

Mechanics, material science, industrial engineering and management
Mechanika, medžiagų inžinerija, pramonės inžinerija ir vadyba

**INERCINIŲ DAVIKLIŲ PROJEKTAVIMAS, GAMYBA PRIDĖTINĖMIS
TECHNOLOGIJOMIS IR TYRIMAS**

Reymon ILJUŠIN, Eugenijus JURKONIS*

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

Gauta 2020 m. sausio 28 d.; priimta 2021 m. sausio 5 d.

Santrauka. Pasiūlyti 2D ir 3D tipo inerciniai davikliai, sukurti veikiantys pavyzdžiai, kurie bandyti laboratorijos ir realių situacijų sąlygomis. Pasiūlyta 2D inercinių daviklių gamybos technologija masinei gamybai. Atlikti 3D inercinių daviklių eksperimentiniai įvairių storių kontaktų stiprumo bandymai. Nustatyti 3D inercinių daviklių kritiniai metimo aukščiai, naudojant suprojektuotą laisvo kritimo stendą. Palyginti eksperimentinių ir skaičiuojamųjų įtempių rezultatai.

Reikšminiai žodžiai: inerciniai davikliai, 3D spausdinimas, prekės pažeidžiamumas, medžiagos anizotropiškumas, inercinės apkrovos.

Įvadas

Transportuojamos prekės jos gali būti pažeidžiamos, bet nustatyti pakuočių pažeidimų kilmę labai sudėtinga. Pakuotės pažeidimas gali įvykti:

- kraunant prekes į transportavimo priemonę ar iš jos;
- transportuojant;
- laikant prekes sandėlyje ar eksponuojant atsitikus nelaimėi.

Pardavėjo (internetinės parduotuvės), gavėjo (pirkėjo) ir transportavimo kompanijos interesams apginti bei pakuotės vientisumui kontroliuoti buvo sukurti teisės aktai ir sugalvotos prekių grąžinimo sąlygos. Norint išvengti nekokybiškų prekių pardavimo ir/ar sužinoti, kuriame transportavimo etape prekės patyrė dideles smūgines apkrovas, naudojami įvairūs davikliai, tarp jų ir inerciniai.

Rinkoje šiaandien žinomi inerciniai davikliai, fiksuojantys apkrovą, viršijančias leidžiamuosius lygius (Amazon, n.d.; AliExpress, n.d.; Everychina, n.d.; Kalwinder, 2012; Werkzeugkoffer shop, n.d.; What-When-How, n.d.). Deja, jų konstrukcija sudėtinga, gamyba brangi ir, kaip pasekmė, jie ne itin populiarūs masinėms prekėms vertinti (GlobalSpec, n.d.; Hallberg, 2012; ShockWatch, n.d.).

Pristatomo tyrimo esmė: suprojektuoti ir pagaminti paprasčiausius inercinius daviklius. Siūlomi paprastos konstrukcijos greitos gamybos pigūs inerciniai davikliai, galimi gaminti masiškai.

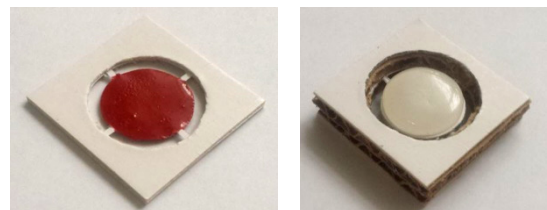
1. Darbo metodai

Pasiūlyti 2D (1 pav.) ir 3D tipo inerciniai davikliai, sukurti veikiantys pavyzdžiai, kurie bandyti laboratorijos ir realių situacijų sąlygomis. Pasiūlyta 2D inercinių daviklių gamybos technologija masinei gamybai (2 pav.). Atlikti 3D inercinių daviklių eksperimentiniai įvairių storių kontaktų stiprumo bandymai. Nustatyti 3D inercinių daviklių kritiniai metimo aukščiai, naudojant suprojektuotą laisvo kritimo stendą. Palyginti eksperimentinių ir skaičiuojamųjų įtempių rezultatai.

