
Návrh unikátneho jednéhoúčelového zariadenia pre skúšky tečenia

Lenka Jakubovičová, Ing., PhD.*

Katedra aplikovanej mechaniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: lenka.jakubovicova@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2984

Ondrej Piroh, Ing.

Katedra aplikovanej mechaniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: ondrej.piroh@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2965

Milan Vaško, doc. Ing., PhD.

Katedra aplikovanej mechaniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: milan.vasko@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2950

Milan Sága, prof. Dr. Ing.

Katedra aplikovanej mechaniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: milan.saga@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2500

The unique CREEP testing machine

Abstract: To study the viscoelastic behaviour of polymers, creep test is the most accurate experimental method. This paper presents the engineering design and strength analysis of a special purpose disposable device for performing creep tests of commonly commercially available composite materials, specifically materials fabricated through 3D printing. The device, made of *Bosch-Rexroth* aluminium profiles, offers flexibility and easy modification to meet different requirements for testing diverse material types. *Finite element analysis (FEM)* is performed to verify the strength and safety of the device under different load levels. Prior to the actual creep test, a tensile test is performed to obtain material properties such as ultimate strength and maximum elongation. The values obtained are a stepping stone to determine the creep conditions. The results of the finite-element analysis demonstrated the reliability of the equipment for performing the required creep tests and confirmed its suitability for use to perform tests on selected composite materials. The proposed device is also dimensioned for stronger materials in terms of strength, which can be addressed in future studies. The significance of this work lies in providing a cost-effective and customizable solution for creep testing of composite material with wider applications in engineering.

Keywords: electric traction, transmission, traction force.

ÚVOD

Pre inžiniersku prax majú mechanické charakteristiky stanovené pri zaťažení ťahom, tlakom, ohybom alebo krutom len obmedzený význam. Existuje celé množstvo aplikácií, kde hlavne polyméry sú vystavované časovo dlhšiemu namáhaniu. Ako uvádzajú rôzni autori [1-3], polyméry vo všeobecnosti reagujú na mechanické namáhanie vždy s určitým časovým oneskorením. Preto pri krátkodobom

namáhaní vykazujú vyššiu pevnosť, modul pružnosti a menšiu ťažnosť, než pri dlhodobom namáhaní. V praxi sa vyžaduje doba životnosti pre kompozitné diely niekoľko rokov, preto je dôležité pri konštrukčných prevedeniach poznať a vychádzať z mechanických charakteristík pri dlhodobom namáhaní. Pre tieto účely slúžia krivky tečenia a isochronne krivky [4-6].

Skúšky tečenia sa vykonávajú na rôznych typoch za-

riadení, či už komerčne vyrábaných, alebo svojpomocne zostrojených [7-10]. Merať tečenie materiálov, teda ich dlhodobú deformáciu pod konštantným zaťažením, je mimoriadne dôležité v mnohých priemyselných odvetviach, kde materiály musia odolávať dlhodobým mechanickým namáhaniam. Znalosť tohto javu je kľúčová pre správny návrh a použitie materiálov, najmä tých, ktoré sa využívajú v leteectve, automobilovom priemysle, či v stavebníctve. V súčasnej dobe, keď sú kompozitné materiály čoraz častejšie využívané v týchto oblastiach, je presné hodnotenie ich vlastností tečenia nevyhnutné pre zabezpečenie dlhodobej spoľahlivosti a bezpečnosti.

Pred tímom výskumných pracovníkov vznikla náročná úloha, ako vyvinúť unikátne jednoúčelové zariadenie, ktoré by umožnilo vykonávanie skúšok tečenia pre rôzne typy kompozitných materiálov. Hlavným cieľom je vytvoriť zariadenie, ktoré je funkčné, ale aj prispôbitel'né rôznym požiadavkám na testovanie, čím by sa zabezpečila jeho široká použiteľnosť v rôznych výskumných aktivitách. Po dôkladnej analýze rôznych materiálových a konštrukčných možností uvažujúc aj zvaranú kovovú nevariabilnú konštrukciu sa autori rozhodli použiť hliníkové profily značky Bosch-Rexroth, ktoré ponúkajú jedinečnú kombináciu ľahkosti, pevnosti a flexibility [11, 12]. Rýchla predstaviteľnosť a nízka hmotnosť predurčuje hliníkové profily na bezpečné využitie nielen v strojárstve, ale aj v iných odvetviach ako napríklad v zdravotníctve a pre čisté priestory, kde sa vyžaduje sterilné prostredie. Táto voľba umožňuje rýchlu predstaviteľnosť zariadenia podľa aktuálnych potrieb testovania rôznych kompozitných materiálov a pri rôznych testovacích zaťaženiach.

