
Vplyv striedavého namáhania na zmenu teploty vzduchu v pružnom pneumatickom elemente

Jozef Krajňák, Ing., PhD.*

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Letná 9, 042 00, Košice.
E-mail: jozef.krajnak@tuke.sk, Tel.: +421 55 602 2373

Silvia Maláková, doc. Ing., PhD.

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Letná 9, 042 00, Košice.
E-mail: silvia.malakova@tuke.sk, Tel.: +421 55 602 2372

Daniela Kepeň Harachová, Ing., PhD.

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Technická univerzita v Košiciach,
Letná 9, 042 00, Košice.
E-mail: daniela.harachova@tuke.sk, Tel.: +421 55 602 2366

The effect of alternating stress on the change in air temperature in the flexible pneumatic element

Abstract: Rubber as a material is one of the frequently used materials in mechanical engineering. This article deals with rubber, or flexible pneumatic elements, the main part of which is rubber. We determine the effect of alternating stress on the temperature change in the flexible pneumatic element under this variable load. We describe a device that serves this purpose. This device was designed and manufactured in our department. We also determine the effect of the air pressure of the flexible element on the temperature of the air and the temperature of the flexible elements. We need to find out the magnitude of these temperatures so that we can determine whether these flexible elements can work without significant negative changes in physical properties.

Keywords: rubber, pneumatic element, temperature, measuring device, alternating stress, temperature sensor.

ÚVOD

V strojárstve sa okrem najčastejšie používaných kovových materiálov používajú nekovové materiály, z ktorých široké uplatnenie má guma. Guma sa v mnohých smeroch líši od klasických konštrukčných materiálov, tým, že má špecifické mechanické a chemické vlastnosti ktoré sa dajú aplikovať v strojárstve a hlavne v konštrukcii rôznych zariadení.

Guma ako materiál má široké uplatnenie v priemysle kvôli svojim špecifickým vlastnostiam a zvláštnym mechanickým vlastnostiam a nízkej hmotnosti [1]. Služi ako surovina pre rôzne priemyselné odvetvia vrátane automobilového priemyslu, stavebníctva, zdravotníctva a spotrebného tovaru, ako sú pneumatiky vozidiel, obuv, chirurgické rukavice a diely a komponenty poľnohospodárskych a priemyselných strojov. Takisto prírodné kaučukové plantáže prispievajú k trvalej udržateľnosti životného

prostredia, keďže kaučukovníky absorbujú oxid uhličitý z atmosféry, čím pomáhajú zmiernovať klimatické zmeny [2, 3]. Je však dobre známe, že prírodný kaučuk má nevýhody nízkej elasticity, nízkej pevnosti v ťahu a nízkej odolnosti proti oderu, čo predstavuje jeho limitné použitie.

Na našom pracovisku sa guma používa v pružných pneumatických elementoch. Tieto pružné elementy sú aplikované v pružných pneumatických hriadel'ových spojkách [4-10]. Pružné elementy sú naplnené vzduchom alebo iným plynným médiom a sú namáhané dynamickým namáhaním. Z dôvodu, že sú namáhané periodicky, dochádza k ohrievaniu vzduchu a ohrievaniu samotnej gummy [11].

Hodnoty získané pri statickom namáhaní sa používajú pre základnú klasifikáciu gumových materiálov. Pri statických skúškach má značný význam čas (hodnoty platia iba pre normalizovanú rýchlosť zaťažovania), tvar a rozmery skúšobného telesa a vplyv teploty (pri

teplotách pod $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sa guma svojimi vlastnosťami blíži vlastnostiam kovov, pri teplotách okolo $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ sa mnohé vlastnosti gumy v porovnaní s tými istými vlastnosťami pri normálnej prevádzkovej teplote okolo $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ silne zhoršujú).

