



# IDENTIFIKACE VISKOELASTICKÝCH VLASTNOSTÍ VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ S POLYMERNÍ MATRICÍ

## Diplomová práce

*Studijní program:* N2301 – Strojní inženýrství

*Studijní obor:* 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály

*Autor práce:* **Bc. Jakub Típek**

*Vedoucí práce:* Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.



VLOŽIT ZADÁNÍ

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

**ANOTACE**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**

**Katedra strojírenské technologie**

**Oddělení tváření kovů a plastů**

Identifikace viskoelastických vlastností vláknových kompozitů s  
polymerní matricí

Identification of viscoelastic behaviour of fiber reinforced polymer  
composites

**Abstrakt:**

Práce se zabývá identifikací viskoelastických vlastností vláknových polymerních kompozitů. V teoretické části jsou popsány používané materiály, výroba kompozitních systémů a jejich vztah k metodě konečných prvků. V praktické části je uvedeno studium viskoelastické odezvy dlouhovláknového kompozitního systému na vnější namáhání prostřednictvím dynamicko mechanické analýzy.

**Klíčová slova:**

viskoelasticita, polymerní, kompozitní, materiál, vlákna, výztuž, metoda konečných prvků, dynamicko mechanická analýza

**Abstract:**

The thesis is focused on identification of viscoelastic behaviour of fiber composite systems. Theoretic part of thesis describes widespread materials and manufacturing technologies. Relation between composite systems and finite elements method is mentioned too. Practical part of thesis is focused on testing of viscoelastic reaction between composite systems and outer load. Dynamic mechanical analysis is used.

**Keywords:**

viscoelasticity, polymer, composite, material, fibres, reinforcement, finite elements analysis, dynamic mechanical analysis

## **Poděkování:**

V úvodu bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli odborné rady a pomoc při vypracování diplomové práce, jmenovitě svému vedoucímu práce Ing. Lubošovi Běhálkovi, Ph.D. za vstřícnost, doc. Ing. Antonínu Potěšilovi, CSc. za zprostředkování tématu diplomové práce a Ing. Petru Horníkovi za rady spojené s experimentem.

Velký vděk patří hlavně mé rodině za podporu během celého studia na Technické Univerzitě v Liberci.

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže SGS 21005 „Výzkum vlivu procesních veličin na kvalitu výsledných produktů technologických procesů“.

|       |                                                                           |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Úvod                                                                      | 10 |
| 2     | Teoretická část                                                           | 11 |
| 2.1   | Kompozitní polymerní materiály vyztužené vlákny                           | 11 |
| 2.1.1 | Charakteristika vláknových kompozitních materiálů                         | 13 |
| 2.1.2 | Rozdělení vláknových polymerních kompozitních materiálů z hlediska vláken | 20 |
| 2.1.3 | Polymery používané pro výrobu matrice                                     | 23 |
| 2.1.4 | Základní způsoby výroby kompozitních systémů s reaktoplastickou matricí   | 25 |
| 2.1.5 | Základní způsoby výroby kompozitního systému s termoplastickou matricí    | 28 |
| 2.2   | Odezva kompozitů na vnější termomechanické namáhání                       | 29 |
| 2.2.1 | Přechodové teploty                                                        | 29 |
| 2.2.2 | Smrštění kompozitu                                                        | 30 |
| 2.2.3 | Statické vnější namáhání                                                  | 30 |
| 2.2.4 | Dynamické vnější namáhání                                                 | 31 |
| 2.2.5 | Mikromechanická a makromechanická kritéria porušení                       | 34 |
| 2.2.6 | Porušení kompozitu                                                        | 38 |
| 2.3   | Vybrané reologické modely pro popis vlastností materiálu                  | 40 |
| 2.3.1 | Hookův model                                                              | 40 |
| 2.3.2 | Newtonův model                                                            | 41 |
| 2.3.3 | Saint Venantův model                                                      | 41 |
| 2.3.4 | Maxwellův model                                                           | 42 |
| 2.3.5 | Voigt-Kelvinův model                                                      | 43 |
| 2.3.6 | Tucketův model                                                            | 43 |
| 2.3.7 | Model Bighamovy látky                                                     | 44 |
| 2.3.8 | Model elasto-viskoplastický                                               | 45 |
| 2.4   | Metoda konečných prvků                                                    | 45 |
| 2.4.1 | Časová závislost analyzovaného děje                                       | 46 |
| 2.4.2 | Povaha MKP z hlediska linearity                                           | 47 |
| 2.4.3 | Matematický aparát                                                        | 47 |
| 2.4.4 | Definice hmoty                                                            | 48 |
| 2.4.5 | Definice materiálu                                                        | 49 |

|       |                                                                              |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4.6 | Pevnostní kritéria pro kompozitní materiály                                  | 53 |
| 3     | Experimentální část                                                          | 54 |
| 3.1   | Kompozitní systém                                                            | 54 |
| 3.1.1 | Popis kompozitního systému                                                   | 54 |
| 3.1.2 | Strukturní charakteristika kompozitního systému pomocí počítačové tomografie | 55 |
| 3.2   | Studium (dynamicko-)mechanických vlastností kompozitních struktur            | 59 |
| 3.2.1 | Dynamicko mechanický analyzátor DMA Q800                                     | 59 |
| 3.2.2 | Příprava měření                                                              | 60 |
| 3.2.3 | Dynamické namáhání při zatížení vzrůstající frekvencí za konstantní teploty  | 61 |
| 3.2.4 | Dynamické namáhání konstantní frekvencí za proměnné teploty.                 | 69 |
| 3.2.5 | Statické namáhání za konstantního zatížení – kríp                            | 74 |
| 3.2.6 | Statické namáhání za konstantní deformace – relaxace napětí                  | 82 |
| 4     | Závěr                                                                        | 86 |

## Seznam zkratk a symbolů

| LATINSKÁ ABECEDA                                    |                      |                                                             |
|-----------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------|
| A                                                   | [mm <sup>2</sup> ]   | Plocha                                                      |
| A <sub>f</sub>                                      | [ - ]                | Objemové zastoupení vláken                                  |
| A <sub>m</sub>                                      | [ - ]                | Objemové zastoupení matrice                                 |
| D                                                   | [ - ]                | Disipační funkce                                            |
| E                                                   | [Pa]                 | Modul pružnosti                                             |
| E'                                                  | [Pa]                 | Modul pružnosti                                             |
| E''                                                 | [Pa]                 | Komplexně sdružený modul pružnosti                          |
| E <sub>c</sub>                                      | [Pa]                 | Creepový modul                                              |
| f'                                                  | [ - ]                | Vazebný koeficient kritéria Tsai-Wu                         |
| F                                                   | [N]                  | Síla                                                        |
| G                                                   | [Pa]                 | Modul pružnosti ve smyku                                    |
| h                                                   | [mm]                 | Výška                                                       |
| k <sub>σ</sub>                                      | [ - ]                | Koeficient koncentrace napětí mikromechanického kritéria    |
| k <sub>ε</sub>                                      | [ - ]                | Koeficient koncentrace protažení mikromechanického kritéria |
| l                                                   | [mm]                 | Délka                                                       |
| m <sub>of</sub>                                     | [ - ]                | Koeficient Puckova kritéria závislý na materiálu vlákna     |
| O                                                   | [mm <sup>3</sup> ]   | Objem                                                       |
| p <sub>21</sub> , p <sub>12</sub> , p <sub>22</sub> | [ - ]                | Sklon lomové křivky Puckova kritéria                        |
| R                                                   | [Pa]                 | Lomový odpor Puckova kritéria                               |
| t                                                   | [s]                  | Čas                                                         |
| T <sub>f</sub>                                      | [°C]                 | Teplota viskozního toku                                     |
| T <sub>g</sub>                                      | [°C]                 | Teplota zesklňování                                         |
| T <sub>m</sub>                                      | [°C]                 | Teplota tání                                                |
| w <sub>p</sub>                                      | [J]                  | Potenciální energie                                         |
| MATICE A VEKTORY                                    |                      |                                                             |
| [C]                                                 | [Pa]                 | Matice tlumení                                              |
| [K]                                                 | [Pa]                 | Matice tuhosti                                              |
| [M]                                                 | [kg]                 | Matice hmotnosti                                            |
| $\vec{F}$                                           | [N]                  | Globální vektor ekvivalentních vnějších sil v uzlech        |
| $\vec{U}$                                           | [m]                  | Vektor posuvu                                               |
| $\vec{\dot{U}}$                                     | [m.s <sup>-1</sup> ] | Vektor rychlosti                                            |
| $\vec{\ddot{U}}$                                    | [m.s <sup>-2</sup> ] | Vektor zrychlení                                            |
| $\vec{X}$                                           | [m]                  | Vektor polohy                                               |
| ŘECKÁ ABECEDA                                       |                      |                                                             |
| β                                                   | [s <sup>-1</sup> ]   | Konstanta tlumení                                           |
| γ                                                   | [%]                  | Zkos                                                        |
| Δ                                                   | [mm]                 | Rozdíl                                                      |
| δ                                                   | [°]                  | Fázový posun                                                |
| ε                                                   | [%]                  | Poměrné prodloužení                                         |
| ε <sub>0</sub>                                      | [%]                  | Amplituda deformace                                         |
| ε <sub>12</sub>                                     | [%]                  | Poměrná deformace tečným napětím                            |
| ε <sub>c</sub>                                      | [%]                  | Deformační mez únavy                                        |
| ε <sub>m</sub>                                      | [%]                  | Prodloužení na mezi pevnosti                                |
| η                                                   | [Pa.s]               | Dynamická viskozita                                         |
| ν                                                   | [ - ]                | Poissonovo číslo                                            |



|              |                        |                                  |
|--------------|------------------------|----------------------------------|
| $\sigma$     | [Pa]                   | Napětí normálové                 |
| $\sigma_0$   | [Pa]                   | Amplituda napětí                 |
| $\sigma_c$   | [Pa]                   | Napětíová mez únavy              |
| $\sigma_k$   | [Pa]                   | Napětí na mezi kluzu             |
| $\sigma_m$   | [Pa]                   | Napětí na mezi pevnosti          |
| $\sigma_o$   | [Pa]                   | Ohybové napětí                   |
| $\tau_{12}$  | [Pa]                   | Smykové napětí                   |
| $\tau_{fmp}$ | [Pa]                   | Pevnost spojení vlákna a matrice |
| $\omega$     | [rad.s <sup>-1</sup> ] | Úhlová rychlost                  |

#### **INDEXY**

|   |                                    |
|---|------------------------------------|
| 1 | Směr vláken                        |
| 2 | Směr kolmý k vláknům               |
| 3 | Směr normálový k rovině ortotropie |
| f | Vlákno                             |
| m | Matrice                            |
| t | Tahové napětí                      |
| d | Tlakové napětí                     |
| P | Mez pevnosti                       |

#### **ZKRATKY**

|      |                                       |
|------|---------------------------------------|
| CT   | Počítačová tomografie                 |
| DMA  | Dynamicko-mechanická analýza          |
| DSC  | Diferenční skenovací kalorimetrie     |
| GMT  | Termoplasty vyztužené skelnou matricí |
| LFT  | Termoplasty vyztužené dlouhými vlákny |
| MKP  | Metoda konečných prvků                |
| FEA  | Metoda konečných prvků                |
| RIM  | Reakční vstřikování                   |
| RTM  | Vstřikování pryskyřice                |
| SMC  | Plošné lisovací materiály             |
| UF-R | Močovino-formaldehydová pryskyřice    |
| UP-R | Nenasycená polyesterová pryskyřice    |
| ZMC  | Vstřikování reaktoplastů              |

## **1 Úvod**

Kompozitní materiály, kterými se tato práce zabývá, zaznamenávají koncem dvacátého století obrovský rozmach. Jsou hojně využívány díky výhodným vlastnostem, mezi něž patří nízká hmotnost, vysoká pevnost a tuhost. Konstruují se z nich nejrozličnější výrobky určené pro náročné aplikace a své využití nalézají v dopravě, sportu, kde jsou zmíněné vlastnosti důležité zejména pro nízkou spotřebu energie. Nízká hmotnost znamená nižší energetické náklady, což je v poslední době velmi diskutované téma.

Práce se kompozitních materiálů týká v oblasti systémů s polymerní, zejména reaktoplastickou matricí, která vykazuje specifickou materiálovou odezvu. Je charakteristická časově závislou odezvou na vnější namáhání a tento jev se nazývá viskoelastické chování materiálu. Viskoelastická je předmětem zkoumání praktické části práce. Ke stanovení materiálové odezvy je využito dynamicko mechanické termoanalýzy, která umožňuje vystavovat zkoušené vzorky proměnným zatěžujícím podmínkám a různým podmínkám prostředí.

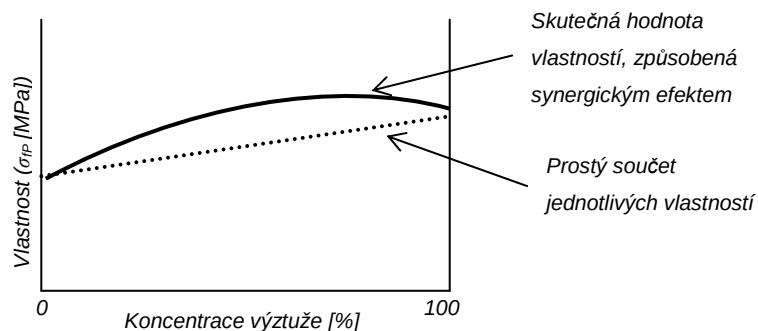
Téma práce je řešeno s firmou LENAM, s.r.o., která se zabývá numerickými simulacemi prostřednictvím software MKP. V teoretické části je zmíněna metoda konečných prvků, která se využívá při numerických simulacích bezpečnosti součástí, optimalizaci technologických procesů, a jiné. Pro tuto metodu jsou mimo jiné důležitá vstupní materiálová data, která jsou nezbytná pro přesný výpočet. Získaná data budou v budoucnu využita pro provedení strukturální analýzy.

## **2 Teoretická část**

### **2.1 Kompozitní polymerní materiály vyztužené vlákny**

Materiály označované jako kompozitní jsou dvou a více složkové materiály, jejichž spojením dostaneme vlastnosti celku, který dosahuje lepších charakteristik než je tomu v případě každé jeho jednotlivé složky. Tento jev se nazývá synergický efekt (obr. 1) a materiálům propůjčuje vysokou měrnou pevnost, (mez pevnosti vztažená na jednotku hmotnosti) a pružnost oproti tradičním materiálům. Vláknové polymerní kompozity jsou tvořeny vlákny výztuže náhodně rozptýlenými, nebo přesně orientovanými v polymerní matrici. Využití nalézají v dynamicky se rozvíjejících odvětvích, jako jsou automobilový a námořní průmysl, sport, letectví, vojenské odvětví a kosmonautika.[1]

Polymerní kompozity zaznamenaly rozvoj v sedmdesátých letech minulého století. Nejprve byly hojně využívány pouze materiály na bázi reaktoplastů. V roce 1907 byla vyrobena první nádrž z fenolické pryskyřice, vyztužená azbestovými vlákny na základě patentu L. H. Baekelanda, který první tuto hmotu vyrobil. Během první poloviny dvacátého století docházelo k vývoji zejména epoxidových a polyesterových pryskyřic plněných skelnými vlákny a zpracovávaných hlavně laminováním. Tyto materiály nalézaly využití k výrobě letadel, lodí a automobilů. První automobilkou, která začala používat sklolaminát k výrobě všech svých modelů, byl americký Chevrolet s prvním modelem Corvette v roce 1953, viz Obr. 2. Další milník pro toto materiálové odvětví bylo zahájení výroby uhlíkových (1959) a aramidových (1971) vláken. Vývoj pokračoval přes termoplastické materiály, které opět našly využití v automobilovém průmyslu, první automobil (1975), který měl celou přední masku ze sklem vyztuženého termoplastu, byl Chevrolet Monza. Termoplastické matrice se však dodnes používají zhruba v desetinásobně menším objemu, než reaktoplastické i přes to, že jejich zpracování vstřikováním je v automobilovém průmyslu velmi rozšířený způsob výroby. Dalším významným objevem je objev americké agentury NASA, která vyvinula kompozitní polotovary ve formě prepregů (předimpregnovaný list s vlákny, uloženými v částečně vytvrzené polyesterové, vinylové nebo epoxidové matrici) a zařízení na jejich zpracování. V průběhu let vývoje byly zaváděny technologie zlepšující parametry výroby a nové materiály, jako strukturní lepidla či sendvičové materiály, kterými se tato práce však dále zabývat nebude.[2][3]



Obr. 1 Synergický efekt kompozitního materiálu [1]

Tendence dalšího vývoje těchto materiálů se dají odhadovat na vývojové tendenci množství použitých kompozitů při výrobě dopravních letadel. Zdroj [2] uvádí, že v roce 1970 bylo při výrobě dopravního letadla společnosti Airbus typu A300 použito pouhých 5 % kompozitních materiálů, v roce 2010 při vývoji prvního armádního letounu společnosti Airbus A400M je to již 35 % a tendence je stále stoupající. V letectví se jedná zejména o kompozity s uhlíkovými vlákny a prepregy. S vývojem nových materiálů a zlepšováním výrobních procesů lze očekávat jejich lepší cenovou dostupnost, vyšší poptávku a tím plynulý nárůst využití kompozitů ve všech odvětvích průmyslu.

Zajímavé využití nalézají polymerní kompozity také při výrobě tenisových raket. Vlákna jsou tvořena piezoelektrickým materiálem, který snímá deformace rakety a tyto hodnoty vysílá do mikroprocesoru, který v reakci na vstupní impulz zdeformuje vlákna tak, aby došlo k útlumu vibrací. Takto bude v budoucnu možné identifikovat selhání důležitých strojních součástí.



Obr. 2 Chevrolet Corvette z roku 1953 se sklolaminátovou karoserií

### **2.1.1 Charakteristika vláknových kompozitních materiálů**

Všechny vlastnosti kompozitů jsou ovlivněny vlastnostmi jejich složek. Množství materiálů ať matrice nebo výztuže je velmi široké, proto lze dosáhnout širokého spektra materiálových charakteristik. Vlastnosti jsou dále významně ovlivňovány také úrovní technologie výroby, respektive vad při výrobě vzniklých.

Pro zhotovení polymerního vláknového kompozitu se používají vyztužující vlákna v různých podobách. Od vláken krátkých (0,1 – 5) mm, přes nitě, po vlákna utkaná do tkanin, rohoží, přízí či rowingů (rowingem jsou myšlena vlákna stočená podél své osy). Výztuž v matrici zaujímá 5% až 80% objemu, vyztužující efekt se s rostoucím objemovým procentem zlepšuje. Nejčastěji jsou používána vlákna skleněná, uhlíková a aramidová (aromatický polyamid). Jsou také snahy o využití vláken přírodních, např. kokosových, lýkových apod. Matrice je povahy termoplastické (PP, PE, ABS) zpracováváné např. vstřikováním, lisováním) a hlavně reaktoplastické (EP-R, UP-R) vyráběné laminováním, stříkáním, reakčním a vstřikováním. [2]

- Výhody kompozitních materiálů:
  - o nízká hmotnost,
  - o tvarová neomezenost výrobků,
  - o značná pružnost při deformaci,
  - o široká paleta dostupných kombinací materiálů,
  - o tvarová stálost,
  - o odolnost proti vlivům prostředí,
  - o nízká tepelná roztažnost.
  
- Nevýhody kompozitních materiálů:
  - o směrová závislost vlastností,
  - o vyšší cena,
  - o obtížná identifikace drobných prasklin,
  - o složitější matematický popis pro účely numerických simulací,
  - o nedostatečné povědomí o technologii i konstrukci.

Počáteční volba kombinace materiálu výplně i výztuže je prováděna vždy s ohledem k následné aplikaci. Je potřeba zohlednit podmínky zatěžování, směr zatěžující síly a její charakter a prostředí, kterému bude výsledný materiál vystaven. Optimalizací těchto faktorů je dosaženo nejlepšího využití materiálových vlastností

a tedy vysoké měrné pevnosti. Vlastnosti výsledného kompozitního materiálu jsou ovlivněny zejména vzájemnou adhezí mezi vlákny a matricí, dále délkou, orientací a koncentrací vláken. Z orientace vláken vychází anizotropní, respektive ortotropní chování kompozitních materiálů. [2]

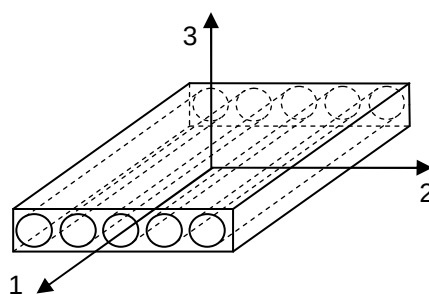
V dalších odstavcích jsou zmíněny charakteristické vlastnosti pro tuto skupinu materiálů.

- **Anizotropie, ortotropie**

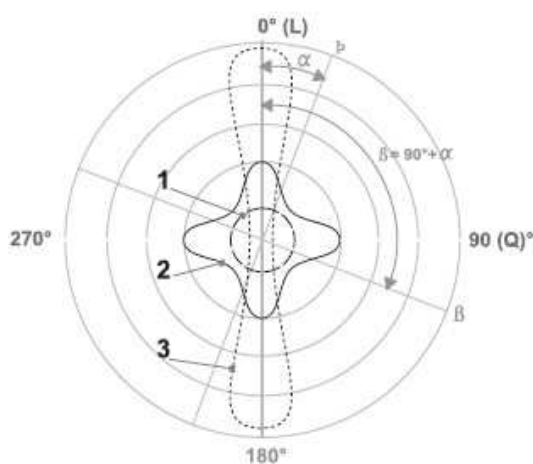
Pro materiály vyztužené vlákny je charakteristické směrové chování, kdy špičky mechanických vlastností pozorujeme v převládajícím směru vláken, proto se pro materiálový popis sloužící pro matematické modelování používá specifický výpočet. Ten je dále implementován do metody konečných prvků.

Anizotropie je druh směrově závislého chování materiálu, kdy při zatěžování v jakémkoli směru je zjištěna jiná odezva na vnější mechanické namáhání. Značná anizotropie je patrná u kompozitu vyztuženého krátkými vlákny, kde je v objemu materiálu rozptýleno velké množství různě orientovaných krátkých vláken, jejichž vlastnosti se prakticky dají využít jen ve směru jejich osy. Kolmo na osu vlákna lze přenést pouze napětí, které je nanejvýš rovno mezi pevností materiálu matrice. Nedosahuje se však ani těchto hodnot. Díky výrazně odlišným modulům pružnosti vlákna i matrice dochází k místní koncentraci protažení, což má za následek koncentraci napětí v jednotlivých místech kontaktu pojiva a plniva a jejich vzájemnému oddělování, tzv. delaminaci a tím i selhání celku. Proto zatížení v jiném než hlavním směru není doporučeno.[2]

Ortotropie je jev, kdy jednosměrně vyztužený materiál vykazuje chování, které je oproti anizotropii závislé pouze na třech základních osách kartézského souřadného systému. Elementární vrstva materiálu je znázorněna na Obr. 3. V každém směru má zcela odlišné chování, nejvyšší hodnota meze pevnosti je vždy naměřena ve směru vláken, tedy směru hlavní osy, viz Obr. 4. Typickým příkladem je vrstvený laminát, složený z jednotlivých jednosměrně vyztužených vrstev. Výroba z důvodu výrazného směrového chování spočívá v postupném kladení jednotlivých vrstev vzájemně pootočených např. o 45° čímž se kompenzují nízké mechanické vlastnosti ve směru jiném než je směr hlavní osy (osa 1 na obr. 3). Nestejnorodé chování lze s výhodou využít, ale matematický popis takového materiálu je komplikovaný. Každá vrstva má pět charakteristických hodnot pevnosti a to pevnost v tahu i tlaku v kolmém i rovnoběžném směru s vlákny a pevnost ve smyku a dále příslušné elastické konstanty.[2]



Obr. 3 Osy ortotropie kompozitního materiálu jednosměrně vyztuženého dlouhými vlákny



Obr. 4 Závislost meze pevnosti v tahu na směru zatěžování základních dlouhovláknenných kompozitů (L-hlavní osa, Q-vedlejší osa) [4]

- (1)... Rohožový materiál
- (2)... Tkaninový materiál
- (3)... Jednosměrně vyztužený

### • Vyztužující účinek

Zatížením kompozitu dojde k přenosu napětí z matrice na vlákno a dál na okolní vlákna. Protože mechanické vlastnosti kompozitu vytvářejí hlavně vyztužující vlákna, je důležité, aby celek splňoval následující podmínky, viz rovnice (1), (2), (3). Index  $m$  náleží matici,  $f$  vláknu.

V případě, že by tažnost matrice byla nižší než tažnost vlákna, došlo by k porušení matrice dříve, než by bylo možno využít pevnostní a tuhostní potenciál vlákna. Je-li tato podmínka splněna, projeví se synergický efekt, viz obr. 1. [2]

$$\varepsilon_m > \varepsilon_f \quad (1)$$

$$\sigma_m < \sigma_f \quad (2)$$

$$E_m < E_f \quad (3)$$

Z předchozích podmínek je zřejmé, že pro dobře fungující materiálový celek je základ soudržnost všech jeho jednotlivých složek. Protože vlákna přenáší většinu zatížení a matrice slouží jen jako nosič, je třeba, aby obě složky vytvářely pevné spojení, ideálně chemickou vazbou. Dokonalé spojení je složitější o ten fakt, že se většinou jedná o dva různé materiály. Pro zlepšení vzájemné přilnavosti se povrch vláken při výrobě apretuje. Apretace je proces zvyšující adhezi mezi matricí a vláknem. Využívají se k tomu zejména organosilany, které se dobře váží k matrici a s vlákny jsou spojeny vodíkovým můstkem. [2]

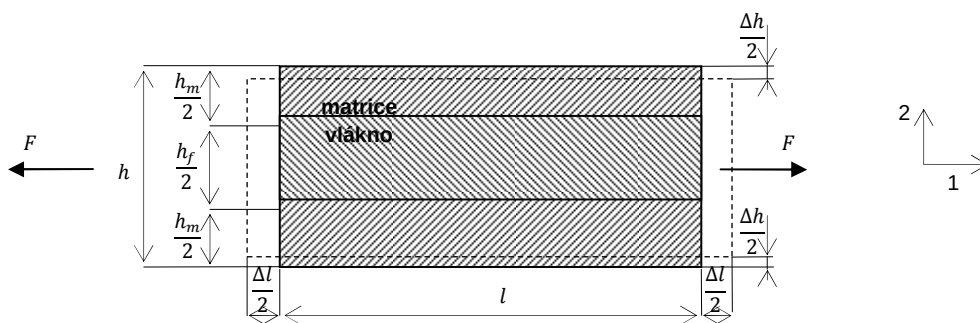
#### • **Přenos tahového napětí**

Po zatížení vnější silou, musí matrice zajistit přenos napětí na vlákna. Ta musí být od sebe rovnoměrně oddělena matricí, která přenáší lokální špičky napětí na okolní vlákna, čímž se dopad koncentrace napětí rozprostře. Dojde-li přes to k trhlině, matrice její rozvoj musí omezit. Proces zatěžování od klidového stavu po selhání lze rozdělit do čtyř stádií. Jednotlivé stavy lze opět logicky odvodit z rovnic (1), (2), (3). [2]

- o vlákna i matrice se deformují pouze pružně,
- o vlákna se deformují pružně, matrice plasticky,
- o plastická deformace vláken i matrice,
- o porušení vláken a následné porušení matrice.

Únosnost celku je daná objemovým zastoupením jednotlivých složek a jejich mechanickými vlastnostmi. Mez pevnosti v tahu a modul pružnosti lze stanovit následovně, kdy se vychází z předpokladů stejných poměrných deformací nebo rovnosti napětí v daném směru ortotropie. Vztahy jsou odvozeny z elementárního objemu, a ze zákona směsí, viz obr 5. [5]





Obr. 5 Elementární objem jednosměrně vyztuženého kompozitu

(h – výška elementárního objemu,  $h_m$  – výška matrice,  $h_f$  – výška vlákna, l – délka elementárního objemu, F – zatěžující síla)

Zdroj [5] uvádí, že za předpokladu, že poměrné prodloužení v podélném směru je v celém elementárním objemu stejně, platí:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{1f} = \varepsilon_{1m} \quad (4)$$

Poměrnou koncentraci složek vláken a matrice lze vyjádřit rovnicí (5) a (6)

$$V_f = \frac{O_f}{O} = \frac{A_f \cdot l}{A \cdot l} = \frac{A_f}{A}, \text{ analogicky } V_m = \frac{A_m}{A} \quad (5), (6)$$

Pro napětí v jednotlivých složkách:

$$\sigma_{1f} = E_f \cdot \varepsilon_{1f}, \text{ analogicky } \sigma_{1m} = E_m \cdot \varepsilon_{1m} \quad (7), (8)$$

Pro celkovou sílu působící na jednotkovém objemu platí rovnice (9)

$$F = A_f \cdot \sigma_{1f} + A_m \sigma_{1m} \quad (9)$$

Pro napětí přenášené jednotkovým objemem ve směru vláken platí rovnice (10), pro modul pružnosti rovnice (11)

$$\sigma_1 = \frac{F}{A} = V_f \cdot \sigma_{1f} + V_m \cdot \sigma_{1m} = (V_f \cdot E_f + V_m \cdot E_m) \cdot \varepsilon_1 \quad (10)$$

Pro modul pružnosti:

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} = V_f \cdot E_f + V_m \cdot E_m = V_f \cdot E_f + (1 - V_f) E_m \quad (11)$$

Poissonovo číslo vlákna a matrice a kompozitního celku lze stanovit následovnými vztahy:

$$\nu_f = -\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1f}} \quad (12)$$

$$\nu_m = -\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1m}} \quad (13)$$

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (14)$$

Modul pružnosti v příčném směru (osa (2) obr. 3) se stanoví z předpokladu rovnosti napětí dle rovnice (15), poměrná příčná deformace dle rovnice (16), modul pružnosti z pravidla směsí dle rovnice (17).

$$\sigma_2 = \sigma_{2f} = \sigma_{2m} \quad (15)$$

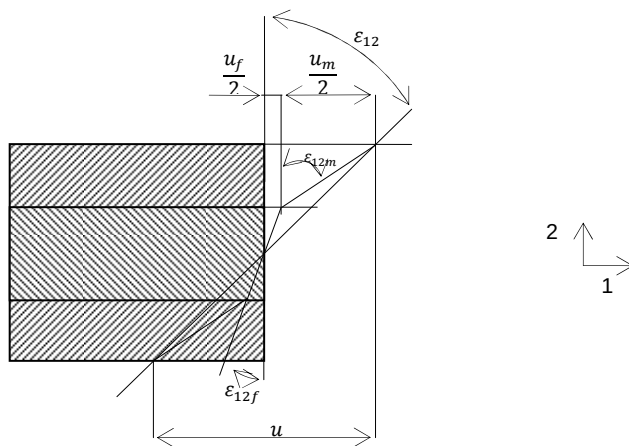
$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta h}{h} \quad (16)$$

$$E_2 = \frac{E_f \cdot E_m}{V_m E_f + V_f E_m} \quad (17)$$

#### • Namáhání smykem

Obdobně je tomu u namáhání smykem (viz Obr. 6), kde se vychází opět z rovnosti napětí, viz rovnice (18).

$$\tau_{12} = \tau_{12f} = \tau_{12m} \quad (18)$$



Obr. 6 Deformace elementárního objemu při namáhání smykem

( $u_{12}$  – celková deformace způsobená smykovým namáháním  $u_f$  – deformace vlákna způsobená smykovým namáháním,  $u_m$  – deformace matrice způsobená smykovým namáháním,  $\varepsilon_{12}$  – celková poměrná deformace způsobená smykovým namáháním,  $\varepsilon_{12f}$  – poměrná deformace vlákna způsobená smykovým namáháním,  $\varepsilon_{12m}$  – poměrná deformace matrice způsobená smykovým namáháním)

Poměrná deformace vlákna, matrice a kompozitního celku lze vyjádřit rovnicí (19) až (21) a modul pružnosti ve smyku rovnicí (22)

$$\varepsilon_{12f} = \frac{\tau_{12f}}{G_f} \quad (19)$$

$$\varepsilon_{12m} = \frac{\tau_{12m}}{G_m} \quad (20)$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{u}{h} = \left( \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \right) \tau_{12} \quad (21)$$

$$G_{12} = \frac{G_m \cdot G_f}{V_m G_f + V_f G_m} \quad (22)$$

#### • Zatížení tlakem

Zatížení tlakem není doporučeno, protože dochází k namáhání vláken na vzpěr, čímž vybočují ze svého směru a v těchto místech dochází k porušení vlákna vlivem jeho vnitřních poruch, nebo k oddělování vlákna od matrice. Při zatížení vláken tlakem je důležité, aby matrice dokázala eliminovat vybočení vláken. Protože dochází k jejich příčné deformaci, je důležitá hodnota Poissonova čísla matrice. Pro Poissonovo číslo platí, že jeho hodnota jak pro vlákna, tak pro matrici musí být podobná. Modul pružnosti je žádoucí co nejvyšší, proto jsou vhodná např. uhlíková vlákna. Při dodržení těchto podmínek je rozdíl mezi pevností kompozitu v tahu a v tlaku minimální.[2]

Protože modul pružnosti matrice je několikanásobně nižší než modul pružnosti vlákna, lze zjednodušeně konstatovat, že na mez pevnosti v tlaku kompozitu má vliv pouze materiál vláken a jejich koncentrace.

Chování kompozitu zatíženého tlakem ve směru vláken lze opět popsat pomocí pravidla směsí, tedy viz rovnice (23).[2]

$$E_{1d} = E_{1f} \cdot V_{1f} + E_{1m} \cdot V_{1m} \quad (23)$$

#### • Konstitutivní vztah ortotropní vrstvy

Konstitutivní vztah je maticový zápis napěťové odezvy na deformaci. V podstatě jde o Hookův zákon zapsaný v tenzorovém tvaru a upravený pro chování ortotropní vrstvy. Deformační tenzor se stanoví jako násobek tuhostní matice zprava vynásobené napěťovým tenzorem, viz rovnice (24). Maticový zápis je obzvláště vhodný pro použití při numerických simulacích.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (24)$$

### 2.1.2 Rozdělení vláknových polymerních kompozitních materiálů z hlediska vláken

Nejrozšířenější z hlediska využití jsou vlákna skleněná, uhlíková a aramidová. Dále vlákna přírodní, či vlákna vyrobená z polymerů jako je polyetylen s vysokou molekulovou hmotností (UHMW PE), nebo polyfenylen-benzobisoxazol (PBO) pod obchodním označením Zylon, který má velmi vysokou mez pevnosti při značně nízké hmotnosti.

- **Skleněná vlákna**

Skleněná vlákna se vyrábí tažením ze skleněné taveniny sklářského kmene (skloviny) složené z oxidů křemíku, hliníku, hořčíku, popřípadě vápníku, boru a ve speciálních případech s přidávkou oxidů zirkonu a sodíku.[2],[6]

Rozlišujeme několik základních druhů skelných vláken podle chemického složení, viz tabulka 1.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti materiálů používaných pro výrobu skelných vláken

| Název    | E [MPa] | $\sigma_m$ [MPa] | $\rho$ [g.cm <sup>-3</sup> ] | $\varepsilon_m$ [%] |
|----------|---------|------------------|------------------------------|---------------------|
| E-sklo   | 73 000  | 3 400            | 2,6                          | 4,8                 |
| R-sklo   | 86 000  | 4 400            | 2,5                          | 4,6                 |
| C-sklo   | 70 000  | 2 400            | 2,5                          | 4,8                 |
| ECR-sklo | 73 000  | 3 440            | 2,7                          | 4,8                 |
| AR-sklo  | 73 000  | 3 000            | 2,7                          | 4,4                 |

E- modul pružnosti,  $\sigma_m$  - napětí na mezi pevnosti,  $\rho$  – hustota,  $\varepsilon_m$  – prodloužení na mezi pevnosti

Největší zastoupení v produkci mají bezalkalická E-skla díky svým dobrým mechanickým a elektricky izolačním vlastnostem. Sklovina označovaná jako R-sklo je sklovina pevnostní s vyšším obsahem oxidu vápenatého. C-sklo je využíváno na aplikace s vysokou chemickou odolností a AR-sklo se zvýšeným obsahem oxidů zirkonu a vápníku se díky odolnosti proti alkáliím využívá jako plnivo betonu. [2],[6]

Skelná vlákna se dodávají v podobě rovingů (pramenců), rohoží, tkanin z pramenců nebo vláken. Pro termoplastické matrice jde o vlákna krátká, nebo dlouhá. Využití nalézají při výrobě lopatek větrných elektráren, nárazníků automobilů, lodí, letadel, či stavebních prvků. [2],[6]

Při náročnějších požadavcích na kompozitní díl je možné využít kombinaci dvou různých materiálů vláken, například uhlíková vlákna pro dosažení vysoké tuhosti a skleněná vlákna pro vyšší pevnost. [2],[6]

Pro zlepšení vlastností se vlákna lubrikují a to z důvodu:

- o ochrany povrchu,
- o spojení více vláken do jednoho svazku,
- o zlepšení vazby mezi matricí a vlákny,
- o zlepšení dalších kroků výrobního procesu.

#### • **Aramidová vlákna**

Aramidová vlákna jsou termoplastická vlákna z lineárních polymerů, která vynikají svou tuhostí způsobenou vodíkovými vazbami mezi jednotlivými řetězci. Jsou specifické anizotropním chováním, které je dáno orientací, k níž dochází dloužením při výrobě. Dloužením je dosaženo právě vysoké tuhosti i pevnosti v tahu v daném směru, jednosměrně vyztužený kompozitní materiál bude ve směru kolmém na hlavní osu vykazovat mechanické vlastnosti srovnatelné s vlastnostmi matrice. Tyto aspekty je důležité brát v úvahu při návrhu dílu, protože kompozit vyztužený aramidovými vlákny nelze vystavovat tlakovému nebo ohybovému namáhání, ale pouze namáhání tahem. [2],[6]

Tab. 2 Mechanické vlastnosti aramidových vláken

| Aramid            | E [MPa] | $\sigma_m$ [MPa] | $\rho$ [g.cm <sup>-3</sup> ] | $\epsilon_m$ [%] |
|-------------------|---------|------------------|------------------------------|------------------|
| Vysokotažný       | 80 000  | 3 600            | 1,45                         | 4,0              |
| S vysokou tuhostí | 131 000 | 3 800            | 1,45                         | 2,8              |
| Ultratuhy         | 186 000 | 3 400            | 1,45                         | 2,0              |

E- modul pružnosti,  $\sigma_m$  - napětí na mezi pevnosti,  $\rho$  – hustota,  $\epsilon_m$  – prodloužení na mezi pevnosti

Nevýhodou aramidových vláken je silná navlhavost polyamidu způsobená polaritou jeho polymerních řetězců. Voda a kyselé roztoky na materiál působí jako změkčovadlo a znehodnocují jeho mechanické vlastnosti. Navlhavost tedy komplikuje proces lubrikace, který je pro výrobu nezbytný. Dalším limitujícím faktorem je teplota skelného přechodu, která odděluje oblast skelného stavu materiálu od stavu kaučukovitě pružného. U aramidových vláken je to teplota 300°C. [2][6]

Aramid se využívá na výrobu ochranných prostředků, neprůstřelných vest (obchodní název kevlar) a dopravních prostředků. [2][6]



Obr. 7 Neprůstřelná vesta firmy CORDURA® z materiálu DuPont 500-Denier / 1000-Denier [7]

- **Uhlíková vlákna**

Uhlíková vlákna vynikají vysokou pevností i tuhostí, odolností proti vysokým teplotám, nízkou hmotností a progresivní charakteristikou modulu pružnosti. Surovinami pro jejich výrobu je celulóza, polyakrylonitril (PAN), smola. Výroba probíhá karbonizací vlákenného polotovaru za vysokých teplot. Čím vyšší teplota je při výrobním procesu dosažena (maximálně 1800 °C), tím lepší hodnoty meze pevnosti v tahu vlákno vykazuje. Dodávají se opět v podobě vláken, jejich pramenů nebo tkanin v širokém rozsahu mechanických vlastností (zejména modulu pružnosti). Vlákna opět vykazují silnou anizotropii.[2]

Tab. 3 Mechanické vlastnosti uhlíkových vláken rozdělené podle způsobu výroby

| Výroba              | E [MPa] | $\sigma_m$ [MPa] | $\rho$ [g.cm <sup>-3</sup> ] | $\epsilon_m$ [%] |
|---------------------|---------|------------------|------------------------------|------------------|
| Karbonizované z PAN | 250 000 | 5 500            | 1,6 - 2                      | 1,9              |
| Grafitizované z PAN | 377 000 | 4 400            |                              | 1,2              |
| Mezofázová smola    | 900 000 | 3 800            |                              | 0,4              |
| Viskóza             | 100 000 | 1 200            |                              | 0,5              |
| Nanovlákn           | 600 000 | 7 000            |                              | 0,5              |

E- modul pružnosti,  $\sigma_m$  - napětí na mezi pevnosti,  $\rho$  – hustota,  $\epsilon_m$  – prodloužení na mezi pevnosti

Vlákna z uhlíku jsou významná díky svým mechanickým vlastnostem, korozní odolnosti, teplotní stálosti, zdravotní nezávadnosti a nízké hořlavosti.