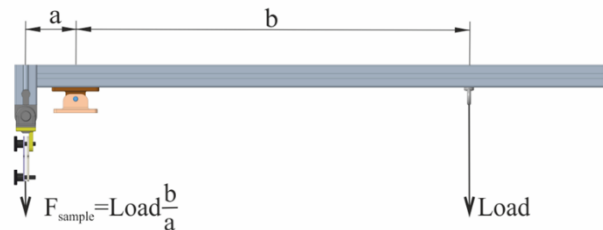
Metódou konečných prvkov (FEM) s využitím softvéru ANSYS Workbench zistíme stav napätosti v konštrukcii a overíme bezpečnosť navrhnutého zariadenia pre stanovenú úroveň zaťaženia. Navrhnuté zariadenie by malo slúžiť na vykonávanie skúšok tečenia kompozitných materiálov. Na dosiahnutie požadovaných podmienok realizovania testov tečenia najprv vykonáme sériu skúšok ťahom kompozitných štruktúr, za účelom určenia základných materiálových vlastností testovaných vzoriek a to hlavne medzi pevnosti, maximálnu silu a maximálne predĺženie. Tieto hodnoty sú kľúčové pre správne nastavenie parametrov skúšok tečenia, ktoré sú následne realizované na tomto zariadení.

1 METODIKA

Výskum tečenia materiálov zameriavame na komerčne dostupné polyméry filamentov ako je polyethylene terephthalate glycol (PETG), polylactic acid (PLA), acrylonitrile styrene Acrylate (ASA) a SILK, ktorý tvorí mix PLA a PETG. Na pochopenie

mechanizmu porušenia materiálu a mechanických vlastností (tuhosť a pevnosť) aditívne vyrábaných polymérov uskutočňujeme ťahové skúšky použitím elektromechanického testovacieho zariadenia M500-100CT, výrobné číslo 500-11209, rozsah nerania 0 N ÷ 100 kN, výrobca LABORMACHINE.

Najvhodnejšou metódou vykonávania testu tečenia materiálu je jednoduché použitie konštantnej axiálnej sily pôsobiacej na skúmanú vzorku. Princíp páky umožňuje udržiavať konštantnú silu po dlhú dobu. Tento princíp páky sme použili pri aplikovaní zaťaženia na skúmanú vzorku zvoleného materiálu (obr. 1).

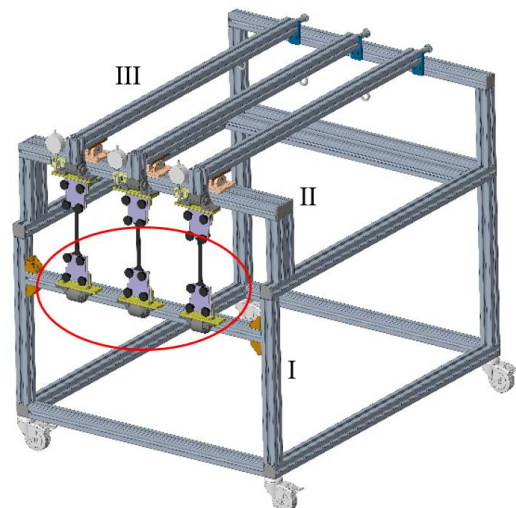


Obr. 1. Princíp Creep zariadenia na skúmanie tečenia

Z ťahovej skúšky získame maximálne hodnoty sily, pri ktorých u skúmaných vzorkách dochádza k porušeniu materiálu, od 650 N do 1300 N. Pre vykonávanie skúšky je dôležité mať informáciu o hodnote veľkosti sily, ktorú treba vyvinúť na dosiahnutie medzi pevnosti R_m . Pri skúškach tečenia je aplikované percentuálne nižšie zaťaženie z maximálnej hodnoty medzi pevnosti, čo je hodnota pod medzou klzu. Vo všeobecnosti sa výsledky ťahového diagramu popisujú v závislosti napätie a deformácia, σ a ε , častejšie ako jednoducho sila a zmena dĺžky, F a ΔL .

2 KONŠTRUKČNÝ NÁVRH

Počas samotného návrhu boli vykonávané konštrukčné zmeny a úpravy. Hornú a dolnú časť uchytienia tvoria otočné kĺby, čo je praktické - (viac modelujúce - imitujúci reálny stav) (obr. 2).



Obr. 2. Finálny návrh zariadenia

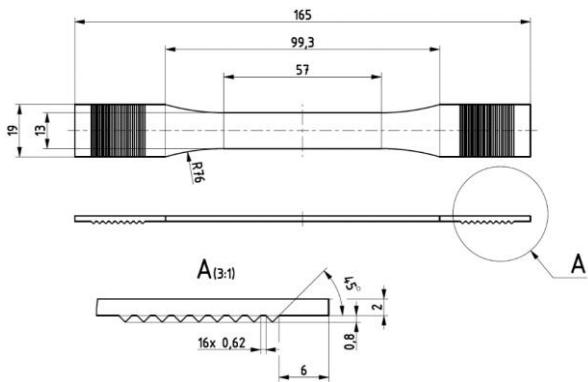
Pri konštrukcii zariadenia sme sa rozhodli použiť hliníkové profily výrobcu *Bosch-Rexroth* [14]. Konštrukčné vyhotovenie zariadenia poskytuje rýchlu zmontovateľnosť, praktickosť, odolnosť proti korózii a flexibilnú prestavbu. Pre naše potreby sme zvolili dva hlavné nosné profily a jeden pevnejší na rameno páky. Hlavná konštrukcia je tvorená hliníkovým profilom I o rozmeroch 45 × 45L (tab. 1). Najviac namáhané rameno, na ktorom sú položené a uchytané zaťažované páky je profil II rozmerov 45 × 90L.

