



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE  
Strojnícka  
fakulta

---

## AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

---

Žilina, 2025

Ing. Damián Čechmánek



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE  
Strojnícka  
fakulta

---

Ing. Damián Čechmánek

## **AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE**

**VÝSKUM V OBLASTI VISKOELASTICKÉHO A VISKOPLASTICKÉHO SPRÁVANIA SA  
KOMPOZITNÝCH MATERIÁLOV PRE AUTOMOBILOVÝ PRIEMYSEL**

Na získanie akademického titulu **doktor**  
(„**philosophiae doctor**“, v skratke „**PhD.**“)  
v študijnom odbore Strojárstvo  
v študijnom programe Časti a mechanizmy strojov

Žilina 2025

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia (01.09.2022 – 20.08.2025) na Žilinskej univerzite v Žiline, Strojníckej fakulte, Katedre konštruovania a častí strojov.

Predkladateľ: **Ing. Damián Čechmánek**  
Žilinská univerzita v Žiline  
Strojnícka fakulta  
Katedra konštruovania a častí strojov

Školiteľ: **doc. Ing. Róbert Kohár, PhD.**  
Žilinská univerzita v Žiline  
Strojnícka fakulta  
Katedra konštruovania a častí strojov

Oponenti:

1. **prof. Ing. Marián Dzimko, PhD.**  
Žilinská univerzita v Žiline  
Strojnícka fakulta  
Katedra konštruovania a častí strojov  
Univerzitná 8215, 010 26 Žilina
2. **Ing. Ján Lábaj, PhD.**  
Contal OK spol. s.r.o.  
Fraňa Mráza 289/2, 010 24 Žilina
3. **Ing. Milan Šoška, PhD.**  
Transmisie Engineering a.s.  
Pavla Mudroňa 10, 036 01 Martin

Autoreferát bol rozoslaný dňa: .....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 20.08.2025 o 8:30 hod. v miestnosti BD004 na SjF, Univerzitná 8215/1, 010 26, Žilina, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou odborovou komisiou v študijnom odbore Strojárstvo, v študijnom programe Časti a mechanizmy strojov, vymenovanou dekanom Strojníckej fakulty, Žilinskej univerzity v Žiline.

S dizertačnou prácou je možné sa oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu SjF, UNIZA, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

prof. Ing. Slavomír Hrček, PhD.  
predseda komisie pre obhajobu dizertačnej práce

## OBSAH

ÚVOD.....	5
STRUČNÝ PREHĽAD PROBLEMATIKY.....	5
CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE .....	6
METODIKA EXPERIMENTOV .....	6
VÝSLEDKY .....	11
ZÁVER.....	30
PRÍNOSY PRE ĎALŠÍ ROZVOJ VEDY A PRAX.....	31
RESUMÉ.....	32
ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI .....	33
LITERATÚRA.....	34

## ÚVOD

Použitie materiálov v rôznych odvetviach priemyslu je v súčasnej dobe veľmi rozmanité. Na trhu existuje veľké množstvo materiálov. Trendom v tejto dobe je takisto aj nahrádzanie konvenčných materiálov súčasnými.

Kompozitné materiály ako také nie sú novinkou na trhu a v súčasnosti sú veľmi často používané. Kompozity sú materiály zložené z dvoch alebo viacerých chemicky rozdielnych elementov alebo fáz, ktoré disponujú tiež rozdielnymi fyzikálnymi vlastnosťami. Uplatnili sa v mnohých odvetviach, najviac však v leteckom a automobilovom priemysle. To predovšetkým vďaka kombinácii ich vlastností, ako napríklad vysoká pevnosť a tuhosť, rezistencia voči mrazu, odolnosť voči korózii a nízka hmotnosť.

Automobilový priemysel je komplexné odvetvie, ktoré má vplyv na strojársku, elektrotechnickú, chemickú výrobu a pod. Patrí medzi jedno z najdynamickejších sa rozvíjajúcich priemyselných odvetví. Použitie kompozitných materiálov v automobilovom priemysle je motivované faktormi, medzi ktoré patria napr. dizajn, výkon, spotreba pohonných hmôt, odolnosť voči korózii, finančne nenáročná prevádzka, sprísnenie ekologických noriem, bezpečnosť atď. Najčastejšie sú uplatňované termoplasty vystužené sklenenými vláknami alebo v špeciálnych prípadoch sú použité uhlíkové vlákna. Pre splnenie ekologických noriem boli vyvinuté aj rôzne druhy biokompozitov, ktoré obsahujú bambus, kokosové vlákna či bavlnu.

Vzhľadom na široké uplatnenie kompozitných materiálov v praxi je potrebné vedieť predpovedať a následne naplno využiť ich vlastnosti. S cieľom zistiť tieto vlastnosti a správanie kompozitných materiálov bývajú podrobené rôznym skúškam. Avšak táto metóda je časovo a finančne náročná. Preto boli vyvinuté softvéry, ktorých úlohou je virtuálne testovanie kompozitov a získanie potrebných vlastností a charakteristík. Základom pre simuláciu fyzických, mechanických, termomechanických, tepelných, elektrických a iných charakteristík skúmaného viacprvkového materiálu je znalosť správania sa jednotlivých fáz.

## STRUČNÝ PREHĽAD PROBLEMATIKY

Kompozitné materiály na báze polymérov zohrávajú čoraz významnejšiu úlohu v automobilovom priemysle, predovšetkým vďaka ich priaznivému pomeru medzi pevnosťou a hmotnosťou, možnosti optimalizácie vlastností a jednoduchej spracovateľnosti. [1, 2, 3, 4] Správanie týchto materiálov je však často ovplyvnené zložitými viskoelastickými a viskoplastickými mechanizmami, ktoré sa prejavujú najmä pri dlhodobom alebo cyklickom zaťažení. Presné pochopenie a numerické popísanie tohto správania je kľúčové pre ich efektívne a bezpečné nasadenie v konštrukčných aplikáciách. [5,6,7]

V kontexte automobilového priemyslu, kde sa požaduje vysoká spoľahlivosť aj pri znížení hmotnosti konštrukčných dielov, je nevyhnutné vyvíjať a validovať pokročilé materiálové modely. Tie musia zohľadňovať časovo závislé vlastnosti matric aj vystužujúcich zložiek. V tomto výskume sa rieši problematika modelovania mechanického správania kompozitných materiálov s dôrazom na ich viskoelastické a viskoplastické vlastnosti, s cieľom ich presnej simulácie v rámci MKP analýz reálnych komponentov. [8,9]

## CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Hlavným cieľom dizertačnej práce je návrh metodiky pre modelovanie kompozitných materiálov s uvažovaním viskoelastického a viskoplastického správania sa kompozitov. Pre dosiahnutie tohto cieľa boli vytýčené nasledovné čiastkové ciele:

- Zistenie viskoelastických a viskoplastických parametrov základných zložiek kompozitného materiálu.
- Modelovanie kompozitného materiálu s viskoelastickým a viskoplastickým správaním za účelom zistenia materiálových charakteristík pre MKP výpočet.
- Experimentálne overenie.
- Aplikácia materiálových charakteristík pre vybrané konštrukčné uzly.

Dizertačná práca bola vypracovaná v rámci projektu č. 045ŽU- 4/2021.

Autor ďakuje za podporu programu ERASMUS+ Traineeship UNIZA.

## METODIKA EXPERIMENTOV

Experimentálna časť dizertačnej práce sa zameriava na výskum v oblasti viskoelastického a viskoplastického správania sa kompozitných materiálov používaných v automobilovom priemysle.

### Vzorky pre mechanické skúšky

Výskum bol realizovaný na dvoch typoch vzoriek. Prvá skupina boli konvenčne používané materiály v priemysle, a to polyamid 6 a polyamid 6 plnený sklenenými vláknami, obr. 1. Druhú skupinu tvorili vzorky zhotovené odlievaním do vlastnoručne vyrobenej silikónovej formy, obr. 2, a to PRC 1810 a jeho varianty plnené sklenenými (PRC 1810 GF30) a uhlíkovými vláknami (PRC 1810 CF20), obr. 3.



Obr. 1 – Polyamid 6 (šedý) a polyamid 6 plnený skleneným vláknom (čierny)



Obr. 2 – Silikónová forma pre výrobu vzoriek



Obr. 3 – Vzorky vlastnej výroby PRC 1810, PRC 1810 GF30, PRC 1810 CF20

## Skúška ťahom

Jednoosové ťahové skúšky boli realizované na elektromechanickom skúšobnom prístroji LabTest 5.20ST podľa postupu definovaného normou STN EN ISO 527 s rýchlosťou posunu pričnicka 2mm/min. Zariadenie na ťahové skúšky a príslušné skúšobné usporiadanie sú zobrazené na obr. 4. Údaje o mechanickej pevnosti získané pri kvázi statickom zaťažení charakterizujú deformačné správanie skúšanej vzorky pri krátkodobom zaťažení. Skúšky boli realizované pri teplote 23 °C a relatívnej vlhkosti 50 %, pretože tieto faktory ovplyvňujú mechanické vlastnosti materiálov.



Obr. 4 – Zariadenie používané pre ťahové skúšky

## SEM a EDS analýza

Metodika analýzy plastových vzoriek využívajúca skenovaciu elektrónovú mikroskopiu (z ang. SEM – Scanning Electron Microscopy) a spektroskopiú röntgenového žiarenia (z ang. EDS – Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy) je orientovaná na získanie podrobných informácií o morfológii, chemickom zložení a štruktúre plastových materiálov. SEM umožňuje vysoké rozlíšenie pri analýze povrchových vlastností vzorky, zatiaľ čo EDS poskytuje detailné údaje o chemickom zložení na mikroúrovni. Na obr. 5 je znázornený skenovací elektrónový mikroskop, na ktorom bola vykonávaná SEM analýza a tiež EDS analýza skúmaných vzoriek.



Obr. 5 – Skenovací elektrónový mikroskop ZEISS SUPRA 25

## **Analýza parametrov skúmaného materiálu**

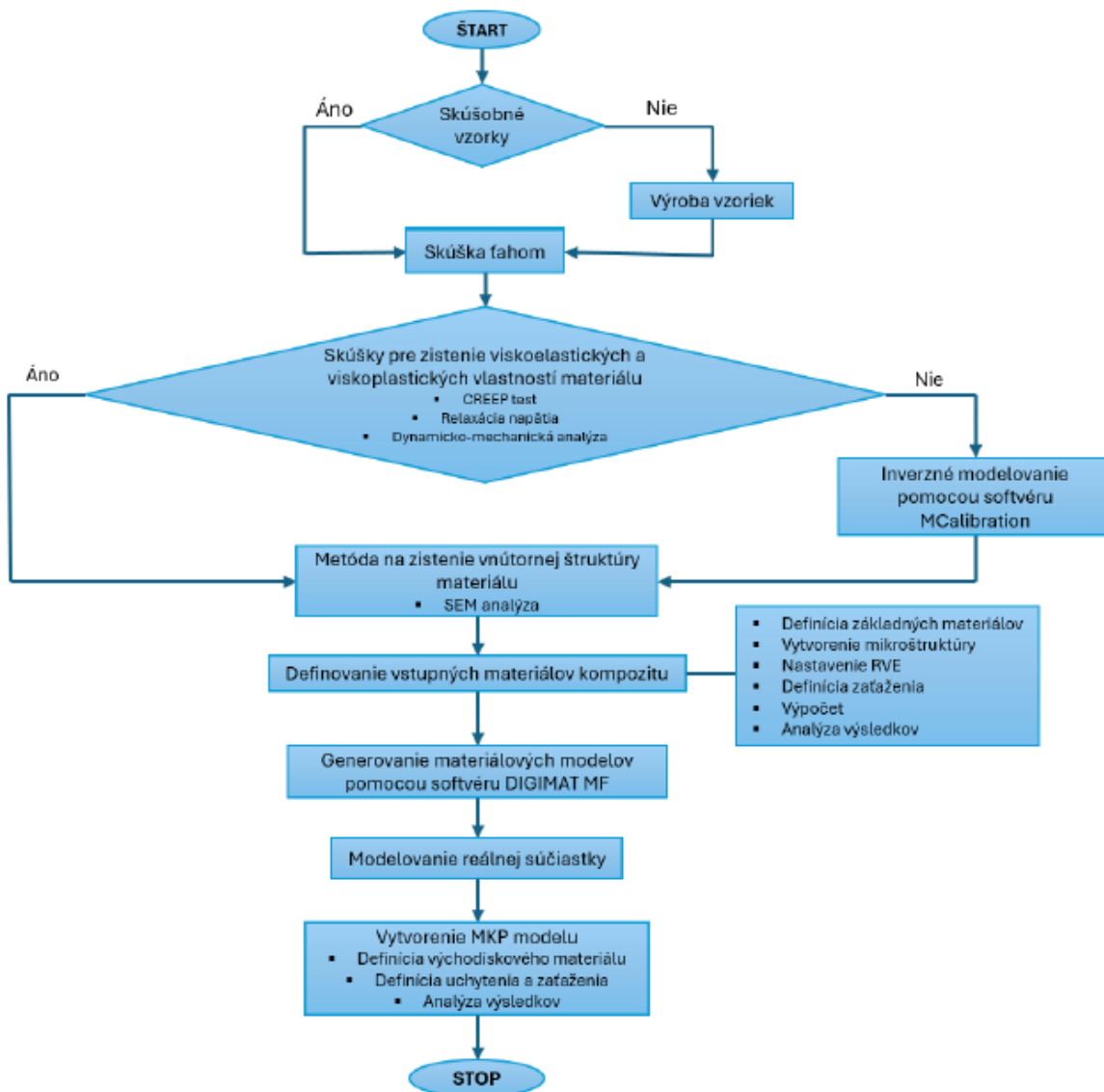
Softvér MCalibration predstavuje pokročilý nástroj na identifikáciu a kalibráciu parametrov konštitutívnych modelov materiálov používaných vo výpočtovej mechanike. Jeho hlavnou úlohou je prispôbiť model materiálu experimentálnym dátam, čím umožňuje presnejšie numerické simulácie správania sa materiálov v rôznych zaťažovacích podmienkach.