Porucha prehriatia je jedným z významných problémov obmedzujúcich prevádzkovú schopnosť gumených pásov a súčiastok z gumy pri vysokej rýchlosti a vysokom zaťažení [12]. V priemysle sa prírodný kaučuk široko používa pri výrobe matrice gumových pásov s vynikajúcimi komplexnými mechanickými vlastnosťami. Samotná guma však vykazuje viskoelasticitu, ktorá vedie k silnému hromadeniu tepla pri vysokej frekvencii a striedavom namáhaní s vysokou amplitúdou počas vysokej rýchlosti a záťaže. Pretože samotná guma spracováva zlú tepelnú vodivosť [13], teplo sa nemôže časom rozptýliť, čo má za následok prudké zvýšenie teploty vo vnútri gumenej dráhy. Okrem toho vysoká prevádzková teplota značne zhoršuje výkon a životnosť gumených pásov. Z toho dôvodu má príprava materiálov z prírodného kaučuku s vysokou tepelnou vodivosťou a nízkou tvorbou tepla veľký význam pre vývoj vysokorýchlostnej gumovej dráhy čo je technický problém, ktorý treba urýchlene vyriešiť. Keďže naše pružné elementy sa skladajú z kovu a gumy a hlavné zaťaženie sa prenáša tlakom vzduchu je pre nás dôležité poznať ako sa táto guma respektíve vzduch bude zahrievať.

Cieľom tohto článku je zistiť vplyv striedavého namáhania na zmenu teploty vzduchu v dvojnóvcovom pružnom pneumatickom elemente pri takomto premenlivom zaťažení. Na našom pracovisku sme vyrobili zariadenie aby sa toto meranie mohlo vykonávať. Pružné elementy budeme dynamicky zaťažovať v závislosti od času a sledovať či teplota gumy sa nezvýši na takú hodnotu kedy už stratí svoje vlastnosti. V prípade, že guma stratí svoje vlastnosti môže dôjsť k poškodeniu pneumatickej hriadeľovej spojky, takisto aj zariadenia v ktorom je tato spojka umiestnená. Tento fakt môže zapríčiniť riziko úrazu či prípadné poškodenie zariadenia a veľké finančné škody na zariadení [14, 15]. Rovnako môže dôjsť k odstaveniu zariadenia, čo v takisto môže spôsobiť veľké finančné straty pre danú firmu ktorá toto zariadenie používa.

1 MERACIE ZARIADENIE

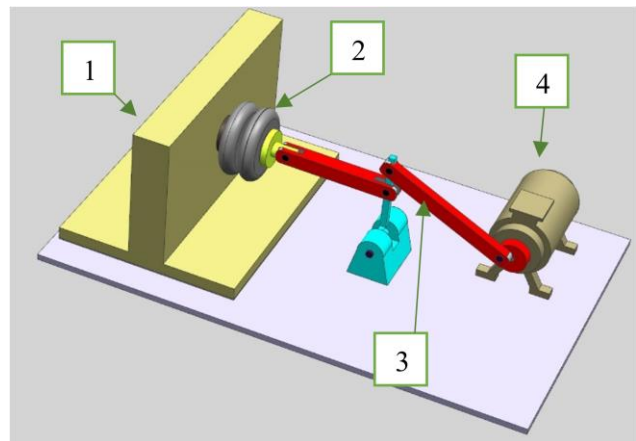
Meracie zariadenie ktoré bolo použité na snímanie teploty pri dynamickom namáhaní pružných elementov bolo vyvinuté na našom pracovisku. Navrhnuté bolo, aby čo najjednoduchšie splnilo svoj účel a zároveň, aby sa jednoducho a ekonomicky s minimálnymi nákladmi vyrobilo.

Skúšobné zariadenie na obr. 1 pozostáva z rámu (1), v ktorom je uložený pneumatický pružný člen (2), oscilačného mechanizmu (3), elektromotora (4) s

plynulou reguláciou frekvencie medzi 0 a 50 Hz. Použité sú digitálne multimetre *M-3870D METEX* s teplotnou sondou *ETP-003* a rozsahom merania $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplotné sondy boli rozmiestnené na troch miestach, kde sa merala teplota. Boli namerané nasledujúce teploty:

- teplota vzduchu vo vnútri pružného člena T_{air} ,
- teplota vnútorného povrchu pružného prvku T_{in} ,
- teplota vonkajšieho povrchu pružného člena T_{out} .

