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org>.



Koostöö raamistik ühiste õppemoodulite arendamiseks koostöös ettevõtjatega ning väliskõrgkoolidega

Autorid:

Kati Nõuakas, MA, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor
Eduard Ševtšenko, PhD, Tallinna Tehnikakõrgkooli kaasprofessor
Lea Murumaa, MA, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor
Oliver Kallas, MSC, Tallinna Tehnikakõrgkooli logistikainstituudi direktor

■ Sissejuhatus

Logistikavaldkond on pidevas muutuses. Need muutused peavad jõudma võimalikult kiiresti ka õppetöösse, et tagada kvaliteetne õpetamine ning hoida logistikainstituudi vilistlaste mainet tööturul hinnatud spetsialistidena.

Tööandjate ootused on saada kõrgkoolist „valmis produkt“, mida kohe tööle rakendada. Kõrghariduse pakkumises seisame aga silmitsi olukorraga, kus luua saame pigem raami, millele tööandja asub kujundama oma spetsiifilisest vajadusest lähtuvat spetsialisti. Selline pakkumise ja ootuste lõhe on tekitanud olukorra, kus instituut on üha enam tegemas koostööd ettevõtjatega ning omandamas kogemusi väliskõrgkoolidega suheldes.

Käesoleva artikli eesmärgiks on anda ülevaade seni tehtud uurimistest ning koostööprojektidest, mille tulemusi on rakendatud õppetöö vormi ja sisu arendamiseks.

■ 1. Uuring ettevõtete hulgas

Varasemalt läbiviidud uuringud on tõestanud, et ülikoolid keskenduvad enamasti inseneriõppe läbiviimisel teadmispädevuste hindamisele ja arendamisele. Seevastu tööandjad vajavad oskusi, mis võimaldaksid ülikoolide lõpetajatel kohe pärast õpingute lõppemist lahendada praktilisi inseneritehnilisi probleeme [1].

See on üheks oluliseks lahkkeliks praeguses inseneriõppes. Teiseks suureks väljakutseks on vajadus integreerida valdkonnaülesed oskused veelgi rohkem õpetamis- ja õppimisprotsessi [2].

Varasemates uurimistöodes on määratud kindlaks üldpõhimõtted, kuidas siduda keskkooliõpilaste valmisolek ning kompetentsus juhendamise kaudu piisavaks valmisolekuks konkreetse tegevusala valikul ja eriala omandamisel [3].

Uuringute autorid on kogunud teavet tööandjate vajaduste kohta, mis oleksid neile vajaliku personali kompetentsid, muu hulgas ka näiteks disaini, teh-

noloogia ja majanduse valdkonnas [4].

Nendele vajadustele tuginevalt on välja töötatud soovitusel karjäärinõustajatele ja täienduskoolitusprogrammide arendajatele. Ettevõtetele koguti andmeid küsitluse läbiviimisega.

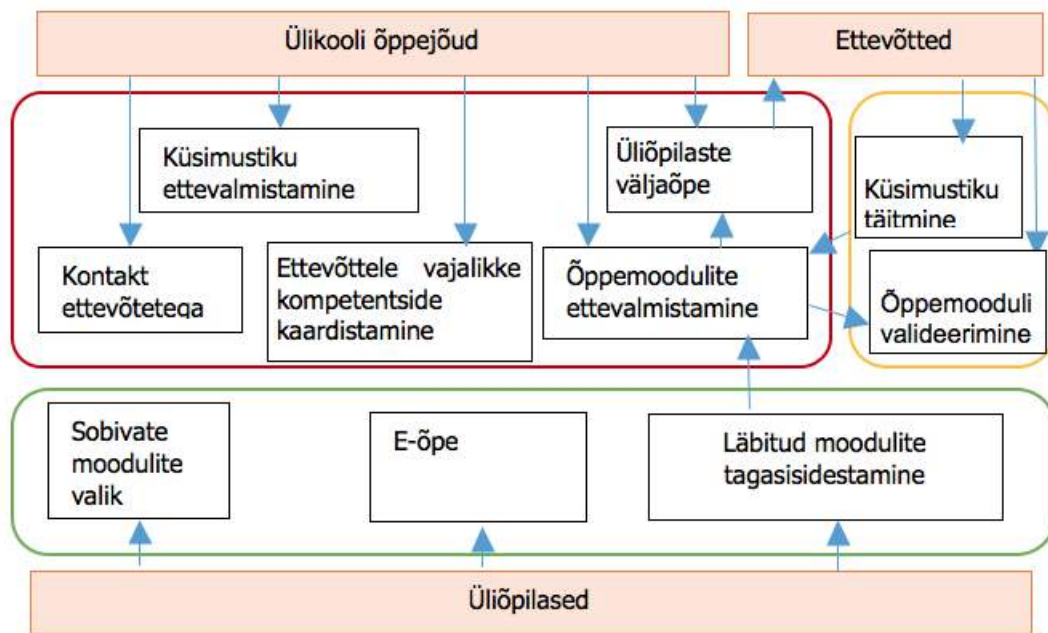
Tulemustena selgus, et metallitöötlus- ja masinaehitusettevõtte vajavad suurema lisandväärtuse loomiseks just loovamaid insenere, kelle oskused ja teadmised on piisavad kohe pärast ülikooliõpinguid tööleasumisel [8].

Uuringu tulemusena selgus, et keskkoolis toimuva karjäärinõustamise ja valitud erialal nõutavate oskuste ja ootuste edastamise vahel on piirkonniti oluline erinevus [1].

Suur roll on julgustada noori valima elukutseid, mille omandamiseks peaks mõistma ning huvituma matemaatikast, loodusteadustest ja tehnoloogiast. Need on valdkonnad, mille järele on tööturul kõige suurem nõudlus. Samas on selliste spetsialistide piisavalt kõrge tasemega väljaõpe võimalik üksnes koolide, ülikoolide ja ettevõtete tiheda koostööna. Ülikoolide haridusprogrammid peaksid vastama konkreetsetes piirkonnas välja töötatud mudelile, mis kaardistaks ettevõtete vajadused.

Seetõttu on pidevalt vajalik jälgida ettevõtlusmaastikul toimuvaid muudatusi ning neile võimalikult kiiresti reageerida ka kõrghariduse pakkumises.

Lisaks on vajalik järgida haridussüsteemis osalejate pädevusi ning nende kattumist või vastuolu ettevõtete nõudlusega [4].



▲ Pilt 1. | Ettevõtete, õppejõu ja üliõpilaste funktsioonid õppemoodulite arendamisel

Eespool kirjeldatud küsimuste lahendamiseks on autorid väljatöötanud uuendusliku raamistiku ühiste õppeplokkide arendamiseks, mida saab rakendada bakalaureuse- ja magistriõppekavade jaoks ülikoolides.

Raamistiku potentsiaalsed kasutajad oleksid nii logistika kui ka haldamise ning juhtimise õppejõud, ettevõtted ja üliõpilased. Õppeploki arendamiseks koostab õppejõud küsimustiku ja tutvustab seda partnerettevõtetele, kellel on huvi ülikooli üliõpilaste vastu.

Küsimustiku abil hindab õppejõud ettevõttele vajalikud kompetentsid ja analüüsib, kuidas nad on kaetud olemasolevates õppekavades.

Seejärel toimub ülikoolide koostöös uute lisamoodulite väljatöötamine vajalike kompetentside katmiseks.

Valminud moodulid pakutakse üliõpilastele kas olemasolevate õppeainete raames või valikainetena. Pärast moodulite läbimist analüüsitakse üliõpilaste tagasisidet, tehakse vajalikud korrektiivid ja moodulid on valmis kasutamiseks bakalaureuse- ja magistriõppekavadel.

2. Uuendusliku raamistiku ühiste õppeplokkide arendamiseks valideerimine „UniLog” projekti raames

Mitte üksnes Eestis, vaid ka paljudes teistes Euroopa riikides on hariduse ja inimkapitali arendamise võtmeküsimused oskused ja oskuste mittevastavused. Poliitikakujundajad, hariduse pakkujad ja sotsiaalpartnerid väidavad, et on vaja teha märkimisväärsed jõupingutusi, et tõsta esile noorte huvi valida karjäärivõimalused majandussektorites [4].

Seega on oluline teha koostööd ka partneritega Eestist väljaspoolt. Näiteks on leitud võimalused projektide raames koostöö tegemiseks naaberriikide kõrgkoolidega, sest nii nagu logistikainstituut Tallinna Tehnikakõrgkoolis, on samalaadsete probleemide ja väljakutsete, nt üliõpilaste motiveeritus ja õigeaegne lõpetamine, ees ka teiste riikide kõrgkoolid.

Siinkohal tuginevad artikli autorid koostööprojektide tulemustele ning suhtlusele partnerkõrgkoolidega.

Projekti „UniLog” raames on eesmärk valideerida uuenduslikku raamistikku ühiste õppeplokkide arendamiseks, mida saab rakendada bakalaureuse- ja magistriõppekavade jaoks ülikoolides.

Raamistiku potentsiaalsed kasutajad oleksid tarneahela ainetega töötavad õppe- ja teadustöötajad partnerülikoolides.

Projekti eesmärk on õpetajate erialase kompetentsi arendamine ja valmis moodulite loomine õppekavade väljatöötamiseks rahvusvahelistes ülikoolides. Võimalus suhelda ettevõtetega võimaldab autoritel tuvastada lõhet praeguste õppekavade ja ettevõtete tänapäevase vajaduse vahel.

Selle uurimistöö eesmärk on õppekavade parem sidumine tööturu oodatud kompetentsidega, suurendades Läänemeriiriikide strateegilist ärispetsialistide arvu.

Tööturu vajadusi arvestavad õppemoodulid võimaldavad üliõpilastel omandada teadmisi ja praktilisi oskusi, mis on eeliseks tööle asumisel.

Autorid on koostanud ülikooli õpetajatele õppe- ja koolitusmaterjalid valitud 1 EAP mooduli vormis.

„UniLog” projekti raames on logistikainstituut tegelenud logistikaõppekava arendusega ning õppeainete jaoks vajalike teemablokkide sisu loomisega.

Projekti meeskonda kuuluvad Rootsi (KTH Royal Institute of Technology), Soome (LAB University of Applied Sciences), Läti (Riga Technical University) ja Eesti esindajad. Projekti algstaadiumis koostati kõigi riikide puhul ülevaade logistikavaldkonna õppevõimalustest ning ettevõtete ootustest valdkonna õppele.

Projekti raames koostatud uuring kannab nimetust „Improvement needs in the Central Baltic logistics competence and the related applied higher education”.

Uurimusega selgitati välja vastused küsimustele: mis on tuleviku võtmenäitajad, mida vajavad Läänemere piirkonna ettevõtted; millised on erinevused ja sarnasused logistikaalastes kompetentsides Rootsis, Soomes, Lätis ja Eestis; millist logistikaharidust pakutakse uuringu riikides ja millist partnerinstitutsioonides; millised on erinevused ja sarnasused logistikavaldkonna kõrghariduses Läänemere piirkonna riikides ja projekti partnerinstitutsioonides; millised lüngad esinevad tuleviku kompetentside vajaduse ja praegu pakutava kõrghariduse vahel. Koondtabel (vt tabel 1) võtab kokku partnerinstitutsioonide asukohariikides läbiviidud uuringu tulemused.

| Riik | Intervjueeritud ettevõtted | | | | | | |
|--------|-----------------------------|------------|--------------|---------------------|-------------------------|--------------|--------|
| | Autotööstus/ autotehnika | Farmaatsia | Toidutööstus | Teised tootmised | Transport ja laondus | Jaekaubandus | Teised |
| Rootsi | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 | 1 | 2 |
| Soome | 1 | | 1 | 1 | 3 | 4 | 5 |
| Läti | | | 1 | 3 | 11 | | |
| Eesti | | 2 | 2 | 2 | 8 | | |

▲ Tabel 1. | Uuringus osalenud ettevõtted asukohariigi ja tegevusala alusel [6]

Seega oli uuringusse kaasatud võimalikult paljude valdkondade ettevõtteid, kuid põhifookus jäi siiski transpordi ja laondusega seotud ettevõtetele.

