



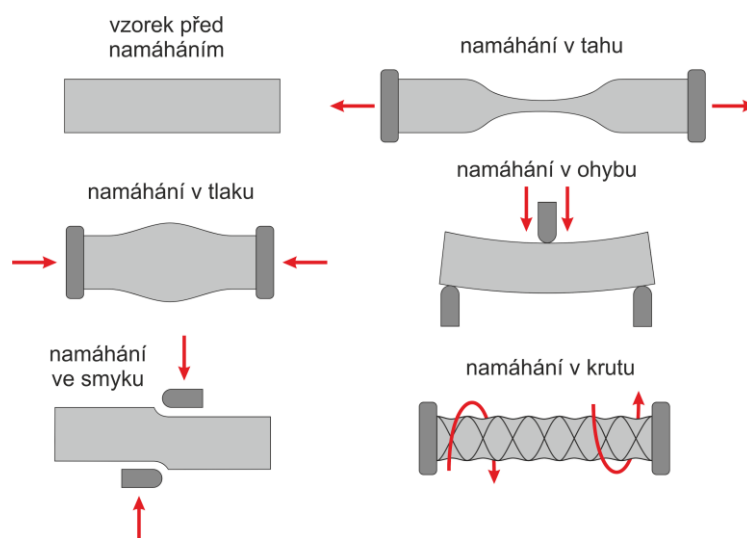
## Úloha č. 2

### Určování mechanických vlastností polymerních materiálů

#### 1 Teoretický úvod

Materiály pro elektrotechnické aplikace jsou kromě elektrického namáhání vystaveny také působení mechanických sil. V elektrotechnických aplikacích se objevuje velká škála materiálů lišících se svými mechanickými vlastnostmi. Vedle kovových materiálů (ve formě čistých kovů nebo slitin) se používají také anorganické materiály (keramiky, skla) a velké množství syntetických i přírodních makromolekulárních látek - polymerů (plasty, pryže, ale také např. dřevo či celulóзовý papír). Právě v případě polymerních materiálů se setkáváme s různým chováním materiálů při působení vnější síly, které je ovlivněno jejich rozmanitou vnitřní strukturou.

Zkoušení materiálů je v praxi nezbytnou součástí nejen vlastního výrobního postupu, ale i kontroly výrobků a polotovarů a je i důležitým prostředkem a základem vývojových a výzkumných prací. K posuzování mechanických vlastností materiálů slouží mechanické zkoušky. Mechanické zkoušky se standardně dělí do několika skupin podle (a) časového hlediska, (b) charakteru působící síly a (c) způsobu silového namáhání. Podle časového hlediska lze odlišit zkoušky krátkodobé (netrvající déle než několik minut) a zkoušky dlouhodobé. Na testovaný vzorek působící síla může být buď statická (pozvolna rostoucí, ustalující se) nebo dynamické (měnící se velmi rychle, skokově). Podle způsobu namáhání jsou zkoušky tahové, tlakové, ohybové, smykové (stříhové) a krutové.



Obr. 1: Druhy mechanického namáhání.

