

# **Měření elektrického odporu pryže v závislosti na mechanickém napětí v tlaku**

Bc. Jan Mitev

---

Diplomová práce  
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

|                   |                                                                             |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Jméno a příjmení: | Bc. Jan Mitev                                                               |
| Osobní číslo:     | T23294                                                                      |
| Studijní program: | N0788A270002 Výrobní inženýrství                                            |
| Forma studia:     | Kombinovaná                                                                 |
| Téma práce:       | Měření elektrického odporu pryže v závislosti na mechanickém napětí v tlaku |

## Zásady pro vypracování

- Vypracovat literární rešerši na dané téma
- Navrhnout přípravek pro měření elektrického odporu pryžového zkušebního tělíska, jenž je mechanicky namáháno v tlaku a to s možností vyloučení jeho příčné deformace
- Navrhnout formu pro vulkanizaci zkušebních tělísek
- Vyhotovit zkušební tělíska pomocí navržené formy a změřit jejich elektrický odpor v navrženém přípravku
- Vyhodnotit naměřená data a dosažené výsledky

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

**Seznam doporučené literatury:**

- Shigley, J. E., Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2011). Mechanical engineering design. Boston: McGraw-Hill.
- Funt, J. M. (2009). Mixing of rubber. Shrewsbury England: Smithers Rapra.
- Osswald, T. A., & Menges, G. (2012). Material science of polymers for engineers. Cincinnati: Hanser Publishers.
- Ding, T., Wang, L., & Wang, P. (2007). Changes in electrical resistance of carbon-black-filled silicone rubber composite during compression. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 45(19), 2700–2706. doi:10.1002/polb.21272
- Harea, E., Datta, S., Stěnička, M., Maloch, J., & Stoček, R. (2021). The influence of local strain distribution on the effective electrical resistance of carbon black filled natural rubber. *Polymers*, 13(15), 2411. doi:10.3390/polym13152411

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ondřej Kratina, Ph.D.**  
Centrum polymerních systémů

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2025**  
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

L.S.

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.**  
děkan

**doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 3. února 2025

# PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

## Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

## Prohlašuji, že

- jsem na diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne .....

.....  
podpis autora



## ABSTRAKT

Elektricky vodivé pryže vykazují piezorezistivní chování, které je často nelineární a nemonotonní. Toto chování je ovlivněno jak přetvořením perkolující sítě v důsledku mechanického napětí, tak mikrostrukturou vodivého plniva a jeho interakcemi s matricí. Tato práce se zaměřuje na experimentální analýzu závislosti elektrického odporu na jednoosém tlakovém zatížení, s důrazem na vliv příčné deformace. Bylo navrženo zkušební těleso, vulkanizační forma pro jeho výrobu a upínací přípravky umožňující měření při volné i vyloučené příčné deformaci. Experiment byl proveden s pryžemi na bázi přírodního kaučuku s různým podílem sazí. Výsledky ukazují, že makroskopické přetvoření perkolující sítě ovlivňuje elektrickou odezvu, avšak nemusí být přímo příčinou jejího vzniku.

Klíčová slova: vodivá pryž, vodivé saze, přírodní kaučuk, elektrický odpor, piezorezistivita, jednoosý tlak, perkolace, kvantové tunelování

## ABSTRACT

Electrically conductive rubbers exhibit piezoresistive behaviour, which is often non-linear and non-monotonic. This behaviour is influenced both by the reshaping of the percolating network due to mechanical stress and by the microstructure of the conductive filler and its interactions with the matrix. This work focuses on the experimental analysis of the dependence of electrical resistivity on uniaxial compressive loading, with emphasis on the effect of lateral deformation. A test fixture, a vulcanization mold for its fabrication, and fixtures allowing measurements under free and excluded lateral deformation were designed. The experiment was carried out with natural rubber based rubbers with different fractions of carbon black. The results show that the macroscopic reshaping of the percolating network affects the electrical response but may not be the direct cause of it.

Keywords: conductive rubber, conductive carbon black, natural rubber, electrical resistance, piezoresistivity, uniaxial pressure, percolation, quantum tunneling

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Ondřeji Kratinovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady a konzultace. Dále děkuji panu Ing. Jaroslavu Malochovi, CSc., za významnou pomoc při realizaci experimentální části. Poděkování patří také panu Ing. Tomáši Sáhovi, Ph.D., za umožnění výroby upínacích přípravků. V neposlední řadě bych rád poděkoval panu Ing. Martinu Stěničkovi, Ph.D., za asistenci při přípravě experimentu a panu Ing. Danielu Husárovi za pomoc s přípravou zkušebních vzorků.

*Study hard what interests you the most in the most undisciplined, irreverent and original manner possible.*

*Richard P. Feynmann*

# OBSAH

|                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ÚVOD.....</b>                                                | <b>11</b> |
| <b>I TEORETICKÁ ČÁST .....</b>                                  | <b>12</b> |
| <b>1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI PRYŽÍ V TLAKU .....</b>              | <b>13</b> |
| 1.1 KVAZISTATICKÁ DEFORMAČNÍ ODEZVA .....                       | 13        |
| 1.1.1 Tvarový faktor.....                                       | 15        |
| 1.2 VISKOELASTICKÉ VLASTNOSTI .....                             | 17        |
| 1.2.1 Křip a relaxace napětí.....                               | 18        |
| 1.2.2 Dynamická odezva .....                                    | 19        |
| <b>2 ELEKTRICKÝ ODPOR PRYŽÍ.....</b>                            | <b>22</b> |
| 2.1 OBECNÁ TEORIE ELEKTRICKÉHO ODPORU.....                      | 22        |
| 2.1.1 Vznik elektrického odporu.....                            | 22        |
| 2.1.2 Zpětný rozptyl elektronů .....                            | 24        |
| 2.2 ELEKTRICKY VODIVÉ SAZE .....                                | 26        |
| 2.2.1 Fyzikální vlastnosti .....                                | 26        |
| 2.3 PERKOLAČNÍ TEORIE .....                                     | 28        |
| 2.4 MECHANISMY TRANSPORTU ELEKTRICKÉHO NÁBOJE .....             | 29        |
| 2.5 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ELEKTRICKÝ ODPOR.....                   | 32        |
| 2.5.1 Vliv plniva.....                                          | 32        |
| 2.5.2 Vliv matrice.....                                         | 32        |
| 2.5.3 Vliv zpracování .....                                     | 33        |
| 2.6 VLIV MECHANICKÉHO NAPĚTÍ NA ELEKTRICKÝ ODPOR.....           | 34        |
| 2.6.1 Mikroskopické faktory ovlivňující odporovou odezvu.....   | 36        |
| <b>II PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>                                   | <b>38</b> |
| <b>3 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI.....</b>                              | <b>39</b> |
| <b>4 KONSTRUKČNÍ NÁVRHY .....</b>                               | <b>40</b> |
| 4.1 ZKUŠEBNÍ TĚLESO .....                                       | 40        |
| 4.1.1 Výrobní požadavky .....                                   | 41        |
| 4.2 VULKANIZAČNÍ FORMA .....                                    | 41        |
| 4.2.1 Dimenzování a pevnostní kontrola vulkanizační formy ..... | 42        |
| 4.3 UPÍNACÍ PŘÍPRAVKY .....                                     | 43        |
| 4.3.1 Přípravek pro volnou příčnou deformaci .....              | 44        |
| 4.3.2 Přípravek pro vyloučení příčné deformace .....            | 45        |
| 4.3.3 Dimenzování a pevnostní kontrola upínacích přípravků..... | 45        |
| 4.3.4 Výroba navržených dílů .....                              | 50        |
| <b>5 PŘÍPRAVA VZORKŮ A POPIS EXPERIMENTU .....</b>              | <b>51</b> |
| 5.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ .....                                       | 51        |

|          |                                                 |           |
|----------|-------------------------------------------------|-----------|
| 5.2      | POPIS EXPERIMENTU .....                         | 53        |
| <b>6</b> | <b>VÝSLEDKY A DISKUZE .....</b>                 | <b>57</b> |
|          | <b>ZÁVĚR.....</b>                               | <b>63</b> |
|          | <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>          | <b>65</b> |
|          | <b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>                     | <b>70</b> |
|          | <b>SEZNAM TABULEK.....</b>                      | <b>72</b> |
|          | <b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b> | <b>73</b> |
|          | <b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>                       | <b>76</b> |

## ÚVOD

Elektricky vodivé pryže díky svým piezorezistivním vlastnostem představují důležitý materiál pro vývoj flexibilních senzorů. Jejich schopnost měnit elektrický odpor v závislosti na mechanickém zatížení umožňuje detekci deformací a tlaků, což je zásadní pro monitorování pohybu a interakcí v reálném čase. Přestože vodivé pryže nabízejí značný aplikační potenciál v oblastech, jako jsou měkká robotika, nositelná elektronika nebo bionika, jejich širšímu využití dosud brání problémy spojené s nelinearitou a nemonotónností elektrické odezvy. Tyto jevy komplikují interpretaci měřených signálů a omezují výslednou přesnost senzorů.

Dosavadní výzkum se převážně zaměřoval na chování vodivých pryží při tahových zatíženích, zatímco odezva při tlakových zatíženích zůstává prozkoumaná méně. Právě tlakové zatížení však nabízí specifické experimentální podmínky, které umožňují omezit příčnou deformaci a tím poskytnout nový pohled na piezorezistivní mechanismy. Studium chování elektricky vodivých pryží v tlaku tak může významně přispět k hlubšímu porozumění nelineární a nemonotónní změny elektrického odporu v závislosti na deformaci. Tyto poznatky mohou v budoucnu napomoci optimalizaci návrhu senzorů a zpřesnění jejich funkce v praxi.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI PRYŽÍ V TLAKU

Při mechanickém zatížení vykazují pryže komplikované hyperelastické a viskoelastické chování, které se projevuje nelineární deformační odezvou, závislostí na rychlosti a historii zatěžování, teplotě i topologii zkušebního tělesa [1; 2].

Jako výchozí model mechanické odezvy slouží statistická teorie kaučukové elasticity, podle níž je odpor vůči deformaci primárně entropického původu. Pružnost tak nevyplývá ze změny vnitřní energie typické pro krystalické látky, ale z omezení konformační volnosti makromolekulárních řetězců v síti. Tento přístup vychází z idealizovaného modelu afinně deformované makromolekulární sítě, který však nezahrnuje reálné disipativní jevy, časovou závislost odezvy ani oblast velmi velkých deformací. Tyto projevy nejsou vysvětlitelné čistě entropickou teorií, ale odrážejí vnitřní disipativní strukturu materiálu, interakce mezi makromolekulárními řetězci a kinetiku retrakce po deformaci [1; 2; 3].

## 1.1 Kvazistatická deformační odezva

Vysoké deformace pryžových těles při působení jednoosého tahu/tlaku výrazně ovlivňují velikost jejich příčného průřezu [4]. V oblasti konečných deformací je proto nutné rozlišovat mezi smluvním, tzv. inženýrským napětím  $\sigma$ , kdy je zatěžující síla  $F$  vztažena na jednotku nedeformované (původní) plochy průřezu  $S_0$ ,

$$\sigma = \frac{F}{S_0}, \quad (1.1)$$

a skutečným napětím  $\bar{\sigma}$ , kdy je zatěžující síla vztažena na jednotku aktuálního (deformovaného) průřezu  $S$ , tedy průřezu skutečné velikosti, v němž síla působí,

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{S}. \quad (1.2)$$

Při jednoosém tlaku roste skutečné napětí pomaleji než smluvní napětí v důsledku zvětšující se plochy příčného průřezu, která snižuje hodnotu napětí vztaženou k aktuální ploše [2; 5].

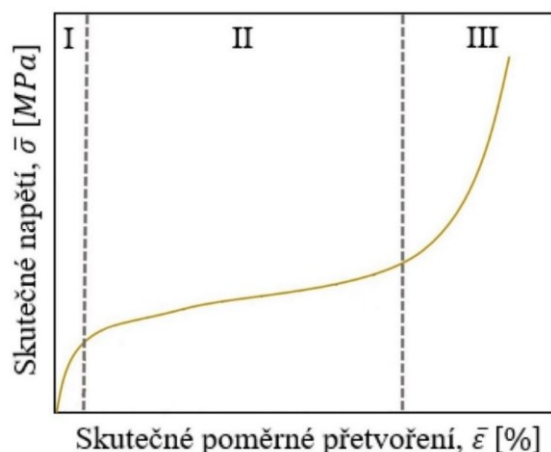
Celková změna délky tělesa  $\delta$  je dána rozdílem  $l - l_0$ , kde  $l$  je délka odpovídající působení zatěžující síly a  $l_0$  je délka v nezatíženém stavu. Smluvní poměrné přetvoření  $\varepsilon$  je potom definováno vztahem

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\delta}{l_0}. \quad (1.3)$$

Skutečné poměrné přetvoření  $\bar{\varepsilon}$  je dáno integrací přírůstků (resp. úbytků) délky vztažených k aktuální délce v průběhu zatěžování, což vede na vztah [2; 5]

$$\bar{\varepsilon} = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}. \quad (1.4)$$

Při kvazistatickém jednoosém tlakovém zatížení vykazují křivky skutečného napětí a deformace výraznou nelinearitu, přičemž v jejich průběhu lze identifikovat tři charakteristické fáze. V počáteční fázi roste napětí téměř lineárně s deformací (viz obrázek 1 – fáze I), přičemž vztah mezi napětím a poměrným přetvořením přibližně odpovídá Hookovu zákonu. Makromolekulární řetězce se orientují a statisticky přeskupují v rámci svých přirozených konformací. S pokračujícím zatěžováním růst napětí zpomaluje a materiál přechází do vysoce elastické fáze (viz obrázek 1 – fáze II). Dochází ke změnám konformace makromolekulárních řetězců a výrazně se snižuje entropie systému. Při dalším zatěžování nastává tzv. vytvrzovací fáze (viz obrázek 1 – fáze III), kdy napětí opět vzrůstá. Makromolekulární řetězce jsou zatěžovány až na úroveň narušení mezimolekulárních interakcí, což zvyšuje vnější zatížení potřebné k dosažení další deformace. Tento stav již nelze dostatečně popsat pouze entropickou teorií a začíná se výrazněji uplatňovat i energetický příspěvek k celkové mechanické odezvě [3; 6; 7].



Obrázek 1 Křivka skutečného napětí a deformace při jednoosém tlakovém zatížení.

(zdroj: [8])

Přestože je mechanická odezva pryží při působení jednoosého tlaku lineární pouze ve velmi úzkém rozsahu deformací, v některých aplikačních oblastech, kde jsou přetvoření omezená, lze její chování považovat za přibližně lineární [4; 6]. V inženýrské praxi se proto běžně používá zjednodušená aproximace pomocí Youngova modulu pružnosti v tahu/tlaku  $E$ , definovaného Hookovým zákonem

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (1.5)$$

jako konstanta úměrnosti mezi napětím a poměrným přetvořením [5; 6].

Přetvoření v příčném směru je charakterizováno Poissonovým číslem  $\nu$ , definovaným jako

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}}, \quad (1.6)$$

kde  $\varepsilon_{11}$  je poměrné přetvoření ve směru působící síly a  $\varepsilon_{22}$  poměrné přetvoření v příčném směru. Schopnost materiálu odolávat objemovým změnám při zatížení všestranným tlakem (napjatostí hydrostatického typu) charakterizuje objemový modul pružnosti  $K$ , který lze vyjádřit vztahem [2; 9]

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}. \quad (1.7)$$

Pryže vykazují hodnoty Poissonova čísla typicky v rozmezí 0,48 až 0,499 [7; 10]. Pro hodnotu  $\nu=0,5$  se objemový modul pružnosti limitně blíží nekonečnu, což odpovídá chování ideálně nestlačitelného materiálu. Reálné hodnoty objemového modulu pružnosti u pryží se pohybují v řádu tisíců, zatímco hodnoty Youngova modulu zpravidla v jednotkách. To umožňuje při analýze napětí a deformace zanedbat relativně malé objemové přetvoření ve srovnání s deformací tvaru a považovat materiál za objemově nestlačitelný [2; 4; 6].

### 1.1.1 Tvarový faktor

Při jednoosém tlakovém zatížení mohou nastat dva mezní případy přenosu zatěžující síly na zátěžné plochy tělesa. V případě volného skluzu zátěžných ploch po styčných plochách, jimiž je vyvíjeno tlakové zatížení, dochází k rovnoměrným příčným deformacím v důsledku stlačení (viz obrázek 2a). Síla  $F_O$ , potřebná pro stlačení válcového tělesa o poloměru  $R$  a výšce  $h$  o hodnotu  $\delta$ , se získá integrací normálového napětí  $\sigma_z$  přes zátěžnou plochu podle vztahu

$$F_O = \int_0^R 2\pi r \sigma_z dr = \int_0^R 2\pi r \cdot \frac{E\delta}{h} dr = \frac{\pi E \delta R^2}{h}, \quad (1.8)$$

kde  $r$  je radiální souřadnice [4; 11].

Naopak, pokud je skluzu zcela zabráněno (například dokonale tuhovou vazbou), dochází ke zvýšení tuhosti tělesa v důsledku omezení volných radiálních deformací v oblasti kontaktu (viz obrázek 2b). Toto omezení vede ke vzniku smykového napětí  $\tau_{rz}$ , které je

přímo úměrné normálové složce napětí a závisí na relativní souřadnici  $r/h$ . Za předpokladu lineární závislosti lze toto smykové napětí přibližně vyjádřit vztahem

$$\tau_{rz} \sim E \left( \frac{\delta}{h} \right) \left( \frac{r}{h} \right). \quad (1.9)$$

Tzv. „vytékání“ pryže, analogické toku viskózní kapaliny mezi dvěma tuhými deskami, je charakterizováno rozložením normálového napětí – tedy tlakem  $p$ , který je funkcí radiální souřadnice. Na základě rovnice rovnováhy v radiálním směru lze odvodit průběh tlaku ve tvaru

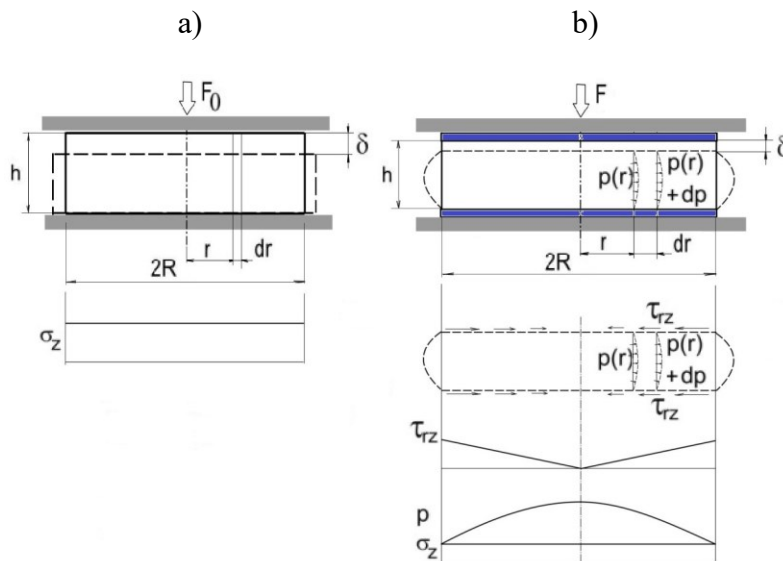
$$p(r) = E \left( \frac{\delta}{h^3} \right) r^2 - E \left( \frac{\delta}{h^3} \right) R^2 \sim E \left( \frac{\delta}{h^3} \right) (R^2 - r^2). \quad (1.10)$$

V důsledku nerovnoměrného rozložení tohoto tlaku je nutné pro dosažení požadovaného stlačení dodat přídatnou sílu  $F_p$ , která kompenzuje odpor materiálu způsobený omezením radiálních deformací (viz obrázek 3a). Tato síla odpovídá výslednici normálového napětí přes celý průřez a je dána integrací podle vztahu

$$F_p = \int_0^R 2\pi r p(r) dr = \frac{\pi E \delta R^4}{2h^3}. \quad (1.11)$$

Celková síla  $F$ , potřebná k dosažení dané deformace, je po dosazení a úpravě dána vztahem [4; 11; 12]

$$F = F_0 + F_p = \pi E \left( \frac{\delta}{h} \right) R^2 \left[ 1 + 2 \left( \frac{r}{2h} \right)^2 \right]. \quad (1.12)$$



Obrázek 2 Silové poměry při volném skluzu (a) a s dokonale tuhými vazbami (b) zátěžných ploch.

(zdroj: [4])

Podíl zátěžné plochy a volného bočního povrchu vyjadřuje bezrozměrný tvarový faktor  $f$ , definovaný jako

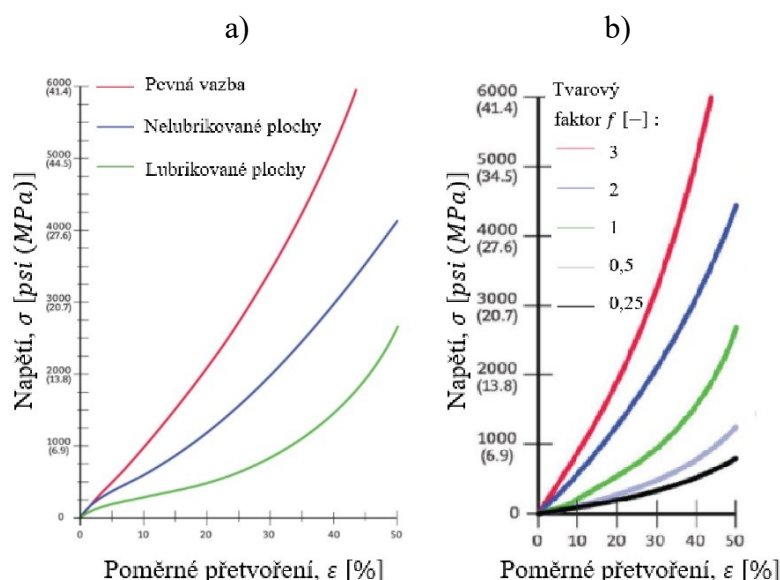
$$f = \frac{\pi R^2}{2\pi R h} = \frac{R}{2h}. \quad (1.13)$$

Čím vyšší je hodnota tohoto faktoru, tím menší je možnost volné příčné deformace tělesa, což vede ke zvýšení jeho tuhosti ve směru působící síly (viz obrázek 3b). Míru tohoto zvýšení vyjadřuje tvarová funkce  $\phi(f)$  ve tvaru

$$\phi(f) = 1 + 2f^2. \quad (1.13)$$

Rovnici pro celkovou sílu potřebnou ke stlačení tělesa (1.12), lze pak přepsat do tvaru [4; 11; 12]

$$F = F_0 \phi(f). \quad (1.14)$$



Obrázek 3 Křivky napětí a deformace při jednoosém tlakovém zatížení: vliv vazeb zátěžných ploch (a), vliv tvarového faktoru (b).

(zdroj: [13])

## 1.2 Viskoelastické vlastnosti

Viskoelastické chování se obecně projevuje kombinací časově nezávislé elastické deformace a disipativních viskózních jevů, v jejichž důsledku je celková mechanická odezva systému závislá na čase i historii zatěžování [2; 6].