Iga riigi esindajad viisid läbi intervjuud vähemalt 10 ettevõttega. Tabelis 2 on intervjuude tulemused ehk peamised punktid, mida hinnati vajalikeks teadmisteks, mida peaks olema võimalik omandada kõrgkoolis ja suurimad erinevused tööandjate ootuste ja töötajate oskuste vahel.

| Riik | | Baastasemel | Operatiivsel tasemel | Juhtimistasandil |
|--------|---|---|---|--|
| Rootsi | Vajalikud teadmised | Terviklik ülevaade, finantsteadmised, jätkusuutlikkus ja digitaliseerimine, kaasamine. | Ostmise, pakkimise, jätkusuutlikkus pakendamises. | Mitme kriteeriumi põhjal otsustamine, juhtimine, pikaajaline visioon. |
| | Suurimad lõugad oskuste ja tööandjate ootuste vahel | Ei hinnatud | Oskus näha tervikut, probleemi lahendamise võimekus, õigete andmete kasutamine, LEAN-mõtlemine logistikas, tagasisidestamine. | Süsteemi terviklikkuse nägemine, täiendav kulu kehvast kvaliteedist, tagasisidestamine ja eesmärkide fookuseerimine. |
| Soome | Vajalikud teadmised | Tervikpildi nägemine ja selle osade põhjal hindamine, enda rolli nägemine, väärtusloome, teadmine, et logistika on enamat kui lihtsalt transport. | Tervikliku protsessi nägemine ja oskus töötada erinevate ülesannetega. | Terviklik tarneahela juhtimise raamistiku nägemine, meetodid, tööriistad, materjalid ja inimesed. Tervikpilt toote disainist kuni kliendini. Enda roll. Sidusrühmade roll tarneahelas. |
| | Suurimad lõugad oskuste ja tööandjate ootuste vahel | Praktilised oskused, suure pildi nägemine, võtmetulemusnäitajad, IT ja tehnoloogia kasutamine, projektitööoskused, probleemilahendused, kliendile keskendumine. | Tööohutus ja tervishoid, töötajate õigused ja kohustused, IT-oskused. | Inimeste juhtimine, suhtlemisoskus. |
| Läti | Vajalikud teadmised | Teadmised logistikaprotsessist, seadusandlus, kommunikatsioon, ressursside efektiivne kasutamine, andmete kogumine ja analüüsimine. | Arusaam ettevõtte kaubavoost ja transpordi dokumentatsioonist, probleemilahendusoskused, keelteoskused, meeskonnatöö oskus, tegevusala spetsiifilised tehnilised oskused. | Suure pildi nägemise oskus, ettevõtte juhtimine, lüldriiskused ja protsesside arendamise oskused. |
| | Suurimad lõugad oskuste ja tööandjate ootuste vahel | Ei hinnatud. | Kogemused ja oskused valdkonnaspetsiifiliste masinatega töötamisel, IT-teadmised, spetsiifilised logistikalised oskused, veodokumentatsioon. | Oskus teoreetilised oskused praktikasse rakendada, teadmised majandusest, riskikartlikkus. |
| Eesti | Vajalikud teadmised | Alusteadmised logistika toimimisest. | „Helikopterivaade“, terve tarneahela mõistmine, võtmetulemusnäitajad, uute tehnoloogiate mõistmine. | Kliendi ja pakkuja vajadused, LEAN-juhtimine, uued tehnoloogiad. Motiveerimisoskused. |
| | Suurimad lõugad oskuste ja tööandjate ootuste vahel | Majanduse baasteadmised, teadmised kulude struktuurist ja kujunemisest. | Probleemilahendusoskused, kartus uue tehnoloogia ja uute lahenduste ees. Statistika ja prognooside kasutamine. Lõugad teooria ja praktiliste teadmiste vahel. | Erinevused generatsioonide juhtimisel ja suhtlemisel. |

▲ Tabel 2 | Vajalikud teadmised ja suurimad erinevused tööandjate ootuste ning töötajate oskuste vahel [6]

Tabelis 2 esitatud tulemused olid peamiseks aluseks uute õppemoodulite arendamiseks ja katsetamiseks. Esmalt vaadati üle nelja partnerkõrgkooli õppekavad ning võrreldi tööandjate intervjuudest saadava infoga ettevõtjate ootuste osas.

Seejärel valiti välja õppeained, mille raames oleks vajalik rakendada arendatud ja täiustatud õpiväljundeid ning õppeainete sisu.

Projekti raames loodi 1 EAP mahuga moodulid, mida on võimalik intergreerida nii bakalaureusekui ka magistriõppe tasemel.

Projekti töökeeleks on inglise keel. Sellepärast on loodud moodulid ja nende kirjeldused esitatud inglise keeles.

Piloteerimise protsessis oli iga partneri enda otsustada, kas tõlgib mooduli oma õppekeelde või kasutab ingliskeelset varianti.

Bakalaureuseõppe logistika õppekavale loodud moodulid on järgmised.

- Tööstus 4.0 ja CPS alused logistikas.
- Protsesside pideva täiustamise kontseptsioonid.
- Logistika parandamise meetodid ja tööriistad.
- Kulusäästlik juhtimine.
- Tarneahela tulevikutrendid
- E-kaubandus viimases miilis.
- Riskijuhtimine tarneahelas.
- ERP.
- Kliendiväärtuse loomine tarneahelas.
- Transpordivahendid ja -tehnoloogiad.
- Transpordi juhtimise süsteem.
- Tagastuslogistika.
- Säästvad ja intelligentsed transpordisüsteemid.
- E-teenused.

Lisaks bakalaureuseõppele pakuvad partnerkõrgkoolid Rootsist ja Lätist ka magistri tasemel logistikaõpet.

Kuna ka magistriõpe on oluline osa logistikavaldkonna õppe pakkumisest, siis valiti välja ja loodi ka magistriõppe moodulid, mis on järgmised.

- Kulusäästlik ja roheline logistikakontseptsioon.
- Logistika jätkusuutlikkuse mudelid.
- Tootmislogistika simulatsioonimudelid.
- Tarneahela läbipaistvus ja roll koostalitlusvõimelistes süsteemides.
- Kuidas tehnoloogia toetab materjalide käitlemist.
- Kulusäästlikud ja optimeeritud mudelid – kuidas arvestada erinevaid kriteeriume.
- Tehnoloogia tutvustus logistikas – riskid ja võimalused.
- Arenenud strateegilise tarneahela juhtimine.
- Täiustatud ärilogistika.
- Transpordieeskirjad.
- Logistikaeeskirjad.
- Mõõdikud ja kvaliteedijuhtimine logistikas.
- SC-simulatsioon.
- SCOR-mudel.
- FIATA määrused.

Loodud moodulite sisu arutati omavahelistel koosolekutel ning peaaegu kõiki loodud mooduleid piloteeriti või veel piloteeritakse partnerkõrgkoolides.

Piloteerimise protsess veel (aprill 2020) kestab, kuid esialgsete tulemustena saab esitada üliõpilaste hinnangu Tallinna Tehnikakõrgkoolis sügissemestril piloteeritud ainemoodulite kohta. Üliõpilaste tagasiside tulemused on esitatud tabelina (vt tabel 3).

| Kursus | Sisu vastavus ainekursuse eesmärgile | | Mooduli integreeritud ainekursusesse | | Sisu arusaadavus | | Mahule 1 EAP vastavus | | Õppemeetodite sobivus | |
|---|--------------------------------------|----|--------------------------------------|----|------------------|----|-----------------------|----|-----------------------|----|
| | Jah | Ei | Jah | Ei | Jah | Ei | Jah | Ei | Jah | Ei |
| Transportations mean and technologies | 15/1 | | 16 | | 14/2 | | 12/4 | | 16 | |
| TMS* | 10/2 | | 10/2 | | 12 | | 12 | | 11/1 | |
| Reverse logistics | 8 | | 8 | | 8 | | 7/1 | | 7/1 | |
| Sustainable and intelligent transport systems | 16/3 | | 17/2 | | 19 | | 13/6 | | 19 | |
| Basics of logistics information and communication systems | 11 | | 11 | | 10/1 | | 9/2 | | 9/2 | |
| E-services | 10 | | 10 | | 10 | | 9/1 | | 10 | |

*TMS – Transport management system

▲ Tabel 3 | Üliõpilaste tagasiside õppemoodulite piloteerimisele

Üliõpilaste hinnangul on moodulid eelkõige õppe-tegevust arendavad ja rikastavad. Peamise puuduse-ena esitati mooduli sisu mittevastavus mahule ehk mõne mooduli puhul oli üliõpilaste hinnangul sisu maht suurem kui selle eest saadav 1 EAP.

Rahvusvaheline vaade ja kõrgkoolide kogemused on loonud baasi, millele tuginevalt on loodud kvaliteetsed ja sisukad ainemoodulid.

„UniLog” projekti tegevused kestavad veel kuni juuni 2020 lõpuni, seejärel saavad õppejõud juba iseseisvalt loodud mooduleid õppetöös piloteerida ning vajadusel oma kogemustele ja arvamustele tuginedes korrigeerida.

„UniLog” projekt on andnud logistikainstituudile olulised koostöösidemed ning transpordi ja logistika õppekava on arendatud ka vastavalt rahvusvahelisele kogemusele.

■ Kokkuvõte

Uurimistöös töötasid autorid välja raamistikku ühiste õppeplokkide arendamiseks ja valideerisid „UniLog” projekti raames. Raamistik võimaldab ülikoolidel võtta arvesse ettevõtete kompetentsivajadused ja nende baasil luua 1 EAP ainemoodulid.

Ainemoodulid on integreeritud olemasolevate õppekavade ainetega bakalaureuse- ja magistritasemel.

Pärast „UniLog” projekti lõpetamist loodud moodulid on kättesaadavad kõikidele ülikoolidele.

Autorid plaanivad kasutada loodud raamistikku uute projektide taotlemisel ja kaaluvad võimalust magistriõppekava loomiseks.

■ Summary

Framework for Common Learning Blocks Development in Collaboration with Companies and Universities

The field of logistics is constantly changing. These changes must also reach the classroom as quickly as possible to ensure high-quality teaching and maintain the reputation of the Institute of Logistics alumni as valued professionals in the labour market.

Employers expect to have a graduate-level employee that can be directly assigned to work tasks. However, in the provision of higher education, we are faced with a situation where the university can rather create a basement on which the employer begins to build a specialist based on company-specific need.

The gap between the qualifications of graduates and company expectations has led the institute increasingly cooperating with entrepreneurs. Companies are gaining experience in dealing with international higher education institutions. The purpose of this article is to give an overview of the carried out research resulted in Innovative Common Study Block Framework development and introduce how the framework has been applied to improve the form and content of teaching in the format of collaborative projects.

The methods of teaching and study objects created to enable the graduated students to possess competencies expected by future employers also have to be adjusted to correspond to rapid changes. The new generation entering the labour market expects curriculums and courses to be created and adapted to their requirements. The heterogeneous studentship expects to be involved in the teaching-learning process and suitable for them studying environment. The teaching process is moving more and more towards using a combination of activities held out both in physical and e-environment.

In this research, the authors developed an innovative framework for developing common learning blocks and validated within the UniLog project. The potential users of the framework would be teaching and research staff working with supply chain subjects.

The framework allows universities to take into account the competence needs of companies and to build 1EAP subject modules on their basis. Subject modules are integrated with existing curriculum subjects at the undergraduate and

graduate levels.

Modules created after completion of the UniLog project are available to all universities. The authors plan to use the framework created to apply for new projects and are considering the possibility of creating a master's program.

▣ Viidatud allikad

[1] Shevtshenko, E., Karaulova, T., Igavens, M., Strods, G., Tandzegolskienė, I., Tütlys, V., Seyed, T., and Kuts, V. Dissemination of Engineering Education at Schools and its Adjustment to Needs of Enterprises. In Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium, Zadar, Croatia, November 08–11, 2017 (Katalinic, B., ed.). DAAAM International, Vienna, 2017, 44–53.

[2] 21st Century Skills for Students and Teachers. <https://ainamulyana.blogspot.com/2017/06/21st-century-skillsfor-students-and.html> (accessed 2019-08-18).

[3] Shevtshenko, E., Karaulova, T., Igavens, M., Strods, G., Tandzegolskienė, I., Tütlys, V., and Mahmood, K. Innovative methods of engineering education popularization at schools. Proc. Est. Acad. Sci., 2019, 68(4), 356–363.

[4] Tandzegolskienė, I., Tütlys, V., Jurgilė, V., Strods, G., Igavens, M., and Shevtshenko, E. Attracting youth to the occupations in the food industry, agriculture and engineering: issues for policy and practice. In Proceedings of the 11th annual International Conference of Education, Research and Innovation, Seville, Spain, November 12–14, 2018. ICERI2018 Proceedings, 2018, 1637–1643.

[5] Shevtshenko, E., Karaulova, T., Igavens, M., Strods, G., Tandzegolskienė, I., Tütlys, V., Seyed, T., and Kuts, V. Implementing interdisciplinarity in career guidance for secondary school students in forestry and wood, metal and machinery, agriculture and food sectors of industry. Holistic Learn., 2017, 3, 53–60.

[6] Sallinen, N.; Baalsrud Hauge, J.; Birze, M.; Kempe, I.; Hintsov, T. Improvement needs in the Central Baltic logistics competence and the related applied higher education: Part I. Requirements and needs analysis. Unilog WP2.

[7] Summary of proposals of the OSKA expert panel on the manufacturing of metal products, machinery and equipment (2016). Available from: http://oska.kutsekoda.ee/wp-content/uploads/2016/05/MMT_ENG.pdf. Accessed: 2017-10-01.

□ Tööstusroboti mobiilsus

Autorid:

Kristo Vaher, MSc, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor

Tavo Kangru, MSc, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor

□ Sissejuhatus

Tänapäeval on tööstuse üks suurimaid probleeme kvalifitseeritud tööjõu nappus. Tehnoloogiate areng on viimastel aastakümnetel olnud ülikiire, tänapäeval muutuvad tehnoloogiad palju kiiremini kui inimpõlvkonnad. Vanemate põlvkondade inimestel puuduvad sageli teadmised ja julgus uusimate tehnoloogiate kasutamiseks. Samal ajal puudub noortel kannatlikkus ja tahe õppida keerulisi insenerialasid.

Sellise käitumise põhjuseid on keeruline täpselt määratleda, kuid on selge, et tööstus peab õppima olukorraga toime tulema ja leidma uusi võimalusi tootmise jätkamiseks ning tulevikus kasumi teenimiseks.

Kvalifitseeritud tööjõu probleemi leevendamiseks on võimalik kasutada tööstusroboteid ja automatiseerida tootmist. Robotiseerimine on muidugi suurematele ettevõtetele taskukohasem kui väikestele ja keskmise suurusega ettevõtetele (VKE).

Tööstusrobotite kasutamise peamine eeltingimus on tootmine suurtes partiidetes, eriti juhul, kui samas süsteemis töötab korraga mitu robotit. See aga ei tähenda, et VKEd ei peaks roboteid üldse kasutama. Koostööroboteid saab interaktsioonitehnoloogia abil edukalt integreerida väiksemate ettevõtete tööprotsessi [2]. Koostöörobotite arendamine ja Tööstus 4.0 põhimõtete üldine vastavus on tööstusrobotite juurutamise üsna lihtsaks teinud [4], [5], [6], [7], [14].