V rámci práce bol softvér MCalibration použitý na spätnú kalibráciu materiálového modelu vybraného kompozitného materiálu na základe výsledkov mechanických skúšok. Kalibrácia bola vykonaná na základe experimentálnych údajov získaných z ťahových skúšok, pričom cieľom bolo získať presné hodnoty materiálových parametrov, ktoré sú nevyhnutné pre následné numerické modelovanie správania sa materiálu v prostredí konečno-prvkovej analýzy (FEA).

Modelovanie viskoelastických a viskoplastických vlastností plastových kompozitných materiálov využívaných v automobilovom priemysle prostredníctvom softvéru Digimat predstavuje zložitý a viacstupňový proces, ktorý zahŕňa niekoľko kľúčových krokov na určenie materiálových parametrov a vývoj modelov schopných presne simulovať správanie týchto materiálov pri rôznych typoch mechanického zaťaženia. Tento proces sa skladá z niekoľkých fáz, vrátane získavania experimentálnych dát, definovania vhodných materiálových modelov, implementácie týchto modelov do softvéru Digimat a následného vykonávania simulačných analýz.

## **Návrh metodiky modelovania kompozitných materiálov**

Cieľom vytvorenej metodiky je zabezpečiť presné a spoľahlivé modelovanie správania sa moderných polymérnych a kompozitných materiálov pri rôznych mechanických zaťaženiach. Vzhľadom na komplexný charakter viskoelastického a viskoplastického správania, najmä pri vystužených systémoch, je nevyhnutné spojiť experimentálne poznatky s pokročilými numerickými prístupmi. Takýto integrovaný prístup umožňuje efektívnu identifikáciu materiálových parametrov, tvorbu realistických materiálových modelov a ich validáciu, čím sa vytvára základ pre presné predikcie správania v inžinierskych aplikáciách. Nasledujúci vývojový diagram sumarizuje jednotlivé kroky tohto procesu, obr. 6.



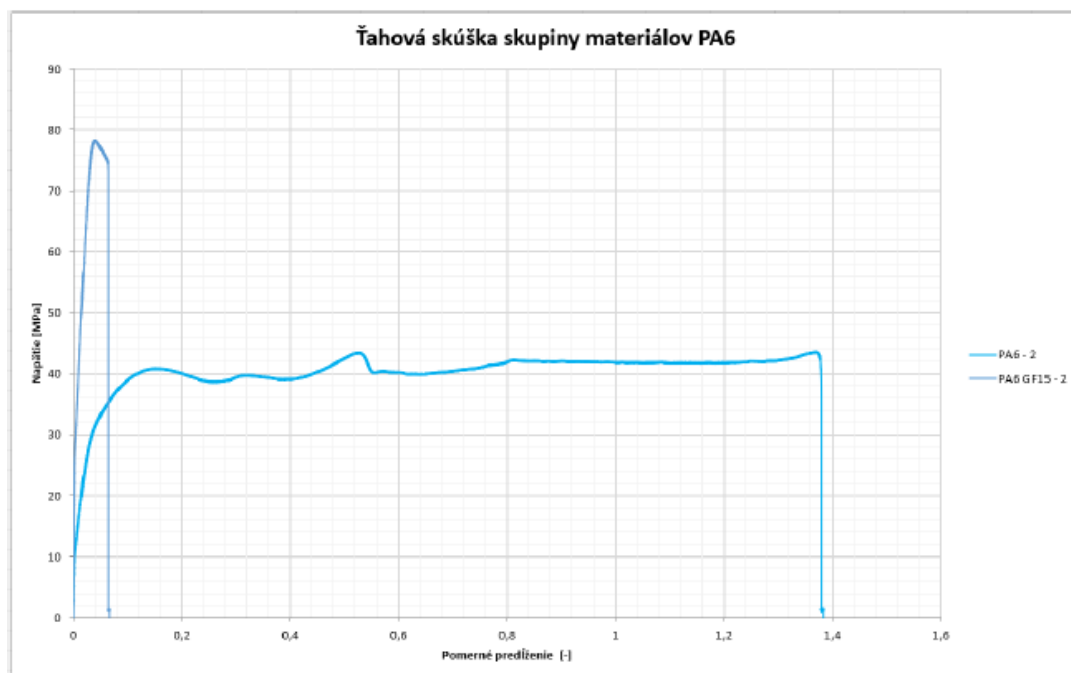
Obr. 6 – Návrh metodiky modelovania kompozitných materiálov

## VÝSLEDKY

### Skúška ťahom

Mechanické správanie analyzovaných materiálov bolo posúdené prostredníctvom experimentálnych ťahových skúšok realizovaných na vzorkách z polyamidu 6 (PA6), polyamidu 6 vystuženého 15% hmotnostným podielom sklenených vlákien (PA6 GF15) a vzorkách vlastnej produkcie PRC 1810, PRC 1810 GF30 a PRC 1810 CF20. Primárnym cieľom týchto skúšok bolo získanie základných poznatkov o odozve materiálov pri zaťažení ťahom a stanovenie rozhodujúcich parametrov, akými sú napätie v závislosti od deformácie, modul pružnosti a pevnosť v ťahu. Experimentálne zistenia boli ďalej využité ako vstupné údaje pre následné numerické modelovanie a simulácie správania materiálu.

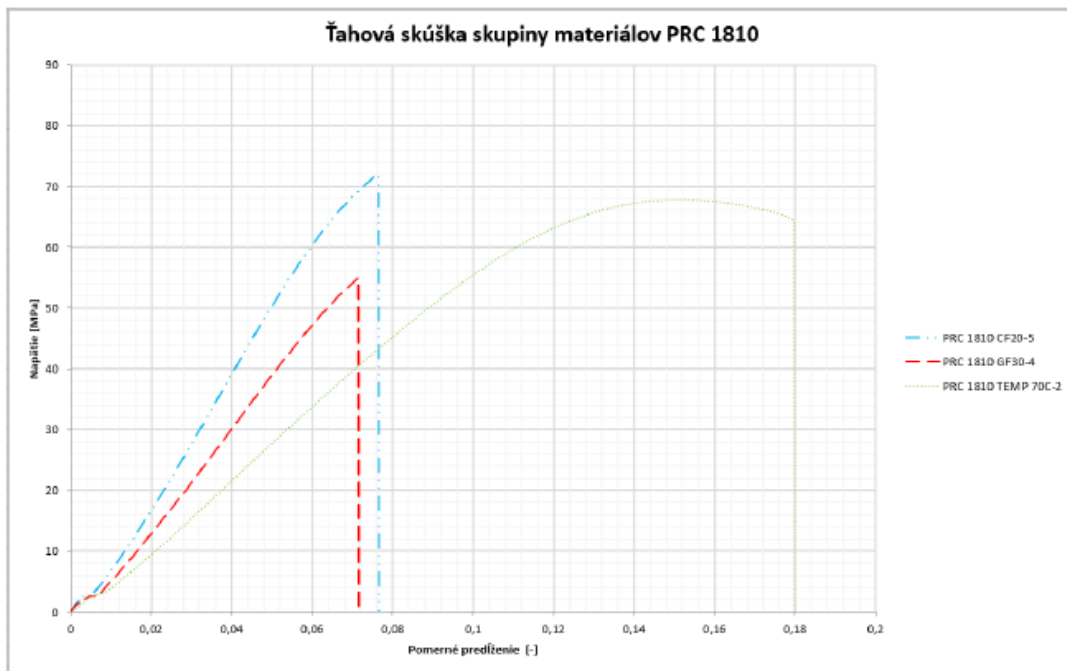
Ťahové skúšky preukázali výrazné rozdiely v mechanickej odozve medzi čistým polyamidom 6 (PA6) a kompozitom PA6 vystuženým 15% sklenených vlákien (PA6 GF15). Na základe experimentálne získaných dát boli vytvorené závislosti napätia od deformácie, ktoré reflektujú špecifické mechanické správanie jednotlivých materiálov. Celkovo bolo možné pozorovať, že prídavok výstuží viedol k výraznému ovplyvneniu mechanických vlastností. Porovnanie správania materiálov PA6 a PA6 GF15 je znázornené na obr. 7.



Obr. 7 – Ťahová skúška skupiny materiálov PA6

Ťahové skúšky realizované na vzorkách materiálov PRC 1810 a jeho kompozitných variantoch (PRC 1810 GF30 a PRC 1810 CF20) odhalili rozdiely v mechanickej odozve v závislosti od typu výstuže a jej obsahu.

Celkovo bolo možné pozorovať, že prídavok výstuží viedol k výraznému ovplyvneniu mechanických vlastností, pričom bol zaznamenaný kompromis medzi zvýšenou pevnosťou a obmedzenou ťažnosťou materiálu, obr. 8. Tieto výsledky sú kľúčové pre ďalšie numerické simulácie a tvorbu presných materiálových modelov.