Využití nalézá u výroby větrných elektráren, leteckého vybavení, sportovního vybavení, karoserií automobilů, námořních staveb, armádního vybavení (radiová technika) a v medicíně při výrobě např. kyčelních náhrad.



Obr. 8 Boeing 787 Dreamliner. Vyrobený za 80% objemového podílu uhlíkového kompozitu [8]

### 2.1.3 Polymery používané pro výrobu matrice

Matrice je spojitá část kompozitního materiálu, která má za úkol výrobku dávat tvar, tedy fixuje vlákna výztuže v požadované pozici, přenáší napětí na nosná vlákna a chrání vlákna před poškozením. Jak již bylo řečeno dříve, je nutné zajistit vzájemnou adhezi obou látek.

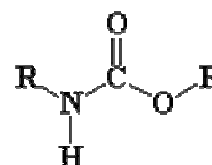
Historicky prvním materiálem byly výše zmíněné fenolformaldehydové pryskyřice, které se řadí do skupiny reaktoplastů, jež se ve výrobě kompozitů využívají daleko hojněji, než termoplasty. Tento jev je dán zejména vyššími teplotami zpracovatelského procesu a vysokou viskozitou termoplastických hmot. Obě skupiny mají tedy zcela odlišný postup při zpracování.

- **Reaktoplastická matrice**

Mezi používané matrice na bázi reaktoplastu se využívá zejména polyuretan (PUR), fenolformaldehydová pryskyřice (PF), epoxidová pryskyřice (EP)

- o **Polyuretan**

Polyuretan je jeden ze světově nejrozšířenějších polymerů. Vzniká polyadící toxických a velmi reaktivních izokyanátů např. s alkoholy. Podle přidávaného polyaduktu se liší polymerní řetězec a tak dostáváme širokou škálu polymerů s různorodými vlastnostmi. Všechny podskupiny polyuretanů jsou charakteristické uretanovou skupinou a vazbou, viz obr. 9. V



**a urethane**

Obr. 9 Uretanová skupina [11]

molekulárním řetězci je obsažen kyslík, který způsobuje jeho ohebnost a tím i jeho nižší teplotu tání. Ze schématu řetězce monomeru uretanu je také patrný vodík, za pomoci kterého může polyuretan tvořit vysoce krystalickou strukturu. To ho předurčuje k výrobě kopolymerů s vlastnostmi termoplastických elastomerů. [1], [10],[11],

Polymery lze rozlišit do několika charakteristických skupin s diametrálně odlišnými vlastnostmi. Pěnové polyuretany díky vlastnostem a široké možnosti jejich modifikace, mají nejhojnější zastoupení. Důležité a přísadami zároveň snadno ovlivnitelné vlastnosti jsou tvrdost, hořlavost, tepelná vodivost, barva. Díky tomu nalézají využití ve stavebnictví (izolační materiál), čalounictví (výplňový materiál sedaček, matrací) nebo také například k výrobě mycích hub. Další využití nalézají pro výrobu elastomerů, vláken a nátěrových hmot a lepidel, poměrně novou formou polyuretanu je takzvaný termoplastický polyuretan (TPU), vyráběný například firmou BASF a využívaný zejména v automobilovém průmyslu a elektrotechnice. Pro výrobu kompozitních materiálů má však nejvíce význam polyuretan ve formě pryskyřic, které se vzájemně liší tvrdostí a elasticitou. Zpracovávají se technologiemi RIM, RTM, LCM, ruční stříkání. Plněny mohou být jakoukoli výztuží. [10],[11],[12]

- **Termoplastická**

Výhoda oproti reaktoplastickým hmotám spočívá hlavně v tom, že během procesu výroby je jejich chemické složení stálé a suroviny pro výrobu jsou ekonomicky výhodnější. Naopak velká nevýhoda jsou jejich teplotně závislé strukturní a mechanické parametry. Viskoelasticita se zde projevuje daleko výrazněji než u reaktoplastických hmot a má tedy za následek trvalé změny tvaru výrobku,



což snižuje soudržnost mezi matricí a vláknem. Vyztužují se zejména dražší plasty z důvodu vysoké ceny zpracovatelské technologie. Výjimku tvoří polypropylen (PP), který se používá díky své dobré zpracovatelnosti, jinak jde o skupinu polyamidů (PA), polykarbonát (PC), polyoxymethylen (POM) a jiné dražší materiály. Často se díky své produktivitě vyrábí technologií vstřikováním, výztuží jsou krátká až středně dlouhá vlákna (0,2 – 2,5) mm, dále dlouhá vlákna či rohože zpracované procesem lisování. Objem výztuže může činit až 80 %.

Z principu nadmolekulárního složení termoplastů se viskoelastická za standardního prostředí projevuje zejména u semikrystalických termoplastů, které se při teplotách okolí nacházejí velmi často ve stavu pružném, kaučukovitém v závislosti na teplotě skelného přechodu pro daný termoplast. Tyto jevy se budou projevovat tečením za studena a relaxací napětí a ztrátovým modulem (viz kapitola 2.2.).[13]

#### **2.1.4 Základní způsoby výroby kompozitních systémů s reaktoplastickou matricí**

Matrice je vždy v první fázi sycena nevytvrzenou pryskyřicí. Nevytvrzený stav má vysokou viskozitu, která zaručuje dobré nasycení vláken v celém objemu. Polymerace a vytvrzení pryskyřice se dosáhne působením tepla (EP-R) nebo přidávkem iniciátoru (UP-R)[2]. Výše teploty, nebo množství např. organického peroxidu ovlivňuje rychlost polyreakce a stupeň zesítení daného materiálu a tím jeho výsledné mechanické vlastnosti.

Pryskyřičné kompozitní polotovary se dodávají nejčastěji v podobě prepregů, což je výztuž předimpregnovaná, ne zcela vytvrzenou matricí.

- **Ruční kladení**

Je to tzv. kladení za mokra, kdy povrch formy je opatřen separačním nástřikem, vrstvou gelcoatu a postupně kladených vrstev rohože ze skleněných vláken prosycené pryskyřicí nanesené válečkem, štětcem, nebo pistolí. [2][4]

- **Stříkání**

Stříkání je opět ruční postup výroby. Používá se speciální směšovací pistole, která podtlakově nasává dvě složky pryskyřice. Nad tryskou je umístěno sekací zařízení, které dělí vlákna na požadovanou délku. Ty padají před trysku a proudem jsou unášeny směrem k povrchu formy. Ke zhutňování se opět používá válečku. [2]

- **Lisování za použití tlaku**

Výztuž s pryskyřicí je nakladena na formu opatřenou separátorem a přikryta folií. Rozlišují se dvě metody a to lisování pomocí vakua a pomocí přetlaku. Oba dva způsoby využívají jednodílné formy, do které je vytvarován obtisk budoucího výrobku. Proti ručním technologiím dochází ke zhutnění pomocí vakua, nebo přetlaku vzduchu.

- **Lisování v autoklávu**

Využívá se pouze pro malosériovou výrobu vysoce kvalitních výrobků, což předurčuje využití pro odvětví motorsportu, letectví a kosmonautiky. Vysoká kvalita dílů je daná hydrostatickým tlakem obklopující celý výrobek a zamezuje odtékání matrice. Na materiál navíc působí přes separační folii, zhutňuje a odstraňuje vzduchové bubliny.

- **Prepregy**

Tenký předimpregnovaný polotovár se skládá z několika vrstev. Nosné vrstvy papíru s vrstvou pojiva, vrstvy vláken (jednosměrně orientovaných, nebo v podobě tkanin či rohoží) a vrstvy krycího papíru. K prosycení dojde mezi sestavou válců. Z důvodu reaktivity pryskyřice se prepregy skladují při teplotách zhruba  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a pouze po omezenou dobu cca půl roku. Povrch pásu polotovaru je lepidlo a tím usnadňuje kladení na povrch formy a umožňuje práci i v poloze nad hlavou. Po vytvarování ve formě pomocí stěrky, nebo válečku se na povrch přikládá prodyšná separační folie a celá forma je zabalena do vakuového pytle, se kterým přichází do autoklávu pro následné vytvrzení. [2]



Obr. 10 Příklad prepregu: uhlíkové vlákno nasycené epoxidovou pryskyřicí.

(firma ZoltekCompanies, Inc) [9]

- **SMC (Sheetmouldingcompound, plošné lisovací materiály)**

Polotovary SMC se vyrábí podobně jako prepregy. Skládají se z vrstev pryskyřice (nejčastěji polyesterové pryskyřice) a vyztužujících krátkých i dlouhých skleněných vláken. Podle orientace vláken se rozlišují SMC polotovary do skupin s náhodně uloženými vlákny (SMC-R), s kombinovaným uložením jak krátkých náhodně rozmístěných tak i dlouhých orientovaných (SMC-C), nebo v kombinaci středně dlouhých i krátkých orientovaných vláken (SMC-D). Prosycení opět nastává mezi soustavou válců.

Oproti prepregům mají SMC polotovary větší tloušťku, což má za následek vyšší tepelné i reakční smrštění při vytvrzování výrobku. Z toho důvodu je dostupných několik modifikací za účelem snížení smrštění hotového výrobku, které se od sebe navzájem liší aditivy (vápenec, termoplastická aditiva). Od standartního SMC (0,2 %) přes nízkosmršlivé LS-SMC (0,1 %) po velmi nízkosmršlivé LP-SMC (0,05 %).

Zpracování probíhá ve vyhřátých kovových formách na hydraulických lisech s horizontální dělicí rovinou umožňující lepší zakládání. Pro nízkou cenu technologie a dobré mechanické, elektrické a jiné vlastnosti výrobků, jsou díly z SMC asi nejrozšířenější z kompozitních výrobků.[2][4]

- **ZMC (low wiscosity molding compound)**

Technologie pro výrobu velkoplošných desek se nazývá ZMC. Používá se pro nenasyčené polyesterové pryskyřice UP-R. Podobně jako je tomu u vstřikování termoplastů, kde šnek dávkuje pryskyřici před své čelo a axiálním posuvem dochází ke vstřikování. Do šneku je pryskyřice dodávána z vertikální komory, ze které je pryskyřice tlačena pístem. Šneková jednotka rotačním pohybem láme a zkracuje vlákna plniva, což vede ke ztrátě pevnosti. Využití nachází při výrobě reflektorů světlometů, elektrotechnických součástek a tam, kde je požadována tvarová stálost dílů. [2]

- **Navíjení, oplétání**

Obě technologie se využívají pro výrobu dutých těles, jádro se tedy ve většině případů po výrobě odstraní. V případě, kdy není možné jádro odstranit, jde o tzv. „ztracené jádro“ (oplétání uzavřeného rámu). Výroba kombinuje dohromady lineární posuv a rotaci. U procesu navíjení je matrice již nanesená na odvíjeném vlákně, u oplétání, protože jde o složitější tvary, se rám nejprve oplete a poté prosytí pryskyřicí pomocí technologie RIM nebo RTM. [2]

- **RIM (reaction injection molding), RTM (resin transfer molding)**

Obě technologie jsou obdobou technologie vstřikování. Technologie RTM vstřikuje vysokým tlakem pryskyřici do uzavřené formy vyplněné tkaninou. Forma může být doplněna o zdroj vakua, který zajistí odvod vzduchových bublin. Zdroj vakua a dvoudílná forma, která obklopuje celý tvar výrobku má za následek vysokou kvalitu dílu jak v jeho objemu, tak i na povrchu. RIM oproti RTM před vstřikem musí smísit dvě složky termosetu. Poté nastane prudká chemická reakce, která má za následek vytvrzení celého dílu během krátkého, minutového, cyklu. [2][4]

- **Odstředivé lití**

Technologie převzatá ze slévárenství, je určena pro lití rotačně symetrických výrobků. Nejčastěji se jedná o potrubní systémy o světlosti do 1500 mm určené pro odpravu agresivních, korozivních a abrazivních látek. Díky odstředivé síle se těžší vlákna dostávají na vnější obvod potrubí a lehčí matrice na vnitřní obvod.

### **2.1.5 Základní způsoby výroby kompozotního systému s termoplastickou matricí**

V porovnání s reaktoplasty mají termoplasty kratší dobu zpracování, vyšší houževnatost a lze je skladovat bez teplotního nebo časového omezení. To je předurčuje k hromadné výrobě, např. k výrobě nárazníků automobilů. Také recyklace je jednodušší, což není zanedbatelný faktor v době, kdy na ekologii je kladený velký důraz. Co se viskoelastických vlastností týče, oproti reaktoplastům mají vyšší tendenci ke krípu, což je způsobeno nadmolekulární strukturou, kde jsou vedle sebe volně uloženy řetězce makromolekul, navzájem nezesíťované. Materiál matrice je nejčastěji PP, PA, PET [2].

Limitujícím faktorem pro výrobu polotovarů a výrobků s termoplastickou matricí je viskozita matrice, která komplikuje prosycení a dokonalé obalení vláken výztuže. Tento faktor lze obejít použitím roztoků polymerů, nebo polymerního prášku rozptýleného ve tkanině. Dále lze výztuž prosytit zalisováním do natavené termoplastické folie, nebo vytlačováním, či lisováním matrice mezi vlákna.[2]

- **GMT (Glass matrix thermoplastic, termoplasty vyztužené skleněnou rohoží)**

Výroba GMT polotovarů probíhá kontinuálně. Mezi dvě rohože skleněných vláken je vtlačována tavenina, která v lisovací části linky sytí rohože mezi dvěma pásy, které celou hmotu stlačují, v další části dochází k chlazení výrobku. Celek je od

pásů separován vytlačovanou folií, která zajistí, aby nedocházelo ke kontaktu skleněných vláken a pásů.[2]

Další zpracování probíhá lisováním ve vytemperované formě (cca 50 °C) na hydraulických lisech s horizontální dělicí rovinou. Před samotným lisováním je nutné polotovar přivést předehřevem na zpracovatelskou teplotu do plastického stavu, čehož je dosaženo např. infrazářiči. [2]

- **LFT (Long fibrethermoplastic)**

Slouží jako výroba termoplastického granulátu, suroviny pro vstřikovací lisy. Pramence skelných vláken se odvíjí z dopravních špulek, dále prochází přes apretační jednotku a ohřev. K prosycení dojde v zařízení, kde kolmo ke směru posunu vláken přichází tavenina z plastikační jednotky. Oba dva materiály se zde smísí a prochází přes vytlačovací hubici a odtahové zařízení ke granulačnímu zařízení. Zmíněný postup se nazývá pultruze. [2]

Dalším způsobem jak vyrábět termoplasty vyztužené dlouhými vlákny (LFT) je sloučení stanice pro přípravu polotovaru s výrobním strojem. Příprava směsi vláken a termoplastu probíhá kontinuálně a dávkuje do vstřikovací pístové jednotky, která po naplnění vstříkne objem taveniny do dutiny formy. Tento způsob odstraní mezikrok ochlazení a následnou plastikaci termoplastu. Je však vhodný pouze pro hromadnou výrobu.[2]

## **2.2 Odezva kompozitů na vnější termomechanické namáhání**

Následující kapitola se bude zabývat materiálovou odezvou kompozitního materiálu v závislosti na teplotě a charakteru zatížení. Bude popsán vliv jak matrice, tak výztuž na výsledné chování systému.

### **2.2.1 Přejíhádové teploty**

Přejíhádové teploty oddělují jednotlivé stavy, ve kterých se daný polymer může nacházet. Jsou to stavy tuhé (skelné), pružné (kaučukovité) a stavy viskózního tečení polymeru. Podle těchto stavů rozlišujeme dvě charakteristické teploty a to teplotu zeskelnění ( $T_g$ ) a teplotu viskózního toku ( $T_f$ ) pro amorfní, popřípadě teplotu tání ( $T_m$ ) pro semikrystalické polymery. Pro amorfní termoplasty je oblast použití vždy ohraničena teplotou  $T_g$ . Nad  $T_g$  se s rostoucí teplotou modul pružnosti výrazně mění. Krystalinita nemolekulárních řetězců ovlivňuje hodnotu modulu pružnosti, čím krystalitější polymer je, tím vyšší vykazuje modul nad teplotou zeskelnění a naopak. Z toho vyplývá, že amorfní plasty, které nevykazují žádnou krystalinitu,

vykazují skokovou změnu modulu pružnosti. Dost důležitá skutečnost je ta, že čím blíže jsou u sebe makromolekuly uloženy, tím na sebe vzájemně působí sekundárními, mezimolekulárními vazbami a tím je jejich teplotní odolnost (teplota  $T_g$ ) vyšší. [13]

Chemická podstata termoplastických materiálů je předurčuje k relativně vysoké tepelné odolnosti. Jejich objem je tvořen vysoce provázanou strukturou řetězců, které jsou vzájemně provázány chemickou, nejčastěji kovalentní vazbou. Výjimečně je objem tvořen vazbou vodíkovou, například u polyuretanu. Procento zesílení je závislé pouze na stupni vytvrzení, respektive na podmínkách (zejména teplotě a času) vytvrzování. Procento vytvrzení se dá zjistit pomocí dynamicko-mechanické analýzy (DMA), nebo diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC).[10][14]

### **2.2.2 Smrštění kompozitu**

Skelná vlákna z pohledu technologie vstřikování ovlivňují smrštění plastového výlisku. Ve směru vláken je smrštění znatelně menší než ve směru kolmém. Všechna vlákna v objemu vstřikovaného výrobku jsou orientována ve směru tečení taveniny, ve kterém také výrobek vyztužují. Nejsou tedy orientována všechna stejným směrem, proto při ochlazování, které je doprovázeno změnou rozměrů, vzniká následkem různého smrštění v různých směrech vnitřní napětí, které může způsobit deformaci dílů. To je nutné brát v potaz již při návrhu konstrukce nástroje. Tok taveniny lze ovlivnit umístěním vtoku či polohou žeber. Délka vláken smrštění ovlivňuje přímo úměrně.[2]

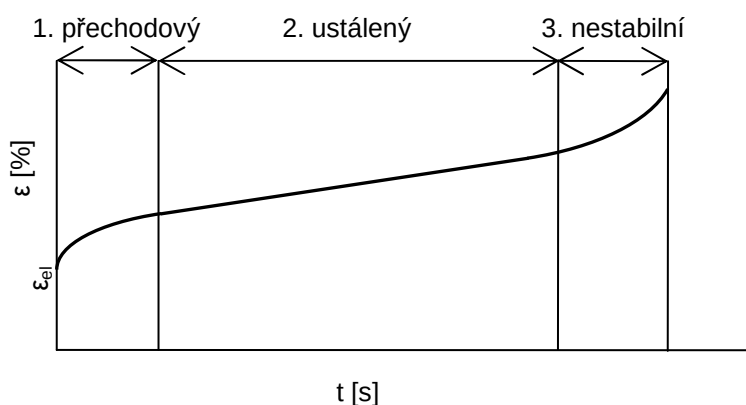
### **2.2.3 Statické vnější namáhání**

Statické vnější namáhání se vyznačuje dlouhodobým zatěžováním tělesa klidnou silou, kdy není uvažován pohyb tělesa, který by způsobil setrvačné, či tlumící síly a akční síly jsou v rovnováze s reakčními.[2]

Deformace tahovým napětím je na rozdíl od kovových materiálů závislá na rychlosti deformace, respektive době působícího napětí. Statické zatěžování polymerů dává prostor pro konformační pohyby, které se navenek projevují jako kríp a relaxace napětí. [2]

Kríp je nutné brát v potaz při návrhu součástí, protože tečení pod napětím má za následek snížení mechanických vlastností, respektive nižší hodnotu modulu pružnosti, takzvaný krípový modul  $E_c$  [MPa]. Ten je stanoven krípvou zkouškou a to buď krátkodobou, nebo dlouhodobou, ze sady krípvých křivek jsou sestaveny

izochronní křivky v souřadnicích napětí – deformace. Izochronní křivky slouží jako podklad pro konstruktéra, který při znalosti velikosti zatěžujícího napětí a doby deformace z nich zjistí příslušný kríповý modul pro návrh konstrukce, nebo naopak hodnotu deformace pro známé napětí. Na obr. 11 je znázorněn průběh kríповého pochodu, který se skládá ze tří částí. Primární úsek tvoří okamžitá pružná odezva na zatížení, která se mění v přechodové pásmo. Dál následuje sekundární oblast ustáleného toku, která po uplynutí určité doby přechází v terciární pásmo, kde rychlost deformace v čase roste a materiál je tedy nestabilním.[19]



Obr. 11 Grafické znázornění creepového pochodu

Relaxace napětí, jak bylo zmíněno výše, se naopak projevuje při konstantní deformaci. Konstruktor ji musí brát na zřetel např. při návrhu montážního celku pomocí šroubového spoje s předpětím, jež se po uplynutí určitého času snižuje a spoj ztrácí svou spolehlivost. V případě vláknových kompozitů, kde konce vláken působí na matici vrubovým účinkem, relaxační jevy vrubový účinek snižují.

#### 2.2.4 Dynamické vnější namáhání

Podobně jako u ostatních inženýrských materiálů i plasty vykazují mez únavy, která je nižší, než hodnota jejich krátkodobé meze pevnosti při stejném druhu namáhání. Ta je závislá na teplotě, času, frekvenci budící síly atp. Navíc se zde projevuje viskoelastická, která má za následek dva jevy. Při konstantním budícím napětí se s počtem cyklů zvětšuje deformační odezva a naopak při konstantní deformaci se budící napětí snižuje. Podle předpokládaného stavu lze pak rozlišit časovou mez únavy buď napětíovou  $\sigma_c$  a nebo deformační mez  $\epsilon_c$ . [10], [15]

Je-li polymer namáhán střídavým napětím (sinusový průběh), je možno odezvu popsat podle rovnice (24). Protože bylo zjištěno, že deformační odezva reaguje s jistým zpožděním za napětím, ale se stejnou frekvencí jako budící napětí, lze její

průběh popsat rovnicí (25), kde je patrný fázový posun  $\delta$  mezi napětím a deformací. Oba dva průběhy jsou znázorněny na obr. 12 a obr 13. Plocha na obrázku (13) znázorňuje disipovanou energii a má tvar elipsy, protože vychází z rovnice (25) a (26), jež jsou parametrickým tvarem rovnice elipsy.

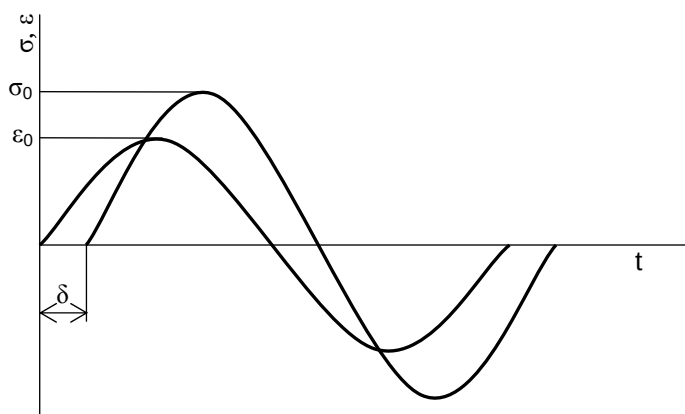
$$\sigma = \sigma_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (25)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - \delta) \quad (26)$$

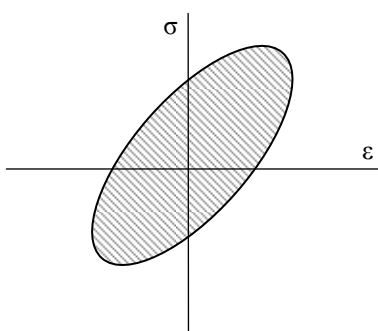
$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (27)$$

Chceme-li zjistit množství ztracené energie (plocha na obr. 13), použijeme podle pramenu [16] rovnost potenciálních energií, viz rovnice (28), kde reálná složka potenciální energie představuje množství energie uložené v elastické deformaci a složka imaginární představuje množství ztracené energie (posunutá o úhel  $\delta$ ).

$$w_p(t) = w_p(t)' + w_p(t)'' \quad (28)$$



Obr. 12 Časová závislost napětí a deformace [10]



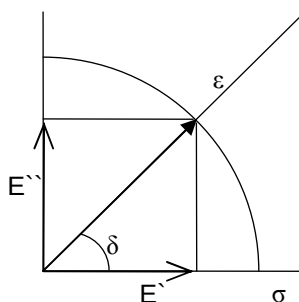
Obr. 13 Schematicky znázorněná hysterezní smyčka zpoždění deformace za napětím [16]

Po vynesení závislosti do souřadnic napětí – deformace se průběh zobrazí jako hysterezní smyčka, jejíž plocha je rovna energii ztracené při jednom cyklu zatížení. Se zmenšující se rychlostí zatěžování a snižující se teplotou se zkracuje i zpoždění



deformace, tedy i plochy hysterezní křivky a způsobené ztráty (ideálně pružné těleso bude zobrazené přímkou). Naopak, čím vyšší je rychlost, nebo teplota, tím vyšší jsou ztráty. Míru ztrát lze vyjádřit tzv. disipační funkcí  $D$ , viz rovnice (29) závislé na imaginární složce potenciální energie a na frekvenci.[10][16]

$$D = w_p'' \left( \frac{2\pi}{\omega}, E'' \right) \cdot \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\varepsilon_0^2}{2} \cdot E'' \cdot \omega \quad (29)$$



Obr. 14 Ztráty způsobené zpožděnou deformací znázorněné v komplexní rovině

Na obr. 14 jsou v komplexní rovině vysvětleny ztráty způsobené zpožděním. Při zpoždění napětí o úhel  $\delta$  (viz obr. 12) se objevuje komplexně sdružený modul  $E''$ , který lze stanovit z rovnice 26 a pomocí něj lze vypočítat ztrátový činitel  $\tan \delta$ . Komplexní modul je tedy úměrný ztrátám přeměněným v teplo.[19]

V kapitole 2.3 jsou popsány reologické modely, pomocí kterých lze graficky i matematicky popsat příčinu viskoelastického chování polymerů. Matematický popis zmíněného časově závislého chování je též začleněn do software metody konečných prvků.

#### • Dynamické zatížení rázem

Rázové namáhání viskoelastických látek lze nejjednodušeji popsat, bude-li se vycházet z Maxwellova modelu (viz kapitola 2.3.4). V případě, že se bude uvažovat vetknutá tyč (podobné jako u rázové zkoušky metodou Izod ale s kruhovým průřezem). Rázové namáhání vybudí podélné posuvy jednotlivých částí tyče, kterou nazveme vlnou deformace šířící se podíl tyče. Diferenciální rovnice (30) znázorňuje vztah mezi deformací a polohou.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (30)$$

Dále je chování polymeru namáhaného rázem popsáno dynamickým modulem pružnosti a konstant zjištěných metodou osamělého afinního pulsu (viz pramen [16]).

### 2.2.5 Mikromechanická a makromechanická kritéria porušení

Pro popsání odezvy a pro potřeby pevnostní kontroly byla sestavena kontrolní kritéria dvojího druhu, každá na odlišném principu. Mikromechanická kritéria uvažují odlišné vlastnosti vláken i matrice, makromechanická vycházejí z tradičních pevnostních hypotéz a pro kompozitní materiály jsou rozšířeny o směrovost vlastností. Teorie říká, že každý stav napjatosti celku lze převést na napětí působící na elementárním objemu v hlavních směrech kompozitu.

#### • Mikromechanická kritéria

Mikromechanická kritéria berou v potaz mechanické vlastnosti jak vlákna, tak matrice a jejich vzájemnou koncentraci a jak bylo popsáno v kapitole 2.1.1 tak využívají např. zákon směsí pro popsání namáhání jednoosým tahem. Pro připomenutí rovnice (10) a (11)  $\sigma_1 = (V_f \cdot E_f + V_m \cdot E_m) \cdot \varepsilon_1$ ,  $E_1 = V_f \cdot E_f + V_m \cdot E_m$ . Platí zde výše zmíněná podmínka o poměrné deformaci vlákna vzhledem k matrici a to  $\varepsilon_m > \varepsilon_f$  z rovnice (1). [5]

Napětí, které je pro kompozit kritické je takové, které působí v příčném směru. Pevnost zde závisí nejvíce na soudržnosti rozhraní vlákna a matrice, kde dochází ke koncentraci napětí popsané součinitelem koncentrace napětí  $k_\sigma$  podle rovnice (31). Podle zdroje [10] je nejčastěji používanou veličinou pro popsání chování v příčném směru koncentrace deformace  $k_\varepsilon$  podle rovnice (33). [5]

$$k_\sigma = \frac{\sigma_{rozhr.max}}{\sigma_2} \quad (31)$$

$$\sigma_{2Pt} = \frac{1}{k_\sigma} \cdot (\sigma_{Pmt} - \sigma_{zb}) \quad (32)$$

kde  $\sigma_{zb}$  je zbytkové napětí po vytvrzení matice

$$k_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_2} = k_\sigma \cdot \left( \frac{E_2}{E_m} \right) \cdot \frac{(1+\nu_m) \cdot (1-2\nu_m)}{(1-\nu_m)} \quad (33)$$

#### • Makromechanická kritéria

Makromechanická kritéria jsou alternativou pro tradiční pevnostní hypotézy, např. podle Guesta, HMM, Rankina atp. lze rozlišit pět druhů pevnosti podle směru namáhání vůči vláknům na podélná a příčná tahová i tlaková napětí a napětí smykové. Tyto kritéria počítají s tím, že materiál je homogenní a napětí lineární až do momentu porušení. Kriterií je více, proto je dále uvedeno jen pár vybraných, v průmyslu nejčastěji využívaných podle univerzity Porto. [5]

### o Kriterium maximálního napětí

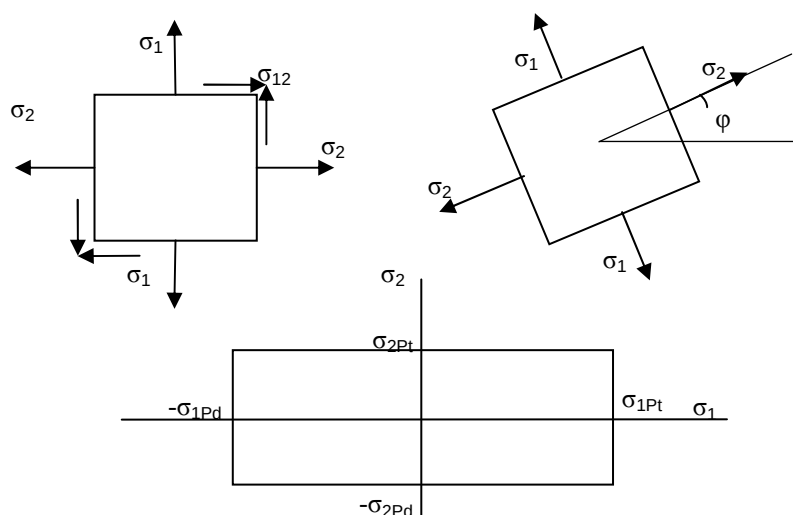
Podle kriteria maximálního napětí dojde k selhání kompozitu v případě, kdy je mez pevnosti překročena alespoň v jednom směru viz rovnice (34) až (36). Lze tedy napsat:

$$-\sigma_{1Pd} < \sigma_1 < \sigma_{1Pt} \quad (34)$$

$$-\sigma_{2Pd} < \sigma_2 < \sigma_{2Pt} \quad (35)$$

$$-\sigma_{12P} < \sigma_{12} < \sigma_{12Pt} \quad (36)$$

Toto kriterium je tzv. neinteraktivní, protože nebere v potaz vzájemnou vazbu jednotlivých druhů napětí. Natočíme-li základní element materiálu do roviny hlavních napětí, tečné napětí přestává působit a graficky se toto kriterium znázorní podle obr. 15.[5]



Obr. 15 Graficky znázorněné kriterium maximálního napětí [5]

### o Kriterium maximální deformace

Kriterium maximální deformace je obdoba kriteria maximálního napětí a také se řadí mezi neinteraktivní kriteria, viz obr. 16.

$$-\varepsilon_{1Pd} < \varepsilon_1 < \varepsilon_{1Pt} \quad (37)$$

$$-\varepsilon_{2Pd} < \varepsilon_2 < \varepsilon_{2Pt} \quad (38)$$

$$-\varepsilon_{12P} < \varepsilon_{12} < \varepsilon_{12Pt} \quad (39)$$

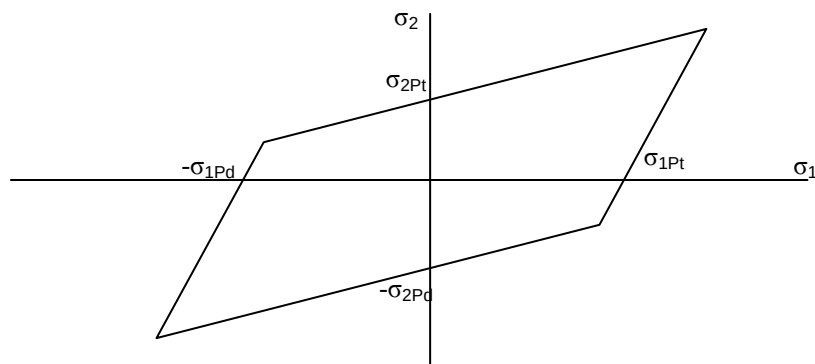
Jako limitující hodnoty jsou zde použity mezní deformace v tahu a tlaku v podélném a příčném směru a deformace ve smyku rovnice (37) až (39). Graficky se toto kriterium znázorní pomocí čtyř lineárních funkcí, viz rovnice (40) až (43).

$$\sigma_{1Pt} = \sigma_1 - \nu_{12}\sigma_2 \quad (40)$$

$$-\sigma_{1Pd} = \sigma_1 - \nu_{12}\sigma_2 \quad (41)$$

$$\sigma_{2Pd} = \sigma_1 - \nu_{12}\sigma_2 \quad (42)$$

$$-\sigma_{2Pt} = \sigma_1 - \nu_{12}\sigma_2 \quad (43)$$



Obr. 16 Graficky znázorněné kritérium maximální deformace [5]

#### o Tsai-Hillovo kritérium

Tsai vychází z Hillem dříve vytvořené podmínky, která je založena na podmínce von Mises pro izotropní materiál. Do této podmínky byly nově zavedeny hlavní směry anizotropie a příslušné hodnoty mezí pevnosti v daných směrech. Tsai kritérium zjednodušil pro ortotropní vrstvu, viz rovnice (44). [5]

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1P}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2P}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{12P}}\right)^2 - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_{1P}^2} = 1 \quad (44)$$

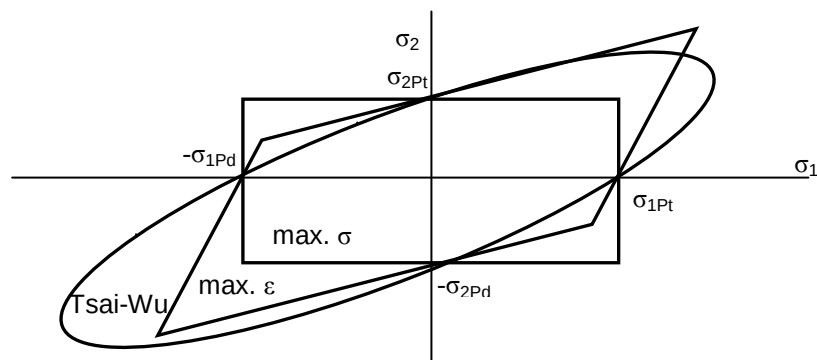
#### o Kritérium podle Tsai-Wu

Tsai-Wuje obecná teorie poškození anizotropního materiálu. K výpočtu používá tenzor pevnosti, který je schopen rozlišit mezi mezí pevnosti v tlaku a v tahu. Tvar polynomu je uveden v rovnicích (45) a (46). Obr. 17 pak ukazuje rozdíl mezi jednotlivými, dříve uvedenými, podmínkami.[5]

$$\left(\frac{1}{\sigma_{1Pt}} - \frac{1}{\sigma_{1Pd}}\right) \cdot \sigma_1 + \left(\frac{1}{\sigma_{2Pt}} - \frac{1}{\sigma_{2Pd}}\right) \cdot \sigma_2 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_{1Pt} \cdot \sigma_{1Pd}} + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_{2Pt} \cdot \sigma_{2Pd}} + \frac{\sigma_{12}^2}{\sigma_{12P}^2} + 2f^* \cdot \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_{1Pt} \cdot \sigma_{2Pd}} = 1 \quad (45)$$

$$f^* = \frac{1}{2\sigma^2} \cdot \left\{ 1 - \left[ \sigma_{1Pd} - \sigma_{1Pt} + \frac{\sigma_{1Pt} \cdot \sigma_{1Pd}}{\sigma_{2Pt} \cdot \sigma_{2Pd}} \cdot (\sigma_{2Pd} - \sigma_{2Pt}) \right] \cdot \sigma + \left( 1 + \frac{\sigma_{1Pt} \cdot \sigma_{1Pd}}{\sigma_{2Pt} \cdot \sigma_{2Pd}} \right) \cdot \sigma^2 \right\} \quad (46)$$

kde  $f^*$  je vazebný koeficient a  $\sigma$  je zatížení, při kterém dojde k porušení při dvouosém testu.[5]



Obr. 17 Obrazné znázornění mezních křivek pevnosti pro kritérium největšího napětí, deformace a kritérium Tsai-Wu [5]

### o Puckovo kritérium

Toto kritérium bere v potaz najednou dva různé způsoby porušení. Porušení vláken a porušení mezi vlákny, protože obě jsou navzájem zcela odlišná.[5]

Porušení vláken (tedy směr vláken, směr hlavní osy ortotropie označený 1) porovnává napětí v materiálu s mezí pevností vláken v tahu i v tlaku, viz rovnice (47) a (48). Při kombinovaném zatížení je však únosnost materiálu v tlaku nižší vlivem vybočování vláken, kritérium potom vypadá podle rovnice (49) a (50).[5]

$$-\sigma_{1Pft} < \sigma_1 < \sigma_{1fPt} \quad (47)$$

$$-\sigma_{1Pfd} < \sigma_1 < \sigma_{1fPd} \quad (48)$$

$$\frac{1}{\varepsilon_{1Pt}} \left( \varepsilon_1 + \frac{\nu_{f12}}{E_{f1}} m_{\sigma f} \cdot \sigma_{2t} \right) = 1, \text{ pro } (\dots) \geq 0 \quad (49)$$

$$\frac{1}{\varepsilon_{1Pd}} \left( \varepsilon_1 + \frac{\nu_{f12}}{E_{f1}} m_{\sigma f} \cdot \sigma_{2t} \right) = -1, \text{ pro } (\dots) < 0 \quad (50)$$

kde  $m_{\sigma f}$  je koeficient závislý na materiálu vlákna.