Na rozdíl od ideálně elastických materiálů zde zatížení nevede pouze ke změně tvaru, ale také k přeměně části deformační energie na teplo. Tento jev je u pryží důsledkem tzv.

brzděné konformační elasticity, při níž dochází ke zpožděnému přeskupení makromolekulárních řetězců v důsledku vnitřních viskózních odporů. Ke viskoelastickému chování dále přispívají faktory, jako je degradace makromolekulární sítě, chemorelaxace nebo reverzibilní uvolňování fyzikálních vazeb [6; 7].

Při deformacích pod mezí linearity lze chování pryží popsat pomocí tzv. lineární viskoelasticity, která předpokládá, že závislost napětí na čase a deformaci je lineární a separabilní. Tato vlastnost umožňuje popis pomocí Volterrova integrálu druhého druhu, ve kterém je napětí vyjádřeno jako konvoluce vstupní funkce (např. deformace) a tzv. jádrové funkce odezvy, která vystihuje časovou charakteristiku systému. Zároveň platí Boltzmannův princip superpozice, podle něhož je celkový účinek vícenásobného působení sil v různých časech roven součtu dílčích odezev každé síly působící samostatně [6; 14].

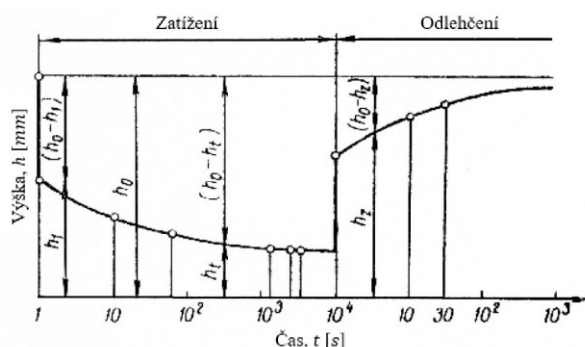
### 1.2.1 Kríp a relaxace napětí

Při aplikaci konstantního napětí dochází ke krípu (tečení), tedy k časově závislému nárůstu deformace. Bezprostředně po zatížení materiál reaguje elasticky — deformace odpovídá Hookovu zákonu — následně pokračuje časově závislé viskózní přetváření (viz obrázek 4) [2; 6; 14].

Časově závislý kríповý modul v tahu/tlaku  $E_c(t)$ , je definován jako poměr konstantního napětí  $\sigma$  a časově závislého poměrného přetvoření deformace  $\varepsilon(t)$ , tedy

$$E_c(t) = \frac{\sigma}{\varepsilon(t)}. \quad (1.15)$$

Po odlehčení dochází analogicky k relaxaci deformace – nejprve nastává okamžité elastické zotavení, poté postupný pokles deformace v čase v důsledku uvolnění vnitřního napětí [2; 6; 14].

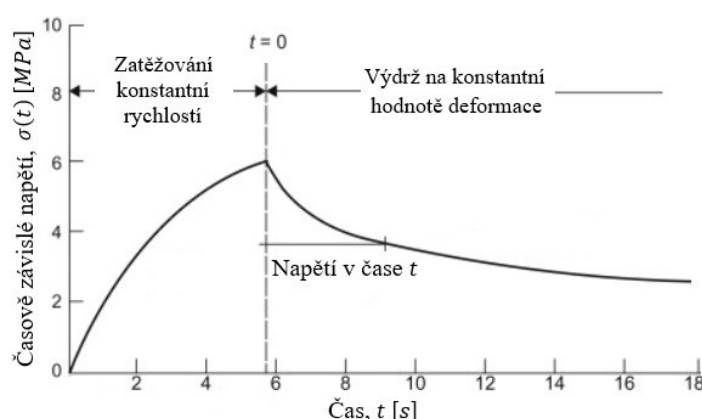


Obrázek 4 Časový průběh deformace při konstantním napětí.

(zdroj: [15])

Obdobné viskoelastické chování lze pozorovat i při konstantní deformaci, kdy dochází k relaxaci napětí – tedy k časově závislému poklesu vnitřního napětí v čase (viz obrázek 5). V tomto případě se definuje časově závislý relaxační modul pružnosti v tahu/tlaku  $E_r(t)$  jako poměr časově závislého napětí  $\sigma(t)$  a konstantního poměrného přetvoření  $\varepsilon$ , tedy [2; 6; 14]

$$E_r(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon}. \quad (1.16)$$



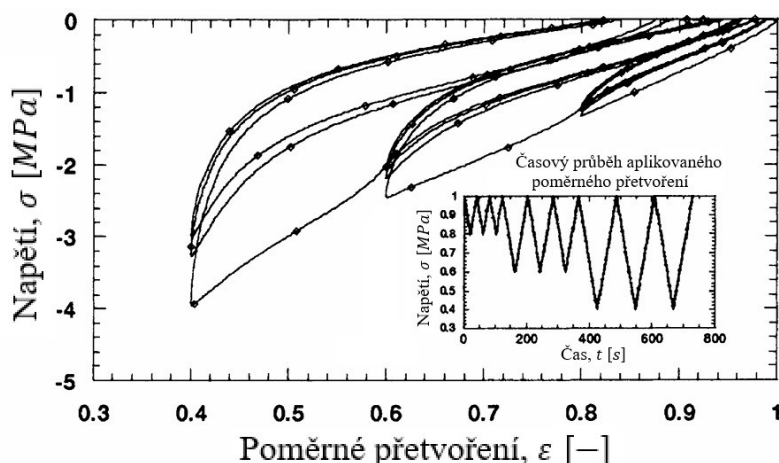
Obrázek 5 Časový průběh napětí při konstantní deformaci.

(zdroj: [16])

Analogicky k modulům v tahu/tlaku lze definovat i další viskoelastické charakteristiky, popisující chování materiálu při odlišných typech zatěžování, přičemž vztah mezi nimi je popsán konvolučním integrálem, jehož konkrétní tvar závisí na zvoleném modelu viskoelastického chování. V technické praxi se k jejich kvantitativnímu popisu často využívají tzv. relaxační a retardační spektra, která vyjadřují rozložení časových konstant jednotlivých vnitřních procesů probíhajících v materiálu [2; 6; 14].

### 1.2.2 Dynamická odezva

Při cyklickém zatěžování pryží lze v důsledku ireverzibilních změn v mikrostruktuře materiálu v prvních cyklech pozorovat specifický nelineární efekt spočívající ve ztrátě tuhosti. Tento jev, známý jako Mullinsův efekt, se projevuje snížením napěťové odezvy při opětovném dosažení stejné úrovně poměrného přetvoření, která byla aplikována v předchozím cyklu. V grafech závislosti napětí na deformaci se Mullinsův efekt projevuje oddělením zatěžovací a odlehčovací křivky (viz obrázek 6). S rostoucím počtem cyklů se tento rozdíl zmenšuje a křivky postupně konvergují ke stabilnímu limitnímu chování [7; 17; 18; 19].



Obrázek 6 Typický průběh Mullinsova efektu při cyklickém jednoosém tlakovém zatížení.

(zdroj: [19])

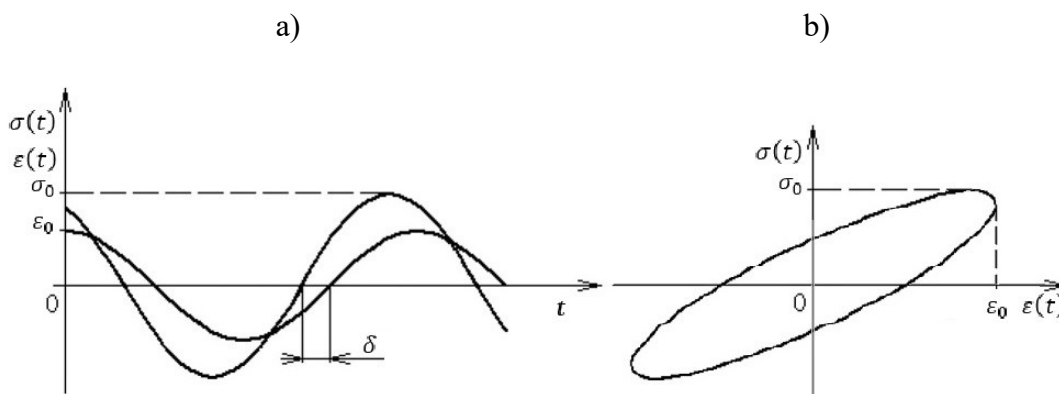
Při ustáleném harmonickém zatěžování dochází vlivem vnitřních disipativních mechanismů ke zpoždění deformační odezvy za napětovým podnětem. Výsledkem je uzavřená hysterezní smyčka, jejíž plocha odpovídá energii disipované během jednoho cyklu (viz obrázek 7). V harmonickém režimu lze časově závislé napětí  $\sigma(t)$  a poměrné přetvoření  $\varepsilon(t)$  vyjádřit jako

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cos(\omega t + \delta), \quad (1.17)$$

a

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cos(\omega t), \quad (1.18)$$

kde  $\omega$  je kruhová frekvence,  $\delta$  je fázový posun a  $\sigma_0$ , resp.  $\varepsilon_0$ , jsou amplitudy napětí a poměrného přetvoření [6; 7].



Obrázek 7 Deformační odezva při harmonickém namáhání: časový průběh napětí a poměrné deformace (a); závislost napětí na poměrné deformaci (b).

(zdroj: [20])

Na základě výše uvedených vztahů lze definovat komplexní modul pružnosti v tahu/tlaku  $E^*$  jako poměr komplexní amplitudy napětí ke komplexní amplitudě poměrného přetvoření podle vztahu

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \exp i\delta = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} (\cos \delta + i \sin \delta) = E' + iE'' , \quad (1.19)$$

kde  $i$  je komplexní jednotka,  $E'$  je reálná složka komplexního modulu a  $E''$  je imaginární složka komplexního modulu. Reálná složka popisuje odezvu, která je ve fázi s deformací, a odpovídá vratnému elastickému chování. Naproti tomu imaginární složka vyjadřuje fázově posunutou disipativní odezvu, spojenou se ztrátou mechanické energie během zatěžovacího cyklu [6; 7; 21].

Poměr imaginární a reálné složky komplexního modulu definuje tzv. činitel vnitřního tlumení  $\eta$ , který popisuje schopnost materiálu tlumit mechanické vibrace a přímo souvisí s velikostí fázového posunu mezi napětím a deformací, tedy [6; 7; 21; 22]

$$\eta = \frac{E''}{E'} = \tan \delta . \quad (1.20)$$

Analogickým způsobem lze pomocí fázového posunu a komplexní reprezentace zavést také komplexní modul pružnosti pro další typy zatěžování. Stejným principem lze kvantifikovat i komplexní deformační práci, jejíž reálná složka odpovídá uchované (vratné) energii, zatímco imaginární složka představuje disipovanou složku během jednoho zatěžovacího cyklu [6; 7; 21].

## 2 ELEKTRICKÝ ODPOR PRYŽÍ

Samotné pryže jsou vynikajícími elektrickými izolanty, jejichž měrný elektrický odpor se typicky pohybuje v rozmezí  $10^{13}$  až  $10^{16} \Omega \cdot \text{m}$ . Elektrická vodivost (dále jen vodivost) však může být výrazně zvýšena aditivací plniv s vysokou vnitřní vodivostí [3; 23].

### 2.1 Obecná teorie elektrického odporu

Velikost elektrického odporu v pevné látce je obecně určena koncentrací a mobilitou vodivostních elektronů. Na makroskopické úrovni je elektrický odpor definován Ohmovým zákonem

$$U = RI, \quad (2.1)$$

který vyjadřuje, že elektrický proud  $I$  procházející vodičem je přímo úměrný přiloženému elektrickému napětí  $U$ , přičemž konstantou této úměrnosti je elektrický odpor  $R$  [24; 25].

Hodnota elektrického odporu závisí na geometrických rozměrech vodiče. Pro porovnávání elektrických vlastností různých materiálů se proto používá jako materiálová konstanta měrný elektrický odpor  $\rho$ , definovaný jako poměr intenzity elektrického pole  $E$  k proudové hustotě  $J$  podle vztahu

$$\rho = \frac{E}{J}. \quad (2.2)$$

Elektrický odpor vodiče lze potom vyjádřit v závislosti na jeho délce  $l$  a průřezu  $S$  jako

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (2.3)$$

K popisu elektrických vlastností materiálů se rovněž často používá měrná elektrická vodivost  $\sigma$  (dále jen vodivost) definovaná jako převrácená hodnota měrného elektrického odporu, tedy [24; 25; 26]

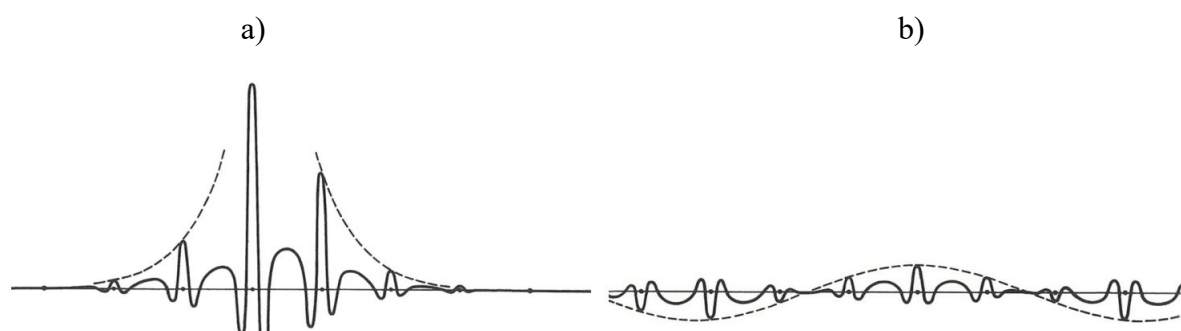
$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (2.4)$$

#### 2.1.1 Vznik elektrického odporu

Klasické modely, jako je Drudeho teorie, poskytují relativně dobré výsledky v popisu makroskopické vodivosti krystalických pevných látek, avšak nedokáží vysvětlit jemnější detaily chování zejména při nízkých teplotách a v přítomnosti silně neuspořádané struktury. Selhávají také v předpovědi kvantově-mechanických jevů, které zásadně ovlivňují

mechanismy transportu elektrického náboje na mikroskopické úrovni. Vzhledem ke složitosti těchto interakcí je nutné použít statistický popis systému. Obecný rámec k tomuto účelu poskytuje teorie lineární odezvy, která popisuje odezvu systému na malé poruchy vychýlením ze stavu rovnováhy. Platnost této teorie je však omezena pouze na případy, kdy střední energie poruchy je malá ve srovnání s energií rovnovážného stavu – tedy nelze ji použít např. v situacích kdy dochází k výrazné deformaci či destrukci materiálu [26; 27].

Z kvantově-mechanického hlediska mají elektrony vlnový charakter a jejich chování je popsáno Schrödingerovou rovnicí. Ve vázaných systémech (např. elektron v atomu) mohou elektrony nabývat pouze diskretních energetických hladin – tzv. vázaných stavů – jejichž vlnová funkce je prostorově lokalizovaná (viz obrázek 8a). Oproti tomu vodivostní elektrony se nacházejí v asymptoticky volných stavech – tzv. rozptylových stavech – které jsou spojité, rozprostřené v prostoru a umožňují volný pohyb elektronů napříč celým krystalem (viz obrázek 8b) [27; 28].



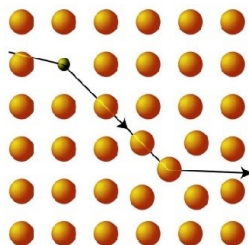
Obrázek 8 Vlnová funkce Blochova typu: lokalizovaný stav (a); delokalizovaný stav (b).

(zdroj: [29])

Díky svému vlnovému charakteru se elektrony v ideálním krystalickém materiálu mohou šířit bez jakéhokoli odporu, neboť jejich vlnová funkce zůstává koherentní s periodickým potenciálem atomů krystalické mřížky. Díky koherenci se elektronová vlna neodchyluje od svého směru a není rozptylována – periodická mřížka tak pro elektrony prakticky „neexistuje“ [27].

Skutečné krystalické látky však nejsou dokonale periodické a vždy obsahují jistý stupeň neuspořádanosti způsobený různými typy mřížkových poruch – bodovými (např. vakance, substituce a intersticiály), čárovými (např. hranové a šroubové dislokace), plošnými (např. hranice zrn a podzrn) a prostorovými (shluky příměsí, fázová rozhraní) [30]. Tyto odchylky od ideálního krystalu působí jako náhodně fluktuující potenciály, které rozptylují

elektronové vlny (viz obrázek 9). Výsledkem je ztráta koherence a vznik obecně difuzního mechanismu transportu, který se makroskopicky projevuje konečným elektrickým odporem [27; 31].



Obrázek 9 Rozptyl elektronu na poruchách krystalové mřížky, zobrazena je substituční příměs a intersticiální atom

(zdroj: [31])

### 2.1.2 Zpětný rozptyl elektronů

Rozptyl elektronů na poruchách mřížky není pouze náhodný – kvantová mechanika umožňuje popsat jevy, které v klasickém pojetí neexistují. Jedním z nejvýznamnějších efektů je zesílení rozptylu proti směru působení vnějšího elektrického pole, tedy proti přiloženému elektrickému napětí. I v rámci klasické Drudého teorie může dojít k tomu, že se elektron po několika rozptylech vrátí zpět na místo, kde se již dříve nacházel. Zesílení těchto zpětných rozptylů kvantovými procesy spočívá v tom, že kvantová mechanika předpovídá vyšší pravděpodobnost návratu, než jakou udává mechanika klasická [28; 31].

Tento jev je znám jako tzv. slabá lokalizace, která vzniká v důsledku interference elektronových vln na uzavřených trajektoriích. Pokud budeme uvažovat elektron, který se může po uzavřené smyčce pohybovat dvěma směry – ve směru hodinových ručiček a proti němu (viz obrázek 10), v klasickém popisu se pravděpodobnosti realizace jednotlivých směrů,  $P_1$  a  $P_2$ , jednoduše sčítají, takže celková pravděpodobnost návratu na výchozí místo je

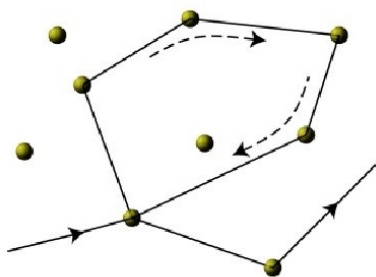
$$P_{klas.} = P_1 + P_2 . \quad (2.5)$$

V kvantové mechanice se však sčítají tzv. amplitudy pravděpodobnosti, přičemž výsledná pravděpodobnost je dána kvadrátem součtu těchto amplitud. Pro zmíněné dva směry pohybu elektronu můžeme vyjádřit amplitudy  $A_1 = \sqrt{P_1}$  a  $A_2 = \sqrt{P_2}$ , amplituda pravděpodobnosti pro smyčku jako celek je potom  $A = A_1 + A_2$ . Odpovídající pravděpodobnost návratu na výchozí místo je

$$P_{kvant.} = A^2 = (A_1 + A_2)^2 = P_1 + P_2 + 2A_1A_2 > P_{klas.} . \quad (2.6)$$

Člen  $2A_1A_2$  představuje interferenční příspěvek, který zvyšuje pravděpodobnost návratu elektronu na výchozí místo a tím i výsledný elektrický odpor. Tento jev je zcela analogický interferenci fotonů v Youngově dvouštěrbinovém experimentu [28; 31; 32; 33].

Slabá lokalizace se tím výrazněji projevuje, čím větší je koncentrace mřížkových poruch, neboť se zvyšuje počet možných návratových trajektorií a narůstá vliv interferenčních jevů. Stejně tak se její účinek zesiluje s klesající dimenzionalitou systému, ve dvourozměrných strukturách se návraty po uzavřených smyčkách stávají pravděpodobnějšími, což vede ke značnějšímu nárůstu elektrického odporu [31; 33].



Obrázek 10 Zpětný rozptyl elektronu

(zdroj: [31])

Při dostatečně silné neuspořádanosti může interferenční efekt přerůst do extrému, kdy všechny elektronové stavy daného materiálu se stanou lokalizovanými. V tomto režimu se elektron nedokáže šířit systémem ani při působení vnějšího elektrického pole. Pohyb elektronů se zcela zastaví, difuze zanikne a z původně vodivého materiálu se stává elektrický izolant. Tento jev je znám jako tzv. Andersonova lokalizace, též silná lokalizace. Zásadní na Andersonově lokalizaci je, že přechod z vodivého do izolačního stavu může nastat pouze změnou koncentrace poruch, aniž by se změnila energie elektronů, tedy stavy s identickou energií mohou být buď volné, nebo lokalizované podle míry neuspořádanosti systému. Tento jev je unikátní pro kvantové systémy s náhodným potenciálem a nemá obdobu v klasické mechanice [29; 31; 34; 35].

Andersonova lokalizace přinesla rozsáhlý rozvoj teoretických modelů, avšak dodnes neexistuje obecně uznávaný univerzální popis, který by kvantitativně postihl všechny aspekty tohoto přechodu. Jeden z důvodů je, že lokalizované stavy jsou vázané v konečném objemu, zatímco makroskopické vzorky jsou z hlediska kvantové teorie efektivně nekonečně

velké. Kvantitativně lze proto popisovat pouze nepřímé důsledky lokalizace, například pomocí změn elektrického odporu [31; 34].

## 2.2 Elektricky vodivé saze

Nejpoužívanější skupinou vodivých plniv jsou saze, a to díky své vysoké vodivosti, relativně nízké ceně a dobré dispergovatelnosti v matrici. Ačkoliv téměř všechny druhy sazí mohou v určité míře přispívat ke zvýšení vodivosti, byla v průběhu let vyvinuta specifická skupina tzv. vodivých sazí, které jsou cíleně optimalizovány pro aplikace vyžadující vodivé vlastnosti. Tyto saze se obecně vyznačují velmi nízkou sypnou hmotností, vysokým stupněm agregace a porozity, malým průměrem primárních částic a vysokou chemickou čistotou povrchu – význam těchto vlastností je rozebrán v kapitole 2.5.1 [23; 36].

Klasifikace sazí je podrobně specifikována normou ASTM D1765 [37]. Vodivé saze lze rozdělit podle hodnot specifického povrchu (BET) a olejového absorpčního čísla (OAN) – viz tabulka 1 [36].

Tabulka 1 Rozdělení elektricky vodivých sazí dle hodnot specifického povrchu (BET) a olejového absorpčního čísla (OAN).

