

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ



HODNOCENÍ TEČENÍ

UHLÍKOVÝCH KOMPOZITŮ

S VYUŽITÍM OPTICKÉHO MĚŘENÍ DEFORMACE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Marcel Adorna

Praha, 2015



**K618 .....Ústav mechaniky a materiálů**

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Marcel Adorna**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**B 3710 – AUT – Automatizace a informatika**

Název tématu (česky): **Hodnocení tečení uhlíkových kompozitů s využitím optického měření deformace**

Název tématu (anglicky): Full-field Strain Evaluation of Carbon Fibre Composite under Constant Stress

**Zásady pro vypracování**

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

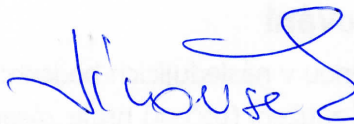
- Znalost deformační odezvy v čase na konstantní zatížení (tečení) hraje zásadní roli při posuzování nově navržených kompozitních materiálů používaných v leteckém průmyslu.
- Cílem bakalářské práce je popis tečení krátkovláknového uhlíkového kompozitu na základě optických měření a vyhodnocování polí deformací v průběhu experimentu.
- Použijte metodu digitální korelace obrazu (DIC) pro mapování deformací na povrchu testovaných vzorků.
- Výsledky optických měření porovnejte s deformací získanou extenzometrem.
- Zvolte vhodný analytický model tečení materiálu a identifikujte jeho materiálové parametry.


- Rozsah grafických prací: Dle pokynů vedoucího
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: S.V. Lomov et al. Compos. Pt. A-Appl. Sci. Manuf. 39(8), 2008, pp:1232–1244  
B.D. Lucas, T.Kanade, An iterative image registration technique with an application to stereo vision. Proc. of Imaging understanding workshop, 1981, pp 121-130  
W.N. Sharpe, Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics, 2008

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Daniel Kytýř, Ph.D.**


Datum zadání bakalářské práce: **25. září 2014**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **24. srpna 2015**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

  
prof. Ing. Ondřej Jiroušek, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu mechaniky a materiálů

  
prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

  
Marcel Adorna  
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... **25. 09. 2014** .....

## Poděkování

Na úvod bych rád poděkoval Ing. Danielu Kytýřovi, Ph.D., vedoucímu práce, za čas, který mi věnoval během konzultací a za užitečné rady při psaní této práce. Dále děkuji Ústavu teoretické a aplikované mechaniky, AV ČR, v.v.i., který mi dokázal zajistit nezbytné zázemí pro realizaci praktické části této práce a také jeho pracovníkům Ing. Petru Zlámalovi Ph.D, Ing. Tomáši Doktorovi, Ing. Ivanu Jandějskovi a dalším.

Tato práce vznikla za podpory grantu studentské grantové soutěže SGS15/225/OHK2/3T/16 a rozvojového grantu 1051505F014 RPMT 2015 43e.

Nelze opomenout poděkovat také rodině a přátelům za jejich podporu a důvěru, kterou ve mě vkládali po celé bakalářské studium.

# Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou v závěru studia na ČVUT v Praze, Fakultě dopravní.

**Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.**

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorských zákonů).

Praha, 20. srpna 2015

.....

Marcel Adorna

# HODNOCENÍ TEČENÍ UHLÍKOVÝCH KOMPOZITŮ S VYUŽITÍM OPTICKÉHO MĚŘENÍ DEFORMACE

MARCEL ADORNA

ČVUT v Praze, Fakulta dopravní

Praha, 2015

## Abstrakt

Předložená práce se zabývá měřením deformační odezvy kompozitních materiálů při zkoušce pevnosti v tahu a creepové zkoušce. K řešení byla použita metoda optické korelace obrazu a pole deformací byla vyhodnocována v průběhu experimentu. Byla provedena celá série těchto testů na vzorcích několika různých typů, měření bylo doplněna o tenzometrické měření. Byla vytvořena sada vyhodnocovacích scriptů ve výpočetním prostředí Matlab. Pro analytický popis průběhu tečení byl jako nejlépe odpovídající použit Findleyho model. Dále byl sledován vliv úpravy výrobní technologie a geometrie vzorků na konzistentnost naměřených dat a mechanické vlastnosti materiálu. Výsledky této práce tak ukazují možnost využití tohoto materiálu v leteckém průmyslu v méně zatěžovaných částech konstrukce.

## Klíčová slova

kompozit s uhlíkovými vlákny, digitální korelace obrazu, vyhodnocování v průběhu experimentu, Findleyho model, creep

FULL-FIELD STRAIN EVALUATION OF CARBON FIBRE  
COMPOSITE UNDER CONSTANT STRESS

MARCEL ADORNA

CTU in Prague, Faculty of Transportation Sciences

Prague, 2015

## **Abstract**

In this thesis measurements and results of creep behaviour of composite with polyphenylene sulphide matrix reinforced by chopped poly-acrylonitrile carbon fibres (C/PPS) are presented. Strain was evaluated based on optical measurement and presented in form of strain fields obtained employing digital image correlation method and contact measurement using strain gauges. Creep compliance-time data were also fitted by Findley's creep law for polymers to evaluate model parameters and to analyse applicability of the model for PPS polymer reinforced by chopped carbon fibres. Optimization of manufacturing process and the sample geometry has positive effect on consolidation of mechanical properties. The results of this study demonstrate possibility of usage of chopped fibre composite for aerospace industry application especially for less loaded parts with complex geometry.