Dále se Puckovokritérium vztahuje na porušení mezi vlákny, tedy porušení matrice nebo porušení vazby mezi vláknem a matricí. To je popsáno pomocí tří módů (A, B, C), viz rovnice (51) až (53).

$$\text{Mód A: } \sqrt{\left(\frac{\sigma_{21}}{R_{21}}\right)^2 + \left(1 - \frac{p_{21}}{R_{21}} \cdot R_2\right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma_2}{R_2}\right)^2} + \frac{p_{12}}{R_{12}} \sigma_2 = 1, \text{ pro } \sigma_2 \geq 0 \quad (51)$$

za předpokladu, že je kompozit namáhán pouze napětím  $\sigma_{21}$  a  $\sigma_2$  má podmínka tvar módu B

$$\text{Mód B: } \frac{1}{R_{21}} \cdot \left[ \sqrt{\sigma_{21}^2 + (p_{12} \cdot \sigma_2)^2} + p_{21} \cdot \sigma_2 \right] = 1, \text{ pro } \sigma_2 < 0 \quad (52)$$

$$\text{Mód C: } \left[ \left( \frac{\sigma_{21}}{2 \cdot (1 + p_{22} \cdot R_{21})} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_2}{R_2} \right)^2 \right] \cdot \frac{R_2}{-\sigma_2} = 1, \text{ pro } \sigma_2 < 0 \quad (53)$$

$$\text{kde } p_{21} = - \left( \frac{d\sigma_{21}}{d\sigma_2} \right)_{\sigma_2=0} \text{ je sklon lomové křivky.} \quad (54)$$

Puck stanovil veličinu nazvanou lomový odpor ( $R$ ) působící v lomové rovině a závislý na druhu zatížení:

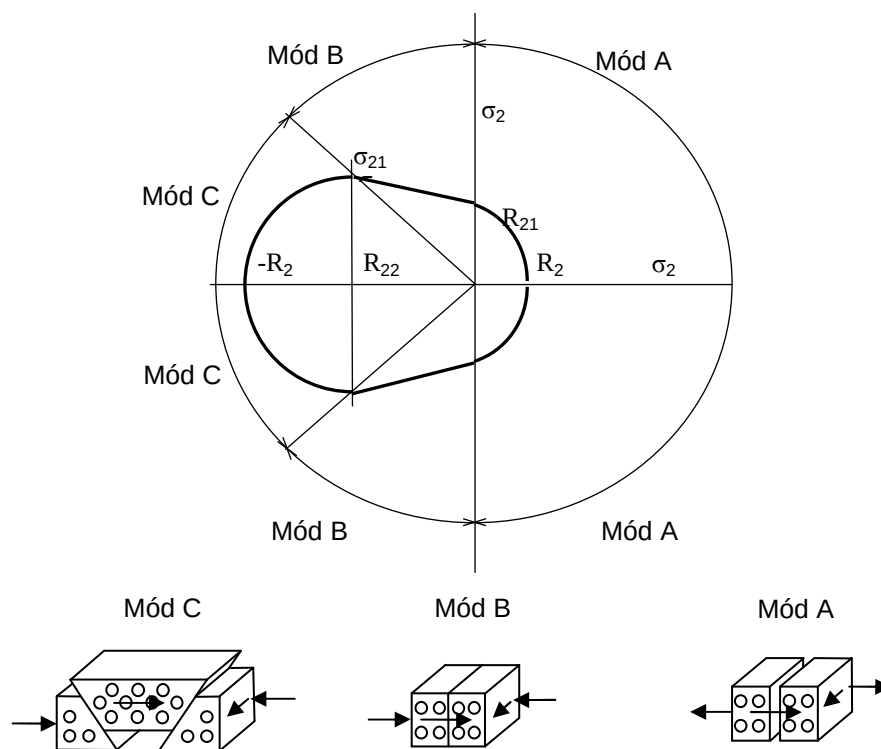
$R_2$ ... Lomový odpor roviny A namáhané příčně tahovým, nebo tlakovým napětím ležícím v této rovině,

$R_{22}$ ... Lomový odpor roviny A namáhané příčně příčným smykovým napětím ležícím v této rovině,

$R_{21}$ ... Lomový odpor roviny A namáhané příčně podélným smykovým napětím ležícím v této rovině.

V ideálním případě, když působí pouze tahové, respektive tlakové napětí,  $R_2 = F_{2t,d}$ . V případě smykového je to  $R_{21} = F_{12}$

Oblasti použití jednotlivých módů jsou patrné z obr. 18, odvozeného z Mohrovy kružnice. [5]



Obr. 18 Oblasti působení jednotlivých módů Puckova kritéria [5]

## 2.2.6 Porušení kompozitu

V předchozí kapitole byly nastíněny různé matematické podmínky porušení kompozitního materiálu, po jejichž překročení nastává porušení systému. Tato kapitola je věnována popisu mechanismu selhání kompozitu. Pro názornost je uváděn jednosměrně vyztužený kompozitní systém. Základní způsoby porušení materiálu jsou mezivláknový lom způsobený tečným napětím a lom vlákna způsobený tahem, nebo tlakem.

- **Lom vlákn**

Dojde-li k selhání jednoho vlákna, zatížení je přeneseno tažnou maticí na vlákna v okolí. Proto je důležité při návrhu brát v potaz směrovost vlastností kompozitu a správný poměr obou složek (kap. 2.1.1.) a jejich vzájemnou adhezi. Jen takto bude zajištěn správný přenos namáhání i po porušení jednoho vlákna. Po porušení prvního vlákna jsou napěťové špičky rovnoměrně převedeny do okolí lomu a porušené vlákno, i když v již omezené délce, namáhání stále přenáší. Tohoto tzv. synergického efektu se s výhodou využívá, protože kdyby nebyla zajištěná vhodná soudržnost obou složek, pevnost by záležela jen na pevnosti vlákna, rowingu. Zvyšuje-li se dále působící napětí, lokální koncentrace napětí roste a dochází k porušení matrice a dalšího sousedního vlákna. V případě nižší adheze vlákna s maticí dochází k pohlcení energie, což je užitečné při namáhání rázem. [2]

- **Pullout**

Pullout efekt se týká hlavně krátkovlákného plniva. Při namáhání tahem ve směru vlákna se vlivem vzájemné adheze a tažnosti matrice koncentruje smykové napětí na konci vláken, což má za následek místní ztrátu vzájemné soudržnosti a vytažení konců vláken z matrice (tzv. pullout) a tím i snížení plochy přenášející napětí. S délkou vlákna se zlepšuje adheze k matrici. Je však zaveden pojem kritické délky vlákna, která dělí oblast porušení vlákna smykem od oblasti, kde dojde k vytažení konců vláken. Po překročení kritické délky vlákna už nedochází k výraznějšímu zvětšení pevnosti materiálu. Kritická délka vlákna je vypočtena podle rovnosti smykové pevnosti povrchů vlákna a matrice s pevností vlákna v tahu. Vztah je uveden v rovnici (55). Kritická délka vlákna zde představuje nejkratší délku vlákna tak, aby bylo plně využito jeho vlastností.[2]

$$l_{krit} = \frac{\sigma_{f1} \cdot d}{\tau_{fmp} \cdot 2} \quad (55)$$

kde  $\sigma_{f1}$  je tahové napětí ve směru vláken a  $\tau_{fmp}$  je pevnost spojení vlákna a matrice[2].

- **Mezivláknové porušení**

Pevnost celku je dále snížena kvůli vadám z výroby, jakými jsou póry a bubliny uzavřené v matrici jako následek vytvrzovacího pochodu u reaktoplastů, nebo nedokonalého proudění termoplastické matrice formou. Poruchy zatížení nepřenáší, proto je důležité, aby ostatní vrstvy vláken kolmo ke směru namáhání převzaly funkci porušené části a díl zůstal neporušený a funkční.

- **Delaminace**

Je to speciální mezivláknové porušení. Jde o mezivrstvé porušení kompozitu, kdy se od sebe oddělují dvě vrstvy vlivem normálových nebo tečných napětí po překročení mezilaminární lomové houževnatosti. Pevnostní mez se opět musí stanovovat experimentálně. Vady a heterogenity v matrici šíření této poruchy jen podporují. Energie mezilaminární lomové houževnatosti se s rostoucí délkou trhliny zvyšuje. [5]

## **2.3 Vybrané reologické modely pro popis vlastností materiálu**

Každý materiál na vnější namáhání reaguje vnitřní odezvou, která má u každého druhu materiálu jiný charakter. U kovů je to do meze úměrnosti elastická deformace popsaná lineární charakteristikou Hookeova zákonu viz rovnice (56), u kapalin je tato odezva popsaná zákonem Newtonovým rovnice (57). Reálné materiály vykazují ale vlastnosti, které leží mezi těmito dvěma extrémy.[16]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \text{ [MPa]} \quad (56)$$

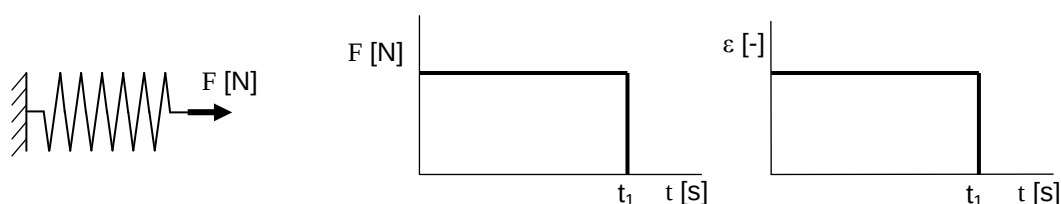
$$\tau = \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} \text{ [MPa]} \quad (57)$$

Zmíněné chování v následujících obrázcích znázorňuje symbol pružiny a tlumiče. Skládáním těchto dvou do paralelního nebo sériového zapojení, za použití příslušných materiálových konstant, docílíme přibližného popisu deformačního chování polymeru.

### **2.3.1 Hookův model**

Hookův zákon popisuje elastické chování materiálu, tedy že napětí je přímoúměrné deformaci zvětšené o hodnotu modulu pružnosti. Deformace nastává okamžitě po zatížení a po odlehčení se těleso okamžitě vrací do původního stavu. Model se využívá pro popis elastických těles, tedy hlavně pro popis chování kovů při zatížení napětím, které nepřesáhne meze kluzu. Vyvolaná deformace je vratná. Kromě kovů lze Hookův zákon aplikovat na amorfny polymery, které se za běžných teplot nacházejí ve sklovitém stavu, kde vliv viskozní složky materiálového modelu lze (do určité rychlosti zatěžování) zanedbat. Model je graficky reprezentován symbolem pružin, viz obr. 19.

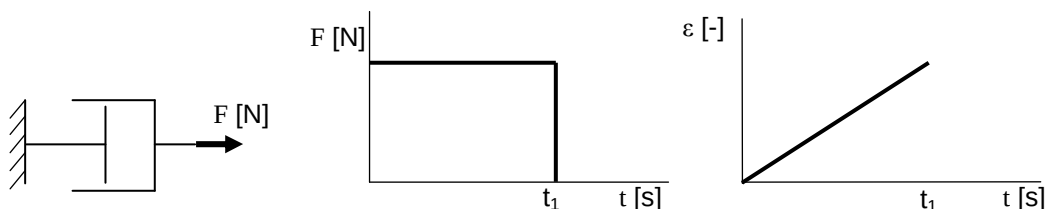




Obr. 19 Grafické znázornění Hookova modelu, včetně odezvy deformace na působení vnější síly

### 2.3.2 Newtonův model

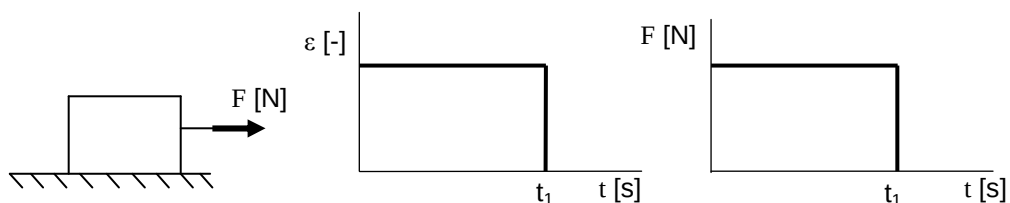
Pro popis kapalin a viskozních látek se používá Newtonův model. Newtonův zákon popisuje tečné napětí, které je přímoúměrné součinu dynamické viskozity s rychlostí deformace. Po zatížení se rovnováha mezi napětím a deformací v kapalině nevyrovná okamžitě, nýbrž narůstá celou dobu působení síly. Po uvolnění zůstává kapalina deformovaná. Během deformace se tedy vložená energie mění přes pohyb molekul kapaliny v teplo. Newtonův model představuje plastický tok, což je znázorněno na obr. 20. [15]



Obr. 20 Grafické znázornění Newtonova modelu, odezva deformace na působení vnější síly

### 2.3.3 Saint Venantův model

Saint Venantův model popisuje chování plastické látky. Rozlišuje dva možné stavy v materiálu a to podle napětí na mezi kluzu, resp. na mezi plasticity. Je-li napětí vyvolané vnějšími silami menší než napětí na mezi kluzu, materiál zůstává bez deformace. Přesáhne-li napětí mez kluzu, materiál se začne nevratně deformovat a vložená energie se automaticky mění v teplo. [17]



Obr. 21 Grafické znázornění Saint Venantova modelu, odezva na působení vnější síly

### 2.3.4 Maxwellův model

Sériově řazená pružina s tlumičem se nazývá Maxwellův model, viz obr. 22. Tento model popisuje jev relaxace napětí. Při relaxaci se při konstantní deformaci uvolňuje vnitřní napětí a tím dochází k nevratné změně tvaru i po odlehčení. Vyskytuje se zejména u polymerních materiálů, jelikož vykazují časově závislé, viskoelastické vlastnosti. Za běžných teplot se relaxace napětí týká hlavně semikrystalických polymerů, protože se nacházejí zpravidla nad teplotou zesklenní nebo v její blízké oblasti, tedy v oblasti pružného, kaučukovitého stavu, který umožňuje větší pohyb segmentů makromolekul. Konformací makromolekul dochází k zahřívání materiálu, vložená energie se mění v teplo.[15]

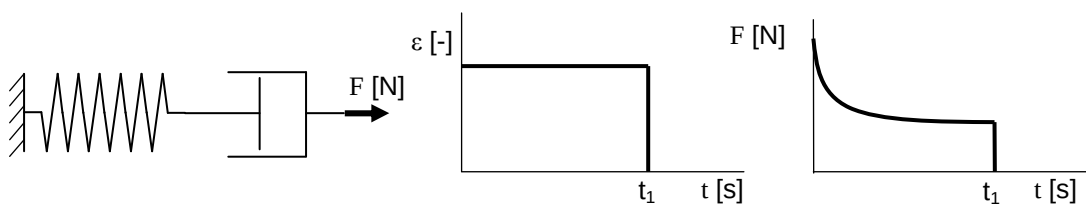
Maxwellův model je matematicky popsán rovnicemi (58) až (60). [15][16]

$$\varepsilon_{maxw.} = \varepsilon + \gamma \quad (58)$$

Po derivaci rovnice (58) model podle času a po dosazení dosazení vyjádřených deformací získáme vztah pro popis rychlosti deformace rovnice (59) a po úpravě (za předpokladu že se deformace změnila skokem a dál se nemění) časovou závislost napětí, viz (59).[16]

$$\dot{\varepsilon}_{maxw.} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (59)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{E \cdot t}{\eta}} \quad (60)$$



Obr. 22 Grafické znázornění Maxwellova modelu, odezva na působení vnější síly

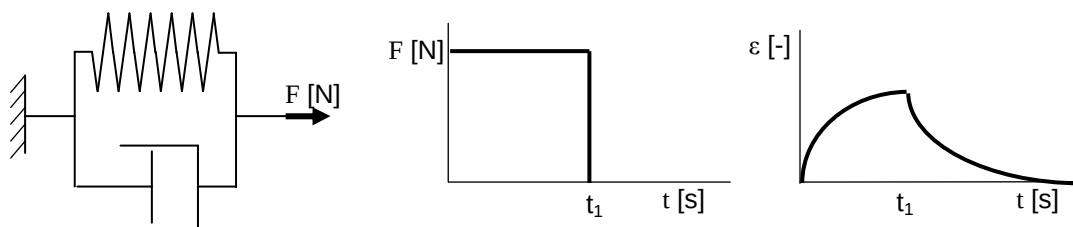
### 2.3.5 Voigt-Kelvinův model

Jde o paralelní sestavu pružiny a tlumiče, kterým lze popsat např. retardaci deformace, tedy zpožděně elastickou deformaci způsobenou viskozitou kapaliny myšleného tlumiče. Po aplikaci zatížení se těleso začne zvolna deformovat do chvíle, kdy se nastolí rovnováha akčních a reakčních sil. Po odlehčení se geometrie se zpožděním vrací do své původní polohy. Opět je to model, který je vhodný pro popis zejména semikrystalických polymerů. Matematický aparát tohoto modelu je nastíněn rovnicemi (61) až (63) a schematicky znázorněn na obr. 23.[13][16]

$$\sigma_{V-K} = \sigma + \tau \quad (61)$$

$$\varepsilon_{V-K} = \varepsilon = \gamma \quad (62)$$

$$\sigma_{V-K} = E \cdot \varepsilon + \mu \cdot \dot{\varepsilon} \quad (63)$$



Obr. 23 Grafické znázornění Voigt-Kelvinova modelu, odezva na působení vnější síly

### 2.3.6 Tucketův model

Potřebujeme-li popsat vlastnosti viskoelastického tělesa, použijeme Tucketův model, viz obr 24, který zahrnuje sériově řazený Hookův, Voigt-Kelvinův a Newtonův model. V okamžiku zatížení elastický člen 1 zareaguje okamžitou pružnou deformací, dále následuje zpožděně elastická deformace členu 2 a 3 až do vyrovnání sil. Ve Voigt-Kelvinově a Newtonově modelu se akumuluje potenciální energie, která lze po ukončení působení síly částečně získat zpět. Po odlehčení se tedy pružné deformace uvolní a viskoelastický člen způsobuje zpožděnou deformaci, tedy retardaci deformace. Člen 3 naakumuloval deformační energii a přeměnil ji v teplo, jde tedy o tu část materiálu, která způsobuje relaxaci deformace, tedy nevratné změny tvaru. [15]

Poměr mezi napětím a deformací není dán materiálovou konstantou, nýbrž časově závislým modulem pružnosti – krípvým modulem. Model lze matematicky vyjádřit rovnicemi (64) a (65). Rovnice (66) popisuje celkovou deformaci a bude tedy zahrnovat reakci elastickou, plastickou a zpožděně elastickou. Tucketův model

názorně demonstuje viskoelastické chování, protože zohledňuje jeho časovou závislost. [15]

Pro věrnější popsání vlastností daného materiálu lze spojit více základních modelů s různými materiálovými konstantami, čímž lze popsat chování materiálu v určitém rozsahu teplot. [15]

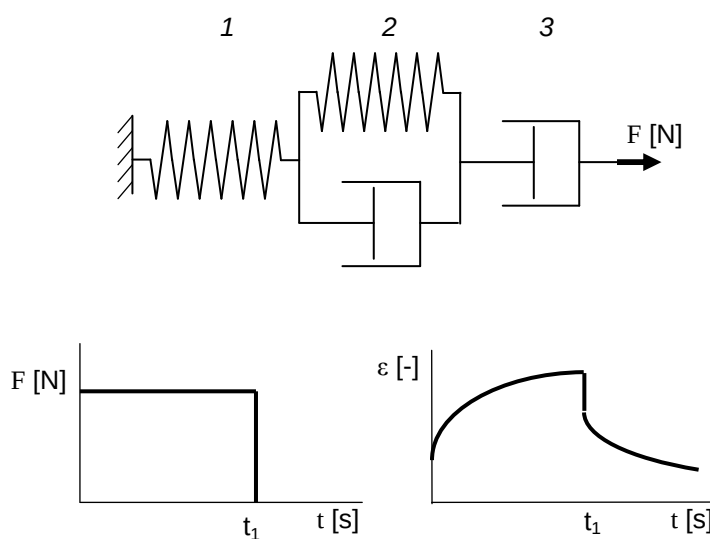
Jak bylo zmíněno, model popisuje jak časově, tak i teplotně závislé chování, Teplotní závislost se projeví v kapalině myšleného tlumiče, konkrétně zvyšováním její viskozity v závislosti na teplotě. Z toho důvodu se časově závislé vlastnosti polymerů projevují výrazněji až nad teplotou zesklennění  $T_g$ , tedy zejména u semikrystalických polymerů.

Deformace elastická:  $\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E}$  (64)

Deformace viskoelastická:  $\gamma_2 = \frac{\sigma}{E_2} \cdot \left[1 - e^{-\frac{G_2 \cdot t}{\eta_2}}\right]$  (65)

Deformace plastická:  $\gamma_3 = \frac{\tau \cdot t}{\eta_3}$  (66)

Deformace celková:  $\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \cdot \left[1 - e^{-\frac{E_2 \cdot t}{\eta_2}}\right] + \frac{\tau \cdot t}{\eta_3}$  (67)

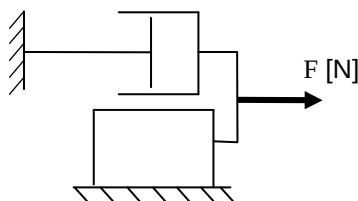


Obr. 24 Grafické znázornění Tucketova modelu, odezva na působení vnější síly

### 2.3.7 Model Binghamovy látky

Model Binghamovy látky popisuje viskoplastické chování. Skládá se ze Saint Venantova a Newtonova modelu. Látky popsané tímto modelem mají svou charakteristickou mez tečení. Napětí nižší než napětí na mezi tečení nevyvolává

žádné geometrické změny v materiálu. Naopak vyšší napětí způsobuje nevratnou deformaci plastickým tokem. [17]



Obr. 25 Grafické znázornění modelu Binghamovy látky

### 2.3.8 Model elasto-viskoplastický

Časově závislé plastické chování materiálu je nazýváno viskoplastickým chováním. Pro jeho popis jsou využity sériově řazené modely Hookovy pružiny a Binghamovy látky. Model Binghamovy látky je neaktivní do té doby, než je překročena konstanta třecího členu (napětí na mezi kluzu materiálu). Do té doby je namáhán pouze elasticky podle Hookova zákona. Po překročení meze kluzu tedy nastává plastický pohyb materiálu, který je ještě zpožděný konstantou „tlumiče“ (viskozni složky) materiálu.

## 2.4 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (MKP, anglicky finite elements analysis, FEA) je výpočetní aparát pro fyzikální analýzu objektů. Metoda zkoumá vzájemné interakce modelových těles a jejich okolí. Jde o numerický výpočet, který lze aplikovat na různé mechanické modely:

- o modely dokonale tuhých těles,
- o modely poddajných těles,
- o modely termomechanických dějů,
- o modely kombinované,
- o a další.

Princip metody konečných prvků, jak již název napovídá, zjednodušeně spočívá v diskretizaci nekonečného objemu virtuálního tělesa vytvořeného v CAD prostředí, na konečný počet jedno, dvou nebo tří rozměrných elementů. Na takto připraveném objemu, po zadání příslušných geometrických a fyzikálních okrajových podmínek, proběhne výpočet vnitřní deformační odezvy zkoumaného tělesa na dané vnější zatížení. Ze vzájemných posuvů sousedících bodů lze stanovit působící napětí.

Matematický aparát používá maticový zápis, který je pro danou problematiku nejvýhodnější a pro strojový výpočet nejpraktičtější.

Jsou dvě možnosti, jak k řešení dojít. Analytické řešení dává výsledek ve tvaru spojitě funkce při určitých zjednodušeních. Výsledkem je funkce mezi vstupními a výstupními parametry.

Numerické řešení je oproti analytickému přibližné a je založeno na hledání konečného počtu aproximujících parametrů. Numerická metoda je výhodná pro počítačový výpočet, protože ručně je dosažení výsledku velmi komplikované. Časová náročnost výpočtu se odvíjí od přesnosti řešení a od hardwarové konfigurace počítače.

#### **2.4.1 Časová závislost analyzovaného děje**

Analýzy mohou být dvojího charakteru, podle časové závislosti se dělí na stacionární a nestacionární. [18]

Stacionární děje jsou podrobeny časově nezávislým vlivům a konvergují k ustálenému stavu. Výstupem analýzy stacionárního modelu je ustálený stav bez ohledu na způsob, kterým ho bylo dosaženo. Stacionárním dějem se rozumí převážně statické úlohy, pro které je typický matematický popis dle rovnice (68), jež je analogií pro Hookeův zákon a obsahuje tuhostní matici  $[K]$  a vektor posuvů  $\vec{U}$ .  $\vec{F}$  je globální vektor ekvivalentních vnějších sil v uzlech. [18]

$$[K] \cdot \vec{U} = \vec{F} \quad (68)$$

Existují však i stacionární dynamické úlohy, které se vyznačují sinusovým průběhem zatěžující síly. Cílem je nalézt odpovídající amplitudu a fázový posuv odezvy. Rovnice 66 přechází do tvaru (69), kde se objevuje vliv hmotnosti v matici hmotnosti  $[M]$ . [18]

$$[M] \cdot \ddot{\vec{U}} + [K] \cdot \vec{U} = \vec{0} \quad (69)$$

Cílem analýzy nestacionárních dějů je získat stavové parametry jako funkce času. Opět jde o analýzy dynamické nebo statické. [18]

Statické nestacionární úlohy, neboli kvazistatické se vyznačují tím, že deformace materiálu pod statickým zatížením stále roste (creep), přestože zatížení je konstantní. Taková úloha lze popsat rovnicí (70). Ta neobsahuje dynamické účinky, protože jejich vliv je z hlediska dlouhého časového horizontu zanedbatelný, proto se v rovnici objeví jen matice tlumení  $[C](\vec{X}, t)$  a matice tuhosti  $[K](\vec{X}, t)$  s příslušnými vektory rychlosti a posuvu v rovnosti s vektorem ekvivalentních vnějších sil v uzlech. [18]

$$[C](\vec{X}, t) \cdot \vec{U}(t) + [K](\vec{X}, t) \cdot \vec{U}(t) = \vec{F}(t) \quad (70)$$

Dynamické úlohy berou v potaz tlumení systému, čímž amplituda odezvy exponenciálně klesá k nule. Cílem je získat vnitřní reakci závislou na čase. Rovnice (71) znázorňuje obyčejnou diferenciální rovnici používanou k řešení diskretizované metody konečných prvků. Rovnice obsahuje časově závislé matice hmotnosti  $[M](\vec{X}, t)$ , tlumení  $[C](\vec{X}, t)$  a tuhosti  $[K](\vec{X}, t)$ . Posuv v čase reprezentuje člen  $\vec{U}(t)$ . [18]

$$[M](\vec{X}, t) \cdot \ddot{\vec{U}}(t) + [C](\vec{X}, t) \cdot \dot{\vec{U}}(t) + [K](\vec{X}, t) \cdot \vec{U}(t) = \vec{F}(t) \quad (71)$$

#### 2.4.2 Povaha MKP z hlediska linearity

Z hlediska linearity metody konečných prvků rozlišujeme dva druhy úloh. Jsou to lineární a nelineární.

- **Lineární úloha**

Lineární úloha se vyznačuje malými posuvy, které jsou z hlediska změny tvaru zkoumaného dílu zanedbatelné. Napěťová odezva se stanoví na původním tvaru součásti. Lineární úloha je určena pro homogenní a izotropní tělesa a k výpočtu je využit Hookeův zákon. Tato úloha je jednoduchá a spolehlivá. Nedochozí zde k maření energie a k určení výsledného stavu není zapotřebí znát celý průběh zatěžování. [18]

- **Nelineární úloha**

Nelineární úlohy se vyznačují závislostí na posloupnosti stavů, kterými systém v době jeho zatěžování prošel. Stacionární metody jsou řešeny přírůstkovou metodou. Nestacionární úlohy se vyznačují časovou závislostí, kdy čas je zde parametrem cesty mezi počátkem a koncem zatěžování a řeší se integrací pohybových rovnic. [18]

V případě, že dojde k velkým posuvům nebo deformacím, tak se jedná o geometrické nelinearity. To se vztahuje například na popis operace tváření kovů či plastů, kdy dochází k přetvoření řádově i stovek procent. Tyto nelinearity mají za následek složitější tvary tenzoru přetvoření, který musí obsahovat i nelineární členy.

#### 2.4.3 Matematický aparát

Každá úloha lze řešit dvěma postupy. Postupem variačním, nebo diferenciálním. Diferenciální formulace je založena na řešení soustavy diferenciálních rovnic a je to tzv. silná formulace. Variační formulace spočívá v hledání minima funkce vnitřní energie systému a označuje se jako formulace slabá.

- **Diferenciální formulace**

Diferenciální formulace k výpočtu používá Laméovy rovnice, nebo rovnice Beltram-Michelovy. Stejně, jako v pružnosti a pevnosti se používají tři základní rovnice rovnováhy např. podle d'Alembertova principu. Dále šest geometrických rovnic (3 poměrné deformace od napětí normálového a 3 od napětí tečného) a rovnice fyzikální (vztah mezi napětím a deformací). [18]

Protože se k výpočtu používají diferenciální rovnice je pro jejich vyřešení třeba znát okrajové podmínky, které jsou trojí. Geometrické určují vazbu tělesa k jeho okolí, určují též kinematiku deformace. Statické, neboli silové okrajové podmínky, vyjadřují statickou vazbu tělesa s jeho vnějším okolím. Kombinací dvou předešlých vzniknou okrajové podmínky smíšené.

Při řešení konkrétních úloh se neřeší současně patnáct funkcí pružnosti, ale během výpočtu jsou vyloučeny jednotlivé skupiny neznámých a vznikají tzv. Lamého rovnice.

- **Variační formulace**

Variační formulace jsou tzv. slabou formulací, protože jde o přibližné metody. Lze je řešit principem virtuálních posuvů nebo sil. Princip virtuálních sil je založen na integraci rovnice rovnováhy. Virtuální práce vnitřních sil je rovna virtuální práci vnějších sil objemových a plošných. Variační formulace se řeší metodou Lagrangeovou nebo Castiglianovou. [20]

- **Řešení základní rovnice**

Numerické řešení lze stanovit např. Gausovou eliminací (lineární problematika), proto, jak bylo zmíněno, je výhodný maticový zápis algebraických rovnic. To platí pro metody lineární, ale pro nelineární formulaci problému využívají iterační metody (Newton-Raphsonova), které spočívají v nalezení přibližného řešení a jeho následné zpřesnění, než je dosaženo požadované chyby.

#### **2.4.4 Definice hmoty**

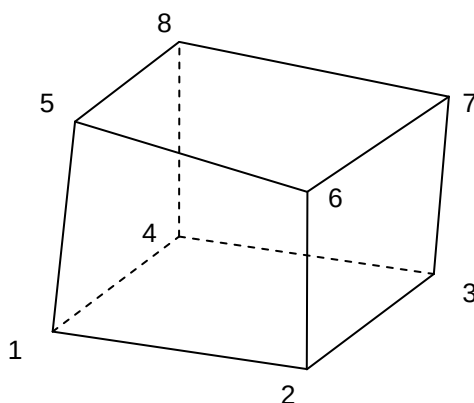
Hmota je ve virtuálním prostředí konečných prvků definována pomocí sítě konečného počtu elementů. Jejich velikost se podle potřeby pohybuje řádově v milimetrech, v kritických místech je tvořena síť hustší, naopak tam, kde se neočekává výrazná změna průběhu deformace je síť složena z větších elementů. Jejich počet (a dostupný výpočetní výkon) přímo ovlivňuje časovou náročnost výpočtu. Pro vytvoření sítě o odpovídající přesnosti je nutná základní zkušenost z oblasti konstrukce a mechaniky, na základě které jsou vytvářeny předpoklady o poloze míst, v nichž je očekávána změna napětí, či jeho koncentrace.



Následné informace jsou převzaty z výukových materiálů Virtual Performance solution 2013, ESI Group, Francie.

Elementy je vhodné dělit podle jejich geometrické povahy od jednorozměrných elementů typu „beam“ přes 2D elementy typu „shell“ po objemové 3D elementy typu „solid“ (viz obr. 26). Každý ze zmíněných elementů je ze své podstaty vhodný pro jinou aplikaci.

- o 3D element: hexahedral, pentahedral, tetrahedral,
- o 2D element: tenkostěnné, tlustostěnné a vrstvené prvky typu shell, membráně,
- o 1D element typu beam, bar.



Obr. 26: 3D objemový element typu „hexahedral“

Hrana každého elementu je zakončena prvkem „node“, který spojuje všechny okolní elementy a je tudíž pro ně společný.

Dále je možné mezi dvěma (i více) body dvou těles vytvářet kinematické vazby sférické, posuvné, rotační, cylindrické, plošné, univerzální, které se navzájem liší odebíranými stupni volnosti příslušného bodu.

#### 2.4.5 Definice materiálu

Materiálové modely popisují chování simulovaného celku z hlediska jeho mechanických, tepelných a např. akustických vlastností, možno i v závislosti na teplotě.

Podobně, jako je tomu v případech výpočtů v pružnosti a pevnosti, i v metodě MKP se výsledku dosáhne aproximací tahového diagramu. Záleží tedy na povaze řešené úlohy, zda postačuje materiálový model, který popisuje pouze lineárně elastické chování, nebo zda je nutné popis rozšířit o elasto-plastické, viskoelastické chování lineární či nelineární, reprezentované různými aproximacemi tahového diagramu. Aproximace vhodné pro materiál se zpevněním jsou například

reprezentované bilineárním schématem v diagramu napětí – poměrné prodloužení, nebo dále formulací mocninového zákona, zákona podle Krupkowskyho a podobně.

Dále je možné zavádět proměnné materiálové charakteristiky v závislosti na teplotě a jedná se o teplotní roztažnost, lineární a nelineární elastické vlastnosti, elasto-plastické zpevnění.

Každý materiál je nutné popsat přijatelně zjednodušeným matematickým modelem, které vycházejí z reologických modelů uvedených v kapitole 2.3. V příručce Virtual Performance solution 2013, ESI Group, Francie je zmíněno, že takových materiálových typů je k dispozici zhruba 100, proto není možné je všechny v této práci obsáhnout.

- **Typ materiálu 5** – lineární viskoelastický materiál pro objemové elementy

Materiálový typ 5 je založený na tzv. Zenerově modelu, který je složený z paralelně řazeného Hookova modelu a modelu Maxwellova. Skládá se tedy ze základního elastického modelu pro izotropní materiály a modelu viskoelastického chování. Popsané je dlouhodobým modulem pružnosti pro malé rychlosti přetvoření, zatímco pro skokové změny zatěžování krátkodobým modulem pružnosti. A konstantu tlumení  $\beta[s^{-1}]$ .

#### Input Overview

1 ☐ Material Identification and General Parameters  
See Material > General Material Definition.

|                            |    |                |                  |      |
|----------------------------|----|----------------|------------------|------|
|                            | 10 | 20             | 30               | 40   |
| 2 <input type="checkbox"/> | K  | G <sub>0</sub> | G <sub>INF</sub> | BETA |

3 ☐ blank eol

4 ☐ blank eol

5 ☐ blank eol

|                            |       |     |                |
|----------------------------|-------|-----|----------------|
|                            | 60    | 70  | 80             |
| 6 <input type="checkbox"/> | blank | KSI | F <sub>0</sub> |

|                            |       |    |    |    |
|----------------------------|-------|----|----|----|
|                            | 40    | 50 | 60 | 70 |
| 7 <input type="checkbox"/> | blank | Q1 | Q2 | Q3 |

- **Typ materiálu 101** - elastický skořepinový

Typ 101 je základní možnost popisu lineárního elastického izotropního chování skořepinového modelu. Přehled veličin materiálového vstupu je na obr. 27. V řádce č. 2 jsou zleva postupně uvedeny hodnoty modulu pružnosti, Poissonova čísla, teplotní roztažnosti. Ostatní vkládané konstanty mají význam opravných bezrozměrných čísel, které nahrazují chybějící integrační body. Číslo F<sub>0</sub> je ztrátová frekvence.

## Input Overview

1 ☐ Material Identification and General Parameters  
See Material > General Material Definition.

|                            |          |       |           |              |            |            |            |           |
|----------------------------|----------|-------|-----------|--------------|------------|------------|------------|-----------|
| 2 <input type="checkbox"/> | 10       | 20    | 30        | 40           | 50         | 60         | 70         | 80        |
|                            | <i>E</i> | blank | <i>NU</i> | <i>ALPHA</i> | <i>HGM</i> | <i>HGW</i> | <i>HGQ</i> | <i>As</i> |

3 ☐ blank eol

4 ☐ blank eol

5 ☐ blank eol

|                            |       |            |           |
|----------------------------|-------|------------|-----------|
| 6 <input type="checkbox"/> | 60    | 70         | 80        |
|                            | blank | <i>KSI</i> | <i>FO</i> |

7 ☐ blank eol

Obr. 27: Přehled vstupních veličin pro elastický skořepinový materiálový model

- **Typ materiálu 121** – nelineární izotropní viskoelastický skořepinový

Definice materiálu 121 je založena na Maxwellově modelu vhodného pro popis odezvy polymerů na vnější namáhání (viz kapitola 2.3.4). Zahrnuje tedy viskozitu materiálu.

Na obr. 28 je tabulka vstupních veličin, kde druhý řádek tabulky je téměř totožný s typem materiálu 101, ve třetím řádku jsou už odlišnosti. Konstantní hodnoty horní poloviny jsou koeficienty konzistence, zpevnění a viskoelastické koeficienty. Dolní polovina jsou hodnoty funkční, stejného významu jako zmíněné konstanty. Čtvrtý řádek je volitelný, význam má pro lokální přechodové změny míry deformace např. v místech kontaktu materiálu s nástrojem a kinematické podmínky.

$$[s_{ij}] = 2 \cdot \eta \cdot [\varepsilon_{ij}]^p \quad (72)$$

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot K \cdot \left( \frac{\varepsilon_p^{m-1}}{\varepsilon_{ref}^m} \right) \quad (73)$$

$$K = k(1 - e^{-w \cdot \varepsilon_p}) \cdot (e^{-h_1 \cdot \varepsilon_p^2}), \text{ pro } h_2 = 0 \quad (74)$$

$$K = k(1 - e^{-w \cdot \varepsilon_p}) \cdot (e^{-h_1 \cdot \varepsilon_p^2}), \text{ pro } h_2 \neq 0 \quad (75)$$

V rovnicích (72) až (75) je popsáný matematický základ pro typ materiálu 121. Rovnice (75) je vztah mezi deviačním tenzorem  $[s_{ij}]$  a tenzorem plastického přetvoření  $[\varepsilon_{ij}]$ . Konstanta  $K$  se stanoví podle rovnic (74) a (75), kde  $k$  je koeficient materiálové konzistence,  $m$  exponent míry deformačního zpevnění,  $h_1$  a  $h_2$  koeficienty míry deformačního zpevnění a  $w$  viskoelastický koeficient.