Tööstusliku roboti töötamise üheks eeltingimuseks on, et sellel oleks päevas piisavalt töötunde.

Väiksemate ettevõtete puhul, kes toodavad väikeseid partiiidid, tähendaks see tootmise ümberkorraldamist selliselt, et roboti tehtavad ülesanded suunataks statsionaarsele robotile. Teine võimalus on roboti käsitsi liigutamine tootmisüksuste vahel. See võib põhjustada pikki pause tööajas ja efektiivsuse langust. Robot võiks ootamise asemel täita mõnd muud ülesannet või teenindada teisi pinke. Selle saavutamiseks

tuleb tootmine kavandada nii, et pingid, mida robot peab teenindama, paigutatakse roboti ümber. Teine võimalus on viia robotit tootmisalal ühelt positsioonilt teisele. Seda saab teha käsitsi või mobiilse roboti abil.

Lisaks kvalifitseeritud tööjõu puudusele peavad tööstused tegelema ka selliste probleemidega, nagu tootmisaja optimeerimine, ressursside tõhusam kasutamine, kiiremate ja väiksemate koguste tootmine ning samas tuleb tagada kõrge kvaliteet [13]. Ka nende probleemide lahendamisel on võtmeteguriks robotiseeritud lahendused. Teadmiste puudumine potentsiaalsete kasutajate nõustamiseks on oluline takistus robotiseeritud lahenduste laialdasemale kasutamisele [9].

□ 1. Uuring Eesti ettevõtete hulgas

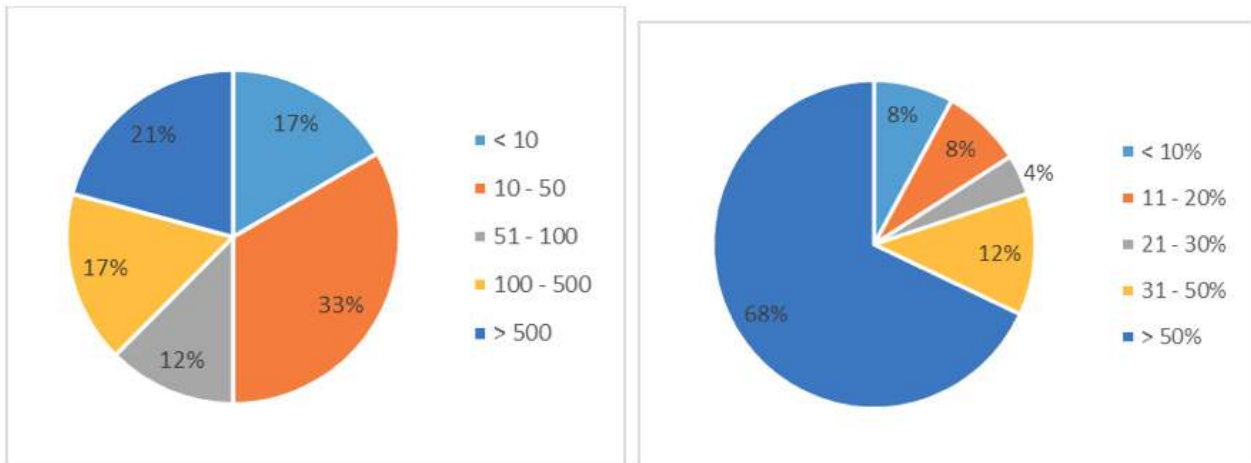
2017. aastal viidi Eesti ettevõtete seas läbi uuring, et kaardistada tootmisettevõtete robotiseerimise tase. Muu hulgas küsiti ettevõtelt tootmise omadusi partii suuruse osas, et hinnata, millised ettevõtted saaksid kasu statsionaarsest lahendusest ja millised mobiilsetest robotisüsteemidest.

Uuringus osales 30 ettevõtet. Ettevõtte keskmine suurus oli 140 inimest ja käibeandmete järgi võis enamiku ettevõtteid määratleda VKE-dena.

Lisaks hõlmas uuring küsimusi toodete ja partii suuruse ning partii korratavuse teguri kohta – see tähendab, kas ühte partiid toodetakse mitu korda või on iga partii erinev.

Uuring näitas, et ühe kolmandiku ettevõtete partiiide suurused vastavad 10–50 ühikule.

Enamikul juhtudel oli partii korratavus üle 50%. Kui partii suurus on alla 10 ühiku, võib täheldada madalat korratavuse taset (ca 10%). Üle 50 ühiku partiiide korral oli korratavus kõrge, üle 50%. Üle 60% ettevõtetest vastas, et enam kui 50% partiiidest korraldaks aja jooksul pidevalt.



▲ Pilt 1. | Detailide arv partii suuruses (vasakul), partide korratavus (paremal)

Uuringust saadud info põhjal võib järeldada, et enamik ettevõtteid toodab suhteliselt väikeseid partiiid, mille korratavus on kõrge.

See tähendab, et ühte partiiid ei kasutata ainult ühe toote või selle osa tootmiseks ja tooteid toodetakse korduvalt. Robotiseerimise seisukohast tähendab see mitme programmi loomist. Tootmistsükli kordamisel saab juba kirjutatud programmi uuesti kasutada.

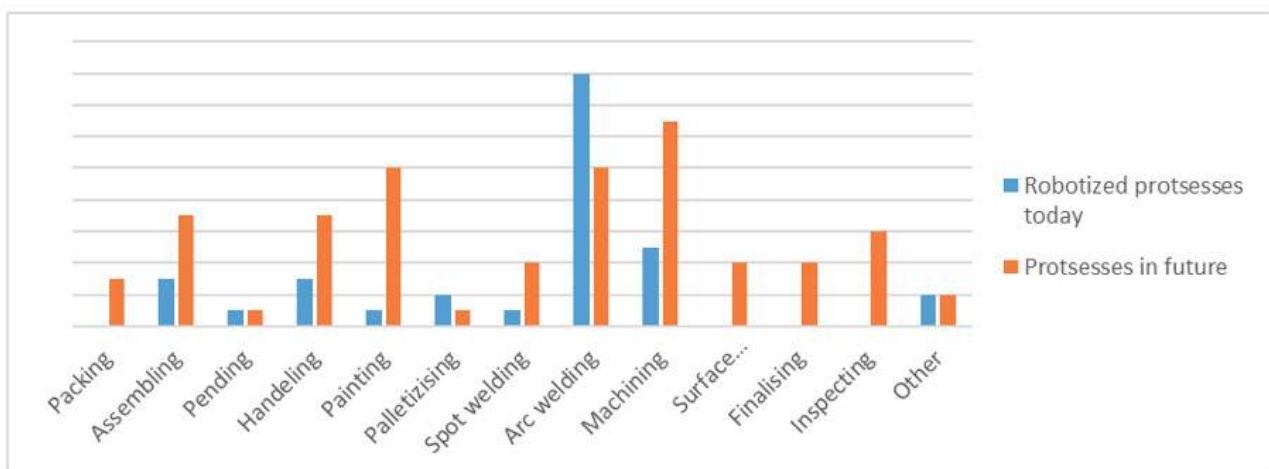
Uuring näitab ka, et tootmises kasutatavad robotid pole täielikult hõivatud. Pooled ettevõtetest kasutavad roboteid 50–70% oma võimsusest.

See näitab, et robotitele võiks anda lisaülesandeid, kuid kuna ettevõtted kasutavad peamiselt keevitusroboteid, on neile raske muid ülesandeid määrata.

Andmed näitavad, et ainult 25% ettevõtetest kasutab üle 70% roboti ressursist.

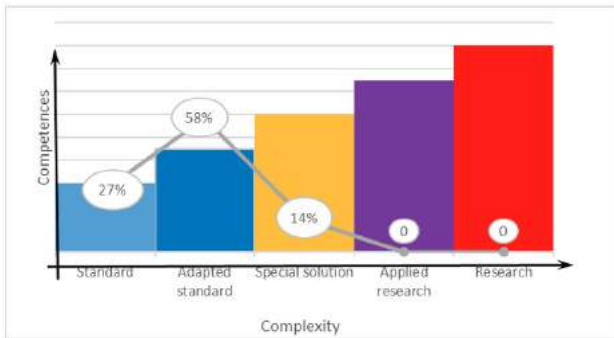
Uuringu kohaselt on seni tööstuslikke roboteid peamiselt kasutatud keevitamisel. Andmed näitavad, et ettevõtted sooviksid kasutada roboteid ka muudeks toiminguteks, nt mehaaniliseks töötlemiseks, värvimiseks, kokkupanekuks ja kvaliteedikontrolliks (pilt 2).

Nendes piirkondades on ülesandeid, mida saab määrata ühele robotile. Kui teatud ülesandega robotit pole täielikult võimalik hõivata, on mõistlik robotit kasutada paljude ülesannete jaoks.



▲ Pilt 2. | Robotiseeritud protsessid praegu ja soov tulevikus

Bo Genefke Taani Tehnoloogiainstituudis välja töötatud Genefke skaala järgi tegutsevad uuringus osalenud ettevõtted peamiselt standardseid ja kohandatavaid teadmisi nõudvate ülesannetega, mida saab hõlpsasti automatiseerida (pilt 3). Genefke skaala jagab ettevõtteid viide kategooriasse. Esimesse rühma kuuluvad ettevõtteid saavad kasutada standardiseeritud, hõlpsasti rakendatavaid lahendusi. Skaala paremasse otsa liikudes ülesannete keerukus tõuseb. Skaala parempoolne ots näitab ettevõtteid, kes vajavad oma protsessides täiesti uusi teadmisi. Siia kuuluvad peamiselt ettevõtteid ja organisatsioonid, kes tegelevad teadusuuringutega.



▲ Pilt 3 | Genefke skaala

Eesti ettevõtete seas tehtud uuringust selgus, et tootmises kasutatavad robotid on peamiselt keevitusrobotid, mis pole 100% koormatud. Samal ajal tahaksid ettevõtteid robotiteid kasutada ka muudeks toiminguteks.

Probleem on selles, et keevitusrobotiteid on keeruline muudeks ülesanneteks rakendada, kuna nende tööriist ja paigaldus on mõeldud ainult keevitamiseks ja nende vahetamine oleks liiga kulukas. Selle asemel oleks võimalik kasutada uut robotit muudeks toiminguteks kui keevitamine. Kui uut robotit ei saa täielikult ühte tüüpi ülesandega hõivata, oleks kasulik leida universaalne lahendus, kus robot saaks täita eri tüüpi ülesandeid, näiteks teenindada CNC-pinki ja pakendit.

2. Tööstus 4.0 katselabor

Praeguses teadustöö raames on TTKs välja töötatud Tööstus 4.0 põhimõtetele töötav robotiseeritud tootmissüsteem [8].

Testitavas laboris on funktsioneeriv tootmissüsteem, alates tellimuse sisestamisest ettevõtte ressursiplaneerimisse (ERP), kuni lõpptarbijalt pakiautomaati jõudmiseni.

Nende vahel on kogu tootmisprotsess koos mitme robotiga. Tootmissüsteem on modulaarne ja paindlik. Uute toodete lisamisel on süsteem hõlpsasti konfigureeritav ja moodulid saab lisada või uuesti

konfigureerida, kui tootmismahud suurenevad. Selle labori peamine eesmärk oli saada testplatvorm, kus stsenaariume saab testida vastavalt Tööstus 4.0 põhimõtetele.

Selle tootmissüsteemi üks moodulitest on liikuv robotkäpp, mille ülesanne on teenindada kõiki teisi mooduleid (pilt 4).

Mooduli peamised ülesanded hõlmavad laokonteineri transportimist moodulite vahel ja plaadi vahetamist 3D-printeris. Mobiilse roboti puhul on sarnaselt nüüdisaegsetele rahvusvahelistele laboritele [11] kasutatud kahe tootja robotiteid – robotkäpp Universal Robots UR 10 ja mobiilne robot Mobile Industrial Robots MIR 100.



▲ Pilt 4 | Robotkäpp mobiilse roboti peal

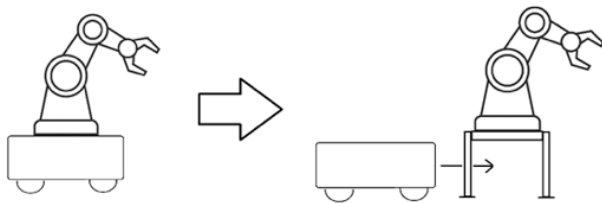
Eespool kirjeldatud mobiilse mooduli põhjal viiakse läbi praktilised katsed ja töötatakse välja prototüübi mudel, mis toetab käimasoleva uuringu teoreetilist osa.

Eesmärk on ehitada robotkäele alusraam või platvorm, mis oleks liikuvast robotist eraldi ja mida mobiilne robot saaks automatiseeritud protsessis koos roboti käega transportida.

3. Alternatiivsed lahendused robotraku jõudluse suurendamiseks

Praegu on saadaval mitu mobiilset robotit, mis suudavad robotkäppa ruumis ringi liigutada. Selleks tuleb ühendada kaks tehnoloogiat. Tulemuseks on paindlik lahendus, mis võimaldab kasutada ühte robotkäppa paljudes tööasendites. On lahendusi, kus robotkäsi on püsivalt paigaldatud mobiilsesse robotisse, nt KUKA KMR Quantec, KUKA KMR iiwa, Robotnik Kairos 3. Lisaks on palju lahendusi MIR 100 + UR 10 ja teiste robotite ühendamiseks eri tootjalt. Sel juhul oleks robotielemendi hind robotkäpa ja mobiilse roboti summa, seega ca kahekordne summa.