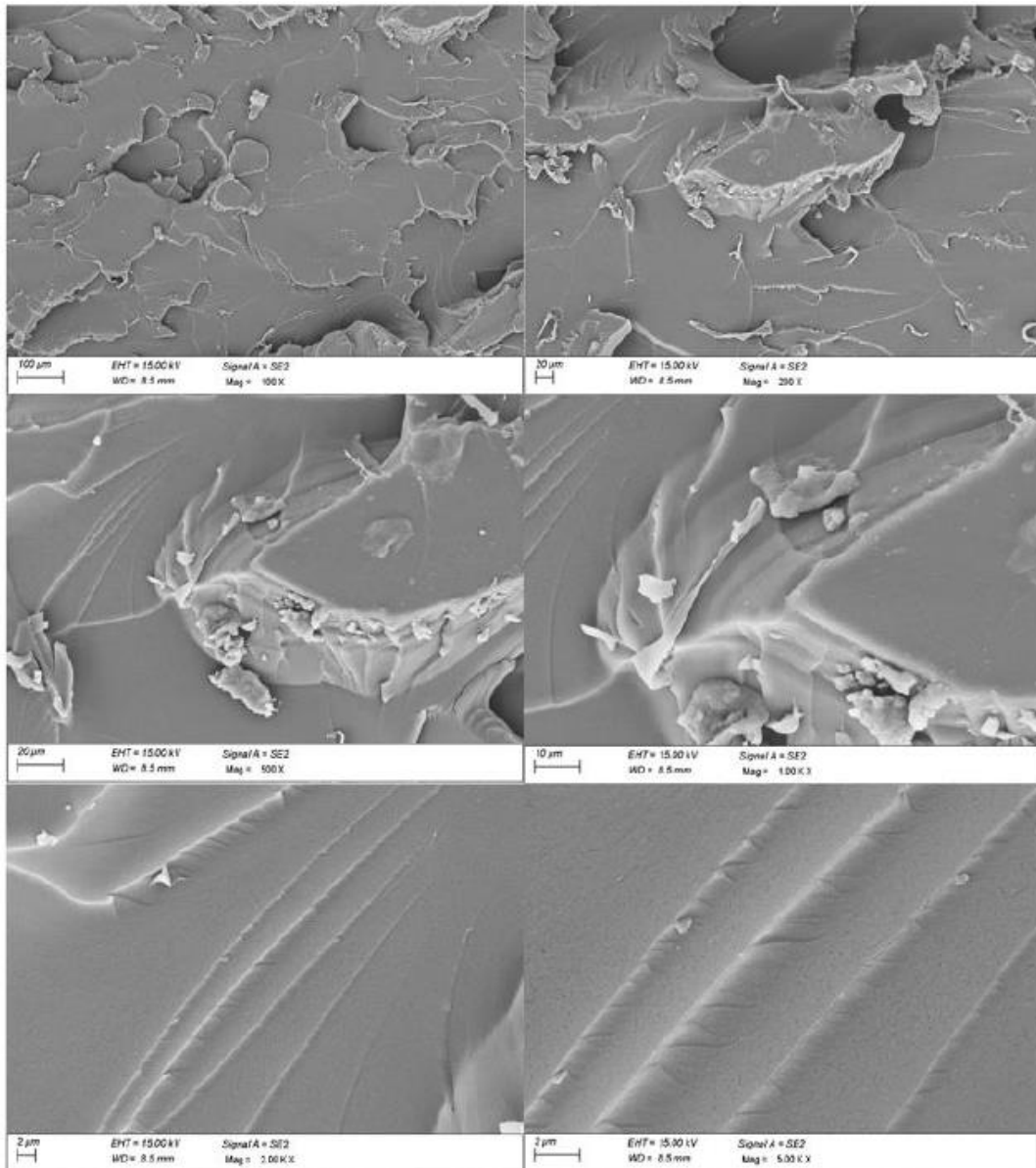


Obr. 8 – Ťahová skúška skupiny materiálov PRC 1810

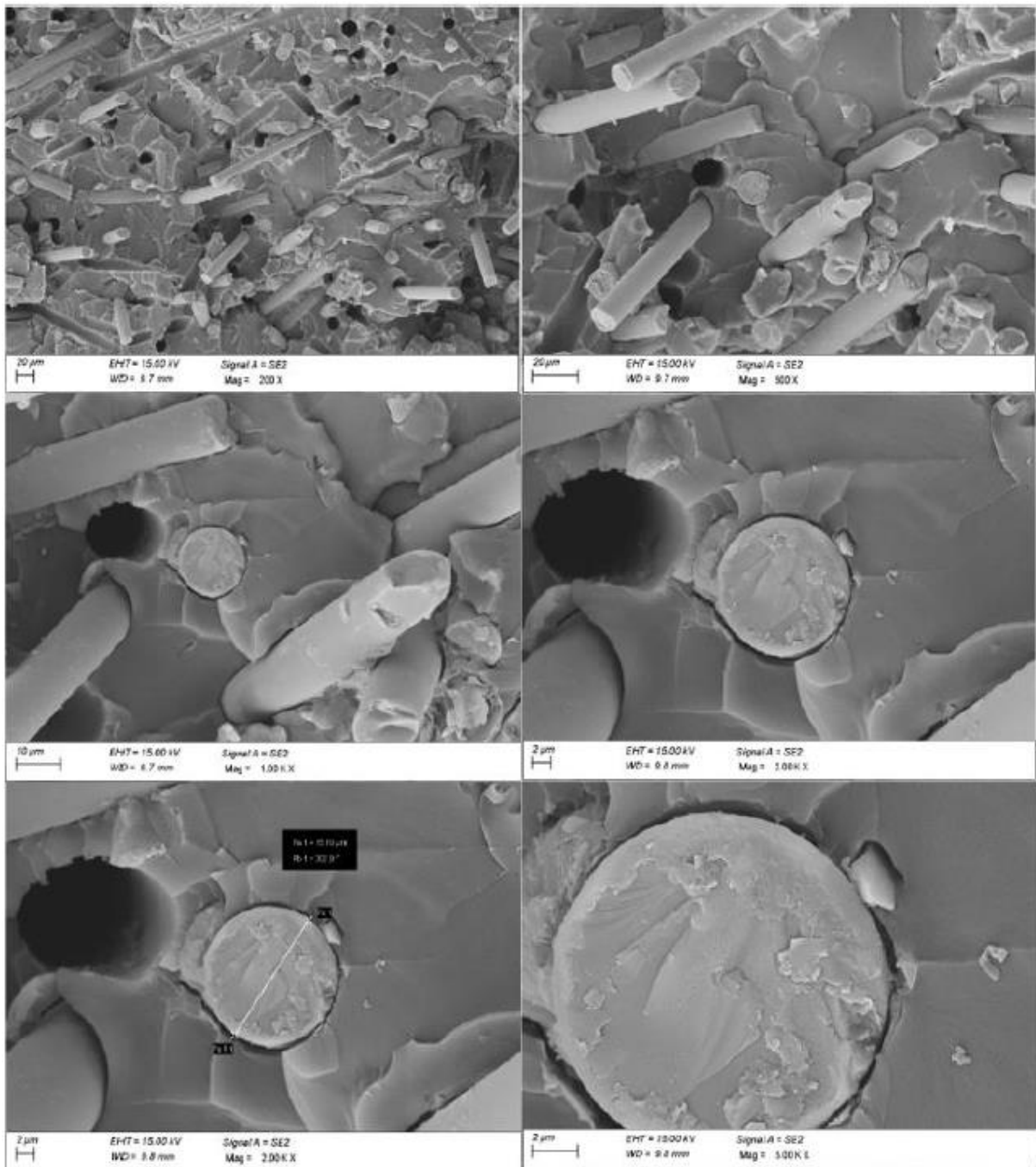
### SEM/EDS analýza

V rámci experimentálnej časti boli realizované analýzy mikroštruktúry a chemického zloženia vzoriek pomocou skenovacej elektrónovej mikroskopie (SEM) v kombinácii s energeticko-disperznou spektroskopiou (EDS). Skúmané boli vzorky základného materiálu (PRC 1810) a jeho variantov plnených sklenenými (PRC 1810 GF30) a uhlíkovými vláknami (PRC 1810 CF20).

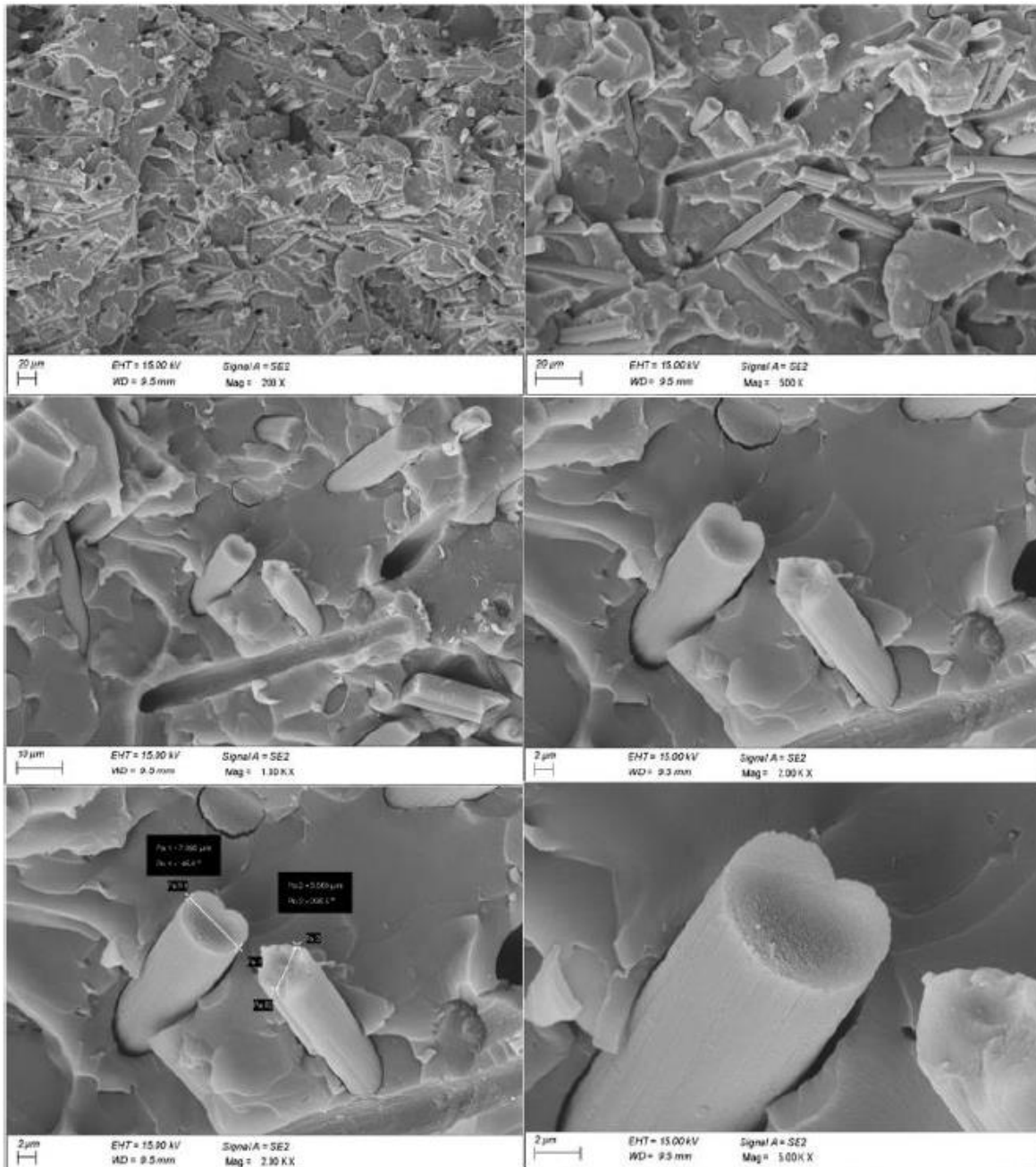
Cieľom mikroštruktúrálnej analýzy bolo charakterizovať morfológiu materiálov, predovšetkým rozloženie, tvar a veľkosť prítomných inklúzií a výstužných častíc. Získané SEM snímky, obr. 9, obr. 10, obr. 11, odhalili homogénne rozloženie častíc v matrici, pričom bol osobitne analyzovaný priemer jednotlivých výstužných inklúzií. Tieto údaje boli následne kvantifikované a slúžili ako podklad pre realistické nastavenie mikroštruktúry v numerických modeloch materiálu.



Obr. 9 – Mikroštruktúra materiálu PRC 1810



Obr. 10 – Mikroštruktúra materiálu PRC 1810 GF30



Obr. 11 – Mikroštruktúra materiálu PRC 1810 CF20

EDS analýza bola využitá na overenie chemického zloženia jednotlivých zložiek kompozitov. Spektrálne mapovanie umožnilo identifikáciu hlavných prvkov tvoriacich maticu a výstužné fázy, čím sa doplnili informácie potrebné pre presné určenie materiálových vlastností, obr. 12, obr. 13, obr. 14.

PRC 1810

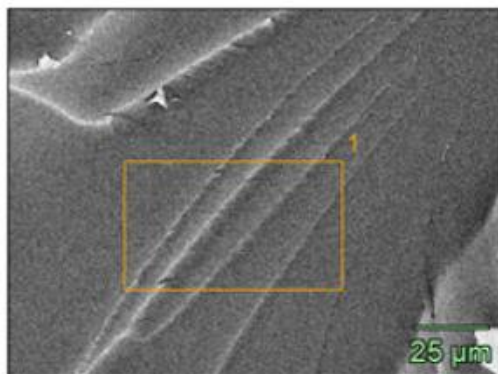
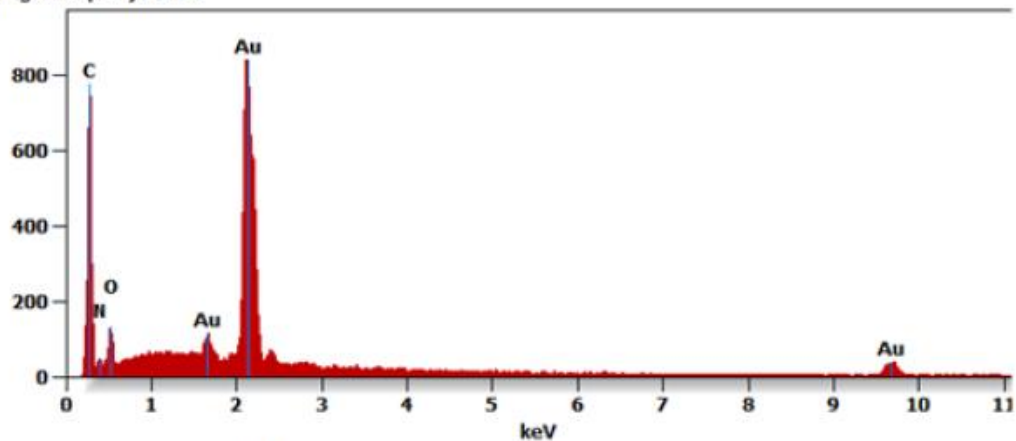


Image Name:	PRC 1810
Image Resolution:	512 by 384
Image Pixel Size:	0.32 μm
Acc. Voltage:	15.0 kV
Magnification:	2000
Detector:	EDS1

Počty na celej stupnici: 844

Integrálne počty: 40785



Hmotnostný percentuálny podiel %

	C	N	O	Au
PRC 1810	23.6	8.5	10.4	57.4

Atómový percentuálny podiel %

	C	N	O	Au
PRC 1810	55.9	17.3	18.5	8.3

Obr. 12 – EDS analýza materiálu PRC 1810

**PRC 1810 GF30**

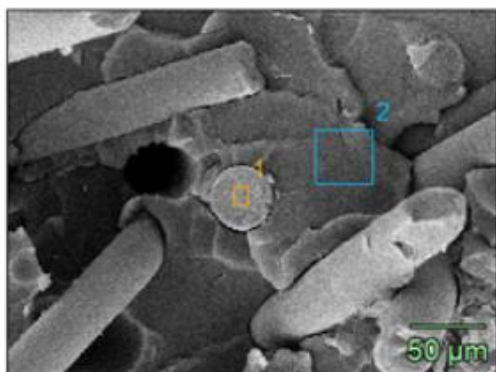
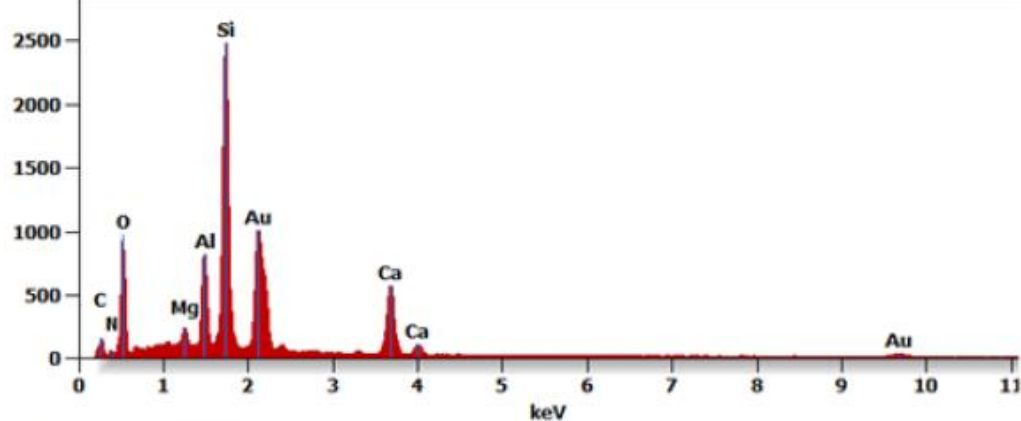