## **Keywords**

carbon-fiber composite, digital image correlation, real time evaluation, Findley's model, creep

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>12</b>
1.1	Motivace . . . . .	12
1.2	Cíle práce . . . . .	13
<b>2</b>	<b>Seznámení s problematikou a použitými metodami</b>	<b>14</b>
2.1	Kompozitní materiály . . . . .	14
2.1.1	Rozdělení kompozitů . . . . .	16
2.1.2	Kompozit C/PPS . . . . .	18
2.2	Využití kompozitů . . . . .	19
2.2.1	Kompozity v leteckém průmyslu . . . . .	19
2.3	Materiálové zkoušky . . . . .	20
2.3.1	Zkouška pevnosti v tahu . . . . .	21
2.3.2	Creepová zkouška . . . . .	22
2.4	Optická korelace obrazu . . . . .	26
2.4.1	Základní princip . . . . .	26
2.4.2	Vzájemná korelace . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Příprava a průběh měření</b>	<b>32</b>
3.1	Popis vzorků . . . . .	34
3.2	Experimentální zařízení pro tahovou zkoušku . . . . .	35
3.3	Experimentální zařízení pro creepovou zkoušku . . . . .	35
3.4	Tenzometrická měření . . . . .	37
3.5	Správné uchycení a nasvětlení vzorku . . . . .	38



<b>4</b>	<b>Zpracování naměřených dat</b>	<b>39</b>
4.1	Vyhodnocování v průběhu experimentu . . . . .	39
4.2	Zdrojová data . . . . .	42
4.2.1	Záznam z přístroje Instron pro tahovou zkoušku . . . . .	42
4.2.2	Optický záznam posuvů . . . . .	42
4.2.3	Záznam tenzometru . . . . .	43
4.3	Hodnotící parametry . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Výsledky</b>	<b>45</b>
5.1	Pilotní testy . . . . .	45
5.1.1	Tahová zkouška . . . . .	45
5.1.2	Creepová zkouška . . . . .	46
5.2	Testy rozšířených vzorků . . . . .	48
5.2.1	Tahová zkouška . . . . .	48
5.2.2	Creepová zkouška . . . . .	49
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>Cíle do budoucna</b>	<b>57</b>
	<b>Literatura</b>	<b>58</b>

# Seznam obrázků

2.1	Synergické chování kompozitu . . . . .	15
2.2	Příklady uspořádání vláken . . . . .	17
2.3	Zastoupení jednotlivých materiálů v Boeingu 787 . . . . .	19
2.4	Diagram napětí-deformace . . . . .	21
2.5	Orientační schéma creepové křivky . . . . .	22
2.6	Mřížka sledovaných bodů na povrchu vzorku s náhodnou texturou . . . . .	26
2.7	Mřížka sledovaných bodů na povrchu vzorku s náhodnou texturou . . . . .	27
2.8	Znázornění matice korelovaných bodů, referenčních subsetů a offsetů . . . . .	28
2.9	Detail jednotlivých oblastí kolem korelovaného bodu . . . . .	28
3.1	Pracovní postup experimentální části práce . . . . .	33
3.2	Povrch vzorku z peletek typu Carbon AS4/PPS se zesílenými konci . . . . .	34
3.3	Experimentálního zařízení pro tahovou zkoušku . . . . .	35
3.4	Vizualizace zařízení pro creepovou zkoušku . . . . .	36
3.5	Experimentální zařízení pro creepovou zkoušku . . . . .	37
4.1	Vývojový diagram korelační procedury probíhající v reálném čase . . . . .	41
5.1	Graf závislosti naměřené deformace na čase $t$ . . . . .	46
5.2	Graf závislosti creepové poddajnosti na čase $t$ . . . . .	47
5.3	Graf creepové poddajnosti- Findleyho model . . . . .	48
5.4	Graf závislosti napětí na deformaci při zkoušce pevnosti v tahu . . . . .	49
5.5	Graf závislosti naměřené deformace na čase $t$ . . . . .	50
5.6	Graf závislosti creepové poddajnosti na čase $t$ . . . . .	50
5.7	Graf creepové poddajnosti- Findleyho model . . . . .	51
5.8	Graf závislosti deformace odečtené z tenzometru na čase $t$ . . . . .	52

5.9 Graf creepové poddajnosti z tenzometru - Findleyho model . . . . .	53
5.10 Mapy plošných deformací vzorků 1 . . . . .	54
5.11 Mapy plošných deformací vzorků 2 . . . . .	55

# Seznam tabulek

5.1	Mez pevnosti vyhodnocená na základě tahové zkoušky . . . . .	45
5.2	Youngův modul pružnosti vyhodnocený na základě tahové zkoušky . . . . .	46
5.3	Parametry $b_o$ a $b_1$ vyhodnocené na základě Findleyho modelu . . . . .	47
5.4	Youngův modul pružnosti a mez pevnosti vyhodnocené z tahové zkoušky . . . . .	49
5.5	Parametry $b_o$ a $b_1$ vyhodnocené na základě Findleyho modelu . . . . .	51
5.6	Parametry vyhodnocené na základě Findleyho modelu- tenzometrická měření . . . . .	53