Neid kahte töörakku saaks aga eraldada, kui näiteks tootmisel kasutatakse rohkem kui ühte robotkäppa. Sel juhul saab üks liikuv robot teenindada paljusid seadmeid. Mobiilse roboti ja robotkäe kombineerimisel saab enamikul juhtudel töötada ainult üks neist. Transpordi ajal robotkäsi ei tööta ja kui robotkäsi töötab, seisab liikuv robot jõude. Mobiilse roboti ja robotkäe tandemi eraldamine (pilt 5) suurendaks mõlema seadme efektiivsust märkimisväärselt.



▲ Pilt 5 | Robotkäpa eraldamine mobiilselt robotilt

Ühte tööstusrobotit saab hõlpsalt kasutada eri tööülesannete täitmiseks. Selleks on vaja erineva funktsionaalsusega robotraku.

Üks robotkäpp saab kasutada palju tööriistu, et olla võimeline tööjaamasid teenindama.

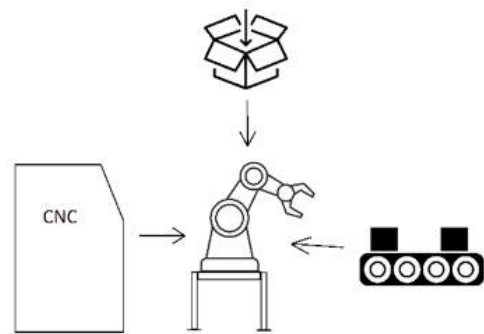
Sõltumata robotkäe töövahendi tüübist on olulisem küsimus, kas tuua tööülesanded roboti või viia robot ülesannete juurde.

Kui robot tuuakse töötavasse tootmishoonesse, on oluline hinnata, kas ja kui palju süsteem ümber korraldatakse ning kui palju on vaja täiendavaid investeeringuid. Järgmistes punktides käsitletakse kolme võimalikku lahendust integreerida robotid tööülesannetega.

3.1 Lahendus 1

Ühe roboti kasutamiseks paljude toimingute jaoks tuleks tootmine kavandada nii, et automatiseeritud toimingud liigutatakse roboti juurde ja robot ise on paigal (pilt 6).

Sel juhul on robot tootmise keskne objekt ja kõik muu tuleks vastavalt sellele paigutada. See oleks tüüpiline lahendus puurirobotile, kus lisaks uue roboti ostmise investeeringule tuleb roboti ümber ehitada ka turvatsoon. See on võimalus, kus roboti integreerimine olemasolevasse tööstuskeskkonda nõuab teatud määral uuesti konfigureerimist. Tootmisliinid ja muud ülesanded tuleks viia roboti poole. Enamikul juhtudel tähendab see tootmise seiskamist pikemaks ajaks.



▲ Pilt 6 | Ülesanded suunatakse roboti juurde

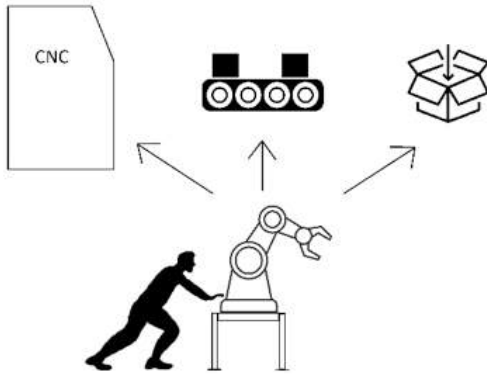
3.2 Lahendus 2

Teine võimalus on jätta olemasolev tootmiskeskkond selliseks, nagu see on, ja liigutada robotit tööasendite vahel. Sellisel juhul viib robot inimese ühest tööasendist teise (pilt 7).

Protsessi keskne objekt on inimene, kes peab olema valmis robotit igal ajal liigutama, niipea kui tootmisprotsess seda nõuab. Sel juhul ei muutu tootmisprotsess palju.

Roboti liigutamine nõuab inimese juuresolekut, kes liigutab robotit tööülesannete vahel ühest kohast teise. Üksikisiku töölevõtmine lihtsalt robotite liigutamiseks ei pruugi siiski olla efektiivne.

See lahendus võib põhjustada ka viivitusi, kuna inimese jõudmine robotini pärast töö lõppu võib võtta aega. Sarnast lahendust tegi ka OpiFlex.



▲ Pilt 7 | Robotit liigutab ülesannete vahel inimene

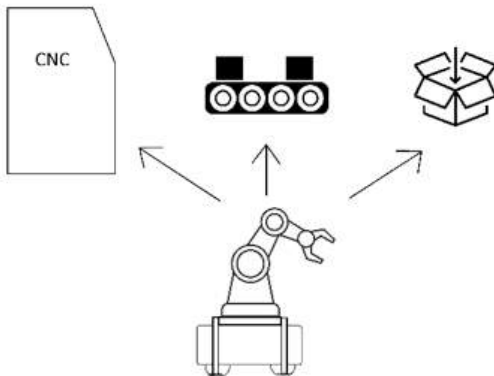
□ 3.3 Lahendus 3

Kolmas võimalus on automatiseerida robotkäpa liikumisprotsess mobiilse roboti abil (pilt 8).

Selle lahenduse korral ei võta ükski osa tootmisest kesket rolli, kuna kogu protsess on täielikult automatiseeritud ja töötab kompaktses tervikuna. Tootmisprotsessi saab kavandada ülitäpselt.

Näiteks CNC-masinat teenindava roboti korral saab üsna täpselt arvutada, millal partii valmis saab. Selleks ajaks saab robotkäpale järgi saata mobiilse roboti, mis viib robotkäpa järgmise ülesande juurde. Selle valiku korral pole vaja inimest, kes viiks robotkäpa ühest tööjaamast teise. Robotkäpa ühendamine elektrivõrguga ja muude sidesüsteemidega toimub automaatselt robotkäe alusraami kaudu.

See lahendus eeldab, et igas töoasendis on roboti jaoks vajalik automaatne dokkimisjaam, mis on ühendatud selliste tsentraliseeritud süsteemidega, nagu elekter, suruõhk, andmed jne.



▲ Pilt 8 | Robotkäpa liigutab tööjaamade vahel mobiilne robot

□ 3.4 Lahenduste võrdlus

Diagrammid (tabel 1)

illustreerivad vajalike muudatuste taset ja mõju tootmisprotsessile robotkäe lahenduse kasutamise võimaluste korral.

Diagramm ei esita kõigi valikutega sarnaseid tegureid, nt programmeerimine, protsessi juurutamine,

hooldus jms. Hindamine toimub nende kolme lahenduse võrdlemisel üksteisega ja antakse hinded, kui lahendus võtab kõige rohkem ja kõige vähem krediiti.

| | Tootmine vajab ümberkorraldamist | Vajadus täiendavate seadmete järele | Vajadus täiendavate tarkvarade järele | Vajadus täiendava inimressursi järele |
|------------|---|--|--|--|
| Lahendus 1 | Kõrge | Madal | Madal | Madal |
| Lahendus 2 | Madal | Madal | Madal | Keskmine |
| Lahendus 3 | Madal | Kõrge (<i>mobile robot, dock's</i>) | Kõrge (MES ¹) | Madal |

▲ Tabel 1 | Integreerimisvajadused robotilahenduse juurutamiseks

Tabelis 2 võrreldakse robotkäte lahenduse tehases integreerimise eeliseid. Iga juhtumi puhul võib see olla erinev, kuid üldiselt näitab see nende kolme lahenduse tulemuste erinevust.

| | Automatiseerituse tase | Efektiivsuse kasv | 24/7 töötamise võimekus | Paindlikkus |
|------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------|
| Lahendus 1 | Kõrge | Kõrge | Kõrge | Madal |
| Lahendus 2 | Keskmine | Keskmine | Keskmine | Kõrge |
| Lahendus 3 | Kõrge | Pigem kõrge | Kõrge | Kõrge |

▲ Tabel 2 | Robotkäpa integreerimise eelised tootmises

Eri lahendused nõuavad väga erinevaid investeringuid. Investeeringud automatiseerimisse on vältimatud. Kasutusele tuleb võtta uued seadmed ja tarkvara ning kulutada raha programmeerimisele. Selle tulemusel on eesmärk saavutada tõhusam tootmine. Tõhususe kasvu väljendab iga ettevõtte erinevalt. See võib olla üks teguritest tabelis või kõik toimingud koos. Kolmandas lahenduses on kõigi tegurite tulemus kõrge. Edasistes arengutes saab katsealust rakendada Tööstuse 4.0 digitaalse küpsuse mudeli 4.0 [12] uurimiseks.

□ Kokkuvõte

Eesti ettevõtete seas tehtud uuring tõi välja, et tööstusrobotite rakendamine VKEdes on olnud aeglane. Selle üks põhjus on see, et statsionaarsete robotite jaoks pole piisavalt tööülesandeid, ilma et tootmist suures plaanis ümber korraldataks. Samal ajal on ettevõtted huvitatud robotitele rohkemate tööde

andmisest. Selle töö tulemusena on välja pakutud lahendus, kus robotkäpa liigutatakse tööasendite vahel ja transpordiosa täidab teine robot – mobiilirobot.

Selline lahendus võib anda robotkäpale piisavalt tööd, ilma et oleks vaja olemasolevat tehast suures plaanis ümber korraldada. Mobiiliroboti kasutamisel pole vaja eraldi inimest, kes peaks hoolitsema selle eest, et robot liiguks tööjaamade vahel. Mobiiliroboti transporditav robotkäsi annab võimaluse rakendada seda ööpäevaringselt ning annab paindlikkuse tootmise hõlpsamaks konfigureerimiseks, kui on seda statsionaarne robot.

Uurimistöö eesmärk on töötada välja robotkäe mobiilseks kasutamiseks tehniline lahendus, millele on lisatud prototüüp ja hinnang selle rakendatavusele. Edasi töötatakse välja disainimudel mobiilse roboti konfigureerimiseks mobiilse roboti külge. Töötatakse välja funktsionaalne mudel ja kulude analüüs. Pärast seda ehitatakse praktiline mudel ja viiakse läbi vajalikud testid mudeli rakendatavuse hindamiseks.

□ Summary

The Mobility of Robotised Work Cells in Manufacturing

Survey among Estonian companies brought out that implementation of industrial robots by SMEs has been slow. One reason for that is that, there is not enough work assignments for stationary robots without reorganize production in a big scale. At same time, the companies are interested to give more jobs to the robots.

As a result of this work, a solution has been proposed in which the robot arm is moved between different working positions and the transport part is filled by another robot - a mobile robot. Such a solution can give high level of work hours to the robotic arm without the need to reorganize existing factory in big scale.

When using a mobile robot, there is no need for a separate person who should take care to move the robot arm between different workstations. Carrying a robotic arm on a mobile robot gives you the opportunity to apply a robotic arm around the clock and it gives you flexibility to reconfigure your production more easily rather the solution where robot arm is stationary.

The aim of the thesis is to develop a technical solution for the mobile use of a robot arm, accompanied by a prototype and an assessment of its applicability. Further on, a design model will be developed for configuring a mobile robot to the robot arm. MIR 100 will be used as a mobile robot and UR 10 as a robot arm. A functional model and a cost-analysis will be developed. After this, a practical model will be built, and necessary tests completed for assessing the model's applicability.

■ Viidatud allikad

- [1] Eiskop, T.; Snatkin, A.; Karjust, K.; Tungel, E. (2018). Production monitoring system design and implementation. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 67 (1), 10–16.10.3176/proc.2017.4.02/.
- [2] Berg, J.; (2019). Human-Robot-Interaction for mobile industrial robot teams. *Procedia CIRP*. 79. 10.1016/j.procir.2019.02.080.
- [3] Grijalva, G.; Chavez D.; Camacho, O. (2018). Material Distribution with Mobile Robots in an Industrial Environment: System design and simulation. *IFAC-PapersOnLine*. 51. 650-655. 10.1016/j.ifacol.2018.07.354.
- [4] Lu, Y. (2017). Industry 4.0: a Survey on Technologies, Applications and Open Research Issues, *Journal of Industrial Information Integration*. 6. 10.1016/j.jii.2017.04.005 .
- [5] Robla-Gomez, S.; Becerra, V.M.; Llata, J.R, et al. (2017). Working Together: A Review on Safe Human-Robot Collaboration in Industrial Environments. *IEEE Access*. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2017.2773127.
- [6] Loun, K.; Riives, J.; Otto, T. (2012). Workplace performance and capability optimization in the integrated manufacturing. *Proceedings of 8th International Conference of DAAAM Baltic Industrial Engineering, 2: 8th International DAAAM Baltic Conference In Estonia. INDUSTRIAL ENGINEERING, 19 - 21st April 2012, Tallinn*. Ed. Otto, T. Tallinn.
- [7] Kuts, V.; Otto, T.; Tähemaa, T.; Bondarenko, Y. (2019). Digital twin based synchronised control and simulation of the industrial robotic cell using virtual reality. *Journal of Machine Engineering*, 19 (1), 128–145.2010.5604/01.3001.0013.0464.
- [8] Vaher, K.; Vainola, V.; Otto, T. (2019). Industry 4.0 Laboratory. *Industry 4.0, Technological Basis of "Industry 4.0", 1/5: IV International Scientific Conference, Industry 4.0. Summer session, 24-27.06.2019, Burgas, Bulgaria. Industry 4.0 Proceedings: 108 Rakovski str; 1000 Sofia*.
- [9] Iglesias, I.; Sebastián, M.A.; Ares, J.E. (2015). Overview of the State of Robotic Machining: Current Situation and Future Potential. *Procedia Engineering*. 132. 911-917. 10.1016/j.proeng.2015.12.577.
- [10] Salunkhe, O.; Gopalakrishnan, M.; Skoogh, A. et al. (2018). Cyber-Physical Production Testbed: Literature Review and Concept Development, *Procedia Manufacturing*, 25: 2-9, <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.050>.
- [11] Papa, M.; Kaselautzke, D.; Stuja, K. & Wolfel, W. (2018). Different Safety Certifiable Concepts for Mobile Robots in Industrial Environments *Proceedings of the 29th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation", 24-27th October 2018, Zadar, Croatia, Volume 29, No.1, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-902734-20-4. Ed. B. Katalinic / Published by DAAAM International, Vienna, Austria, EU, 2018*.
- [12] Gajsek, B.; Marolt, J.; Rupnik, B.; Lerher, T. & Sternad, M. (2019). Using Maturity Model and Discrete-Event Simulation for Industry 4.0 Implementation *International Journal of Simulation Modelling* Volume 18: Number 3: September 2019.
- [13] Reinhart G. (2017). *Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Hanser.
- [14] Sell, R; Otto, T. (2008). Remotely controlled multi robot environment. *Proceedings of 19th EAEEIE Annual Conference: 19th EAEEIE Annual Conference, Tallinn, Estonia, June 29 - July 2, 2008. Tallinn, 20–25.10.1109/EAEEIE.2008.4610152*.