Image Name: PRC 1810 GF30  
 Image Resolution: 512 by 384  
 Image Pixel Size: 0.65 μm  
 Acc. Voltage: 15.0 kV  
 Magnification: 1000  
 Detector: EDS1

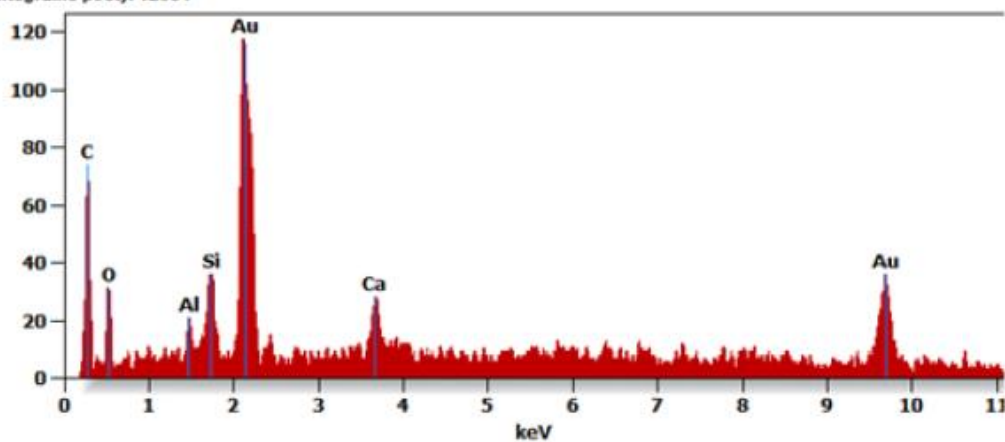
Počty na celej stupnici: 2486  
 Integrálne počty: 90596

**Sklenené vlákno (1)**



Počty na celej stupnici: 118  
 Integrálne počty: 12084

**PRC 1810 (2)**



Hmotnostný percentuálny podiel %

	C	N	O	Mg	Al	Si	Ca	Au
Sklenené vlákno	3.6	1.2	24.0	0.9	5.4	19.8	11.3	33.6
PRC 1810	18.2		8.6		1.4	4.7	5.4	61.6

Atómový percentuálny podiel %

	C	N	O	Mg	Al	Si	Ca	Au
Sklenené vlákno	9.1	2.7	45.7	1.2	6.1	21.4	8.6	5.2
PRC 1810	55.7		19.8		2.0	6.1	5.0	11.5

Obr. 13 - EDS analýza materiálu PRC 1810 GF30

**PRC 1810 CF20**

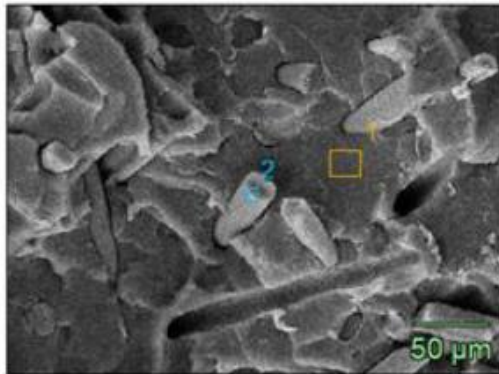
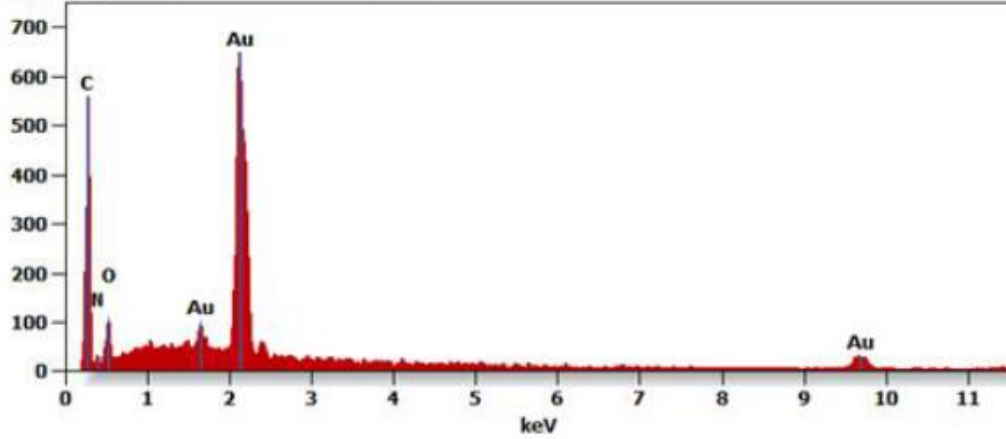


Image Name: PRC 1810 CF20  
 Image Resolution: 512 by 384  
 Image Pixel Size: 0.65 μm  
 Acc. Voltage: 15.0 kV  
 Magnification: 1000  
 Detector: EDS1

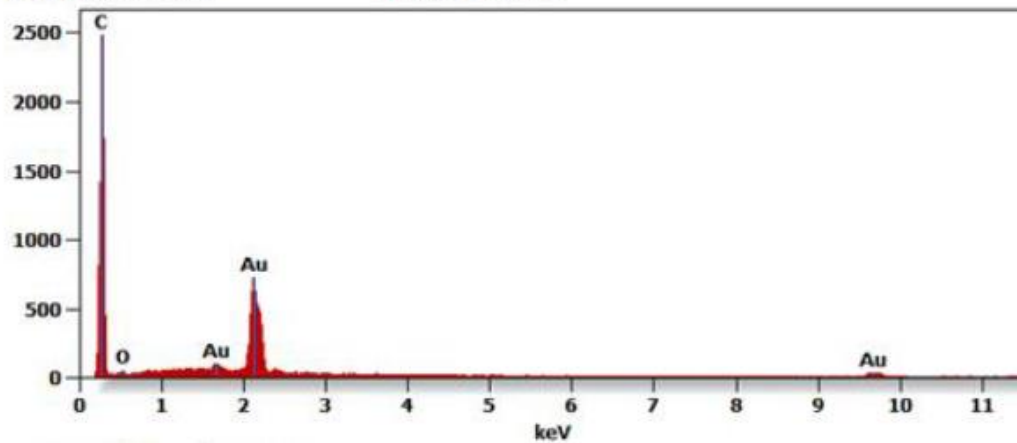
Počty na celej stupnici: 651  
 Integračné počty: 32263

**PRC 1810**



Počty na celej stupnici: 2487  
 Integračné počty: 44236

**Uhlíkové vlákno**



Hmotnostný percentuálny podiel %

	<i>C</i>	<i>N</i>	<i>O</i>	<i>Au</i>
PRC 1810	23.1	7.5	11.2	58.1
Uhlíkové vlákno	54.7		1.4	43.9

Atómový percentuálny podiel %

	<i>C</i>	<i>N</i>	<i>O</i>	<i>Au</i>
PRC 1810	55.6	15.6	20.3	8.5
Uhlíkové vlákno	93.6		1.8	4.6

Obr. 14 - EDS analýza materiálu PRC 1810 CF20

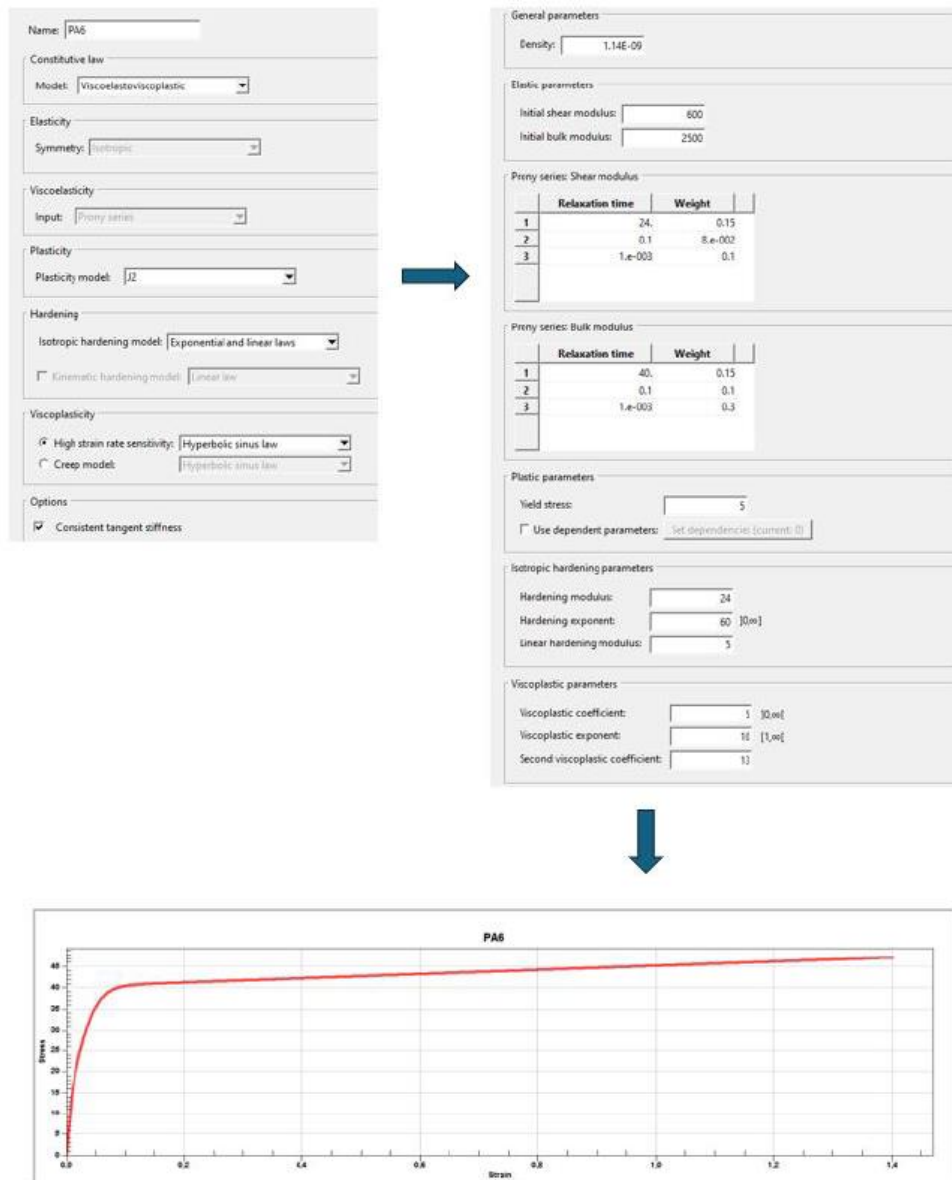
## Tvorba virtuálnych modelov materiálov

Cieľom je prepojiť výsledky materiálových analýz s numerickým modelovaním, ktoré umožňujú simulovať správanie kompozitov. Kapitola sa zameriava na postup výberu vstupných parametrov a metodiku tvorby modelov s cieľom zabezpečiť čo najvernejšie zastúpenie reálnych materiálových vlastností v numerickom prostredí.