Tab. 1. Použité hliníkové profily

Hliníkový profil	Prierez	Prierezová charakteristika
I. 45 × 45L		$A = 6,0 \text{ cm}^2$ $I_x = 11,7 \text{ cm}^4$ $I_y = 11,7 \text{ cm}^4$ $W_x = 5,2 \text{ cm}^3$ $W_y = 5,2 \text{ cm}^3$ $m = 1,6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$
II. 45 × 90L		$A = 11,3 \text{ cm}^2$ $I_x = 82,0 \text{ cm}^4$ $I_y = 23,6 \text{ cm}^4$ $W_x = 18,2 \text{ cm}^3$ $W_y = 10,5 \text{ cm}^3$ $m = 3,0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$
III. 45 × 45		$A = 7,5 \text{ cm}^2$ $I_x = 13,8 \text{ cm}^4$ $I_y = 13,8 \text{ cm}^4$ $W_x = 6,1 \text{ cm}^3$ $W_y = 6,1 \text{ cm}^3$ $m = 2,0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$

Páka ramena III, na ktorej je zavesené závažie tvorí pevnejší a silnejší hliníkový profil 45 × 45. Zvolené profily využívajú 10 milimetrový slot na spájanie. V tab. 1 sú uvedené použité hliníkové profily spolu s prierezovými charakteristikami.

3D tlačiareň tlačí vzorku od základne smerom nahor. Preto spodná strana vzorky ostáva hladká a vrchnú stranu tvorí zúbkovaný reliéf (obr. 3).



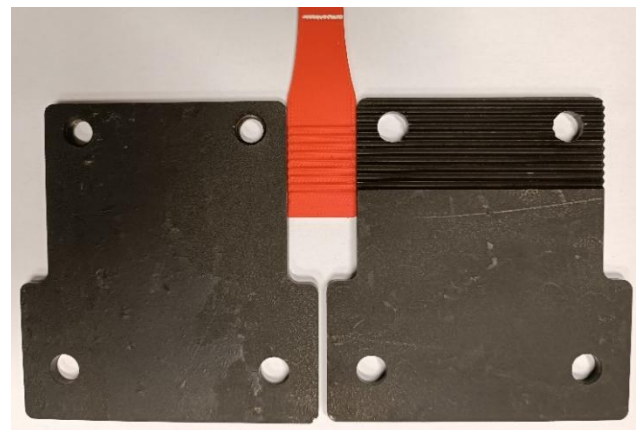
Obr. 3. Kompozitná vzorka so zúbkovitým reliéfom

Profily sú spojené spojovníkmi, taktiež od firmy *Bosch Rexroth* [15, 16]. Všetky spojenia použitých profilov boli realizované použitím *quick* konektor. Pre spevnenie najviac namáhaného profilu 40 × 90L bol použitý *blacket* pre lepšie a bezpečnejšie spojenie. Jednotlivé *Quick* konektory a *blacket* a ich princíp použitia spojenia profilov sú názorne vykreslené v tab. 2.

Tab. 2. Použité *Quick* konektory

<i>Quick connector, 10 mm slot, 0°</i>	
<i>Quick connector, 10 mm slot, 90°</i>	
<i>Blacket 45 × 45</i>	

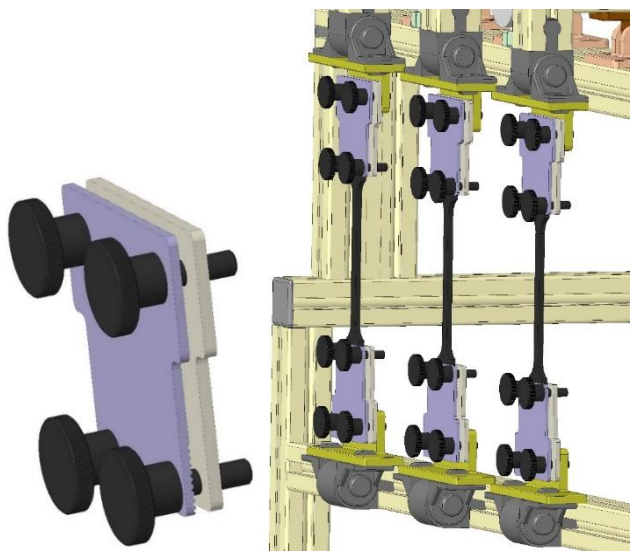
Uchytenie hladkej vzorky bez použitia komerčnej upínacej hlavy bola nasledujúca výzva pre výskumný tím. Normalizovaná vzorka je na povrchu hladká, čo spôsobovalo vyklznutie z upínacích platní.