2. 2D inerciniai davikliai

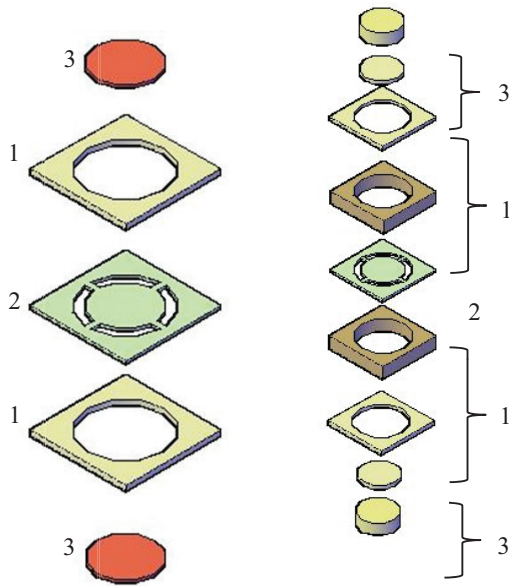
2D inercinių daviklių pagrindas yra gaminamas iš celiuliozės (popieriaus ir/ar kartono). Daviklio charakteristikos:

- gabaritiniai matmenys: 40×40 mm;
- medžiaga: kartonas, gofro kartonas, popierius, karšti klėjai, emaliniai dažai;
- gaminimo būdas: tradicinė spauda.



1 paveikslas. Plono ir gofro 2D inercinių daviklių pavyzdžiai
Figure 1. Examples of thin and corrugated 2D inertial sensors

*Autorius susirašinėti. El. paštas eug.jurkonis@gmail.com



2 paveikslas. 2D inercinių daviklių sudedamosios dalys: 1 – korpusas (reikiamo storio kartono lakštai); 2 – funkcinis sluoksnis (plonas popierinis sluoksnis); 3 – papildoma masė (reikiamo storio karštų klijų ar dažų sluoksnis iš abiejų pusių)
Figure 2. Components of 2D inertial sensors: 1 – housing (cardboard sheets of required thickness); 2 – functional layer (thin paper layer); 3 – additional mass (the required thickness of a layer of hot glue or paint on both sides)

3. 2D inercinių daviklių galima gamybos technologija

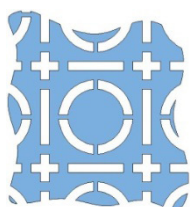
Siūlomą 2D inercinių daviklių gamybą sudaro 3 etapai:

3.1. Korpuso dalies gamyba

Korpusas susideda iš dviejų vienodų dalių. Korpuso dalis gaminama iš 1 mm storio kartono. Jo lakštai patenka į skylių iškirtimo liniją, kur iš kartono lakštų iškertami segmentai.

3.2. Vidinės dalies (inercinės masės) gamyba

Vidinė dalis susideda iš popierinio lakšto, kurio abi pusės nudažomos. Popieriaus lakštai paduodami į spaudos mašiną, kur nudažomi iš abiejų pusių. Išdžiovinti popieriaus lakštai tiekiami į skylių iškirtimo liniją, kur pagal schemą iškertami figūriniai segmentai (3 pav.).



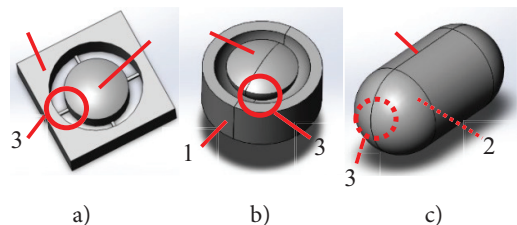
3 paveikslas. Vidinės dalies (masės) iškirtimo schema
Figure 3. Internal part (mass) cutting scheme

3.3. Inercinio daviklio surinkimas

Į inercinių daviklių surinkimo liniją paduodami du korpuso dalies lakštai ir vienas vidinės dalies (masės) lakštas. Šie lakštai tarpusavyje suklijuojami. Išdžiovinti lakštai supjaustomi į atskirus visiškai paruoštus darbu inercinius daviklius.