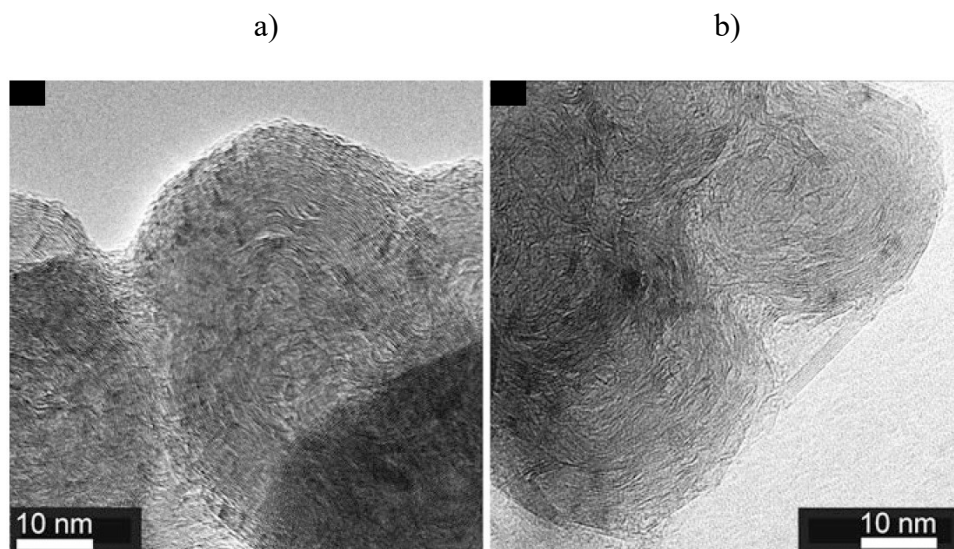
|             | BET [ $\text{m}^2/\text{g}$ ] | OAN [ $\text{ml}/100 \text{ g}$ ] |
|-------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Vodivé      | 120                           | 100                               |
| Supervodivé | 250                           | 180                               |
| Extravodivé | 800-1000                      | 300-400                           |
| Ultravodivé | 1300-1400                     | >600                              |

(zdroj: [36])

### 2.2.1 Fyzikální vlastnosti

Jedná se o vůbec nejčistší formu sazí, s obsahem uhlíku dosahujícím až 99,8 % [38]. Mikrostruktura je tvořena různě rozvinutou grafitickou strukturou, která se pohybuje od parakrystalických primárních částic tvořených soustředně uspořádanými planárními vrstvami hexagonálně uspořádaných atomů uhlíku, až po částice obsahující malé grafitické nebo turbostratické domény (viz obrázek 11) [23]. V planárních vrstvách jsou atomy uhlíku vázány silnými kovalentními vazbami – hybridizace  $\text{sp}^2$ , zatím co jednotlivé vrstvy jsou mezi sebou spojeny pouze slabými van der Waalsovými vazbami, což způsobuje výrazné anizotropní vlastnosti. Elektrická vodivost je vysoká ve směru rovin vrstev díky přítomnosti delokalizovaných  $\pi$ -elektronů, zatímco ve směru kolmo na vrstvy je přibližně o čtyři řády nižší. Tato vrstevnatá struktura zároveň umožňuje snadné klouzání jednotlivých vrstev po sobě, což se projevuje v mechanických vlastnostech – zejména křehkosti při smykovém

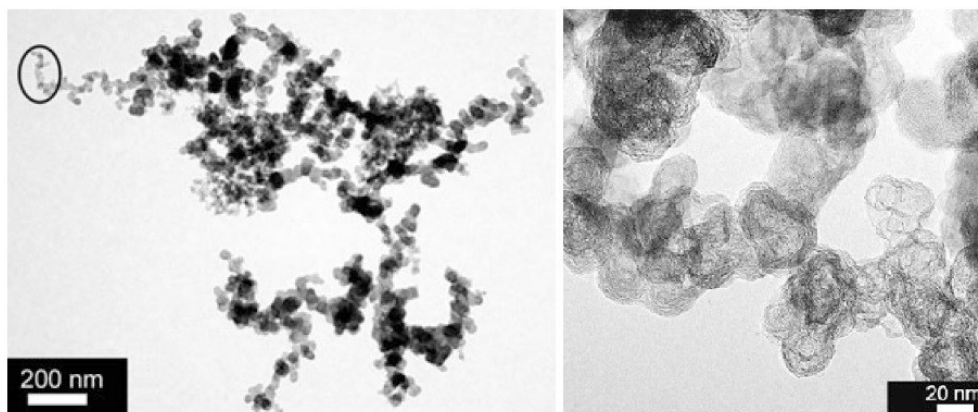
a tahovém či tlakovém zatížení. Efektivní přenos fononů v rovině vrstev je příčinou vysoké tepelné vodivosti [39; 40].



Obrázek 11 TEM snímky primárních částic různých druhů acetylenových elektricky vodivých sazí: mikrostruktura s vysokým obsahem rovině uspořádaných grafitických domén (a); mikrostruktura tvořená deformovanými uhlíkovými vrstvami soustředně uspořádanými kolem růstového jádra (b).

(zdroj: [23])

Primární částice mají více či méně sférický tvar a jejich střední průměr se typicky pohybuje v řádu několika desítek nanometrů. Spojují se silnými kovalentními vazbami do tuhých agregátů, které následně vytvářejí rozsáhlejší aglomeráty – často řetězcovité, vláknité nebo hroznovité struktury – o velikosti až několika stovek nanometrů (viz obrázek 12). Složitá prostorová architektura s výrazným vnitřním členěním vede k vysoké struktuře a značnému objemu dutin uvnitř těchto útvarů [23].



Obrázek 12 TEM snímky aglomerátů acetylenových extravodivých sazí.

(zdroj: [23])

Typické hodnoty měrného elektrického odporu se pohybují v rozmezí  $10^{-1}$  až  $10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$ , přičemž výsledná hodnota závisí především na struktuře a vnitřním uspořádání částic. Vzhledem k výrazné anizotropii grafitu má významný vliv orientace grafitických domén a jejich prostorová konfigurace. Čím silnější je vzájemné propojení těchto domén ve vodivém směru (tedy podél rovin vrstev), tím nižší je měrný elektrický odpor celé saze [23; 40].

Ačkoliv velikost primárních částic sama o sobě nemá jednoznačný vliv na vnitřní vodivost, významnou roli může hrát celková porozita systému. Zatímco běžná pórovitost má zpravidla jen omezený dopad, při velmi vysoké míře poréznosti může docházet k efektivnímu usměrnění toku náboje. Typickým příkladem jsou tzv. ultravodivé saze, tvořené kulovitými dutými částicemi s velmi malým poloměrem. Tyto částice se skládají z tenkých skořápek grafitických vrstev, jejichž specifické uspořádání umožňuje dosahovat velmi vysoké vodivosti, a to i přes jejich nízkou objemovou hmotnost [36; 23].

## 2.3 Perkolační teorie

Při dosažení určité kritické koncentrace částic plniva, tzv. perkolačního prahu, dochází v matrici k vytvoření souvislých vodivých cest, což vede k dramatickému poklesu elektrického odporu materiálu (viz obrázek 13). Tento přechod z izolačního do vodivého stavu je popsán tzv. mocninným zákonem, který vychází z předpokladu, že pravděpodobnost přenosu elektrického náboje mezi dvěma vodivými částicemi klesá exponenciálně s rostoucí vzdáleností mezi nimi. Za předpokladu statisticky náhodného rozmístění částic v matrici lze chování vodivosti v okolí perkolačního prahu rozdělit do tří režimů v závislosti na poměru objemového zlomku plniva  $v_f$  k hodnotě kritické koncentrace  $v_c$  [23; 41; 42].

V oblasti pod perkolačním prahem, tedy pro  $v_f < v_c$ , je měrný elektrický odpor  $\rho$  popsán vztahem

$$\rho = \rho_m (v_c - v_f)^q, \quad (2.7)$$

kde  $\rho_m$  je měrný elektrický odpor samotné matrice a exponent  $q$  charakterizuje rychlost růstu vodivosti při přibližování se k perkolačnímu prahu. Na samotné hranici perkolace, kdy  $v_f = v_c$ , je měrný elektrický odpor popsán přechodovým vztahem

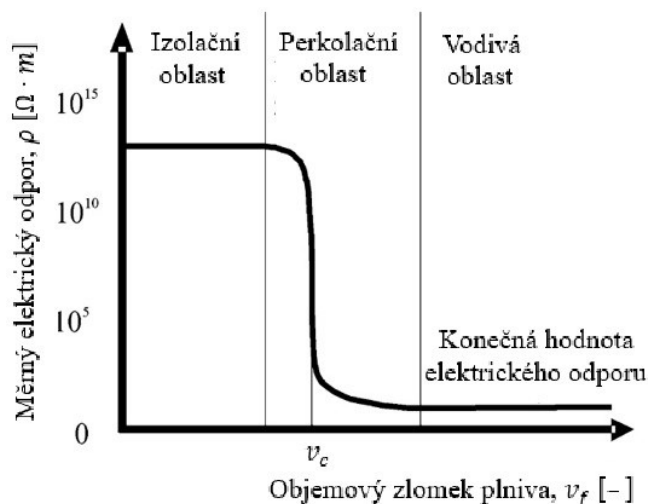
$$\rho = \rho_f \left( \frac{\rho_m}{\rho_f} \right)^s, \quad (2.8)$$

kde  $\rho_f$  označuje měrný elektrický odpor plniva a exponent  $s$  souvisí s charakterem propojení částic v perkolující síti. Při překročení prahu perkolace, tedy pro  $v_f > v_c$ , dochází k ustavení souvislé vodivé sítě a měrný elektrický odpor klesá již jen omezeně podle vztahu

$$\rho = \rho_f (v_f - v_c)^{-t}, \quad (2.9)$$

kde exponent  $t$  popisuje, jak rychle měrný elektrický odpor klesá se zvyšující se koncentrací vodivého plniva nad kritickou hodnotu. Uvedené exponenty  $q, s, t$  jsou mezi sebou definovány vztahem [41; 43]

$$q = t \left( \left( \frac{1}{s} \right) - 1 \right). \quad (2.10)$$



Obrázek 13 Perkolační křivka.

(zdroj: [23])

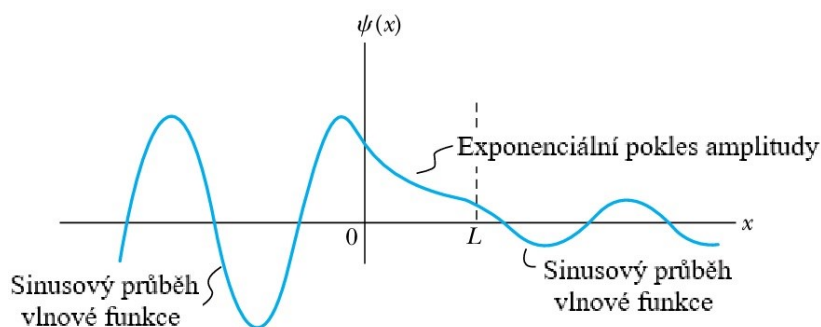
Tvar závislosti měrného elektrického odporu na koncentraci vodivého plniva je u většiny typů plniv a matric obdobný. Rozdíly se projevují především v hodnotě koncentrace odpovídající dosažení perkolačního prahu, ve výsledné hodnotě měrného elektrického odporu ve vodivé oblasti a v experimentálně určených hodnotách exponentů  $q, s, t$ , jejichž rozptyl bývá značný. Faktory ovlivňující tyto rozdíly jsou podrobně rozebrány v kapitole 2.5 [41; 43].

## 2.4 Mechanismy transportu elektrického náboje

V tzv. klasických perkolačních modelech je elektrická konektivita chápána čistě geometricky – jakmile se částice plniva fyzicky dotýkají, předpokládá se mezi nimi nulový přechodový odpor, zatímco mezi částicemi, které jsou od sebe jakkoliv oddělené, je odpor

považován za prakticky nekonečný. V reálných systémech však mohou být částice plniva i při vysokých objemových koncentracích odděleny tenkou vrstvou matrice, která vytváří diskontinuity ve vodivé síti. Transport elektrického náboje pak probíhá prostřednictvím kvantově-mechanického tunelování skrze interferující makromolekulární řetězce matrice [23; 43].

Kvantově-mechanické tunelování je jev, při němž se elektron pohybuje skrze potenciálovou bariéru, aniž by měl dostatek kinetické energie k jejímu překonání. Vznik tohoto jevu je důsledkem vlnové povahy elektronů – jejich vlnová funkce se neukončuje ostře na hranici potenciálové bariéry, ale exponenciálně do ní zasahuje, což umožňuje určitý netriviální tok pravděpodobnosti výskytu elektronu na druhé straně bariéry (viz obrázek 14) [44].



Obrázek 14 Kvantově-mechanické tunelování elektronu skrz potenciálovou bariéru;  $\psi$  značí vlnovou funkci elektronu,  $x$  je prostorová souřadnice a  $L$  šířka potenciálové bariéry.

(zdroj: [44])

Reálné matrice obsahují lokalizované energetické stavy, tzv. pasti. Tyto stavy se typicky vyskytují na rozhraní plniva a matrice, v defektních oblastech makromolekulárního řetězce nebo v důsledku přítomnosti polarizovaných chemických skupin. Z hlediska elektronového transportu se pasti často chovají jako efektivně kladně nabitě kvazičástice – díky schopnosti dočasně zachytit elektron vytvářejí lokální potenciálová minima, která modifikují profil potenciálové bariéry. V takových případech elektron během přechodu neprochází bariérou přímo, ale přeskakuje přes sérii těchto lokalizovaných stavů, přičemž dočasně setrvává v jednotlivých pastech [45; 46].

Pravděpodobnost kvantově-mechanického tunelování mezi vodivými částicemi závisí na jejich vzájemné vzdálenosti, teplotě systému a na intenzitě přiloženého elektrického pole.

Tzv. tunelovací odpor mezi dvěma blízkými, avšak nedotýkajícími se částicemi plniva lze za určitých předpokladů popsat empirickým vztahem

$$\rho = \rho^0 \exp \left[ -\frac{T_1}{T+T_e} \left( 1 - \frac{E}{E_0} \right)^2 \right], \quad (2.11)$$

kde  $\rho^0$  je referenční hodnota tunelovacího odporu, která shrnuje vlastnosti systému v referenčních podmínkách.  $T$  je absolutní teplotu systému,  $T_e$  je efektivní teplotní konstanta, která souvisí s elektronovými fluktuacemi a  $T_1$  charakterizuje citlivost tunelovacího procesu na teplotu, která se odvíjí se mimo jiné od průměrné vzdálenosti mezi sousedními částicemi. Intenzita přiloženého elektrického pole je označena  $E$ , a  $E_0$  je charakteristická hodnota elektrického pole, která udává, jak silně elektrické pole ovlivňuje pravděpodobnost tunelování [23; 29; 44].

V důsledku toho je třeba celkový elektrický odpor  $R$  pryže chápat jako sumy odporů jednotlivých agregátů plniva  $R_{a,j}$  plus sumy meziagregátových odporů  $R_{e,j}$  [23; 36]

$$R = \sum_{i=0}^n R_{a,i} + \sum_{j=0}^n R_{e,j}. \quad (2.12)$$

V systémech bez přímé geometrické konektivity, by se teoreticky neměly vyskytovat ostré prahové přechody, které předpokládá klasická perkolační teorie. Experimentální výsledky však ukazují, že i tyto tzv. negeometrické systémy vykazují chování, které lze dobře popsat mocninnou závislostí klasického typu [43; 47].

Tento zdánlivý paradox vedl k formulaci tzv. tunelově-perkolačního modelu, který zohledňuje exponenciální útlum tunelové pravděpodobnosti a statistické rozložení vzdáleností mezi částicemi. Model předpokládá, že významný přenos náboje nastává pouze mezi částicemi oddělenými vzdáleností menší nebo srovnatelnou s charakteristickou tunelovací vzdáleností. Takto vymezené „efektivní sousedské“ interakce tvoří dominantní tunelovou síť, která určuje výslednou vodivost systému. Perkolační práh je v tomto smyslu definován jako minimální koncentrace částic nutná k propojení této tunelovací sítě. Rovněž je tímto modelem vysvětlována neuniverzálnost hodnoty exponentů  $q, s, t$ , pozorovaná ve studiích, jako důsledek specifického rozložení tunelovacích vzdáleností mezi částicemi v rámci této dominantní sítě [43; 41].

## 2.5 Faktory ovlivňující elektrický odpor

Perkolační chování pryží a s ním související konečná hodnota elektrického odporu ve vodivé oblasti jsou výsledkem komplexní interakce mezi vodivým plnivem, matricí a zpracovatelskými podmínkami [36; 43].

### 2.5.1 Vliv plniva

Klíčovým faktorem ovlivňujícím koncentraci nutnou k dosažení perkolačního prahu je disperze a mikrostruktura sazí. Vysoký stupeň agregace a porozity přispívá k efektivnímu vytváření vodivých cest – rozvětvená morfologie sazí umožňuje hlubší pronikání elastomerní matrice do struktury plniva, aniž by došlo k přerušení elektrických kontaktů mezi jednotlivými agregáty. Naopak příliš jemné primární částice s vysokým měrným povrchem sice poskytují větší počet potenciálních kontaktních bodů, ale zároveň vykazují silnou tendenci k aglomeraci, což komplikuje dosažení rovnoměrné distribuce v matrici [48; 49; 50].

Významnou roli hraje také oxidační stav povrchu plniva – přítomnost kyslíkatých funkčních skupin působí jako elektronové pasti a snižuje schopnost efektivního transportu elektrického náboje [51; 52].

### 2.5.2 Vliv matrice

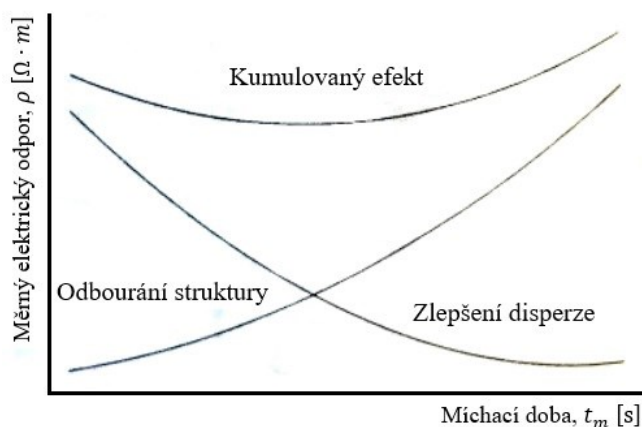
Vliv matrice na výsledný odpor se projevuje především jejím chemickým složením, povrchovým napětím a polaritou [36].

Mezifázové vlastnosti určují, jakým způsobem se plnivo v matrici distribuuje a do jaké míry může dojít k vytvoření spojitě vodivé sítě. Pokud jsou interakce mezi agregáty sazí silnější než jejich afinita k makromolekulárnímu řetězci, vznikají aglomeráty, které zhoršují rovnoměrné rozptýlení částic a vedou ke zvýšení elektrického odporu. Naopak vyšší kompatibilita plniva s matricí podporuje rovnoměrnou distribuci, bývá však často spojena s potřebou vyšší objemové koncentrace pro dosažení perkolačního prahu [49; 53].

Matrice zároveň významně ovlivňuje charakter kvantově-tunelovacích spojení mezi částicemi plniva, jak již bylo zmíněno v kapitole 2.4. Polární vlastnosti makromolekulárních řetězců se podílejí na výšce a šířce potenciálových bariér, a tím i na pravděpodobnosti kvantově-mechanického tunelování elektrického náboje [54].

### 2.5.3 Vliv zpracování

Výsledné elektrické vlastnosti pryže jsou výrazně ovlivněny také podmínkami zpracování gumárenské směsi. V počáteční fázi míchání dochází k postupnému vytváření vodivých cest, což vede ke snižování elektrického odporu. Příliš dlouhé nebo intenzivní mechanické zpracování však může narušit strukturu agregátů sazí, rozbít jemné morfologické vazby a způsobit opětovné zvýšení elektrického odporu (viz obrázek 15) [36; 55; 56].



Obrázek 15 Vývoj měrného elektrického odporu v průběhu míchání gumárenské směsi.

(zdroj: [36])

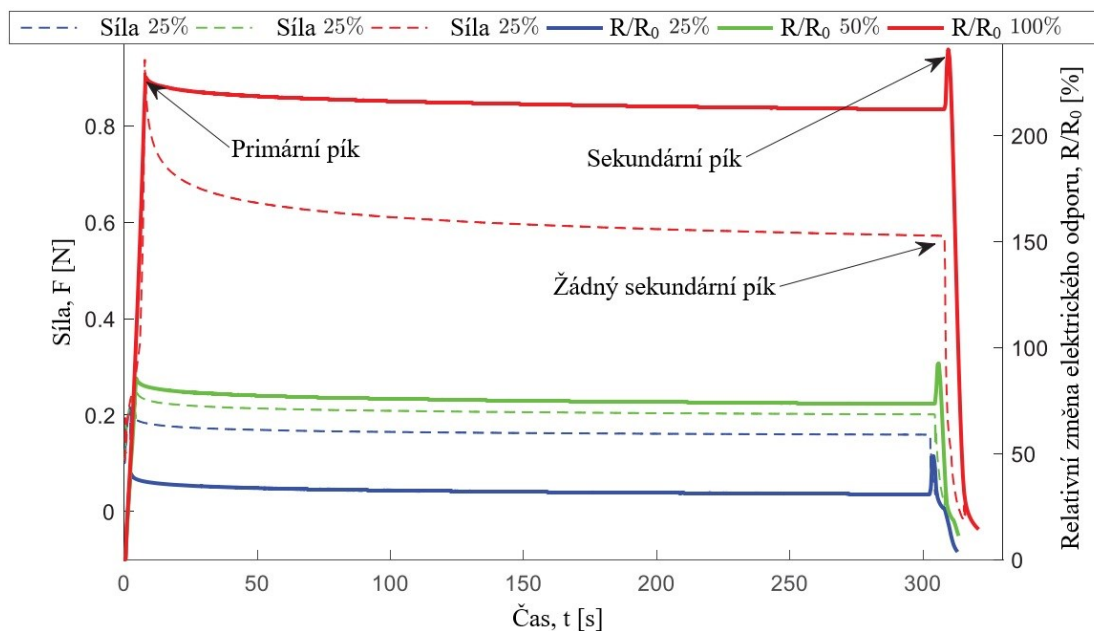
Vysoké smykové síly při dalších procesech – typicky při vytlačování nebo vstřikování – mohou dále narušovat integritu vodivé sítě. Naopak šetrnější metody, jako je lisování, obvykle vykazují lepší zachování vodivé struktury, a tedy i nižší hodnoty elektrického odporu [36].

Významnou roli hrají také procesní podmínky vulkanizace, které ovlivňují kinetiku síťování a tím i konečnou mikrostrukturu materiálu. Fázové rozložení, lokalizace částic a charakter potenciálových bariér jsou do značné míry fixovány právě během vulkanizace a mají zásadní vliv na efektivitu elektrického transportu v hotovém vulkanizátu [43; 57].

Drobné strukturální poruchy, jako jsou uzavřené plynové inkluze vzniklé při vulkanizaci, mohou lokálně narušit vodivou síť a vést ke zvýšení odporu, případně ke vzniku elektrické anizotropie [58].