## Input Overview

1 ☐ **Material Identification and General Parameters**  
See Material > General Material Definition.

2 ☐

|          |       |           |       |            |            |            |           |
|----------|-------|-----------|-------|------------|------------|------------|-----------|
| 10       | 20    | 30        | 40    | 50         | 60         | 70         | 80        |
| <i>E</i> | blank | <i>NU</i> | blank | <i>HGM</i> | <i>HGW</i> | <i>HGQ</i> | <i>As</i> |

3 ☐

|                           |              |              |               |               |              |                 |
|---------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|-----------------|
| 10                        | 20           | 30           | 40            | 50            | 60           | constant values |
| <b>CONST</b><br>o o o o o | <i>k</i>     | <i>m</i>     | <i>h1</i>     | <i>h2</i>     | <i>w</i>     |                 |
| <b>CURVE</b><br>o o o o o | <i>IFUNk</i> | <i>IFUNm</i> | <i>IFUNh1</i> | <i>IFUNh2</i> | <i>IFUNw</i> |                 |

  
functions of temperature

4 ☐

|                           |                            |
|---------------------------|----------------------------|
| 10                        | 20                         |
| <i>TIME</i><br><i>fil</i> | <i>ERATE</i><br><i>ref</i> |

5 ☐

|                            |       |                           |                            |                           |
|----------------------------|-------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 10                         | 30    | 40                        | 50                         | 60                        |
| <i>EPSIp</i><br><i>max</i> | blank | <i>REL</i><br><i>THIN</i> | <i>EPSIp</i><br><i>max</i> | <i>REL</i><br><i>THIC</i> |

6 ☐

|       |
|-------|
| eol   |
| blank |

7 ☐

|       |
|-------|
| eol   |
| blank |

8 ☐

|       |
|-------|
| eol   |
| blank |

Obr. 28 Přehled vstupních veličin pro nelineární izotropní viskoelastický skořepinový materiál

- **Typ materiálu 130, 131, 132** – vrstvené skořepinové materiály

Tyto tři typy se využijí pro vícevrstvé materiály (lamináty), nebo pro model složený z více materiálů (pokovený plast). Vrstev může být libovolné množství a jsou číslovány od spodní vrstvy k té horní. Každá jednotlivá vrstva odpovídá jednomu integračnímu bodu. Minimální počet vrstev je jedna, která se chová jako membránový element, který nepřenáší ohybové momenty. U laminovaného materiálu záleží na orientaci jednotlivých vrstev.

Na obr. 29 je opět přehled potřebných materiálových konstant. Druhý řádek zleva obsahuje veličiny: poměrný útlum, ztrátová frekvence, počet operací, identifikační číslo vrstev a opravné konstanty. Řádek č. 3 obsahuje veličiny popisující jednotlivé vrstvy. Zleva: číslo vrstvy, tloušťka jednotlivé vrstvy a úhel orientace vrstvy. Pátý řádek definuje kriteria selhání vrstvy: minimální dovolený počet cyklů, způsob porušení (maximální poškození – DMG, tloušťka - THIC), kritérium porušení elementu (zda element selže při porušení jedné či více vrstev, nebo konkrétní vrstvy) a poměr poškozených vrstev nutných pro selhání jednoho elementu. Šestý řádek je volitelný.

## Input Overview

1 **Material Identification and General Parameters**  
See Material > General Material Definition.

2 ☐

|     |    |       |      |       |     |     |     |    |
|-----|----|-------|------|-------|-----|-----|-----|----|
| 10  | 20 | 25    | 30   | 40    | 50  | 60  | 70  | 80 |
| KSI | FO | NOPEP | ILAY | blank | HGM | HGW | HGQ | AS |

3 ☐

|       |       |       |      |
|-------|-------|-------|------|
| 10    | 20    | 30    | ILAY |
| IDPLY | THKPL | ANGPL | 0    |
| ID    | blank | blank | 1    |
| LAYER |       |       |      |

4 **Additional Ply Identification and Parameters Cards**  
Repeat the above card (3) <NOPEP> times.

5 ☐

|       |      |       |         |       |       |       |        |
|-------|------|-------|---------|-------|-------|-------|--------|
| 10    | 15   | 20    | 30      | 40    | 45    | 50    | 60     |
| blank | NMIN | blank | KEYWORD | VALUE | IFAIL | blank | ERATIO |

6 ☐

|        |        |        |        |     |        |        |
|--------|--------|--------|--------|-----|--------|--------|
| 5      | 10     | 15     | 20     | ... | 75     | 80     |
| IDPLY1 | IDAUX1 | IDPLY2 | IDAUX2 | ... | IDPLY8 | IDAUX8 |

7 **Additional Auxiliary Plot Variable Definitions**  
Repeat the above card (6) up to 5 times (48 auxiliary variables in total).

Obr. 29 Přehled vstupních veličin pro vrstvený skořepinový materiál

### 2.4.6 Pevnostní kritéria pro kompozitní materiály

Kritéria porušení byla nastíněna v kapitole 2.2.5. Příručka Virtual Performance solution 2013, ESI Group, Francie udává, že pro výpočet využívá následující teorie:

- Teorie ekvivalentního smykového napětí
- Teorie maximálního napětí
- Kritérium Tsai-Wu
- Puckovo kritérium
- Další

### 3 Experimentální část

Experimentální část práce je zaměřena na měření časově závislých vlastností kompozitních vzorků na bázi polyuretanové matrice vyztužené skleněnými vlákny. Cílem práce je prověřit viskoelastickou odezvu polymerních kompozitů.

#### 3.1 Kompozitní systém

##### 3.1.1 Popis kompozitního systému

Diplomová práce je řešena ve spolupráci s firmou LENAM, s.r.o., kterou byly poskytnuty vzorky kompozitních rámců. Jelikož se jedná o prototypy, jejich bližší specifikace není možno uvádět. K dispozici byly tři varianty, lišící se koncentrací vláken v matrici (viz tab. 4). Každý rám je z geometrického hlediska uzavřený tvar, jehož jádrem je lehčená strukturní polyuretanová pěna. Ta slouží pouze jako „ztracené jádro,“ které nepřispívá k výsledným mechanickým vlastnostem rámu, nýbrž je použito pouze jako nosič vláken při technologii oplétání. Proces oplétání probíhá na sofistikovaném jednoúčelovém zařízení, jehož rotační část obsahuje odvíjecí mechanismus pro skelná vlákna. Ta jsou vrstvu po vrstvě nanášena na jádro, každá vrstva vždy pod jiným úhlem. Po nanesení daného počtu vrstev je proces ovíjení ukončen a opletený rám je založen do formy vstřikovacího lisu, kde je technologií RIM (reaction injection molding) nízkotlakým způsobem nanesena matrice. Reakční vstřikování spočívá ve vstříknutí kapalné monomerní směsi (izokyanátu a polyolu) do uzavřené formy, kde proběhne exotermická reakce a expanse polyadici. Výrobní proces probíhá při teplotě 90 °C po dobu 4 minut. Na obr. 30 je vidět řez rámem.



Obr. 30 Řez kompozitním rámem, který je předmětem zkoumání experimentální části

Protože se jedná o sofistikovaný rám, bylo poměrně obtížné vybrat místo odběru takové, aby vzorky byly rovinné. Minimální velikost vzorku pro zkoušku tříbodovým ohybem na zařízení DMA je 20 mm délka, maximálně 15 mm šířka a maximálně 7 mm tloušťka. Odebrané vzorky byly upraveny na velikost (30 x 10) mm, tloušťku nebylo možné sjednotit, protože téměř v každém místě odběru vykazoval vzorek jinou tloušťku.

Tab. 4 Přehled objemového zastoupení vláken výztuže

|                            |             |               |
|----------------------------|-------------|---------------|
| Matrice                    | rám 1, 2, 3 | polyuretan    |
| Výztuž                     | rám 1, 2, 3 | skelná vlákna |
| Objemové zastoupení vláken | rám 1       | 35 %          |
|                            | rám 2       | 11 %          |
|                            | rám 3       | 23 %          |

### 3.1.2 Strukturní charakteristika kompozitního systému pomocí počítačové tomografie

Zkoumané vzorky byly podrobeny skenování pomocí počítačové tomografie pro zjištění vnitřní struktury a její uspořádanosti. Skenování vzorků proběhlo ve spolupráci s oddělením Textilní fakulty v Ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace na TUL

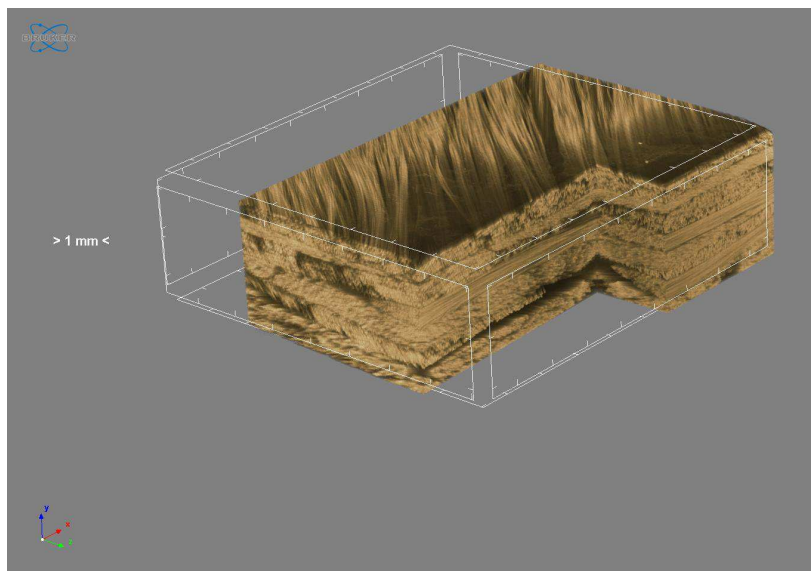
Proces skenování probíhal na laboratorním skeneru SkyScan 1174 firmy Bruker, viz obr. 31. Princip tohoto zařízení spočívá v tom, že zkoumaným vzorkem prochází rentgenové záření, které je na druhé straně pracovního prostoru snímáno a ukládáno na disk počítače v podobě fotky. Vzorek je upevněn na otočném stolku, který pro každý snímek svírá jiný úhel se svou počáteční pozicí, v každé pozici získáme jeden snímek. Počet úhlů (mimo jiné parametry) udává výslednou kvalitu zobrazení. Po skončení procesu skenování byl ze získaných snímků sestaven trojrozměrný obraz zkoumaného předmětu pomocí počítačového prostředí, viz obr. 32 až obr. 37.



Obr. 31 Laboratorní stolní skener SkyScan firmy Bruker

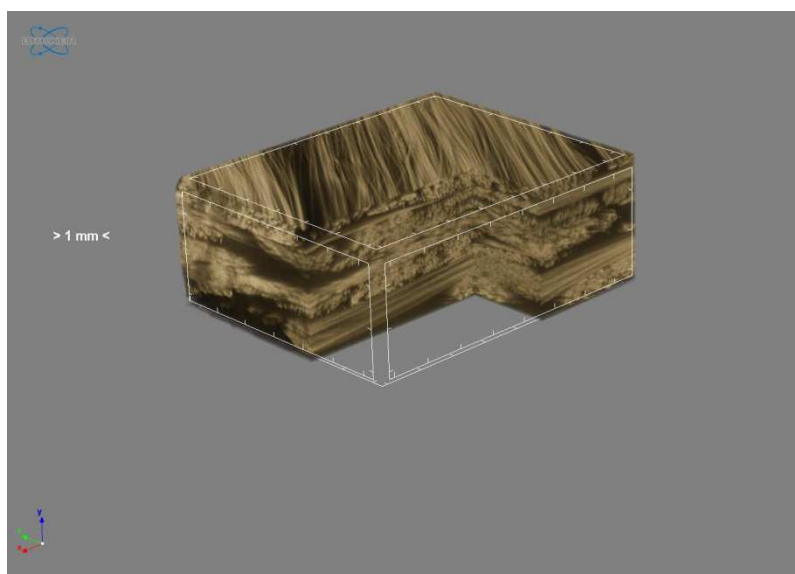
- **Vzorek rámu 1**

Na obr. 32 je vidět trojrozměrná rekonstrukce vnitřní struktury materiálu vzorku s nejvyšším objemovým zastoupením vláken (35%). V tomto místě bylo zjištěno následující směrové uložení vláken:  $+45^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $+45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $+45^\circ$ ;  $90^\circ$ ,  $-45^\circ$ , tedy 8 vrstev



Obr. 32 Skladba vzorku rámu 1 v prvním místě odběru

V druhém místě odběru téhož rámu bylo zjištěno složení odlišné, viz obr. 33. Skladba vláken je v tomto místě řezu uspořádána do 7 vrstev a jejich pořadí je následující:  $+45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $+45^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $+45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $-45^\circ$ .

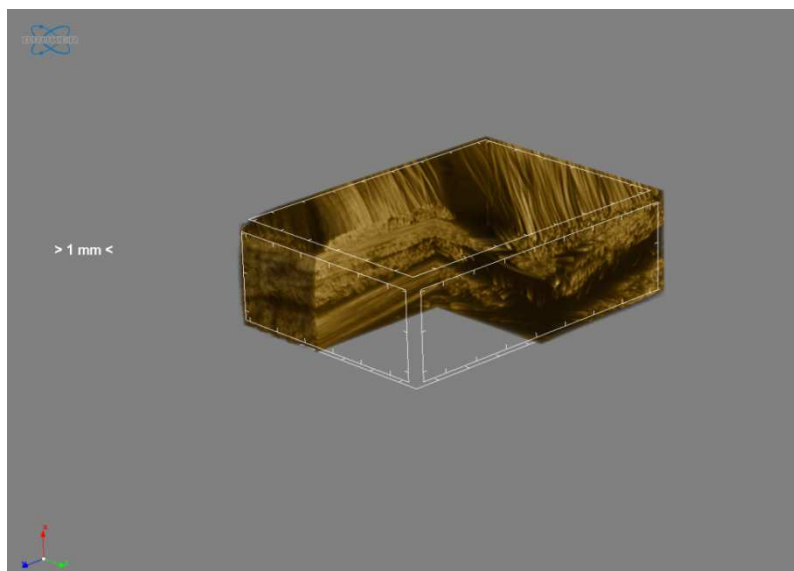


Obr. 33 Skladba vzorku rámu 1 z jiného místa odběru



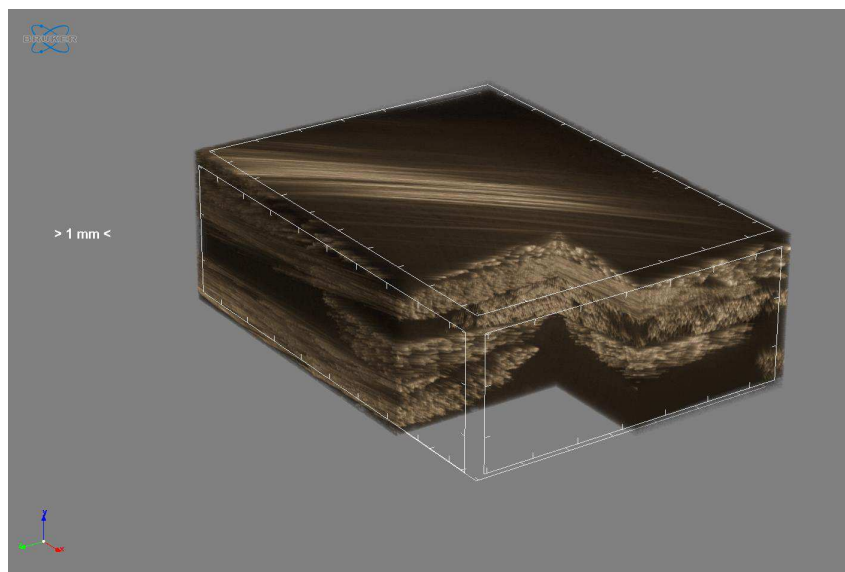
- **Vzorek rámu 2**

Na obr 34 je znázorněna vnitřní struktura vzorku 2, tedy vzorku s nejnižším objemovým podílem výztuže (11%) uložené v 6 vrstvách vláken v následujícím pořadí:  $+45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $+45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $-45^\circ$ . Vzorek se tedy odlišuje od předchozího jak počtem vrstev, tak i směrem uložení vláken.



Obr. 34 Skladba vzorku rámu 2 z prvního místa odběru

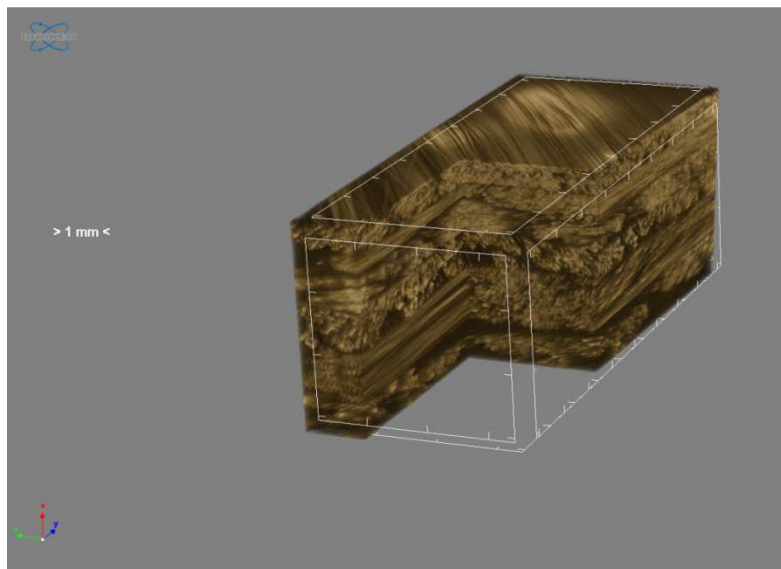
Vzorek odebraný z jiného místa téhož rámu má skladbu vláken totožnou jako vzorek předchozí, tedy 6 vrstev:  $+45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $+45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $-45^\circ$ . Ve vzorku jsou ale pozorovatelné značné heterogenity a místy i chybějící vrstvy, viz obr. 35.



Obr. 35 Skladba vzorku rámu 2 z jiného místa odběru

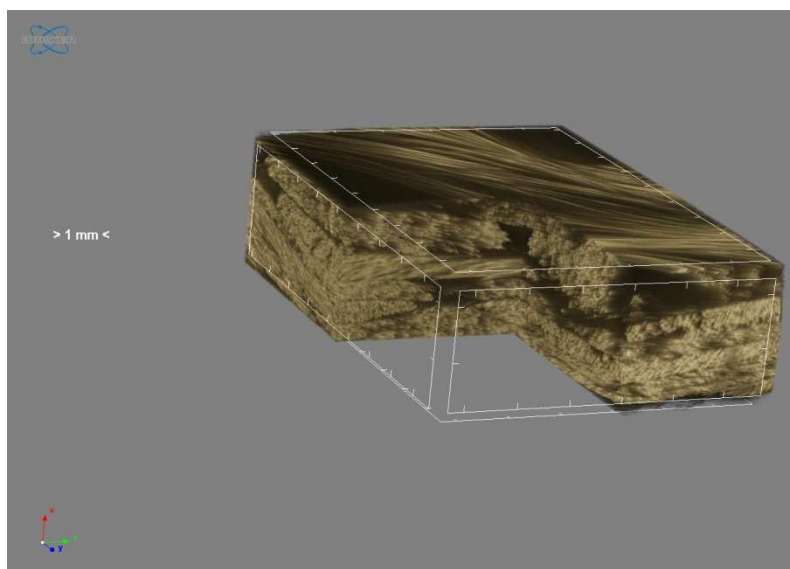
- **Vzorek rámu 3**

První vzorek posledního rámu vykazuje oproti předchozím dobrou uspořádanost, skladba vláken je  $+45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $+45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $-45^\circ$  v 6 vrstvách, viz obr. 36. Objemové zastoupení vláken je 23 %.



Obr. 36 Skladba vzorku rámu 3 z prvního místa odběru

Skladba druhého vzorku z jiného místa odběru téhož rámu je obdobná, jen s tím rozdílem, že chybí jedna příčná vrstva. Vzorek obsahuje 5 tedy jen 5 vrstev skleněné výztuže následujícího uložení:  $+45^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $+45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $-45^\circ$ , viz obr. 37.



Obr 37. Skladba rámu 3 z druhého místa odběru

- **Shrnutí pozorované struktury**

Na všech vzorcích podrobených skenování jsou patrné heterogenity rozložení materiálu i nepravidelná skladba jednotlivých vrstev vláken, někdy i chybějící celé roviny, což svědčí o nedokonalosti technologie výroby a tím i značných rozdílech mechanických vlastností po obvodu celého rámu.

### **3.2 Studium (dynamicko-)mechanických vlastností kompozitních struktur**

Viskoelastická polymerů je mírou velikosti a rychlosti zatěžování i teploty prostředí. Experimentální měření (dynamicko-)mechanických vlastností na dodaných vzorcích je proto prováděno při proměnných hodnotách frekvence, teploty nebo velikosti zatížení při třibodovém ohybovém zatěžování.

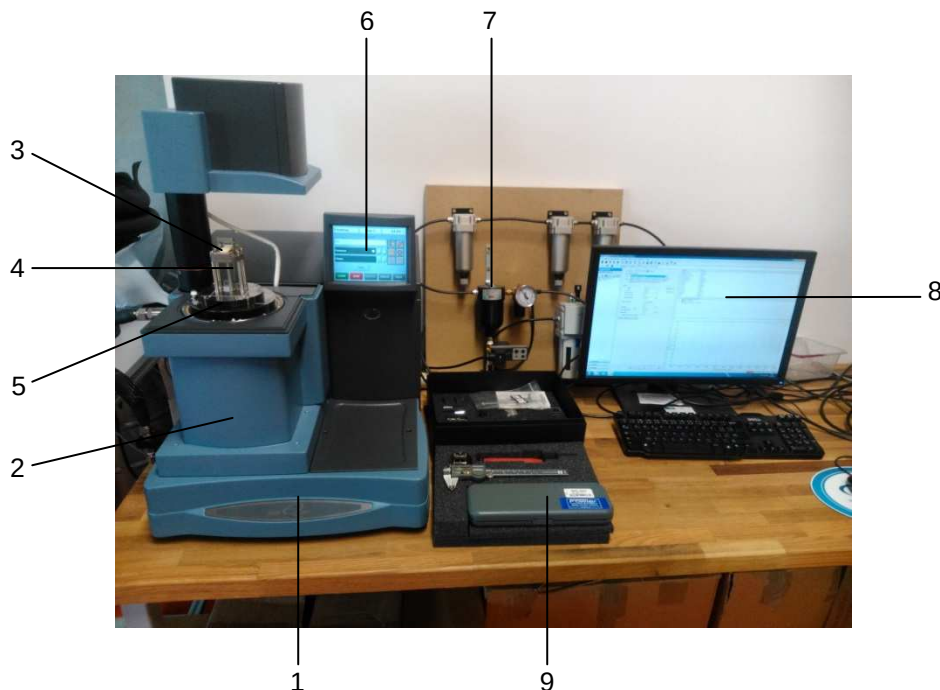
#### **3.2.1 Dynamicko mechanický analyzátor DMA Q800**

Měření časově závislých vlastností vzorků bylo měřeno ve spolupráci s ústavem pro nanomateriály a pokročilé technologie a inovace při TU v Liberci na dynamicko mechanickém analyzátoru DMA Q800 firmy Thermal Analysis, který umožňuje zkoumat a vyhodnocovat odezvu materiálu při namáhání statickým i dynamickým a za různých podmínek okolí i zatěžování. Dynamické zatížení bylo pro účely této práce zvoleno ve frekvenčním rozsahu od 1Hz do meze dané materiálovými charakteristikami. Statické zatížení je reprezentováno krátkodobými zkouškami křípu a relaxace. Prostřednictvím DMA je možno zkoumat vzorky v pevné podobě, dále v podobě filmů, vláken, gelu nebo viskózní kapaliny.

Zařízení je navrženo tak, aby jeho tuhost byla dostatečná a měření přesné. Výrobce uvádí přesnost snímání síly v řádech  $10^{-5}$  N a deformace  $10^{-9}$  m. Maximální použitelná síla je 18 N, což ovlivňuje podmínky zatěžování jednotlivých experimentů.[21]

Zařízení se skládá ze základního rámu (1) ve kterém je upevněno ústrojí zajišťující pohyb a jeho optické snímání (2). Nad pohybovým ústrojím je pec (3) část se svorkami pro umístění vzorku (4), topením a chlazením (5) s termočládky. Vpravo od pece je ovládací displej (6). K funkci zařízení je nutný přívod stlačeného vzduchu (7). Zařízení může pracovat autonomně, nebo pomocí uživatelského rozhraní v PC (8). Další příslušenství (9) slouží ke kalibraci zařízení a měření vzorků. Jemný pohyb zajišťuje hnací motor s vzduchovými ložisky, která přenášejí

pohyb bez fyzického kontaktu pohyblivých částí, mezi pohyblivou a pevnou částí je optický snímač.



Obr. 38 Zařízení DMA Q800

1-základní rám, 2-pohybové ústrojí a snímací zařízení, 3-pec, 4-svorky pro upevnění vzorku, 5-topení a chlazení, 6-ovládací displej, 7-přívod stlačeného vzduchu. 8-PC, 9-příslušenství

### 3.2.2 Příprava měření

Před samotným měřením je nutné nechat zařízení zahřát na provozní teplotu a provést kalibraci přístroje. Protože zařízení podporuje různé metody měření s různými nástroji a s různou velikostí vzorků, je třeba jej zkalibrovat na podmínky konkrétního měření. Veškerá kalibrace probíhá v uzavřené komoře.

Zařízení obsahuje termočlánky pro měření teploty měřicí komory. Při změně metody je vždy nutné upravit jejich polohu tak, aby byla snímána teplota v bezprostředním okolí vzorku a tím byly eliminovány nepřesnosti měření.

Nejprve je provedena kalibrace pozice jednotlivých upínacích částí bez měřících svorek, poté se svorkami. V tomto případě s volnou i pohyblivou částí upínacího mechanismu pro tříbodový ohyb. Následně se kalibrují svorky pro daný rozměr vzorku podle přiloženého kovového etalonu o známých rozměrech a materiálových vlastnostech.

### 3.2.3 Dynamické namáhání při zatížení vzrůstající frekvencí za konstantní teploty

Experimentálně bylo zjištěno, že metodu třibodového volného ohybu je možno použít pro frekvenční rozsah shora ohraničený frekvencí 70 Hz, nad kterou se vzorek vlivem své elasticity přestává držet ve stabilní poloze a měření ztrácí význam. Rozsah frekvencí byl tedy omezen od 1 Hz do 70 Hz s lineárním dělením.

Zatěžující amplituda byla nastavena na konstantní hodnotu 10  $\mu\text{m}$  a tudíž i vynucená deformace vzorku byla konstantní. Vlastnosti při dynamickém namáhání byly zkoumány při teplotách 30  $^{\circ}\text{C}$ , 60  $^{\circ}\text{C}$  a 90  $^{\circ}\text{C}$ . Zjišťovanými veličinami byly obě složky komplexně sdruženého modulu pružnosti  $E^*$  [MPa], reálná  $E'$  [MPa] a imaginární  $E''$  [MPa] složka a od nich odvozený úhel posunutí  $\delta$  respektive ztrátový činitel  $\tan \delta$  a dále průběh vybuzeného napětí v ohybu.

Očekávaný výsledek měření je takový, že modul pružnosti, respektive reálná část komplexně sdruženého modulu pružnosti ( $E'$ ) bude pro zvyšující se frekvenci vykazovat rostoucí tendenci. Podobně tak i napětí, které je s modulem pružnosti prakticky svázáno pouze smluvním přepočtem přes průřezové charakteristiky daného vzorku, které jsou v průběhu měření na jednom vzorku neměnné.

Dalším předpokladem k experimentálnímu ověření je klesající hodnota modulu pružnosti, popřípadě napětí v ohybu s rostoucí teplotou. Podle teorie viskoelastivity vyšší teplota polymeru je provázána rychlejším pohybem makromolekul, přičemž dochází ke zvyšování účinku viskózní složky modelu deformace a tedy i menšímu projevu složky elastické deformace. Ztrátový činitel  $\tan \delta$  bude mít opačnou posloupnost než ohybové napětí, s teplotou se bude jeho hodnota zvyšovat. Vyšší hodnota ztrátového činitele má automaticky za následek vyšší hodnoty úhlu posunutí  $\delta$  a tím i vyšší hodnotu komplexně sdruženého modulu ( $E^*$ ).

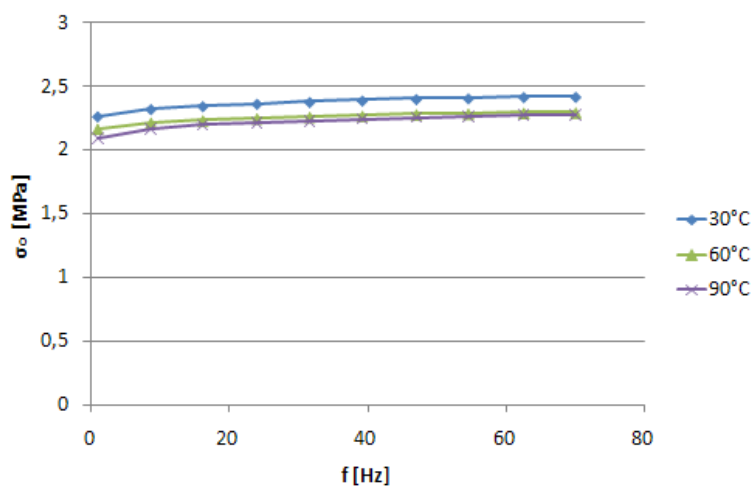
#### • Vzorek rámu 1

Při dynamickém zatížení kompozitu na teplotě 30  $^{\circ}\text{C}$  a maximální možné frekvenci 70 Hz bylo zjištěno maximální ohybové napětí  $\sigma_o(30^{\circ}\text{C}) = 2,42 \text{ MPa}$ , pro teplotu 60  $^{\circ}\text{C}$  je  $\sigma_o(60^{\circ}\text{C}) = 2,29 \text{ MPa}$  a pro nejvyšší teplotu 90  $^{\circ}\text{C}$  je  $\sigma_o(90^{\circ}\text{C}) = 2,28 \text{ MPa}$ . Všechny křivky vykazovaly maximum při zatěžující frekvenci  $f = 70 \text{ Hz}$ , viz obr 39.

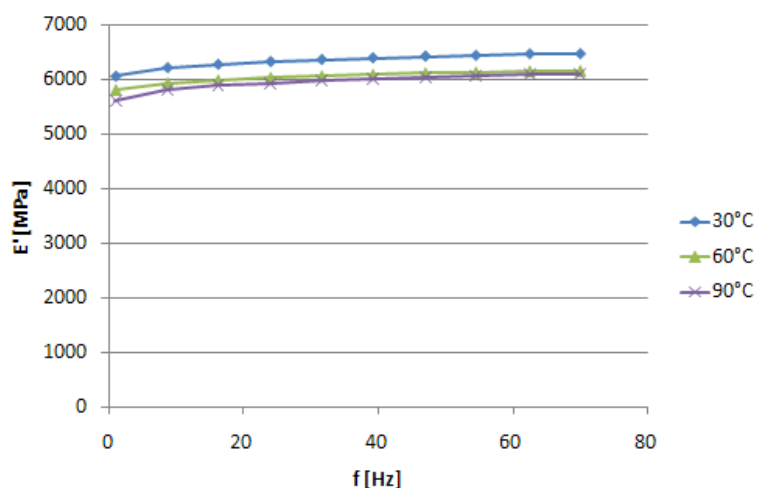
Grafická závislost reálné složky komplexně sdruženého modulu pružnosti ( $E'$ ) na frekvenci ( $f$ ) a teplotě ( $T$ ) je znázorněna na obr. 40, je obdobná, jako je tomu v případě ohybového napětí. Pro zatížení na teplotě 30  $^{\circ}\text{C}$  je maximální modul zjištěn  $E'(30^{\circ}\text{C}) = 6476 \text{ MPa}$ , pro teplotu 60  $^{\circ}\text{C}$  je  $E'(60^{\circ}\text{C}) = 6149 \text{ MPa}$  a pro

nejvyšší teplotu 90 °C je  $E'(90^\circ\text{C}) = 6106 \text{ MPa}$ . Pro imaginární část komplexního modulu byly zaznamenány křivky, viz obr. 41. Hodnota imaginárního modulu pružnosti byla  $E''(30^\circ\text{C}) = 348 \text{ MPa}$ , pro teplotu 60 °C je  $E''(60^\circ\text{C}) = 327 \text{ MPa}$  a pro nejvyšší teplotu 90 °C je  $E''(90^\circ\text{C}) = 351 \text{ MPa}$ .

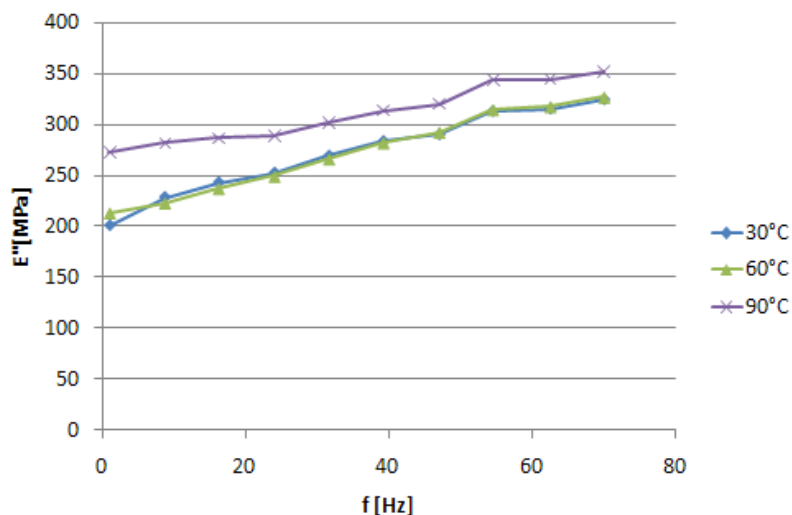
Maximum ztrátového činitele ( $\tan \delta$ ) bylo zjištěno při frekvenci 70 a potvrdily se tak dříve zmíněné předpoklady. Pro konkrétní teplotní zatížení nabýval hodnot:  $\tan \delta(30^\circ\text{C}) = 0,0500$ ,  $\tan \delta(60^\circ\text{C}) = 0,0532$  a  $\tan \delta(90^\circ\text{C}) = 0,0576$ . Vlivem teplotního zatížení se snižuje viskozita viskózního členu v pomyslném tlumiči reologického modelu a dochází tedy k vyšším projevům viskoelastivity. Na obr. 42 je znázorněn zvyšujícím se ztrátovým číslem směrem k vyšším frekvencím a teplotám.



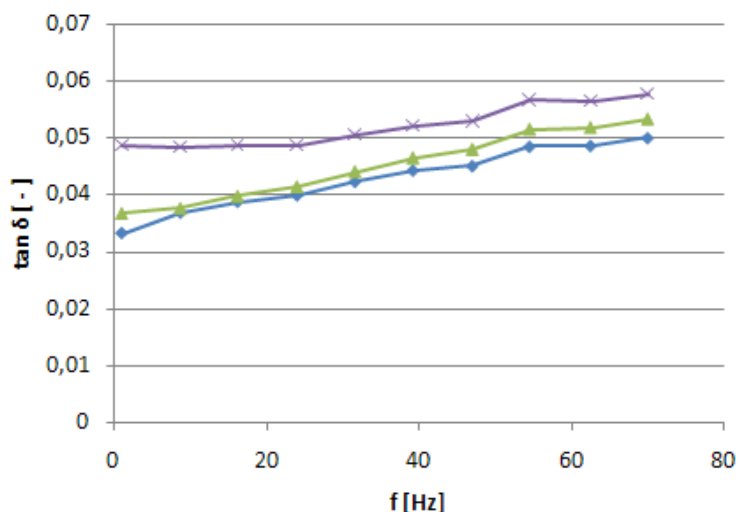
Obr. 39 Grafická závislost napětí v ohybu na frekvenci při konstantní teplotě vzorku rámu 1



Obr. 40 Grafická závislost reálné složky komplexního modulu pružnosti na frekvenci při konstantní teplotě vzorku rámu 1



Obr. 41 Grafická závislost imaginární složky komplexního modulu pružnosti na frekvenci při konstantní teplotě vzorku rámu 1



Obr. 42 Grafická závislost ztrátového činitele na frekvenci a při konstantní teplotě vzorku rámu 1

#### • Vzorek rámu 2

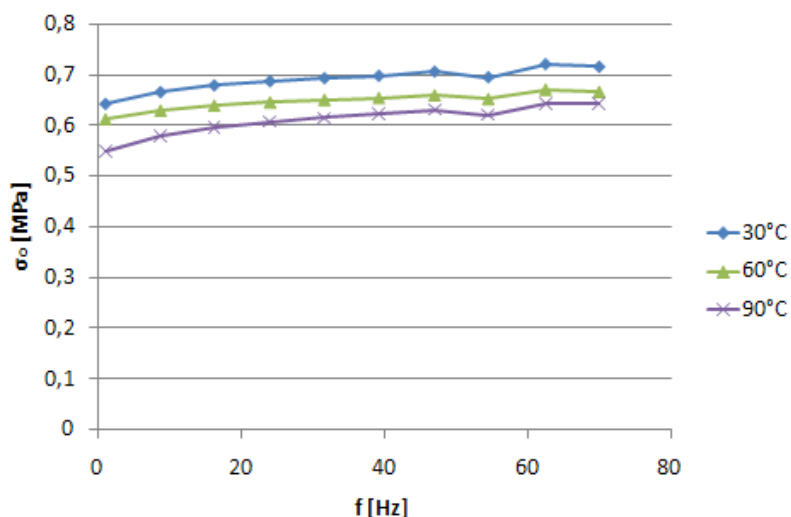
Z důvodu nejnížší koncentrace vyztužujících vláken ze všech tří dostupných vzorků (11%) byly mechanické vlastnosti očekávány podprůměrné, což se potvrdilo.

Napětí v ohybu při frekvenci 70Hz bylo při 30°C je  $\sigma_o(30^\circ\text{C}) = 0,71 \text{ MPa}$ , pro 60°C je  $\sigma_o(60^\circ\text{C}) = 0,67 \text{ MPa}$  a pro nejvyšší teplotu 90°C je  $\sigma_o(90^\circ\text{C}) = 0,64 \text{ MPa}$ , viz obr 43.

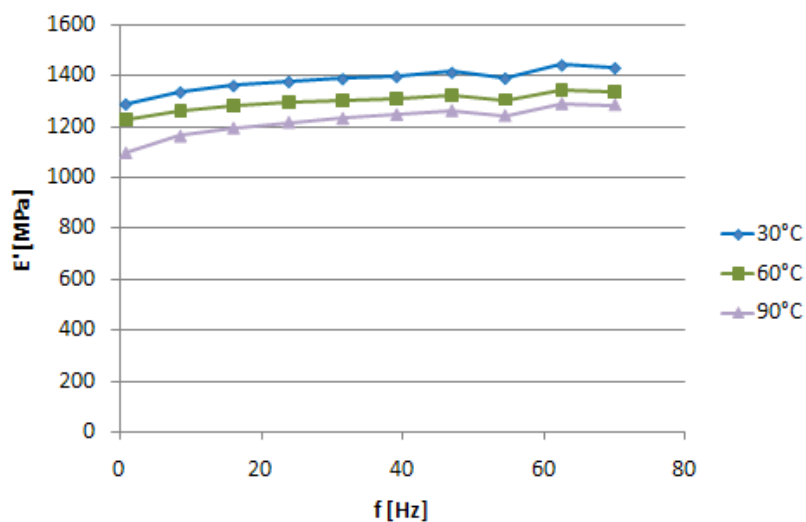
Modul pružnosti, respektive jeho reálná složka při frekvenci 70 Hz a teplotě 30 °C je  $E'(30^\circ\text{C}) = 1431 \text{ MPa}$ , pro 60 °C je  $E'(60^\circ\text{C}) = 1334 \text{ MPa}$  a pro nejvyšší teplotu 90 °C je  $E'(90^\circ\text{C}) = 1286 \text{ MPa}$ , viz obr 44.