4. 3D inerciniai davikliai

3D inerciniai davikliai gaminami naudojant pridėtinės gamybos technologijas. Sukurti ir bandyti cilindrinis, sferinis ir kapsulinis inerciniai davikliai (pastarojo daviklio ypatybė ta, kad, jog vidinė dalis (masė) yra apsaugota nuo išorinių jėgų, kurios gali tiesiogiai ją paveikti).



4 paveikslas. 3D inercinių daviklių pavyzdžiai: a) cilindrinis; b) sferinis; c) kapsulinis
Figure 4. Examples of 3D inertial sensors are: a) cylindrical; b) spherical; c) capsular

Inercinio daviklio konstrukcija:

- medžiaga: PLA;
- gamybos būdas: 3D spausdinimas.

Inercinio daviklio sudedamosios dalys (4 pav.):

- 1) korpusas;
- 2) vidinė dalis (masė);
- 3) kontaktai.

4.1. Kontaktų tempimo bandymai

Šio tyrimo metu buvo analizuojama, kokiai jėgai esant nutrūksta tam tikro storio kontaktas ir kiek kontaktas pailgėja tempimo metu, parinkus leidžiamuosius tempimo greičius.

4.2. Skaičiavimo pagrindai

Inercinis daviklis suveikia arba inercinio daviklio kontaktas nutrūksta, kai kontakto įtempis lygus arba viršija kritinį įtempį:

$$\sigma = \frac{F_{trūkio}}{A_{kontakto}} \geq \sigma_{kritinė} ; \quad (1)$$

$$F_{trūkio} = ma , \quad (2)$$

čia m – judri masė, pakabinta ant kontaktų; a – ekstremalaus poveikio pagreitis; $A_{kontakto}$ – kontakto, prilaikančio judrią masę, skerspjūvio plotas.

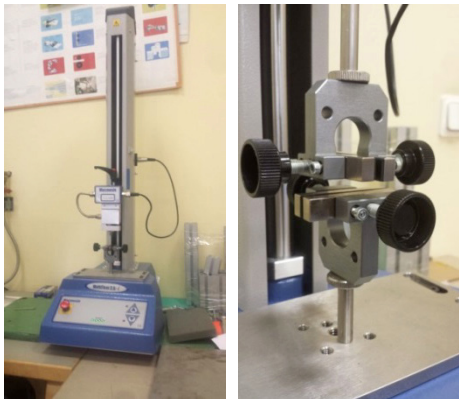
4.3. Pasiruošimas kontaktų tempimo bandymams

Šio tyrimo metu buvo analizuojama, kokiai jėgai esant nutrūksta tam tikro storio kontaktas ir kontaktas pailgėja parinkus leidžiamuosius tempimo greičius (maksimalus tempimo greitis yra 500 mm/min.).

Buvo pasirinkti 5 mm ilgio įvairaus dydžio kontakto stori, kurie pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Kontaktų storiai (mm)
Table 1. Contact thicknesses (mm)

| Plastikas: PLA; kontakto matmenys, mm | | Atspausdintų siūlių skaičius į aukštį, vnt. | | | | | | |
|--|---|---|-----------|------------|----------|------------|-----------|------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Atspausdintų siūlių skaičius į plotį, vnt. | 1 | 0,35×0,125 | 0,35×0,25 | 0,35×0,375 | 0,35×0,5 | 0,35×0,625 | 0,35×0,75 | 0,35×0,875 |
| | 2 | 0,7×0,125 | 0,7×0,25 | 0,7×0,375 | 0,7×0,5 | 0,7×0,625 | 0,7×0,75 | 0,7×0,875 |



5 paveikslas. Mecmesin MultiTest 2.5 tempimo bandymų įrenginys
Figure 5. Mecmesin MultiTest 2.5 tensile testing device

Naudojant tempimo įrenginį Mecmesin MultiTest 2.5 (5 pav.) buvo atlikti kontaktų stiprumo bandymai.