## 2.6 Vliv mechanického napětí na elektrický odpor

Při mechanickém zatížení vykazují vodivé pryže výraznou piezorezistivní odezvu, která je obecně silně nelineární, často nemonotónní, a časově závislá. Nejčastěji používanou metodou pro hodnocení vlivu mechanického napětí na elektrický odpor těchto materiálů jsou jednoosé tahové testy, prováděné za různých scénářů zatěžování při souběžném měření elektrického odporu. V řadě studií byla pozorována neočekávaná odporová maxima (tzv. píky) – náhlé vrcholy v odporové odezvě, které se typicky objevují v oblasti návratu deformace k výchozímu stavu, buď na počátku uvolnění, nebo při úplném odlehčení (viz obrázek 16). Konkrétní podoba jevů závisí na celé řadě faktorů, jako jsou rychlost zatěžování, typ a vlastnosti matrice, typ a koncentrace vodivého plniva, historie předchozího zatěžování a topologie zkušební tělesa [58; 59; 60; 61; 62; 63; 64; 65; 66; 67; 68; 69; 70].



Obrázek 16 Typická odporová odezva pryže při zatížení jednoosým tahem.

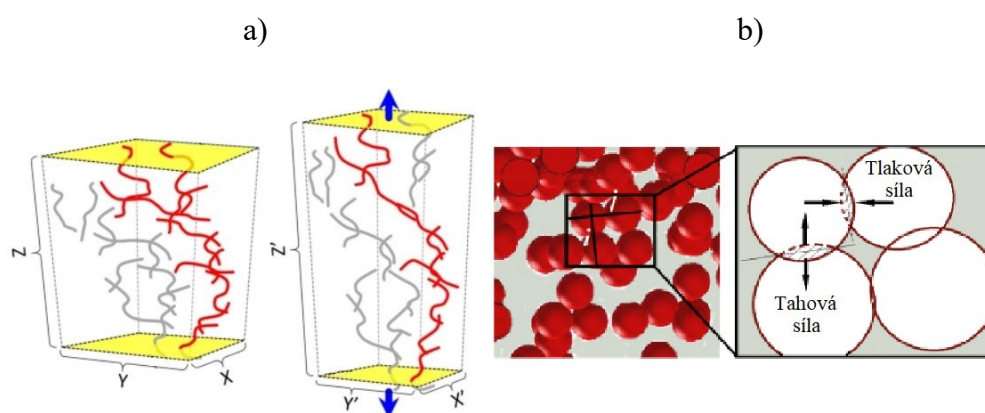
(zdroj: [67])

Tato neočekávaná odporová maxima jsou obecně přisuzovány mechanicky indukovaným změnám topologie perkolující sítě, zahrnujícím její destrukci, rekonstrukci a reformaci v průběhu zatěžovacího cyklu (viz obrázek 17a) [71; 70].

Během jednoosého tahového zatížení se částice plniva ve směru zatížení vzdalují, zatímco v příčném směru se v důsledku kontrakce přibližují (viz obrázek 17b). V důsledku toho dochází ke změně dominantního transportního mechanismu – ve směru deformace přechází přímé kontakty na méně efektivní transport elektrického náboje kvantově-

mechanickým tunelováním, zatímco v příčném směru je situace opačná. V případě jednoosého tlakového zatížení je situace analogicky obrácená. Tento konkurenční pohyb vede ke komplikovaným nelineárním anizotropním změnám v konektivitě sítě [58; 61; 67].

V těchto změnách se dále projevují časově závislé viskoelastické vlastnosti pryží, které způsobují časově zpožděné reakce struktury perkolující sítě. Rychlost deformace a relaxace není v obou směrech stejná, což vede k dočasné nerovnováze v počtu vodivých drah. V určitých fázích zatěžovacího cyklu tak může přechodně převládnout mechanismus s nižší nebo vyšší efektivitou transportu náboje, což se projevuje jako výše zmíněná neočekávaná odporová maxim [67; 72].



Obrázek 17 Mechanicky indukovaná změna topologie perkolující sítě na makroskopické (a) a mikroskopické (b) úrovni.

(zdroj: a) [73], b) [58])

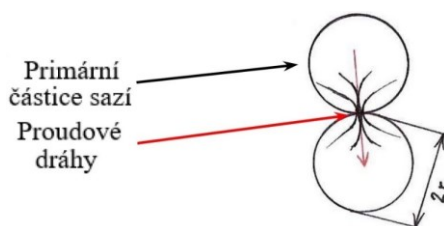
Významnou roli při popisu pozorovaných jevů hraje také evoluce struktury plniva v průběhu cyklického zatěžování, kdy v prvních cyklech může docházet k nevratným změnám perkolující sítě. Tato evoluce vede ke vzniku nové, mechanicky stabilnější konfigurace vodivé struktury, která se projevuje elektrickou hysterezí, jež s rostoucím počtem zatěžovacích cyklů obvykle slábne, a současným prodlužováním relaxační doby elektrického odporu [74; 75].

Tato obecně přijímaná teorie sice vystihuje hlavní charakteristiky piezorezistivní odezvy pryží, avšak zřídka kdy bývá podrobně diskutována. Zásadní omezení spočívá v tom, že vychází téměř výhradně z pozorování při tahovém zatěžování a opomíjí detailnější analýzu fyzikálních procesů odehrávajících se na mikroskopické úrovni.

### 2.6.1 Mikroskopické faktory ovlivňující odporovou odezvu

Kromě mechanismu popsaného v kapitole 2.6.1 bylo v literatuře identifikováno několik dílčích fyzikálních jevů, které mohou na mikroskopické úrovni ovlivňovat výslednou piezorezistivní odezvu. Tyto faktory působí souběžně se změnami struktury perkolující sítě a mohou modifikovat lokální podmínky transportu elektrického náboje, a tím i celkové chování elektrického odporu při mechanickém zatížení [59; 76].

Jedním z diskutovaných faktorů je vznik vnitřního hydrostatického tlaku v okolí částic plniva. Tento tlak, vyvolaný rozložením mechanického napětí a lokálními deformacemi makromolekulární sítě, ovlivňuje nejen vzájemnou vzdálenost částic plniva, ale i jejich případnou deformaci. Tím dochází ke změně efektivní geometrie elektrických kontaktů. To přímo ovlivňuje lokální proudovou hustotu i pravděpodobnost kvantově-mechanického tunelování. V idealizovaném případě se sférické částice dotýkají pouze bodově, čímž vznikají tzv. singularity proudové hustoty, které vedou k výraznému zvýšení kontaktního odporu (viz obrázek 18). V reálném systému je však tvar a rozsah kontaktu ovlivněn deformovatelností částic a viskoelastickým tokem okolní matrice [59; 76; 77].



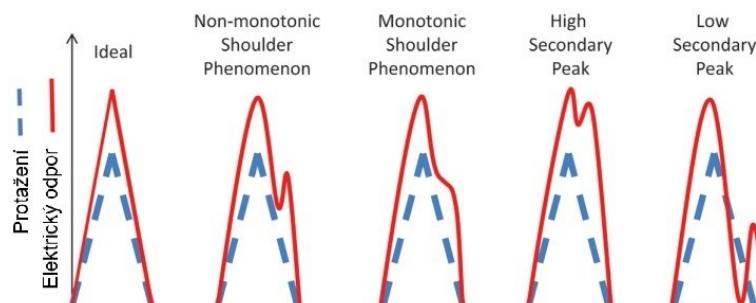
Obrázek 18 Idealizovaný kontakt dvou sférických částic.

(zdroj: [77])

Dalším diskutovaným aspektem je nestabilita trajektorií proudových drah, kdy transport elektrického náboje při opakovaných cyklech neprobíhá vždy po identických cestách – i při nominálně stejném zatížení může struktura perkolující sítě vykazovat znatelné odchylky. Tento jev lze přičíst kombinaci viskoelastických vlastností pryže a mikrostrukturálních reorganizací, které ovlivňují aktuálně preferované trasy transportu elektrického náboje [59; 76].

Významnou roli může sehrávat také mezifázová vrstva, vznikající na rozhraní plniva a matrice. Tato oblast může vykazovat odlišné mechanické a elektrické vlastnosti než okolní objemové fáze a ovlivňovat charakter piezorezistivní odezvy materiálu [76].

Pozornost si také zaslouží rozdíl mezi tzv. vysokými a nízkými píky (viz obrázek 19). Bylo teoretizováno, že vysoké píky mohou souviset s přechodnými změnami dominantního transportního mechanismu, vyvolanými makroskopickým přetvořením perkolující sítě. Naproti tomu bylo navrženo, že nízké píky mohou souviset s náhlými reorganizacemi proudových cest, mikrostrukturálními kolapsy nebo nestabilními přeskoky mezi konkurenčními trajektoriemi v deformované matici [67; 76].



Obrázek 19 Příklady odporových píků pozorovaných při tahových zkouškách. Názvy jednotlivých jevů jsou ponechány v původním anglickém znění, jelikož se v české odborné terminologii běžně nevyskytují a jejich překlad by mohl vést k nejasnostem v již tak nesjednocené nomenklatuře.

(zdroj: [67])

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

### 3 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem praktické části této práce byl návrh a realizace experimentu zaměřeného na měření elektrického odporu pryže v závislosti na jednoosém mechanickém napětí v tlaku, včetně návrhu a výroby součástí experimentální sestavy – konkrétně zkušebního tělesa, vulkanizační formy pro jeho výrobu a přípravku umožňujícího současné mechanické upnutí a elektrické připojení vzorku, s možností vyloučení příčné deformace během zatěžování.

Hlavním cílem samotného experimentu bylo vyhodnocení vlivu příčné deformace na elektrickou odezvu materiálu, přičemž zvláštní pozornost byla věnována výskytu nemonotónních jevů, zejména odporových píků typicky se objevujících při uvolnění mechanického napětí.

## 4 KONSTRUKČNÍ NÁVRHY

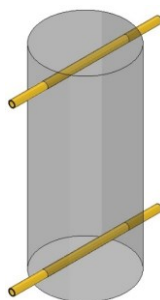
Všechny konstrukční návrhy a konečně-prvkové simulace byly zpracovány v softwaru SolidWorks 2022 (Dassault Systèmes, Francie). Materiálové vlastnosti jednotlivých součástí byly uvažovány dle údajů uvedených v příslušných materiálových listech [78; 79; 80]. Kompletní technická dokumentace navržených řešení je součástí příloh této práce.

### 4.1 Zkušební těleso

Pro jednoosé tlakové zkoušky se běžně používají zkušební tělesa válcového tvaru, zatěžovaná v osové směru. Hlavním důvodem tohoto uspořádání je dosažení symetrického průběhu příčné deformace a minimalizace nežádoucích napěťových koncentrací.

Klíčovým parametrem je poměr výšky  $h$  k průměru  $d$ , který zásadně ovlivňuje mechanickou stabilitu vzorku během zatěžování. Vzorky s příliš vysokým poměrem  $h/d$  jsou náchylné ke ztrátě stability a vzniku vzpěru, což vede k odchýlení od čistě tlakového zatěžování. Naopak příliš nízký poměr způsobuje výrazný vliv koncových efektů a vede k předčasnému přechodu do fáze vytvrzení. Obvykle se doporučuje udržovat poměr  $h/d$  v rozmezí 1 až 3 [8; 81].

Navržené zkušební těleso (viz obrázek 20) má průměr  $d = 25$  mm a výšku v nezatíženém stavu  $h_0 = 60$  mm. Pro realizaci elektrického kontaktu jsou v tělese integrovány elektrody v podobě mosazných trubiček o vnějším průměru 2 mm a tloušťce stěny 0,3 mm. Aby bylo zajištěno rovnoměrné proudové pole v celém objemu materiálu jsou elektrody uloženy symetricky vzhledem k ose tělesa, vzájemná rozteč je 50 mm.



Obrázek 20 Zkušební těleso

(zdroj: vlastní)

Pro minimalizaci rizika odtržení elektrod vlivem příčné deformace je navrženo, aby bylo minimálně 6 mm od každého čela zkušebního tělesa během zatěžování pevně upnuto v upínacím přípravku, který zabrání deformaci materiálu v těchto oblastech.

Efektivní výška  $h_e$  ve které může docházet k volné příčné deformaci je pak

$$h_e = h_0 - 2 \cdot 6 = 60 - 2 \cdot 6 = 48 \text{ mm} . \quad (4.1)$$

Poměr efektivní výšky ku průměru vzorku tak činí

$$\frac{h_e}{d} = \frac{48}{25} = 1,92 , \quad (4.2)$$

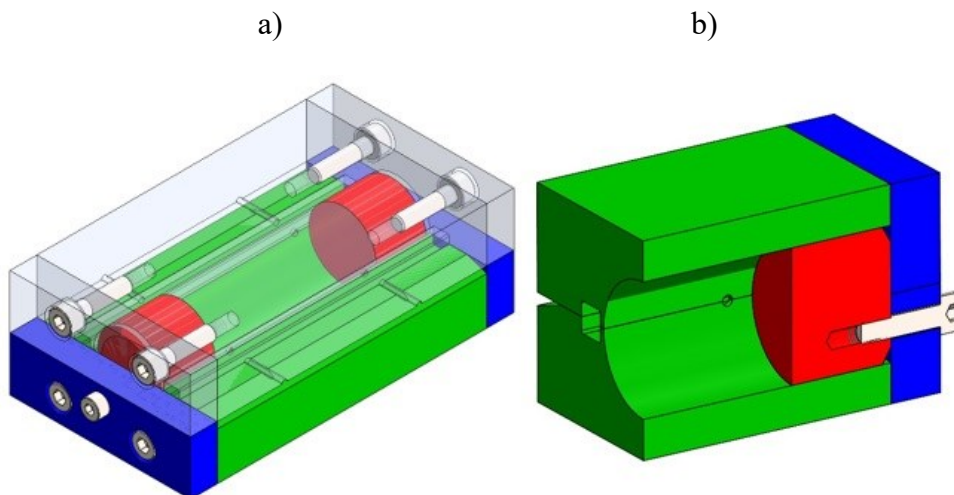
což vyhovuje doporučenému rozmezí pro jednoosé tlakové zkoušky.

#### 4.1.1 Výrobní požadavky

Pro zajištění kvalitního elektrického kontaktu je nezbytné, aby byly elektrody integrovány do vzorku již během vulkanizace. Zároveň je nutné zajistit vysokou kvalitu čelních ploch – ty musí být zcela rovné a hladké, bez jakýchkoliv nerovností, otřepů či deformací, které by mohly negativně ovlivnit rovnoměrný přenos mechanického zatížení.

#### 4.2 Vulkanizační forma

Vulkanizační forma pro výrobu navrženého zkušebního tělesa (viz obrázek 21) je určena pro ruční vkládání gumárenské směsi. Dále je řešena jako snímací, bezvložková, jednonásobná, s omezeným působením tlaku ve tvarových dutinách. Konstrukce byla navržena s důrazem na jednoduchost a nízké pořizovací náklady.



Obrázek 21 Vulkanizační forma: pohled (a), řez (b).

(zdroj: vlastní)

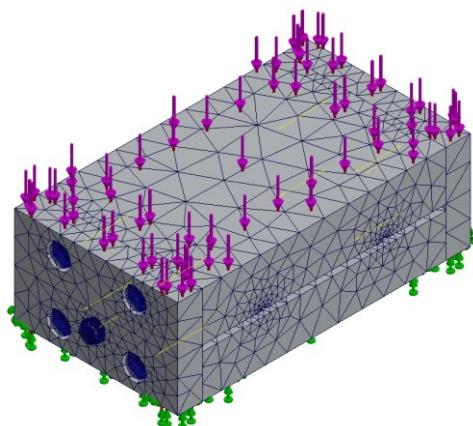
Po obou stranách tvarové dutiny jsou drážky pro přetoky, poloha elektrod je zajištěna jejich uložením do drážek v tvarových deskách formy. Kvalita čelních ploch je řešena použitím válcových vložek, jejichž cílem je zajistit, aby dělicí rovina formy neprocházela

přes čela vzorků. Tyto vložky zároveň slouží jako vodící prvky při uzavírání formy a zajišťují souosost tvarových desek.

S ohledem na charakter laboratorního použití byla pro tvarové desky a válcové vložky zvolena jako materiál hliníková slitina EN AW-7050. Pro boční příložky byla zvolena legovaná ocel 42CrMo4 ve zušlechtěném stavu, která zajišťuje dostatečnou pevnost a stabilitu formy v provozních podmínkách.

#### 4.2.1 Dimenzování a pevnostní kontrola vulkanizační formy

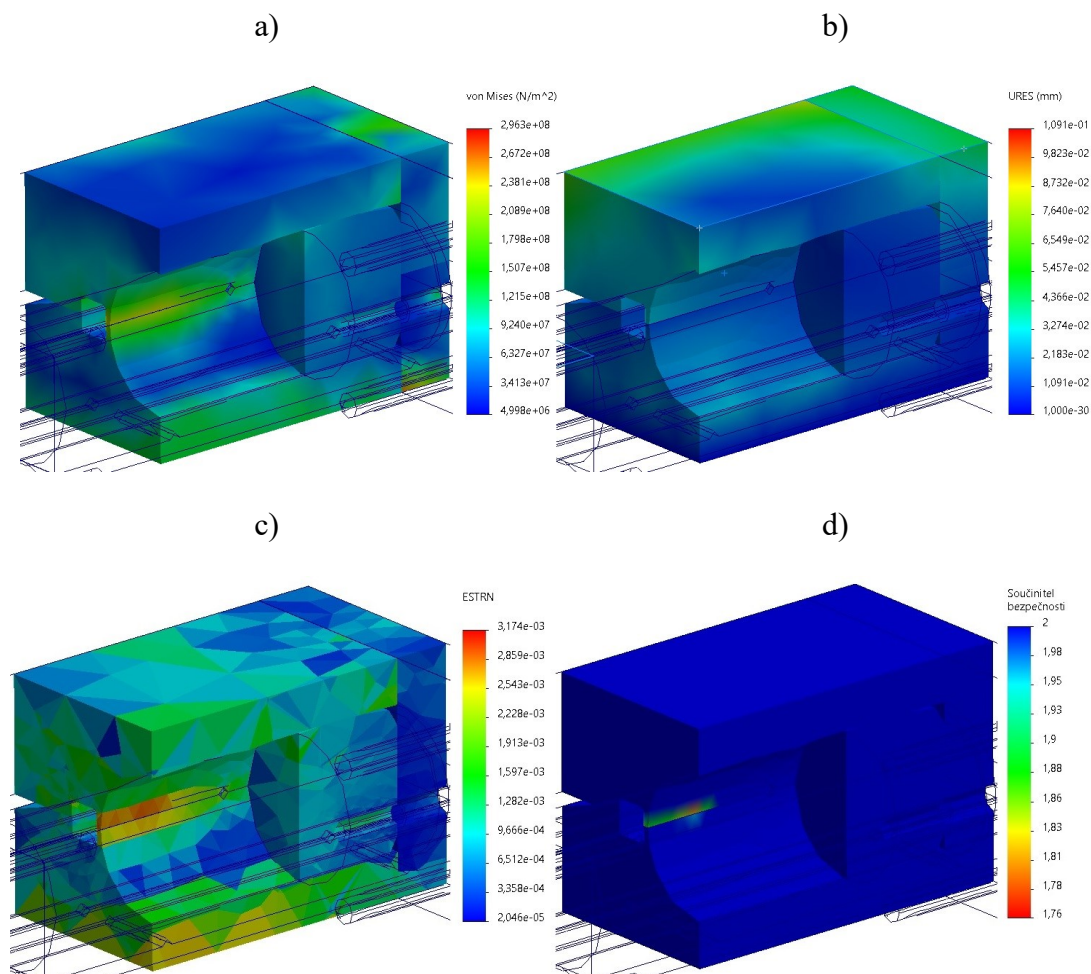
Pevnostní návrh formy vycházel z maximální uzavírací síly 300 kN, odpovídající provozním parametrům předpokládaného vulkanizačního lisu. Konstrukce byla optimalizována pomocí konečně-prvkových simulací s cílem dosáhnout součinitele bezpečnosti  $k=2$ . V rámci analýz bylo dále uvažováno rovnoměrné teplotní pole 150 °C, odpovídající předpokládané vulkanizační teplotě. Použitá síť prvků, schéma zatížení a uchycení jsou znázorněny na obrázku 22.



Obrázek 22 Síť prvků konečně-prvkové simulace vulkanizační formy; směr zatížení – fialové šipky, uchycení – zelené šipky.

(zdroj: vlastní)

Výsledky analýz (viz obrázek 23) ukázaly, že součinitel bezpečnosti mírně klesá na hodnotu 1,76 v oblasti přechodu mezi tvarovou dutinou a drážkou pro přetoky. Zvýšení této hodnoty by bylo možné úpravou konstrukce, což by však vedlo k nárůstu výrobních nákladů. Vzhledem k předpokládanému malému počtu vyráběných vzorků a nízké pravděpodobnosti nadměrného zatížení byla dosažená hodnota považována za plně vyhovující. Maximální posunutí v oblasti tvarové dutiny se v simulaci pohybovalo v řádu setin milimetru, což je z hlediska požadované kvality zkušebních těles rovněž plně vyhovující.



Obrázek 23 Výsledky konečně-prvkové simulace vulkanizační formy: napětí von Mises (a); posunutí (b); poměrné přetvoření (c); součinitel bezpečnosti (d).

(zdroj: vlastní)

### 4.3 Upínací přípravky

Upínací přípravky slouží k upevnění vzorků v podobě navrženého zkušební tělesa do zkušebního stroje. Konstrukce byla navržena ve dvou variantách – první umožňující příčnou deformaci vzorku, druhá zajišťující úplné omezení příčné deformace v průběhu zatěžování. Obě varianty přípravků jsou ke zkušebnímu stroji připevněny pomocí identických upínacích šroubů se závitem na obou koncích díku a podložek.

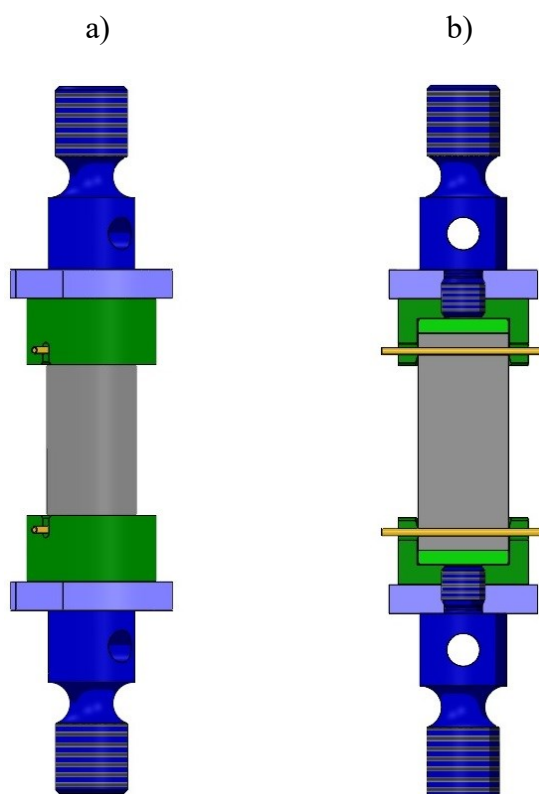
Návrh upínacích šroubů a podložek vycházel ze standardně používaného řešení, upraveného pouze rozměrově pro danou aplikaci. Jeden závit šroubu je zašroubován do konstrukce zkušebního stroje. Na opačném závitu je nejprve našroubována rovná podložka, která z jedné strany slouží jako opěrná plocha pro těleso přípravku našroubovaného na stejném závitu. Z druhé strany podložka slouží jako dosedací plocha pro dvojici spirálových podložek,

nasunutých na dřík šroubu. Vzájemným utažením spirálových podložek vůči opěrné ploše stroje vzniká osově předpětí, které zajišťuje pevné a přesné ustavení přípravku.