Všetky tieto tri teploty boli sledované súčasne v závislosti od času. Samozrejme, že merania sa vykonávali až po ustálení teploty v laboratóriu. Skúšobné zariadenie bolo tepelne izolované. Na obr. 1 je znázornené schéma celého meracieho zariadenia ktoré bolo tepelne izolované od okolitého prostredia čo bolo veľmi dôležité pre presne merania. Počas experimentov sa udržiavala stabilná teplota v izolovanom objeme okolo testovacieho zariadenia.



Obr. 1. Schéma meracieho zariadenia: 1 - rám, 2 - pneumatický pružný člen, 3 - oscilačný mechanizmus, 4 - elektromotor

Teplota okolia (ktorá je rovnaká ako všetky teploty v celom systéme v čase $t = 0\text{ s}$) bola $T_0 = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Interval odberu vzoriek, čiže odčitavania teploty bola 1 min. Teploty sa zaznamenávali v časoch $t = 1, 2, 3, 4, 5 \dots 30$ min pri konštantnej frekvencii a amplitúde kmitov a meniacom sa tlaku vzduchu. Počas experimentov bol vplyv prostredia minimalizovaný použitím tepelnej izolácie a udržiavaním stabilných teplotných podmienok. okolo testovacieho zariadenia. Maximálne rozlíšenie teplotných sond bolo $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Referenčná hodnota frekvencie v experimente bola $f = 13,5\text{ Hz}$. Tento prevádzkový stav predstavuje rezonančný stav (rezonančnú frekvenciu a amplitúdu) zariadenia, kde bol použitý pneumatický tuner.

Amplitúda lineárneho posunu na ohybnom prvku bola konštantná: $A = 4\text{ mm}$.

1.1 Pneumatické elementy

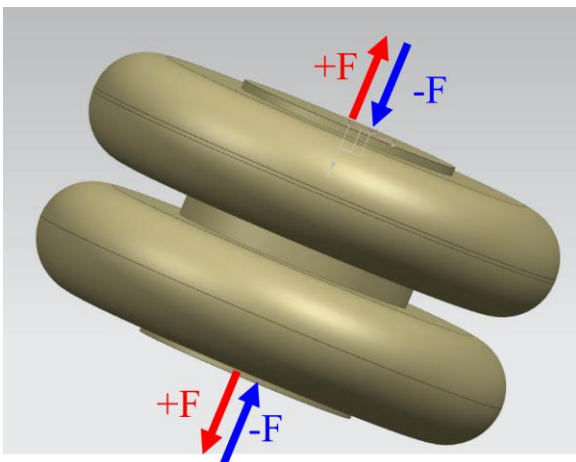
Pri meraní sme použili dvojnóvcové pružné elementy *PM 70* znázornené na obr. 2. Tieto pružné elementy používame v pružných pneumatických

hriadeľových spojkách. Priemer tohto pružného elementu je 70 mm a výška 90 mm.



Obr. 2. Dojvlnocový pružný pneumatiký element PM 70

Takýto dvojvlnocový pružný pneumatiký element bol zaťažovaný striedavým namáhaním v smere kladnej sily $+F$ (namáhanie na ťah) a v opačnom smere sily $-F$ (namáhanie na tlak). Smery týchto síl vidieť na schematickom znázornení elementu na obr. 3.



Obr. 3. Schéma pružného elementu so smerom zaťaženia

2 ANALÝZA VEDENIA TEPLA V PRUŽNOM ELEMENTE

Pružný element bol namáhaný dynamicky ako je to naznačené na obr. 3. V dôsledku stláčania a rozťahovania dochádza k nahrievaniu vzduchu a gummy. Zohrievanie sa gumovo-kordového materiálu pružného elementu pri jeho periodickom stláčaní má dva zdroje.