Digitrükitud spordirõivaste materjalide õhuläbilaskvuse ning venivuse määramine enne ja pärast hooldust

Autorid:

Ada Traumann, PhD, Tallinna Tehnikakõrgkooli professor

Merje Beilmann, MA, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor

Diana Tuulik, MBA, Tallinna Tehnikakõrgkooli lektor

Sissejuhatus

Teise kursuse üliõpilased koostasid õppeaines „Tekstiilmaterjalide testimine” uurimistöo. Testiti ja analüüsiti Eesti ühe suurima spordirõivaste tootja tekstiilmaterjale enne ja pärast hooldust eri pesurežiimidel. Kõikide testmaterjalide kiuline koostis oli 100% polüester.

Digitrüki ajastu alguseks võib pidada transfert-rüki meetodi kasutuselevõtmist 80ndatel, kui disainerid said kuumpressi abiga kangale üle kanda järjest keerukamaid pilte [1].

Turujõud ja digitaalse trükkimise eelised soosisid selle laialdasemat arendamist ja kasutuselevõttu. Tootjad said trükitehnoloogia levikuga vähendada varude säilitamise riske ja kulusid. Analoogmeetodid nagu siiditrükk on säilinud praeguseni ja seda on mõistlik kasutada just suurte koguste trükkimisel, digitrüki tehnoloogia rakendamine on aga pääsetee väiksemate partiide trükkimisel. Digitrükk annab võimaluse toodete personaliseerimiseks ja kiiretes olukordades reageerimiseks [2].

Üheks levinumaks digitrükimeetodiks on sublimatsioonimeetod [3].

Selle tehnoloogia eripäraks on paberile trükitud kujutise kandmine tekstiilmaterjalidele või substraatidele [4].

Kuna puuvillas puuduvad sublimeerimiseks vajalikud polümeerid, ei saa sellel vastavat digitrükitehnoloogiat kasutada. Selleks, et saaks substraati sublimeerida lisaaineid kasutamata, peab kanga kiuline koostis sisaldama vähemalt 70% polüestrit.

Kvaliteetse värvilahenduse ja terava resolutsiooniga trükitud kujutise saavutamiseks on soovitatav kasutada tekstiilmaterjale, mille kiuline koostis on 100% polüestrit [5].

Seepärast on uurimistöös kasutatud materjalid kõik 100% polüesterkiu sisaldusega.

Iga toode, eriti spordirõivas, vajab hooldust ning

seepärast on oluline testida kangaste omadusi ka pärast hooldusrežiime. Spordirõivaid panakse ka tihti kuivatisse, mis omakorda mõjutab rõivatoodete kvaliteeti ja eluiga. Üheks oluliseks näitajaks spordirõiva puhul on kanga õhuläbilaskvus, mida uurimistöös kontrolliti.

Teine näitaja – tekstiilmaterjalide venivus, mõjutab spordirõiva kasutamist nii tema funktsionaalsuse kui ka trükikvaliteedi põhiselt.

Mõõtmise meetodika

Uurimistöös testiti kuut kangaartiklit õhuläbilaskvusele ja venivusele järgmiselt: originaalkangaste testimine (valget värvi trükkimata kangad); sublimatsioonimeetodil digitrükitud kangaste testimine; digitrükitud kangaste testimine, mida on pestud Mini Risk'i pesupulbriga; digitrükitud kangaste testimine, mida on pestud Mini Risk'i pesupulbri ja pesupehmedajaga; digitrükitud kangaste testimine, mida on pestud Mini Risk'i pesupulbri ja kuivatis kuivatatud.

Õhuläbilaskvuse testimiseks kasutati mõõteseadet FX 3300 LabAir IV ja aluseks võeti standardi EVS-NE ISO 9237:2000 mõõtemetod [6]. Testimaks õhuläbilaskvust võimalikult suure pindala ulatuses, võeti testkehad viiest eri kohast läbi kanga laiuse. Mõõdeti ühe ruutmeetri suuruse kanga õhuläbilaskvust ühe sekundi jooksul. Uurimistöös analüüsiti iga kangaartikli puhul viit tulemust programmis MS Excel.

Kangaste venivuse testimiseks kasutati mõõteseadet Fryma Fabric Extensometer, mis mõõdab kangaste venivust ja elastsust.

Trikotaažkangaste testimiseks lõigati kangast 7,5 x 8,5 cm suurused testkehad nii koe- kui ka lõimesuunas, mis kinnitati ükshaaval seadmele ning venitati kolmekilogrammise raskusega.

Kootud kangaste puhul lõigati 7,5 x 21,5 cm suurused testkehad nii koesuunas kui ka lõimesuunas ja venitati kuuekilogrammise raskusega.

Iga kangaartikli venivustulemused esitati nii lõime kui ka koe suunas protsentuaalselt.

Trükitud testkangaste iseloomustus on näidatud tabelis 1. Kõik testitud polüestrist kangad olid kootud erineva struktuuriga multifilamentlõngadest. Näitena on töös esitatud artikkel RRC318 kiu ja lõnga pilt digitaalse mikroskoobiga (vt foto 1 ja 2).

Testkehasid suurendati kuni 140 korda, mõõteseadmeks oli kõrge optilise resolutsiooniga digitaalne mikroskoop MiScope 2.0 MP, kujutise lahutusvõime 680 x 480 pikslit.

Testid viidi läbi temperatuuril 24.4 °C ja 37%-lise õhuniiskusega keskkonnas.



▲ Foto 1 | Artikkel RRC318 filamentkiud



▲ Foto 2 | Artikkel RRC318 multifilamentlõng

| Nr | Artikkel | Kanga kiuline koostis, % | Kanga struktuur | Kanga parem pool* | Kanga pahem pool* |
|----|----------|--------------------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| 1 | KAN702 | 100 PES | silmuskoeline | | |
| 2 | MIS001 | 100PES | silmuskoeline | | |
| 3 | KAN316 | 100 PES | silmuskoeline | | |
| 4 | FLT850 | 100 PES | silmuskoeline | | |
| 5 | RRC318 | 100 PES | kootud | | |
| 6 | RIL210 | 100 PES | kootud | | |

* Suurendus kuni 140 (@4 mikronit).

▲ Tabel 1 | Testkangaste iseloomustus

Tulemused ja arutelu

Katsetulemused näitasid, et kõikide kangaste õhuläbilaskvus vähenes pärast digitrükkimist musta värviga, v.a artikkel RIL210 (vt tabel 2). Artikli õhuläbilaskvus suurenes pärast tükkimist 40% ning pärast tavalist pesu ja kuivatirežiimi 60%. Saab eeldada, et sublimatsioonimeetod on kahjustanud kanga struktuuri ning seetõttu laseb trükitud kangas rohkem õhku läbi.

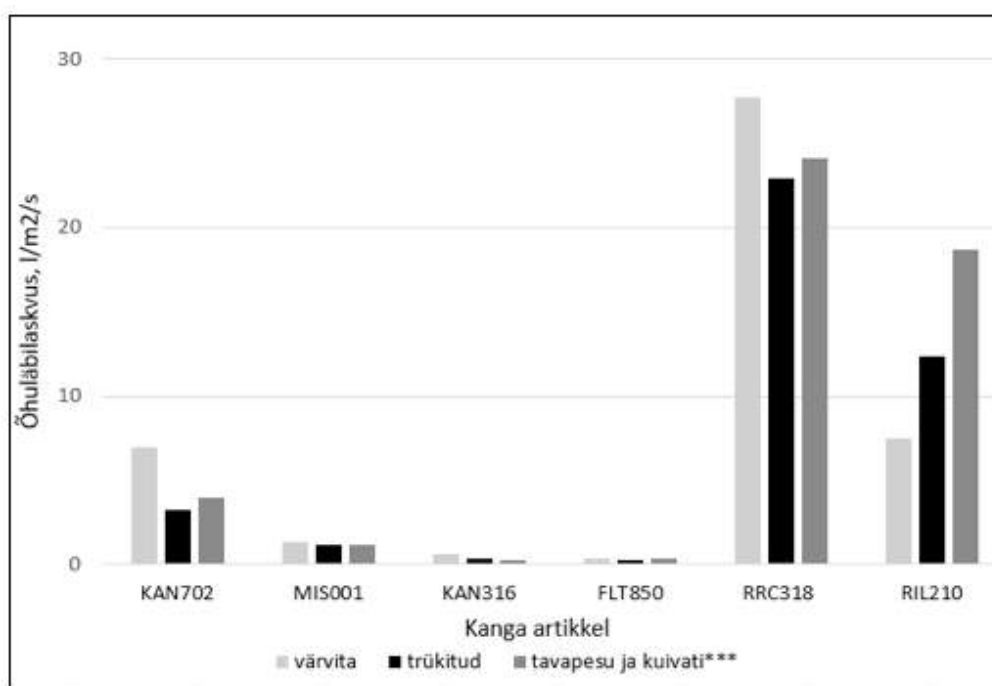
| Nr | Artikkel | Kanga õhuläbilaskvus, l/m ² /s | | | |
|----|-----------------|---|------------------|--------------------------|--------------------------------------|
| | | Originaalhoolduseta | Pärast tavapesu* | Pärast pesu pehmendiga** | Pärast tavapesu ja kuivatirežiimi*** |
| 1 | KAN702 värvita | 6,92 | | | |
| | trükitud | 3,20 | 3,00 | 3,16 | 3,98 |
| 2 | MIS001 värvita | 1,33 | | | |
| | trükitud | 1,18 | 1,57 | 1,38 | 1,18 |
| 3 | KAN316 värvita | 0,58 | | | |
| | trükitud | 0,32 | 0,30 | 0,30 | 0,29 |
| 4 | FLT 850 värvita | 0,31 | | | |
| | trükitud | 0,27 | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| 5 | RRC318 värvita | 277,40 | | | |
| | trükitud | 229,20 | 230,80 | 211,20 | 240,60 |
| 6 | RIL210 värvita | 7,52 | | | |
| | trükitud | 12,40 | 15,92 | 16,70 | 18,72 |

*Tavapesu – 30 °C, 600 pööret, 28 min, 25 g pesupulbrit (Mini Risk).

**Pesupehmenti – 30 °C, 600 pööret, 28 min, 25 g pesupulbrit (Mini Risk) + 25 g pesupehmentit (Lenor).

***Tavapesu ja kuivati – 30 °C, 800 pööret, 28 min, 25 g pesupulbrit (Mini Risk) + 50 °C.

▲ Tabel 2 | Testkangaste õhuläbilaskvuse tulemused



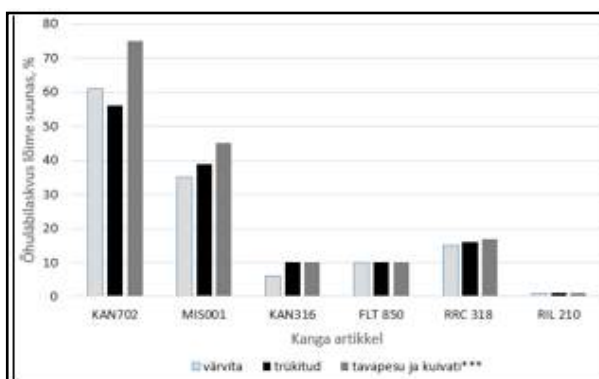
▲ Joonis 1 | Testkangaste õhuläbilaskvuse võrdlus värvimata, trükitud ja pärast hooldust***

Joonisel 1 on näha, et kuuest testkangast olid kõige suurema õhuläbilaskvusega kootud kangad art RRC318 ja art RIL210.

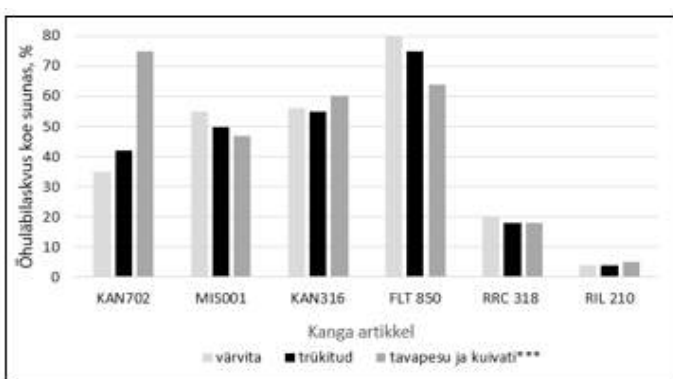
Artikkel KAN702 on silmuskoelistest kangastest kõige suurema õhuläbilaskvusega, kusjuures testkangaste organoleptilise analüüsi järgi oli artikkel üks paksemaid ja eeldati, et kanga õhuläbilaskvus on kõige väiksem. Labase koega kootud kangastest eeldati enne testi, et RRC318 on suurema õhuläbilaskvusega ja nii katse tulemusel ka selgus. Teisel kootud kangal, artikkel RIL210, suureneb õhuläbilaskvus trükkimisel ja lisaks veelgi pesu ning kuivatirežiimi kasutamisel. Kokkuvõttes võib öelda, et kõikide testkangaste õhuläbilaskvus suurenes pärast tavapesu 30 °C juures, kasutades 25 g pesupulbrit Mini Risk ja kuivatusrežiimi + 50 °C, 800 pööret minutis.