Jako materiál šroubů a podložek byla zvolena legovaná ocel 42CrMo4 ve zušlechtěném stavu. Součásti upínacích přípravků byly navrženy z materiálu ABS (akrylonitrilbutadienstyren), který zajišťuje dostatečnou mechanickou pevnost a tuhost při současném zachování elektrické izolace. Konstrukce přípravků byla optimalizována pro výrobu pomocí aditivní technologie FDM (Fused Deposition Modeling).

#### 4.3.1 Přípravek pro volnou příčnou deformaci

Přípravek pro volnou příčnou deformaci vzorku (viz obrázek 24) je koncipován ve tvaru misky, jejímž primárním účelem je omezit příčnou deformaci vzorku v oblasti elektrod. Ve zbývajícím objemu zůstává vzorek volný, což umožňuje jeho příčnou deformaci. Elektrody jsou vyvedeny ven skrze úzkou drážku. Dno přípravku, které přenáší mechanické zatížení na čelní plochy vzorku je řešeno jako samostatný prvek a k hlavnímu tělesu je připevněno pomocí lepeného spoje.



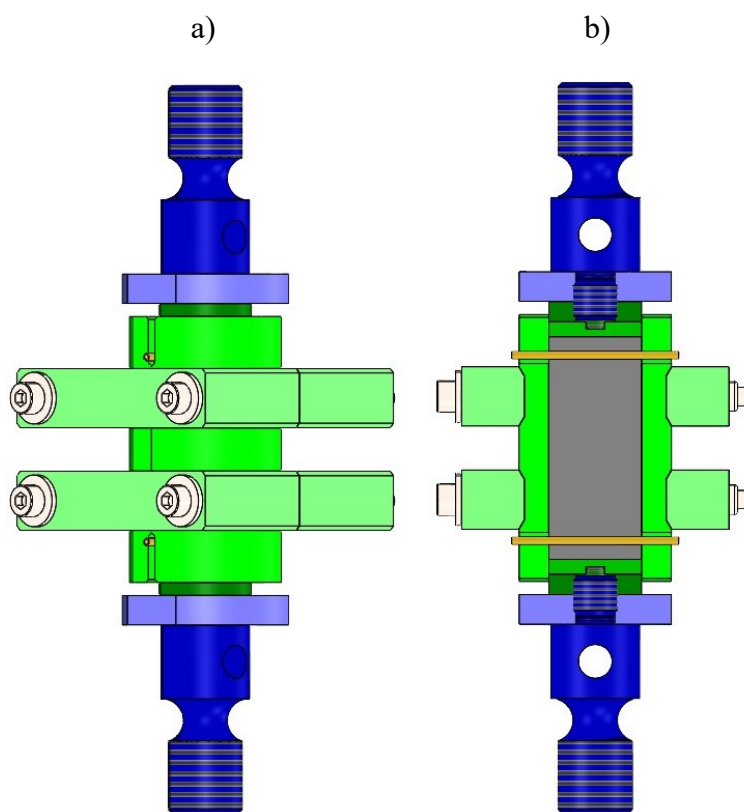
Obrázek 24 Upínací přípravek pro volnou příčnou deformaci vzorku: pohled (a), řez (b); upínací šrouby a podložky – modrá, upínací misky – zelená, zkušební těleso – šedá, elektrody – žlutá.

(zdroj: vlastní)

#### 4.3.2 Přípravek pro vyloučení příčné deformace

Přípravek pro vyloučení příčné deformace (viz obrázek 25) je tvořen dvěma hlavními konstrukčními částmi. První tvoří tlačné desky, které přenášejí mechanické zatížení na čelní plochy vzorku. Každá deska se skládá ze závitové části a vlastní zatěžovací plochy. Obě části jsou spojeny opět pomocí lepeného spoje.

Druhou část tvoří pouzdro pro vyloučení příčné deformace vzorku, koncipované jako plášť v podobě podélně rozděleného dutého válce. Toto rozdělení umožňuje nasazení pouzdra kolem elektrod. Elektrody jsou vyvedeny ven drážkou v tělese pláště podobně jako v předchozím případě. Obě poloviny pouzdra jsou spojeny pomocí objímek se šroubovým spojením, matice jsou zapuštěny přímo do tělesa objímek.



Obrázek 25 Upínací přípravek pro vyloučení příčné deformace vzorku: pohled (a), řez (b); upínací šrouby a podložky – modrá, tlačné desky a pouzdro – zelená, zkušební těleso – šedá, elektrody – žlutá.

(zdroj: vlastní)

#### 4.3.3 Dimenzování a pevnostní kontrola upínacích přípravků

Vzhledem k tomu, že v době návrhu přípravků nebyly k dispozici materiálové konstanty vzorků, vycházel návrh z předpokladu, že jejich Youngův modul pružnosti v tahu/tlaku

nepřekročí hodnotu 10 MPa. Dále bylo předpokládáno, že při zatěžování vzorků s volnou příčnou deformací bude maximální úroveň smluvního poměrného přetvoření odpovídat hodnotě  $\varepsilon = 0,3$ . V případě vyloučené příčné deformace pak bude aplikována stejná zatěžovací síla, jaká je potřebná pro dosažení uvedeného přetvoření v podmínkách volné deformace.

V případě volné příčné deformace je celková změna výšky zkušební tělesa  $\delta$  podle vztahu (1.3) rovna

$$\delta = \varepsilon \cdot h_0 = 0,3 \cdot h_0 = 0,3 \cdot 60 = 18 \text{ mm} . \quad (4.3)$$

Zatěžující síla  $F$  potřebná ke stlačení tělesa o tuto hodnotu je určena podle vztahu (1.12) jako

$$F = \pi E \left( \frac{\delta}{h_e} \right) R^2 \left[ 1 + 2 \left( \frac{r}{2h_e} \right)^2 \right] = \pi \cdot 10 \left( \frac{18}{48} \right) 12,5^2 \left[ 1 + 2 \left( \frac{12,5}{2 \cdot 48} \right)^2 \right] = 1903 \text{ N} . \quad (4.4)$$

Plocha čela vzorku  $S$ , na kterou zatěžující síla působí, je

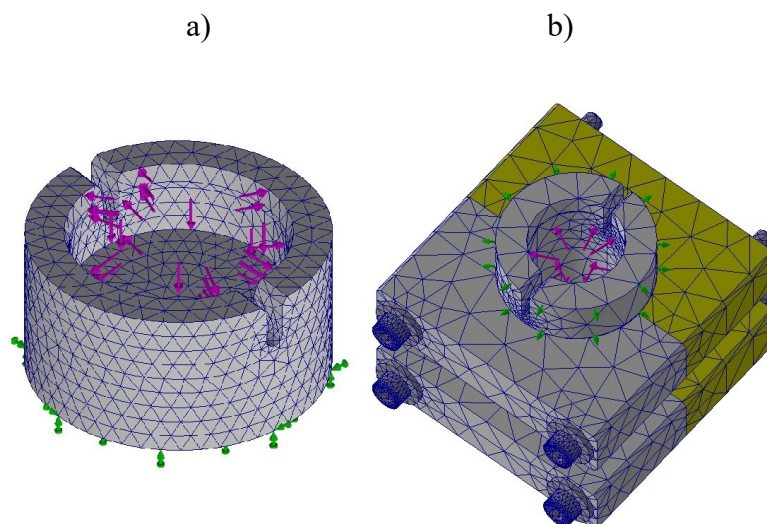
$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 25^2}{4} = 491 \text{ mm}^2 . \quad (4.5)$$

Maximální tlak  $p$ , působící na vnitřní stěny pouzdra při vyloučení příčné deformace, lze za zjednodušujícího předpokladu objemové nestlačitelnosti pryže, stanovit podle Pascalova zákona jako

$$p = \frac{F}{S} = \frac{1903}{491} = 3,88 \text{ MPa} . \quad (4.6)$$

Stanovení tlaku působícího na stěny přípravku pro volnou příčnou deformaci je analytickou metodou komplikované, lze však oprávněně předpokládat, že výsledný tlak nepřekročí hodnotu odpovídající případu vyloučení příčné deformace (viz vztah 4.6).

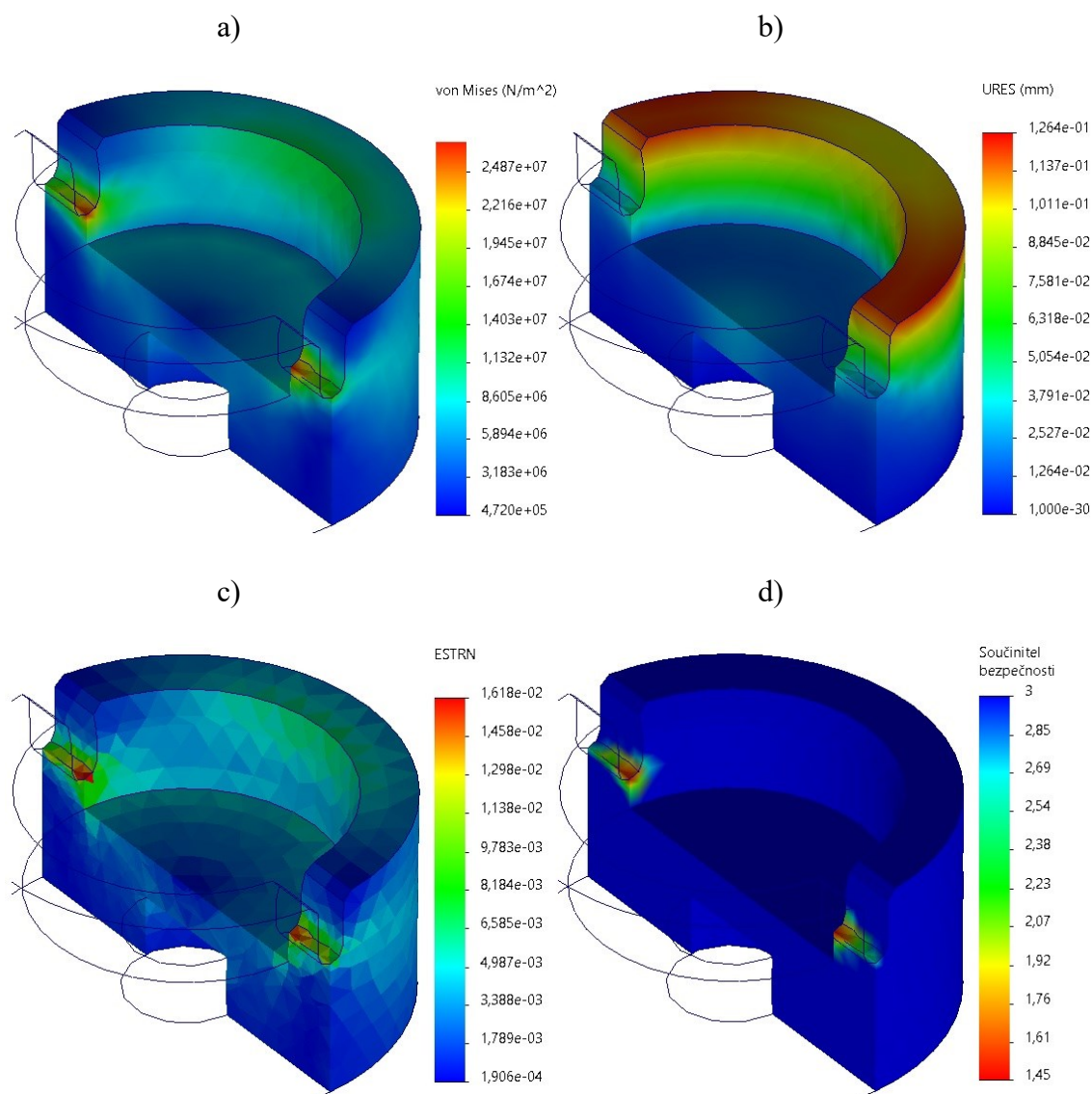
Pro účely návrhu byla hodnota tlaku zaokrouhlena na  $p = 4$  MPa. Tato hodnota byla použita jako vstupní parametr pro konečně-prvkové analýzy obou typů přípravků. Vzhledem k anizotropnímu poklesu mechanických vlastností, typickému pro aditivní technologii FDM, byla konstrukce optimalizována s cílem dosáhnout součinitele bezpečnosti  $k = 3$ . Použitá síť prvků, schéma zatížení a uchycení jsou znázorněny na obrázku 26.



Obrázek 26 Síť prvků konečně-prvkové simulace upínacího přípravku pro volnou příčnou deformaci vzorku (a) a pouzdra pro vyloučení příčné deformace vzorku (b); směr zatížení – fialové šipky, uchycení – zelené šipky

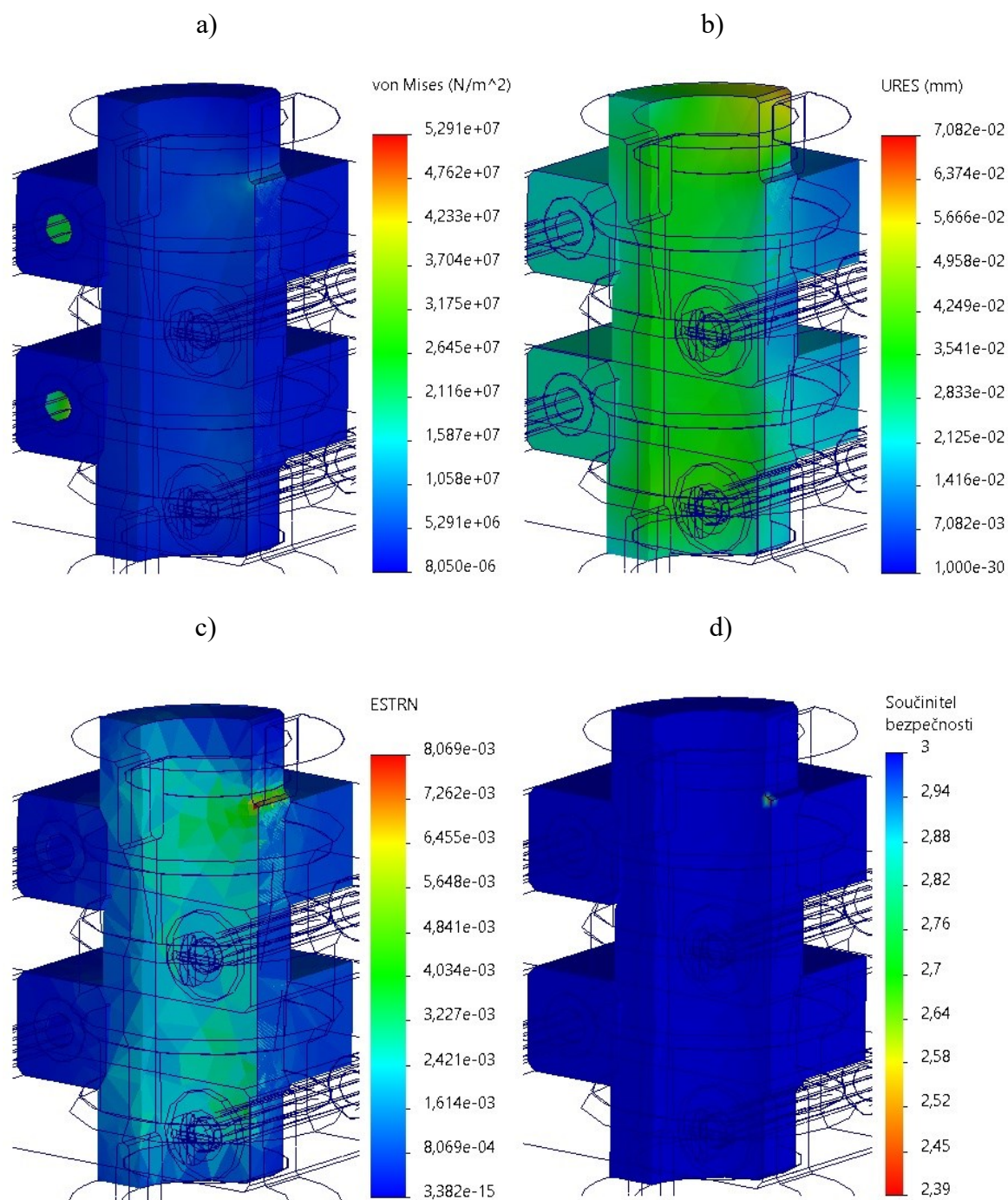
(zdroj: vlastní)

Výsledky analýz (viz obrázek 27 a 28) ukázaly, že součinitel bezpečnosti u obou variant mírně klesá pouze v oblasti dna drážky pro průchod elektrod. Vzhledem k relativně nízkému počtu předpokládaných zatěžovacích cyklů a nízkým výrobním nákladům bylo toto riziko považovat za akceptovatelné. Maximální posunutí v oblasti kontaktu se vzorkem se u obou přípravků pohybovalo v řádu setin milimetru, což přijatelné a lze předpokládat, že nebude mít významný vliv na výsledky experimentu. Zároveň lze očekávat, že reálně dosažené hodnoty budou díky viskoelastickým vlastnostem pryží příznivější než simulované.



Obrázek 27 Výsledky konečně-prvkové simulace upínacího přípravku pro volnou příčnou deformaci vzorku: napětí von Mises (a); posunutí (b); poměrné přetvoření (c); součinitel bezpečnosti (d).

(zdroj: vlastní)

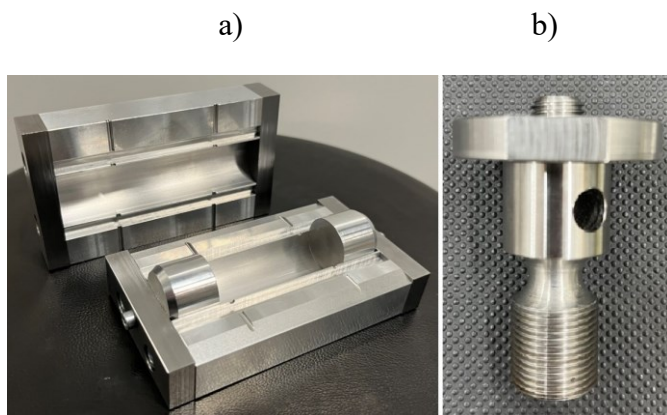


Obrázek 28 Výsledky konečně-prvkové simulace pouzdra pro vyloučení příčné deformace vzorku: napětí von Mises (a); posunutí (b); poměrné přetvoření (c); součinitel bezpečnosti (d).

(zdroj: vlastní)

#### 4.3.4 Výroba navržených dílů

Vulkanizační forma byla vyrobena společností WakeMaster (Česká republika). Upínací šrouby a podložky pro uchycení přípravků dodala společnost Moment (Česká republika). Veškeré díly byly vyrobeny na základě dodané technické dokumentace.

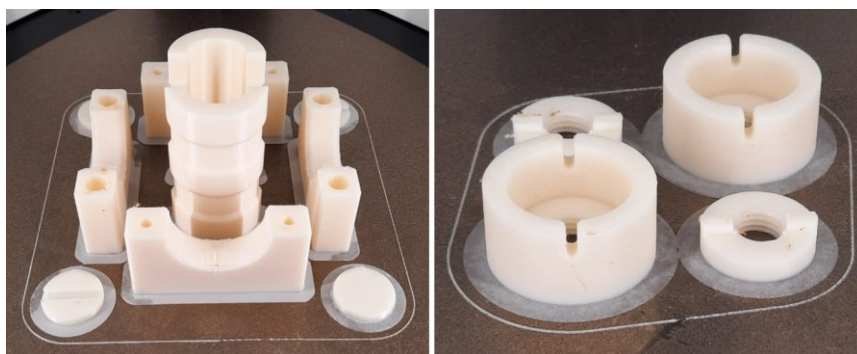


Obrázek 29 Hotová vulkanizační forma (a) a upínací šroub s podložkou (b).

(zdroj: vlastní)

Výroba dílů upínacích přípravků byla realizována autorem této práce. G-kódy byly vygenerovány pomocí softwaru PrusaSlicer 2.9.2 (Prusa Research, Česká republika), aditivní výroba proběhla na 3D tiskárně AzteQ Industrial (Trilab Group, Česká republika) s použitím materiálu ABS Extrafill Natural (Fillamentum Manufacturing, Česká republika).

Před výrobou finálních dílů byla připravena sada zkušebních vzorků sloužících k odladění procesních parametrů, kompenzaci výrobního smrštění a ověření správného lícování. Drobné nepřesnosti typické pro technologii FDM byly následně odstraněny ručním opracováním pomocí jehlových pilníků. Lepené spoje byly provedeny kyanoakrylátovým lepidlem Loctite 435 (Henkel, Německo).



Obrázek 30 Součásti upínacích přípravků.

(zdroj: vlastní)

## 5 PŘÍPRAVA VZORKŮ A POPIS EXPERIMENTU

Při přípravě experimentu byl kladen důraz na opakovatelnost, přesnost a minimalizaci rušivých vlivů. Použité postupy vycházely z dříve ověřených metod a byly systematicky upraveny pro potřeby této práce.

### 5.1 Příprava vzorků

Pro přípravu vzorků byl zvolen přírodní kaučuk (NR), a to vzhledem k jeho vynikajícím mechanickým vlastnostem a širokému průmyslovému využití [82; 83]. Připraveny byly tři různé gumárenské směsi, které se lišily obsahem sazí, složení ostatních komponent zůstalo ve všech případech shodné. Receptury jednotlivých směsí jsou uvedeny v tabulce 2.

Základní složkou je přírodní kaučuk typu SVR-CV60 (Binh Phuoc, Vietnam). Jako plnivo byly použity saze typu N550 (Cabot Corporation, USA). Plastikátorem sloužícím ke zlepšení zpracovatelnosti směsi byl naftenický olej NYTEX® (Nynas AB, Švédsko). Jako aktivátor vulkanizace byl použit oxid zinečnatý (ZnO) (Slov-Zink a.s., Slovensko), jako sekundární aktivátor vulkanizace byl použit stearin (Sigma-Aldrich, USA). Stabilizátor byl použit 6PPD (Lanxess, Německo). Vulkanizačním činidlem byla síra typu OT33 (Eastman Chemical, USA) a jako akcelerátor vulkanizace byl použit TBBS (Duslo a.s., Slovensko).