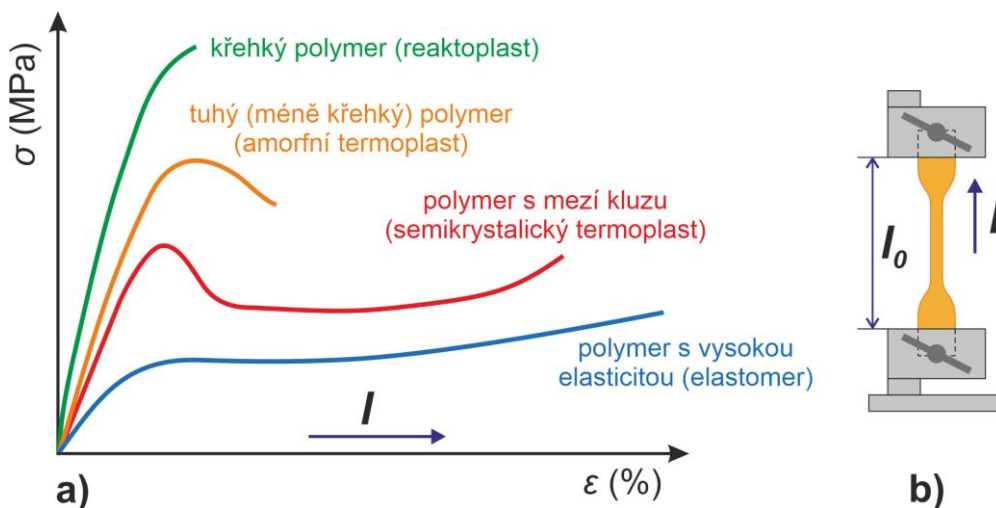


## Zkouška pevnosti v tahu polymerních materiálů

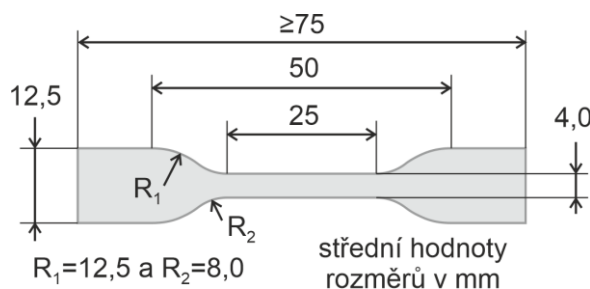
Jednou ze základních a vůbec nejdůležitějších zkoušek mechanických vlastností materiálů je bez ohledu na typ materiálu zkouška tahem. Při tahovém namáhání dochází k deformaci zkušebního tělesa až do jeho přerušení (přetržení).

Tahové charakteristiky jsou nejzákladnější mechanické charakteristiky testovaného materiálu. Jestliže je zkušební těleso vystaveno jednoosému namáhání v tahu, je možné průběh deformace, resp. poměrného prodloužení v závislosti na normálovém napětí, sledovat pomocí deformační křivky (pracovního diagramu). Deformační křivka poskytující komplexní představu o chování materiálu v celém průběhu tahové zkoušky se může pro jednotlivé materiály výrazně lišit. Typické příklady deformačních křivek pro polymerní materiály jsou znázorněny na Obr. 2a.

Tahová zkouška se provádí na zkušebních vzorcích (tělískách), které se upínají do čelistí zkušebního stroje tak, aby osa zkušebního vzorku ležela přesně v ose čelistí stroje, jak je ukázáno na Obr. 2b. Zkušební vzorky jsou standardně normované a velmi často jsou používány vzorky ve tvaru oboustranné lopatky. Pro testování polymerních materiálů se často využívají vzorky menších rozměrů dle Obr. 3.



Obr. 2: Znázornění deformačních křivek pro zkoušku tahem vybraných polymerních materiálů (a) a znázornění uchycení vzorku v čelistech zkušebního stroje (b).



Obr. 3: Vzorek pro zkoušku pevnosti v tahu (typ 5A dle ČSN EN ISO 527-2).

Během zatěžování plynule rostoucí silou se testovaný vzorek deformuje, až při určitém tahovém zatížení dojde k přerušení vzorku. Při zkoušce se registruje působící síla a odpovídající deformace. Zkušební těleso, zatěžované silou  $F$  se prodlužuje z počáteční měřené délky  $L_0$  na konečnou délku  $L_U$ . Počáteční plocha příčného průřezu zkušebního tělesa  $S_0$  ( $S_0 = a_0 \cdot b_0$ ) se při zkoušce naopak zmenšuje na konečnou plochu  $S_U$ . Působící síla  $F$  vztažená na jednotku plochy se nazývá mechanické napětí. Vzhledem k tomu, že osové tahové zatížení působí kolmo na ploše příčného průřezu, se jedná o normálové (jmenovité) mechanické napětí označované  $\sigma$ , které se určí ze vztahu:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \text{ (Pa = N/m}^2\text{)}.$$

V praxi se hodnota mechanického napětí pro polymery standardně uvádí v MPa (N/mm<sup>2</sup>).