Venivuse tulemused kuuele testmaterjalile on näidatud joonisel 2 ja 3 eraldi, kuna testiti venivust nii lõime- kui ka koesuunal. Enne testi sooritamist oletati organoleptilise analüüsi põhjal, et kõige parema venivusega kangas on art RRC318.

Joonise 2 ja 3 põhjal on aga näha, et artikli venivus nii koe- kui ka lõimesuunal on keskpärane, ligikaudu 20%.



▲ Joonis 2 | Testkangaste venivus lõime suunas



▲ Joonis 3 | Testkangaste venivus koe suunas

Artikkel RIL210 venivus jäi protsesside tagajärjel stabiilseks ja väikeseks. Venivuse 0,5-protsendipunktiline tõus toimus ainult kanga koesuunas pärast mehaanilist kuivatamist. Selle põhjuseks võib eeldada kiudude katkemist või lõngade asetuse muutumist.

Lõime suunas oli kõige parema venivusega art KAN702. Kuigi kanga lõimesuunaline venivus langes ja koesuunaline venivus võrreldes originaalkangast trükitud testkehaga tõusis. See võib olla tingitud kanga digitaalse trükkimise sublimatsioonimeetodist, mis on tekitanud muutusi kanga struktuuris.

Samuti tõusis pesupehmenemise pesemisel kanga venivus, mis võib olla tingitud pehmenemise keemil-

sest mõjust kanga struktuurile ja/või kiulisele koostisele.

Koe suunas oli kõige parema venivusega art FLT850. Kangas originaalina ehk valget värvi ja trükkimata ning musta värviga trükituna erinesid venivuselt koesuunas 15%, kusjuures originaalkangas värvimata kujul oli venivam.

Sellest võib kanga puhul järeldada, et sublimatsioonitrükk mõjutab vaid koesuunalist venivust. Venivus vähenes veelgi 16 protsendipunktiliselt pärast pesupehmenemise pesemist, mis on eeldatavalt tingitud vahendi keemilise koostise mõjust kanga struktuurile.

■ Järeldused ja kokkuvõte

Uuringu eesmärgiks oli analüüsida spordirõivaste tekstiilmaterjale kolmest vaatepunktist: originaalkangast, mida pole veel trükitud sublimatsioonimeetodil; musta värviga trükitud kangas ja trükitud kangas, mida on pestud kolme pesurežiimiga.

Katse tulemusena selgus, et kaasaegse tehnoloogiaga ning multifilamentlõngast kootud kangastel ei ole võimalik nende mehaanilis-füüsikalisi omadusi määrata ainult organoleptilist analüüsi kasutades.

Näiteks kui vaatluse ja käega katsumise teel tundus artikkel KAN702 paks ning kohev ja eeldati, et tema õhuläbilaskvus on seejuures kehv, siis katsetulemused tõestasid vastupidist.

Silmuskoelistest kangastest oli art KAN702 kõige enam õhku läbilaskev.

Samuti näitasid katsed, et digitrükkimine võib originaalkujul ehk valget värvi kanga füüsikalisi omadusi täiesti vastupidiselt mõjutada. Näiteks kui võib eeldada, et trükivärv ummistab kanga poore, siis kootud kanga artikli RIL210

õhuläbilaskvus hoopis suurenes pärast kanga musta värviga digitrükkimist. Kindlasti mängib olulist rolli ka trükikvaliteet – kui palju trükivärv imendub kangasse ning milliseid kostruktuuri muutusi see kaasa toob.

Kuna toote eluea pikkus ja materjali kvaliteedi säilimine on spordirõivaste puhul olulisel kohal, siis analüüsiti testkangaid kolme hooldusrežiimiga. Selgus, et kangaste õhuläbilaskvust mõjutab kuivatiga kuivatamine ning pesupehmediga pesemine. Kuivatiga kuivatamine või pesupehmediga pesemine võib olenevalt kangast, kas suurendada või vähendada õhuläbilaskvust, näiteks artiklil RIL210 see suurenes. Teatud juhtudel võib vastav hooldus ka taastada kanga omadused, mis on suhteliselt ligilähedased originaalsele värvimata kangale nagu näiteks artikli FLT850 puhul.

Uurimistöös selgus, et digitrükkimine avaldab mõju kanga venivusele. Kusjuures digitrükkimisega vähenenud kangaste venivus võib mõjutada ka toote visuaalset kvaliteeti, eriti just tumedate värvidega trükitud toodete või detailide puhul. Näiteks koe suunas vähenes kuuest testkangast venivus viiel kangal pärast digitrükkimist.

■ Tunnustus

Autorid on tänulikud õpperühma TD31 teise kursuse üliõpilastele: Piret Saartok, Carl-Henry Parts ja Nadežda Jerilova, kes sooritasid testimised Eesti spordirõivaste tootja materjalidega.

Uurimistöö toetab Erasmus Plus 2017-KA203-06 rahvusvahelist projekti „Digitrükkimine tekstiilmaterjalidele ja muudele tasapinnalistele materjalidele“.

■ Summary

Determination of Air Permeability and Elongation of Digitally Printed Sportswear Materials Before and After Domestic Maintenance

The aim of this study was to analyse sportswear materials from three different perspectives: original fabric not yet printed by sublimation method; fabric printed by black colour and printed fabric that has been washed in three different washing regimes. Result of the experiment has been showed that woven fabrics with modern technology and multifilament yarns can, on the basis of organoleptic analysis alone, fail to reach their maximum value. For example, if by inspection and touching, the fabric of art KAN702 felt thick and bulky, and was expected to have poor air permeability, the test results proved otherwise. Of the knitted fabrics was art KAN702 the most breathable.

The tests also showed that digital printing can affect the physical properties of the fabric in the opposite way in its original form. Of course, print quality also plays an important role in how much ink is absorbed into the fabric and what changes in the structure it causes. If it will be assumed that the ink can be to clog the pores of the fabric, the air permeability of the art RIL210 increased significantly after the digital printing.

Because the life cycle of the product and the maintenance of the quality of the material play an important role in sportswear, the test fabrics were analysed with three different maintenance regimes. It was found that air permeability of fabrics is affected by drying with a dryer and washing with a washing softener. Drying with a dryer or washing with a washing softener can, depending on the fabric, increase or decrease the air permeability, for example, in art RIL210 it is increased.

In certain cases, such maintenance may also restore fabric properties that are relatively close to those of the original unpainted fabric, such as in the case of art FLT850.

In this study it was found that digital printing has effect on fabric stretch. However, the ductility of fabrics that are reduced by digital printing will certainly also affect the visual quality of the product, especially for products or details printed in dark colours. Of the six different test bodies most of fabrics were exhibited a decrease in elongation after digital printing.

▣ Viidatud allikad

[1] S. Carden, Digital Textile Printing, New York: Bloomsbury Academic, 2015, p 160.

[2] Vince Cahill, „Introduction to Digital Printing Technology,” [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.scribd.com/document/154950925/An-Introduction-to-Digital-Printing-Technology>. [Kasutatud 26. veebruar, 2020].

[3] K. Kiisküla, „Digitaalsete trükitehnoloogiate kaardistamine AS Fifaa näitel”, 2019, lõputöö Rõiva ja tekstiili instituudis, Tallinna Tehnikakõrgkool.

[4] Nova Sublimation Australia Pty Ltd, „Sublimation 101,” 2011. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 26. veebruar, 2020].

[5] Quality Print OÜ, „Sublimatsioon tekstiilile,” [Võrgumaterjal]. Available: <http://qualityprint.ee/reklaamtrukk/sublimatsioon-tekstiilile>. [Kasutatud 26. veebruar, 2020].

[6] EVS-EN ISO 9237:2000 Tekstiil. Kangasmaterjalide õhuläbilaskvuse määramine.

Keemiliste pinnete valmistamise tehnoloogia

Autor: Toomas Pihl, PhD, Tallinna Tehnikakõrgkooli professor

Sissejuhatus

Tallinna Tehnikakõrgkooli pindamistehnoloogiate laboratooriumis on uuritud pindamistehnoloogiaid, kuid võrdlemisi vähe on tegeldud keemiliste pindamisprotsessidega. Käesolevas töös on esitatud mõned uurimuse momendid ning pinnete omaduste tulemusel materjalide keemilisest pindamisest.

Erinevalt elektrokeemilisest pindamisprotsessist, ei rakendata keemilise pindamise protsessis elektrivoolu. Samuti kasutatakse protsessil ainult ühte elektroodi. Kogu protsessi põhimõte seisneb selles, et elektrood ehk pinnatav detail asetatakse pinnatava materjali soola(sid) ja redutseerivat komponenti sisaldavasse lahusesse, kus elektroodi pinnal hakkab toimuma reaktsioon, mille tulemusena pinde materjal, mis sadestub elektroodi pinnal, taandatakse soolalahusest. Protsessi reaktsioon toimub järgmiselt: $Mz^{+} + \text{lahused (elektroodi pind)} + M \text{ tahke} + \text{Oxy lah.}$ Nikli puhul näeb protsess välja järgmine: $3\text{Na}(\text{H}_2\text{PO}_3)_2 + \text{Ni}(\text{SO}_4)_4 + 3\text{NaH}_2\text{PO}_3 + \text{Ni} + 2\text{H}_2$. Protsessi eelisteks võrreldes elektrokeemilise pindamisega on madalam hind, võimalus pinnata keeruka kujuga detaile, võimalus pinnata elektrit mittejuhtivaid materjale. Puuduseks on madal tootlikkus ja väiksem saavutatav pinde paksus. [1]

1. Keemiline pindamine nikliga

Valmistada katsekehad, mida hakatakse pindama, puhastada ja poleerida katsekehade pinnad, et saavutada pinde parem nakkumine ja väiksem pinnakaredus. Pinnatavate katsekehade mõõtmed olid:

35 x 29 x 20 x 2 mm ja 20 x 7 x 2 mm.

Enne töödega alustamist tuleb tingimata sisse lülitada ventilatsioon ja täita kõiki ohutusnõudeid ning kasutada kaitseprille, kindaid, kaitseriideid ja maski.

Eelnevalt valmistatud toorikute pesuvahend SD 416 valada anumasse ja asetada küttekeha lahuse kuumutamiseks anumasse. Järgmiseks on vaja valmistada töölahus. Mensuuriga mõõta lahuse vajalikud komponendid: (osa – A), (osa – B) ja destilleeritud vee kogused ning kokku segada töölahuse valmistamiseks mõeldud anumasse ja valminud töölahusesse lisada ka küttekeha. Kui mõlemad lahused ja küttekehad on

anumates valmis pandud, tuleb lahuseid soojendada. Pesulahus SD 416 peab saavutama temperatuuri 70 °C. Kui pesulahuse temperatuur on saavutatud, tuleb asetada katsekehad pesulahusesse minimaalselt viieks minutiks, et eemaldada detaililt rasv, õli või muu reostus. Pärast katsekehade pesulahuses puhastamist tuleb sooritada detailidel märgavustest, pritsides detailile vett. Vesi peab detaili katma ühtlaselt ja detaili tuleb pesta seni, kuni seebimullide teke lakkab. Mitte mingil juhul ei tohi lasta detailidel kuivada.

Seejärel, kui töölahus on oma temperatuuri saavutanud, asetada katsekehad töölahusesse ja hoida seal kuni soovitud pinde paksuse saavutamiseni. Hiljem, kui soovitud pinne on saavutatud, tuleb detailid pesta [2].

Keemiline nikliga pindamine sõltub olulisel määral temperatuurist. Töölahuse temperatuur (60–90 °C) peab olema märksa kõrgem. Nikliga pindamist teostati kahel temperatuuril, nii erinevate kui ka samast metallist katsekehade. Katsetel kasutati erinevaid töölahuse temperatuure, et selgitada välja eri materjalidest valmistatud katsekehadele pinde moodustumisest ja struktuuride erinevusest ning mikrokõvaduse sõltuvust pindamisest eri temperatuuridel.

Esimesel katsel kasutati töölahuse temperatuuri 60–90 °C. Teiste katsete puhul oli juhendi järgi soovituslik temperatuur 96–98 °C. Kui detailide pesulahuse temperatuur 70 °C on saavutatud, tuleb asetada katsekehad pesulahusesse minimaalselt viieks minutiks, et eemaldada detaililt rasv, õli ja muu reostus.

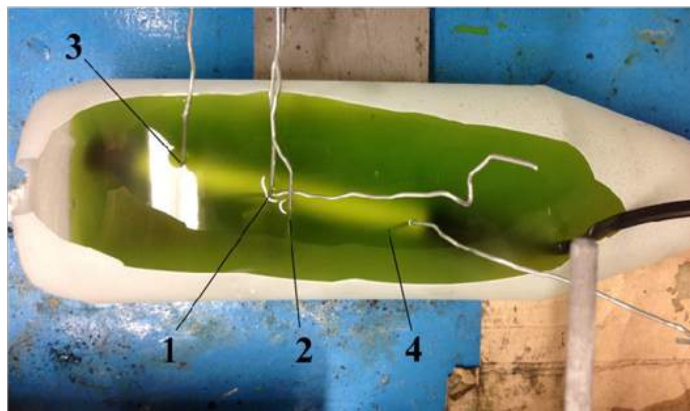
Pärast katsekehade pesulahuses puhastamist, tuleb sooritada detailidel märgavustest, pritsides detailile vett. Vesi peab detaili katma ühtlaselt ja detaili tuleb pesta seni, kuni mullide teke lakkab. Hoolikalt tuleb jälgida, et detailide pinnad ei jõuaks kuivada.