Prvým zdrojom je vzduch uzavretý v jeho vnútri. Ten sa pri periodickom stláčaní striedavo zohrieva a ochladzuje – tieto zmeny teploty potom vplyvajú na materiál, v ktorom je vzduch uzavretý [8]. Je však dokázané, že s ohľadom na vysokú frekvenciu zmien

objemu ($200 \text{ min}^{-1} \div 600 \text{ min}^{-1}$) a malú tepelnú vodivosť však toto kolísanie teploty vzduchu ovplyvňuje iba tenkú povrchovú vrstvu (menej ako 0,1 mm) vnútornej časti materiálu. Napriek tomu je výmena tepla medzi vzduchom a materiálom dôležitá a nesmie sa zanedbať – pretože by nastala fyzikálne nezmyselná situácia, kedy by vnútri ohriateho gumovo-kordového materiálu bol uzavretý vzduch s pôvodnou (a nižšou) teplotou. Druhým tu prítomným procesom je ohrev gumového materiálu v dôsledku tepelných strát pri jeho periodických deformáciách. Pre úplnosť je potrebné dodať, že okrem ohrevu je prítomné odovzdávanie tepla vzduchu okolo pružného elementu. Vyrovnanie tepelnej bilancie všetkých zúčastnených procesov má za následok dosiahnutie rovnovážnej teploty v sústave.

Istú komplikáciu predstavuje nízka tepelná vodivosť gumového materiálu. Tá spôsobuje to, že vnútorný a vonkajší povrch pružného elementu majú rôznu teplotu (experimentálne merania to jasne ukazujú). Preto sa nedá v čase t predpokladať rovnaká hodnota teploty pre celý objem pružného elementu.

Množstvo tepla preneseného vedením je úmerné obsahu prierezu, cez ktorý teplo tečie. Keďže kordové vlákna votkané do gummy tvoria iba zanedbateľnú časť jej objemu, zrejme preto budú pre vedenie tepla nepodstatné.

Šírenie tepla v prostredí popisuje rovnica vedenia tepla (1) – parciálna diferenciálna rovnica, ktorá dáva do súvislosti okamžité rozdelenie teploty v objeme $T(x, y, z, t)$ a jeho časový vývoj (udáva teda hodnotu časovej derivácie teploty v každom bode objemu):

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

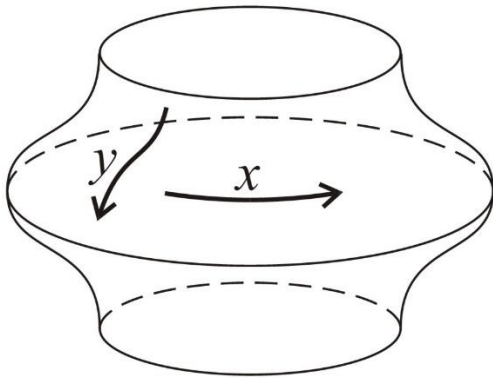
kde c je merná tepelná kapacita materiálu gummy [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

ρ hustota gummy [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

λ je koeficient vedenia tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

Pri numerickom riešení sa bude v ďalšom skúmať vedenie tepla v pneumatiko-pružnom elemente ako jednorozmerný problém. Predpokladá sa, že teplo v jeho priereze prúdi iba v smere normály k povrchu. Okrem tohto sú však ešte dva iné smery, v ktorých by teplo mohlo prúdiť pozdĺž povrchu elementu v smere po obvodě (na obr. 4) a kolmo naň (na obr. 4 smer y). Smer x je vylúčený z dôvodu symetrie elementu – ktorý sa pozdĺž obvodu ohrieva všade rovnako, a tak nie je dôvod, aby v tomto smere vznikali nejaké teplotné rozdiely a tok tepla.

So smerom y je to zložitejšie. Ak sa teda uvažuje vznik tepla v objeme gummy, z teórie plynie, že množstvo vznikajúceho tepla závisí od veľkosti zmien deformácie pružného prostredia.