Obr. 4. Platne spolu s vrúbkovanou vzorkou

Vytvorenie zúbkovanej štruktúry upínacej časti je vhodné riešenie, ktoré zabezpečí pevné neporušiteľné uchytenie. Navrhli sme a vyrobili dve oceľové platne, hladkú platňu a platňu so zúbkovitým reliéfom, ktorého rozstup je zhodný s reliéfom na kompozitnej vzorke (obr. 4).

Spojenie oboch platní a uchytenie vzorky je zabezpečené pomocou ryhovanej skrutky od firmy *Haberkorn*. Súčasne sú uchytené k T spojke na páke, obr. 5 (žltý komponent). Prítláčna sila na uchytenie vzorky je vyvinutá utiahnutím týchto skrutiek.



Obr. 5. Platne spolu s vrúbkovanou vzorkou

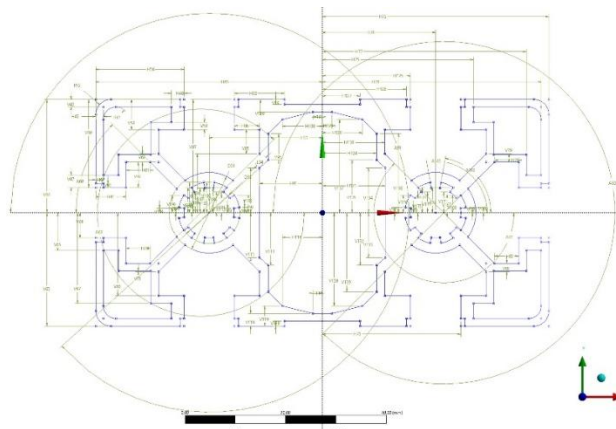
3 KONEČNO-PRVKOVÁ ANALÝZA

Na vykonanie konečno-prvkovej analýzy používame *FEM* program *Ansys 2024 R1* [17]. Keďže sa jedná o kontrolný výpočet bezpečnosti zostrojenej konštrukcie, zvolíme alternatívu tvorby modelu použitím nosníkových prvkov [11]. Zvolená metodika umožňuje rýchlu tvorbu komplexného modelu. V časti *Geometry* je potrebné vytvoriť prierezovú charakteristiku hliníkových profilov a následne jednotlivým nosníkovým elementom priradiť presne definovaný prierez (*cross section*). Vo výsledkoch je možné odčítať hodnoty pre *Beam Results: Axial force, Bending Moment, Torsional Moment, Shear Force*. Pre potreby týchto meraní je dôležitý maximálny ohybový moment (*Bending Moment*), z ktorého si následne vypočítame maximálne ohybové napätie σ_z pre profil $45 \times 45L$ (5) a σ_y pre profil $45 \times 90L$ (6). Na základe získaných hodnôt maximálneho ohybového napätia vieme určiť bezpečnosť kontrolovanej konštrukcie (7, 8).

3.1 Tvorba konečno-prvkového modelu v programe ANSYS

Geometriu nosníkového modelu konštrukcie realizujeme v *Design Modeler*. *Design Modeler* obsahuje *Cross Sections* základných najviac používaných profilov. Keďže sa jedná o špeciálny

tvar hliníkového profilu, ten zhotovíme podľa dokumentácie poskytnutej firmou [14]. Vytvorený *Cross Section* profilu $45 \times 90L$ je znázornený na obr. 6.



Obr. 6. Skica prierezu profilu $45 \times 90L$

Jednotlivým nosníkom priradíme prislúchajúce profily s presne definovanou orientáciou prierezu. Pre hliníkové profily je potrebné definovať špeciálny materiálový model, ktorého vlastnosti korešpondujú s materiálovými vlastnosťami udávanými výrobcom. Jedná sa o hliník v zložení *AlMgSi*. Tieto materiálové vlastnosti sú voľne dostupné spolu s katalógom profilov [14].

Na základe citlivostnej analýzy definujeme veľkosť konečno-prvkovej siete na 2,5 mm, kde celý model tvorí 5796 elementov a 11758 uzlových bodov. Rozmer elementu je postačujúci a zvyšovanie počtu elementov vyžaduje väčší výpočtový čas pri malej zmene hodnoty výsledkov.

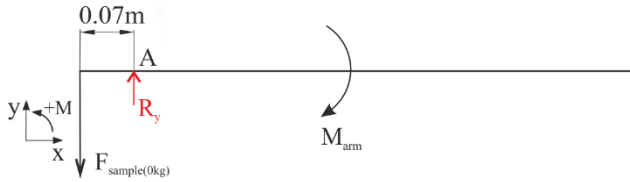
3.2 Okrajové podmienky

Keďže sa jedná o princíp pákového mechanizmu, veľkosť zaťaženia závisí od veľkosti hmotnosti zavesenej na páke. Na pravej dlhšej strane ramena III je zavesené závažie definovanej hmotnosti a na druhej kratšej strane v danom pomere pôsobí konštantná zaťažujúca sila. Otočné uloženie páky je klzné. Schematický model páky ramena je na obr. 1 [11].