4.4. Tempiamų kontaktų nutrūkimo jėgų nustatymas

Stiprumo bandymams buvo pasirinkti šeši skirtingi tempimo greičiai: 10, 100, 200, 300, 400, 500 mm/min.

Pagal gautus tempimo rezultatus sudaromas 1×1–1×7 kontaktų storių nutrūkimo jėgų priklausomybės nuo skirtingų tempimo greičių grafikas (6 pav.).

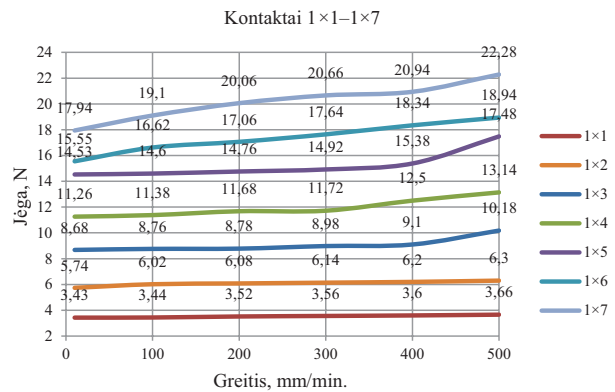
Iš grafiko matyti skirtingų kontakto storių nutrūkimo jėgos ir skirtingų tempimo greičių tiesinė priklausomybė. Tai reiškia, kad kuo kontaktas yra greičiau tempiamas, tuo didesnės jėgos reikia, kad kontaktas nutrūktų.

Yra sudaromas 1×1–1×7 kontaktų storių priklausomybės nuo visų greičių vidutinės jėgos reikšmės grafikas (7 pav.).

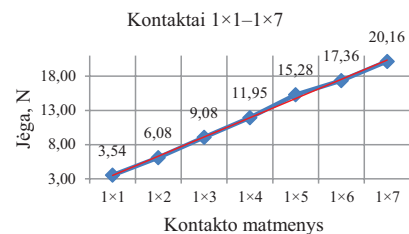
Iš grafiko matyti kontakto storio nuo visų greičių vidutinės jėgos reikšmės tiesinė priklausomybė. Tai reiškia, kad kuo kontaktas storesnis, tuo didesnės jėgos reikia, kad kontaktas nutrūktų.

Patikrinamas skirtumas tarp 5 mm ir 3 mm ilgio kontaktų. 3 mm kontaktas tempiamas 500 mm/min. greičiu. Tyrimui buvo parinkti 2×4 ir 2×5 storio kontaktai (2 lentelė).

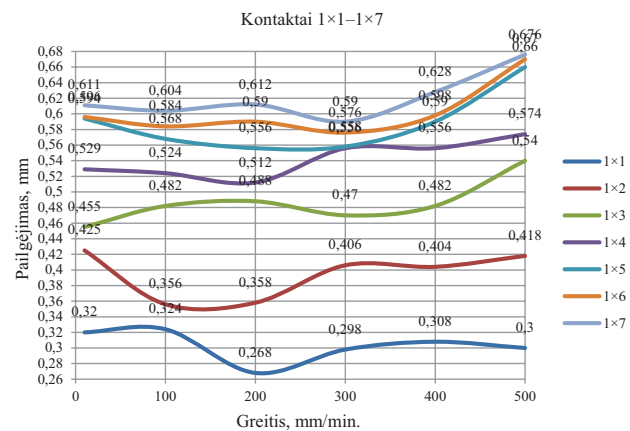
Iš rezultatų matoma, jog sutrumpinus kontaktą nuo 5 mm iki 3 mm nutrūkimo jėga sumažėjo iki 10–11 %.