Obr. 4. Smery šírenia tepla na pružnom elemente

Pri pohľade na deformujúci sa element je jasné, že nie každá časť jeho povrchu sa pri deformácii namáha rovnako a preto sa budú jednotlivé časti rôzne zahrievať. Vo všetkých výpočtoch sa však uvádza pre teplotu povrchu jediné číslo. Z toho dôvodu treba myslieť na to, že skutočná hodnota bude oscilovať okolo neho a nebude rovnaká pre všetky časti elementu. Reálne sa rozdiely v mechanickom namáhaní jednotlivých častí pružného elementu zrejme nelíšia mnohonásobne. Navyše, vznik tepla pri namáhaní gumy nie je jediným faktorom, často má oveľa väčší vplyv napríklad vznik tepla pri turbulentnom prúdení vzduchu v hadiciach spájajúcich pružné elementy. Je možné konštatovať, že rozdiely teplôt na povrchu elementu by nemali byť príliš veľké a ich zanedbaním sa nedopúšťa zásadnej chyby.

2 VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNYCH MERANÍ

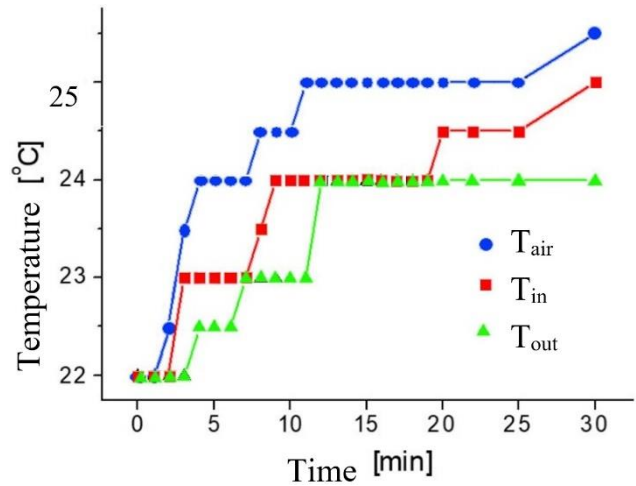
Skúšobné zariadenie znázornené na obr.1 bolo tepelne izolované, ako bolo už uvedené. Počas experimentov sa udržiavala stabilná teplota v izolovanom objeme okolo testovacieho zariadenia.

Teplota okolia (ktorá je rovnaká ako všetky teploty v celom systéme v čase $t = 0$ s) bola $T_0 = 22$ °C.

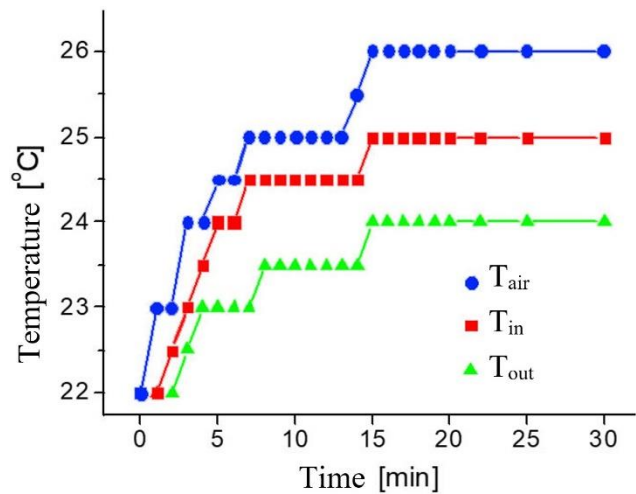
Teplota z multimetrov sa odčítavala raz za 1 min. Teploty sa zaznamenávali v časoch $t = 1, 2, 3, 4, 5 \dots 30$ min pri konštantnej frekvencii a amplitúde oscilácií a meniacom sa tlaku vzduchu. Počas experimentov bolo snahou zabezpečiť stabilné teplotné podmienky v okolí testovacieho zariadenia. Maximálne rozlíšenie teplotných sond bolo 0,5 °C.

Referenčná hodnota frekvencie v experimente bola $f = 13,5$ Hz a tá bola zabezpečená pri konštantných otáčkach elektromotora $n = 800$ min⁻¹. Tento prevádzkový stav predstavoval pre našu sústavu stav v blízkosti oblasti rezonancie.