# Kapitola 1

## Úvod

Celá historie lidstva je neodmyslitelně spojena s využíváním různých druhů materiálů. Epoque vývoje lidské společnosti byly v minulosti s konkrétními materiály svázány natolik úzce, že nesly i stejný název. Od doby, kdy nejpokročilejší výrobky byly zhotovovány ze dřeva, kamene a primitivní keramiky urazilo lidstvo velmi dlouhou cestu. Výroba stále nových materiálů je velmi úzce spojena s jejich uplatněním v různých odvětvích průmyslu. Prudký rozvoj materiálového inženýrství posledních desetiletí umožnil vznik konstrukcí, které vykazují vyšší pevnost, tvarovou stálost a zároveň nižší hmotnost než konstrukce zhotovené z konvenčních materiálů. V současné době je již zcela běžné vyvíjet materiál s konkrétními mechanickými vlastnostmi k předem definovanému účelu, na základě požadavku určitého průmyslového odvětví. Aby bylo možné materiál popsat, je zcela nezbytné nejprve přesně identifikovat, kvantifikovat a následně analyzovat mechanické procesy probíhající v jeho struktuře. Přestože dnešní doba poskytuje výběr z velkého množství materiálů různých vlastností a struktur, vývoj se stejně jako v jiných oborech nezastavuje a na trh se dostávají stále nové materiály.

### 1.1 Motivace

Motivací pro tvorbu této práce bylo bližší pochopení problematiky související s chováním dílů vyrobených z kompozitních materiálů při konstantním zatěžování za zvýšené teploty s využitím vlastních experimentálních a vyhodnocovacích procedur. Hlubší poznání odezvy materiálů právě na tento typ zatěžování je velmi důležité pro tvorbu odolných

konstrukcí zejména v leteckém a automobilovém průmyslu. Kompozitní materiály jako takové jsou pak v současné době využívány stále častěji pro výrobu stále složitějších součástí a dílů, a proto je přesná analýza jejich mechanických vlastností stále důležitější již při tvorbě návrhu těchto součástí a pro jejich bezpečný provoz.

## 1.2 Cíle práce

Cílem této práce je přesný popis tečení několika různých typů vzorků vyrobených z krátkovláknového uhlíkového kompozitu typu C/PPS na základě optických měření a vyhodnocování deformací v průběhu experimentu. Pro vyhodnocování deformace v průběhu creepové zkoušky bylo upraveno jádro programu pro optickou korelaci obrazu vyvinuté na Ústavu teoretické a aplikované mechaniky, AV ČR, v.v.i. tak, aby bylo možné sledovat vývoj deformace vzorku již po dobu trvání experimentu.

# Kapitola 2

## Seznámení s problematikou a použitými metodami

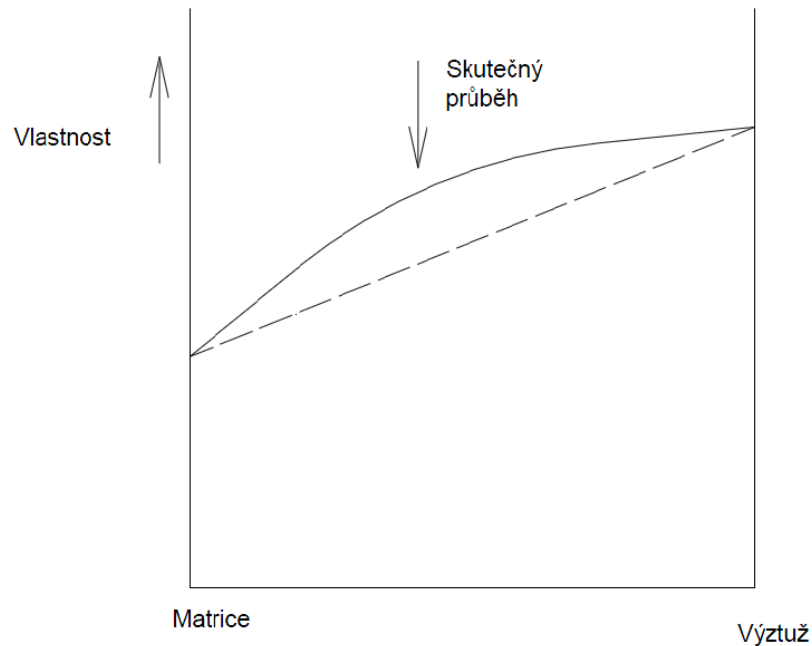
Pro pochopení problematiky testování kompozitních materiálů a jejich testování je nejprve třeba seznámit se se základními pojmy a metodami, které jsou využity v této práci a mají souvislost s daným tématem. V této kapitole jsou popsány samotné kompozitní materiály, jejich dělení, creepové a tahové zkoušky a optické měření deformace.

### 2.1 Kompozitní materiály

Kompozitními materiály označujeme heterogenní materiály, které jsou tvořeny ze dvou nebo více materiálových složek, neboli fází. Nespojité fáze kompozitního materiálu zajišťující pevnost a tvrdost se nazývá výztuž. Výztuž, nejčastěji ve formě vláken nebo malých částíček, je vložena do spojitě fáze, dodávající výslednému materiálu tvarovou stálost a poskytující výztuži vnější ochranu. Tato pojivá složka kompozitu se nazývá matrice. Při výrobě kompozitů se snažíme dosáhnout takové kombinace matrice a výztuže, která vykazuje lepší mechanické vlastnosti než její jednotlivé komponenty. Tento jev se nazývá *synergický efekt* (Obrázek 2.1).

Již začátkem 60. let 20. století vznikla samostatná vědní disciplína zabývající se kompozitními materiály, ale jejich princip už byl znám mnohem dříve. Například jedním z prvních kompozitních materiálů, které vytvořil člověk byla zeď domu z jílu a slámy.

Jíl zde plnil roli matrice a sláma sloužila jako výztuž. Ne všechny kompozitní materiály jsou ovšem dílem člověka. Typickým příkladem přírodního kompozitního materiálu je dřevo. Zde je matrice tvořena ligninem a funkci výztuže plní vlákna celulózy.