6 paveikslas. 1×1–1×7 kontakto storių nutrūkimo jėgų priklausomybės nuo skirtingų tempimo greičių grafikas
Figure 6. Graph of the dependence of the breaking forces of 1×1–1×7 contact thicknesses on different tensile speeds



7 paveikslas. 1×1–1×7 kontaktų storių priklausomybės nuo visų greičių vidutinės jėgos reikšmės grafikas
Figure 7. Graph of the dependence of 1×1–1×7 contact thicknesses on the mean value of all speeds



8 paveikslas. 1×1–1×7 kontaktų storių pailgėjimo priklausomybės nuo skirtingų tempimo greičių grafikas
Figure 8. Graph of the elongation of 1×1–1×7 contact thicknesses at different tensile speeds

2 lentelė. 5 mm bei 3 mm 2×4 ir 2×5 kontaktų tempimas ir palyginimas
Table 2. 5 mm and 3 mm 2×4 and 2×5 contacts stretching and comparison

| Tempimo greitis: 500 mm/min. | | Kontakto ilgis, mm | Jėga, N | | Jėgos skirtumas, N | Jėgos skirtumas, % |
|------------------------------|-----|--------------------|--------------------|--|--------------------|--------------------|
| | | | Vidutinės reikšmės | | | |
| Kontakto matmenys | 2×4 | 5 | 29,94 | | 3,36 | 11,22 |
| | | 3 | 26,58 | | | |
| | 2×5 | 5 | 38,12 | | 3,94 | 10,34 |
| | | 3 | 34,18 | | | |

4.5. Tempiamų kontaktų pailgėjimo nustatymas

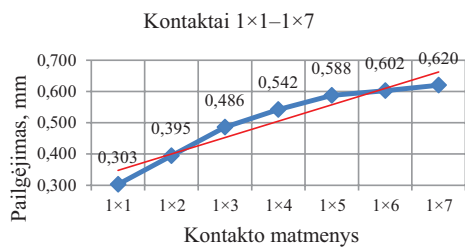
Kontakto pailgėjimui nustatyti buvo pasirinkti tie patys šeši skirtingi tempimo greičiai: 10, 100, 200, 300, 400, 500 mm/min.

Yra sudaromas 1×1–1×7 kontaktų storių pailgėjimo priklausomybės nuo skirtingų tempimo greičių grafikas pagal gautus pailgėjimo rezultatus (8 pav.).

Dėl spausdinimo ypatybių kiekvienas atspausdintas kontaktas turi skirtingų savybių. Tai reiškia, kad kiekvieno kontakto bandymo pailgėjimas yra skirtingas ir negalima įžvelgti tam tikros priklausomybės.

Yra sudaromas 1×1–1×7 kontaktų storių priklausomybės nuo visų greičių vidutinės pailgėjimo reikšmės grafikas (9 pav.).

Iš grafikų matyti kontakto storio nuo visų greičių vidutinės pailgėjimo reikšmių tiesinė priklausomybė. Tai reiškia, kad kuo kontaktas yra storesnis, tuo didesnis pailgėjimas.



9 paveikslas. 1×1–1×7 kontaktų storių priklausomybės nuo visų greičių vidutinės pailgėjimo reikšmės grafikas

Figure 9. Graph of the mean elongation value of 1×1–1×7 contact thicknesses for all speeds

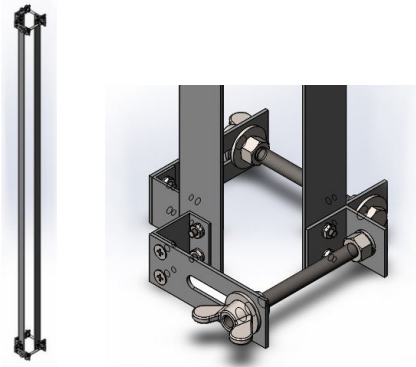
Patikrinamas skirtumas tarp 5 mm ir 3 mm ilgio kontaktų. 3 mm kontaktas tempiamas 500 mm/min. greičiu. Tyrimui buvo parinkti 2×4 ir 2×5 storio kontaktai (3 lentelė).