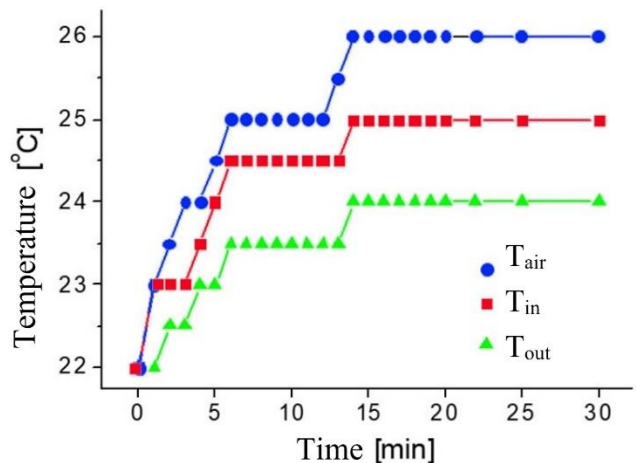
Merania sa vykonávali pri troch tlakoch. Zvolený bol jeden nízky tlak a dva vysoké tlaky, ktorých hodnoty boli $p = 200$ kPa, $P = 500$ kPa a $P = 600$ kPa. Priebiehy nameraných hodnôt sú zachytené na obr. 5, obr. 6 a obr. 7.



Obr. 5. Priebieh teploty v závislosti od času pre tlak 200 kPa v pružnom elemente.



Obr. 6. Priebieh teploty v závislosti od času pre tlak 500 kPa v pružnom elemente.



Obr. 7. Priebieh teploty v závislosti od času pre tlak 600 kPa v pružnom elemente.

Tlak vzduchu vo vnútri pružného pneumatického elementu mal konštantnú hodnotu, ktorá bola kontrolovaná počas priebehu celého merania. Amplitúda lineárneho posunu na ohybnom prvku bola konštantná: $A = 4$ mm. Táto hodnota bola zabezpečená presne navrhnutým pákovým mechanizmom znázorneným na obr. 1, pozícia 3.

Výsledky meraní boli vynesené do grafu. Obrázky 5 až 7 zobrazujú vývoj teploty zaznamenaný všetkými tromi sondami pri frekvencii kmitov $f = 13,5$ Hz a pri rôznych hodnotách tlaku vzduchu vo vnútri pneumatického pružného člena.

Priebeh teplôt v závislosti od času pre tlak 200 kPa je na obr. 5. Vývoj teplôt pri nízkych tlakoch je veľmi podobný. Prvá teplotná rovnováha nastala po 12 minútach pre teplotu vzduchu T_{air} pri 25 °C. Teplota sa tu ustálila a už sa nezväčšovala. Následne sa teplota vonkajšieho povrchu T_{out} stabilizovala na 24 °C. Tretia meraná teplota vnútorného povrchu T_{in} sa stabilizovala po 6 min. na konečnej hodnote 25 °C.

Pri tlaku 500 kPa sú priebehy znázornené na obr. 6. Dochádza opäť k zmene teplotnej stabilizácie. Všetky tri namerané teploty sa ustálili súčasne, po 15 min. Maximálne teploty sú $T_{air} = 26$ °C, teplota vnútorného povrchu $T_{in} = 25$ °C a teplota vonkajšieho povrchu T_{out} sa ustálila na 24 °C.