Pri prevádzke zariadenia sme stanovili najmenšiu možnú bezpečnosť $k=2$ pre najkritickejšiu konštrukčnú časť. Na základe viacerých analýz a optimalizačných postupov sme stanovili maximálne povolené zaťaženie 3×12 kg. Každá časť ramena ako: skrutky, podložky, upínacie platne, profil a ďalšie komponenty majú svoju hmotnosť a tým pádom pôsobia určitou silou a adekvátnym momentom na nosník. Keď je nezaťažené rameno vo vodorovnej polohe, zistíme vo vzdialenosti 1 meter veľkosť sily. Jej nameraná hodnota je $F_{arm} = 8,29$ N. Výsledná veľkosť pôsobiaceho momentu od tejto sily na vzdialenosti 1 m je $M_{arm} = 8,29$ N·m (1):

$$M_{arm} = F_{arm} \cdot 1 = 8,29 \text{ N} \cdot 1 \text{ m} = 8,29 \text{ N} \cdot \text{m} . \quad (1)$$

Meraná vzorka je uchytená vo vzdialenosti 0,07 m na ľavej, kratšej strane ramena. V prípade, že na rameno nemáme žiadne závažie, samotné rameno pôsobí na vzorku silou $F_{(sample(0kg))} = 118,5 \text{ N}$ (2). V mieste uchytenia ramena k rámu A sa nachádza rotačný kĺb, ktorý odoberá dva stupne voľnosti. Všetky silové účinky sú v smere osi y (obr. 7) (R_y). Silový účinok v smere osi x je rovný nule.



Obr. 7. Určenie pôsobiacej sily čistého ramena bez závažia

$$\sum M_{Az} = 0 \rightarrow F_{(sample(0kg))} \cdot 0,07 - M_{arm} = 0,$$

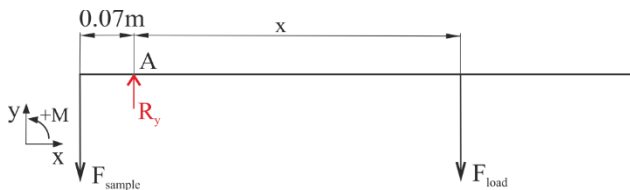
$$F_{(sample(0kg))} = \frac{M_{arm}}{0,07 \text{ m}} = \frac{8,29 \text{ N} \cdot \text{m}}{0,07 \text{ m}} = 118,5 \text{ N}, \quad (2)$$

kde F_{arm} je veľkosť nameranej sily [N] vo vzdialenosti 1 m,

M_{arm} je veľkosť momentu nezaťažného ramena [N·m],

$F_{(sample(0kg))}$ je veľkosť sily pôsobiacej na vzorku ramena bez záťaže [N].

V mieste závesného oka na rameno je umiestnená tyč, na ktorej je zavesené závažie (obr. 1). Hmotnosť zavesenej tyče je $m_{bar} = 2,46 \text{ kg}$. Výsledná hmotnosť $m_{load} = m_{bar} + m_{weight}$ je sčítaním hmotnosti závažia a tyče, na ktorej je závažie zavesené. Zaťažujúca sila je teda $F_{load} = m_{load} \cdot g$, kde gravitačné zrýchlenie $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (obr. 8). Z momentovej podmienky, rovnice (3), máme prídavnú silu od naloženého zaťaženia $F_{sample(ykg)}$. Výsledná sila pôsobiaca na vzorku je sčítaním sily od ramena pri nulovom zaťažení a sily od závažia a tyče, $F_{sample} = F_{(sample(0kg))} + F_{sample(ykg)}$.



Obr. 8. Výsledná aplikovaná sila

$$\sum M_{Az} = 0 \rightarrow F_{sample(ykg)} \cdot 0,07 \text{ m} - F_{load} \cdot x = 0,$$

$$F_{sample(ykg)} = \frac{F_{load} \cdot x}{0,07} \quad , \quad (3)$$

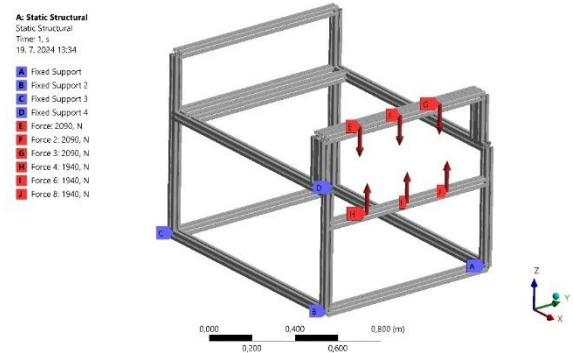
K dispozícii máme viac kusov závažia o hmotnosti 0,5 kg, 1 kg, 2 kg, 5 kg, 10 kg a ich kombináciu. Požadovanú silu pôsobiacu na vzorku F_{sample} vieme definovať závažím, ktoré je k dispozícii, a zmenou polohy závesnej tyče x na dlhšom ramene. Späťne použijeme opačný prepočet (4). Dĺžka ramena

je okolo 1 metra, preto je vhodné vzdialenosť umiestnenia závažia voliť v rozmedzí 0,80 m až 1 m.