Imaginární složka modulu pružnosti byla při 70 Hz zjištěna řádově pouze v desítkách meapascalů. Při teplotě okolí bylo naměřeno  $E''(30^\circ\text{C}) = 84 \text{ MPa}$ ,  $E''(60^\circ\text{C}) = 78 \text{ MPa}$  a pro nejvyšší teplotu  $E''(90^\circ\text{C}) = 89 \text{ MPa}$ , viz obr. 45.

Ztrátový činitel při frekvenci 70 Hz zatížení nabýval pro dané teplotní zatížení hodnoty  $\tan \delta(30^\circ\text{C}) = 0,0578$ ,  $\tan \delta(60^\circ\text{C}) = 0,0643$  a  $\tan \delta(90^\circ\text{C}) = 0,0805$ , viz obr. 46.

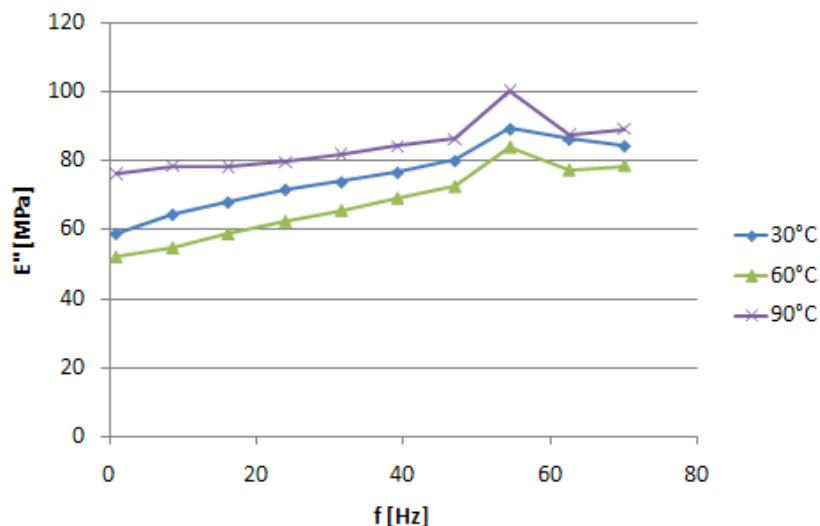


Obr 43 Grafická závislost napětí v ohybu na frekvenci při konstantní teplotě vzorku rámu 2

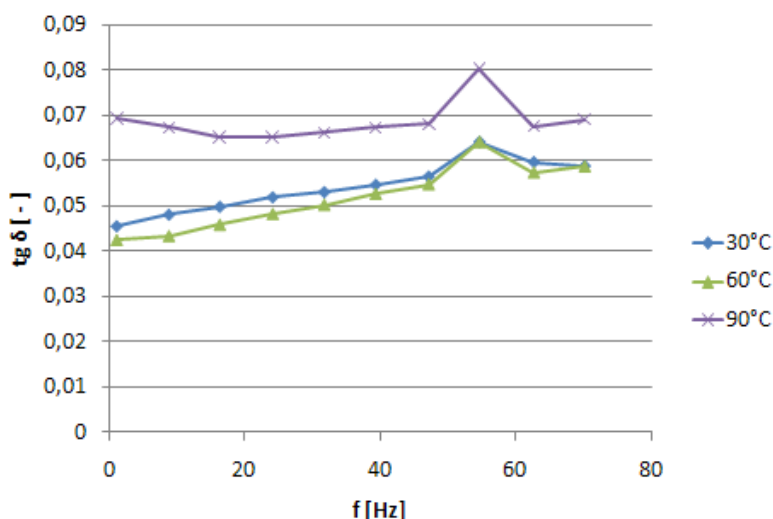


Obr 44 Grafická závislost reálné složky komplexního modulu pružnosti na frekvenci při konstantní teplotě vzorku rámu 2





Obr 45 Grafická závislost imaginární složky komplexního modulu pružnosti na frekvenci při konstantní teplotě vzorku rámu 2



Obr 46 Grafická závislost ztrátového činitele na frekvenci a teplotě vzorku rámu 2

### • Vzorek rámu 3

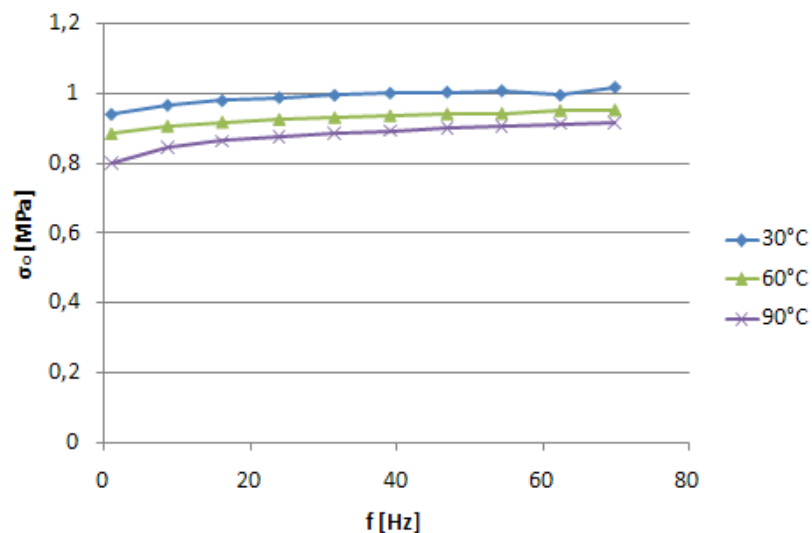
U vzorku rámu 3 s objemovým zastoupením vláken 23 % leží jeho hodnoty mechanických vlastností mezi oběma předchozími vzorky.

Napětí v ohybu bylo při frekvenci 70 Hz zjištěno  $\sigma_o(30^\circ\text{C}) = 1,01 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_o(60^\circ\text{C}) = 0,95 \text{ MPa}$  a pro nejvyšší teplotu  $\sigma_o(90^\circ\text{C}) = 0,92 \text{ MPa}$ , viz obr 47.

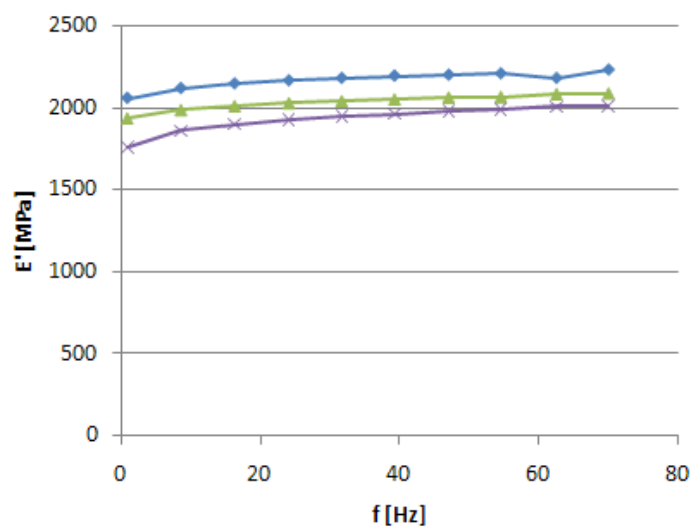
Maximum modulu pružnosti při frekvenci 70 Hz nalezneme při nejnižší teplotě  $E'(30^\circ\text{C}) = 2227 \text{ MPa}$ ,  $E'(60^\circ\text{C}) = 2088 \text{ MPa}$  a pro nejvyšší teplotu  $E'(90^\circ\text{C}) = 2009 \text{ MPa}$ , viz obr. 48.

Hodnoty imaginární složky modulu pružnosti (viz obr. 49) byly zjištěny  $E''(30^\circ\text{C}) = 130 \text{ MPa}$ ,  $E''(60^\circ\text{C}) = 139 \text{ MPa}$  a  $E''(90^\circ\text{C}) = 0,91 \text{ MPa}$

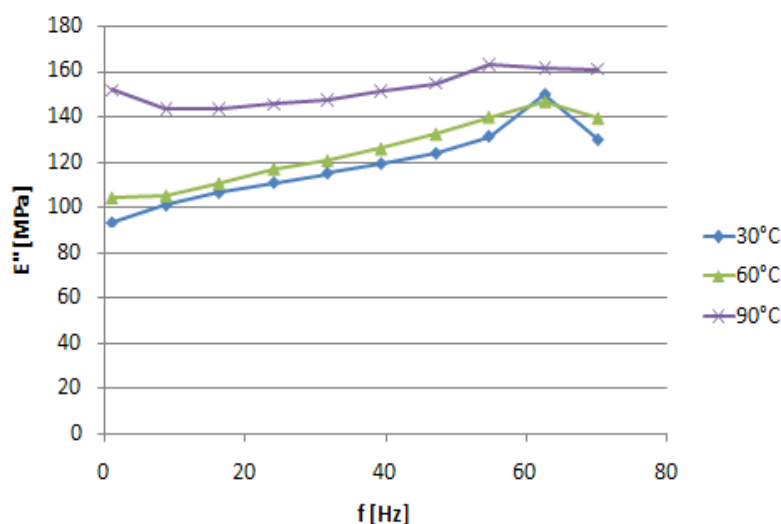
Ztrátový činitel při frekvenci 70 Hz byl odečten následující:  $\tan \delta(30^\circ\text{C}) = 0,0648$ ,  $\tan \delta(60^\circ\text{C}) = 0,0665$  a  $\tan \delta(90^\circ\text{C}) = 0,0799$ , viz obr 50.



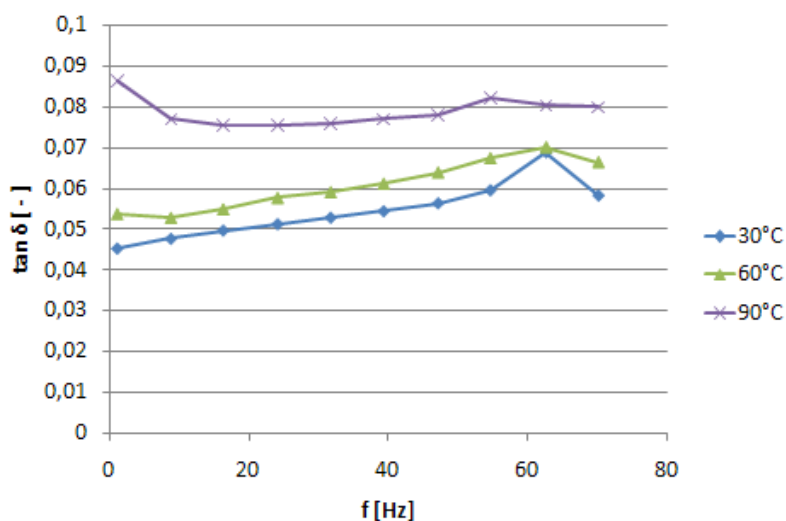
Obr 47 Grafická závislost napětí v ohybu na frekvenci při konstantní teplotě vzorku rámu 3



Obr. 48 Grafická závislost reálné složky komplexního modulu pružnosti na frekvenci při konstantní teplotě vzorku rámu 3



Obr. 49 Grafická závislost imaginární složky komplexního modulu pružnosti na frekvenci při konstantní teplotě vzorku rámu 3



Obr 50 Grafická závislost ztrátového činitele na frekvenci a teplotě vzorku rámu 3

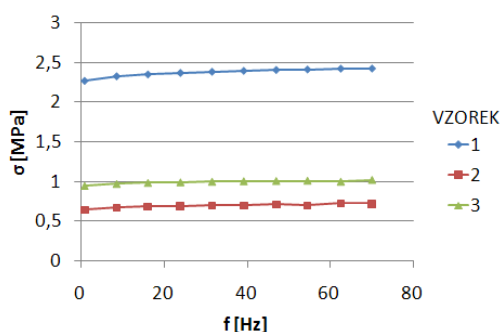
### • Diskuze výsledků

V tab. 4 je uvedeno objemové procento vláken v jednotlivých vzorcích. Nejvyšší procento výztuže skelných vláken obsahuje vzorek č. 1 (35 %), dále č. 3 (23 %) a nejméně č. 2 (11 %). Od vzorku s nejvyšším zastoupením vyztužující fáze bylo očekáváno, že bude v porovnání s ostatními vykazovat nejvyšší mechanické vlastnosti, což experiment potvrdil. Mechanické vlastnosti tedy klesají se snižujícím se procentem výztuže. To je graficky znázorněno na obr. 51 až obr. 54 na příkladu teploty 30 °C.

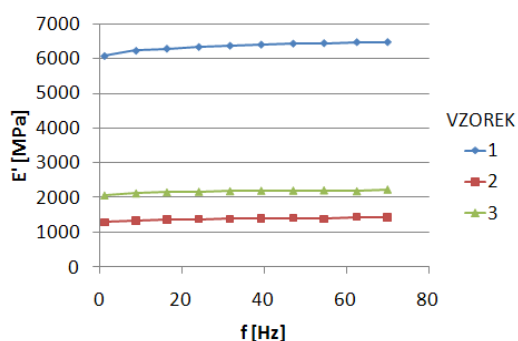
Rozdíl hodnot vyjádřený procentuálně je uveden v tab. 5. V případě, že naměřené veličiny vzorku kompozitního rámu 1 budou brány za referenční,

tedy 100 %, lze pozorovat, že mechanické vlastnosti rámu 2 se pohybují kolem 25 % velikosti hodnot změřených pro první variantu. Pro třetí variantu rámu se hodnoty mechanických vlastností pohybují kolem 38 %.

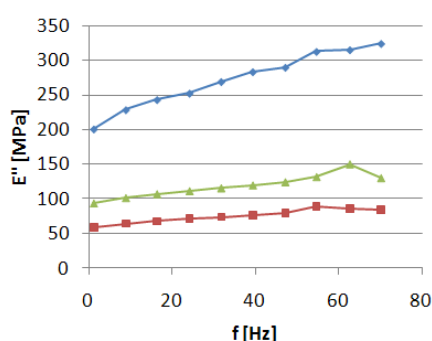
Další závěr, který lze z této části měření vyvodit vychází z hodnot graficky znázorněných na obr. 54. Ten znázorňuje průběh koeficientu tlumení v závislosti na frekvenci zatížení opět pro všechny typy vzorků pro vybranou teplotu 30 °C. Hodnota koeficientu tlumení byla předpokládána nejvyšší pro vzorek 2 s nejmenším poměrem výztuže. Hodnoty koeficientu tlumení vzorků č. 2 a 3 se však převážně překrývají i přes to, že hodnoty mechanických vlastností vzorku č. 2 dosahují zhruba 60 % hodnot vzorku č. 3. Znamená to, že při dané teplotě je imaginární část komplexně sdruženého modulu obou materiálů při teplotě 30 °C a frekvenci 70 Hz pootočená oproti reálné o stejný úhel posunutí.



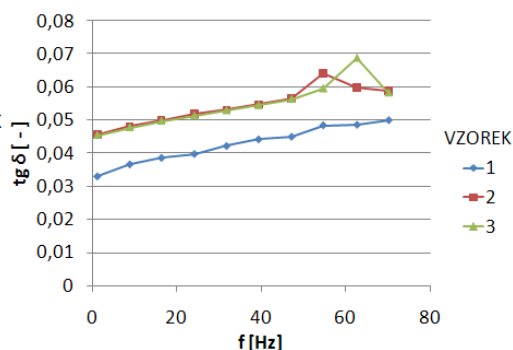
Obr. 51 Grafické znázornění průběhu napětí všech vzorků v závislosti na frekvenci a teplotě 30°C



Obr. 52 Grafické znázornění reálné složky komplexního modulu pružnosti všech vzorků při teplotě 30°C



Obr. 53 Grafické znázornění imaginární složky modulu pružnosti v závislosti na frekvenci a teplotě 30°C.



Obr. 54 Grafické znázornění průběhu složky koeficientu tlumení použitých vzorků v závislosti a frekvenci p při teplotě 30°C

Tab. 5 Hodnoty změřené při frekvenci 70 Hz a teplotě 30 °C

| Teplota | Vzorek              | 1      |      | 2      |        | 3      |        |
|---------|---------------------|--------|------|--------|--------|--------|--------|
| 30      | $\sigma_0$ [MPa]    | 2,42   | 100% | 0,71   | 29,3%  | 1,02   | 42,1%  |
|         | $E'$ [MPa]          | 6476   | 100% | 1431   | 22,1%  | 2227   | 34,4%  |
|         | $E''$ [MPa]         | 348    | 100% | 84     | 24,1%  | 130    | 37,4%  |
|         | $\tan \delta$ [ - ] | 0,0500 | 100% | 0,0589 | 117,8% | 0,0584 | 116,8% |
| 60      | $\sigma_0$ [MPa]    | 2,29   | 100% | 0,67   | 29,3%  | 0,95   | 41,5%  |
|         | $E'$ [MPa]          | 6149   | 100% | 1333   | 21,6%  | 2087   | 33,9%  |
|         | $E''$ [MPa]         | 327    | 100% | 78     | 23,9%  | 138    | 42,2%  |
|         | $\tan \delta$ [ - ] | 0,0532 | 100% | 0,0588 | 110,5% | 0,0665 | 125%   |
| 90      | $\sigma_0$ [MPa]    | 2,28   | 100% | 0,64   | 28,0%  | 0,92   | 40,4%  |
|         | $E'$ [MPa]          | 6106   | 100% | 1286   | 21,1%  | 2009   | 29,9%  |
|         | $E''$ [MPa]         | 351    | 100% | 89     | 25,4%  | 160    | 45,6%  |
|         | $\tan \delta$ [ - ] | 0,0576 | 100% | 0,0693 | 120,3% | 0,0799 | 138,7% |

### 3.2.4 Dynamické namáhání konstantní frekvencí za proměnné teploty.

Zkoumaný kompozitní systém byl vystaven namáhání tříbodovým ohybem v teplotním intervalu (30-150) °C tak, aby byla v teplotním rozsahu zahrnutá i teplota tvarové stálosti HDT, kterou výrobce v materiálovém listu udává na 110 °C. Dynamické namáhání je reprezentováno třemi frekvencemi 20 Hz, 40 Hz a 60 Hz. Cílem zkoušky je prověřit vztah mezi rychlostí zatěžování a mechanickými vlastnostmi materiálu a také ověřit, jakým způsobem se projeví přechod teploty tvarové stálosti na charakteru křivek modulu pružnosti, popřípadě ztrátového čísla.

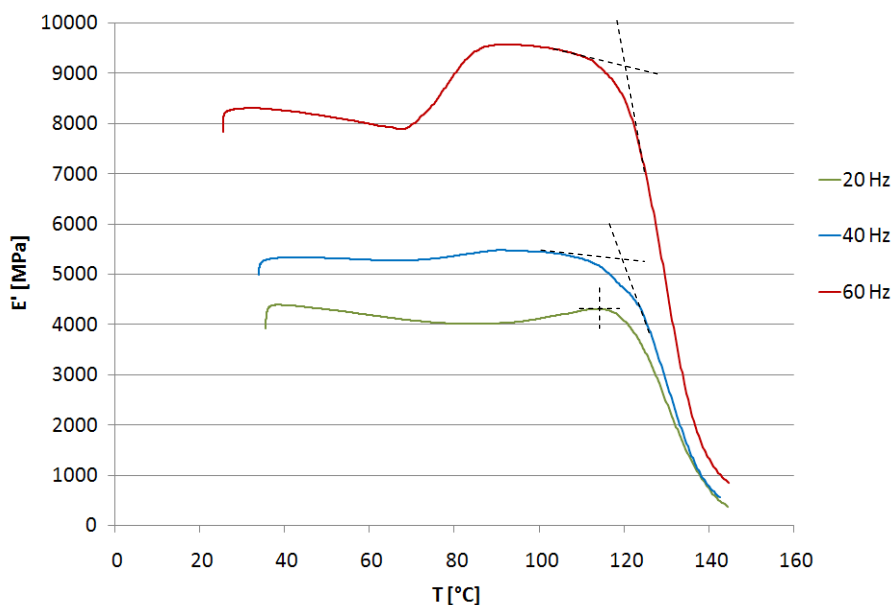
Vzorek byl deformován amplitudou 10  $\mu\text{m}$  s rychlostí ohřevu 5 °C.min<sup>-1</sup>.

#### • Vzorek rámu 1

Vzhledem k vyšší koncentraci vláken (35 %) byly od prvního vzorku očekávány vyšší hodnoty modulu pružnosti než od ostatních. Průběh reálné složky modulu pružnosti v závislosti na teplotě je zobrazen obr. 55, na kterém lze demonstrovat zvyšující se hodnoty modulu pružnosti se zvyšující se frekvencí. Dále lze pozorovat, že křivky dosahují svého lokálního maxima v oblasti teploty zesklenní, která je na

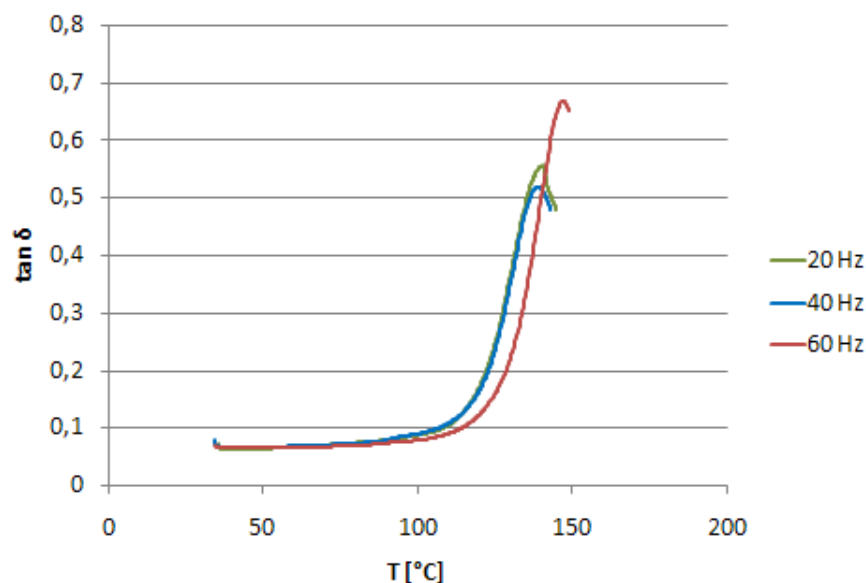
obrázku určena průsečíkem tečen částí křivek závislosti reálné složky modulu pružnosti na teplotě. Teplota zesklenní se pohybuje v oblasti teploty tvarové stálosti HDT (110 °C). Její hodnota je však ovlivněna frekvencí zatěžování. S rostoucí frekvencí se teplota zesklenní zvyšuje.

Z obr. 55 při frekvenci 60 Hz byla odečtena hodnoty teploty zesklenní 120 °C. Pro zatěžovací rychlost 40 Hz je tato teplota rovna 113 °C a při zatěžování 20 Hz byla zjištěna teplota 112 °C.



Obr. 55 Grafické znázornění průběhu reálné složky modulu pružnosti v závislosti na teplotě a frekvenci vzorku rámu 1

Z grafické závislosti ztrátového činitele na teplotě a frekvenci zatěžování, (viz obr. 56) je vidět, že hodnota ztrátového součinitele se prudce zvyšuje v okolí teploty zesklenní, což je logické, protože reálná složka modulu pružnosti zde prudce klesá a imaginární složka modulu pružnosti naopak stoupá. Se vzrůstající teplotou se tedy ztráty zvyšují, v oblasti teploty zesklenní dochází ke skokovým změnám. Vlivem snižující se teploty zesklenní s frekvencí zatěžování se křivka ztrátového součinitele při frekvenci 40 Hz láme k vyšším hodnotám dříve, než křivka získaná při 60 Hz a křivka při 20 Hz dříve než při 40 Hz.



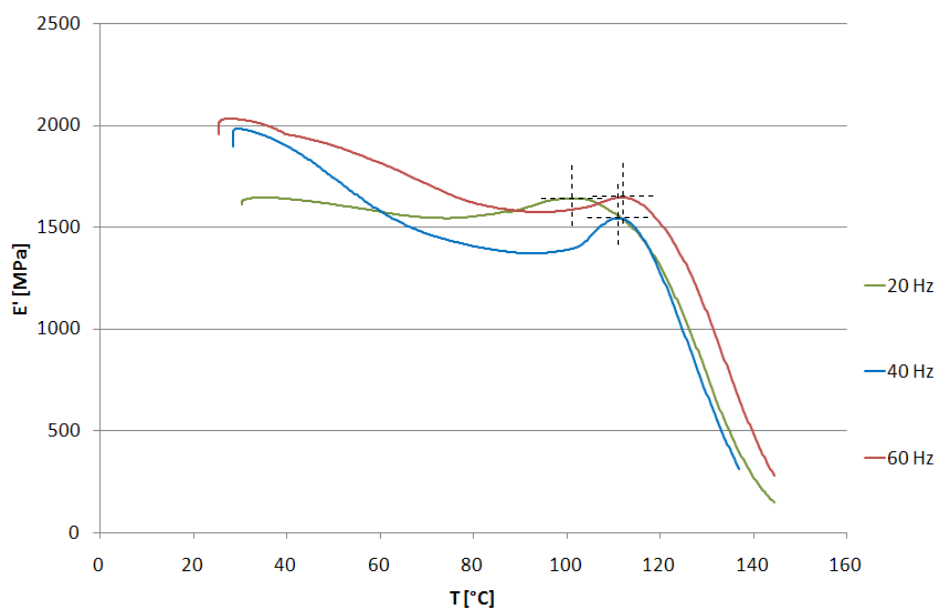
Obr. 56 Průběh ztrátového součinitele  $\tan \delta$  v závislosti na teplotě a frekvenci pro vzorek rámu 1

#### • Vzorek rámu 2

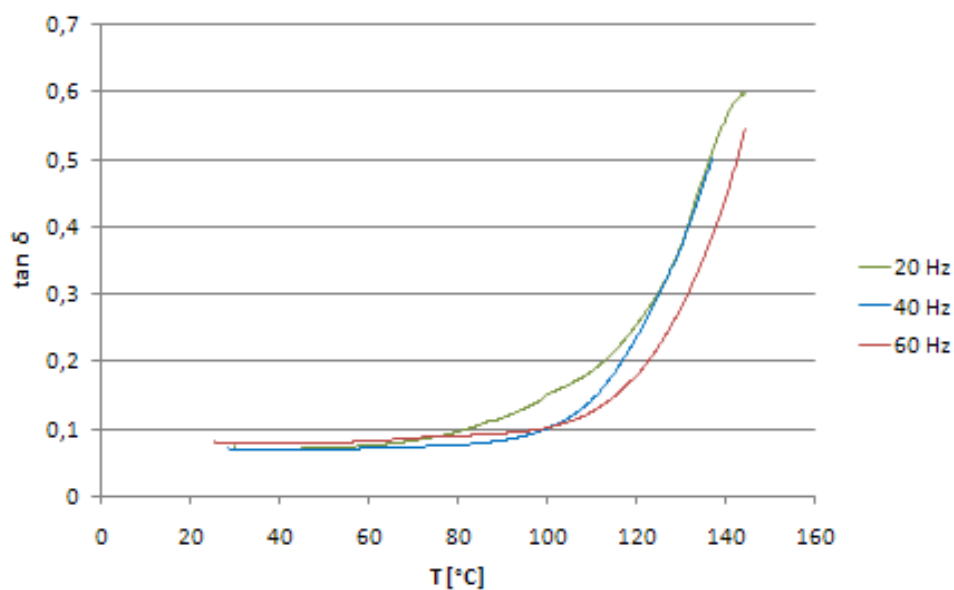
Vzorek rámu 2 je vyztužen pouze 11 % skelných vláken. Bylo tedy potvrzeno, že mechanické vlastnosti jsou nejnižší ze všech tří kompozitních systémů. Pravděpodobně z důvodu nepravidelného rozložení vláken byla při měření zatěžující frekvencí 20 Hz zaznamenána odchylka oproti očekávané tendenci, kdy hodnota reálného modulu pružnosti se měla vzhledem k hodnotám zjištěným při vyšších zatěžujících frekvencích nacházet pod úrovní ca 1500 MPa. Pravděpodobný důvod tohoto jevu spočívá v chybě během výrobní etapy, kdy došlo ke skluzu vláken a jejich nahromadění v místě odběru vzorku sloužícího pro dané měření

Při frekvenci zatěžování 60 Hz byla zaznamenána teplota zesklenní 112 °C. Pro frekvenci 40 Hz je přechodová teplota 110 °C. Při zatěžování 20 Hz byla přechodová teplota zjištěna 102 °C, viz obr. 57

Podobně, jako modul pružnosti, tak i ztrátový součinitel zatěžovací charakteristiky při frekvenci 20 Hz vykazuje odlišnosti oproti čekané tendenci (viz obr. 58). Pod i nad teplotou zesklenní by měl ležet mezi oběma křivkami. Charakteristika pro 40 Hz a pro 60 Hz očekávání naplnila, pod teplotou zesklenní jsou výraznější ztráty při vyšší frekvenci zatěžování, nad přechodovou teplotou jsou ztráty u rychlosti 40 Hz menší, protože teplota zesklenní se při nižší rychlosti posouvá k nižším hodnotám, ztráty zaznamenají růst dříve.



Obr. 57 Průběh reálné složky modulu pružnosti v závislosti na teplotě a zatěžující frekvenci pro vzorek rámu 2



Obr. 58 Průběh ztrátového součinitele  $\tan \delta$  vzorku rámu 2 v závislosti na teplotě a frekvenci zatěžování

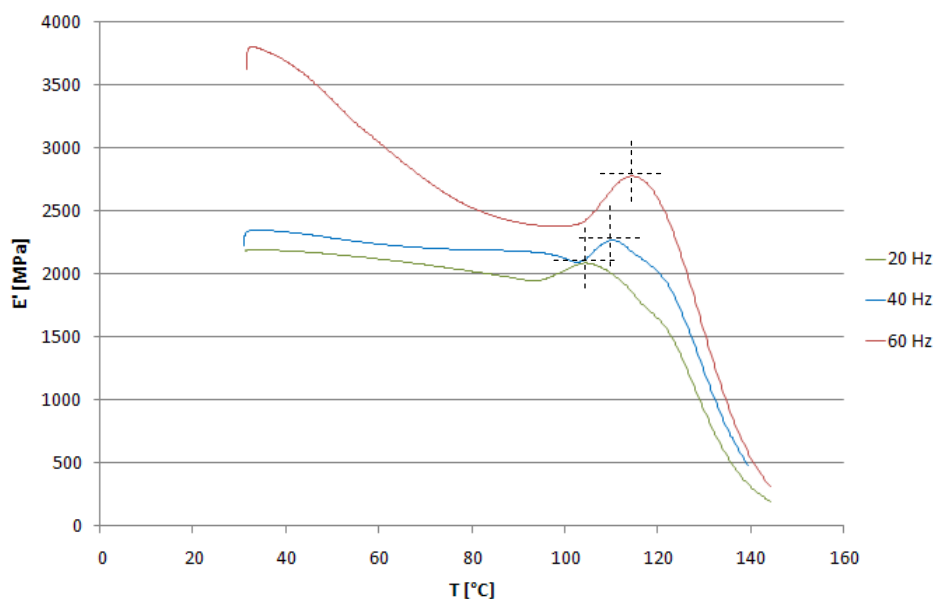
### • Vzorek rámu 3

U rámu 3 jsou očekávány střední hodnoty mechanických vlastností oproti předchozím dvěma, vzhledem k jeho průměrnému obsahu vyztužujících skleněných vláken.

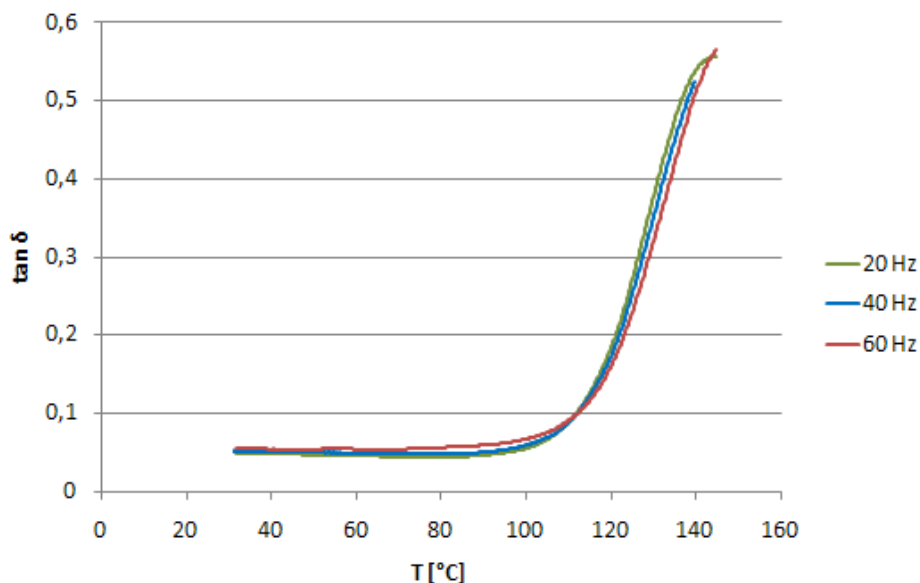


Při zatěžující frekvenci 20 Hz byla zjištěna teplota zesklenní 104 °C, dále při frekvenci 40 Hz byla teplota zesklenní nalezena při 110 °C a při nejvyšší frekvenci byla teplota zesklenní naměřena při 114 °C, viz obr. 59, tedy nejvyšší hodnota přechodové teploty je zaznamenána pro nejvyšší frekvenci zatěžování a naopak.

Na obr. 60 je ukázán průběh ztrátového činitele. Pod přechodovou teplotou jsou nejnižší ztráty při nejnižší frekvenci a naopak. V oblasti přechodové teploty nabývají na hodnotě a maxima dosahují v okolí maxima imaginární složky modulu pružnosti.



Obr. 59 Průběh reálné složky modulu pružnosti v závislosti na teplotě a frekvenci zatěžování pro vzorek rámu 3



Obr. 60 Ztrátový součinitel  $\tan \delta$  v závislosti na teplotě a frekvenci vzorku rámu 3

- **Diskuze výsledků měření dynamickým namáháním za zvyšující se teploty**

V této kapitole bylo popsáno měření odezvy kompozitního systému na vnější dynamické namáhání. Byl zvolen způsob měření při konstantní frekvenci a plynule se zvyšující teplotě. Z experimentálního měření bylo zjištěno, že čím vyšší dynamické namáhání (frekvence) je, tím vyšší je naměřená odezva mechanických vlastností: reálné i imaginární složky modulu pružnosti, napětové odezvy vybuzečné vnější silou i ztrátového činitele. Ztrátový činitel vykazuje v místě přechodové teploty zlom a jeho hodnoty se prudce zvyšují. Dále bylo zjištěno, že přechodová teplota se zvyšuje se zvyšující se frekvencí zatěžování.

Měřením ztrátového činitele byla ověřena teorie, která říká, že ztráty s teplotou a frekvencí zatěžování rostou. S frekvencí zatěžování roste i přechodová teplota, což má za následek, že se křivky závislosti ztrátového činitele na teplotě a frekvenci protínají a nad teplotou zesklenní při jedné teplotě vykazuje vyšší ztráty nižší frekvence.

V tab. 5 jsou uvedeny pouze hodnoty reálné a imaginární složky modulu pružnosti odečtené při teplotě zesklenní, v závislosti na frekvenci a obsahu skleněné výztuže. Čím vyšší je objemové zastoupení výztuže, tím vyšší hodnotu teploty zesklenní kompozit vykazuje. Obě složky komplexního modulu pružnosti mají také zvyšující se tendenci. Vzorek kompozitního rámu č. 1, který je vyztužen 35 % skleněných vláken má přechodovou teplotu nejvyšší ze všech zkoušených kompozitních systémů a i odpovídající moduly pružnosti odečtené na této teplotě převyšují hodnoty ostatních kompozitních systémů.

Tab. 5 Přehled teplot zesklenní a základních mechanických vlastností

| Vzorek       | 1                   |          |           | 2                   |          |           | 3                   |          |           |
|--------------|---------------------|----------|-----------|---------------------|----------|-----------|---------------------|----------|-----------|
| Objem vláken | 35 %                |          |           | 11 %                |          |           | 23 %                |          |           |
| f<br>[Hz]    | T <sub>g</sub> [°C] | E' [MPa] | E'' [MPa] | T <sub>g</sub> [°C] | E' [MPa] | E'' [MPa] | T <sub>g</sub> [°C] | E' [MPa] | E'' [MPa] |
| 20           | 112                 | 4308     | 502       | 102                 | 1638     | 258       | 104                 | 2089     | 153       |
| 40           | 113                 | 9210     | 634       | 110                 | 1541     | 155       | 110                 | 2266     | 208       |
| 60           | 120                 | 9394     | 1687      | 112                 | 1646     | 199       | 114                 | 2779     | 318       |

### 3.2.5 Statické namáhání za konstantního zatížení – kríp

Pro odlišení statického namáhání od dynamického byla jako jedna ze dvou zkoušek vybrána zkouška krátkodobého krípu, která má za cíl porovnat hodnoty krípuvého modulu mezi jednotlivými kompozitními vzorky s různým procentuálním zastoupením vyztužujících vláken.

Zkouška probíhala za zvýšené teploty, konkrétně 80 °C. Před vlastním zkoušením vzorků byly tyto izotermicky ohřívány po dobu pěti minut. Zkušební vzorky odebrané ze všech tří rámců byly namáhány konstantním ohybovým napětím ve tříbodovém uspořádání v poloze na plocho tak, aby bylo dosaženo hodnot ohybového napětí (1-4) MPa. Během zatěžování, které trvalo vždy 60 min, byly zaznamenány průběhy průhybu zkušebních těles v závislosti na čase (krípkové křivky), ze kterých byly následně sestaveny izochronní křivky pro stanovení krípkového modulu  $E_c$  [MPa], který má sloužit pro porovnání náchylnosti jednotlivých typů výrobku ke krátkodobému tečení pod napětím.

Rozsah ohybového napětí byl zvolen záměrně tak, aby i vzorek s největším průřezem po vystavení zatížení nepřekonal hranici síly 18 N, která je u tohoto typu zařízení (DMA Q800) limitující. Kontrolní výpočet byl proveden na základě rozměrů zkušebních těles (viz tab. 6) přes známý vztah pro stanovení napětí v ohybu podle rovnice (76).

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{\frac{F \cdot l}{\frac{2 \cdot 2}{2}}}{\frac{b \cdot h^3}{6}} \Rightarrow F = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_o \cdot b \cdot h^3}{l} \quad (76)$$

Tab. 6 Maximální rozměry zkoušeného vzorku

| Tloušťka<br>vzorku<br>b [mm] | Šířka<br>vzorku<br>h [mm] | Maximální<br>síla<br>zařízení<br>F [N] | Vzdálenost<br>podpor<br>l [mm] | Působící<br>napětí<br>$\sigma_o$ [MPa] |
|------------------------------|---------------------------|----------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|
| 10,10                        | 3,52                      | 18,00                                  | 20,00                          | 4,32                                   |

Zařízení DMA má nativně nastaveno vzorkování signálu, měřené veličiny tedy odečítá v konkrétních časech. Z těchto časů byly pro odečtení hodnoty deformace vybrány následující čtyři, viz tab. 7.