Iš rezultatų matoma, jog, sutrumpinus kontaktą nuo 5 mm iki 3 mm, plonesnio (2×4) kontakto pailgėjimas sumažėjo iki 28,61 %, o storesnio (2×5) kontakto – iki 19,70 %.

5. Inercinių daviklių metimo bandymai

Šio tyrimo metu buvo analizuojama, iš kokio aukščio metant inercinį daviklį jis suveikia.

Šiems tyrimams buvo suprojektuotas 1640 mm aukščio laisvo kritimo stendas (10 pav.), kuris susideda iš dviejų kampuočių, iš kurių vienas, reguliuojant varžtus, gali slankioti X bei Y ašių kryptimis.



10 paveikslas. Laisvo kritimo stendas
Figure 10. Freefall stand

3 lentelė. 5 mm bei 3 mm 2×4 ir 2×5 kontaktų tempimas ir palyginimas
Table 3. 5 mm and 3 mm 2×4 and 2×5 contacts stretching and comparison

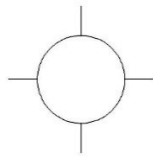
| Tempimo greitis: 500 mm/min. | | Kontakto ilgis, mm | Pailgėjimas, mm | | Pailgėjimo skirtumas, mm | Pailgėjimo skirtumas, % |
|------------------------------|-----|--------------------|--------------------|--|--------------------------|-------------------------|
| | | | Vidutinės reikšmės | | | |
| Kontakto matmenys | 2×4 | 5 | 0,804 | | 0,23 | 28,61 |
| | | 3 | 0,574 | | | |
| | 2×5 | 5 | 0,812 | | 0,16 | 19,70 |
| | | 3 | 0,652 | | | |



11 paveikslas. Filmavimo aplinka ir vienas iš vaizdo kadru
Figure 11. Filming environment and one of the video frames

Bandymai buvo filmuojami (11 pav.) naudojant greitą vaizdo kamerą ir *Phantom Camera Control* programą (Phantom High Speed, n.d.). Filmavimas vyko 300 kadru per sekundę greičiu.

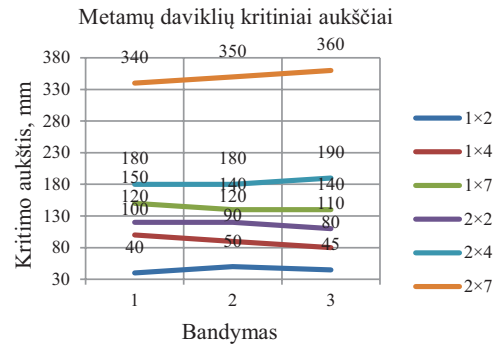
Buvo pasirinktas inercinio daviklio kontaktų išdėstymas pagal schemą (12 pav.).



12 paveikslas. Inercinio daviklio schema, 4 kontaktai
Figure 12. Inertial sensor scheme 4 contacts

Taip pat buvo pasirinkti šeši skirtingi kontaktų storiai:

- 1×2 (0,35×0,25 mm);
- 1×4 (0,35×0,5 mm);
- 1×7 (0,35×0,875 mm);



13 paveikslas. Metamų daviklių kritinių aukščių grafikas
Figure 13. Graph of critical heights of thrown sensors

- 2×2 (0,7×0,25 mm);
- 2×4 (0,7×0,5 mm);
- 2×7 (0,7×0,875 mm).

Kiekvienas iš daviklių buvo metamas pradedant nuo 20 mm aukščio ir didinant kritimo aukštį kas 10 mm. Kiekvieno daviklio tyrimas buvo stabdomas, kai iš tam tikro aukščio metamas daviklis suveikdavo. Iš gautų rezultatų sudaromas metamų daviklių kritinių aukščių grafikas (13 pav.).