$$F_{sample} = F_{sample(0kg)} + \frac{F_{load} \cdot x}{0,07}$$

$$x = \frac{F_{sample} - F_{sample(0kg)}}{(m_{bar} + m_{weight}) \cdot g} \quad , \quad (4)$$

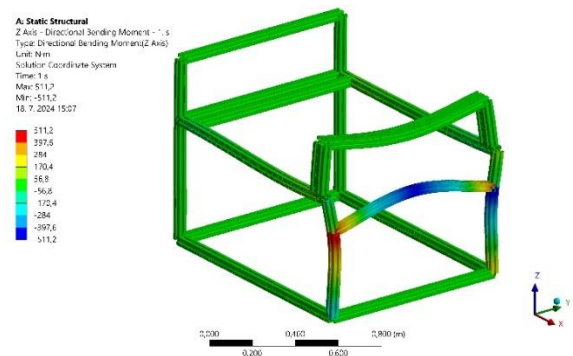
Pevnostný konečno-prvkový výpočet realizujeme pre hmotnosť závažia $3 \times 12 \text{ kg}$ na všetky tri ramená vo vzdialenosti $x = 0,9 \text{ m}$. Sila pôsobiaca v jednej vzorku je $F_{sample} = 1940 \text{ N}$. V mieste kontaktu konštrukcie so zemou sa nachádzajú kolieska, ktoré je možné zabrzdiť, takže v tejto časti odoberieme všetky stupne voľnosti.



Obr. 9. Okrajové podmienky

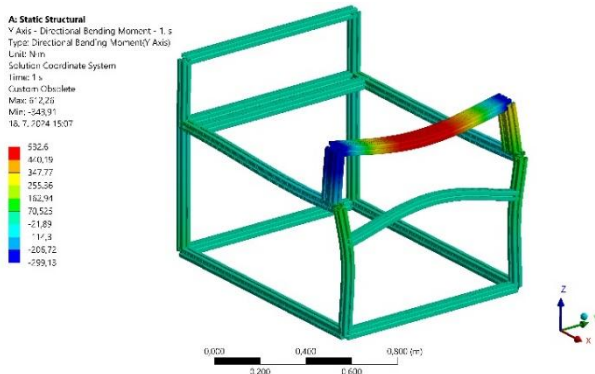
4 VÝSLEDKY FEM ANALÝZY

Zo statickej analýzy pre nosníkové elementy identifikujeme najviac namáhané časti zariadenia. Na spodný profil $45 \times 45L$ sú uchytené tri rotačné kĺby a vzorky namáhané na ťah. Orientácia profilu je nezmenená. Pre tento profil vyhodnocujeme ohybový moment k osi z (obr. 10). Na horný dvojprofil $45 \times 90L$ pôsobí celá naložená hmotnosť troch závaží a vyvinuté zaťaženie na ramená. Dvojprofil je rotovaný o 90° a jeho lokálny súradnicový je tiež pootočený o 90° . Zo statickej analýzy vyhodnocujeme ohybový moment k osi y (obr. 11).



Obr. 10. Ohybový moment k osi z

Keďže používame nosníkové prvky, veľkosť napätia nezískame priamo z konečno-prvkovej analýzy, ale vypočítaním z maximálneho ohybového momentu.



Obr. 11. Ohybový moment k osi z

Maximálny ohybový moment z pre profil $45 \times 45L$ je $M_{Oz} = 511,2 \text{ N}\cdot\text{m}$. Pre ohyb okolo lokálnej osi z je ohybové napätie $\sigma_{Oz} = 98,3 \text{ MPa}$:

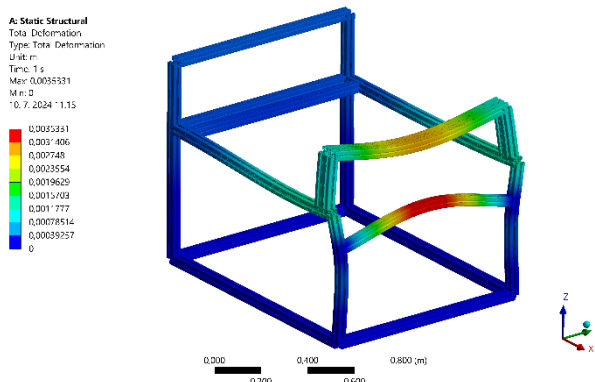
$$\sigma_{Oz} = \frac{M_{Oz}}{W_{Oz}} = \frac{445 \text{ Nm}}{0,0000052 \text{ m}^3} = 98,3 \text{ MPa}, \quad (5)$$

kde M_{Oz} je ohybový moment k osi z [N·m] (obr. 10), W_{Oz} je prierezový modul v ohybe vzhľadom na os z [m³] [15].

Maximálny ohybový moment v osi y pre dvojprofil $45 \times 90L$ je $M_{Oy} = 532,6 \text{ N}\cdot\text{m}$. Pre ohyb okolo lokálnej osi y je ohybové napätie $\sigma_{Oy} = 50,7 \text{ MPa}$:

$$\sigma_{Oy} = \frac{M_{Oy}}{W_{Oy}} = \frac{532,6 \text{ Nm}}{0,0000105 \text{ m}^3} = 50,7 \text{ MPa}, \quad (6)$$

kde M_{Oy} je ohybový moment k osi y [N·m] (obr. 16), W_{Oy} je prierezový modul v ohybe vzhľadom na os y [m³] [15].