Obrázek 2.1: Synergické chování kompozitu

Vlastnosti kompozitů jsou závislé nejen na vlastnostech jednotlivých fází a jejich vzájemné adhezi, ale také na výrobním postupu. V porovnání s homogenními materiály vykazují kompozity vyztužené dlouhými vlákny různé vlastnosti v závislosti na směru vnějšího namáhání (*anizotropie*).

Přestože existuje nepřehledné množství různých kompozitů, je možné nalézt několik obecných výhod a nevýhod při jejich využití [1].

Výhody kompozitních materiálů:

- vysoká tuhost a pevnost,
- odolnost vůči korozi,
- malá hustota,



- vysoká statická a dynamická pevnost,
- odolnost vůči nárazu,
- možnost výroby geometricky složitých dílů.

Nevýhody kompozitních materiálů:

- náročná výroba a následné opracovávání,
- kompozity vyztužené vlákny mají horší mechanické vlastnosti ve směru kolmém k uložení vláken,
- finančně nákladnější než konvenční materiály,

Je velmi obtížné nalézt přesné rozhraní mezi homogenními materiály a kompozity. O žádném známém homogenním materiálu nelze při bližším pohledu prohlásit, že je tvořen pouze jedinou složkou či prvkem. Aby bylo možné určitý materiál klasifikovat jako materiál kompozitní, musí být splněno několik podmínek. Jeho jednotlivé složky musí být rozlišitelné na makroúrovni, musí zachovávat svou identitu (nesmějí být vzájemně rozpustné) a rozhraní mezi nimi musí být fyzicky identifikovatelné [2].

Často je také uváděno, že podíl výztuže na celkovém objemu musí být vyšší než 5 % [3].

### 2.1.1 Rozdělení kompozitů

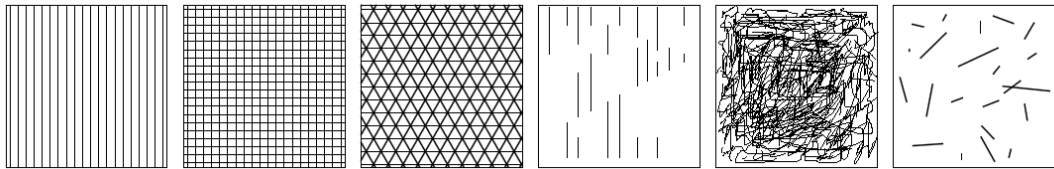
Jak již bylo naznačeno výše, kompozitních materiálů existuje velké množství, přičemž jednotlivé typy se mohou velmi lišit svými mechanickými vlastnostmi. Nejčastěji se tak kompozity rozdělují do skupin na základě:

- geometrie a orientace výztuže,
- materiálu výztuže,
- materiálu matrice,
- způsobu výroby matrice.

V krátkosti zde proto rozepíší pouze rozdělení na základě geometrie a orientace výztuže a typu matrice.

## Rozdělení podle výztuže [1]:

- Vláknové (viz. Obrázek 2.2)
  - dlouhovláknové
    - \* jednosměrové
    - \* vícesměrové
  - krátkovláknové
    - \* s náhodnou orientací
    - \* s přednostní orientací
- Částicové



Obrázek 2.2: Příklady uspořádání vláken: a)Jednosměrné uspořádání dlouhých vláken, b)dvousá orientace dlouhých vláken, c)vícesměrová výztuž, d)krátká vlákna s přednostní orientací, e)náhodná orientace vláken (netkaná textilie), f)krátká vlákna s náhodnou orientací

### Dlouhovláknová výztuž

Do této skupiny řadíme ty kompozity, u nichž je délka vláken mnohem menší než jejich průměr. Konkrétně musí platit  $L/D > 100$ <sup>1</sup>. Pokud jsou vlákna orientována jednosměrně, vykazuje kompozit v tomto směru mnohem větší pevnost než ve směru kolmém na orientaci vláken. Vrstva kompozitu s jednosměrně orientovanými vlákny se nazývá lamina, materiál vytvořený z několika lamin s různou orientací vláken se označuje jako laminát.

---

<sup>1</sup> $L$  - length (délka);  $D$  - diameter (průměr)

### **Krátkovláknová výztuž**

Pro krátkovláknové kompozity platí naopak  $L/D < 100$ . Pokud jsou krátká vlákna orientována náhodně, chová se kompozit téměř jako izotropní materiál.

### **Částicová výztuž**

Částice se nejčastěji vyrábějí mikromletím anorganických materiálů. Dalšími výrobními postupy lze získat vyztužující částice pravidelnějších tvarů, nejčastěji však kulovité a rektangulární. Materiály vyztužené částicemi vykazují stejné vlastnosti ve všech směrech namáhání a jsou tedy již zcela izotropní.

### **Rozdělení podle materiálu matrice**

Úkolem matrice je spojovat vyztužující složku, přenášet do ní vnější zatížení a chránit ji před okolními vlivy. Funkci pojiva by měla matrice vykonávat i po prvotních poruchách výztuže, její poměrné prodloužení při poruše celého materiálu by mělo být větší než mezní prodloužení výztuže. Matrice se nejčastěji vyrábí z polymerů, kovů, keramiky, uhlíku nebo skla.

### **Rozdělení podle materiálu výztuže**

Výztuž zajišťuje kompozitu díky své vlastní tuhosti a pevnosti dobré vlastnosti při vnějším namáhání. Pro správnou funkci výztuže je třeba zajistit dokonalou adhezi s materiálem matrice. Vlákna výztuže mohou být skleněná, uhlíková, polymerní, keramická nebo kovová.