- **Materiál PA6**

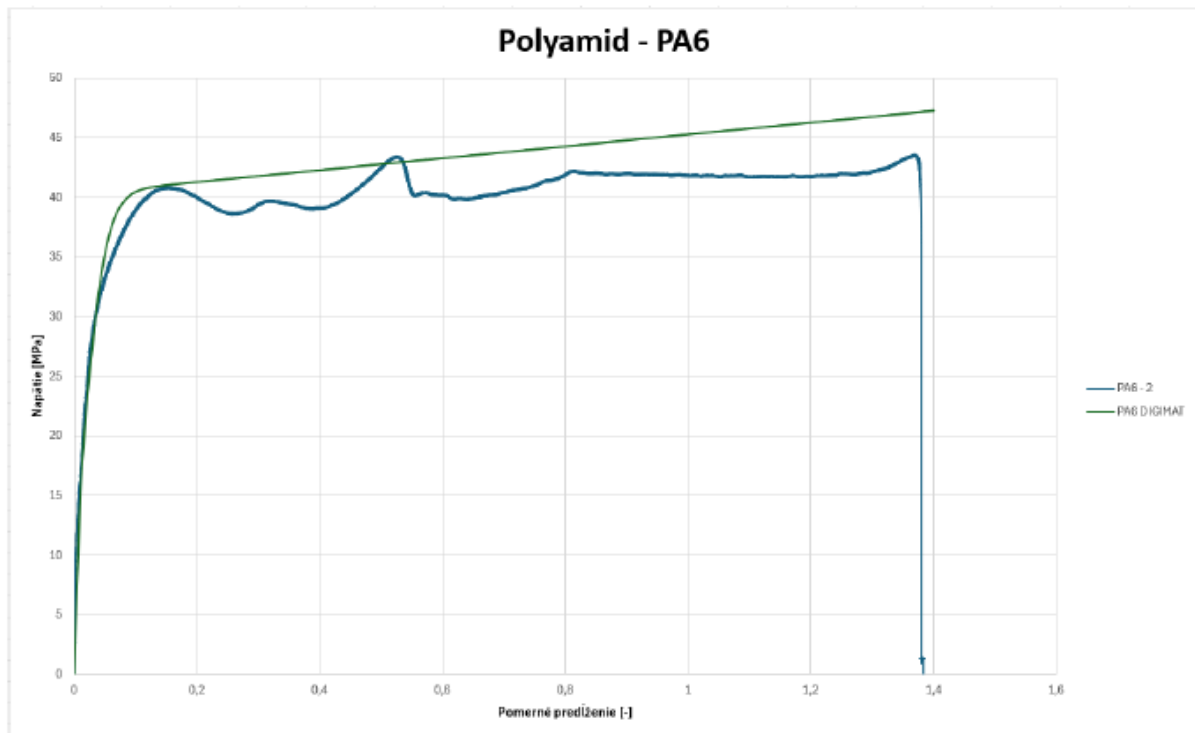
Vzhľadom na jeho rozšírené použitie sú jeho mechanické a fyzikálne vlastnosti dobre zdokumentované a dostupné v odbornej literatúre či materiálových databázach. Táto skutočnosť umožňuje vytvorenie numerického modelu bez potreby dodatočnej experimentálnej charakterizácie.

Obr. 15 zachytáva tvorbu virtuálneho modelu čistého PA6 v softvéri Digimat, ktorý je určený na mikromechanické modelovanie kompozitných materiálov a pokročilú materiálovú simuláciu.



Obr. 15 – Tvorba modelu materiálu PA6

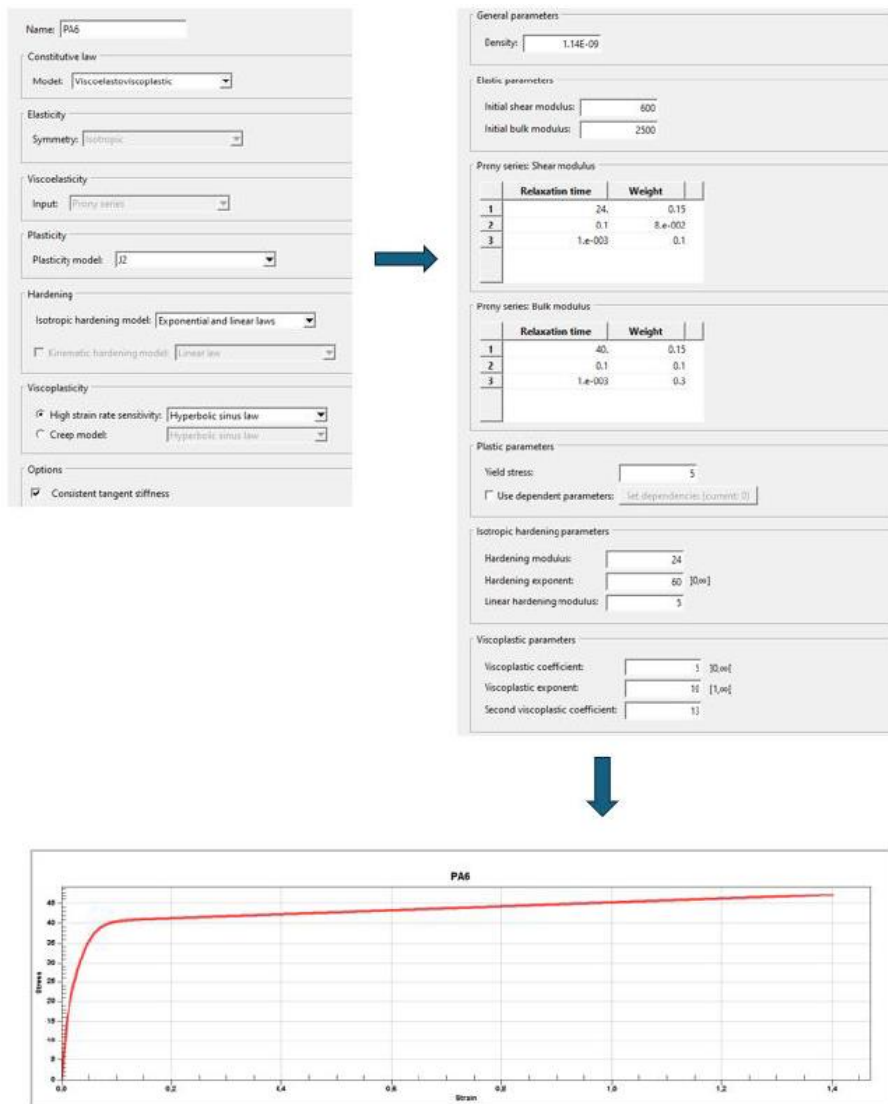
Cieľom modelovania bolo overiť presnosť výpočtového modelu porovnaním jeho výstupov s výsledkami reálnej ťahovej skúšky, obr. 16. Porovnanie simulovaných a experimentálnych dát slúži ako validačný krok pre ďalšie využitie tohto modelu v predikcii správania sa materiálu v rôznych aplikáciách.



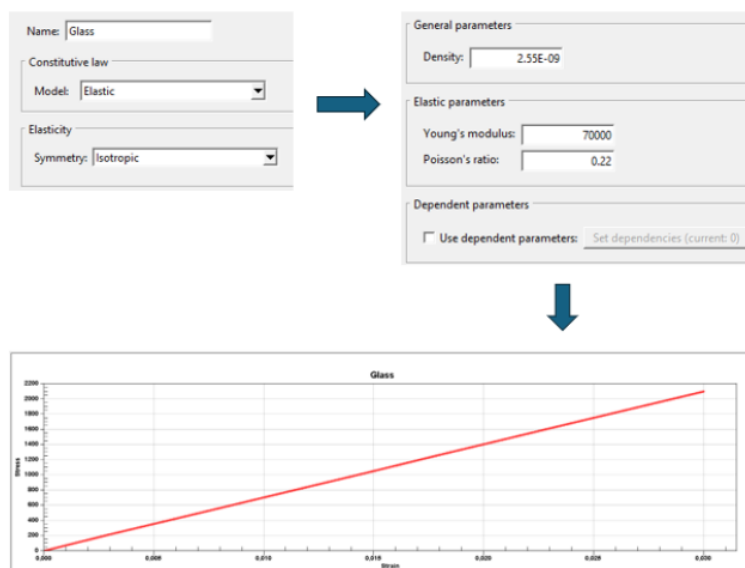
Obr. 16 – Porovnanie materiálového modelu PA6 s reálnym priebehom

- **Materiál PA6 GF15**

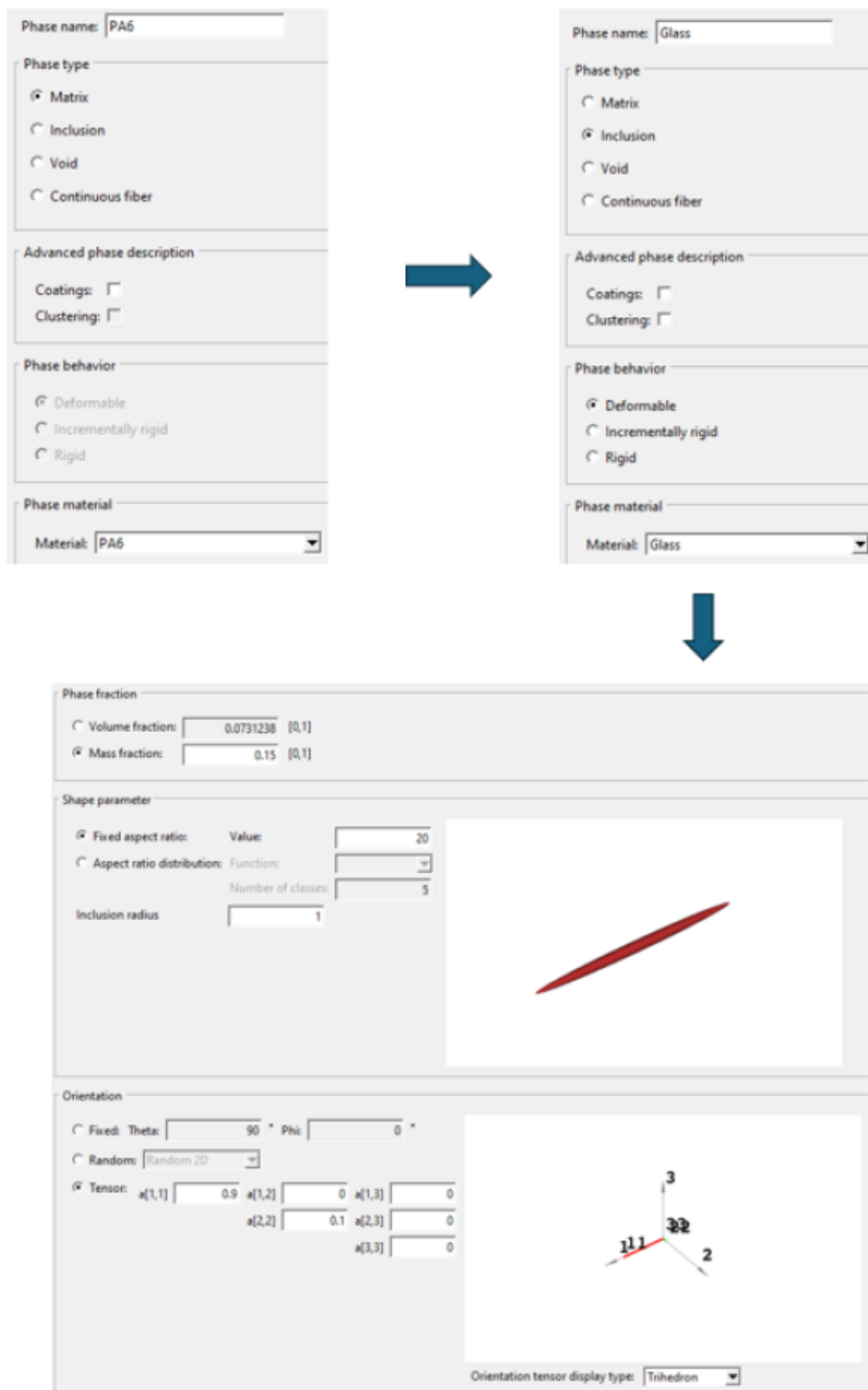
V tejto časti bol vytvorený virtuálny model materiálu PA6 GF15 v softvéri Digimat, ktorý umožňuje realistickú reprezentáciu správania sa kompozitov prostredníctvom mikromechanického prístupu. Model bol zostavený na základe dostupných materiálových parametrov vrátane vlastností matrice (PA6), obr. 17, aj výstuže (sklenené vlákna), obr. 18, ako aj informácií o ich objemovom podiele a orientácii, obr. 19. Vzhľadom na obsah výstuže bolo nutné zohľadniť aj anizotropiu materiálu a vplyv orientácie vlákien na jeho mechanické správanie. Ďalej obr. 20 ukazuje definovanie reprezentatívneho objemového prvku RVE, obr. 21 znázorňuje definíciu indikátorov porúch a obr. 22 predstavuje typ zaťaženia.