Obr. 12. Maximálna deformácia pri zaťažení $3 \times 12 \text{ kg}$ na ramene $0,69 \text{ m}$

Z pohľadu pretvorenia konštrukčných prvkov sú najväčšie hodnoty deformácie na spodnom profile $45 \times 45L$, kde sú uchytané tri rotačné kĺby (obr. 12). Deformácia dosahuje maximálnu hodnotu $3,5 \text{ mm}$ v strede hliníkového profilu pre aplikované zaťaženie $3 \times 12 \text{ kg}$ zavesené na ramene $0,69 \text{ m}$ čo predstavuje veľkosť konštantne pôsobiacej sily vo vzorke $F_{sample} = 1940 \text{ N}$. Odčítavanie posunutia na vzorke je vykonávané bezkontaktným optickým extenzometrom, ktorý na pracovisku vyvíjame. Vzniknutá deformácia rámu nemá vplyv na presnosť

výsledkov experimentálneho merania. Po upnutí vzorky a aplikovaní zaťaženia sa celá sústava pred samotným meraním ustáli v rovnovážnej nulovej hladine. Následne na to spustíme samotný proces skúšky so súčasným zaznamenávaním posunutia.

Navrhnuté zariadenie chceme bezpečne používať, aby nedošlo k jeho trvalej deformácii, maximálne hodnoty napätí nesmú prekročiť medzi klzu materiálu, ktorá je pre materiál hliníkového profilu daná $R_{p0,2} = 195 \text{ MPa}$, medza pevnosti v ťahu $R_m = 245 \text{ MPa}$. Z analýzy ohybového napätia vyšlo, že $\sigma_{Oz} < R_{p0,2}$ a tiež $\sigma_{Oy} < R_{p0,2}$. Zvolené zaťaženie zariadenia je teda pod medzou klzu. Z hľadiska spoľahlivého používania zariadenia je vhodné určiť mieru bezpečnosti jednotlivých profilov. Pre profil $45 \times 45L$ je miera bezpečnosti:

$$k = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_{Oz}} = \frac{195 \text{ MPa}}{98,3 \text{ MPa}} = 2. \quad (7)$$

Pre dvojprofil $45 \times 90L$ je miera bezpečnosti:

$$k = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_{Oy}} = \frac{195 \text{ MPa}}{50,7 \text{ MPa}} = 3,8. \quad (8)$$

Z hľadiska bezpečnosti je zariadenie navrhnuté správne a miera bezpečnosti je postačujúca.

Maximálna hodnota sily, pri ktorej dôjde k porušeniu pri ťahovej skúške pre zvolený typ kompozitného materiálu je do 1300 N . Pri analýze sme uvažovali so zaťažením skúmanej vzorky $F_{sample} = 1940 \text{ N}$, a najnižšia povolená miera bezpečnosti je $k = 2$ pre profil $45 \times 45L$. Pri teste tečenia sa aplikuje nižšia hodnota zaťaženia a teda je zariadenie vhodne skonštruované a skúšky je možné vykonávať s dostatočnou bezpečnostnou rezervou. Ak by sa kolektív vedeckých pracovníkov rozhodol vykonávať skúšky tečenia pre pevnejšie materiály, napríklad iné kompozitné materiály vystužené vláknami rôznych typov, je možné ísť až do hodnoty zaťaženia $F_{sample} = 1940 \text{ N}$.

ZÁVER

Kompozitné materiály sa vyznačujú širokým rozptylom materiálových vlastností. Rotačné uchytanie ramena má zanedbateľný vplyv na vykonávaný experiment. Jedná z vlastností polymérov je absorpcia vzdušnej vlhkosti materiálu. Výraznejší vplyv na kompozitnú štruktúru majú aj podmienky tlačenia na 3D tlačiarňi.

Na základe výsledkov pevnostnej analýzy môžeme konštatovať, že navrhnuté zariadenie spĺňa všetky potrebné kritériá pre úspešné vykonávanie skúšok tečenia na kompozitných materiáloch a je vhodné aj pre ďalší výskum v oblasti tečenia iných typov materiálov, vrátane tých, ktoré sú vystužené vláknami. Zariadenie teda predstavuje efektívne a prispôsobiteľné riešenie, ktoré môže nájsť uplatnenie hlavne v akademických a výskumných

laboratóriách, kde môže prispieť k lepšiemu pochopeniu vlastností nových materiálov zaťažovaných dlhodobým rovnomerným konštantným zaťažením.

Význam tohto článku spočíva v poskytnutí nákladovo efektívneho, avšak funkčného a adaptovateľného špeciálneho zariadenia, ktoré umožňuje spoľahlivé vykonávanie skúšok tečenia. Týmto príspevkom sa otvárajú nové možnosti pre výskum a vývoj v oblasti materiálového inžinierstva v mieste pôsobenia výskumného tímu, najmä pokiaľ ide o skúmanie a testovanie nových kompozitných materiálov, ktoré sú nevyhnutné pre ďalší pokrok v rôznych priemyselných aplikáciách.