Seejärel, kui töölahuse temperatuur on saavutatud, võib katsekehad asetada töölahusesse ja hoida seal kuni soovitud pinde paksuse saavutamiseni. Kõikide pindamiskatsete kestus oli 60 minutit. Kui soovitud pinde paksus on saavutatud, tuleb detailid hoolikalt pesta ja kuivatada. [2]

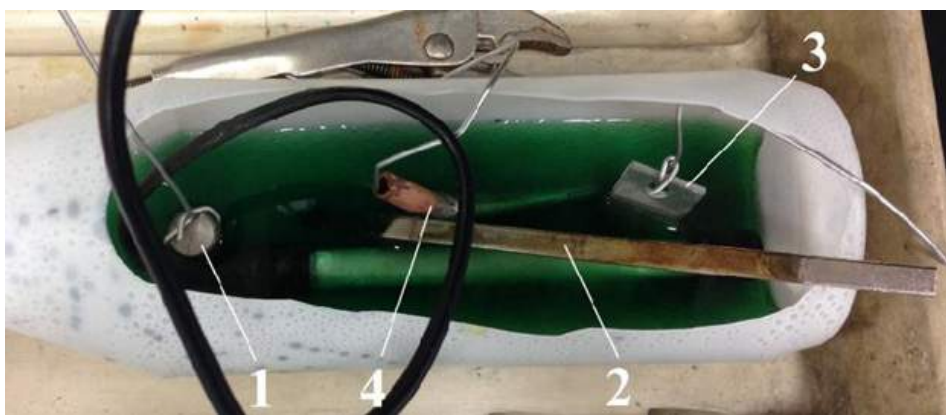
Keemiline nikliga pinnete katsekehade ettevalmistus ja kasutatud töövahendid on näidatud joonistel 1, 2 ja 3.



▲ Joonis 1 | Käi katsekehade poleerimiseks, töötlemiseks (1 – alumiinium, 2 – malm, 3 – vask, 4 – teras)



▲ Joonis 2 | Katsekehad asetatuna pesuvahendisse



▲ Joonis 3 | Katsekehad asetatuna töölahusesse (1 – malm, 2 – teras, 3 – alumiinium, 4 – vask)

Puhastuslahuste ja pindamiseks kasutatud elektrolüütide temperatuure mõõdeti kontaktivaba termomeetriga Raytek Raynger ST.

Töölahuse temperatuuridel 60–90 °C toimunud pindamisel oli katsekehade nikli pinne tuhmim kui temperatuuridel 96–98 °C toimunud katsekehadel. Pinne oli aluspinna küljes kõvemini kinni kui kõrgematel temperatuuridel kaetud katsekehadel. Seda näitasid pinnete struktuuriuuringud ja mikrolihvide valmistamiseks katsekehade löikamine, kus kõrgemate temperatuuridega pinnatud katsekehadel tuli löikamise käigus pinne alusmaterjalilt lahti.

Juhendi järgi tehtud pindamine andis küll dekoratiivsema läike, kuid detaili pinnal esines mulle ja dekoratiivsusest pole kasu, kui pinne detaililt pinnalt lihtsalt maha koorub.

Uurimusest selgus, et paremini töötas katseeksitusmeetodil madalama temperatuuriga töölahusega pindamine. Selliselt kaetud katsekeha pindel ei esinenud mulle ja pinne ei koorunud maha. Mikrokõvaduse uuringust selgus, et kõrgematel temperatuuridel pinnatud katsekehade kõvadus oli suurem kui madalamatel temperatuuridel pinnatud katsekehadel.

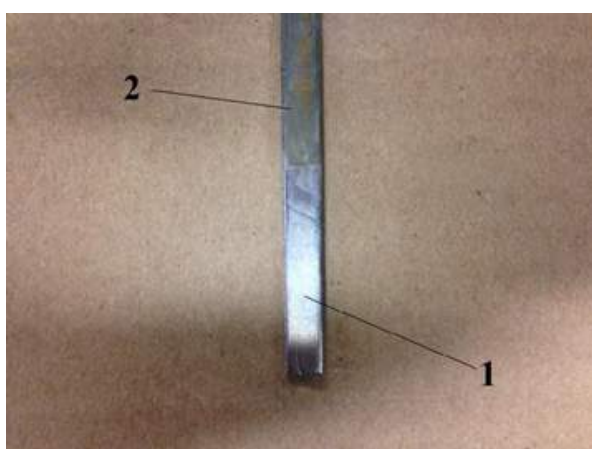
Nikliga pinnatud katsekehad on esitatud joonistel 4 ja 5.



▲ Joonis 4A | Nikliga pinnatud vask.
A (1 – nikli pinne vasel, 2 – vase pindamata osa)



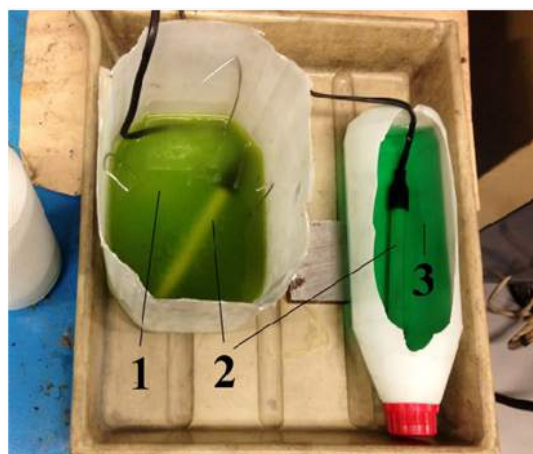
▲ Joonis 4B | B – nikliga pinnatud malm
(1 – pinnatud osa, 2 – malmi pindamata osa)



▲ Joonis 5 | Nikliga pinnatud detailid: 1 – alumiinium,
2 – nikliga pinnatud teras

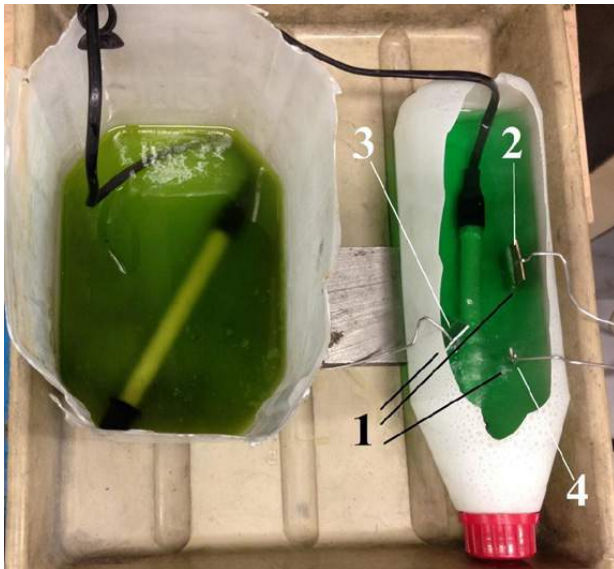


▲ Joonis 6 | Nikli töölahuse vajalikud komponendid:
1 – mensuur, 2 – nikli komponent.
Osa B, 3 –elektivaba. Osa A, 4 – destilleeritud vesi



▲ Joonis 7 | Katsekehade puhastamine:
(1 – pesulahus, 2 – küttekeha, 3 – töölahus nikkel)

Keemiline nikliga pindamine ja kasutatud töövahendid (töölause temperatuurid 96–98 °C). Pindamisvannidena kasutati lahti löigatud plastpudeleid ja karnistreid.



▲ Joonis 8 | Katsekehade katmine nikliga
(1 – katsekehad töölahuses, 2 – vask, 3 – alumiinium, 4 – teras)

2. Keemiline pindamine boornitriidiga

Boornitriidipindeid kasutatakse eelkõige nende suure kõvaduse ja kulumiskindluse tõttu.

Parema pinnakvaliteedi saamiseks tuleb katsekehad puhastada ja poleerida, et saavutada ka pinde parem nakkumine. Pinnatavate katsekehade mõõtmed olid järgmised: 35 x 20 x 2 mm ning 35 x 7 x 2 mm.

Tingimata tuleb lülitada sisse ventilatsioon, täita ohutusnõudeid ja kasutada kaitseprille, kindaid, kaitseriideid ning maski, seejärel valada pesuvahend SD 416 anumasse ja asetada küttekeha pesuvahendiga anumasse. Järgmisena on vaja valmistada töölahus.

Mensuuriga mõõdeti (osa – A), (osa – B), destilleeritud vee ja boornitriidi kontsentratsiooni kogused, mis seejärel segati kokku töölahuse valmistamiseks mõeldud anumasse ja valminud töölahusesse seejärel lisada ka küttekehad. Keemilise reaktsiooni tekitamiseks tuleb lahuseid soojendada. Pesulahus SD 416 peab saavutama temperatuuri 70 °C. Töölahuse temperatuur peab aga olema märksa kõrgem: 73–85 °C.

Boornitriidiga pindamist teostati korduvalt ja kasutati ka eelnevalt nikliga kaetud katsekehi, et välja selgitada, kuidas käituvad katsekehad teistkordsel pindamisel ning milline pinne moodustub, millised saavad olema katsekehade mikrokõvadused ja pinnete struktuurid.

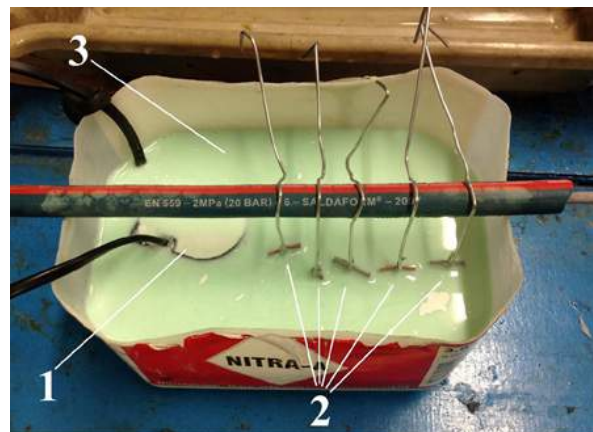
Pindamise kestus mõlemal korral oli 60 minutit. Kui pesulahuse temperatuur 70 °C oli saavutatud, asetati katsekehad pesulahusesse minimaalselt viieks minutiks, et eemaldada detaililt rasv, õli ja muu reostus.

Pärast katsekehade pesulahuses puhastamist tuleb sooritada detailidel märgavustest, pritsides detailile vett. Vesi peab detaili katma ühtlaselt ja detaili tuleb pesta seni, kuni mullide teke lakkab.

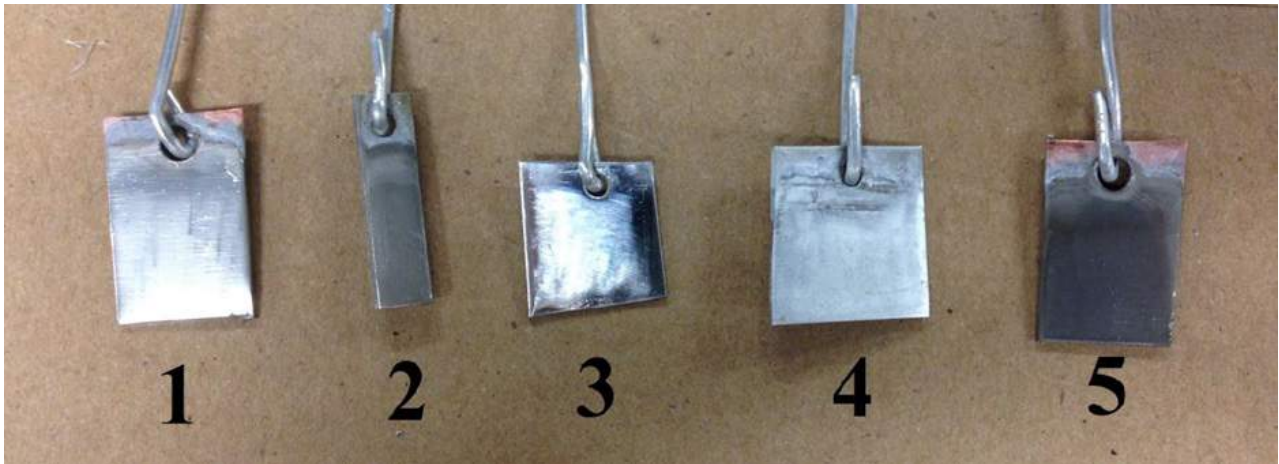
Mitte lasta detailidel kuivada.

Seejärel, kui töölahus on oma temperatuuri saavutanud, asetada katsekehad töölahusesse ja hoida seal kuni soovitud pinde saavutamiseni.

Hiljem, kui soovitud pinne saavutatud, tuleb detail pesta [1].



▲ Joonis 9 | Katsekehad asetatuna töölahusesse
(1 – pump töölahuses ringluse tekitamiseks, 2 – katsekehad, 3 – töölahus)



▲ Joonis 10 | Boornitriidiga kaetud katsekehad pärast teist pindamist (1 – vask, 2 – teras, 3 – roostevaba teras, 4 – alumiinium, 5 – vask)

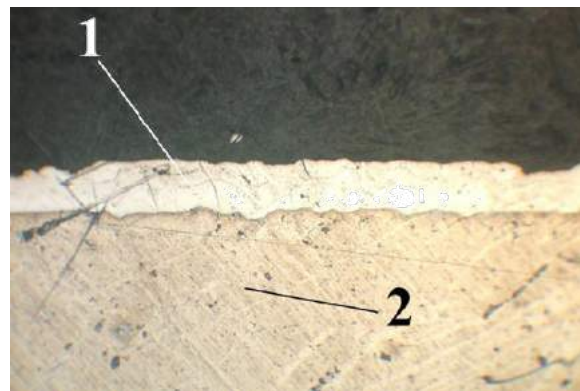
Paksema boornitriidi kihi saamiseks pinnati eri materjalist katsekehi mitu kihti ja katsetulemused on esitatud joonisel 10.