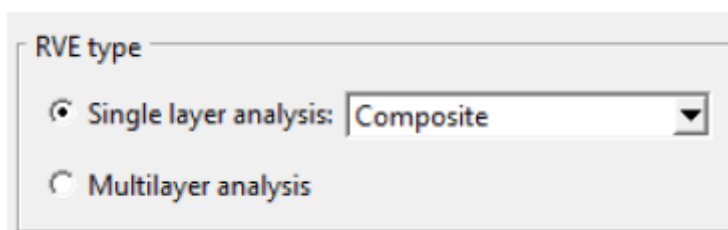
Obr. 17 – Parametre matrice PA6



Obr. 18 – Parametre výstuže – sklenené vlákna



Obr. 19 – Definovanie parametrov výsledného kompozitu



Obr. 20 - Definovanie reprezentatívneho objemového prvku

Name: FIBER\_Stress

Model: Component Stress  Use linear formulation

Axis system: tensor's principal axes

Failure indicator outputs

$f_i = \mathcal{F}_i(\boldsymbol{\sigma})$ , with:

$$\mathcal{F}_A(\boldsymbol{\sigma}) = \frac{\sigma_1}{X_t} \text{ if } \sigma_1 > 0, 0 \text{ otherwise.}$$

$$\mathcal{F}_B(\boldsymbol{\sigma}) = -\frac{\sigma_3}{X_c} \text{ if } \sigma_3 < 0, 0 \text{ otherwise.}$$

Parameters

Tensile strength ( $X_t$ ): 900

Compressive strength ( $X_c$ ): 600

Dependent parameters

Use dependent parameters

Progressive failure

Use progressive failure

Name: MATRIX\_Stress

Model: Component Stress  Use linear formulation

Axis system: tensor's principal axes

Failure indicator outputs

$f_i = \mathcal{F}_i(\boldsymbol{\sigma})$ , with:

$$\mathcal{F}_A(\boldsymbol{\sigma}) = \frac{\sigma_1}{X_t} \text{ if } \sigma_1 > 0, 0 \text{ otherwise.}$$

$$\mathcal{F}_B(\boldsymbol{\sigma}) = -\frac{\sigma_3}{X_c} \text{ if } \sigma_3 < 0, 0 \text{ otherwise.}$$

Parameters

Tensile strength ( $X_t$ ): 45

Compressive strength ( $X_c$ ): 60

Dependent parameters

Use dependent parameters

Progressive failure

Use progressive failure

Obr. 21 – Definovanie indikátorov porúch výstuže a matrice

Loading source

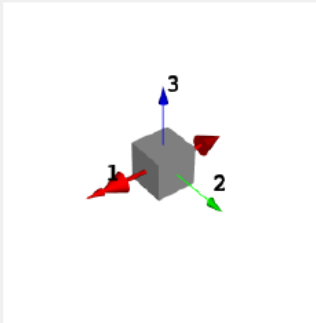
Digimat

Macro FE model

Load from Digimat

Loading type: Strain UNIAxIAL

Load direction: Theta: 90 ° Phi: 0 °



History

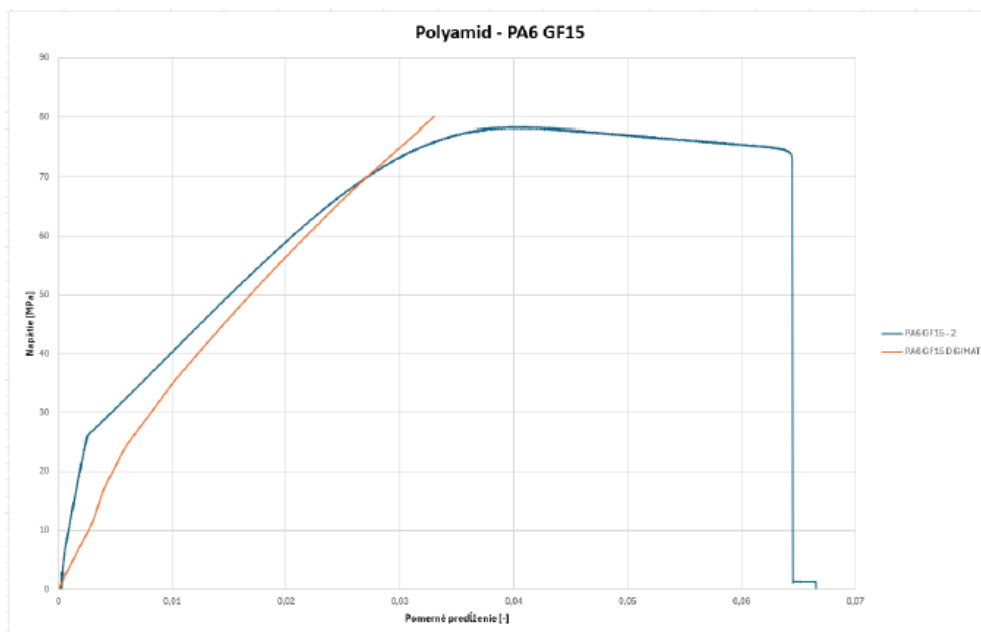
Monotonic

Cyclic

User-defined

Obr. 22 – Typ zaťaženia

Cieľom vytvorenia modelu bolo overiť jeho schopnosť realisticky predikovať správanie sa kompozitu pri mechanickom namáhaní, konkrétne pri ťahovej skúške. Výstupy zo simulácie boli porovnané s reálnymi experimentálnymi dátami, čo umožnilo overiť presnosť modelu, obr. 23.

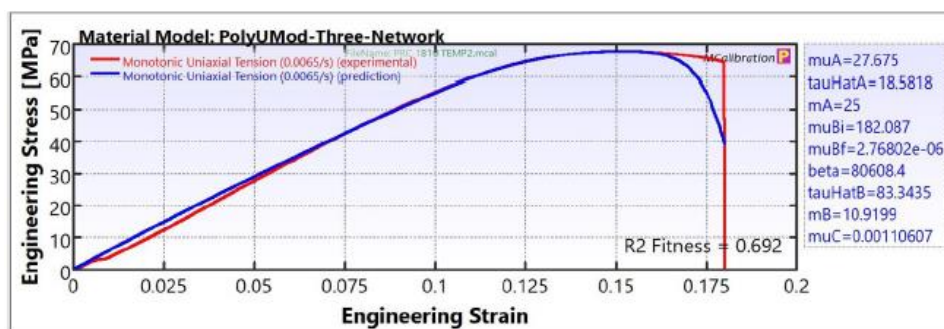


Obr. 23 – Porovnanie materiálového modelu PA6 GF15 s reálnym priebehom

- **Materiál PRC 1810**

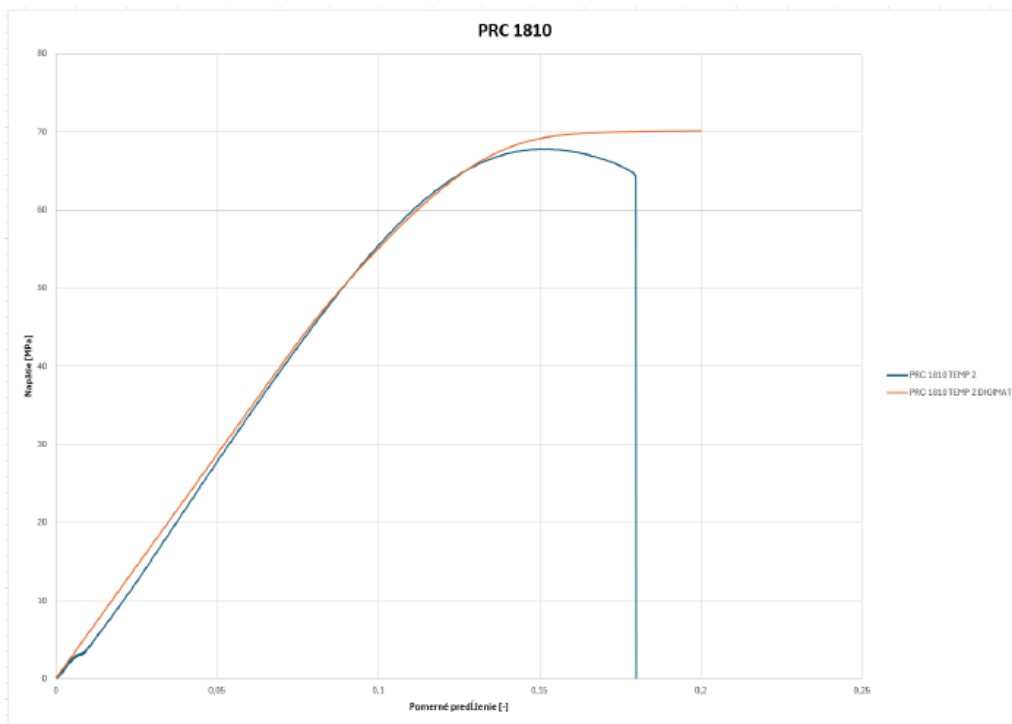
Materiál PRC 1810 predstavuje dvojzložkový polymérny systém, ktorého charakteristiky nie sú bežne dostupné v štandardných databázach materiálových vlastností. Z tohto dôvodu bolo nevyhnutné pristúpiť k experimentálnej charakterizácii mechanického správania materiálu s cieľom získať všetky potrebné vstupné údaje pre jeho numerické modelovanie.

Skúšobné vzorky boli podobrené ťahovej skúške. Výsledné napäťovo-deformačné krivky poslúžili ako základ pre identifikáciu konštitutívnych parametrov materiálu. Keďže išlo o materiál s neštandardne dostupnými dátami, bola na spracovanie výsledkov a odhad materiálových parametrov použitá špecializovaná softvérová aplikácia MCalibration, obr. 24. Tá umožnila prostredníctvom inverzného modelovania identifikovať vhodné materiálové vlastnosti (napr. plasticko-viskoelastické) a získať presné hodnoty parametrov na základe reálnej krivky napätia a deformácie.



Obr. 24 – Inverzné modelovanie pomocou softvéru MCalibration

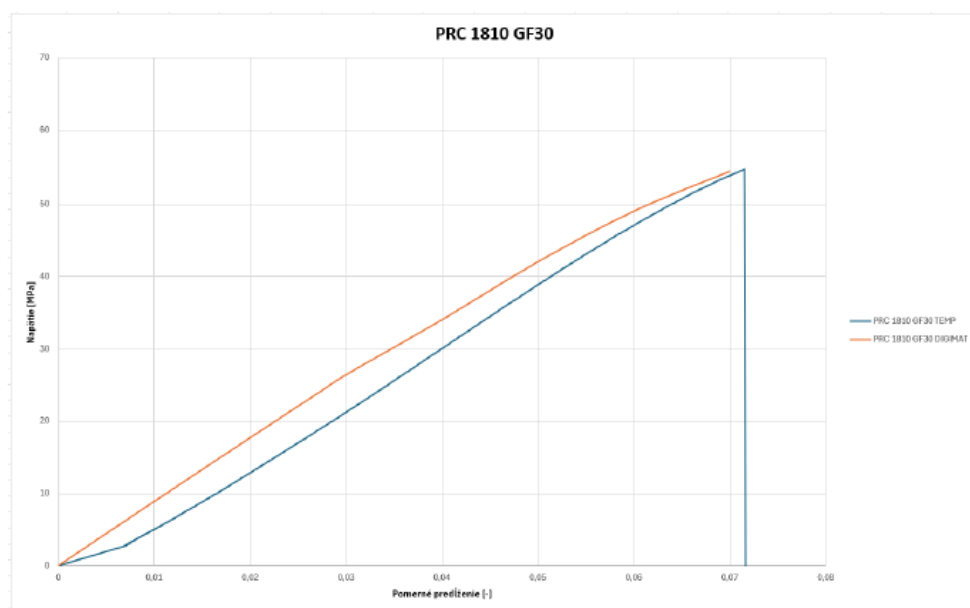
Následne bol vytvorený virtuálny model materiálu PRC 1810 v prostredí Digimat, pričom vstupné údaje boli založené práve na výstupe z MCalibration. Výstupy zo simulácie boli porovnané s reálnymi experimentálnymi dátami, čo umožnilo overiť presnosť modelu, obr. 25.



Obr. 25 – Porovnanie materiálového modelu PRC 1810 s reálnym priebehom

- **Materiál PRC 1810 GF30**

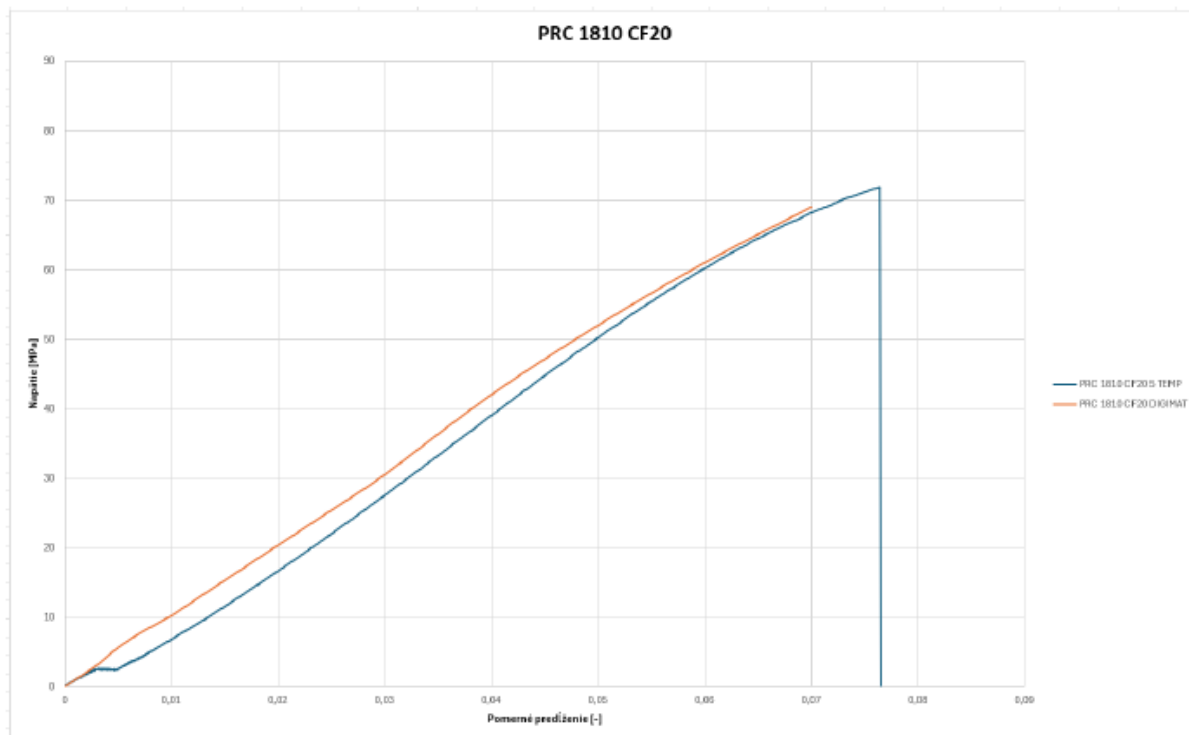
Materiál PRC 1810 GF30 je kompozitný systém založený na dvojzložkovej matrici PRC 1810, ktorá je doplnená o 30% sklenených vlákien. Na obr. 26 je porovnanie výsledkov simulácie s reálnymi experimentálnymi dátami.