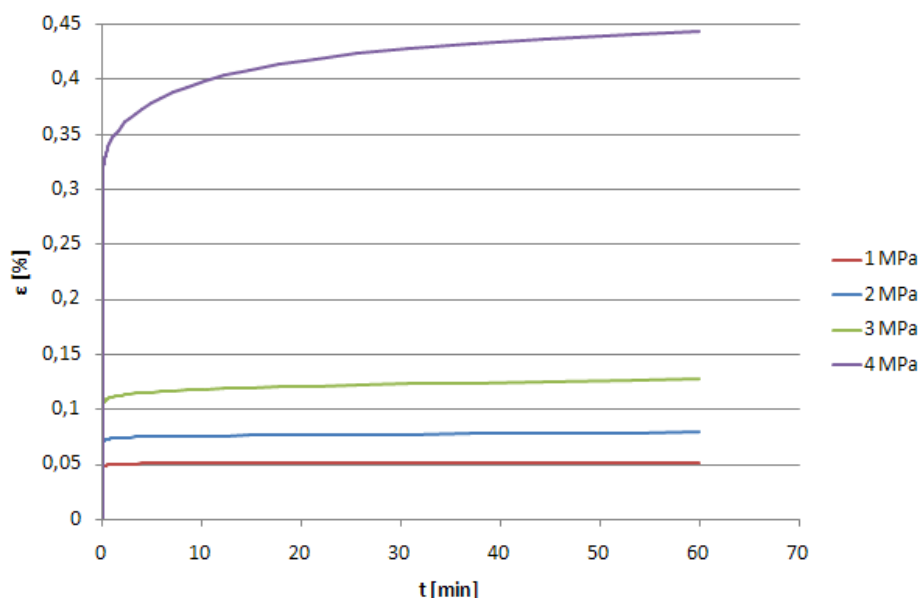
Tab. 7 Časy odečítání deformace zkoušeného vzorku

| $t_1$<br>[min] | $t_2$<br>[min] | $t_3$ [min] | $t_4$ [min] |
|----------------|----------------|-------------|-------------|
| 5,8            | 21,3           | 44,3        | 60,0        |

#### • Vzorek rámu 1

Jak bylo uvedeno dříve, pro měření krátkodobého tečení byly zvoleny čtyři zatěžovací režimy, tedy i čtyři vzorky. Zkušební tělesa byla vystavena zmíněnému namáhání a sledována byla okamžitá elastická deformace a plastická deformace po ukončení zatěžovacího cyklu v čase 60 min.

Jelikož rám 1 má nejvyšší objemové procento výztuže (35 %), je předpoklad, že hodnocená zkušební tělíska budou vykazovat nejmenší náchylnost na tečení za studena. Grafické záznamy krípvých a izochronních křivek jsou uvedeny na obr. 61 a 62.

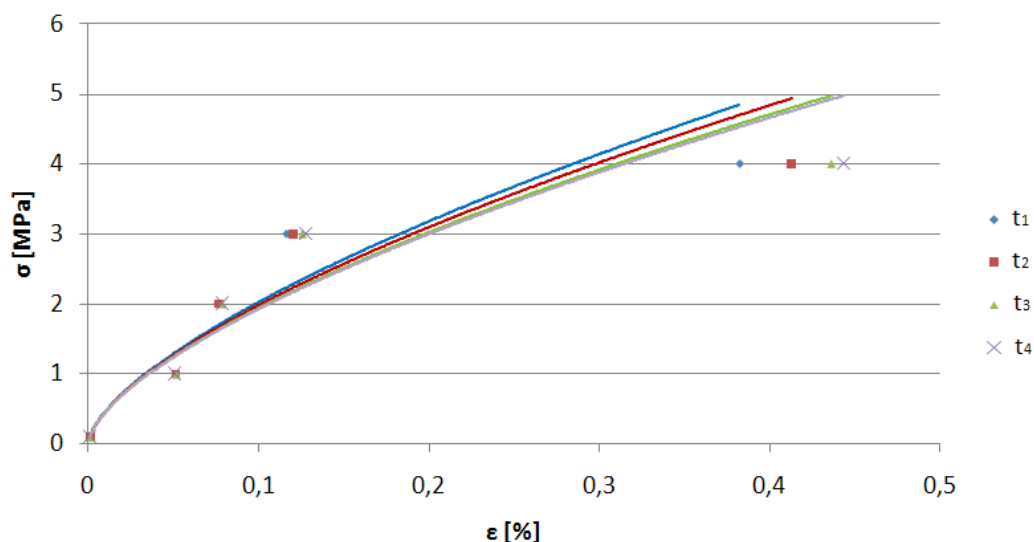


Obr. 61 Krípvé křivky rámu 1

Tab 8. Výsledné deformace a krípvé moduly odečtené při zkoušce vzorku rámu 1

| $\sigma$ [MPa] | t [min]        | $t_1=5,8$ min | $t_2=21,3$ min | $t_3=44,3$ min | $t_4=60,0$ min |
|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| 1              | $\epsilon$ [%] | 0,051         | 0,051          | 0,051          | 0,051          |
|                | $E_c$ [MPa]    | 1979          | 1973           | 1969           | 1962           |
| 2              | $\epsilon$ [%] | 0,075         | 0,076          | 0,078          | 0,079          |
|                | $E_c$ [MPa]    | 2665          | 2626           | 2566           | 2533           |
| 3              | $\epsilon$ [%] | 0,116         | 0,120          | 0,125          | 0,128          |
|                | $E_c$ [MPa]    | 2591          | 2504           | 2396           | 2350           |
| 4              | $\epsilon$ [%] | 0,383         | 0,413          | 0,437          | 0,444          |
|                | $E_c$ [MPa]    | 1046          | 968            | 916            | 901            |

V tabulce 8 jsou zaznamenány výsledky krípvé zkoušky, respektive hodnot deformace vzorků ve vybraných časech  $t_1$  -  $t_4$ . Je patrné, že se zvyšujícím se napětím se zvyšuje rozdíl deformace mezi elastickou oblastí a oblastí krípu, tedy deformace způsobená tečením.



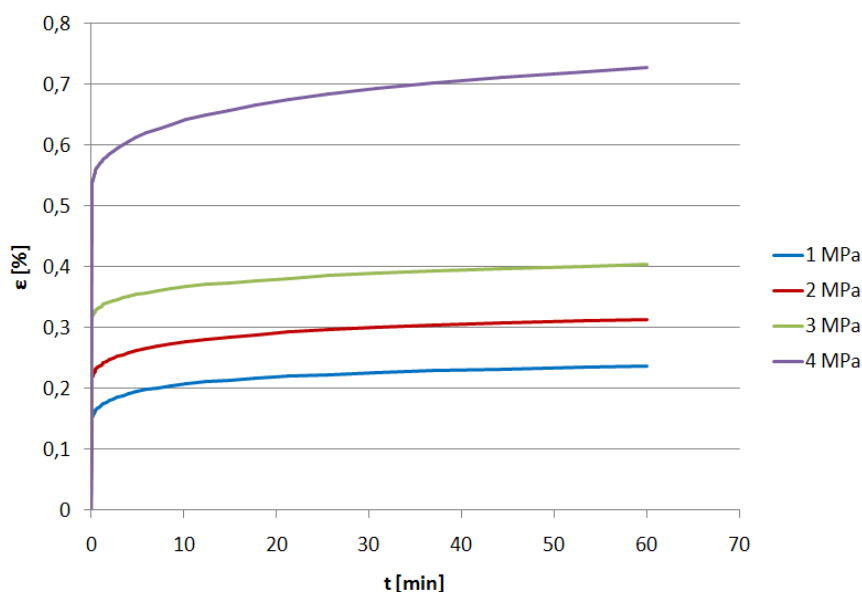
Obr. 62 Izochronní křivky rámu 1

### • Vzorek rámu 2

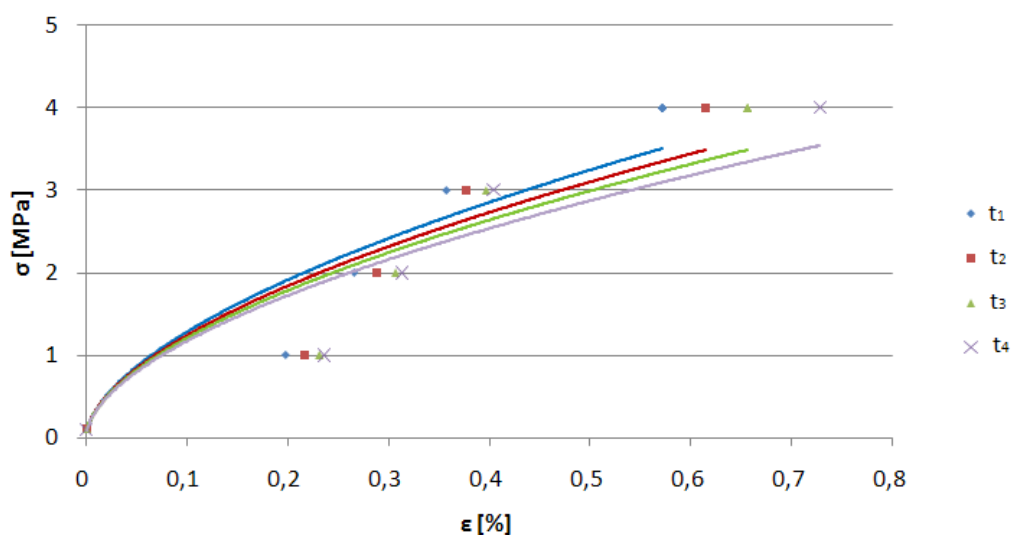
Druhý rám má nejmenší procentuální obsah plniva (11 %), a i jeho krátkodobý modul pružnosti bude nízký. Lze předpokládat největší náchylnost k tečení za studena ze všech testovaných kompozitních systémů. Deformace vzorku by při stejných zatěžovacích podmínkách měla být větší než u ostatních rámu a krípový modul by naopak měl být nejmenší. Naměřené krípové křivky a z nich sestavené izochronní křivky jsou uvedeny na obr. 63 a 64. Vzorek rámu 2 vykazoval při největším ohybovém napětí v čase 60 min deformaci 0,728 % (viz tab. 9), což je o ca 60 %, než bylo naměřeno u vzorku rámu 1. Krípový modul pružnosti (550 MPa) je za stejných podmínek o ca 40 % nižší.

Tab. 9 Výsledné deformace a krípové moduly naměřené pro vzorky rámu 2

| $\sigma$ [MPa] | $t$ [min]      | $t_1=5,8$ min | $t_2=21,3$ min | $t_3=44,3$ min | $t_4=60,0$ min |
|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| 1              | $\epsilon$ [%] | 0,198         | 0,217          | 0,232          | 0,236          |
|                | $E_c$ [MPa]    | 505           | 460            | 432            | 423            |
| 2              | $\epsilon$ [%] | 0,266         | 0,289          | 0,307          | 0,313          |
|                | $E_c$ [MPa]    | 751           | 693            | 651            | 638            |
| 3              | $\epsilon$ [%] | 0,358         | 0,378          | 0,397          | 0,404          |
|                | $E_c$ [MPa]    | 838           | 794            | 755            | 742            |
| 4              | $\epsilon$ [%] | 0,572         | 0,615          | 0,657          | 0,728          |
|                | $E_c$ [MPa]    | 699           | 651            | 609            | 550            |



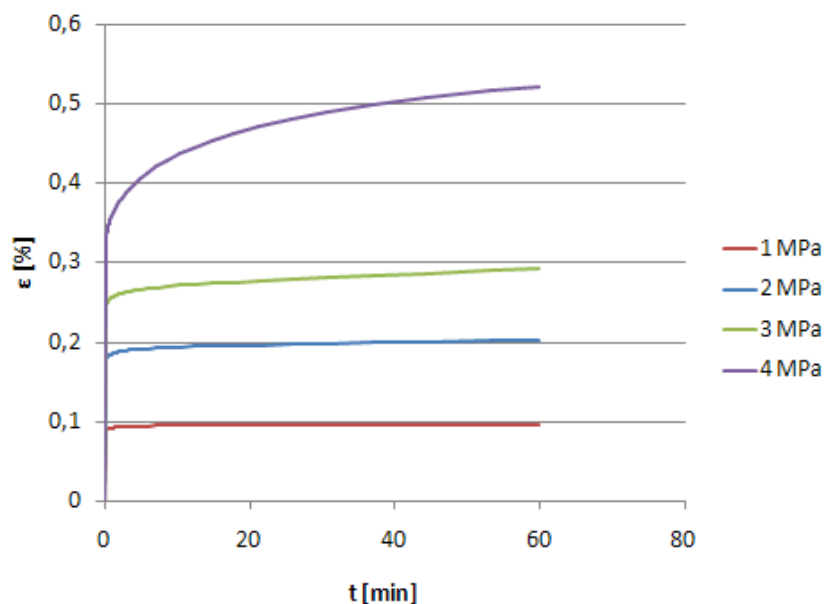
Obr. 63 Kríповé křivky rámu 2



Obr. 64 Izochronní křivky rámu 2

### • Vzorek rámu 3

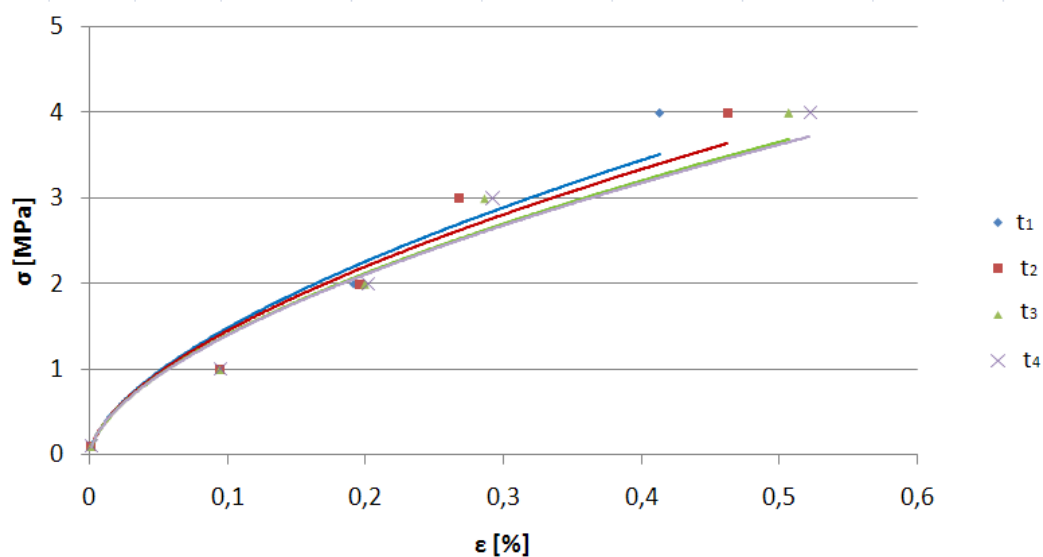
Rám číslo 3 má objemové procento vláken 23 %, tudíž se od něj očekávají hodnoty mechanických vlastností, které budou ležet někde mezi naměřenými hodnotami pro vzorky rámu 1 a 2. Vzorky rámu 3 nebudou náchylné k tečení tak jako vzorky rámu 2 a hodnoty kríповého modulu budou nižší než u vzorků z rámu 1. Tato skutečnost je potvrzena výsledky kríповých zkoušek na obr. 65 a 66. Výsledné hodnoty měření jsou zaznamenány v tab. 10.



Obr. 65 Kríkové křivky rámu 3

Tab. 10 Výsledné deformace a kríkové moduly naměřené pro vzorky rámu 3

| $\sigma$ [MPa] | t [min]           | $t_1=5,8$ min | $t_2=21,3$ min | $t_3=44,3$ min | $t_4=60,0$ min |
|----------------|-------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| 1              | $\varepsilon$ [%] | 0,094         | 0,094          | 0,094          | 0,094          |
|                | $E_c$ [MPa]       | 1061          | 1060           | 1059           | 1059           |
| 2              | $\varepsilon$ [%] | 0,192         | 0,195          | 0,200          | 0,202          |
|                | $E_c$ [MPa]       | 1044          | 1024           | 1002           | 991            |
| 3              | $\varepsilon$ [%] | 0,267         | 0,275          | 0,286          | 0,292          |
|                | $E_c$ [MPa]       | 1122          | 1090           | 1048           | 1029           |
| 4              | $\varepsilon$ [%] | 0,413         | 0,462          | 0,507          | 0,522          |
|                | $E_c$ [MPa]       | 968           | 865            | 789            | 767            |



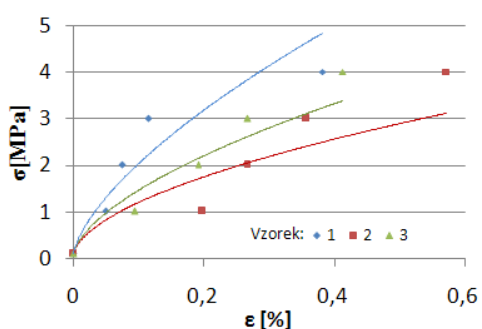
Obr. 66 Izochronní křivky rámu 3

### • Diskuze výsledků kríkové zkoušky

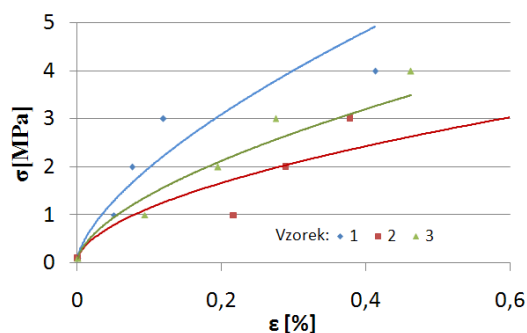
Z diskuze kríkové zkoušky z izochronních křivek na obr. 67. až 70. Je z nich patrné, že kríkový modul  $E_c$  [MPa] je úměrný objemovému podílu vláken. Bylo tedy ověřeno, že při daném napětí a čase je kompozitní materiál deformován více, čím nižší je procento výztuže. To lze demonstrovat na příkladu deformací vyvolaných napětím 4 MPa odečtených při čase 60 min, kdy deformace kompozitu č. 2 vyztuženého 11 % skleněných vláken byla 0,728 %, což je o ca 64 % více než v případě kompozitu č. 1, kdy deformace dosáhla 0,444 %. V případě kompozitního vzorku č. 3 (vyztužený 23 %) byla získána deformace 0,522 %, což je o 18 % více než u vzorku č. 1.

Deformace vzorku č. 1 pod napětím 4 MPa v čase 60 min odpovídá kríkovému modulu 901 MPa. Kompozitní systém č. 2 vykazuje při stejném zatížení modul 550 MPa, což je 61 % hodnoty zkušebního tělesa č. 1 a kompozitní systému č. 3 má kríkový modul 767 MPa, což je 85 % hodnoty vzorku odebraného z rámu č. 1, viz tab. 11.

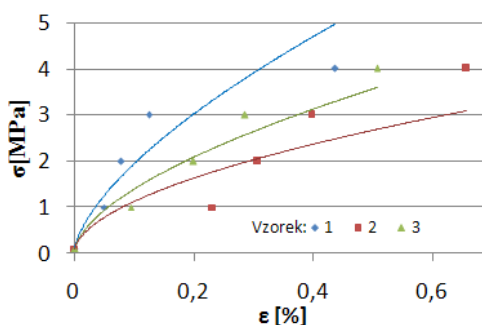
Na obr. 71 až 74 je ukázaný pokles kríkového modulu v čase  $t_1$  až  $t_4$  při zatížení napětím 1 až 4 MPa. Počáteční prudký pokles z hodnoty kríkového modulu pružnosti odečtené bezprostředně po zatížení se po pěti minutách mění v téměř lineární závislost s nižším rozdílem po sobě jdoucích hodnot.



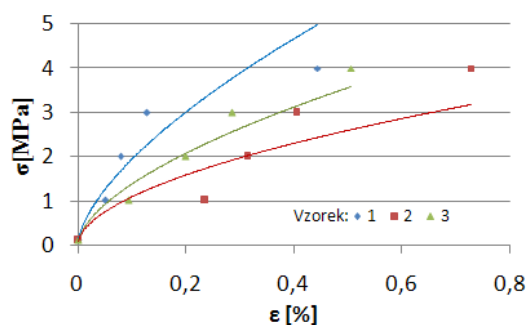
Obr. 67 Izochronní křivky v čase 5,8 min



Obr. 68 Izochronní křivky v čase 21,3 min

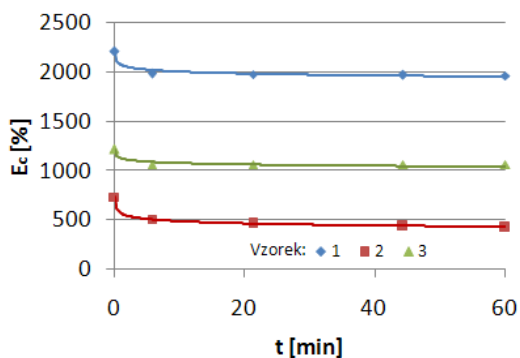


Obr. 69 Izochronní křivky v čase 44,3 min

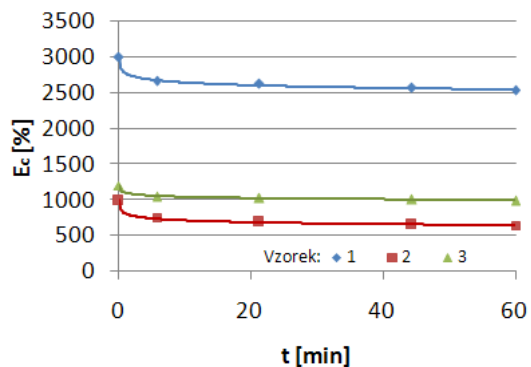


Obr. 70 Izochronní křivky v čase 60,0 min

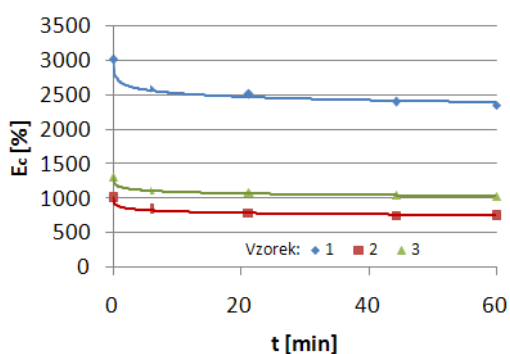




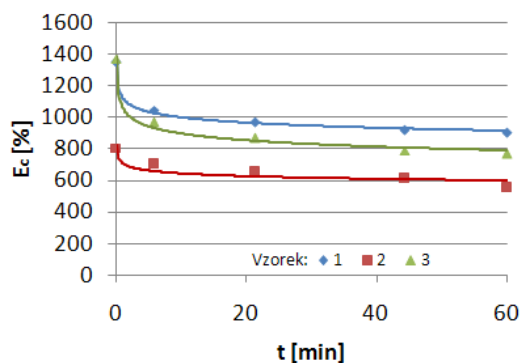
Obr. 71. Závislost kríповého modulu na čase při působícím napětí 1 MPa



Obr. 72 Závislost kríповého modulu na čase při působícím napětí 2 MPa



Obr. 73 Závislost kríповého modulu na čase při působícím napětí 3 MPa



Obr. 74 Závislost kríповého modulu na čase při působení napětí 4 MPa

Tab. 11 Tabulka vypočtených kríповých modulů  $E_c$  [MPa] a jejich procentuálních podílů vůči zkušební tělesům z rámu 1.

| Zkušební těleso |                | 1           |       | 2           |      | 3           |      |
|-----------------|----------------|-------------|-------|-------------|------|-------------|------|
| t [min]         | $\sigma$ [MPa] | $E_c$ [MPa] | [%]   | $E_c$ [MPa] | [%]  | $E_c$ [MPa] | [%]  |
| 5,8             | 1              | 1979        | 100,0 | 505         | 25,5 | 1061        | 53,6 |
|                 | 2              | 2665        | 100,0 | 751         | 28,2 | 1044        | 39,2 |
|                 | 3              | 2591        | 100,0 | 838         | 32,3 | 1122        | 43,3 |
|                 | 4              | 1046        | 100,0 | 699         | 66,8 | 968         | 92,5 |
| 21,3            | 1              | 1973        | 100,0 | 460         | 23,3 | 1060        | 53,7 |
|                 | 2              | 2626        | 100,0 | 693         | 26,4 | 1024        | 39,0 |
|                 | 3              | 2504        | 100,0 | 794         | 31,7 | 1090        | 43,5 |
|                 | 4              | 968         | 100,0 | 651         | 67,3 | 865         | 89,4 |
| 44,3            | 1              | 1969        | 100,0 | 432         | 21,9 | 1059        | 53,8 |
|                 | 2              | 2566        | 100,0 | 651         | 25,4 | 1002        | 39,0 |
|                 | 3              | 2396        | 100,0 | 755         | 31,5 | 1048        | 43,7 |
|                 | 4              | 916         | 100,0 | 609         | 66,5 | 789         | 86,1 |
| 60              | 1              | 1962        | 100,0 | 423         | 21,6 | 1059        | 54,0 |
|                 | 2              | 2533        | 100,0 | 638         | 25,2 | 991         | 39,1 |
|                 | 3              | 2350        | 100,0 | 742         | 31,6 | 1029        | 43,8 |
|                 | 4              | 901         | 100,0 | 550         | 61,0 | 767         | 85,1 |

### 3.2.6 Statické namáhání za konstantní deformace – relaxace napětí

Druhou zkouškou statického namáhání byla relaxace napětí, která podobně jako krípková zkouška má za úkol prověřit viskoelastické chování materiálu při statickém, dlouhodobém zatížení. Opět bylo použito metody tříbodového ohybu v uspořádání na plocho. V tomto případě byl vzorek upnut do pracovních čelistí a namáhán za daných podmínek konstantní deformací 0,4 %. Vlivem konformace makromolekul dochází k uvolňování napětí a cílem zkoušky je pro zkoumané kompozitní struktury stanovit relaxační časy, které odpovídají 37 % původní hodnoty napětí.

Při experimentu byly vzorky vystaveny shodným podmínkám. Měření probíhalo opět za zvýšené teploty 80 °C, deformace 0,4 % po dobu 60 min. Relaxační čas byl stanoven v okamžiku poklesu napětí na 37 % původní hodnoty. Pro tyto účely byla relaxační křivka aproximována pro delší časové působení v souladu s teoretickými předpoklady, dle rovnice (77).

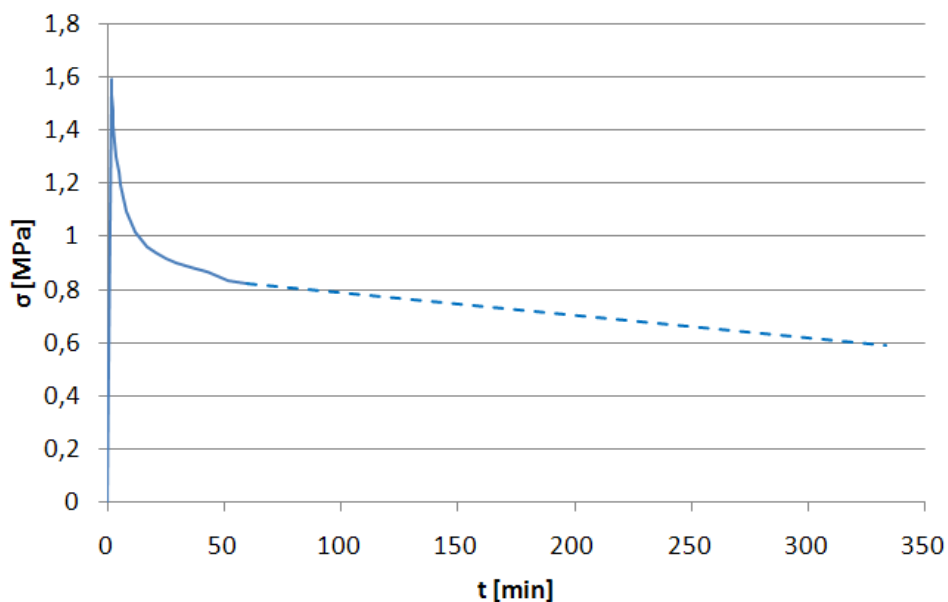
$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{E \cdot t}{\eta}} \quad (77)$$

- **Vzorek rámu 1**

První typ rámu obsahuje nejvíce výztuže (35 %), proto se od něj očekává nejmenší projev relaxace napětí. Po ustálení deformace na 0,4 % bylo odečteno počáteční napětí 1,59 MPa a v čase 60 min jeho pokles na 0,82 MPa. Relaxační čas byl po aproximaci získané křivky stanoven na 331,8 min. Hodnoty jsou zanesené v tabulce 12 a graficky znázorněny v obr. 71.

Tab. 12 Hodnoty zjištěné při relaxační zkoušce vzorku rámu 1

|               | Počáteční deformace | Počáteční napětí | Konečné napětí | Relaxační čas |
|---------------|---------------------|------------------|----------------|---------------|
|               | [%]                 | [MPa]            | [MPa]          | [min]         |
| Vzorek rámu 1 | 0,4                 | 1,59             | 0,59           | 331,8         |



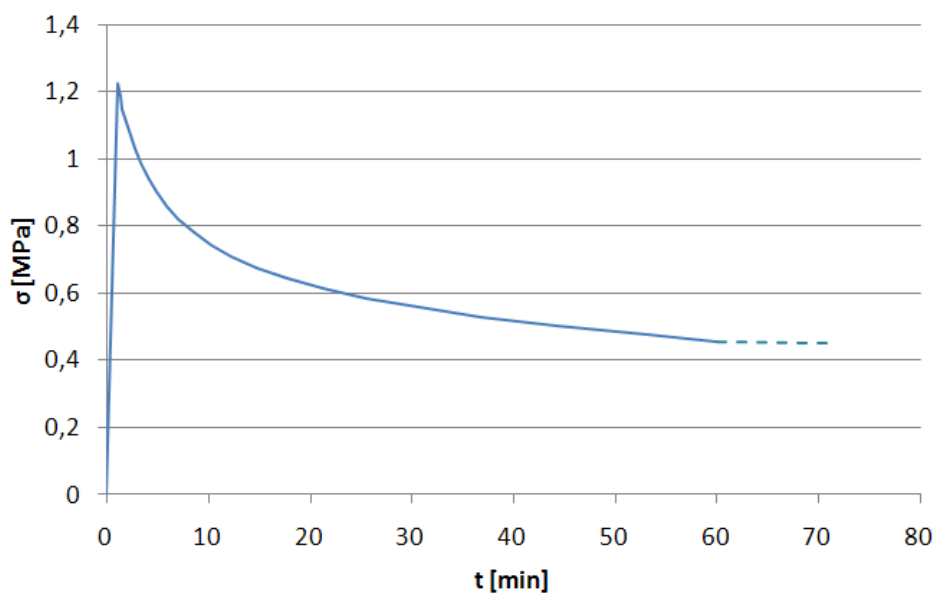
Obr. 71 Relaxační křivka rámu č. 1

- **Vzorek rámu 2**

Druhý typ rámu obsahuje naopak nejmenší objemové množství výztuže (11 %), tudíž se očekává nejkratší relaxační doba. Hodnota napětí z počátečních 1,22 MPa klesla během 60 min na 0,44 MPa. Pro relaxační čas byla stanovena mez 0,45 MPa, které bylo dosaženo po 70,38 min relaxačního procesu, viz tab. 13 a obr. 72. Čas zjištěný měřením kompozitního systému č. 2 odpovídá 21% relaxační doby zkušebního vzorku rámu 1.

Tab. 13. Hodnoty zjištěné při relaxační zkoušce vzorku rámu 2

|               | Počáteční deformace | Počáteční napětí | Konečné napětí | Relaxační čas |
|---------------|---------------------|------------------|----------------|---------------|
|               | [%]                 | [MPa]            | [MPa]          | [min]         |
| Vzorek rámu 2 | 0,40                | 1,22             | 0,45           | 70,38         |



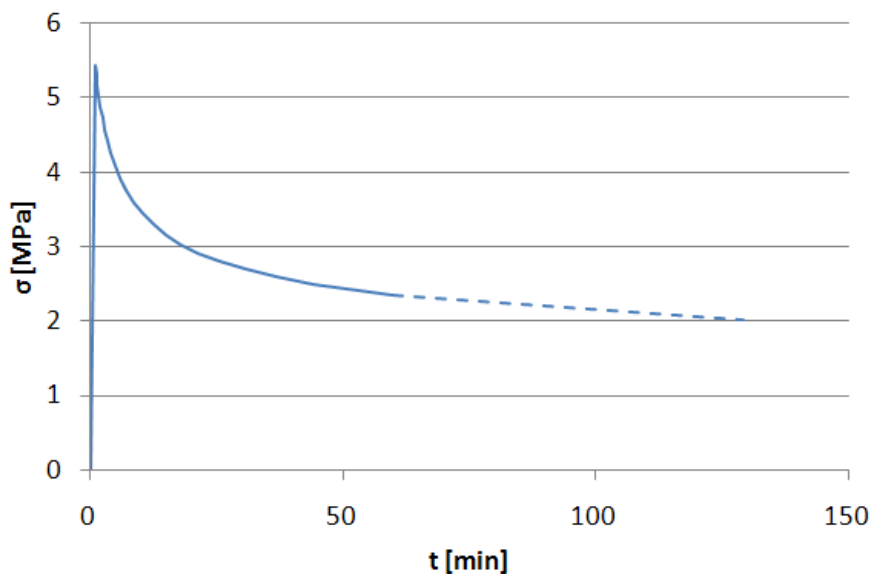
Obr. 72 Relaxační křivka rámu č. 2

- **Vzorek rámu 3**

Poslední typ rámu, který obsahuje 23 % vláken. Při počáteční deformaci 0,4 % bylo odečteno napětí 5,43 MPa, které po 60 min působení konstantní deformace kleslo na 2,34 MPa. Pro relaxační čas byla stanovena mez 2,01 MPa odpovídající 37% počátečního napětí. Relaxační doba byla stanovena na 128,13 min, viz tab. 14 a obr. 73 a odpovídá 40 % relaxačního času vzorku rámu 1.

Tab. 14. Hodnoty zjištěné při relaxační zkoušce vzorku rámu 3

|                  | Počáteční deformace | Počáteční napětí | Konečné napětí | Relaxační čas |
|------------------|---------------------|------------------|----------------|---------------|
|                  | [%]                 | [MPa]            | [MPa]          | [min]         |
| Vzorek rámu č. 3 | 0,4                 | 5,43             | 2,01           | 128,13        |



Obr. 73 Relaxační křivka rámu č. 3

#### • Diskuze výsledků relaxace napětí

Relaxační doba je ovlivněna procentuálním zastoupením vyztužujících vláken a definovaná je jako doba, kdy napětí v materiálu klesne na 37 % původní hodnoty. Materiál s nejvyšším zastoupením výztuže je charakteristický dlouhou relaxační dobou, naopak materiál nevyztužený bude k relaxačnímu pochodu více náchylný, což také dokazují výsledky.

V tab. 15 jsou shrnuty výsledky měření. Bude-li vzorek rámu 1 s 35% skleněných vláken brán za referenční (doba relaxace je 331,80 min), vzorek 2 s nejnižším obsahem vláken zrelaxuje v čase 70,38 min, tedy o 78,8 % času dříve než vzorek rámu 1. Napětí ve vzorku 3 zrelaxuje za 128,13 min, tedy o 61,4% času dříve než vzorku rámu 1.

Tab. 15 Přehled hodnot získaných měření relaxace napětí

|                  | Výchozí deformace | Výchozí napětí | Konečné napětí | Relaxační čas | Procentuální vyjádření |
|------------------|-------------------|----------------|----------------|---------------|------------------------|
|                  | [%]               | [MPa]          | [MPa]          | [min]         | [%]                    |
| Vzorek rámu 1    | 0,4               | 1,59           | 0,59           | 331,80        | 100,0                  |
| Vzorek rámu 2    | 0,4               | 1,22           | 0,45           | 70,38         | 21,2                   |
| Vzorek rámu č. 3 | 0,4               | 5,43           | 2,01           | 128,13        | 38,6                   |

#### 4 Závěr

Pomocí dynamicko mechanické analýzy byly zkoušeny kompozitní vzorky na bázi polyuretanové matrice vyztužené skleněnými vlákny o různém objemovém zastoupení. Navrženy byly tyto testy:

- Dynamické namáhání při zatížení vzrůstající frekvencí za konstantní teploty
- Dynamické namáhání konstantní frekvencí za zvyšující se teploty
- Statické namáhání za konstantního zatížení – kríp
- Statické namáhání za konstantní deformace – relaxace napětí

Měřením vzrůstající frekvencí při konstantní teplotě byly vyvozeny tyto závěry: Vzrůstající frekvence má za následek zvyšující se hodnoty obou složek komplexně sdruženého modulu pružnosti  $E^*$ , reálné složky  $E'$  i imaginární složky  $E''$  a hodnoty ztrátového součinitele  $\tan \delta$ . Dále výše teploty okolí, při které měření probíhá zmíněné mechanické vlastnosti ovlivňuje nepřímouměrně. Nejvyšší zjištěné hodnoty jsou uvedeny v tab. 16, všechny byly zaznamenány při působení frekvencí 70 Hz a teplotě 30 °C. Při srovnání komplexně sdružených modulů pružnosti je vidět, že modul pružnosti vzorku 3 dosahuje 34% hodnoty vzorku 1 a vzorek 2 pouze 22 % hodnoty vzorku 1.

Tab. 16 Nejvyšší mechanické vlastnosti zjištěné zkouškou při zatížení vzrůstající frekvencí seřazené sestupně od nejvyšších zjištěných mechanických vlastností

| Pořadí | Označení rámu | $A_f$ [%] | $E''$ [MPa] | $E'$ [MPa] | $E^*$ [MPa] | $\tan \delta$ | $\delta$ [°] |
|--------|---------------|-----------|-------------|------------|-------------|---------------|--------------|
| 1      | 1             | 35        | 6476        | 324        | 6484        | 0,050         | 2,86         |
| 2      | 3             | 23        | 2227        | 130        | 2231        | 0,058         | 3,32         |
| 3      | 2             | 11        | 1431        | 84         | 1433        | 0,059         | 3,38         |

Při zatížení kompozitních vzorků konstantní frekvencí za plynule se zvyšující teploty byl zjištěn vliv podmínek zatěžování na přechodovou teplotu zesklenní  $T_g$ . Čím vyšší je působící frekvence zatěžování a čím větší je podíl plniva, tím je vyšší hodnota teploty zesklenní viz tab. 17. Hodnota teploty zesklenní zjištěná pro rám 3 při 60 Hz je o 5% nižší než teplota zesklenní u rámu 1 při stejné frekvenci zatěžování. Přechodová teplota zjištěná při též frekvenci pro rám 2 je nižší o 7%. Dále byl nad přechodovou teplotou zaznamenán prudký pokles reálné složky modulu pružnosti a naopak prudký nárůst součinitele tlumení  $\tan \delta$ .