Kahekordsel boornitriidiga pindamisel saadud katsekehade pinnete ja pinde struktuuride uurimistel selgus, et punktis 2 kirjeldatud pindamise protsess töötab ja saadakse pinne. Pinde struktuuri uuringutest selgus, et kahekordsel boornitriidiga pindamisel tekkis pinnatud katsekehadele kahes kihis vahekiht. Eriti hästi kajastus see boornitriidiga pinnatud terase struktuuri uuringus (joonis 13), kus teine pindekiht on selgesti silmatav. Pinnatud vask ja alumiinium kattusid pindega ühtlaselt ega esinenud pinde murdumisi ega mõrasid. Terasel (joonis 13) on aga näha pindel esinevaid pragusid, mille põhjuseks on paksemate kihtide korral tekkivad sisepinged.

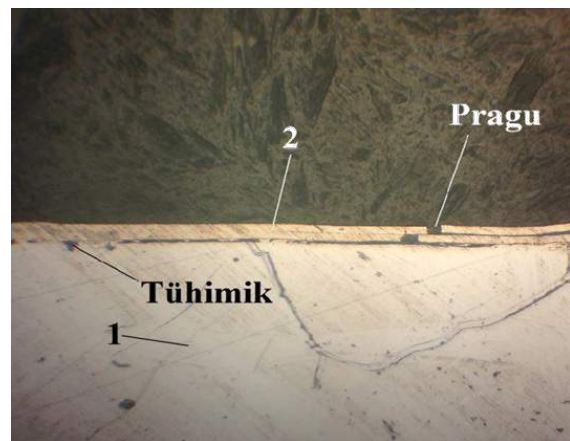
Pinnet ei tekkinud ainult ühel roostevabast terasest katsekehal, millel silmaga nähtavat pinnet ei olnud võimalik tuvastada, kuna teistel katsekehadel oli pinne selgesti silmaga nähtav.

3. Pinnete struktuuriuuringud

Mikrolihvitud katsekehade struktuuriuuringuteks kasutati metalli mikroskoopi Metkon IMM 901 maksimaalse suurendusega kuni 400 korda. Eesmärgiks oli uurida keemilise protsessi tulemusena saadud pindeid, nende struktuure ja kuidas pindamine eri temperatuuridel mõjutab pinde kihti ja pinde struktuuri. Pinnete struktuuri uurimine teostati 100-kordse suurendusega, v.a elektrokeemiliselt booriga pinnatud teras, kus kasutati 200-kordset suurendust. Struktuuri piltidelt on selgesti näha pinnatud põhimaterjal, pindekiht ja kontaktjoon.



▲ Joonis 11 | Boornitriidiga pinnatud alumiinium (1 – boornitriidpinne, 2 – alumiinium)



▲ Joonis 12 | Boornitriidiga pinnatud vask (1 – boornitriidpinne, 2 – vask)

Boornitriidiga pinnatud vase struktuuri pildilt (joonis 11) on näha, et pinne kinnitus katsekehale täies ulatuses. Pinde paksus jäi ühtlane ja pinne on hästi nakkunud vasega.

Boornitriidiga pinnatud terase (joonis 13) struktuuriuuringutest selgus, et pinne oli katnud pinnatud katsekeha küll täies ulatuses, aga pindel esines pragusid, mis võivad tekkida sisepingetest. Pindekihi paksus oli katsekeha ulatuses ühtlane. Pindekihi all on näha seal asuvaid tühimikke. Pindel on näha ka kahe pinde vahelist kihti, mis tekkis katsekeha teistkordsel pindamisel.



▲ Joonis 13 | Boornitriidiga pinnatud teras (1 – teras, 2 – boornitriidpinne)

4. Pinnete mikrokõvaduse määramine

Mikrokõvaduse määramine toimus Vickersi meetodil, kus surutakse teemantpüramiidi otsik uuritava katsekeha pinnale.

Seejärel mõõdeti katsekeha pinnale tekitatud püramiidi jälje diagonaalide pikkused ja pärast seda oli võimalik Vickersi kõvaduse määramise valemi abil välja arvutada HV.

Kõvadust mõõdeti kümnel katsekehal survejõuga 2 kgf = 19,6133 N; kestusega 10 sekundit ja igal katsekehal teostati kolm mõõtmist 40-kordse suurendusega objektiiviga.

Pinnete kõvaduse määramiseks kasutati mikrokõvaduse mõõtmiseks seadet Innovatest 400A.

Uuritud pinnete kõvadused tabelites 1 kuni 7.

| | D1 (µm) | D2 (µm) | $d = (D1 + D2) / 2$ | $d^2(\mu\text{m})$ | HV | Keskmine kõvadus (HV) |
|---------|---------|---------|---------------------|--------------------|------|-----------------------|
| Katse 1 | 1,20 | 1,35 | 1,275 | 1,625625 | 2281 | 2249 |
| Katse 2 | 1,22 | 1,22 | 1,22 | 1,4884 | 2492 | |
| Katse 3 | 1,42 | 1,32 | 1,37 | 1,8769 | 1976 | |

▲ Tabel 1 | Keemiline nikli pinne alumiiniumil (töölahuse temperatuur 96–98 °C)

| | D1 (µm) | D2 (µm) | $d = (D1 + D2) / 2$ | $d^2(\mu\text{m})$ | HV | Keskmine kõvadus (HV) |
|---------|---------|---------|---------------------|--------------------|------|-----------------------|
| Katse 1 | 1,07 | 1,10 | 1,085 | 1,177225 | 3150 | 3030 |
| Katse 2 | 1,15 | 1,10 | 1,125 | 1,265625 | 2930 | |
| Katse 3 | 1,10 | 1,12 | 1,11 | 1,2321 | 3010 | |

▲ Tabel 2 | Keemiline nikli pinne terasel (töölause temperatuur 96–98 °C)

| | D1 (µm) | D2 (µm) | $d=(D1+D2)/2$ | $d^2 (\mu\text{m})$ | HV | Keskmine kõvadus (HV) |
|---------|---------|---------|---------------|---------------------|------|-----------------------|
| Katse 1 | 1,55 | 1,45 | 1,5 | 2,25 | 1648 | 1637 |
| Katse 2 | 1,47 | 1,57 | 1,52 | 2,3104 | 1605 | |
| Katse 3 | 1,52 | 1,47 | 1,495 | 2,235025 | 1659 | |

▲ Tabel 3 | Keemiline nikli pinne vasel (töölause temperatuur 96–98 °C)

| | D1 (µm) | D2 (µm) | $d=(D1+D2)/2$ | $d^2 (\mu\text{m})$ | HV | Keskmine kõvadus (HV) |
|---------|---------|---------|---------------|---------------------|-----|-----------------------|
| Katse 1 | 2,02 | 2,07 | 2,045 | 4,182025 | 886 | 884 |
| Katse 2 | 2,12 | 1,95 | 2,035 | 4,141225 | 895 | |
| Katse 3 | 2,07 | 2,05 | 2,06 | 4,2436 | 873 | |

▲ Tabel 4 | Keemiline boornitriidpinne vasel

| | D1 (µm) | D2 (µm) | $d=(D1+D2)/2$ | d^2 (µm) | HV | Keskmine kõvadus (HV) |
|---------|---------|---------|---------------|------------|------|-----------------------|
| Katse 1 | 1,65 | 1,65 | 1,65 | 2,7225 | 1362 | 1360 |
| Katse 2 | 1,62 | 1,62 | 1,62 | 2,6244 | 1413 | |
| Katse 3 | 1,70 | 1,67 | 1,685 | 2,839225 | 1306 | |

▲ Tabel 5 | Keemiline boornitriidpinne terasel

| | D1 (µm) | D2 (µm) | $d=(D1+D2)/2$ | d^2 (µm) | HV | Keskmine kõvadus (HV) |
|---------|---------|---------|---------------|------------|-----|-----------------------|
| Katse 1 | 2,35 | 2,32 | 2,335 | 5,452225 | 680 | 675 |
| Katse 2 | 2,37 | 2,35 | 2,36 | 5,5696 | 666 | |
| Katse 3 | 2,32 | 2,35 | 2,335 | 5,452225 | 680 | |

▲ Tabel 6 | Keemiline boornitriidpinne alumiiniumil

| | D1 (µm) | D2 (µm) | $d=(D1+D2)/2$ | d^2 (µm) | HV | Keskmine kõvadus (HV) |
|---------|---------|---------|---------------|------------|------|-----------------------|
| Katse 1 | 1,60 | 1,55 | 1,575 | 2,480625 | 1495 | 1518 |
| Katse 2 | 1,62 | 1,62 | 1,62 | 2,6244 | 1413 | |
| Katse 3 | 1,50 | 1,50 | 1,50 | 2,25 | 1648 | |

▲ Tabel 7 | Keemiline nikli pinne terasel (töölahuse temperatuur 60–90 °C)

■ Kokkuvõte

Uurimistö eesmärgiks oli täpsemalt uurida metallisulamite keemilise pindamise iseärasusi ja tehnoloogiat. Katsete tulemustest võib järeldada, et suure tähtsusega on kasutatavate elektrolüütide temperatuur.

Nikliga pinnati kahel töölahuse temperatuuril (60–90 °C) ja (96–98 °C) ning teostatud pindamised andsid erinevaid tulemusi. Selgus, et juhendi järgi teostatud pindamine temperatuuril 96–98 °C jättis küll ilusa läikiva pinde, aga pinne oli rabe ja koorus lihtsalt pinnatud materjalilt maha. Samas temperatuuridel 60–90 °C katseeksitusmeetodil teostatud nikliga pindamine andis tuhmima pinde, aga pinne ise oli kaetud materjalil kõvemini kinni ega koorunud maha. Pinnete mikrokõvaduse uuringust selgus, et kõrgematel temperatuuridel toimunud pindamine andis suurema kõvaduse, kui seda tegi madalamatel temperatuuridel toimunud pindamine. Tuleb tõdeda, et juhendi järgi pinnatud tulemus valmistab üllatuse ning parema pinde ja tulemuse andis hoopis katseeksitusmeetodil läbiviidud keemiline nikliga pindamine.

Boornitriidiga toimus pindamine samadel tingimustel kaks korda, sama kestusega ja samadel temperatuuridel. Lõpptulemus näitas, et roostevabale terasele pinne peale ei kinnitunud, samas kõik teised katsekehad saavutasid korraliku pinde. Struktuuriuuringutest selgus, et katsekehadel tekib mitmekordset pindamisel pinnete vaheline kiht.

Katsekehade mikrokõvaduse mõõtmisel oli kõige suurema kõvadusega temperatuuridel 60–90 °C pinnatud malm 3506 HV. Kõige väiksema kõvadusega aga boornitriidiga kaetud alumiinium 675 HV.

Keemiline pindamine ei nõua seadmete (nt toiteallikas) olemasolu ja jätab detailile ühtlasema pinde, kui seda teeb elektrokeemiline pindamine. Töölahust on lihtsam valmistada ja töölahusele vajadusel koostisosi lisada.

■ Summary

The technology of chemical coatings

This thesis gave an overview about electroless coating technologies, techniques, coating materials and their usage and properties.

During this thesis, there were performed a chemical coatings on different base materials. There were tested different work solution temperatures and materials acting during and after this process. There were plated

materials with boron nitride two times, to see how the coating reacts and what will be materials and coatings structure after that. In this thesis there were also explored microhardnesses on the coated materials.

Nickel plating in different temperatures 60 - 90 °C ja 96 - 98 °C, gave different results. It turned out that with the help of the manual using temperatures 96 - 98 °C, the coating was shine and looked decorative, but it was brittle and came off from the surface very easily. The other test in temperatures 60 - 90 °C, gave better results, the coating weren't so shiny, but the coating was firmly fixed to the surface and didn't came off. Coating microhardness test showed that in higher temperatures coated materials had better hardness, than in lower temperatures coated materials.

Boron nitride coating took place two times and on the same test pieces in the same temperatures. Final result showed that the stainless steel didn't showed any coating, but other test pieces achieved the purpose and got proper coatings. Structure studies showed, that test pieces got two different coatings on them.

Microhardness measurement showed, that the highest hardness was on the cast iron 3506 HV, what was coated with the nickel coating in temperatures 96 - 98 °C. The lowest hardness was on the aluminium 675 HV, what was coated with boron nitride.

When comparing chemical- and electrochemical plating in a single production, then its easier to use chemical plating. Chemical plating doesn't require any electrical equipment and the surface of the detail coating will be smoother compared to the electrochemical plating. Its simple to mix and the components and you get a working solution, but in electroplating you need anode and power supply. Electrochemical plating is much more complex. It requires bigger amount of electrical current when you have large details and its more dangerous because of the electricity. Electrochemical plating requires also very clean surfaces.

■ Viidatud allikad

[1] Philip A. Schweitzer. (2005). Paint and Coatings – Application and corrosion resistance. USA, Taylor and Francis Group.

[2] Caswell Inc. The Complete Planting Manual. Version 9-UK & Europe.

[3] E. Reinsoo. (2011). Kulumiskindlad galvaanilised pindid. Tallinna Tehnikakõrgkool. Tallinn. [Lõputöö].