Prodloužení  $\Delta L$  zkušebního vzorku v daném okamžiku tahové zkoušky se určí jako rozdíl měřené délky vzorku  $L$  v daném čase a počáteční délky vzorku  $L_0$ . Změnu délky vzorku lze standardně určit také jako poměrné prodloužení  $\varepsilon$  dle vztahu:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} (-).$$

Z uvedených vztahů vyplývá, že zaznamenávaná závislost  $F/\Delta L$  odpovídá závislosti  $\sigma/\varepsilon$ , přičemž tato závislost se nazývá také jako smluvní nebo pracovní diagram zkoušky tahem.

Počáteční přímkový úsek diagramu vyjadřuje úměrnost napětí a deformace podle Hookova zákona dle vztahu:

$$E_t = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ (Pa)},$$

kde  $E_t$  vyjadřuje **Youngův modul pružnosti v tahu**. Jak plyne z rovnice, je tato závislost přímková, tzn., že v oblasti platnosti Hookova zákona je prodloužení vzorku přímo úměrné působícímu mechanickému napětí. Čím vyšší hodnota modulu pružnosti je, tím vyšší je tuhost materiálu.



U některých polymerů (např. elastomerů nebo plastů s viskoelastickým chováním) je stanovení modulu pružnosti obtížné, protože se od počátku chovají nelineárně. V tomto případě se pak používají specifické veličiny pro charakterizování chování polymerů v počáteční oblasti pracovního diagramu (např. sečný modul pružnosti či gumárenské moduly). Sečný modul pružnosti se vypočítá dle vztahu:

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \text{ (Pa)}.$$

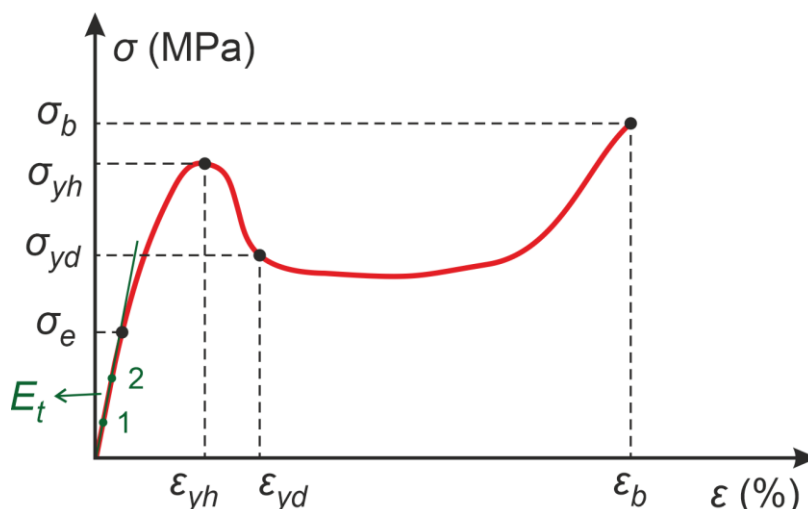
Při nárůstu mechanického napětí, kdy se křivka odchyluje od přímkového průběhu, je dosaženo tzv. **meze pružnosti**  $\sigma_E$ . Deformace v tahu, která nastává v materiálu do této meze, má charakter deformace pružné a je tedy vratná. V případě křehkých polymerů dochází k lomu těsně za mezí pružnosti při relativně malých deformacích.

Za mezí pružnosti dochází u vzorků méně křehkých polymerů při dalším zvyšování napětí k výraznější celkové deformaci, nastává již výrazná plastická (trvalá) deformace, pro jejíž vznik je v pracovním diagramu charakteristická **mez kluzu**  $\sigma_e$ . Mez kluzu je tedy nejmenší napětí, při němž dochází k podstatné deformaci a vzorek se začne výrazně prodlužovat (vodorovná část tahového diagramu za  $\sigma_e$ ). Pokud se vytvoří při vzniku výrazné plastické deformace lokální maximum napětí (dojde k následnému poklesu napětí), tak je možné definovat horní a dolní mez kluzu. Horní mez kluzu je lokálním maximem napětí a dolní mez je následným minimálním mechanickým napětím na pokračující křivce pracovního diagramu. U semikrystalických polymerů dochází za dolní mezí kluzu k opětovnému nárůstu napětí až do určitého maxima, kdy dojde k přetržení zkušební tělesa nebo k porušení soudržnosti doprovázené poklesem napětí a lomem. Při přetržení vzorku polymeru jsou definovány hodnoty **napětí při přetržení**  $\sigma_b$  a poměrného prodloužení při přetržení  $\varepsilon_b$ .