Yra patikrinami inercinio daviklio kritinių metimo aukščių skirtumai tarp skirtingų kontaktų konfigūracijų bei jų skirtingų išdėstymų aplink masę. Buvo pasirinkti inerciniai davikliai su išdėstytais dviem kontaktais ir su vienu kontaktu.

Kiekvienas iš daviklių buvo metamas pradedant nuo 20 mm aukščio ir didinant kritimo aukštį kas 10 mm. Kiekvieno daviklio tyrimas buvo stabdomas, kai nuo tam tikro aukščio metamas daviklis suveikdavo. Šie rezultatai pateikti 4 lentelėje.

4 lentelė. Inercinių daviklių metimo kritiniai aukščiai (du kontaktai)

Table 4. Inertial sensors drop critical heights (two contacts)

| Kontaktų skaičius: 2 | | | Kritimo aukštis, mm | | | |
|---------------------------------|----------------------|-------------------|---------------------|-----|-----|------------------------|
| Laipsnių skaičius tarp kontaktų | Kontaktų išdėstymas: | Kontaktų storiai: | Bandymas | | | Vidutinės reikšmės, mm |
| | | | 1 | 2 | 3 | |
| 90° | | 2×4 | 190 | 200 | 190 | 193 |
| 60° | | 2×4 | 200 | 180 | 190 | 190 |
| 180° | | 2×4 | 175 | 185 | 180 | 180 |
| 0° | | 2×7 | 350 | 310 | 320 | 327 |

Buvo pastebėta, kad kritiniam metimo aukščiui kontaktų skaičius ir išdėstymas aplink masę daro minimalią įtaką, t. y. kritinių aukščių skirtumas yra nuo 3 mm iki 23 mm.

6. Eksperimentinių ir skaičiuojamųjų įtempių palyginimas

Pagal (1) ir (2) formules skaičiuojamos eksperimentinių įtempių reikšmės, o skaičiuojamųjų įtempių reikšmės nustatomos pagal šias formules:

$$\sigma_{sk} = \frac{F_{sk}}{A_{kontakto}}; \quad (3)$$

$$F_{sk} = ma; \quad (4)$$

$$a = \frac{\delta_{kontakto}}{\Delta t_{kritimo}^2}, \quad (5)$$

čia m – judri masė, pakabinta ant kontaktų; a – ekstremalaus poveikio pagreitis; $A_{kontakto}$ – kontakto, prilaikančio judrią masę, skerspjūvio plotas; $\delta_{kontakto}$ – kontakto ilgis; $\Delta t_{kritimo}^2$ – kritimo laikas iš vaizdo įrašo.

Eksperimentinių ir skaičiuojamųjų įtempių rezultatai pateikti 5 lentelėje.

5 lentelė. Kontaktų 1×1–1×7 eksperimentinių ir skaičiuojamųjų įtempių rezultatai

Table 5. Results of experimental and calculated stresses of contacts 1×1–1×7

| Ilgis: 5mm | σ eksperimentinė, Pa | σ skaičiuojamoji, Pa | Skirtumas % | |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------|---------|
| Kontaktų matmenys | 1×1 | 80800000 | 86698286 | 6,80 |
| | 1×2 | 69485714 | 43349143 | -60,29 |
| | 1×3 | 69180952 | 28899429 | -139,39 |
| | 1×4 | 68266667 | 21674571 | -214,96 |
| | 1×5 | 69843810 | 17339657 | -302,80 |
| | 1×6 | 66126984 | 14449714 | -357,64 |
| | 1×7 | 65839456 | 12385469 | -431,59 |

Iš rezultatų matyti, kad, didėjant kontakto skerspjūviui, didėja ir skirtumas tarp eksperimentinių ir skaičiuojamųjų įtempių. Tai reiškia, kad kuo kontakto skerspjūvis yra didesnis, tuo medžiaga yra labiau anizotropinė.