Veľmi podobné výsledky nameraných teplôt v závislosti od času sa dosiahli aj pri ďalšom vysokom tlaku 600 kPa. Tieto priebehy pri tlaku 600 kPa vidieť na obr. 7. Všetky tri teploty sa ustálili skoro súčasne. Ich ustálenie nastalo po čase 13-15 min. Maximálne teploty vzduchu sú $T_{air} = 26$ °C pre vzduch vo vnútri, $T_{in} = 25$ °C pre vnútorný povrch a $T_{out} = 24$ °C pre vonkajší povrch. Pri porovnaní výsledkov z meraní prezentovaných na obr. 5–7 vidieť, že teplota vzduchu vo vnútri pružného člena T_{air} dosahovala maximálne hodnoty v rozmedzí 25 °C až 26 °C. Pri nízkych tlakoch 200 kPa dosiahla teplota vzduchu T_{air} maximálnu hodnotu 25,0 °C už po 10 minútach merania. Pri vyšších tlakoch (500 kPa ÷ 600 kPa) sa stabilná teplota 26 °C dosiahla až po 15 minútach merania. Zaujímavé je, že pri týchto vyšších tlakoch sa teplota v celom systéme súčasne stabilizovala. Naopak, najväčší rozdiel v nameraných časoch stabilizácie bol zaznamenaný pri nízkych tlakoch. Z týchto priebehov je viditeľné že sa nedosahujú extrémne veľké hodnoty teplôt a taktiež že tlak nemá až taký veľký vplyv na teplotu ako sa predpokladalo.

ZÁVER

Prezentovaný článok skúmal teplotu dvojnóvcového pružného pneumatického elementu pri dynamickom namáhaní. Po vykonaní meraní na skúšobnom zariadení, ktoré je v článku popísané, sa dá konštatovať ako sa mení teplota povrchu pružného elementu, teplota vnútra v pružnom elemente a teplota vzduchu vo vnútri pružného elementu. Pre meranie boli vybrané tlaky 200 kPa, 500 kPa, 600 kPa. Teplota sa pri meraní ustálila po čase 10 až 15 minút a potom sa už nemenila. Z nameraných hodnôt sa môže konštatovať že tlak nemá výrazný vplyv na zmenu teploty. Rozdiely teplôt pri nízkom a vysokom tlaku nie sú výrazné. Merania tiež ukazujú, že pri dynamickom namáhaní sa

pneumatický element ako aj vzduch zahrejú do maximálnej teploty 26 °C. Táto teplota nie je kritická pretože neohrozuje zdravie a takisto nemení vlastnosti gúmy ktoré by mohli spôsobiť poruchu či poškodenie. Dá sa teda konštatovať že pružné elementy zvládajú dynamické zaťaženia a nedochádza k výraznému nárastu teploty ktoré by bolo pre obsluhu nebezpečne. Je vhodné vyskúmať či na zmenu teploty nebude mať vplyv zmena frekvencie namáhania, čomu je zámer venovať sa v ďalšom výskume.

Pod'akovanie

Táto práca je súčasťou týchto projektov: KEGA 029TUKE-4/2021 - Implementácia moderných edukačných prístupov pri konštruovaní prevodových mechanizmov, KEGA 037TUKE-4/2024 - Vytvorenie interaktívneho nástroja pre zvýšenie zručností a kompetencií študentov v rámci výučby predmetov zameraných na tvorbu konštrukčnej dokumentácie, VEGA 1 /0346/24 - Vývoj inovatívnych systémov a prvkov pre redukciiu torzných vibrácií v mechanických pohonoch.

LITERATÚRA

- [1] VASILEV, A. - LORENZ, T. - BREITKOPF, C. (2021): *Thermal Conductivities of Crosslinked Polyisoprene and Polybutadiene from Molecular Dynamics Simulations*. *Polymers*, 13, 315. <https://doi.org/10.3390/polym13030315>.
- [2] YAN, Z. - ZAOUI, A. - ZAÏRI, F. (2023): *Physical and mechanical properties of vulcanized and filled rubber at high strain rate*. *Chinese Journal of Physics* Vol. 86, December 2023, pp. 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2023.09.010>.
- [3] SATAKHUN, D. - CHAYAWAT, C. - SATHORNKICH, J. - PHATTARALERPHONG, J. - CHANTUMA, P. - THALER, P. - GAY, F. - NOUVELLON, Y. - KASEMSAP, P. (2019): *Carbon sequestration potential of rubber-tree plantation in Thailand*. *IOP Conference Series: Mater. Sci. Eng.*, 526.
- [4] HOMIŠIN, J. - KAŠŠAY, P. - PUŠKÁR, M. - GREGA, R. - KRAJŇÁK, J. - URBANSKÝ, M. - MORAVIČ, M. (2016): *Continuous tuning of ship propulsion system by means of pneumatic tuner of torsional oscillation*. *International Journal of Maritime Engineering: Transactions of The Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 158, No. Part A3, pp. A231-A238, ISSN 1479-8751.
- [5] HOMIŠIN, J. (2007): *Pneumatic flexible shaft couplings*. *Transport Problems*. Vol. 2, No. 3, p. 63-72, ISSN 1896-0596.
- [6] KRAJŇÁK, J. - URBANSKÝ, M. - GURSKÝ, P. - BRESTOVIČ, T. (2011): *Analysis of impact of gasses on mechanical properties of flexible pneumatic*