Kromě mezí pružnosti a kluzu je důležitou charakteristikou také **mez pevnosti v tahu**  $\sigma_m$ , jejíž poloha v pracovním diagramu závisí na typu polymeru. V případě semikrystalických polymerů může být mez pevnosti v tahu shodná s horní mezí kluzu nebo s mechanickým napětím při přetržení. Dosažené maximální mechanické napětí označované jako mez pevnosti v tahu  $\sigma_m$  se vypočítá dle vztahu:

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{S_0} \text{ (Pa)}.$$

Výše popsané důležité charakteristiky polymeru podrobeného tahové zkoušce jsou vyznačeny v následujícím pracovním diagramu. V pracovním diagramu jsou vyznačeny také body 1 a 2, které jsou potřebné pro výpočet sečného modulu pružnosti v tahu  $E_t$ . Dle normy ČSN EN ISO 527 je v bodě 1 zaznamenáno poměrné prodloužení 0,05 % ( $\varepsilon_1 = 0,0005$ ) a v bodě 2 je zaznamenáno poměrné prodloužení 0,25 % ( $\varepsilon_2 = 0,0025$ ).



Obr. 4: Pracovní diagram pro semikrystalický polymer s horní a dolní mezí kluzu.

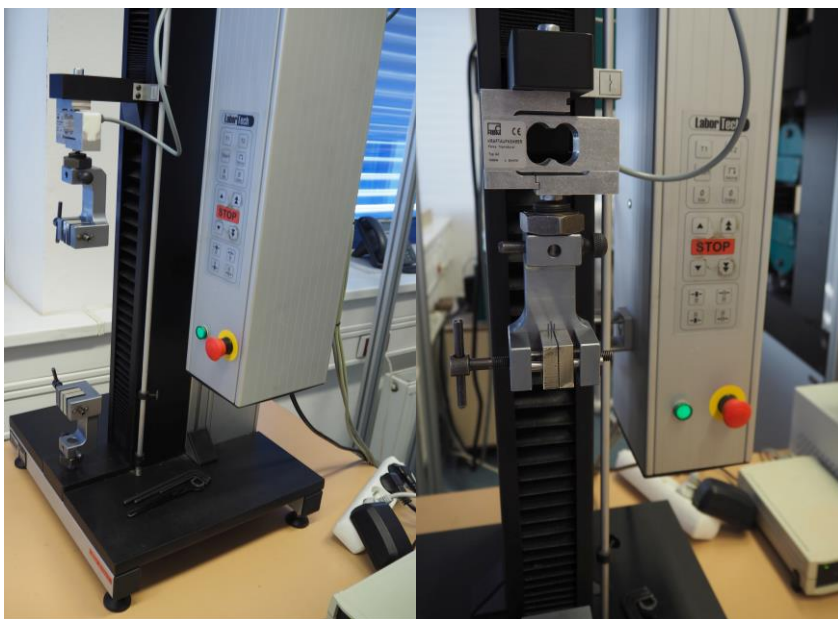
## 2 Zadání úlohy

1. Proveďte zkoušku pevnosti v tahu pro tři odlišné typy polymerních materiálů pomocí univerzálního laboratorního zkušebního stroje.
2. Hodnoty na ose dráhy příčnicku přepočítejte na poměrné prodloužení  $\epsilon$  a hodnoty síly působící na vzorek přepočítejte na mechanické napětí  $\sigma$ .
3. Pro každý vzorek graficky zpracujte pracovní diagram a rozhodněte, který z testovaných materiálů je dle deformační křivky i) elastomer (silikonová pryž), ii) termoplast (ethylenvinylacetát) a iii) křehký reaktoplast (epoxidová pryskyřice).
4. Na základě souboru s exportovanými hodnotami dráhy a síly (deformační křivky) pro jednotlivé materiály vytvořte tabulky s následujícími veličinami:
  - výchozí hodnoty rozměrů před zkouškou ( $a_0$ ,  $b_0$ ,  $S_0$ ,  $L_0$ ),
  - dráhy příčnicku pro výpočet poměrných prodloužení ( $L_e$ ,  $L_b$ ,  $L_{max}$ ),
  - síly působící na vzorek pro výpočet mechanických napětí ( $F_e$ ,  $F_b$ ,  $F_{max}$ ),
  - charakteristická poměrná prodloužení ( $\epsilon_e$ ,  $\epsilon_b$ ,  $\epsilon_m$ ),
  - charakteristická mechanická napětí ( $\sigma_e$ ,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_m$ ),
  - sečný Youngův modul  $E_t$  pro hodnoty  $\epsilon_1 = 0,005$  a  $\epsilon_2 = 0,025$ .
5. Zhodnoťte průběhy tahových zkoušek provedených pro tři odlišné polymerní materiály a popište rozdíly mezi průběhy zaznamenanými pro jednotlivé materiály.