Tabulka 2 Receptury gumárenských směsí.

| Směs | Složka [dsk] |      |      |     |         |      |      |      |
|------|--------------|------|------|-----|---------|------|------|------|
|      | NR           | Saze | Olej | ZnO | Stearin | 6PPD | Síra | TBBS |
| NR50 | 100          | 50   | 10   | 2   | 1       | 1    | 2    | 1    |
| NR70 |              | 70   |      |     |         |      |      |      |
| NR90 |              | 90   |      |     |         |      |      |      |

(zdroj: vlastní)

Míchání gumárenských směsí bylo provedeno ve vnitřním hnětiči SYD-2 L (Everplast Machinery, Taiwan) dvoustupňovým postupem. Přesný průběh jednotlivých fází míchání je uveden v tabulce 3. Základ směsi byl po ukončení prvního stupně míchání zpracován na dvouválcovém kalandru (Labtech Engineering, Finsko) do podoby plátů. Finální směsi byly po ukončení druhého stupně míchání rovněž krátce (cca 2 minuty) válcovány na dvouválcovém kalandru, aby došlo k jejich ochlazení a dokončení homogenizace. Takto připravené gumárenské směsi byly následně ponechány při laboratorní teplotě po dobu minimálně 24 hodin před dalším zpracováním.

Tabulka 3 Postup míchání gumárenských směsí.

| 1. stupeň |                                            | Počáteční teplota: 80 °C |                                    |
|-----------|--------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|
|           | Přidávaná složka                           | Doba míchání             | Otáčky [ot. · min. <sup>-1</sup> ] |
| 1.        | Kaučuk                                     | 1 min.                   | 35                                 |
| 2.        | Saze 1/2 + olej 1/2                        | 1 min.                   | 35                                 |
| 3.        | Saze 1/2 + olej 1/2 + ZnO + stearin + 6PPD | 1 min.                   | 35                                 |
| 4.        | -                                          | Do teploty 150 °C        | 40                                 |
| 2. stupeň |                                            | Počáteční teplota: 70 °C |                                    |
|           | Přidávaná složka                           | Doba míchání             | Otáčky [ot. · min. <sup>-1</sup> ] |
| 1.        | Směs z 1. stupně                           | 1 min.                   | 30                                 |
| 2.        | Síra + TBBS                                | Do teploty 105 °C        | 30                                 |

(zdroj: vlastní)

Hodnoty času optimální vulkanizace  $t_{90}$  při teplotě 150 °C byly stanoveny na oscilačním reometru MDR 3000 Basic (MonTech GmbH, Německo) v souladu s normou ASTM D6204. Jelikož byl čas  $t_{90}$  určen pro vzorek o tloušťce 1 mm, bylo nutné k naměřeným hodnotám připočítat 60 sekund pro každý další milimetr tloušťky připravovaných vzorků. Konečné hodnoty doby vulkanizace jsou uvedeny v tabulce 4.

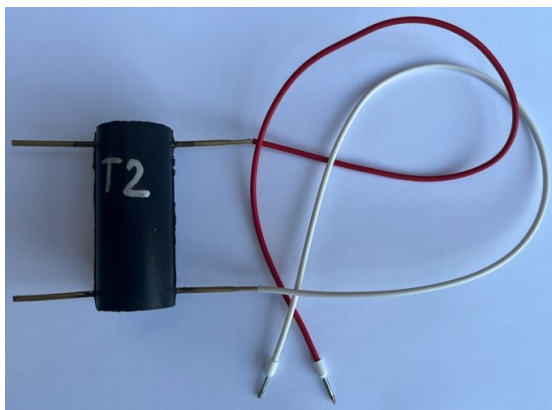
Tabulka 4 Stanovené časy  $t_{90}$ .

| Označení směsi | $t_{90}$ [min.] |
|----------------|-----------------|
| NR50           | 30:14           |
| NR70           | 29:22           |
| NR90           | 29:48           |

(zdroj: vlastní)

Vzorky byly vyrobeny s využitím výše navržené vulkanizační formy. Mosazné trubičky, byly použity od výrobce Gust. Alberts (Německo). Vulkanizace proběhla v elektricky vyhřívaném hydraulickém lisu LabEcon (Fontijne Presses, Nizozemsko) při teplotě 150 °C za použití uzavírací síly 300 kN, po dobu odpovídající dříve stanoveným časům  $t_{90}$ . Po vyjmutí z formy byly ručně odstraněny přetoky.

Pro elektrické připojení k měřicí aparatuře byly do elektrod vsunuty obnažené konce izolovaných vodičů, tvořených měděným vícežilovým lankem o délce 300 mm (viz obrázek 31). Byl použit standardní vodič o průřezu 0,75 mm<sup>2</sup> (Kablo Vrchlabí, Česká republika). Poloha vodičů v elektrodách byla zajištěna ručním krimpováním. Na opačných koncích vodičů byly krimpovány standardní dutinkové koncovky (KSS Wiring, Taiwan).

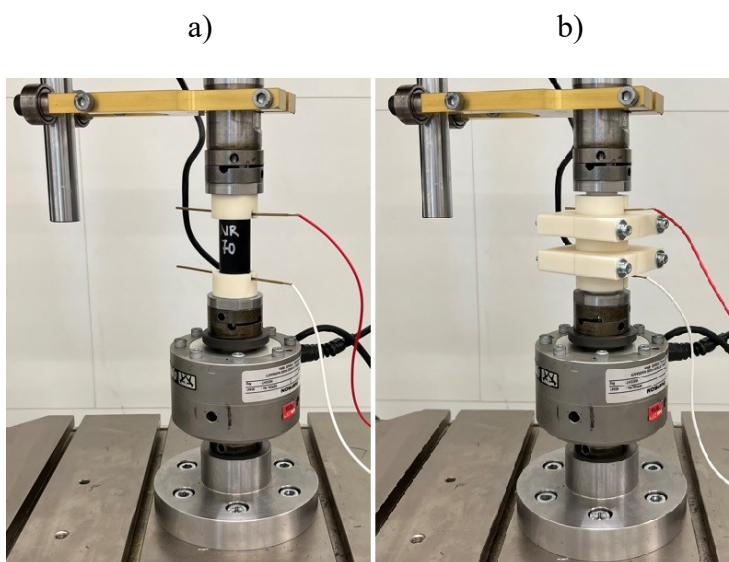


Obrázek 31 Zkušební těleso s připojenými vodiči.

(zdroj: vlastní)

## 5.2 Popis experimentu

Měření změn elektrického odporu vzorků v závislosti na jednoosém tlakovém zatížení proběhlo na univerzálním zkušebním stroji Instron 8871 (Instron, USA). Jedná se o hydraulický zkušební stroj určený pro dynamické testování materiálů umožňující různé scénáře zatěžování. Vzorky byly do stroje upnuty pomocí dříve navržených upínacích přípravků (viz obrázek 32).



Obrázek 32 Upnutí vzorků na zkušebním stroji pomocí navržených přípravků: volná příčná deformace (a); vyloučená příčná deformace (b).

(zdroj: vlastní)

Každý vzorek byl vystaven šesti cyklům mechanického zatížení. V případě konfigurace s volnou příčnou deformací byl průběh zatěžování řízen polohově. Byla zvolena maximální změna výšky tělesa  $\delta = 10$  mm, odpovídající poměrnému přetvoření  $\varepsilon = 0,167$ .

Před zahájením zatěžovacího cyklu bylo aplikováno předpětí 0,5 mm, za účelem zajištění spolehlivého mechanického kontaktu mezi zkušebním tělesem a upínacím přípravkem.

Zatěžování proběhlo ve formě lichoběžníkového signálu, cílem bylo oddělit potenciální jevy v odporové odezvě, které se mohou projevat odlišně během zatěžovací a odlehčovací rampy. Rychlost zatěžovací rampy byla ve všech cyklech konstantní, zatímco rychlost odlehčovací rampy se v jednotlivých cyklech postupně snižovala podle geometrické řady. Přesné parametry jsou uvedeny v tabulce 5. Po dosažení požadované změny výšky vzorku následovala výdrž v délce 30 sekund. Po návratu do výchozí polohy následovala prodleva 30 sekund před dalším zatěžovacím cyklem.

Tabulka 5 Rychlosti zatěžovací a odlehčovací rampy při volné příčné deformaci.

| Cyklus | Rychlost zatěžovací rampy [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ] | Rychlost odlehčovací rampy [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ] |
|--------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 1.     | 1                                                             | 20                                                             |
| 2.     |                                                               | 10                                                             |
| 3.     |                                                               | 5                                                              |
| 4.     |                                                               | 2,5                                                            |
| 5.     |                                                               | 1,25                                                           |
| 6.     |                                                               | 0,625                                                          |

(zdroj: vlastní)

Celková doba trvání zatěžovací rampy tak byla ve všech cyklech 10 sekund, zatímco časy odlehčovací rampy postupně činily: 0,5; 1; 2; 4; 8 a 16 sekund.

Při vyloučení příčné deformace není možné z důvodu téměř nulové objemové stlačitelnosti pryže dosáhnout srovnatelné změny výšky. V této konfiguraci byl proto průběh zatěžování řízen silově, jako cílová síla byla použita hodnota odpovídající průměrné maximální síle potřebné ke stlačení vzorku volné příčné deformaci v předchozí sérii. Hodnoty byly zaokrouhleny na celé desítky newtonů, neboť řídicí jednotka stroje neumožňuje jemnější nastavení. Rychlosti zatěžovací a odlehčovací rampy byly přepočítány z polohových jednotek na silové jednotky ( $\text{N} \cdot \text{s}^{-1}$ ) tak, aby časy jednotlivých fází zůstaly identické s předchozím režimem. Přesné parametry jednotlivých cyklů jsou uvedeny v tabulce 6. Před zatížením bylo aplikováno předpětí o velikosti 5 N.

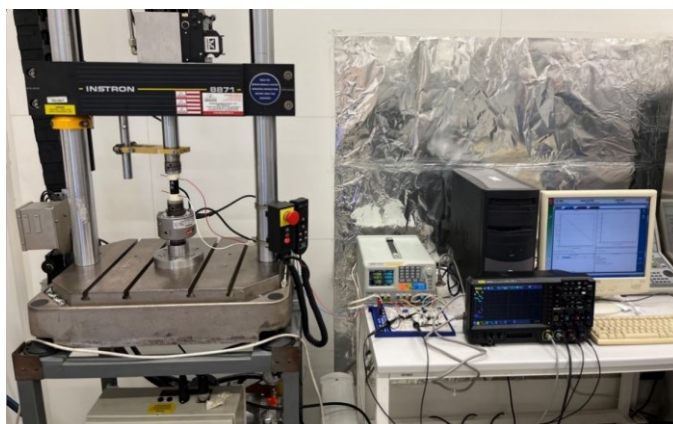
Tabulka 6 Rychlosti zatěžovací a odlehčovací rampy při vyloučené příčné deformaci.

| Směs   | NR50 ( $F_{\max.} = 600 \text{ N}$ )                    |                                                          | NR70 ( $F_{\max.} = 800 \text{ N}$ )                    |                                                          | NR90 ( $F_{\max.} = 900 \text{ N}$ )                    |                                                          |
|--------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Cyklus | Rychlost<br>zatěžovací<br>rampy<br>[N·s <sup>-1</sup> ] | Rychlost<br>odlehčovací<br>rampy<br>[N·s <sup>-1</sup> ] | Rychlost<br>zatěžovací<br>rampy<br>[N·s <sup>-1</sup> ] | Rychlost<br>odlehčovací<br>rampy<br>[N·s <sup>-1</sup> ] | Rychlost<br>zatěžovací<br>rampy<br>[N·s <sup>-1</sup> ] | Rychlost<br>odlehčovací<br>rampy<br>[N·s <sup>-1</sup> ] |
| 1.     | 60                                                      | 1200                                                     | 80                                                      | 1600                                                     | 90                                                      | 1800                                                     |
| 2.     |                                                         | 600                                                      |                                                         | 800                                                      |                                                         | 900                                                      |
| 3.     |                                                         | 300                                                      |                                                         | 400                                                      |                                                         | 450                                                      |
| 4.     |                                                         | 150                                                      |                                                         | 200                                                      |                                                         | 225                                                      |
| 5.     |                                                         | 75                                                       |                                                         | 100                                                      |                                                         | 112,5                                                    |
| 6.     |                                                         | 37,5                                                     |                                                         | 50                                                       |                                                         | 56,25                                                    |

(zdroj: vlastní)

Síla působící na vzorek byla snímána pomocí tenzometrického snímače, umístěného na statickém stole zkušebního stroje. Elektrický odpor byl měřen pomocí metody vyvinuté v Centru polymerních systémů Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která byla využita v předchozích studiích, kde je podrobně popsána [58].

Měřicí obvod byl realizován s využitím operačních zesilovačů s vysokým vstupním odporem, osazených J-FET tranzistory na vstupu. Celý obvod byl sestaven na zkušební desce a napájen ze standardního symetrického zdroje  $\pm 15 \text{ V}$  ODP6033 (OWON Technology, Čína). Vodiče připojené k elektrodám vzorku byly zapojeny přímo do zkušební desky. Napěťové a proudové signály byly zaznamenávány ze zkušební desky pomocí digitálního osciloskopu MSO5104 (Rigol Technologies, Čína) při vzorkovací frekvenci 20 kHz. Z řídicí jednotky zkušebního stroje byly paralelně zaznamenávány signály síly a pozice zátěžné plochy v souřadnicích zkušebního stroje. Celá experimentální sestava je na obrázku 33.



Obrázek 33 Celkový pohled na experimentální sestavu.

(zdroj: vlastní)

Data byla z paměti osciloskopu exportována ve formátu .csv a následně zpracována v softwaru MATLAB 2023 (MathWorks, USA). Průměrný počet záznamů na jeden vzorek činil přibližně 650 000 řádků. Pro filtraci elektrického šumu byl použit skript pracující na principu tzv. posuvného průměrovacího okna vyvinutý rovněž v CPS UTB. Přítomný šum pocházel jak z elektromagnetického rušení v okolí vodičů, tak z vlastního šumu měřicích přístrojů. Přesné zdroje a intenzitu šumu však nelze bez specializované aparatury jednoznačně určit. Z odfiltrovaných napěťových a proudových dat byl následně vypočten elektrický odpor podle Ohmova zákona (rovnice 2.1). Získané hodnoty byly dále zpracovány do grafických výstupů, které sloužily jako podklad pro analýzu a interpretaci naměřených jevů.

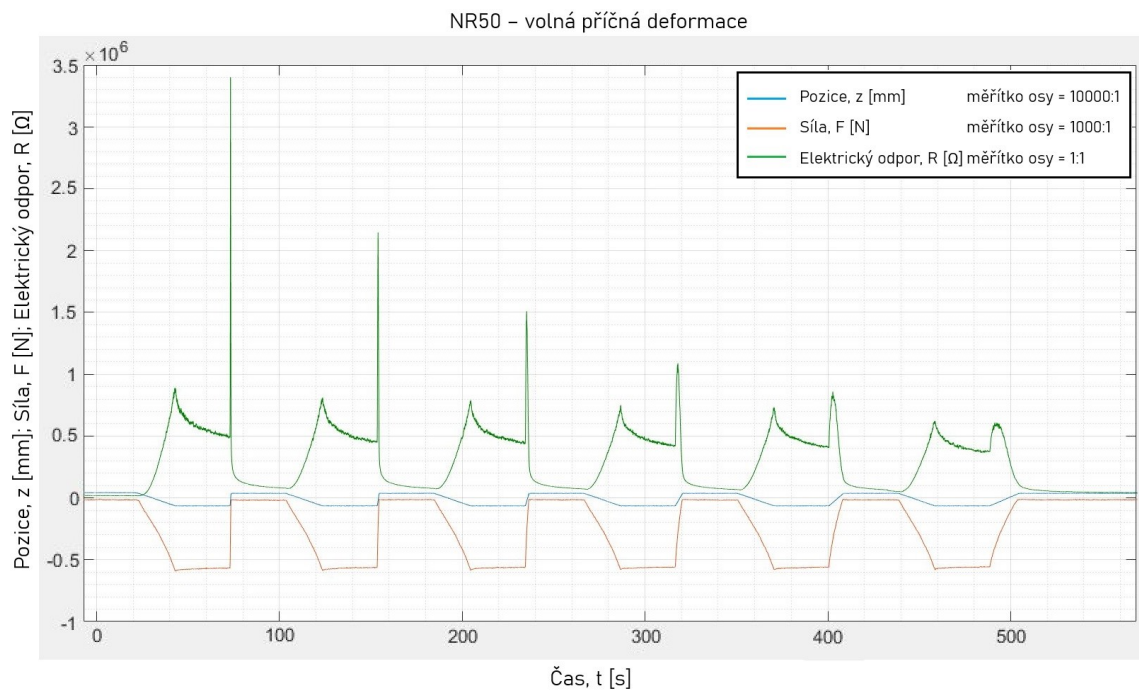
## 6 VÝSLEDKY A DISKUZE

Pro každou ze tří testovaných pryží (NR50, NR70 a NR90) bylo připraveno šest vzorků, z nichž tři byly testovány při volné příčné deformaci a tři při vyloučené příčné deformaci. Celkem bylo tedy provedeno 18 měření ( $3 \text{ směsi} \times 2 \text{ podmínky} \times 3 \text{ vzorky}$ ), přičemž pro každé měření byl použit nový, dosud netestovaný vzorek. Níže uvedené grafy ilustrují reprezentativní příklady výsledků jednotlivých měření ve zvolených konfiguracích.

Při volné příčné deformaci se výrazně projeví rozdíly v piezorezistivní odezvě mezi jednotlivými typy pryží, jak ukazují výsledky uvedené na obrázcích 34 až 36. Vzorky NR50 vykazovaly v každém cyklu monotónní nárůst elektrického odporu, který kulminoval současně s dosažením maximální zatěžující síly. Naproti tomu u vzorků NR70 a NR90 byl zaznamenán nemonotónní průběh – odpor dosahoval maxima dříve, než bylo dosaženo maximální zatěžující síly, a následně klesal, a to i při pokračujícím zatěžování. Tento jev byl nejvýraznější u vzorků NR90, kde odpor po kulminaci klesl téměř na výchozí hodnotu.

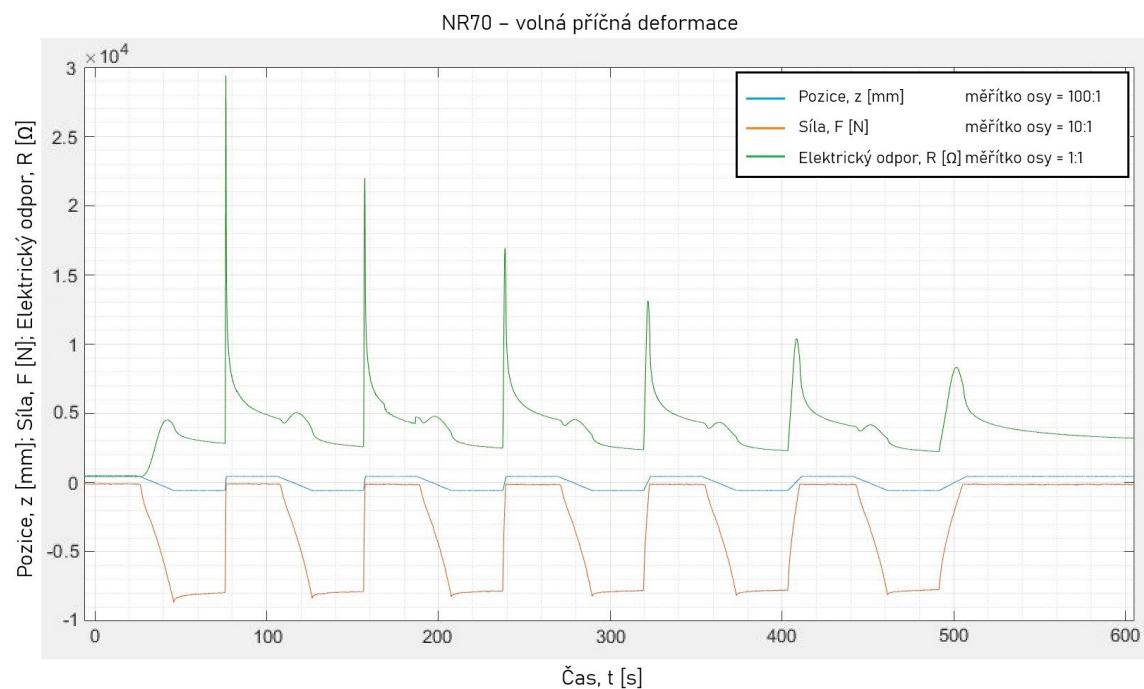
Rozdíly byly patrné i v relaxační fázi po odlehčení. U vzorků NR50 docházelo k rychlému návratu odporu k původní hodnotě, zatímco vzorky NR70 a NR90 vykazovaly výrazně pomalejší relaxaci. V důsledku toho začínaly další cykly z vyšší výchozí hodnoty odporu než cyklus první, což vedlo ke změně trendu – u vzorků NR70 se kulminace odporu začala projevovat ihned po zatížení, u vzorků NR90 dokonce zcela zanikla a dále se projevoval již jen monotónní pokles odporu. Tento efekt lze interpretovat jako důsledek trvalých, nebo přinejmenším velmi pomalu relaxujících změn ve struktuře perkolující sítě při prvním zatěžovacím cyklu.

Výrazným a konzistentním fenoménem při volné příčné deformaci byl výskyt odporových píků na sestupné hraně zatěžovacích cyklů. Jejich výška byla silně závislá na rychlosti odlehčení – při prudkém uvolnění napětí byly píky výraznější, což odpovídá dřívejším pozorováním při tahových zkouškách. Nejvýraznější projevy byly pozorovány u směsi NR50, méně intenzivní u NR70 a nejmírnější u NR90. Tento rozdíl reflektuje kombinaci viskoelastických vlastností matrice a strukturální stability perkolující sítě.



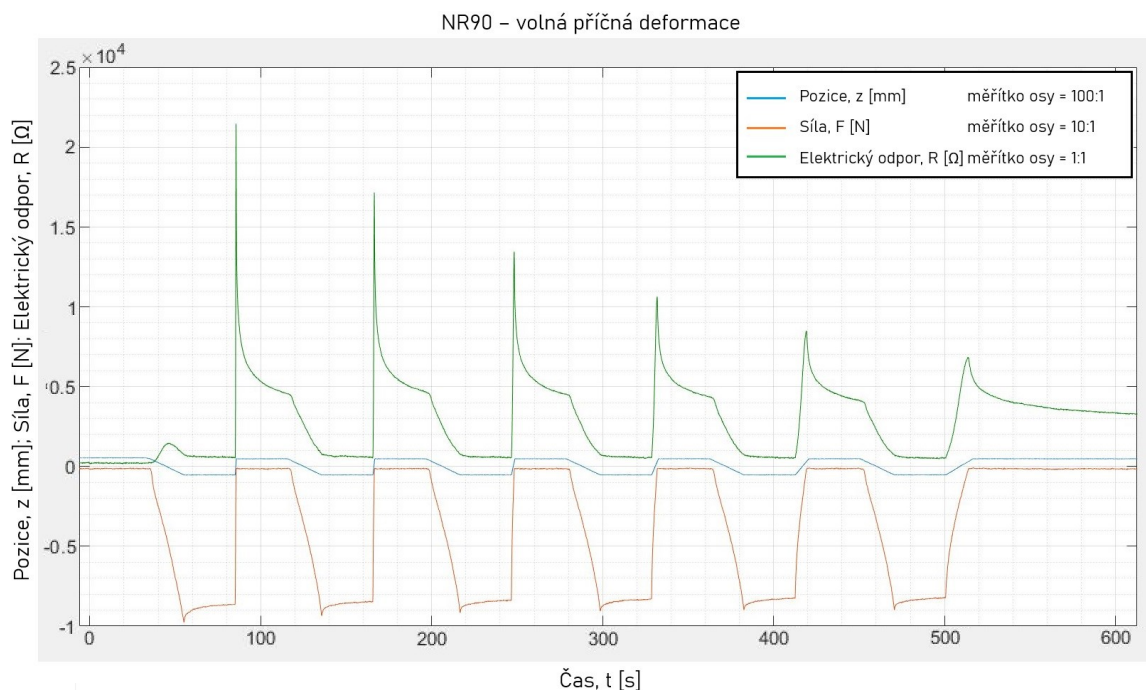
Obrázek 34 Odporová odezva, vzorek NR50 – volná příčná deformace.