## **2.1.2 Kompozit C/PPS**

Námi zkoumaný kompozitní materiál je složen z polyfenylen-sulfidové matrice vyztužené krátkými polyakrilonitrilovými uhlíkovými vlákny, zkráceně C/PPS<sup>2</sup>. Tento materiál je velmi odolný vůči chemickým vlivům, proti zvýšené teplotě okolí a dokonce ohni. Díky tomu je v poslední době stále častěji používán pro konstrukci částí letadel. Tyto jsou vyráběny velmi snadno technikou vstříkávání, což má ovšem za následek vytváření elementárních buněk kompozitu ve struktuře materiálu s různou orientací krátkých vláken. Ostře vymezené hranice mezi těmito buňkami pak způsobují snížení pevnosti a odolnosti výsledného materiálu [4].

---

<sup>2</sup>C - carbon (uhlík); PPS - polyphenylene sulphide (polyfenylen-sulfid)

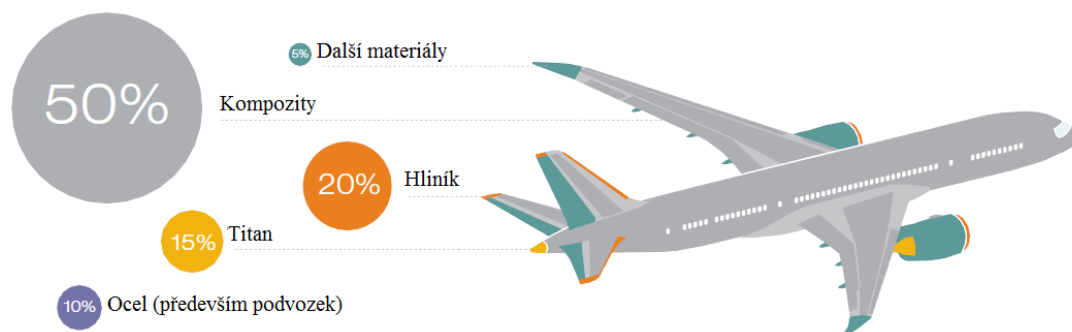
## 2.2 Využití kompozitů

V posledních desetiletích se začaly kompozitní materiály velmi široce uplatňovat ve většině průmyslových odvětví, zejména pak ve strojírenství. Jejich nižší hmotnost, větší tuhost a pevnost a mnohé jiné výhody v porovnání s konvenčními materiály zapříčinily jejich částečné nebo úplné nahrazení.

Dnes jsou již kompozity velmi široce využívány, zejména při výrobě různých dopravních prostředků, strojních součástek a ochranných prostředků. Všeobecně je známé využití různých druhů laminátů při výrobě malých a středních plavidel. Stále častěji jsou kompozity využívány i v automobilovém průmyslu a to zejména díky své nízké hmotnosti. S výhodou je lze také využít pro výrobu ochranných přileb, lehkých a odolných sportovních pomůcek a také neprůstřelných vest pro ozbrojené složky [5].

### 2.2.1 Kompozity v leteckém průmyslu

Mezi nejdůležitější průmyslové oblasti pro aplikaci vláknových kompozitů patří výroba vojenských a komerčních letadel, pro které je snížení hmotnosti naprosto kritickým faktorem ovlivňujícím jejich konečnou rychlost a velikost provozních nákladů [6]. Hmotnosti dílů z uhlíkového kompozitu je oproti dílům z hliníku dokonce až o 20 % nižší [7]. Náklady na výrobu kompozitních materiálů jsou ovšem výrazně vyšší než náklady na konvenční materiály, z tohoto důvodu je jejich využití výhodné pouze pokud je jich využito dostatečně velké množství.



Obrázek 2.3: Zastoupení jednotlivých materiálů v Boeingu 787 [7]

Průkopníkem na poli využívání kompozitních materiálů v komerčním letectví byla společnost Airbus. Její letoun Airbus A380 z roku 2006 je tvořen z 25 % kompozitním materiálem. Hlavními kompozitními částmi tohoto letounu jsou klapky, stabilizátory, ocasní plochy a mnoho dalších. Ještě dále se pustila firma Boeing se svými dopravními letouny Boeing 777 a Boeing 787 Dreamliner, který je tvořen dokonce z 50 % polymery vyztuženými uhlíkovými vlákny. Rozložení materiálů v tomto letounu můžete vidět na obrázku 2.3 [5, 7].

## 2.3 Materiálové zkoušky

Zjišťování mechanických vlastností hraje klíčovou roli jak při výzkumu a vývoji nových materiálů, tak i při ověřování vlastností materiálů již známých. Aby bylo možné přesně určovat vlastnosti konstrukčních materiálů, je třeba je podrobovat normalizovaným materiálovým zkouškám. Tyto zkoušky spočívají v zatěžování vzorku mechanickou silou a sledování deformační odezvy materiálu. Velikost a charakter deformace závisí na velikosti a druhu namáhání při zkoušce.