### **3 Používané přístroje a další laboratorní vybavení**

- univerzální zkušební stroj
- mikrometr nebo posuvné měřidlo pro měření rozměrů testovaných vzorků



Obr. 5: Používaný univerzální zkušební stroj (trhačka) s tenzometrem do síly 1 kN.

### **4 Postup měření**

1. Označte si vzorky jednotlivých polymerních materiálů a pomocí posuvného měřidla a mikrometru změřte jejich počáteční geometrické rozměry ( $a_0$ ,  $b_0$ ).
2. Na řídicím počítači spusťte software LabTest a otevřete v něm pomocí volby „Definice zkoušení → Otevři definici“ soubor s názvem „Tah\_ELTM\_2021.definice“ s uloženými parametry měření.



Obr. 6: Okno softwaru pro ovládání univerzálního zkušebního stroje a pro záznam zkoušek.

3. Kliknutím na ikonu „Nový soubor“ vytvořte soubor pro ukládání dat z měření. Soubor uložte do adresáře ELTM2021 a pojmenujte svým jménem s příponou „\_2021“.
4. Čelisti nastavte tak, aby jejich vzájemná vzdálenost byla 50 mm. Následně do čelistí vložte vzorek polymeru a pevně jej upněte.
5. Kliknutím na ikonu „Definice vybraných parametrů před zkouškou“ otevřete dialogové okno a v něm přes volbu „Vypočti plochu“ vložte geometrické rozměry vzorku a vzdálenost čelistí. Do okna „Číslo vzorku“ vložte vaše zvolené označení.
6. Zkušební stroj je nyní připraven pro provedení zkoušky pevnosti v tahu. Zkoušku spustíte stisknutím ikony „Start nové zkoušky“ se symbolem semaforu. Program se automaticky přepne na panel „Pracovní graf“ (jedna z ikon v levé části obrazovky).
7. V grafu sledujte nárůst síly v závislosti na posuvu příčnicku stroje. V okamžiku přetržení vzorku je zkouška ukončena a stroj se automaticky zastaví. Ze softwaru odečtete vzdálenost čelistí jako jejich uraženou dráhu.
8. Zkoušku opakujte pro vzorky dalších dvou typů polymerních materiálů.
9. Vyexportujte si naměřená data z programu LabTest pro další zpracování následujícím postupem:
  - a. Nejprve si uložte celkovou tabulku s označením vzorků a s dosaženými hodnotami. Uložení provedete tak, že kliknete na panelu „Seznam zkoušek“ pravým tlačítkem myši a z kontextového menu vyberte volbu „Exportuj tabulku do Excelu“.
  - b. Následně klikněte na zkoušku číslo 1, přepněte se do panelu „Pracovní graf“ a po kliknutí pravým tlačítkem z kontextového menu vyberte volbu „Naměřené vzorky celého grafu“. Zobrazí se tabulka s naměřenými hodnotami. V pravé části vyberte „Do ASCII CSV souboru“ a soubor uložte pod vlastním jménem



do vlastní složky v adresáři Plocha/ELTM (složku i soubory pojmenujte tak, abyste se v nich případně vyznali i po delší době).

- c. Stejným způsobem vyexportujte naměřená data z ostatních provedených zkoušek a uložte je do vlastní složky.
- d. Soubory si následně můžete nahrát na Google Disk nebo odeslat z prostředí Webmail na email.