Tab. 17 Hodnoty teplot zesklennění v závislosti na zatěžující frekvenci seřazené sestupně od nejvyšších zjištěných hodnot

| Pořadí | Označení rámu | A <sub>f</sub> [%] | T <sub>g</sub> [ °C ] |       |       |
|--------|---------------|--------------------|-----------------------|-------|-------|
|        |               |                    | 60 Hz                 | 40 Hz | 20 Hz |
| 1      | 1             | 35                 | 120                   | 113   | 112   |
| 2      | 3             | 23                 | 114                   | 110   | 104   |
| 3      | 2             | 11                 | 112                   | 110   | 102   |

Křípová zkouška reprezentuje statické namáhání za konstantního zatížení. Zjišťovaná deformace je úměrná namáhání a se zvyšujícím se objemovým zastoupením vyztužujících vláken deformace klesá. Zkouška byla provedena za teploty 80 °C a z naměřených hodnot byly vypočteny hodnoty křípových modulů. Jejich časová závislost ukazuje, že se vzrůstajícím časem hodnota křípového modulu snižuje. V tab. 18 jsou uvedeny hodnoty křípových modulů pro zatížení 4 MPa odečtené v časech  $t_1$  až  $t_4$ .

Tab. 18 Křípové moduly vypočtené zatížení 4 MPa seřazené sestupně od nejvyšších zjištěných hodnot

| Pořadí | Označení rámu | E <sub>c</sub> [MPa]    |                          |                          |                          |
|--------|---------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|        |               | t <sub>1</sub> =5,8 min | t <sub>2</sub> =21,3 min | t <sub>3</sub> =44,3 min | t <sub>4</sub> =60,0 min |
| 1      | 1             | 1046                    | 968                      | 916                      | 901                      |
| 2      | 3             | 968                     | 865                      | 789                      | 767                      |
| 3      | 2             | 699                     | 651                      | 609                      | 550                      |

Zkouškou relaxace napětí byly pro každý vzorek zjišťovány relaxační časy. Nejdelší čas relaxace byl dosažen pro rám 1 (331,8 min) s objemovým zastoupením 35 % skleněných vláken. Napětí ve vzorku rámu 3 vyztuženém objemovým podílem 23 % skleněných vláken vyrelaxovalo za 128,1 min, tedy za 39 % relaxačního času vzorku rámu 1, a vzorek rámu 2 vyztužený 11% skleněných vláken zrelaxuje za 70,38 min, tedy za 21 % času vzorku rámu 1.

Studium struktury pomocí počítačové tomografie ukázalo, že rozmístění vláken v jednotlivých místech odběru vzorků je pravděpodobně z důvodu neodladěné výrobní technologie nepravidelné, tudíž hrozí jejich zvýšená lokální koncentrace nebo naopak lokální nedostatek, což má za následek např. lokální oslabení konstrukce a nebezpečí jejího selhání.

Naměřené výsledky bude možné využít v další etapě řešení problému s využitím numerické simulace namáhání konkrétního výrobku.

V případě využití některého ze zkoumaných produktů v reálné praxi je na zvážení teamu procesních inženýrů, jak velkému namáhání bude produkt vystaven a za jakých podmínek bude využíván. Je též nutné zvážit ekonomická hlediska při volbě druhu procenta výztuže. S vyšším procentem výztuže se prodlužuje čas na výrobu jednoho produktu, nehledě na zvýšenou spotřebu materiálu výztuže. Rozhodovací kritéria mají dva extrémy. Zda použít kvalitnější kompozitní materiál (s vyšším podílem vyztužujících vláken) a získat lepší užitné vlastnosti, nebo snížit nároky na únosnost vnějšího namáhání s tím, že automaticky klesnou i náklady na výrobu.



## Literatura

- [1] DAĐOUREK, K. *Kompozitní materiály: druhy a jejich užití*. 1. vyd. Liberec: TU v Liberci, 2007. 114s. ISBN 8073722798.
- [2] EHRENSTEING. W. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vyd. Mníšek pod Brdy: Scientia, 2009. 351s. ISBN. 978-80-86960-29-6
- [3] General Motors. *Fiberglass to Carbon Fiber: Corvette's Lightweight Lega* [online].  
[cit:10. 01. 2015], URL:<[http://media.gm.com/media/us/en/gm/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2012/Aug/0816\\_corvette.html](http://media.gm.com/media/us/en/gm/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2012/Aug/0816_corvette.html) >
- [4] Havel composites. *Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů*. [online]. [cit.: 12. 1. 2015] URL:<<http://www.havel-composites.com/clanky/0-/74-Vseobecny-a-zakladny-popis-materialov-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitov.html>>
- [5] LAŠ, V. *Mechanika kompozitních materiálů*. 2. vyd. Plzeň: ZČU V Plzni, 2008. 204s. ISBN 978-80-7043-689-9
- [6] BAREŠ R. *Kompozitní materiály*. 1.vyd. Praha: SNTL Praha, 1988. 328s. ISBN 04-734-88
- [7] Cordura. *Military/Tactical apparel* [online]. [cit.:16. 01. 2015]. URL:<[http://www.cordura.com/en/tactical\\_apparel/index.html](http://www.cordura.com/en/tactical_apparel/index.html) >
- [8] Boeing. *Boeing: 787 design highlits* [online]. [cit.: 25. 01. 2015]. URL:<<http://www.boeing.com/commercial/787/>>
- [9] Zoltek. *Zoltek Panex® 35 prepreg tapes* [online]. [cit.: 02. 02. 2015].  
URL:<<http://www.zoltek.com/products/panex-35/prepreg/>>
- [10] KREBSOVÁ, M. *Nauka o polymerech*. dotisk. Liberec: VŠST v Liberci, 1979. 223s. ISBN 55-817-79
- [11] Polymer science learning center. *Polyurethane* [online]. [cit.: 20. 02. 2015]. URL:<<http://pslc.ws/macrog/urethane.htm>>
- [12] BASF. *Elastollan® HPM the first TPU for the automotive exterior*, [online]. [cit.: 20. 02. 2015]. URL:<[http://www.polyurethanes.basf.de/pu/solutions/en/content/group/innovation/products/Elastollan\\_HPM](http://www.polyurethanes.basf.de/pu/solutions/en/content/group/innovation/products/Elastollan_HPM)>
- [13] TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie, oddělení tváření kovů a plastů. *Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti* [online]. [cit.: 26. 02. 2015].

URL:<[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/01.htm#015](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm#015)>

- [14] VŠCHT v Praze. ŠVORČÍK, V. *Polymery* [online]. [cit.:6. 3. 2015]  
URL:<<http://old.vscht.cz/ipl/osobni/svorcik/Polymery.pdf> >
- [15] KREBS, J. *Teorie zpracování nekovových materiálů*. 3. vyd. Liberec,: TU v Liberci, 2006. 250s. ISBN 30-7372-133-3
- [16] POTĚŠIL, A. *Základy teorie viskoelasticity a dynamická odezva viskoelasických materiálů*. Habilitační práce. Liberec: VŠST v Liberci, 1993. 107s.
- [17] SOUKUPOVÁ, K. *Hodnocení mechanických vlastností plastů v závislosti na teplotě a rychlost zatěžování*. Diplomová práce. Liberec: TU v Liberci, 2010. 91s.
- [18] ŠPANIEL, M., HORÁK Z. *Úvod do metody konečných prvků*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 2011. 158 s. ISBN 978-80-01-04665-4.
- [19] TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie oddělení tváření kovů a plastů. *Viskoelastické vlastnosti plastů* [online]. [cit 30. 3. 2015].  
URL:<<http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/vip.htm>>
- [20] VŠB Ostrava, ZČU Plzeň. FUSEK M., HALAMA R. *Matematika pro inženýry 21. století. Metoda konečných a hraničních prvků* [online]. [cit 11. 4. 2015].  
URL:<[http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda\\_konecných\\_prvku\\_a\\_hranicnich\\_prvku.pdf](http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda_konecných_prvku_a_hranicnich_prvku.pdf) >
- [21] Thermal Analysis instruments, *Dynamic mechanical analysis brochure* [online].  
URL:<<http://www.tainstruments.com/pdf/brochure/dma.pdf> >

## **Seznam příloh**

Materiálový list PUR matrice – list 1

Materiálový list PUR matrice – list 2

Materiálový list PUR matrice – list 3

Zkouška vzorku 1 – namáhání konstantní frekvencí 20 Hz za vzrůstající teploty

Zkouška vzorku 1 – namáhání konstantní frekvencí 40 Hz za vzrůstající teploty

Zkouška vzorku 1 – namáhání konstantní frekvencí 60 Hz za vzrůstající teploty

Zkouška vzorku 1 – kríповá zkouška se zatížením 1 MPa

Zkouška vzorku 1 – kríповá zkouška se zatížením 2 MPa

Zkouška vzorku 1 – kríповá zkouška se zatížením 3 MPa

Zkouška vzorku 1 – kríповá zkouška se zatížením 4 MPa

Zkouška vzorku 1 – relaxace napětí

Zkouška vzorku 2 – namáhání konstantní frekvencí 20 Hz za vzrůstající teploty

Zkouška vzorku 2 – namáhání konstantní frekvencí 40 Hz za vzrůstající teploty

Zkouška vzorku 2 – namáhání konstantní frekvencí 60 Hz za vzrůstající teploty

Zkouška vzorku 2 – kríповá zkouška se zatížením 1 MPa

Zkouška vzorku 2 – kríповá zkouška se zatížením 2 MPa

Zkouška vzorku 2 – kríповá zkouška se zatížením 3 MPa

Zkouška vzorku 2 – kríповá zkouška se zatížením 4 MPa

Zkouška vzorku 2 – relaxace napětí

Zkouška vzorku 3 – namáhání konstantní frekvencí 20 Hz za vzrůstající teploty

Zkouška vzorku 3 – namáhání konstantní frekvencí 40 Hz za vzrůstající teploty

Zkouška vzorku 3 – namáhání konstantní frekvencí 60 Hz za vzrůstající teploty

Zkouška vzorku 3 – kríповá zkouška se zatížením 1 MPa

Zkouška vzorku 3 – kríповá zkouška se zatížením 2 MPa

Zkouška vzorku 3 – kríповá zkouška se zatížením 3 MPa

Zkouška vzorku 3 – kríповá zkouška se zatížením 4 MPa

Zkouška vzorku 3 – relaxace napětí

## Materiálový list PUR matrice – list 1

### Technical Data Sheet

#### Elastolit® R 8819/104/LT

Page 1 / 3  
Version 03  
Date of issue 07.08.2013



### Application

This system is used for production of structural parts in RTM processing.

### Chemical Characteristics

**Polyol-Component:** Preparation based on: polyol, catalyst, stabilizing agents  
**Iso-Component:** Preparation based on: carbodiimide, 4,4'-methylenediphenyl diisocyanate;  
diphenylmethane-4,4'-diisocyanate = IsoMMDI 92050

### Supply

The type of supply for the components will be decided after consultation with our Sales Office

### Storage, Preparation

Polyurethane components are moisture sensitive. Therefore they must be stored at all times in sealed, closed containers. The A-component (Polyol) must be homogenised by basic stirring before processing. More detailed information should be obtained from the separate data sheet entitled "Information for in-coming material control, storage, material preparation and waste disposal" and from the component data.

### Possible Hazards

The B-component (Isocyanate) irritates the eyes, respiratory organs and the skin. Sensitisation is possible through inhalation and skin contact. MDI is harmful by inhalation. On processing these, take note of the necessary precautionary measures described in the Material Safety Data Sheets (MSDSs). This applies also for the possible dangers in using the A-component (Polyol) as well as any other components. See also our separate information sheet "Safety- and Precautionary Measures for the Processing of Polyurethane Systems." Use our Training Programme "Safe Handling of Isocyanate."

### Waste Disposal

More detailed information is provided in our country-specific pamphlet

### Consumer articles, medical products

There are national and international laws and regulations to consider if it is intended to produce consumer articles (eg articles that necessitate food or skin contact, toys etc.) or medical objects out of BASF Polyurethanes GmbH products. Where these do not exist, the current legal requirements of the European Union for consumer articles as well as medical products should be sufficient. Consultation with our Sales Office and our Ecology and Product Safety Department is strongly recommended.

## Materiálový list PUR matrice – list 2

### Elastolit® R 8819/104/LT

Page: 2 / 3  
Version: 03  
Date of Issue: 07.08.2013



#### Component Data

| Characteristics  | Unit   | Polyol-Comp | Isoc-Comp. | Method   |
|------------------|--------|-------------|------------|----------|
| Density (25°C)   | g/cm³  | 1.05        | 1.22       | G 133-08 |
| Viscosity (25°C) | mPa·s  | 216         | 40         | G 133-07 |
| Shelf-life       | months | 3           | 6          |          |

#### Typical Processing Data

##### Cup Test

| Characteristics       | Unit  | Value           | Method   |
|-----------------------|-------|-----------------|----------|
| Component temperature | °C    | 20              |          |
| Weights               | g     | A = 100 B = 178 |          |
| Cream time            | s     | 480             | G 132-01 |
| Free rise density     | kg/m³ | 1000            |          |

##### Machine processing

| Characteristics       | Unit | Value | Method |
|-----------------------|------|-------|--------|
| Gel time              | s    | 45    |        |
| Demoulding time       | min. | <4    |        |
| Component temperature | °C   | 45    |        |
| Mould temperature     | °C   | 90    |        |

## Materiálový list PUR matrice – list 3

### Elastolit® R 8819/104/LT

Page: 3 / 3  
Version: 03  
Date of Issue: 07.08.2013



#### Typical Physical Properties

| Characteristics               | Unit              | Measured value | Method            |
|-------------------------------|-------------------|----------------|-------------------|
| Density                       | kg/m <sup>3</sup> | 1170           | DIN EN ISO 1183-1 |
| Shore hardness D              |                   | 83             | DIN 53505         |
| Tensile strength              | N/mm <sup>2</sup> | 77             | DIN EN ISO 527    |
| Elongation at break           | %                 | 6              |                   |
| Flexural modulus at + 23 °C   | N/mm <sup>2</sup> | 2420           | DIN EN ISO 178    |
| Flexural strength             | N/mm <sup>2</sup> | 105            |                   |
| Heat distortion temperature B | °C                | 110            | DIN EN ISO 75     |
| Shrinkage                     | %                 | 0.9            |                   |

Mechanical properties of neat PU system, no post curing.

® = registered trade mark of BASF

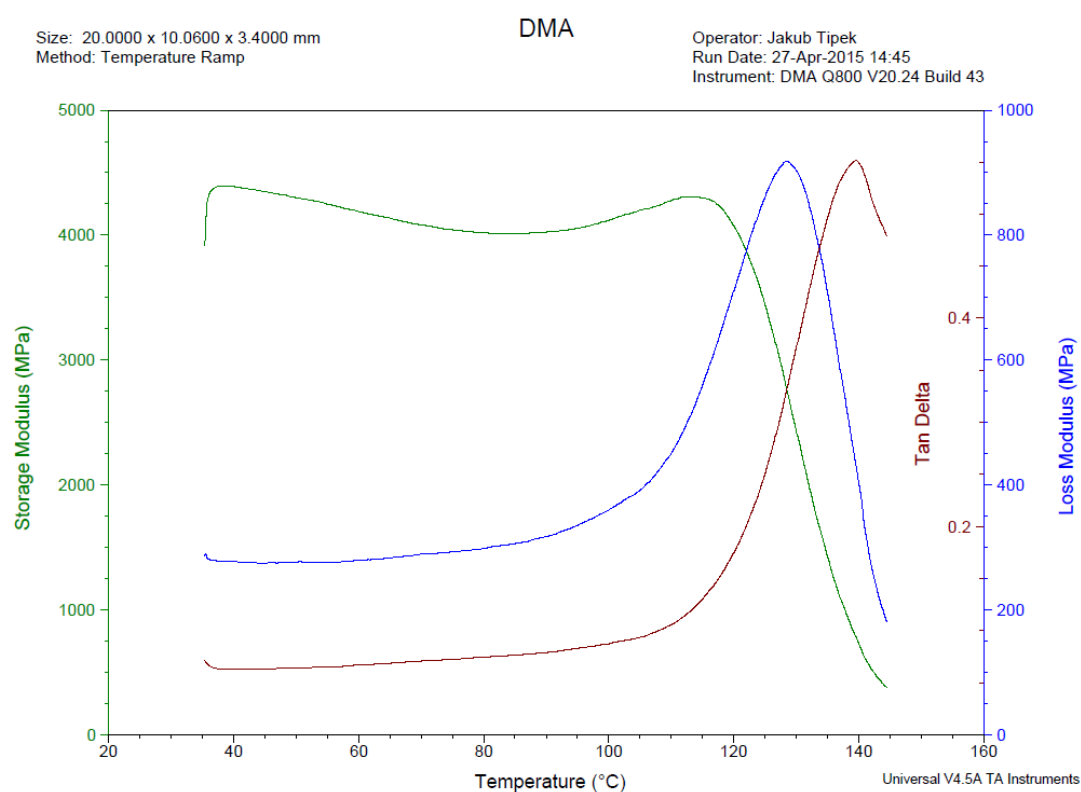
The data contained in this document as well as advice or other support services are based on our current knowledge and experience. In view of many factors that may affect processing and application of our products, this data does not relieve processors from carrying out their own investigations and tests, particularly with regards to the suitability of the goods supplied for the processes and purposes they intend to use them for. neither does this data imply any guarantee of certain properties, or the suitability of the product for a specific purpose. Any descriptions, drawings, photographs, data, proportions, weights, measured values etc. given herein may change without prior notice and do not constitute the agreed contractual quality of the product. It is the responsibility of the recipient of our products to ensure that any proprietary rights and existing laws and legislation are observed.

**BASF Polyurethanes GmbH**  
Postfach 1140  
49440 Lemförde  
Germany

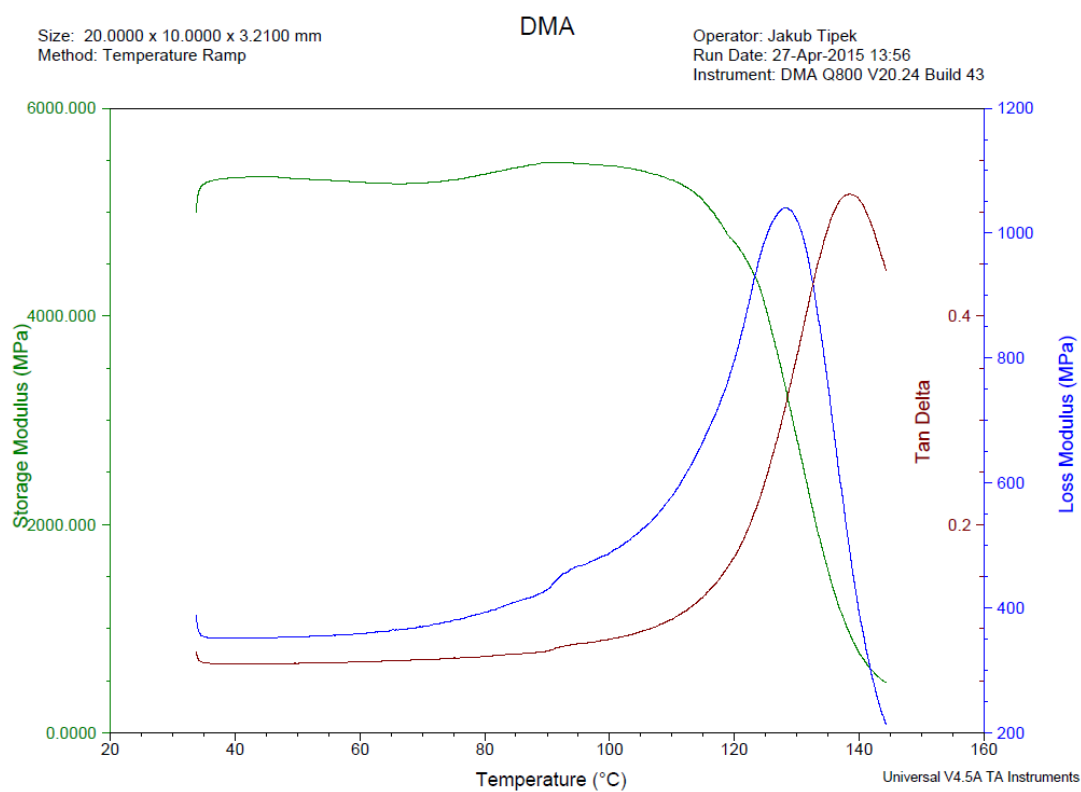
Tel.: +49 (0) 5443/12-0  
Fax: +49 (0) 5443/12-2020  
Mail: [pu-spezialsysteme@basf.com](mailto:pu-spezialsysteme@basf.com)  
Internet: [www.pu.basf.eu](http://www.pu.basf.eu)



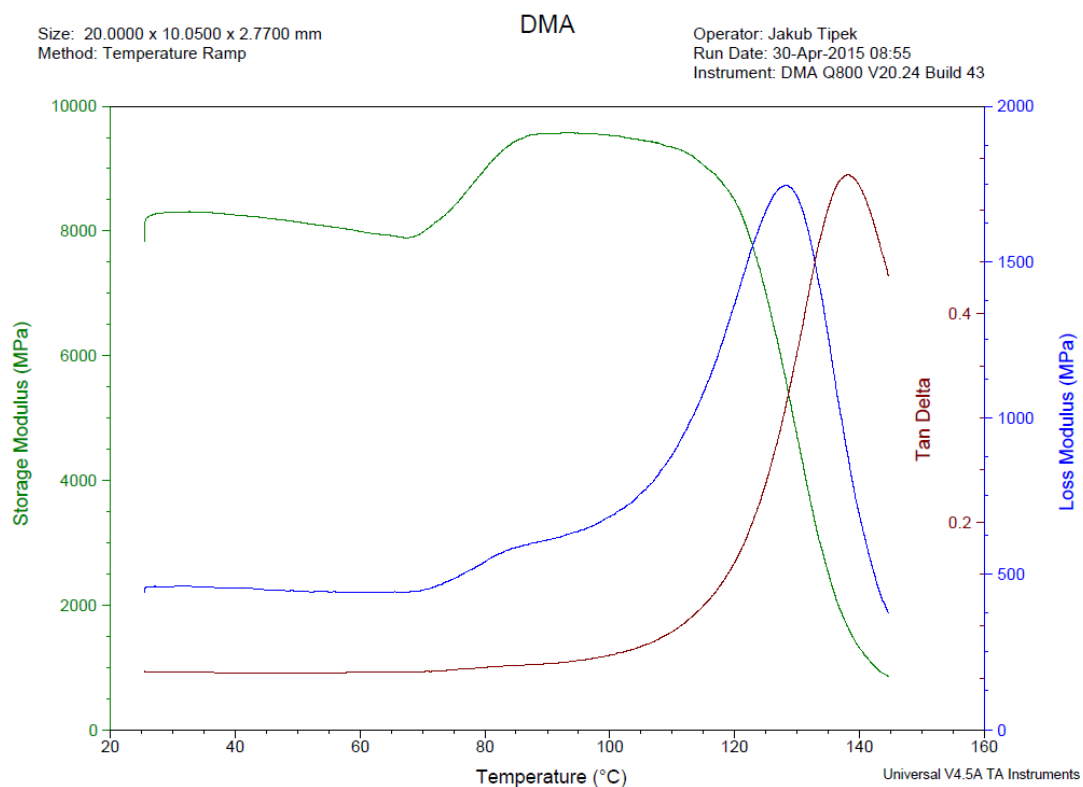
# Zkouška vzorku 1 – namáhání konstantní frekvencí 20 Hz za vzrůstající teploty



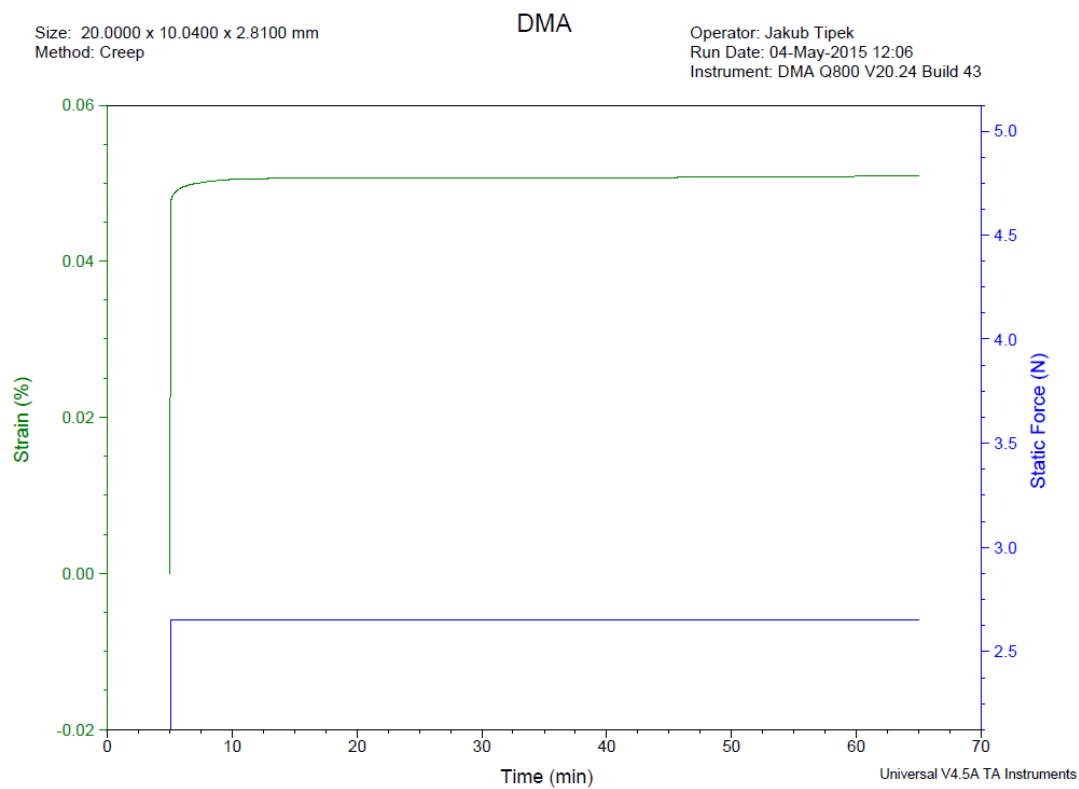
# Zkouška vzorku 1 – namáhání konstantní frekvencí 40 Hz za vzrůstající teploty



## Zkouška vzorku 1 – namáhání konstantní frekvencí 60 Hz za vzrůstající teploty

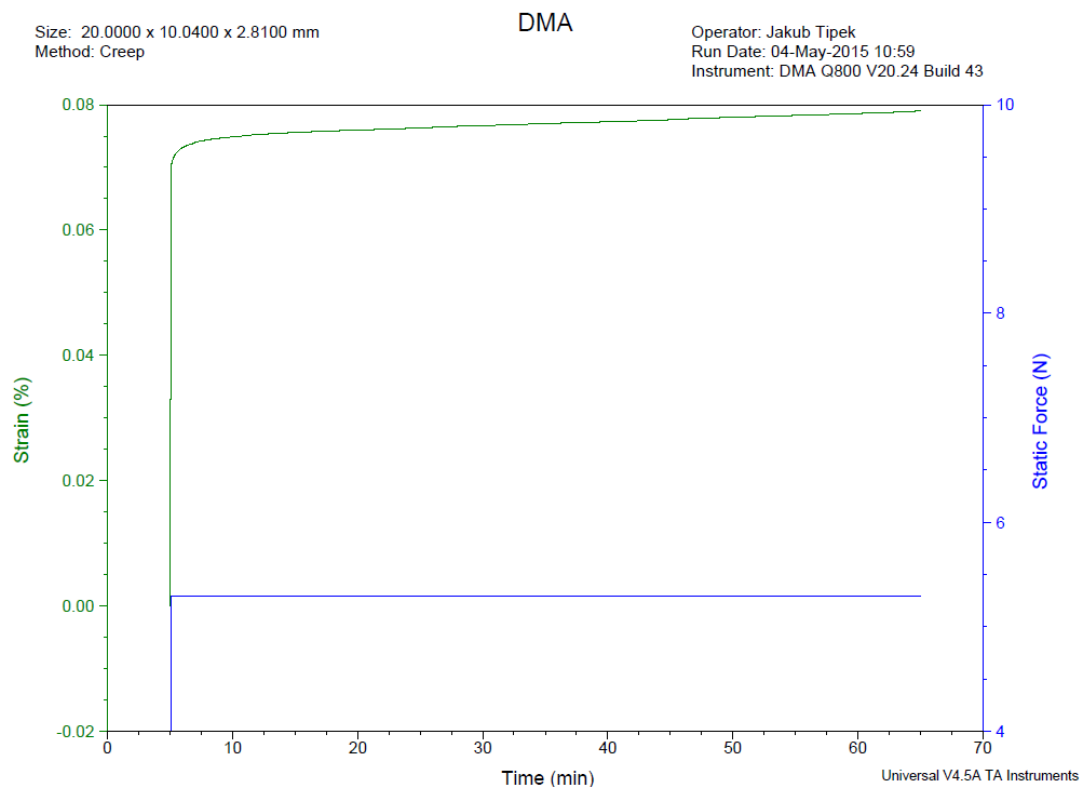


## Zkouška vzorku 1 – kríková zkouška se zatížením 1 MPa

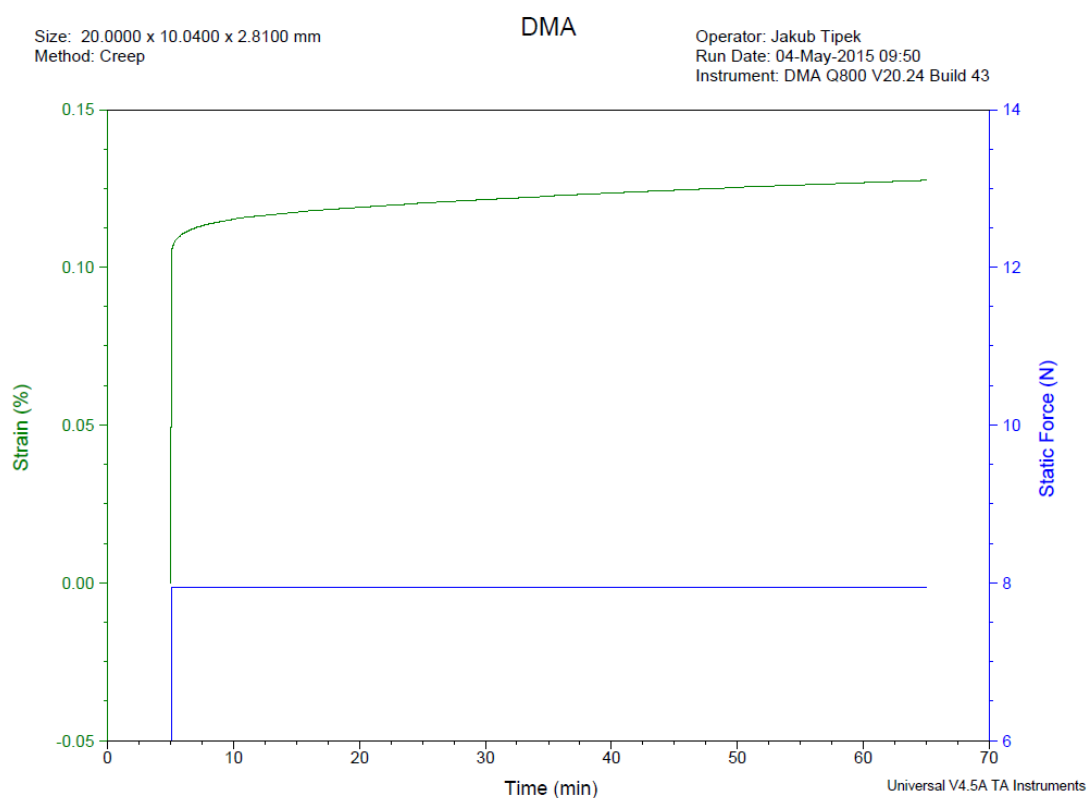




## Zkouška vzorku 1 – kríková zkouška se zatížením 2 MPa



## Zkouška vzorku 1 – kríková zkouška se zatížením 3 MPa

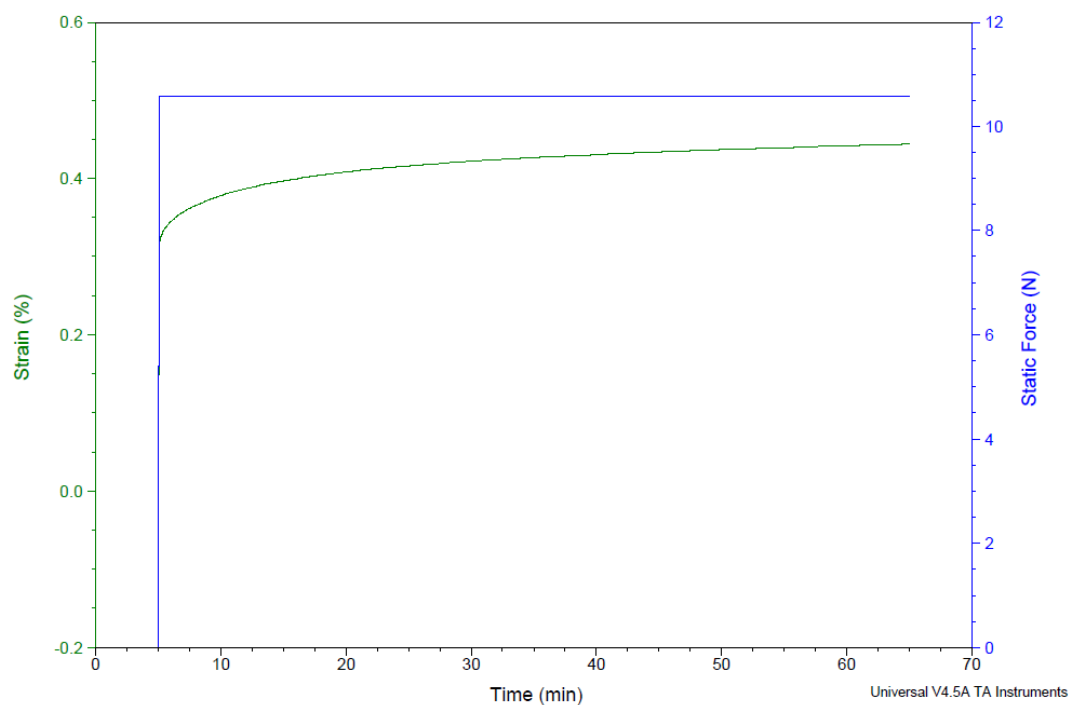


## Zkouška vzorku 1 – kríková zkouška se zatížením 4 MPa

Size: 20.0000 x 10.0400 x 2.8100 mm  
Method: Creep

DMA

Operator: Jakub Típek  
Run Date: 04-May-2015 08:34  
Instrument: DMA Q800 V20.24 Build 43

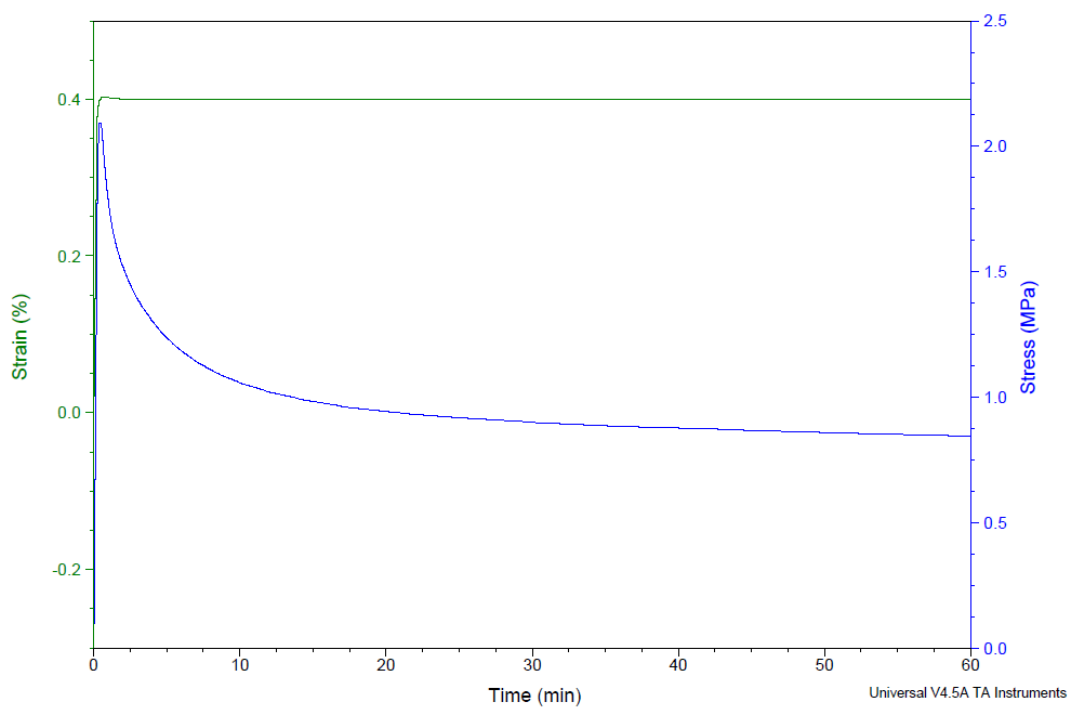


## Zkouška vzorku 1 – relaxace napětí

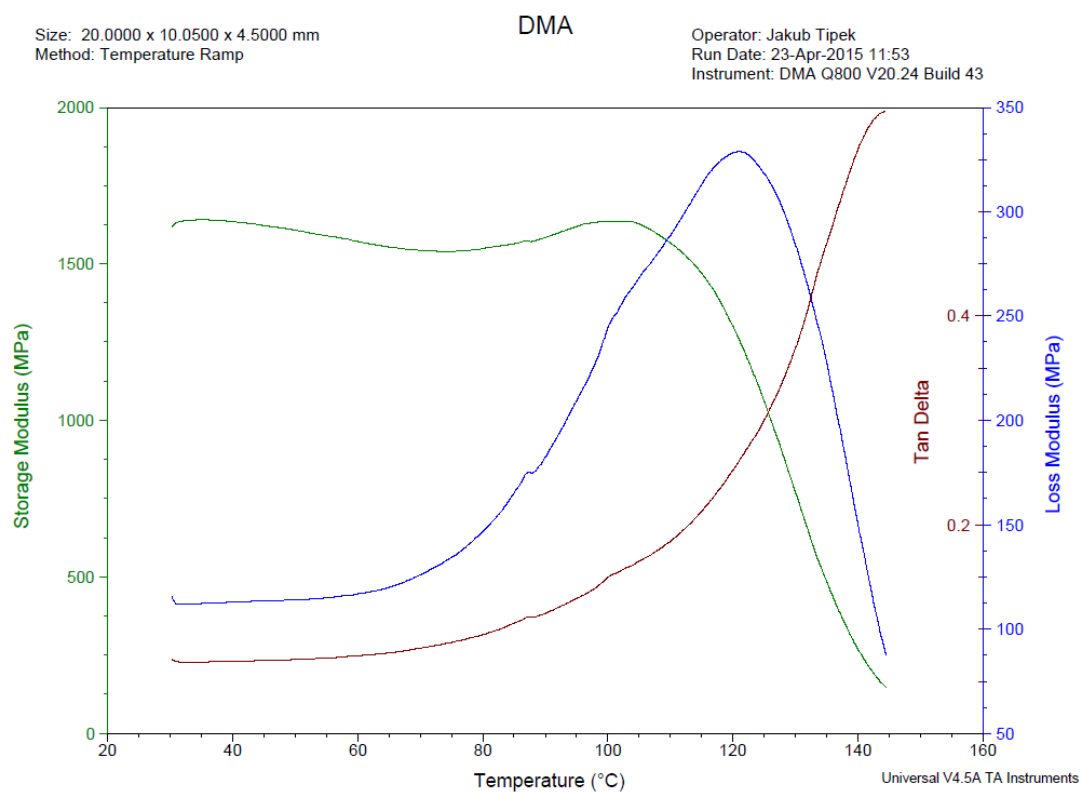
Size: 20.0000 x 10.0800 x 2.7900 mm  
Method: Stress Relaxation