Mechanické zkoušky můžeme rozdělit podle [6]:

- charakteru zatěžování (statické, dynamické)
- zjišťované vlastnosti (houževnatost, pevnost, tvrdost atp.)
- druhu konkrétního namáhání (tah, tlak, krut, střih atp.)
- teploty okolního prostředí

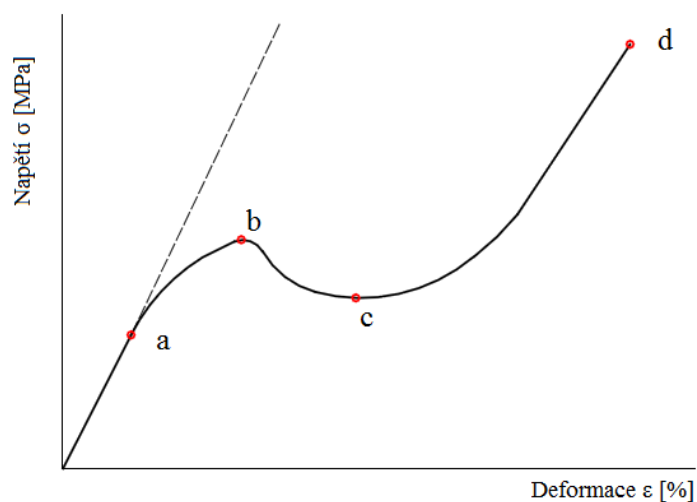
Způsob, jakým testujeme konkrétní materiál závisí na způsobu namáhání, kterému bude výrobek z daného materiálu vystaven v provozu. V této práci se dále zaměřuji hlavně na statické zkoušky pevnosti v tahu a na zkoušky materiálu při konstantním zatížení (tzv. creepová zkouška<sup>3</sup>).

---

<sup>3</sup>creep - tečení

### 2.3.1 Zkouška pevnosti v tahu

Jednou ze základních materiálových zkoušek je statická zkouška pevnosti v tahu, která se provádí na trhacím zařízení. Zkoumaný vzorek se upne do čelistí trhacího zařízení, z nichž jedna je vybavena siloměrným čidlem. Druhá čelist je pohyblivá a je spojena s pohonem. Pohyblivá čelist se postupně oddaluje, čímž je vzorek zatěžován silou. Tahová zkouška se většinou provádí až do přetržení vzorku. Výsledkem tahové zkoušky je závislost mezi silou a prodloužením upnutého vzorku, která se nejčastěji zobrazuje pomocí pracovního diagramu napětí-deformace (obrázek 2.4) [8].



Obrázek 2.4: Diagram napětí-deformace s vyznačenými body: a - mez úměrnosti, b - horní mez kluzu, c - dolní mez kluzu, d - bod lomu [8]

Ze získaného diagramu lze následně určit celou řadu materiálových vlastností, mezi nimi modul pružnosti v tahu (Youngův modul), mez kluzu, mez pevnosti, tažnost, houževnatost atd. Jako příklad zde uvedu vyhodnocení modulu pružnosti v tahu. V počáteční fázi zatěžování je závislost napětí na deformaci lineární a platí zde Hookův zákon:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.1)$$

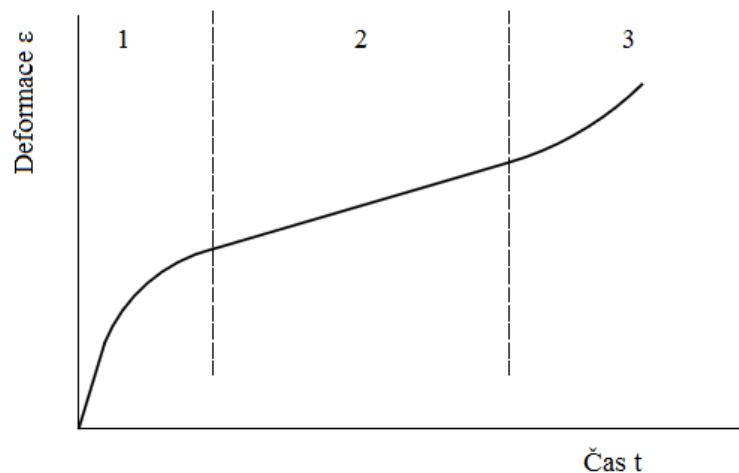
kde  $\sigma$  je napětí,  $\varepsilon$  je deformace a  $E$  je Youngův modul pružnosti.

Youngův modul pak lze jednoduše získat jako směrnici tečny ke křivce v bodě a. Napětí,

působící na vzorek v oblasti platnosti Hookova zákona vyvolává jeho okamžitou elastickou deformaci. Po odlehčení vzorku dojde k vymizení elastické deformace a rozměry vzorku jsou stejné jako před namáháním. Po překročení meze úměrnosti je již deformace plastická a nevratná.

### 2.3.2 Creepová zkouška

Na materiálech, u kterých je vyžadována velká odolnost při vysokých teplotách se často provádějí zkoušky při dlouhodobém konstantním zatížení. Během těchto zkoušek dochází k plastické deformaci vzorků při zatížení nižším, než jaké odpovídá mezi kluzu zjištěné na stejném materiálu při tahové zkoušce. Tato časově závislá plastická deformace způsobená konstantním zatížením při zvýšené teplotě se nazývá *creep*. Deformace vyvolaná konstantním zatížením jako funkce času je zobrazena na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: Orientační schéma creepové křivky

Nejrozšířenější zkouškou vyvinutou pro studium časově závislých mechanických vlastností materiálu při zvýšených teplotách je dlouhodobá creepová zkouška při konstantním zatížení. Experimentálně naměřená závislost deformace na čase zatěžování se rozděluje na tři základní stádia. Nejprve je nutné definovat dva procesy probíhající ve struktuře materiálu v průběhu celé zkoušky.