Obr. 26 - Porovnanie materiálového modelu PRC 1810 GF30 s reálnym priebehom

- **Materiál PRC 1810 CF20**

Materiál PRC 1810 CF20 predstavuje kompozitný systém tvorený rovnakou dvojzložkovou maticou PRC 1810 ako v predchádzajúcom prípade, avšak je vystužený 20% uhlíkových vlákien. Na obr. 27 je porovnanie simulovaných výsledkov s nameranými dátami z ťahovej skúšky.

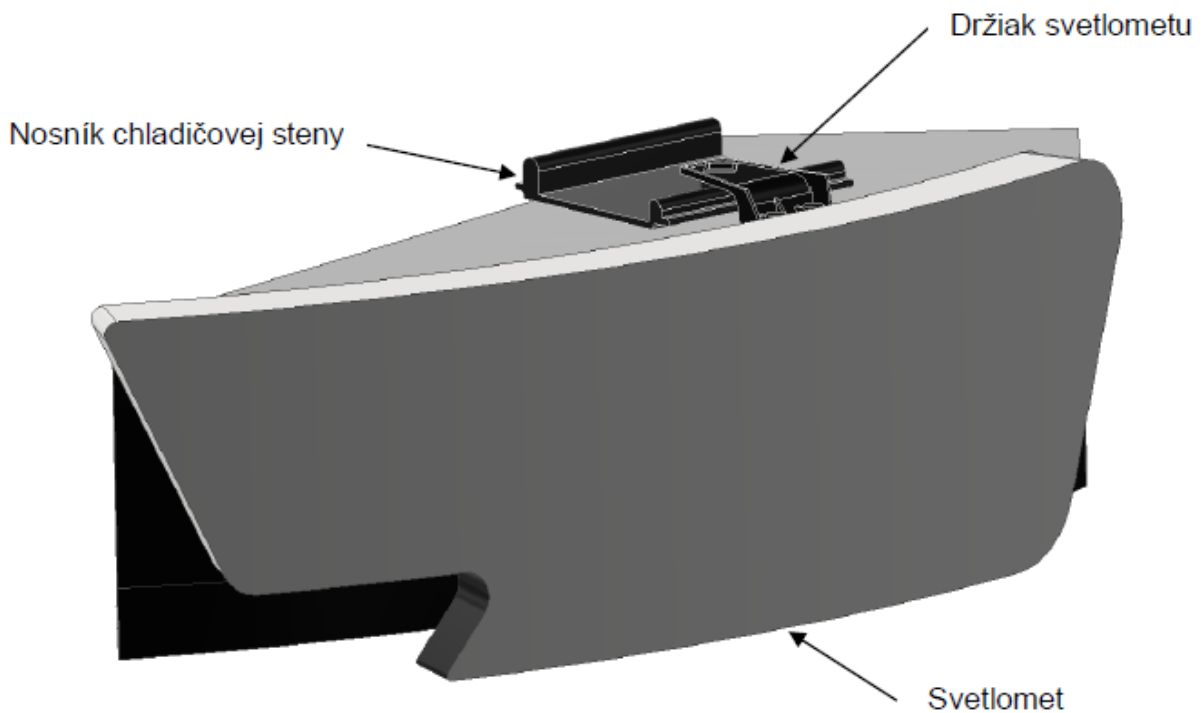


Obr. 27 - Porovnanie materiálového modelu PRC 1810 CF20 s reálnym priebehom

### **MKP analýza vybraného konštrukčného prvku**

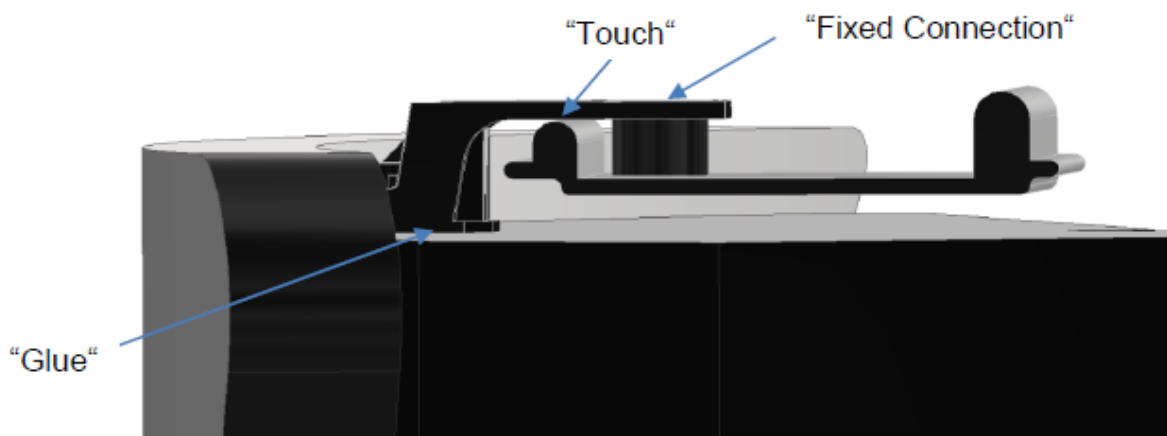
Cieľom je overiť vhodnosť jednotlivých materiálových modelov pri reálnych prevádzkových podmienkach a analyzovať rozdiely v správaní súčiastky v závislosti od použitého materiálu.

Modelovaná súčiastka predstavuje plastový držiak svetlometu, ktorý je bežne využívaný v praxi. Tento držiak je navrhnutý tak, aby zabezpečoval stabilné uchytenie svetelnej jednotky a zároveň absorboval a rozkladal mechanické namáhania vznikajúce počas prevádzky vozidla. Z konštrukčného hľadiska je komponent zvrchu prichytený k nosníku čelnej časti karosérie, konkrétne k nosníku chladičovej steny, zatiaľ čo spodná časť slúži ako nosná plocha pre samotný svetlomet, obr. 28. Takéto usporiadanie vytvára komplexný systém zaťaženia, ktorý zahŕňa statické, vibračné a dynamické účinky, a preto je presná analýza mechanického správania materiálu v týchto podmienkach kľúčová pre zabezpečenie funkčnosti a životnosti komponentu.



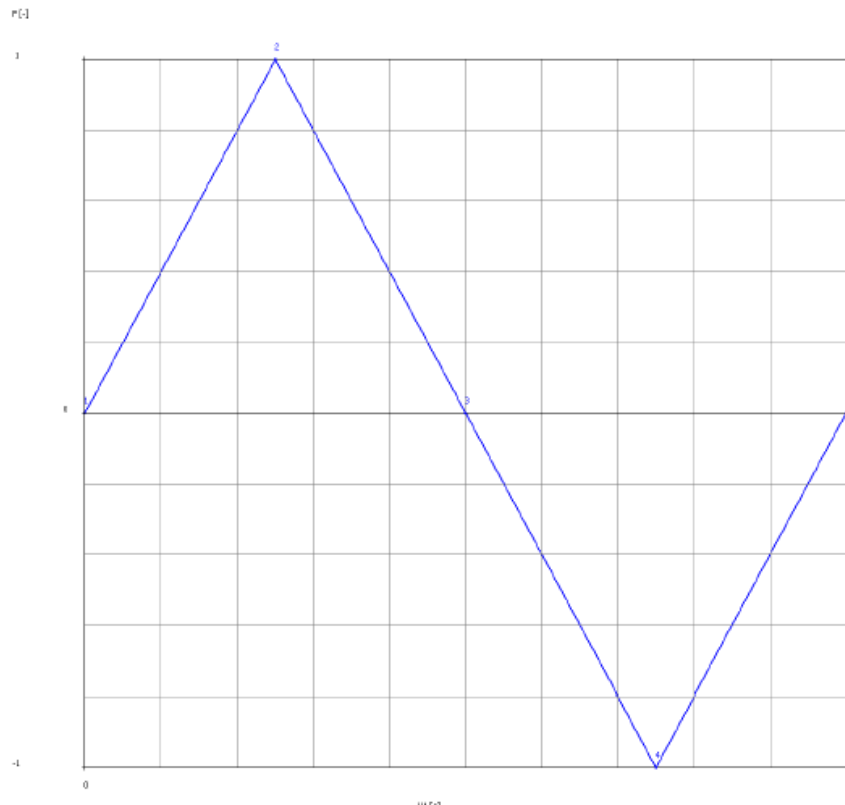
Obr. 28 – Schéma uchytenia svetlometu v praxi

V rámci prípravy MKP analýzy bolo nevyhnutné presne definovať okrajové podmienky a kontaktné interakcie medzi jednotlivými súčastami zostavy, aby bolo možné verne simulovať reálne prevádzkové zaťaženie držiaka svetlometu. Takto definované okrajové podmienky umožňujú realistické zachytenie správania zostavy v numerickej simulácii, obr. 29.



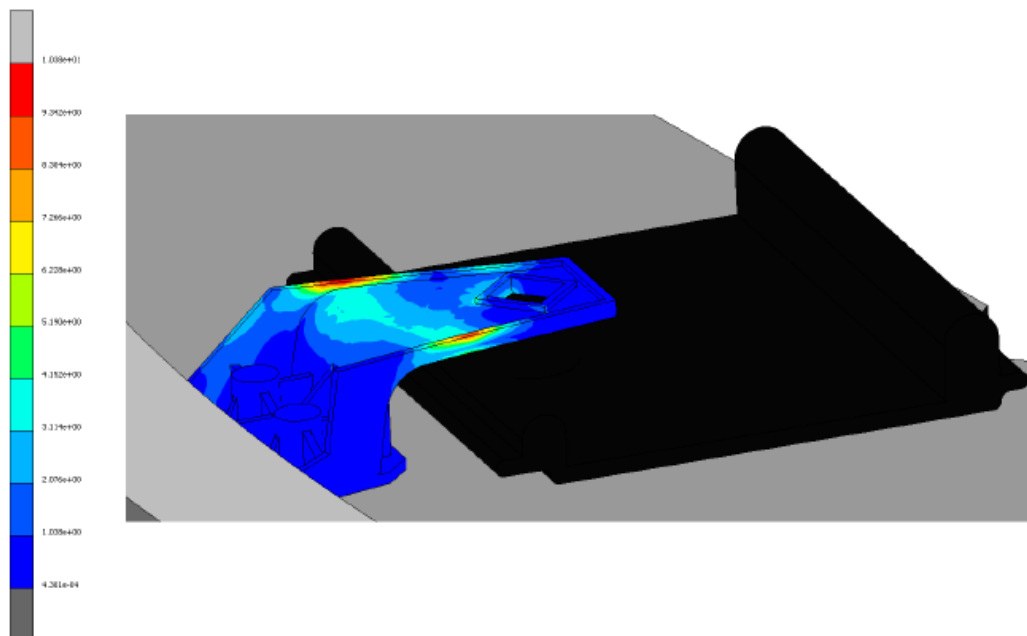
Obr. 29 – Definovanie okrajových podmienok pre MKP analýzu

Na základe vytvoreného MKP modelu bol vykonaný numerický výpočet držiaka svetlometu pre vybrané typy materiálov. Simulácia bola realizovaná za predpokladu definovaných okrajových podmienok, ktoré boli podrobne popísané v predchádzajúcej časti. Zaťaženie komponentu spočívalo v aplikovaní riadeného posunu o hodnotu  $\pm 1$  mm v smere zvislej osi (hore a dole), pričom celý pohyb prebiehal počas časového intervalu 2 sekundy, obr. 30

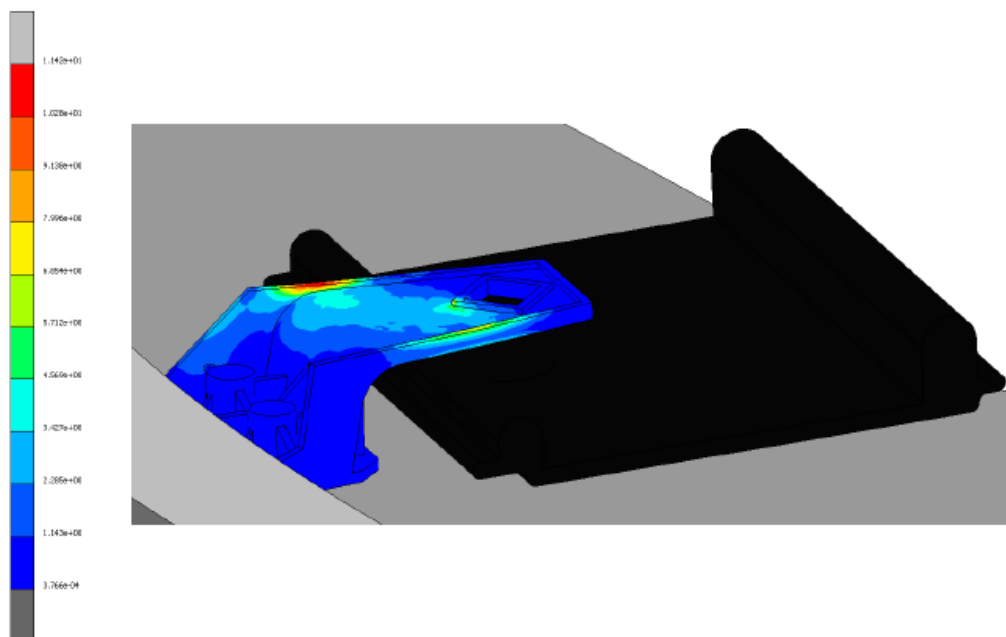


Obr. 30 – Definované posunutie v čase

Pre ilustráciu priebehu analýzy a jej výsledkov bol zvolený základný materiál PA6. Počas simulácie bolo sledované ekvivalentné napätie von Mises, ktoré slúži ako kritérium pre plastickú deformáciu materiálu. Hodnoty napätí boli vyhodnocované v časových bodoch 0,5 sekundy (posun +1 mm) a 1,5 sekundy (posun -1 mm), kedy bol komponent najviac deformovaný. Na obr. 31 je zobrazené rozloženie napätia v čase 0,5 sekundy a na obr. 32 je zobrazené rozloženie napätia v čase 1,5 sekundy.