- couplings*. Transactions of the Universities of Košice. No. 2, pp. 49-56, ISSN 1335-2334.
- [7] GURSKÝ, P. - GREGA, R. (2011): *Influence of flexible elements temperature on flexible couplings characteristics*. Transactions of the Universities of Kosice. No. 2, 2011, pp.61-66, ISSN 1335-2334.
- [8] KRAJŇÁK, J. - HOMIŠIN, J. - GREGA, R. - KAŠŠAY, P. - URBANSKÝ, M. (2021): *The failures of flexible couplings due to self-heating by torsional vibrations – validation on the heat generation in pneumatic flexible tuner of torsional vibrations*. Engineering Failure Analysis. Amsterdam (Nemecko): Elsevier No. 119, pp. 1-13, ISSN 1350-6307.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104977>
- [9] GREGA, R. (2014): *Examination of applicated pneumatic flexible coupling and its effect on magnitude of vibrations in drive of belt conveyer*. Zeszyty naukowe Politechniki Slaskiej. Vol. 85, No. 1925, p. 21-25, ISSN 0209-3324.
- [10] HOMIŠIN, J. - GREGA, R. - KOPAS, M. (2007): *New kinds of pneumatic flexible shaft couplings with low torsional rigidity*. Transactions of the Universities of Košice. No. 1, pp. 17-20, ISSN 1335-2334.
- [11] KAŠŠAY, P. - HOMIŠIN, J. - ČOPAN, P. - URBANSKÝ, M. (2014): *Verification of Torsional Oscillating Mechanical System Dynamic Calculation*. Results. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej: seria: Transport. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2014, Vol. 84, pp. 29-34, ISSN 0209-3324.
- [12] LIANG, K. - TU, Q.-Z. - SHEN, X.-M. - FANG, Z.-H. - YANG, X. - ZHANG, Y. - XIANG, H.-y. (2022): *An improved LuGre model for calculating static steering torque of rubber tracked chassis*. Other articles in Defence Technology, Vol.18, No. 5, May 2022, pp. 797-810,
<https://doi.org/10.1016/j.dt.2021.03.026>.
- [13] SETHULEKSHMI, A. S. - APPUKUTTAN, S. - KURUVILLA J. (2022): *A comprehensive review on the recent advancements in natural rubber nanocomposites*. International Journal of Biological Macromolecules, Vol. 194, pp. 819-842, ISSN 0141-8130,
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.134>.
- [14] MALÁKOVÁ, S. - PUŠKÁR, M. - FRANKOVSKÝ, P. - SIVÁK, S. - HARACHOVÁ, D. (2021): *Influence of the shape of gear wheel bodies in marine engines on the gearing deformation and meshing stiffness*. Journal of Marine Science and Engineering, Bazilej (Švajčiarsko), Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 9, No. 10, pp. 1-22, ISSN 2077-1312.
<http://dx.doi.org/10.3390/jmse9101060>.
- [15] HARACHOVÁ, D. - MALÁKOVÁ, S. (2013): *Applying the modularity principle in design of drive systems in mechanotherapeutic devices*. Grant journal, Vol. 2, No. 2 , pp. 80-82, ISSN 1805-0638.