(zdroj: vlastní)



Obrázek 35 Odporová odezva, vzorek NR70 – volná příčná deformace.

(zdroj: vlastní)



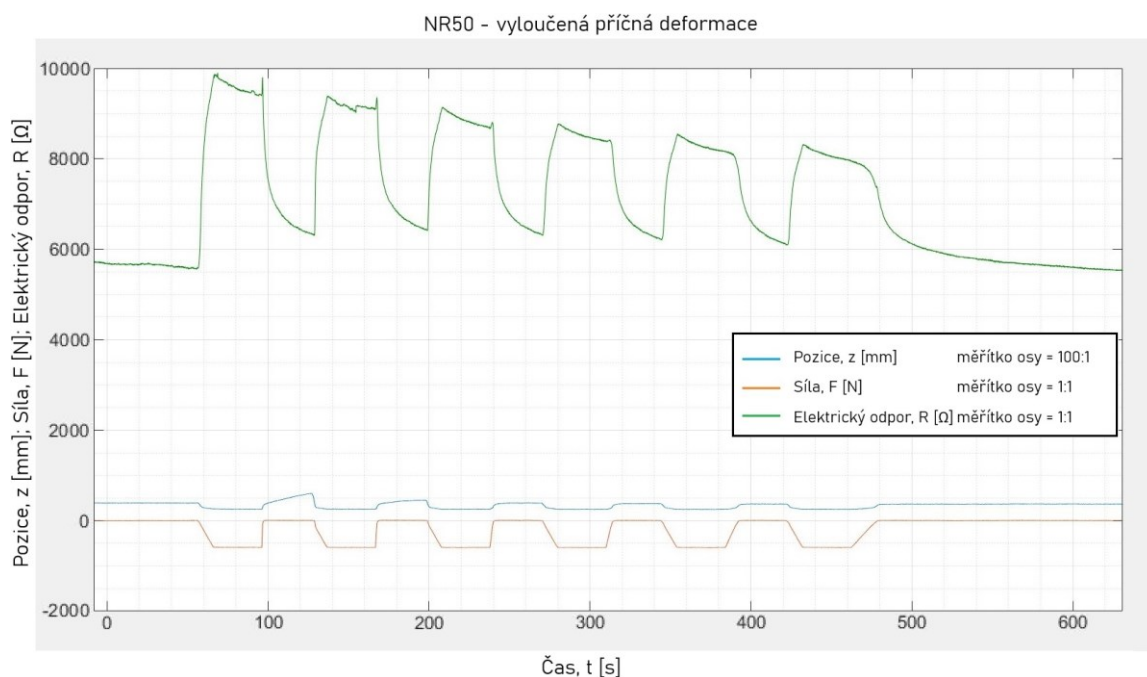
Obrázek 36 Odporová odezva, vzorek NR90 – volná příčná deformace.

(zdroj: vlastní)

V režimu s vyloučenou příčnou deformací bylo teoreticky očekáváno, že vlivem objemové komprese materiálu dojde k nárůstu efektivní kontaktní plochy sazí a zkrácení tunelovacích vzdáleností mezi nedotýkajícími se částicemi, jež budou tlačeny proti sobě bez možnosti ustupovat do stran. Tento stav by měl vést k vyšší efektivitě transportu náboje a poklesu elektrického odporu. Zároveň by mělo vyloučení příčné deformace zamezit anizotropní relaxaci materiálu, a tím i vzniku přechodných nerovnovážných stavů v konektivitě perkolující sítě, které se projevují vznikem odporových píků na sestupné hraně zatěžovacího cyklu.

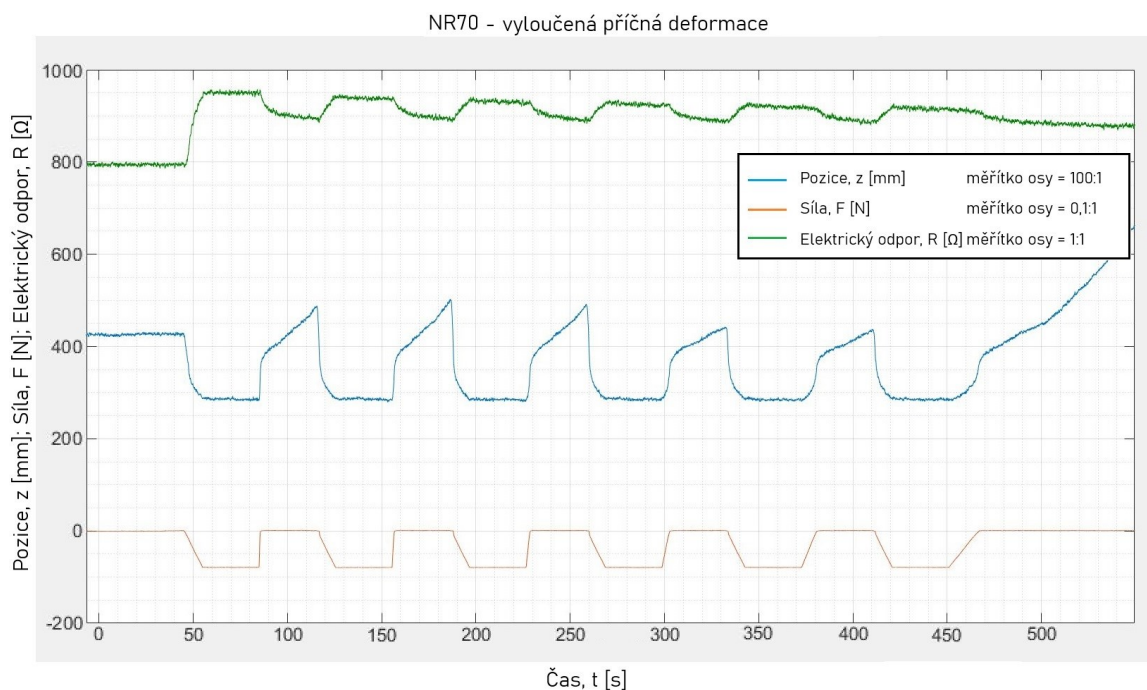
Naměřené výsledky, zobrazené na obrázcích 37 až 39, však tato očekávání nenaplnily. Všechny vzorky vykazovaly během zatěžování monotónní nárůst elektrického odporu, nikoliv jeho pokles. Co je však zásadní – odporové píky se objevily i za těchto podmínek. Vzorky NR50 vykazovaly odporový pík během prvních tří cyklů, vzorky NR90 vykazovaly pík až v pěti cyklech. Přestože jejich intenzita byla velmi malá byly tyto jevy dobře identifikovatelné. Tento jev nebyl dosud za podmínek takto výrazně omezené příčné deformace vzorku v odborné literatuře popsán a odporuje dosavadním předpokladům o vzniku tohoto jevu, který byl až dosud spojován téměř výhradně s makroskopickou deformací struktury perkolující sítě. U směsi NR70 nebyly odporové píky zaznamenány,

avšak vzhledem k úrovni šumu v zaznamenaných datech nelze zcela vyloučit jejich potlačenou přítomnost.



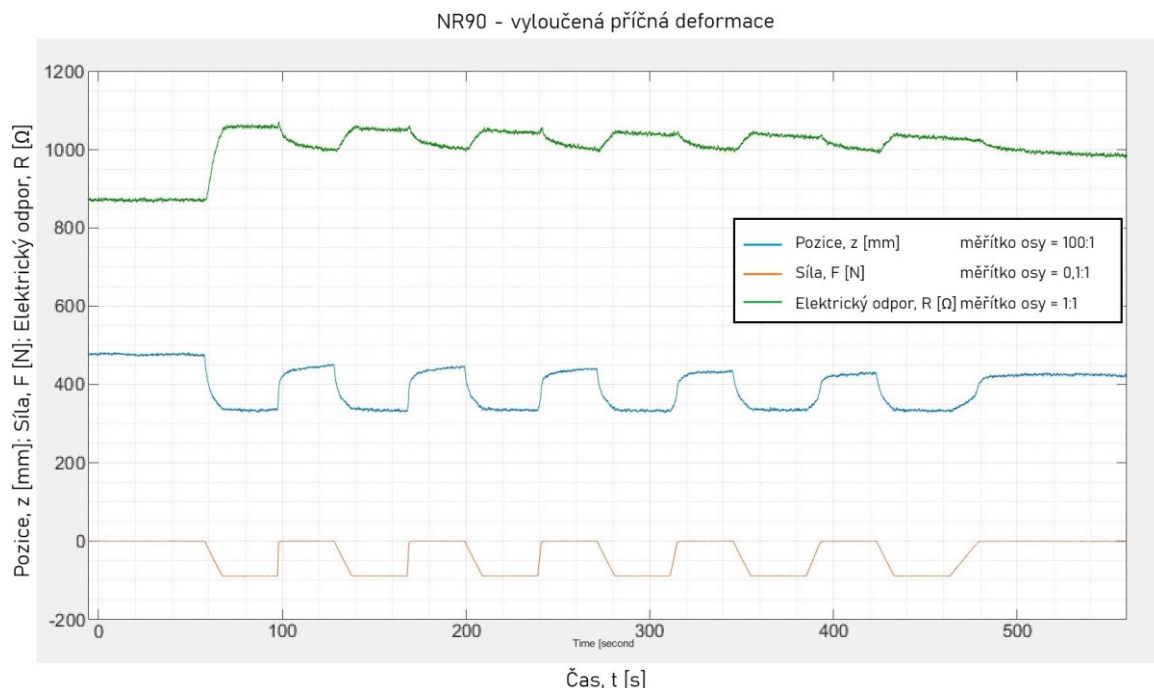
Obrázek 37 Odporová odezva, vzorek NR50 – vyloučená příčná deformace.

(zdroj: vlastní)



Obrázek 38 Odporová odezva, vzorek NR70 – vyloučená příčná deformace.

(zdroj: vlastní)



Obrázek 39 Odporová odezva, vzorek NR90 – vyloučená příčná deformace.

(zdroj: vlastní)

Celkově lze říci, že pryže s vyšším obsahem sazí (NR70, NR90) vykazovaly stabilnější piezorezistivní chování, které se projevilo nižší variabilitou odporových změn, menší výškou odporových píků a pomalejší relaxací po odlehčení. Toto chování může odrážet vyšší hustotu a robustnost perkolující sítě, která lépe odolává přerušením konektivity a efektivněji se přizpůsobuje změnám mechanického zatížení. Naopak pryž NR50, s nejnižším obsahem vodivého plniva, vykazovala větší náchylnost ke kolapsu vodivých cest a přechodným nestabilitám, zároveň však rychleji reagovala na změny zatížení a vykazovala pružnější rekonstrukci sítě.

Dále výsledky ukázaly, že makroskopické přetvoření perkolující sítě má sice nepopíratelný vliv na intenzitu odporových píků, avšak zřejmě nehraje klíčovou roli při samotném vzniku tohoto jevu. Mechanismus jejich vzniku je třeba hledat spíše v kontextu mikromechanických procesů probíhajících uvnitř materiálu. I při velmi omezeném makroskopickém pohybu může docházet k jemným posunům nebo změnám v orientaci vodivých částic, které vedou ke vzniku přechodných nerovnovážných stavů v konektivitě vodivé sítě.

Zároveň je nutné uvažovat, že účinnost transportu náboje může být citlivá nejen na polohu a vzdálenost částic, ale i na intenzitu elektrického pole, lokální teplotu a další fyzikální parametry prostředí. S ohledem na disipativní charakter pryží, které

při mechanickém zatížení vykazují ztráty energie, lze důvodně předpokládat, že během zatěžovacích cyklů dochází k lokálním změnám energetických poměrů. Tyto změny mohou zásadně ovlivnit efektivitu transportu náboje a tím i okamžitou odporovou odezvu materiálu. Do budoucna je proto nezbytné zaměřit výzkum na detailní analýzu těchto procesů – zejména na studium mechanismů transportu náboje a lokalizace elektronů v kontextu lokálního energetického pole, teplotního režimu a strukturální dynamiky perkolující sítě.

Je však třeba také upozornit na omezení této práce. Experiment byl zaměřen pouze na pryže založené na přírodním kaučuku a pracoval s jediným typem vodivého plniva. Tato úzká materiálová báze omezuje možnost zobecnění závěrů na širší spektrum elektricky vodivých pryží. Navíc byl počet experimentálních vzorků relativně nízký, což neumožňuje provést statisticky robustní analýzu variability pozorovaných jevů.

## ZÁVĚR

V rámci této práce byl navržen a realizován experiment zaměřený na sledování změn elektrického odporu pryže při jednoosém tlakovém zatěžování, a to se zvláštním zaměřením na vliv příčné deformace zkušebního tělesa. Součástí řešení byl návrh zkušebního tělesa, vulkanizační formy a dvojice upínacích přípravků umožňujících měření v režimu s volnou i výrazně omezenou příčnou deformací.

Navržená metodika se ukázala jako funkční a dostatečně citlivá pro sledování detailní piezorezistivní odezvy v průběhu mechanického zatížení. Tato metodika tak může být dále rozvíjena a využita v navazujících studiích.

Za nejvýznamnější přínos experimentu lze považovat prokázání výskytu odporových píků při odlehčení vzorků i za podmínek výrazně omezené příčné deformace. Tento jev nebyl dosud v dostupné literatuře popsán a zpochybňuje stávající předpoklady. To otevírá nové otázky ohledně mechanismů transportu náboje a stability perkolující sítě během mechanického zatěžování, a poskytuje podnět k dalšímu výzkumu, který by měl být zaměřen na hlubší porozumění těmto vnitřním procesům.



## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SPERLING, L. H. *Introduction to physical polymer science: Fourth edition*. 2006. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. ISBN 978-0-471-70606-9.
- [2] BOWER, Allan F. *Applied Mechanics of Solids*. 2010. New York: CRC Press, 2010. ISBN 978-1-4398-0247-2.
- [3] IKEDA, Yuko; KATO, Atsushi; KOHJIYA, Shinzo a NAKAJIMA, Yukio. *Rubber Science: A Modern Approach*. 2018. Berlin: Springer, 2018. ISBN 978-9811097447.
- [4] ŠUBA, O. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. 2. (dotisk). Zlín: Univerzita Tomáše Baťi ve Zlíně, 2007. ISBN 978-80-7318-431-5.
- [5] SHIGLEY, Joseph; MISCHKE, Charles a BUDYNAS, Richard. *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUTUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [6] MEYERS, M. A. a CHAWLA, K. K. *Mechanical Behavior of Materials*. 2nd ed. Cambridge University Press, 2009. ISBN 978-0-521-86675-0.
- [7] TRELOAR, L. R. G. *The Physics of Rubber Elasticity*. 3rd ed. Oxford University Press, 2005. ISBN 978 0 19 857027 1.
- [8] HOSFORD, W. F. *Mechanical behavior of materials*. 2nd ed. Cambridge University Press, 2010. ISBN 978-0-521-19569-0.
- [9] MACOUR, Milan. *Úvod do analitické mechaniky a mechaniky kontinua*. 2010. Brno: VUTUM, 2010. ISBN 978-80-214-3944-3.
- [10] KUMAR, Anil a GUPTA, Rakesh K. *Fundamentals of Polymers Engineering: Second Edition Revised and Expanded*. 2003. New York: Marcel Dekker, 2003. ISBN 0-8247-0867-9.
- [11] GENT, A. N. *Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components*. 3rd ed. Hanser Publishers, 2012. ISBN 9783446427648.
- [12] BAUMAN, J. T. *Fatigue, Stress, and Strain of Rubber Components: A Guide for Design Engineers*. Hanser Publishers, 2008. ISBN 978-3-446-41681-9.
- [13] *Calculating Compression/Deflection Of Polyurethane*. Online. Dostupné z: <https://psiurethanes.com/calculating-compression-deflection/>. [cit. 2025-05-07].
- [14] MACOSKO, Ch. W. *Rheology: Principles, Measurements, and Applications*. Wiley, 1996. ISBN 978-0-471-18575-8.
- [15] ŠTĚPÁN, M. *Gumárenská technologie VI: Teoretické základy*. Státní nakladatelství technické literatury, 1965. ISBN 04-632-65.
- [16] ASHTER, S. A. *Thermoforming of Single and Multilayer Laminates: Plastic Films Technologies, Testing, and Applications*. Elsevier, 2014. ISBN 978-1-4557-3172-5.
- [17] ZHAN, L.; QU, S. a XIAO, R. A Review on the Mullins Effect in Tough Elastomers and Gels. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2024, roč. 37, č. 2, s. 181–214.
- [18] RICKAB, S. R. a SCOTT, N. H. The Mullins effect. In: JERRAMS, S. a MURPHY, N. (ed.). *Constitutive Models for Rubber VII*. Taylor & Francis, 2011, s. 273–276. ISBN 9780429087608.
- [19] AMIN, A. F. M. S.; ALAM, M. S. a OKUI, Y. An improved hyperelasticity relation in modeling viscoelasticity response of natural and high damping rubbers in compression: experiments, parameter identification and numerical verification. *Mechanics of Materials*. 2002, roč. 32, č. 2, s. 75-95.
- [20] *Fyzika polymerů: studijní texty*. Online. Ústav fyziky a materiálového inženýrství UTB. Zlín. Dostupné z: [http://ufmi.ft.utb.cz/index.php?page=fyzika\\_pol](http://ufmi.ft.utb.cz/index.php?page=fyzika_pol). [cit. 2023-04-07].

- [21] PAINTER, Paul C. a COLEMAN, Michael M. *Essentials of Polymer Science and Engineering*. 2009. Lancaster, Pennsylvania: DEStech Publications, 2009. ISBN 978-1-932078-75-6.
- [22] MEISSNER, Bohumil a ZILVAR, Václav. *Fyzika polymerů: Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. 1987. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [23] SPAHR, M. E.; GILARDI, R. a BONACCHI, D. Carbon Black for Electrically Conductive Polymer Applications. In: ROTHON, R. (ed.). *Fillers for Polymer Applications*. Springer, 2017, s. 375-400. ISBN 978-3-319-28116-2.
- [24] PURCELL, E. M. a MORIN, D. J. *Electricity and Magnetism*. 3rd ed. Cambridge University Press, 2013. ISBN 978-1-107-01402-2.
- [25] SEDLÁK, Bedřich a ŠTOLL, Ivan. *Elektřina a magnetismus*. Vydání čtvrté, v Nakladatelství Karolinum třetí. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 2024. ISBN 978-80-246-5810-0.
- [26] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert a WALKER, Jearl. *Fyzika: Druhé přepracované vydání*. 2019. Brno: VUTIUM, 2019. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [27] KITTEL, Ch. *Introduction to Solid State Physics*. 9th ed. Wiley, 2005. ISBN 0-471-68057-5.
- [28] AULETTA, G.; FORTUNATO, M. a PARISI, G. *Quantum Mechanics*. Cambridge University Press, 2009. ISBN 978-0-521-86963-8.
- [29] ZALLEN, Richard. *The physics of amorphous solids*. Physics textbook. Weinheim: Wiley-VCH, [2004]. ISBN 0-471-29941-3.
- [30] DE GRAEF, M. a MCHENRY, M. E. *Structure of Materials: An Introduction to Crystallography, Diffraction, and Symmetry*. Cambridge University Press, 2007. ISBN 978-0-521-65151-6.
- [31] JANIŠ, V. a KOLORENČ, J. Statistická náhodnost v kovových materiálech: elektrický odpor, difuze a lokalizace elektronů. *Československý časopis pro fyziku*. 2005, roč. 55, č. 4, s. 316-320.
- [32] COWLEY, J. M. *Diffraction Physics*. 3rd ed. Elsevier, 1995. ISBN 0-444-82218-6.
- [33] DATTA, Supriyo. *Electronic transport in mesoscopic systems*. Cambridge studies in semiconductor physics and microelectronic engineering. New York: Cambridge University Press, 1997. ISBN 978-0-521-59943-6.
- [34] KETTEMANN, Stefan a BRANDES, Tobias (ed.). *Anderson localization and its ramifications: disorder, phase coherence and electron correlations*. Lecture notes in physics. Berlin: Springer, c2003. ISBN 3-540-40785-5.
- [35] LAGENDIJK, A.; VAN TIGGELEN, B. A. a WIERSMA, D. Fifty years of Anderson Localization. *Physics Today*. 2009, roč. 62, č. 8, s. 24-29.
- [36] KLIMENT, J. *Saze*. ČSVTS, 2007. ISBN 978-80-02-02004-2.
- [37] ASTM INTERNATIONAL. ASTM D1765, *ASTM D1765: Standard Classification System for Carbon Blacks Used in Rubber Products*. 2018.
- [38] DUCHÁČEK, Vratislav a HRDLÍČKA, Zdeněk. *Gumárenské suroviny a jejich zpracování*. 2009. Praha: VŠCHT Praha, 2009. ISBN 978-80-7080-713-2.
- [39] PIERSON, H. O. *Handbook of carbon, graphite, diamond and fullerenes: properties, processing and applications*. Noyes Publications, 1993. ISBN 0-8155-1339-9.
- [40] DELHAËS, Pierre (ed.). *Graphite and precursors*. CRC Press, 2001. ISBN 9780429165399.