DMA

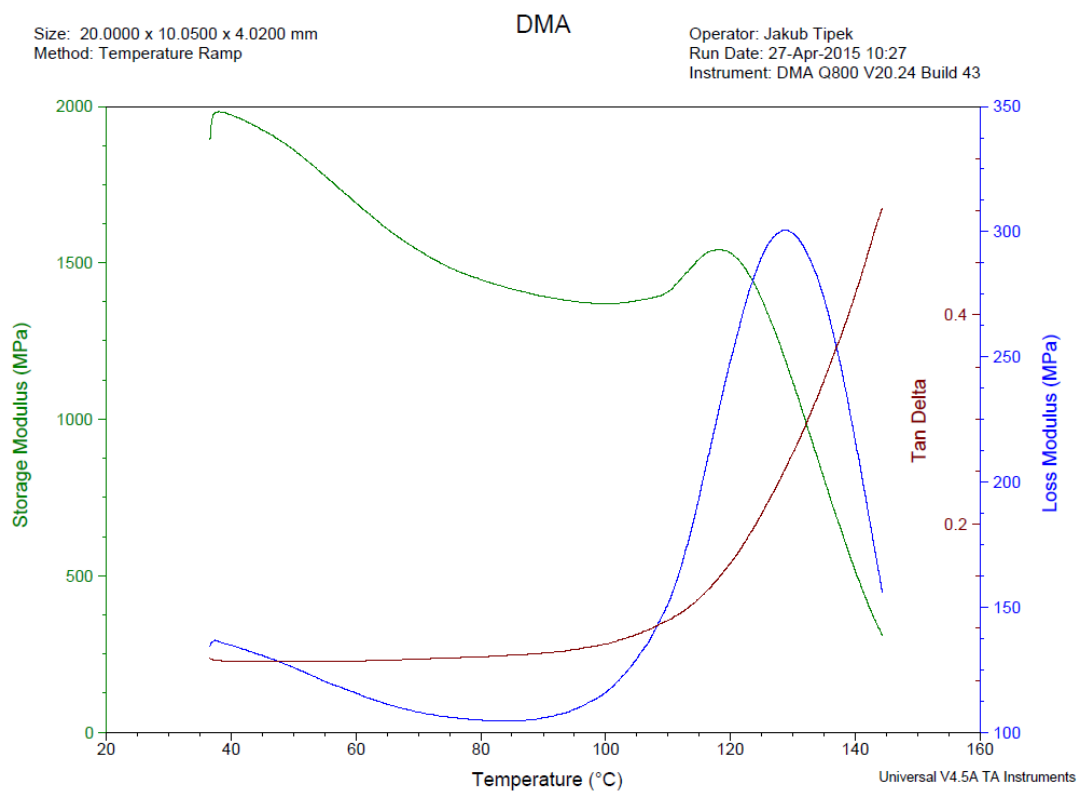
Operator: Jakub Típek  
Run Date: 04-May-2015 13:19  
Instrument: DMA Q800 V20.24 Build 43



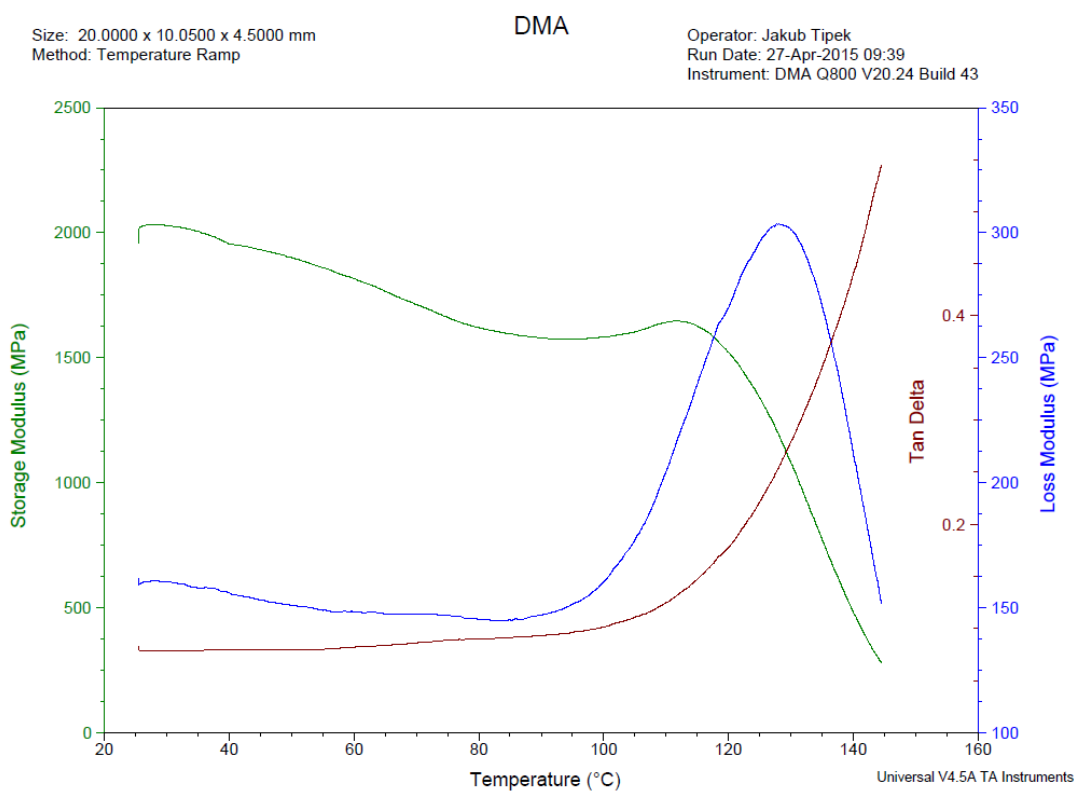
## Zkouška vzorku 2 – namáhání konstantní frekvencí 20 Hz za vzrůstající teploty



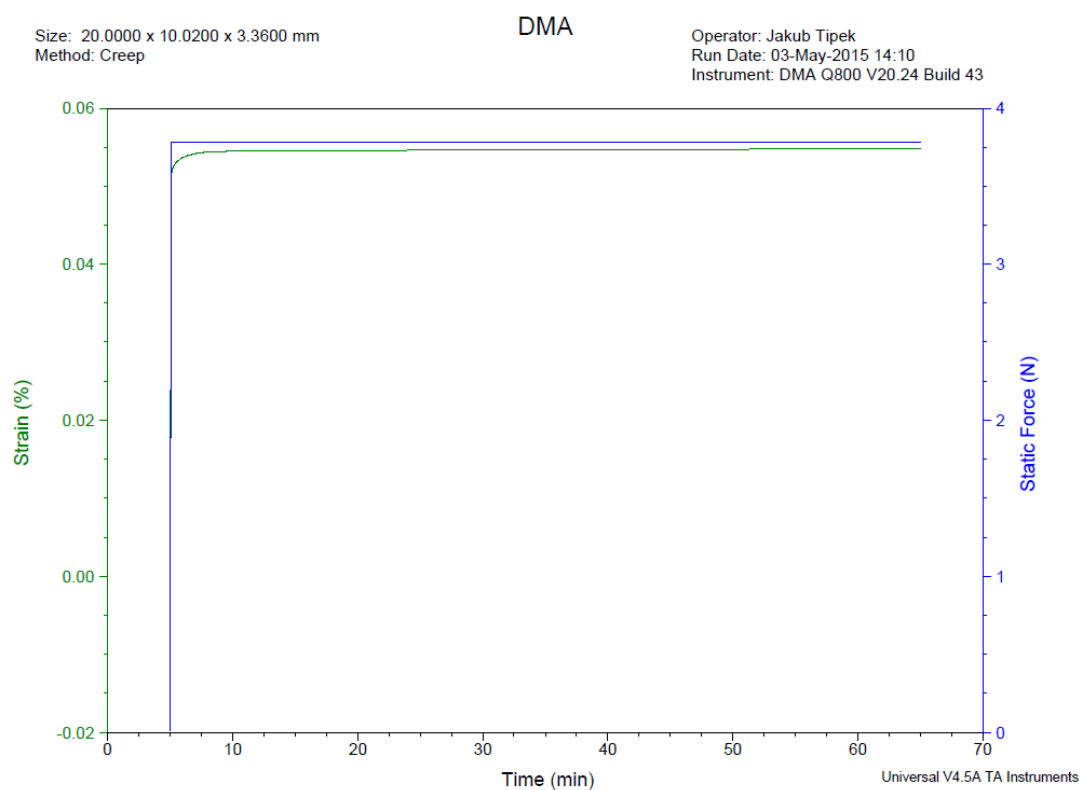
## Zkouška vzorku 2 – namáhání konstantní frekvencí 40 Hz za vzrůstající teploty



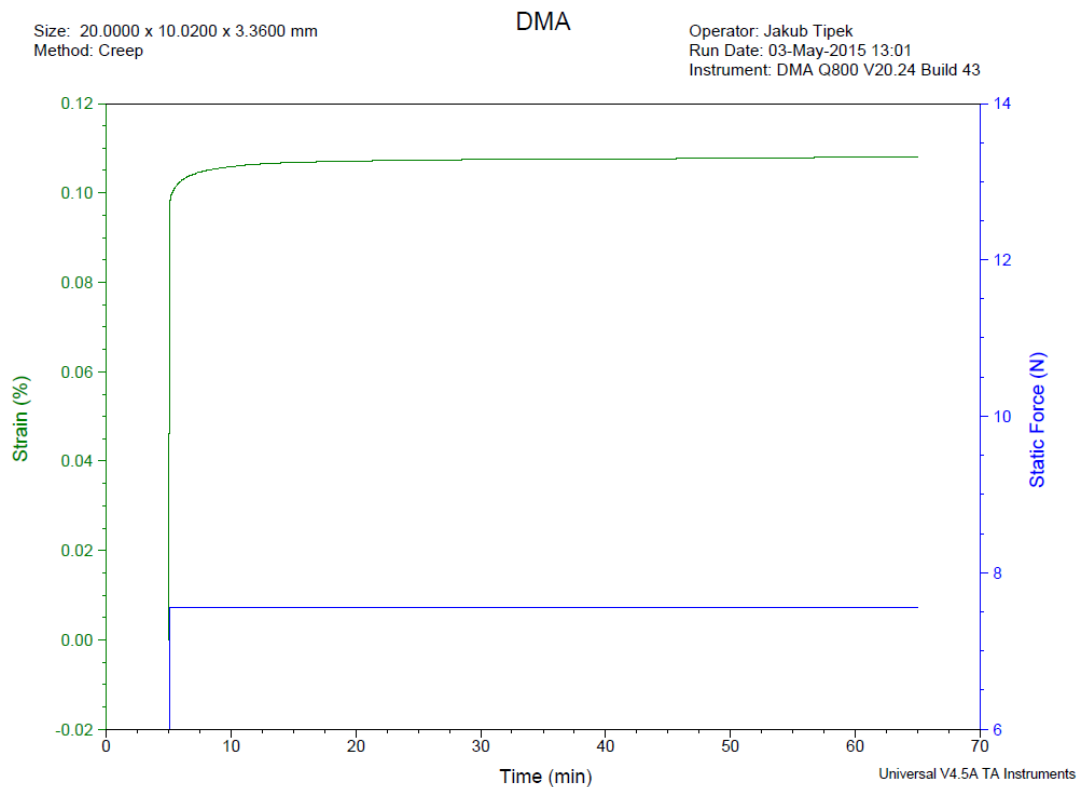
## Zkouška vzorku 2 – namáhání konstantní frekvencí 60 Hz za vzrůstající teploty



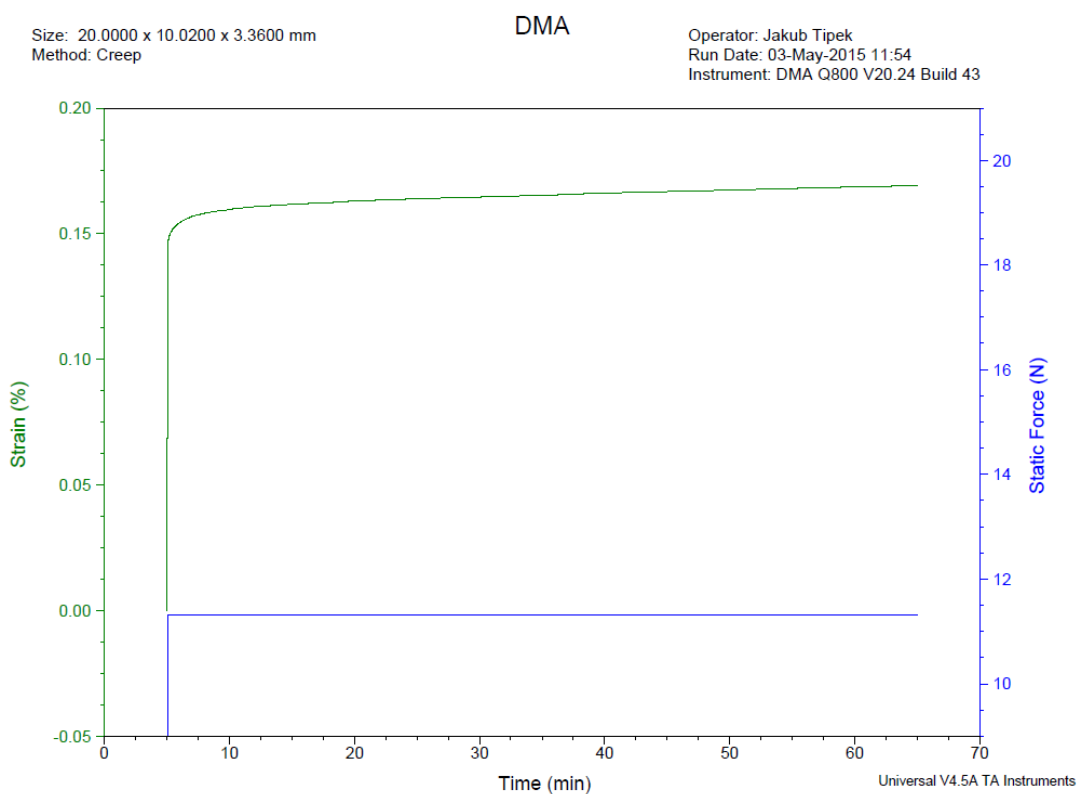
## Zkouška vzorku 2 – kríková zkouška se zatížením 1 MPa



## Zkouška vzorku 2 – kríková zkouška se zatížením 2 MPa



## Zkouška vzorku 2 – kríková zkouška se zatížením 3 MPa

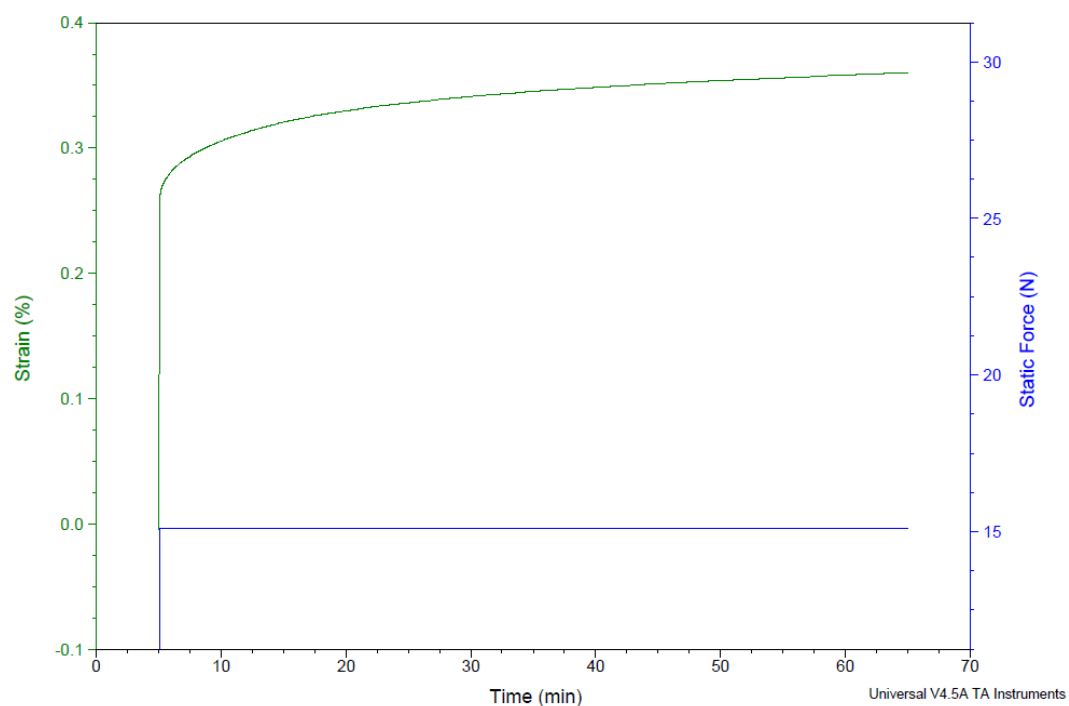


## Zkouška vzorku 2 – křipová zkouška se zatížením 4 MPa

Size: 20.0000 x 10.0200 x 3.3600 mm  
Method: Creep

DMA

Operator: Jakub Típek  
Run Date: 03-May-2015 10:40  
Instrument: DMA Q800 V20.24 Build 43

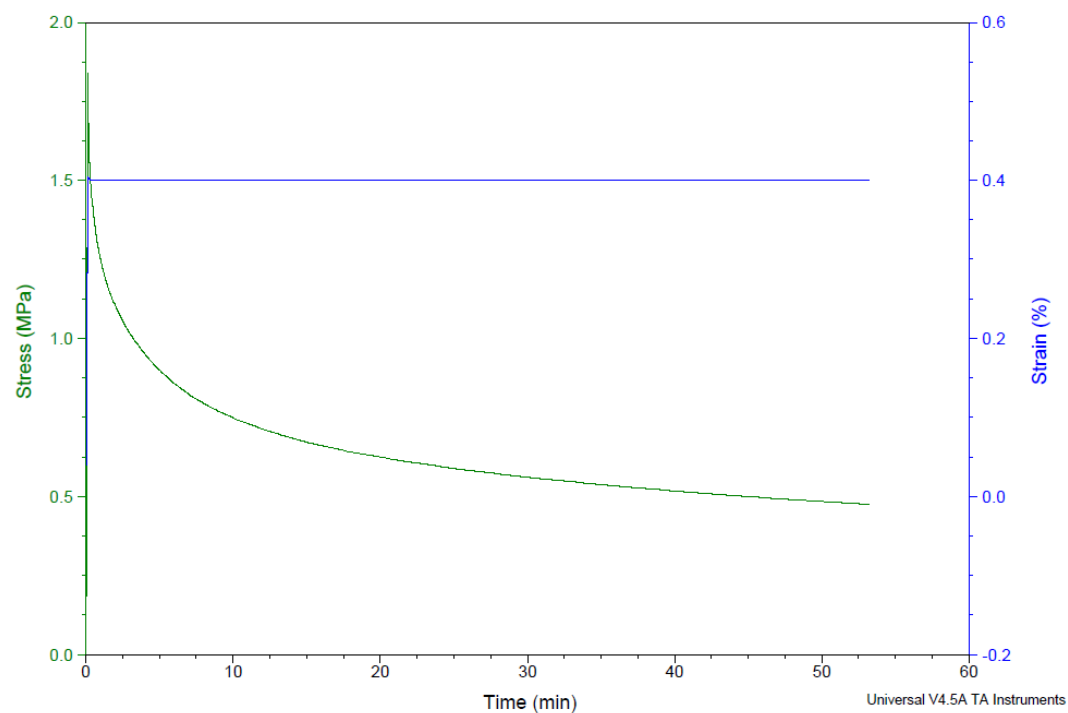


## Zkouška vzorku 2 – relaxace napětí

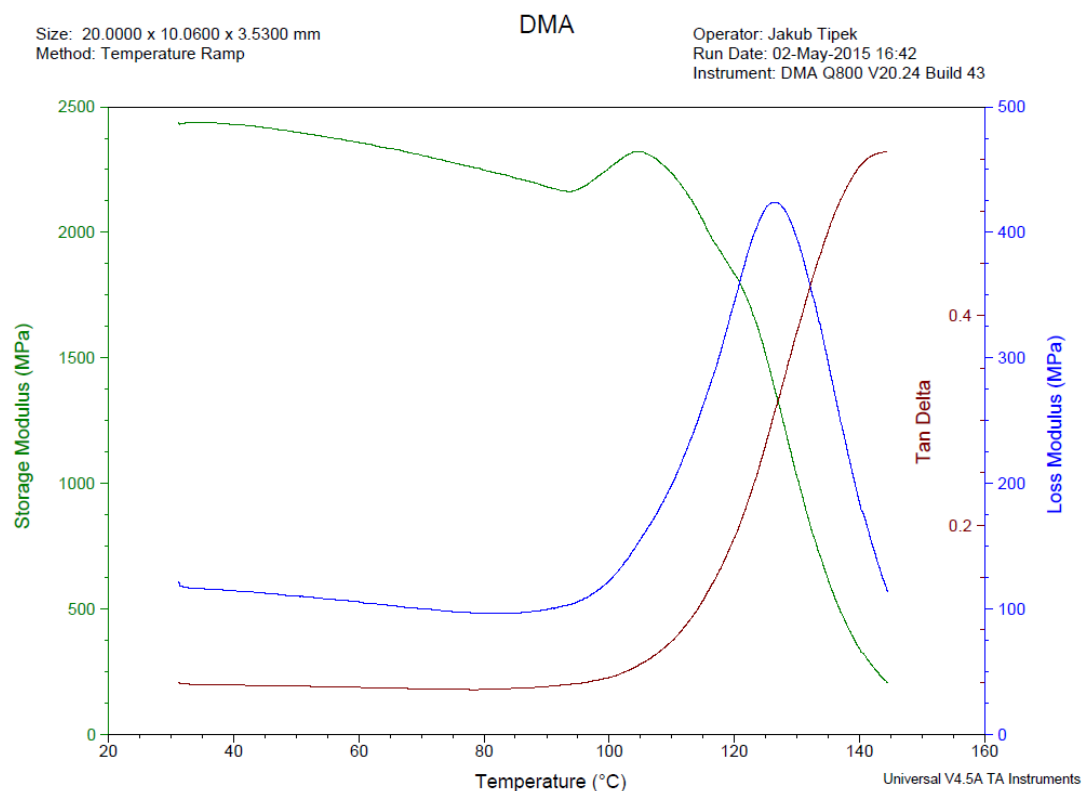
Size: 20.0000 x 10.0100 x 3.4800 mm  
Method: Stress Relaxation

DMA

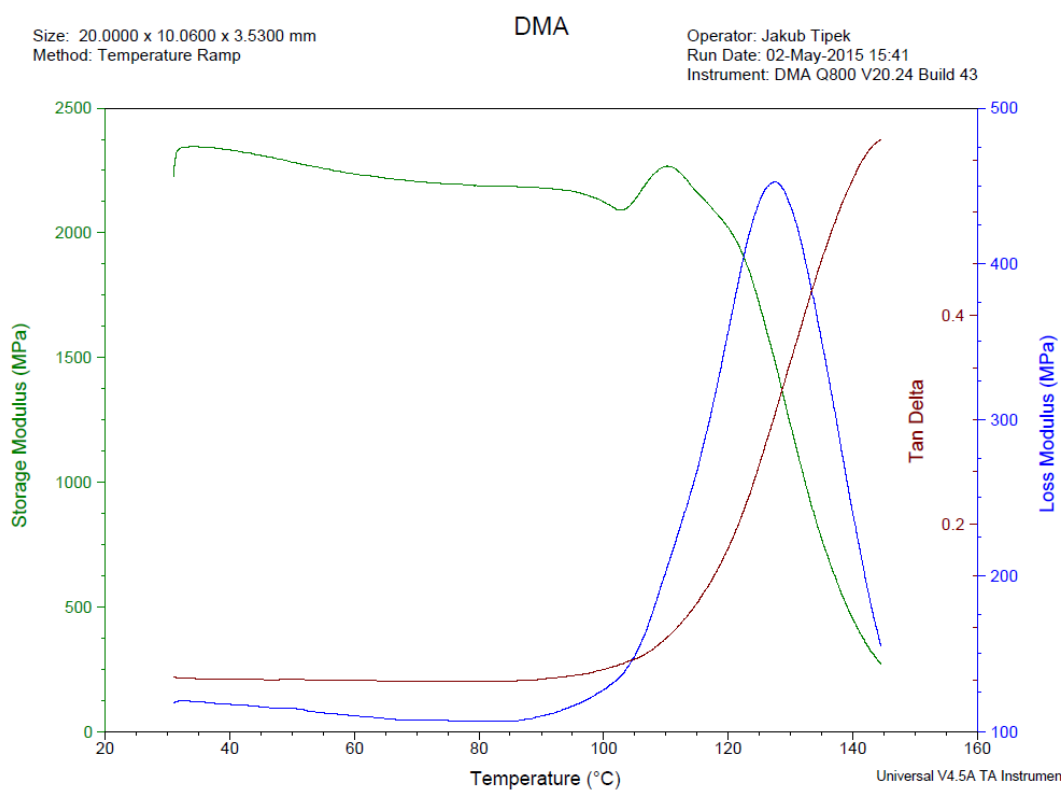
Operator: Jakub Típek  
Run Date: 04-May-2015 14:32  
Instrument: DMA Q800 V20.24 Build 43



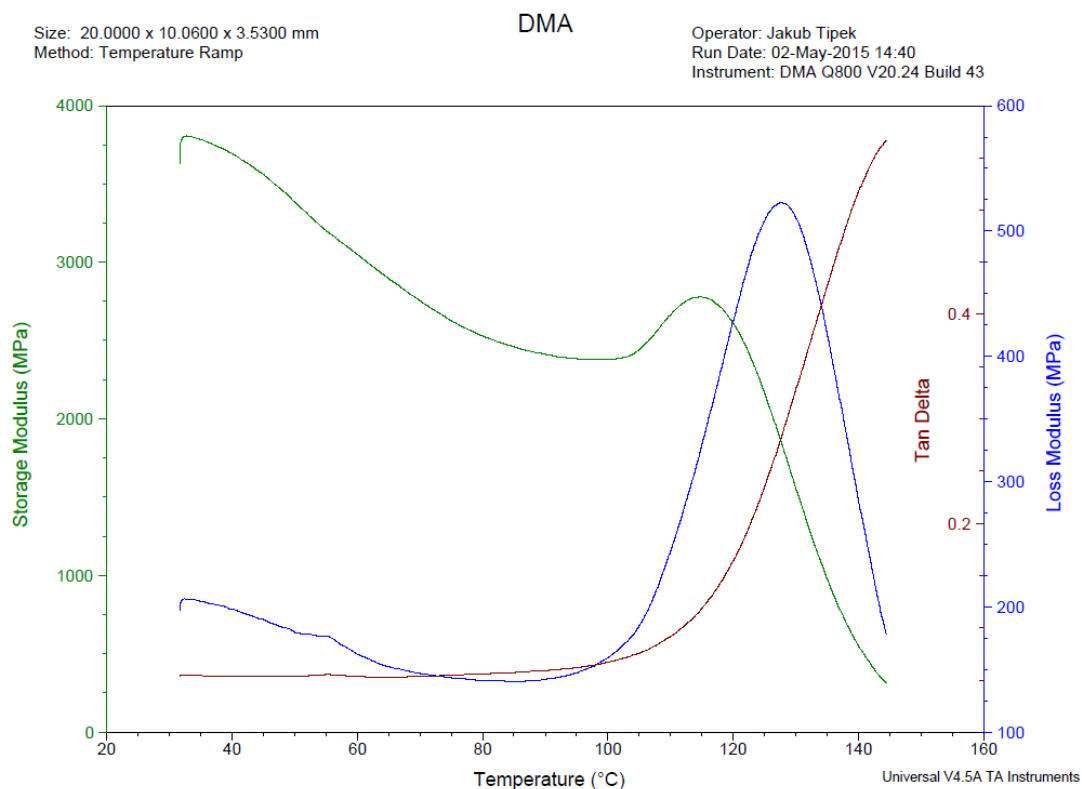
### Zkouška vzorku 3 – namáhání konstantní frekvencí 20 Hz za vzrůstající teploty



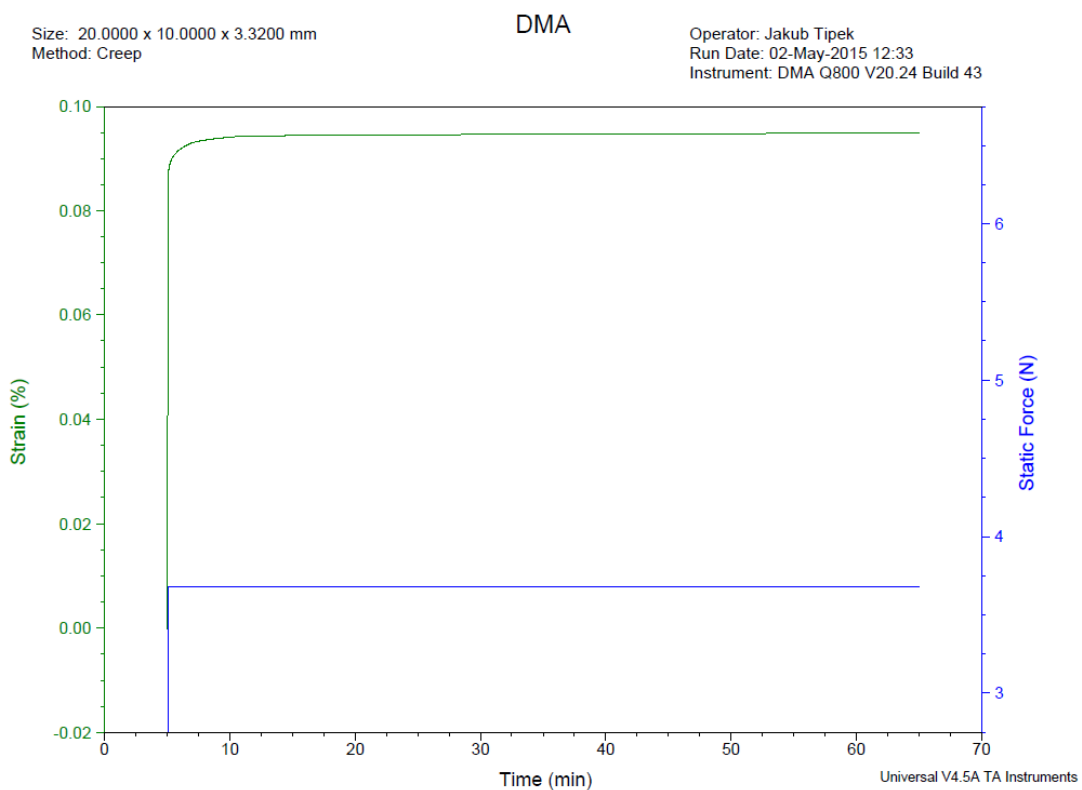
### Zkouška vzorku 3 – namáhání konstantní frekvencí 40 Hz za vzrůstající teploty



### Zkouška vzorku 3 – namáhání konstantní frekvencí 60 Hz za vzrůstající teploty



### Zkouška vzorku 3 – kríповá zkouška se zatížením 1 MPa



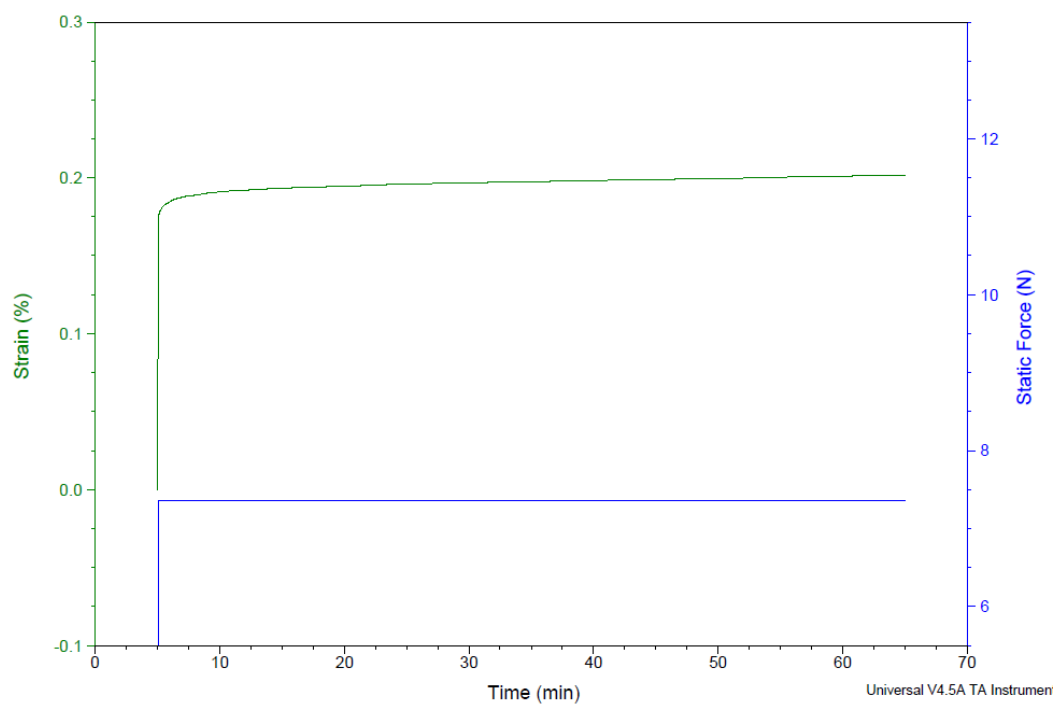


### Zkouška vzorku 3 – kríková zkouška se zatížením 2 MPa

Size: 20.0000 x 10.0000 x 3.3200 mm  
Method: Creep

DMA

Operator: Jakub Típek  
Run Date: 02-May-2015 11:23  
Instrument: DMA Q800 V20.24 Build 43

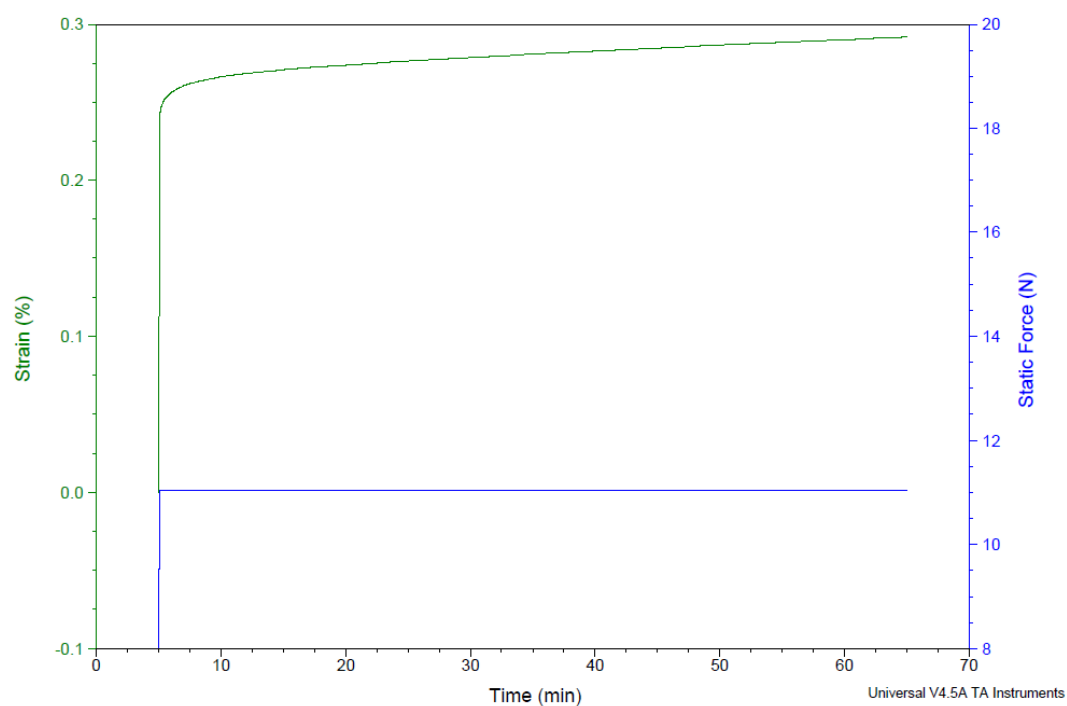


### Zkouška vzorku 3 – kríková zkouška se zatížením 3 MPa

Size: 20.0000 x 10.0000 x 3.3200 mm  
Method: Creep

DMA

Operator: Jakub Típek  
Run Date: 02-May-2015 10:14  
Instrument: DMA Q800 V20.24 Build 43

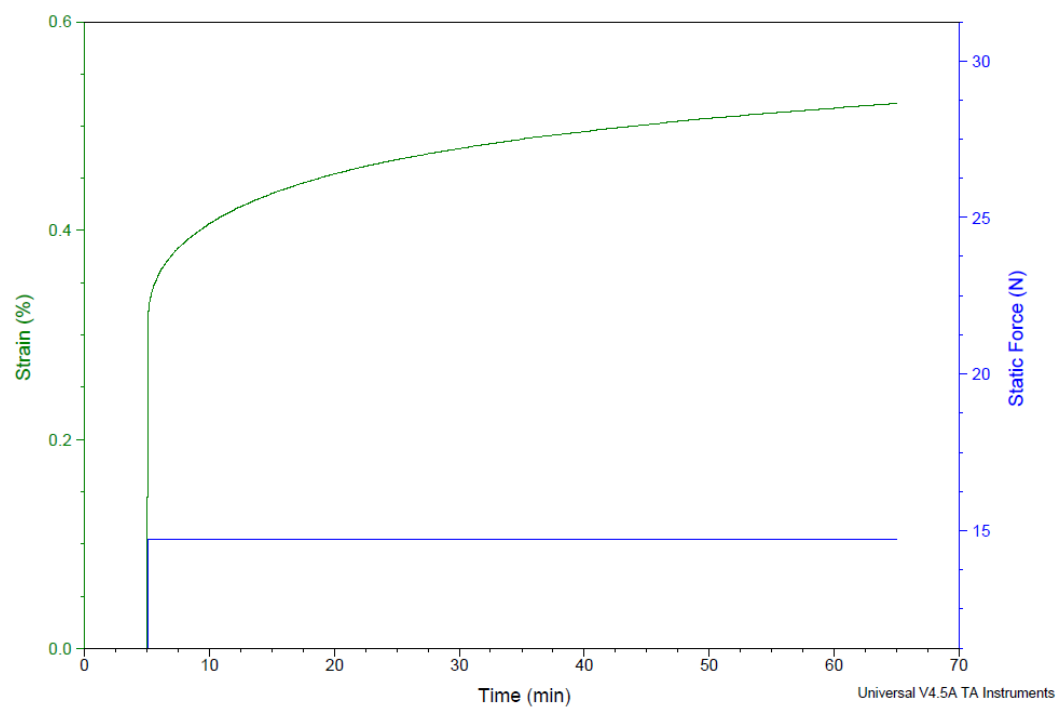


## Zkouška vzorku 3 – křipová zkouška se zatížením 4 MPa

Size: 20.0000 x 10.0000 x 3.3200 mm  
Method: Creep

DMA

Operator: Jakub Típek  
Run Date: 02-May-2015 09:00  
Instrument: DMA Q800 V20.24 Build 43



## Zkouška vzorku 3 – relaxace napětí

Size: 20.0000 x 10.0200 x 2.9800 mm  
Method: Stress Relaxation

DMA

Operator: Jakub Típek  
Run Date: 03-May-2015 16:20  
Instrument: DMA Q800 V20.24 Build 43