*Deformační zpevnování* je proces při kterém vlivem vnějšího zatížení roste plastická deformace a tím i koncentrace poruch v materiálu. Tyto poruchy pak brání pohybu dislokací, což způsobuje větší odpor materiálu proti deformaci a jeho zvýšenou tuhost.

*Deformační zotavení* je proces při kterém se materiál naopak vlivem zvýšené teploty stává měkčím a znovu získává schopnost plasticky se deformovat.

V prvním stádiu (**1**) se výrazně mění elastická i plastická deformace; rychlost deformace prudce klesá vlivem nárůstu deformačního zpevnění. Ve druhém stádiu (**2**) dosahuje rychlost deformace minimální hodnoty a dále zůstává konstantní, což je způsobeno rovnováhou mezi deformačním zpevněním a zotavovacími procesy. Ve třetím stádiu (**3**) dochází již k výrazné redukci průřezu vzorku což vede ke zvýšení skutečného napětí a deformace a následně k lomu.

#### **Materiálové charakteristiky získané z creepové zkoušky:**

- deformace v závislosti na čase  $t$ :  $\varepsilon = f(\sigma, t, T)$ , kde teplota  $T$  a napětí  $\sigma$  jsou konstantní
- rychlost deformace v závislosti na čase:  $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$
- čas do porušení vzorku
- mez pevnosti při tečení:  $\sigma_R = f(\sigma, T, t)$  udává napětí, které při dané teplotě vyvolá porušení vzorku za stanovený čas
- mez tečení:  $\sigma_{Al} = f(\sigma, T, \varepsilon)$ , velikost napětí, které je třeba k vyvolání určité deformace při stanovené teplotě a času

K popisu creepové zkoušky je nutné sestavit analytický model. Lze sestavit velmi širokou škálu modelů v závislosti na požadované rozlišovací úrovni. Na úrovni mikrostruktury, používané pro popis tečení materiálů, lze rozlišit dva základní mechanismy: *difuzní creep* a *dislokační creep*.

V této práci se strukturními změnami na mikroúrovni nezabýváme, k popisu použijeme model na úrovni makrostruktury (experimentu). Až na několik výjimek platí pro celkovou deformaci vzorku během zkoušky s dostatečnou přesností následující rovnice:

$$\varepsilon = \varepsilon_o + \varepsilon_c \quad (2.2)$$



kde:

$\varepsilon$  je celková deformace vzorku v čase  $t$

$\varepsilon_o$  je konstantní deformace vyvolaná počátečním zatížením

$\varepsilon_c$  je časově závislá deformace vyvolaná tečením vzorku v čase  $t$

Funkce popisující časově proměnnou deformaci  $\varepsilon_c$  může být velmi složitá, její průběh pak lze modelovat použitím exponenciálních funkcí, jak je patrné z obrázku 2.5. Pro popis chování polymerních materiálů byl vytvořen zjednodušený model deformace, známý jako **Findleyho model** [9]. V tomto zjednodušení je deformace  $\varepsilon_c$ :

$$\varepsilon_c = m \left( \frac{t}{t_o} \right)^{n_F} \quad (2.3)$$

kde:  $m$  je bezrozměrný materiálový parametr závislý na počátečním zatížení a teplotě

$n_F$  je bezrozměrný *Findleyho materiálový parametr* nezávislý na počátečním zatížení

$t$  je čas ve kterém deformaci sledujeme v hodinách

$t_o$  je 1 hodina (použita pro normalizaci)

Po dosazení do rovnice (2.1) tak lze Findleyho model tečení polymerního materiálu zapsat ve tvaru:

$$\varepsilon = \varepsilon_o + mt^{n_F} \quad (2.4)$$

Bylo prokázáno, že tento model lze velmi dobře aplikovat na popis tečení nejen polymerních materiálů, ale také v této práci zkoumaných kompozitů [4]. Konstanty  $m$  a  $n_F$  je možné nalézt na základě experimentálních dat [9].

Creepovou křivku lze s velkou přesností modelovat pomocí **Principu superpozice**. Při aplikaci tohoto modelu jsou 1. a 2. stádium výše popsané creepové křivky popisováno zvlášť a celková podoba křivky je získána jejich následným součtem. Pro celkovou deformaci pak platí:

$$\varepsilon = \varepsilon_o + \varepsilon_t(1 - e^{(rt)}) + t\dot{\varepsilon}_{SC}. \quad (2.5)$$

Kde  $\varepsilon_o$  je počáteční deformace,  $\varepsilon_t$  je přechodová deformace mezi 1. a 2. stádiem,  $r$  je konstanta charakterizující 2. stádium a  $\dot{\varepsilon}_{SC}$  udává rychlost deformace odpovídající 2. stádiu. Pokud je čas trvání zkoušky  $t$  delší, než doba trvání prvního stádia a deformace vzorku je funkcí konstantního napětí  $\sigma$ , pak lze rovnici 2.5 přepsat do tvaru:

$$\varepsilon = \varepsilon_o + B\sigma^m t + D\sigma^n \quad (2.6)$$

Kde  $B$  a  $D$  jsou materiálové konstanty, které jsou určovány z experimentálních dat,  $m$  napěťový exponent pro 1. stádium,  $n$  napěťový exponent pro 2. stádium.