Obr. 31 – von Mises napätie materiálu PA6 v čase 0,5 sekundy



Obr. 32 – von Mises napätie materiálu PA6 v čase 1,5 sekundy

Ďalej boli vykonané simulácie podľa rovnakých okrajových podmienok na rôznych typoch materiálov. Výsledky analýz sú uvedené v tab. 1.

Tab. 1 - Výsledky analýz pre vybrané typy materiálov

Označenie materiálu	Variant	Maximálne napätie von Mises v čase 0,5 s [MPa]	Maximálne napätie von Mises v čase 1,5 s [MPa]
PA6	-	10,38	11,42
PA6	viskoelastické správanie	10,36	11,37
PRC 1810 GF30	náhodné rozloženie	3,70	4,04
PRC 1810 GF30	tenzor x	3,27	3,65
PRC 1810 GF30	tenzor y	6,12	6,58
PRC 1810 GF30	tenzor z	3,56	5,01
PRC 1810 CF20	náhodné rozloženie	3,54	3,87

Cieľom simulácií bolo posúdiť správanie vybraných typov materiálov v reálnych prevádzkových podmienkach a porovnať ich výkonnosť s nevystuženým variantom. Výsledky analýz poskytujú dôležitý základ pre porovnanie s výsledkami získanými pri simuláciách s inými materiálmi a následné posúdenie vhodnosti použitia daného materiálu pre konkrétne aplikácie v automobilovom priemysle.

Pri modelovaní bola matrica (PRC 1810) opísaná viskoelasticko-viskoplastickým správaním, čím sa zachytila jej časovo závislá a nelineárna odozva. Avšak v celkovom správaní kompozitu sa tieto vlastnosti výraznejšie neprejavili, keďže dominantný vplyv výstuže (sklenenej alebo uhlíkovej) zabezpečil vysokú tuhosť a potlačil efekty viskoelasticity a viskoplasticity.

## ZÁVER

Táto dizertačná práca bola zameraná na výskum viskoelastického a viskoplastického správania polymérnych a kompozitných materiálov s cieľom vytvoriť metodiku ich numerického modelovania a aplikácie v automobilovom priemysle. Základom bolo identifikovať materiálové charakteristiky z experimentálnych ťahových skúšok, ktoré boli následne spracované inverzným modelovaním v softvéri MCalibration. Na základe týchto údajov boli vytvorené materiálové modely v prostredí Digimat a následne použité v MKP simuláciách v softvéri Marc Mentat.

Analyzované boli štyri materiálové varianty: referenčný PA6 a kompozitný PRC 1810 v základnej forme, ako aj vo verziách vystužených 30 % sklenených vlákien (GF30) a 20 % uhlíkových vlákien (CF20). Simulovaný komponent – plastový držiak svetlometu – bol zaťažovaný harmonickým pohybom  $\pm 1$  mm v osi Z a analyzovaný v dvoch časových momentoch: 0,5 s a 1,5 s.

Výsledky ukázali, že:

- PA6 dosiahol najvyššie napätia (10,38 MPa a 11,42 MPa) a preukázal výrazné plastické deformácie,
- PRC 1810 GF30 mal znížené napätie (3,27 MPa a 3,65 MPa) a vyššiu tuhosť vďaka skleneným vláknám,
- PRC 1810 CF20 poskytol najlepšiu výkonnosť (3,54 MPa a 3,87 MPa), najnižšiu deformáciu a najvyššiu tuhosť vďaka uhlíkovým vláknám.

Z hľadiska hlavného výskumného cieľa – hodnotenia viskoelasticko-viskoplastického správania – sa ukázalo, že hoci matrica bola modelovaná ako viskoelastická a viskoplastická, jej správanie bolo v konečnom kompozite potlačené dominantným elastickým vplyvom výstuže. To je kľúčový poznatok pri výbere materiálového modelu pre návrh komponentov.

Vyvinutá metodika od experimentálnej charakterizácie až po MKP simuláciu predstavuje efektívny nástroj pre návrh plastových dielov v automobilovom sektore. Získané poznatky umožňujú optimalizovať komponenty z hľadiska hmotnosti, tuhosti a životnosti. V budúcnosti sa odporúča rozšíriť výskum o analýzu únavy a životnosti pomocou SN kriviek pri cyklickom zaťažení.

## **PRÍNOSY PRE ĎALŠÍ ROZVOJ VEDY A PRAX**

### **Prínosy pre prax**

- Presnejšie predikcie správania polymérnych kompozitov pri zaťažení v reálnych podmienkach automobilových komponentov.
- Možnosť optimalizácie konštrukčných dielov z kompozitov z hľadiska pevnosti, životnosti a hmotnosti.
- Návrh efektívneho postupu identifikácie materiálových parametrov bez potreby rozsiahlych fyzických testov.
- Uplatniteľnosť metodiky pri vývoji nových materiálov s ohľadom na špecifické aplikačné požiadavky (napr. zníženie deformácií, zvýšenie bezpečnosti).
- Zníženie nákladov a času pri návrhu dielov v automobilovom priemysle vďaka využitiu virtuálneho testovania.

### **Prínosy pre vedný odbor**

- Rozšírenie poznatkov v oblasti viacfázových polymérnych materiálov s dôrazom na viskoelastické a viskoplastické správanie.
- Prepojenie experimentálnych metód (ťahová skúška, SEM, EDS) s numerickými nástrojmi (Digimat, MCalibration) v oblasti materiálového inžinierstva.
- Príspevok k metodológii kalibrácie a verifikácie materiálových modelov na mikromechanickej úrovni.
- Identifikácia vplyvu mikroštruktúry výstuží (sklenené, uhlíkové vlákna) na makroskopické správanie materiálov.
- Podpora vývoja presnejších konštitutívnych modelov pre komplexné inžinierske aplikácie.

### **Prínosy v pedagogickej oblasti:**

- Možnosť využitia výsledkov práce pri výučbe predmetov zameraných na materiálové inžinierstvo, MKP a experimentálnu mechaniku.
- Prípadová štúdia ako praktický príklad prepájania teórie s praxou pri modelovaní pokročilých materiálov.
- Vytvorenie didaktických materiálov zameraných na identifikáciu materiálových parametrov a tvorbu materiálových modelov.
- Podpora interdisciplinárneho vzdelávania kombinujúceho oblasť polymérnych materiálov, numerického modelovania a experimentálnej mechaniky.

## RESUMÉ

This dissertation focuses on the investigation of the viscoelastic and viscoplastic behavior of composite polymer materials intended for use in the automotive industry. The primary objective was to develop a methodology for identifying material parameters and their application in numerical simulations of a structural component – a plastic headlamp bracket.

The research analyzed four material variants: reference PA6 (polyamide) and PRC 1810 in their base forms, as well as their modifications reinforced with 30% glass fibers (GF30) and 20% carbon fibers (CF20). For each material, uniaxial tensile tests were performed, followed by inverse modeling using the MCalibration software to obtain parameters describing nonlinear viscoelastic-viscoplastic behavior. These parameters were then implemented into a microstructure-oriented material model in Digimat, and numerical simulations were conducted in Marc Mentat.

The simulated component was subjected to harmonic cyclic displacement in the Z-axis with an amplitude of  $\pm 1$  mm. Boundary conditions reflected the real-world mounting of the component in the vehicle assembly. Simulation results showed that the highest stress levels occurred in PA6 (10.38 MPa / 11.42 MPa), while the lowest values were observed in PRC 1810 CF20 (3.54 MPa / 3.87 MPa). The presence of reinforcements significantly reduced both deformation and stress, with carbon fiber reinforcement providing the highest stiffness.

A key finding is that although the polymer matrix was modeled with viscoelastic and viscoplastic behavior, the global response of the composite material was dominated by the elastic and anisotropic nature of the fiber reinforcement. This has implications for selecting appropriate material models in engineering simulations. The results of this work present a validated and applicable approach to the design and optimization of composite plastic components and lay the groundwork for future research focused on fatigue life assessment through SN curves under cyclic loading.

## ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI

### Publikácie v zahraničných karentovaných časopisoch

- **FIAČAN, J., JENIS, J., ČECHMÁNEK, D., HRČEK, S., MICHAL, P.** *Structural design and safety verification of a service hatch used at airports by FEM analysis.* Infrastructures, 2023, roč. 8, č. 4, s. 1-12. DOI 10.3390/infrastructures8040073.

### Publikácie v časopisoch, ktoré nie sú karentované, ale sú registrované v databázach WoS alebo SCOPUS

- **ČECHMÁNEK, D., KOHÁR, R., BRUMERČÍK, F., LUKÁČ, M., FIAČAN, J.** *Optimization of the injection mold runner system of the transport means plastic parts.* Communications-Scientific Letters of the University of Žilina, 2023, roč. 25, č. 3, s. 176-185. DOI 10.26552/com.C.2023.046.
- **ŠTEVKO, P., KOHÁR, R., ČECHMÁNEK, D., MEDVECKÁ, D., NOVÝ, F.** *Optimization of the tire building drum for passenger tires using the TRIZ methodology.* Management Systems in Production Engineering, 2023, roč. 31, č. 3, s. 361-372. DOI 10.2478/mspe-2023-0040.

### Publikácie na zahraničných vedeckých konferenciách

- **ČECHMÁNEK, D., KOHÁR, R., ČUCHOR, D., POMPÁŠ, L.** *A structural design of the injection mould.* TRANSCOM 2023, Transportation Research Procedia, ISSN 2352-1465, 2023, č. 74, s. 576-583. DOI 10.1016/j.trpro.2023.11.184.
- **POMPÁŠ, L., KUČERA, L., ČECHMÁNEK, D., FIAČAN, J.** *Construction design of the reaction arm for tightening tools.* Transportation Research Procedia, ISSN 2352-1465, 2023, č. 74, s. 568-575. DOI 10.1016/j.trpro.2023.11.183.
- **ČUCHOR, D., FIAČAN, J., ČECHMÁNEK, D., BRONČEK, J.** *Design of specialized gripper for automated casting manipulation.* Transportation Research Procedia, ISSN 2352-1465, 2023, č. 74, s. 584-591. DOI 10.1016/j.trpro.2023.11.185.
- **FIAČAN, J., HRČEK, S., ČECHMÁNEK, D., POMPÁŠ, L.** *Matematická analýza simulácie letu vrtule.* SEMDOK 2023, ISBN 978-80-554-1947-3, s. 36-42.

## LITERATÚRA

- [1] **Ali, M., et. al.** *Nano and bio-composites and their applications: A review*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1067. 012093. DOI: 10.1088/1757-899X/1067/1/012093.
- [2] **Elmarakbi, A.** *Advanced Composite Materials for Automotive Applications*. John Wiley & Sons, Ltd. 2013. ISBN: 978-1-118-42386-8.
- [3] **Zhang, W., Xu, J.** *Advanced lightweight materials for Automobiles: A review*. Materials & Design. 2022. 110994. ISSN 0264-1275. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110994>
- [4] **University of Utah.** *Composites in Cars: Making Vehicles Lighter, Safer, and More Fuel-Efficient*. [online]. College of Engineering. 2011. [cit. 2023-05-08]. Dostupné na internete: [https://www.price.utah.edu/wp-content/uploads/2017/11/coe\\_research\\_report\\_2011.pdf](https://www.price.utah.edu/wp-content/uploads/2017/11/coe_research_report_2011.pdf)
- [5] **Kumar, A., Gupta, R.** *Fundamentals of Polymer Engineering*. 2. vydanie. Marcel Dekker Inc.: New York, NY, USA, 2003.
- [6] **Serban, D. A.** *Viscoplastic Behaviour of Polyamides*. Viscoelastic and Viscoplastic Materials. InTech. 2016. DOI: 10.5772/64563
- [7] **Strobl, G.** *The Physics of Polymers*. Springer: Berlin, Germany, 2007.
- [8] **Bergström, Jörgen.** *Mechanics of Solid Polymers. Theory and Computational Modeling*. 1st edition. USA: William Andrew, 2015. 509 pages. ISBN: 978-0-323-31150-2.
- [9] **Landel, R.F., Nielsen, L.E.** *Mechanical Properties of Polymers and Composites*. 2nd edition. CRC Press. 1993. ISBN: 978-0-429-18150-4.