Z výsledkov analýzy vyplynulo, že zariadenie dokáže bezpečne vykonávať skúšky tečenia v rámci stanovených limitov a zároveň má dostatočnú rezervu bezpečnosti aj pre prípad, že by bolo potrebné testovať materiály s vyššou pevnosťou.

Pod'akovanie

Táto práca vznikla za podpory grantového projektu KEGA 002ŽU-4/2023 a VEGA 1/0423/23.

LITERATÚRA

- [1] PAPANICOLAOU, G. C. - ZAOUTSOS, S. P. (2019): *Viscoelastic constitutive modeling of creep and stress relaxation in polymers and polymer matrix composites*. Creep and Fatigue in Polymer Matrix Composites (Second Edition), Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Elsevier, pp. 3-59, ISBN 978-0-08-102601-4.
- [2] XIANG, Q. - XIAO, F. (2020): *Applications of epoxy materials in pavement engineering*. In: Construction and Building Materials, Elsevier, Vol. 235, ISSN 1879-0526.
- [3] RUDIN, A. - CHOI, P. (2023): *Mechanical Properties of Polymer Solids and Liquids*. The Elements of Polymer Science & Engineering (Third Edition), Elsevier, pp. 149-229, ISBN 978-0-12-382178-2.
- [4] HEARN, E. J. (1997): *Mechanics of Materials 2* (Third Edition), Chapter 11 - Fatigue, Creep and Fracture. Elsevier, pp. 443-508, ISBN 978-0-7506-3266-9.
- [5] CHEN, M. - LI, Y. - ZHANG, Y. - QI, M. - WU, N. (2023): *Recent advances in creep behaviors characterization for hydrate-bearing sediment*. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 2023, ISSN 1879-0690.
- [6] SCHOECHER, N. - SCHMACHTENBERG, E. (2021): *Calculating Thermally Induced Stresses Using a Nonlinear Viscoelastic Material Model*. Plastics Failure Analysis and Prevention, Elsevier, pp. 187-192, ISBN 978-1-884207-92-1.

[7] MAJCHER, A. - WEGLOWSKI, B. - OCLON, P. (2014): *Multi-Function Device for Creep Testing at Elevated Temperature*. In: Advanced Materials Research, Vols. 875-877, pp 462-466, ISSN print 1022-6680.

[8] SKELTON, R. P. (2003): *Creep-Fatigue Interactions (Crack Initiation)*. Comprehensive Structural Integrity, Elsevier Science, 2003, pp. 241-271, ISBN 978-0-08-043749-1,

[9] NORMAN, E. DOWLING (2013): *Mechanical Behavior of Materials, Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*, Pearson Education Limited, ISBN 10: 0-273-76455-1, ISBN 13: 978-0-273-76455-7

[10] ZHANG, S. - NAKANO, H. - XIONG, Y. - NISHIMURA, T. - ZHANG, F. (2010): *Temperature-controlled triaxial compression/creep test device for thermodynamic properties of soft sedimentary rock and corresponding theoretical prediction*. In: Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Elsevier, Vol. 2, Issue 3, pp. 255-261, ISSN 1674-7755.

[11] JAKUBOVIČOVÁ, L. - VAŠKO, M. - PIROH, O. - SYNÁK, F. (2024): *Simplified FEM Model of the Aluminum Bosch Rexroth Profile*. In: 25th International Scientific Conference, Applied Mechanics, book of articles, 252 pages, ISBN 978-80-554-2090-5.

[12] *Basic mechanic elements, Rexroth a Bosch Company*, available from: https://store.boschrexroth.com/Assembly-Technology/Basic-mechanic-elements?cclcl=en_GB

[13] RAMÍREZ-REVILLA, S. - CAMACHO-VALENCIA, D. - GILMAR GONZALES-CONDORI, E. G. - MÁRQUEZ G. (2023): *Evaluation and comparison of the degradability and compressive and tensile properties of 3D printing polymeric materials PLA, PETG, PC, and ASA*. In: MRS Communications, Vol. 13, Issue 1

[14] MTS (2019): *Aluminium profiles Bosch Rexroth*. [online]. 2019. available from: <https://www.mts.sk/wp-content/uploads/2019/04/prislusenstvo.pdf>

[15] MTS (2019): *Aluminium profiles Bosch Rexroth, connecting elements*. [online]. 2019. available from: <https://www.mts.sk/wp-content/uploads/2019/04/spojovacie-prvky-1.pdf>

[16] MTS (2019): *Aluminium profiles Bosch Rexroth, Accessories*. [online]. available from: <https://www.mts.sk/wp-content/uploads/2019/04/prislusenstvo.pdf>

[17] CHEN, X., - LIU, Y. (2015): *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. Boca Raton: CRC Press, 389 s. ISBN 13: 978-1-4398-7385-4.