- [41] STAUFFER, D. a AHARONI, A. *Introduction to Percolation Theory*. 2nd ed. Taylor & Francis, 2003. ISBN 0-7484-0253-0.
- [42] OSSWALD, T. A. a MENGES, G. *Material Science of Polymers for Engineers*. 3rd ed. Hanser, 2012. ISBN 978-1-56990-514-2.
- [43] MUTISO, R. M. a WINEY, K. I. Electrical Conductivity of Polymer Nanocomposites. In: *Polymer Science: A Comprehensive Reference - Volume 7 - Nanostructured Polymer Materials and Thin Films*. Elsevier, 2012, s. 327-344. ISBN 9780444593849.
- [44] THORNTON, S. T. a REX, A. F. *Modern physics for scientists and engineers*. 4th ed. Cengage Learning, 2013. ISBN 978-1-133-11186-3.
- [45] GISMATULIN, A. A.; KAMAEV, G. N.; KRUCHININ, V. N. a ET AL. Charge transport mechanism in the forming-free memristor based on silicon nitride. *Sci. Rep.* 2021, roč. 11, č. 2417.
- [46] SHANDILYA, A.; SCHADLER, L. a SUNDARARAMAN, R. First-principles identification of localized trap states in polymer nanocomposite interfaces. *Journal of Materials Research*. 2020, roč. 35, č. 8, s. 1-9.
- [47] JUNG; CHOI a MOCANU, ET AL. Modeling Electrical Percolation to optimize the Electromechanical Properties of CNT/Polymer Composites in Highly Stretchable Fiber Strain Sensors. Online. *Scientific Reports*. 2019, roč. 9. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56940-8>. [cit. 2025-02-16].
- [48] RAM, R.; RAHAMAN, M.; ALDALBAHI, A. a ET AL. Determination of percolation threshold and electrical conductivity of polyvinylidene fluoride (PVDF)/short carbon fiber (SCF) composites: effect of SCF aspect ratio. *Polymer International*. 2017, roč. 66, č. 4, s. 573-582.
- [49] WANG, Y.; XU, Ch.; JAHNKE, T. a ET AL. Microstructural Modeling and Simulation of a Carbon Black-Based Conductive Polymer—A Template for the Virtual Design of a Composite Material. *ACS Omega*. 2022, roč. 7, č. 33, s. 28820-28830.
- [50] TANG, Ch.; LIU, L.; KE, K. a ET AL. Piezoresistive behavior of elastomer composites with segregated network of carbon nanostructures and alumina. *Nano Materials Science*. 2023, roč. 5, č. 3, s. 312-318.
- [51] DONNET, J. *Carbon black: Science and technology*. 2nd ed. Marcel Dekker, 1993. ISBN 0-8247-8975-X.
- [52] NAGORNAYA, M. N.; MYSHLYAVTSEV, A. a STRIZHAK, E. A. Effect of oxidized technical carbon on surface energy of rubber. *Voprosy Materialovedeniya*. 2019, roč. 98, č. 2, s. 96-101.
- [53] BASAN, S. a SANCAKTAR, E. Comparison of Electrical Conductivity in Compounds of Carbon Black With Natural and Butadiene Rubbers. *Front. Mater.* 2019, roč. 6, č. 265.
- [54] CHOI, H.; KIM, M.; AHN, D. a ET AL. Electrical percolation threshold of carbon black in a polymer matrix and its application to antistatic fibre. *Sci Rep.* 2019, roč. 9, 6338.
- [55] DAS, N. C.; CHAKI, T. K. a KHAISTGIR, D. Effect of processing parameters, applied pressure and temperature on the electrical resistivity of rubber-based conductive composites. *Carbon*. 2002, roč. 40, č. 6, s. 807-816.
- [56] FUNT, J. M. *Mixing of Rubber*. ISmithers Rapra Publishing, 2009. ISBN 978-1847354280.

- [57] SAU, K. A Review on Carbon Black Filled Conductive Rubber Composites. *International Journal for Research in Engineering Application & Management*. 2019, roč. 4, č. 12, s. 448-454.
- [58] HAREA, E.; DATTA, S. a STĚNIČKA, M. The Influence of Local Strain Distribution on the Effective Electrical Resistance of Carbon Black Filled Natural Rubber. *Polymers*. 2021, roč. 13, č. 15, s. 2411.
- [59] HAREA, E.; DATTA, S.; MALOCH, J. a ET AL. Novel perspectives on self-monitoring internal rubber failure using piezoresistivity. *International Journal of Fatigue*. 2023, roč. 175, č. 107825.
- [60] TANG, H.; CHEN, X.; TANG, A. a ET AL. Studies on the electrical conductivity of carbon black filled polymers. *Journal of Applied Polymer Science*. 1996, roč. 59, č. 3, s. 383-387.
- [61] YAMAGUCHI, K. a BUSFIELD, J. J. C. Electrical and mechanical behavior of filled elastomers. I. The effect of strain. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*. 2003, roč. 41, č. 17, s. 2079-2089.
- [62] YANG, H.; YUAN, L.; YAO, X. a ET AL. Monotonic strain sensing behavior of self-assembled carbon nanotubes/graphene silicone rubber composites under cyclic loading. *Composites Science and Technology*. 2020, roč. 200.
- [63] CHEN, J.; LI, H.; YU, Q. a ET AL. Strain sensing behaviors of stretchable conductive polymer composites loaded with different dimensional conductive fillers. *Composites Science and Technology*. 2018, roč. 168, s. 388-396.
- [64] ZHANG, S.; SUN, K.; LIU, H. a ET AL. Enhanced piezoresistive performance of conductive WPU/CNT composite foam through incorporating brittle cellulose nanocrystal. *Chemical Engineering Journal*. 2020, roč. 387, č. 124045.
- [65] TANG, J.; WU, Y.; MA, S. a ET AL. Strain-Sensing Composite Nanofiber Filament and Regulation Mechanism of Shoulder Peaks Based on Carbon Nanomaterial Dispersion. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2023, roč. 15, č. 5.
- [66] YANG, H.; YAO, X.; ZHENG, Z. a ET AL. Highly sensitive and stretchable graphene-silicone rubber composites for strain sensing. *Composites Science and Technology*. 2018, roč. 168, s. 371-378.
- [67] MERSCH, J.; WINGER, H.; NOCKE, A. a ET AL. Experimental Investigation and Modeling of the Dynamic Resistance Response of Carbon Particle-Filled Polymers. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2020, roč. 305, č. 10, s. 2000361.
- [68] CUI, X.; JIANG, Y.; XU, Z. a ET AL. Stretchable strain sensors with dentate groove structure for enhanced sensing recoverability. *Composites Part B: Engineering*. 2021, roč. 211, s. 108641.
- [69] ORFEO, A.; TUBALDI, E. a MCALORUM, J. Self-Sensing Rubber for Bridge Bearing Monitoring. *Sensors*. 2023, roč. 23, č. 6, s. 3150.
- [70] WANG, L.; WANG, X. a LI, Y. Relation between repeated uniaxial compressive pressure and electrical resistance of carbon nanotube filled silicone rubber composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2012, roč. 43, č. 2, s. 268-274.
- [71] ZHANG, R.; DENG, H.; VALENCA, R. a ET AL. Strain sensing behaviour of elastomeric composite films containing carbon nanotubes under cyclic loading. *Composites Science and Technology*. 2013, roč. 74, s. 1-5.
- [72] BHAGAVATHESWARAN, E. S.; STÖCKELHUBER, K. W.; VAIKUNTAM, S. R. a ET AL. Time and temperature dependent piezoresistive behavior of conductive

- elastomeric composites. *Rubber Chemistry and Technology*. 2018, roč. 91, č. 4, s. 651–667.
- [73] JUNG, S.; CHOI, H. W.; MOCANU, F. C. a ET AL. Modeling Electrical Percolation to optimize the Electromechanical Properties of CNT/Polymer Composites in Highly Stretchable Fiber Strain Sensors. *Scientific Reports*. 2019, roč. 9, s. 20376.
- [74] PEIDAYESH, H.; ŠPITALSKÝ, Z. a CHODÁK, I. Electrical Conductivity of Rubber Composites with Varying Crosslink Density under Cyclic Deformation. *Polymers*. 2022, roč. 14, č. 17, s. 3640.
- [75] ALOUI, S.; LANG, A. a DECKMANN, H. Simultaneous characterization of dielectric and dynamic-mechanical properties of elastomeric materials under static and dynamic load. *Polymer*. 2021, roč. 215, č. 3, s. 123413.
- [76] HAREA, E.; DATTA, S. a MALOCH, J. Rubber-based piezoresistive sensing: a new approach based on hydrodynamic flow of material deformation describing nonlinear signals in stretchable sensors. *Polymer Bulletin*. 2024, roč. 82, č. 3, s. 799-815.
- [77] STRUMPLER, R. a GLATZ-REICHENBACH, J. Conducting Polymer Composites. *Journal of Electroceramics*. 1999, roč. 3, s. 329–346.
- [78] SMITH METAL. 7050 Aluminium - datasheet. Online. Dostupné z: <https://www.smithmetal.com/pdf/aluminium/7xxx/7050.pdf>. [cit. 2025-05-08].
- [79] STAHLHANDEL GRÖDITZ. 42CrMo4 + QT - datasheet. Online. Dostupné z: [https://www.stahlportal.com/fileadmin/user\\_upload/1.7225\\_Material\\_Data\\_Sheet.pdf](https://www.stahlportal.com/fileadmin/user_upload/1.7225_Material_Data_Sheet.pdf). [cit. 2025-05-08].
- [80] FILLAMENTUM MANUFACTURING, ČESKÁ REPUBLIKA. ABS Extrafill - datasheet. Online. Dostupné z: [https://www.materialpro3d.cz/user/documents/upload/datasheet\\_abs\\_extrafill.pdf](https://www.materialpro3d.cz/user/documents/upload/datasheet_abs_extrafill.pdf). [cit. 2025-05-08].
- [81] DOWLING, N. E. *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue*. 4th ed. Essex, England: Pearson Education Limited, 2013. ISBN 978-0-273-76455-7.
- [82] PRINCI, Elisabetta. *Rubber: Science and Technology*. 2019. Berlin: Walter de Gruyter GmbH & Co. ISBN 978-3-11-064031-1.
- [83] CIULLO, Peter A. a HEWITT, Norman. *The Rubber Formulary*. 1999. New York: Noyes Publications/William Andrew Publishing, 1999. ISBN 0-8155-1434-4.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 1 Křivka skutečného napětí a deformace při jednoosém tlakovém zatížení. ....                                                                                                                                                                                                         | 14 |
| Obrázek 2 Silové poměry při volném skluzu (a) a s dokonale tuhou vazbou (b) zátěžných ploch.....                                                                                                                                                                                             | 16 |
| Obrázek 3 Křivky napětí a deformace při jednoosém tlakovém zatížení: vliv vazeb zátěžných ploch (a), vliv tvarového faktoru (b). ....                                                                                                                                                        | 17 |
| Obrázek 4 Časový průběh deformace při konstantním napětí. ....                                                                                                                                                                                                                               | 18 |
| Obrázek 5 Časový průběh napětí při konstantní deformaci. ....                                                                                                                                                                                                                                | 19 |
| Obrázek 6 Typický průběh Mullinsova efektu při cyklickém jednoosém tlakovém zatížení. ....                                                                                                                                                                                                   | 20 |
| Obrázek 7 Deformační odezva při harmonickém namáhání: časový průběh napětí a poměrné deformace (a); závislost napětí na poměrné deformaci (b). ....                                                                                                                                          | 20 |
| Obrázek 8 Vlnová funkce Blochova typu: lokalizovaný stav (a); delokalizovaný stav (b). ....                                                                                                                                                                                                  | 23 |
| Obrázek 9 Rozptyl elektronu na poruchách krystalové mřížky, zobrazena je substituční příměs a intersticiální atom .....                                                                                                                                                                      | 24 |
| Obrázek 10 Zpětný rozptyl elektronu .....                                                                                                                                                                                                                                                    | 25 |
| Obrázek 11 TEM snímky primárních částic různých druhů acetylenových elektricky vodivých sazí: mikrostruktura s vysokým obsahem rovinně uspořádaných grafitických domén (a); mikrostruktura tvořená deformovanými uhlíkovými vrstvami soustředně uspořádanými kolem růstového jádra (b). .... | 27 |
| Obrázek 12 TEM snímky aglomerátů acetylenových extravodivých sazí.....                                                                                                                                                                                                                       | 27 |
| Obrázek 13 Perkolační křivka.....                                                                                                                                                                                                                                                            | 29 |
| Obrázek 14 Kvantově-mechanické tunelování elektronu skrz potenciálovou bariéru; $\psi$ značí vlnovou funkci elektronu, $x$ je prostorová souřadnice a $L$ šířka potenciálové bariéry. ....                                                                                                   | 30 |
| Obrázek 15 Vývoj měrného elektrického odporu v průběhu míchání gumárenské směsi...33                                                                                                                                                                                                         | 33 |
| Obrázek 16 Typická odporová odezva pryže při zatížení jednoosým tahem. ....                                                                                                                                                                                                                  | 34 |
| Obrázek 17 Mechanicky indukovaná změna topologie perkolující sítě na makroskopické (a) a mikroskopické (b) úrovni. ....                                                                                                                                                                      | 35 |
| Obrázek 18 Idealizovaný kontakt dvou sférických částic.....                                                                                                                                                                                                                                  | 36 |
| Obrázek 19 Příklady odporových píků pozorovaných při tahových zkouškách. Názvy jednotlivých jevů jsou ponechány v původním anglickém znění, jelikož se v české odborné terminologii běžně nevyskytují a jejich překlad by mohl vést k nejasnostem v již tak nesjednocené nomenklatuře. ....  | 37 |
| Obrázek 20 Zkušební těleso .....                                                                                                                                                                                                                                                             | 40 |
| Obrázek 21 Vulkanizační forma: pohled (a), řez (b). ....                                                                                                                                                                                                                                     | 41 |
| Obrázek 22 Síť prvků konečně-prvkové simulace vulkanizační formy; směr zatížení – fialové šipky, uchycení – zelené šipky.....                                                                                                                                                                | 42 |
| Obrázek 23 Výsledky konečně-prvkové simulace vulkanizační formy: napětí von Mises (a); posunutí (b); poměrné přetvoření (c); součinitel bezpečnosti (d). ....                                                                                                                                | 43 |

|                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 24 Upínací přípravek pro volnou příčnou deformaci vzorku: pohled (a), řez (b); upínací šrouby a podložky – modrá, upínací miský – zelená, zkušební těleso – šedá, elektrody – žlutá.....                            | 44 |
| Obrázek 25 Upínací přípravek pro vyloučení příčné deformace vzorku: pohled (a), řez (b); upínací šrouby a podložky – modrá, tlačné desky a pouzdro – zelená, zkušební těleso – šedá, elektrody – žlutá.....                 | 45 |
| Obrázek 26 Síť prvků konečně-prvkové simulace upínacího přípravku pro volnou příčnou deformaci vzorku (a) a pouzdra pro vyloučení příčné deformace vzorku (b); směr zatížení – fialové šipky, uchycení – zelené šipky ..... | 47 |
| Obrázek 27 Výsledky konečně-prvkové simulace upínacího přípravku pro volnou příčnou deformaci vzorku: napětí von Mises (a); posunutí (b); poměrné přetvoření (c); součinitel bezpečnosti (d).....                           | 48 |
| Obrázek 28 Výsledky konečně-prvkové simulace pouzdra pro vyloučení příčné deformace vzorku: napětí von Mises (a); posunutí (b); poměrné přetvoření (c); součinitel bezpečnosti (d).....                                     | 49 |
| Obrázek 29 Hotová vulkanizační forma (a) a upínací šroub s podložkou (b). ....                                                                                                                                              | 50 |
| Obrázek 30 Součásti upínacích přípravků. ....                                                                                                                                                                               | 50 |
| Obrázek 31 Zkušební těleso s připojenými vodiči.....                                                                                                                                                                        | 53 |
| Obrázek 32 Upnutí vzorků na zkušebním stroji pomocí navržených přípravků: volná příčná deformace (a); vyloučená příčná deformace (b). ....                                                                                  | 53 |
| Obrázek 33 Celkový pohled na experimentální sestavu. ....                                                                                                                                                                   | 55 |
| Obrázek 34 Odporová odezva, vzorek NR50 – volná příčná deformace. ....                                                                                                                                                      | 58 |
| Obrázek 35 Odporová odezva, vzorek NR70 – volná příčná deformace. ....                                                                                                                                                      | 58 |
| Obrázek 36 Odporová odezva, vzorek NR90 – volná příčná deformace. ....                                                                                                                                                      | 59 |
| Obrázek 37 Odporová odezva, vzorek NR50 – vyloučená příčná deformace.....                                                                                                                                                   | 60 |
| Obrázek 38 Odporová odezva, vzorek NR70 – vyloučená příčná deformace.....                                                                                                                                                   | 60 |
| Obrázek 39 Odporová odezva, vzorek NR90 – vyloučená příčná deformace.....                                                                                                                                                   | 61 |

## SEZNAM TABULEK

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabulka 1 Rozdělení elektricky vodivých sazí dle hodnot specifického povrchu (BET) a olejového absorpčního čísla (OAN)..... | 26 |
| Tabulka 2 Receptury gumárenských směsí.....                                                                                 | 51 |
| Tabulka 3 Postup míchání gumárenských směsí. ....                                                                           | 52 |
| Tabulka 4 Stanovené časy $t_{90}$ .....                                                                                     | 52 |
| Tabulka 5 Rychlosti zatěžovací a odlehčovací rampy při volné příčné deformaci. ....                                         | 54 |
| Tabulka 6 Rychlosti zatěžovací a odlehčovací rampy při vyloučené příčné deformaci. ....                                     | 55 |

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

|       |                                                          |
|-------|----------------------------------------------------------|
| $A$   | amplituda pravděpodobnosti [–]                           |
| $d$   | průměr [m]                                               |
| $h$   | výška [m]                                                |
| $h_0$ | výška v nezatíženém stavu [m]                            |
| $h_e$ | efektivní výška [m]                                      |
| $E$   | intenzita elektrického pole [ $V \cdot m^{-1}$ ]         |
| $E$   | Youngův modulu pružnosti v tahu/tlaku [Pa]               |
| $E'$  | reálná složka komplexního modulu v tahu/tlaku [Pa]       |
| $E''$ | imaginární složka komplexního modulu v tahu/tlaku [Pa]   |
| $E^*$ | komplexní modul pružnosti v tahu/tlaku [Pa]              |
| $E_0$ | charakteristická hodnota elektrického pole               |
| $E_c$ | časově závislý kríkový modul v tahu/tlaku [Pa]           |
| $E_r$ | časově závislý relaxační modul v tahu/tlaku [Pa]         |
| $f$   | tvarový faktor [–]                                       |
| $F$   | síla [N]                                                 |
| $F_p$ | přídavná síla [N]                                        |
| $i$   | komplexní jednotka [–]                                   |
| $I$   | elektrický proud [A]                                     |
| $J$   | proudová hustota [ $A \cdot m^{-2}$ ]                    |
| $K$   | objemový modul pružnosti [Pa]                            |
| $l$   | délka [m]                                                |
| $l_0$ | délka v nezatíženém stavu [m]                            |
| $p$   | tlak [Pa]                                                |
| $P$   | pravděpodobnost [–]                                      |
| $q$   | exponent rychlosti růstu měrného elektrického odporu [–] |

|                     |                                                             |
|---------------------|-------------------------------------------------------------|
| $r$                 | radiální souřadnice [m]                                     |
| $R$                 | elektrický odpor [ $\Omega$ ]                               |
| $R$                 | poloměr [m]                                                 |
| $R_{a,i}$           | odporů jednotlivých agregátů plniva [ $\Omega$ ]            |
| $R_{e,j}$           | sumy meziagregátových odporů [ $\Omega$ ]                   |
| $s$                 | exponent popisující propojení částic v perkolující síti [–] |
| $S$                 | plocha [ $m^2$ ]                                            |
| $S_0$               | nedeformovaná plocha průřezu [ $m^2$ ]                      |
| $t$                 | čas [s]                                                     |
| $t$                 | exponent poklesu měrného elektrického odporu [–]            |
| $T$                 | absolutní teplotu systému [K]                               |
| $T_1$               | konstanta citlivosti tunelovacího procesu [–]               |
| $T_e$               | efektivní teplotní konstanta [–]                            |
| $U$                 | elektrické napětí [V]                                       |
| $v_c$               | kritické koncentrace plniva (perkolační práh) [–]           |
| $v_f$               | objemový zlomek plniva [–]                                  |
| $\delta$            | fázový posun                                                |
| $\delta$            | změna délky tělesa [ $m$ ]                                  |
| $\varepsilon$       | smluvní poměrné přetvoření [–]                              |
| $\bar{\varepsilon}$ | skutečné poměrné přetvoření [–]                             |
| $\varepsilon_0$     | amplituda poměrného přetvoření [–]                          |
| $\varepsilon_{11}$  | přetvoření ve směru působící [–]                            |
| $\varepsilon_{22}$  | poměrné přetvoření v příčném směru [–]                      |
| $\eta$              | činitel vnitřního tlumení [–]                               |
| $\nu$               | Poissonovo číslo [–]                                        |
| $\pi$               | Ludolfovo číslo [–]                                         |

---

|                |                                                             |
|----------------|-------------------------------------------------------------|
| $\rho$         | konstanta měrný elektrický odpor [ $\Omega \cdot m$ ]       |
| $\rho^0$       | referenční hodnota tunelovacího odporu [ $\Omega \cdot m$ ] |
| $\rho_f$       | měrný elektrický odpor plniva [ $\Omega \cdot m$ ]          |
| $\rho_m$       | měrný elektrický odpor matrice [ $\Omega \cdot m$ ]         |
| $\sigma$       | měrná elektrická vodivost [ $S \cdot m^{-1}$ ]              |
| $\sigma$       | smluvní napětí [Pa]                                         |
| $\bar{\sigma}$ | skutečné napětí [Pa]                                        |
| $\sigma_0$     | amplituda napětí [Pa]                                       |
| $\sigma_z$     | normálové napětí [Pa]                                       |
| $\tau_{rz}$    | smykové napětí [Pa]                                         |
| $\phi$         | tvarová funkce [–]                                          |
| $\omega$       | kruhová frekvence [ $rad \cdot s^{-1}$ ]                    |

## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha P1: 01-00\_ZKUŠEBNÍ\_TĚLESO\_A4
- Příloha P2: 02-00\_FORMA-SESTAVA\_A3
- Příloha P3: 02-01\_TVAROVÁ\_DESKA-SPODNÍ\_A3
- Příloha P4: 02-02\_TVAROVÁ\_DESKA-HORNÍ\_A3
- Příloha P5: 02-03\_PŘÍLOŽKA-SPODNÍ\_A4
- Příloha P6: 02-04\_PŘÍLOŽKA-HORNÍ\_A4
- Příloha P7: 02-05\_VLOŽKA\_FORMY\_A4
- Příloha P8: 03-00\_UPÍNACÍ\_ŠROUB\_A4
- Příloha P9: 04-00\_UPÍNACÍ\_PODLOŽKA\_A4
- Příloha P10: 05-00\_UPÍNACÍ\_MISKA-SESTAVA\_A4
- Příloha P11: 05-01\_KORPUS\_A4
- Příloha P12: 05-02\_DNO\_A4
- Příloha P13: 06-00\_TLAČNÁ\_DESKA-SESTAVA\_A4
- Příloha P14: 06-01\_ZÁKLADNA\_A4
- Příloha P15: 06-02\_TLAČNÁ\_DESKA\_A4
- Příloha P16: 07-00\_POUZDRO-SESTAVA\_A3
- Příloha P17: 07-01\_PLÁŠŤ\_A4
- Příloha P18: 07-02\_OBJÍMKA-STRANA\_ŠROUBU\_A4
- Příloha P19: 07-03\_OBJÍMKA-STRANA\_MATICE\_A4
- Příloha P20: 07-04\_VLOŽKA\_OBJÍMKY\_A4