Išvados ir pasiūlymai

- Sukurti 2D ir 3D inerciniai davikliai, kurie gali būti panaudoti inercinės perkrovos fiksacijai.
- Atlikti bandymai parodė stabilius suveikimo parametrus.
- Kontaktų skerspjūvio plotas yra gana tolygiai proporcingas maksimaliai leidžiamajai jutiklio apkrovai.
- Kontaktų skaičius ir išdėstymas aplink masę kritiniam metimo aukščiui daro minimalią įtaką.
- 2D inerciniai davikliai gali būti gaminami masiškai įprastais spausdinimo gamybos būdais.
- Ateityje tikslinga atlikti papildomus tyrimus, tiksliau įvertinant spausdintos anizotropinės medžiagos savybes.

Literatūra

- AliExpress. (n.d.). *Keystudio analogovyy pëzojelektricheskij keramicheskij datchik vibracii dlja Arduino*. https://aliexpress.ru/i/32822937042.html?spm=a2g0v.search0306.3.189.72ad2d4dJ5w9s6&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_0_10084_10083_10821_10887_10307_321_453_322_454_10618_536_10065_317_537_10068_319_10059_10103_10884_10696_10303_10820_10302,searchweb201603_0,ppcSwitch_0&algo_pvid=6c36ce37-5767-498a-912e-1df8a1369c28&algo_expId=6c36ce37-5767-498a-912e-1df8a1369c28-25
- Everychina. (n.d.). *Impact Label 100G – the function is as same as shockwatch – impact indicator*. WAN-YO Enterprise Co. Ltd. <http://wan-yo.m.sell.everychina.com/p-102931168-impact-label-100g-the-function-is-as-same-as-shockwatch-impact-indicator.html>
- GlobalSpec. (n.d.). *Shock and impact sensors information*. https://www.globalspec.com/learnmore/sensors_transducers_detectors/acceleration_vibration_sensing/shock_impact_sensors
- Hallberg, A. (2012). *What is Shockwatch*. <http://shockwatch.co.nz/what-is-shockwatch/>
- Kalwinder, K. (2012). *Automotive airbag sensors*. <https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=40>
- Phantom High Speed. (n.d.). *Phantom Camera Control (PCC) software*. Vision Research Inc. <https://www.phantomhighspeed.com/resourcesandsupport/phantomresources/pccsoftware>
- ShockWatch. (n.d.). *Shock & tilt solutions*. eCommerce Software Shopping Cart Solutions Inc. http://www.shockwatch.co.uk/shock_tilt_solutions.htm#.XEDFinl7nIV
- Werkzeugkoffer shop. (n.d.). *Tiltwatch – Kippindikator zur transportüberwachung*. <https://werkzeugkoffer-shop.de/index.php/de/Tiltwatch-Kippindikator--Warnaufkleber/c-TRANSPORT-CONTROL/a-TILTWATCH>
- What-When-How. (n.d.). *Supplementary Restraint System (SRS) or “Air-Bag” (Automobile)*. <http://what-when-how.com/automobile/supplementary-restraint-system-srs-or-air-bag-automobile/>

DESIGN, MANUFACTURE WITH ADDITIVE TECHNOLOGIES AND RESEARCH OF INERTIA SENSORS

R. Iljušin, E. Jurkonis

Abstract

2D and 3D type inertial sensors have been proposed, working examples have been developed and tested in the laboratory and real conditions. 2D inertial sensor manufacturing technology for mass production is proposed. Experimental tests of contacts strength of 3D inertial sensors of various thicknesses were performed. The critical drop heights of the 3D inertial sensors were determined using a designed free fall stand. The results of experimental and computational stresses were compared.

Keywords: inertial sensors, 3D printing, product vulnerability, material anisotropy, inertial loads.