#### **Vyhodnocování zkoušky [4]:**

Pro popis chování námi zkoumaných vzorků lze s velkou výhodou použít již popsany Findleyho model. Deformace vzorku v daném čase lze převést na hodnoty creepové poddajnosti dosazením do vztahu:

$$J_c(t) = \frac{\varepsilon_c(t)}{\sigma_c} \quad (2.7)$$

Kde  $J_c(t)$  udává hodnotu creepové poddajnosti v čase  $t$  a  $\sigma_c$  je napětí v tahu. Creepovou poddajnost lze v čase aproximovat použitím Findleyho zákona pro tečení polymerů podle vzorce:

$$\overline{J_c(t)} = b_o t^{b_1} \quad (2.8)$$

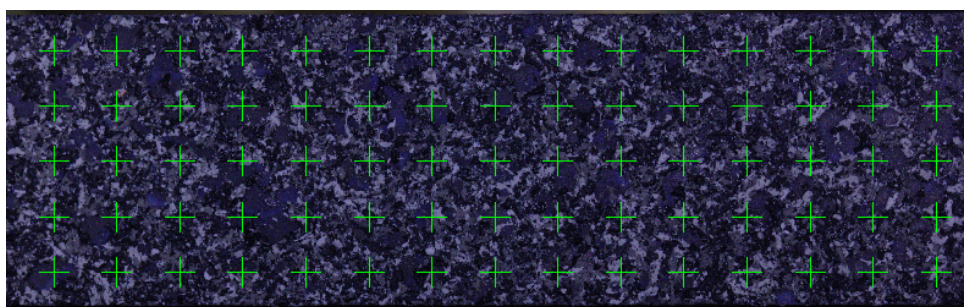
Kde  $\overline{J_c(t)}$  je predikovaná hodnota creepové poddajnosti,  $t$  je čas,  $b_o$  a  $b_1$  jsou materiálové parametry stanovené regresí.

## 2.4 Optická korelace obrazu

Pro výše popsané materiálové testy je nutné velmi přesně měřit deformace vzorku. Měření deformací, které jsou typické pro kompozitní materiály, lze s velkou výhodou provádět pomocí metody optické korelace obrazu. Tato metoda umožňuje oproti extenzometrickým metodám bezkontaktní sledování celého 2D pole deformací vzorku. Optické měření deformací začalo být v praxi využíváno poměrně nedávno, vzhledem k velmi dobrým výsledkům se však jeho využívání velmi rychle rozšířilo [10].

### 2.4.1 Základní princip

Digitální korelace obrazu (zkratka DIC<sup>4</sup>) nám poskytuje kvalitativní i kvantitativní informaci o deformaci povrchu zkoumaného vzorku. Aby bylo možné tuto metodu v praxi aplikovat, je nutné v průběhu testu sledovat povrch vzorku pomocí digitální kamery nebo fotoaparátu. Objektiv sledovacího zařízení je nutné umístit tak, aby směřoval kolmo na plochu povrchu. Na povrchu vzorku musí být vytvořena dostatečně výrazná náhodná textura, kterou lze následně sledovat na všech snímcích pořízených v průběhu měření. Na prvním (referenčním) snímku je vytvořena matice bodů, ve kterých chceme sledovat deformaci vzorku. Tyto body jsou nejčastěji uspořádány v pravidelné mřížce, aby bylo možné sledovat pole deformací v celé ploše zkoumaného vzorku (Obrázek 2.6). Metoda optické korelace poté spočívá v porovnávání referenčního snímku s dalšími deformovanými snímky a hledání nové polohy bodů vyznačených na referenčním snímku (Obrázek 2.7).



Obrázek 2.6: Mřížka sledovaných bodů na povrchu vzorku s náhodnou texturou

Námi definovaný bod (neboli pixel<sup>5</sup>) na referenčním snímku nese informaci o stupni šedi

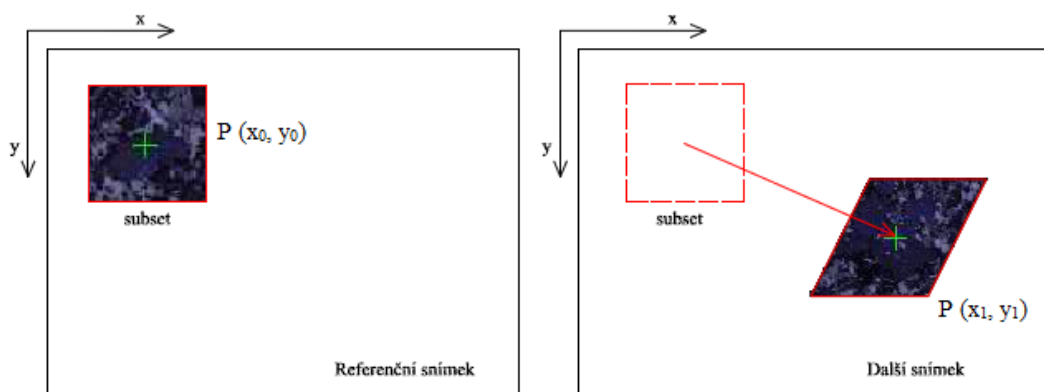
<sup>4</sup>DIC - *Digital image correlation* (Digitální korelace obrazu)

<sup>5</sup>pixel- zkratka z angl. *picture element* (obrazový prvek, dále zkracováno **px**)

v daném místě snímku, což je vstupní parametr pro výpočet korelace. Hledání pouze jednoho pixelu na každém dalším snímku je však nemožné, protože stejné úrovně šedi dosahuje příliš velký počet okolních pixelů, což zapříčiňuje chybnou identifikaci hledaných bodů. Abychom snížili pravděpodobnost výskytu těchto chyb, je pro určení posunutí bodu  $P$  porovnáván ne jeden bod z referenčního snímku, ale čtvercové okolí tohoto pixelu. Toto okolí, které se označuje jako tzv. *subset* má velikost v px:

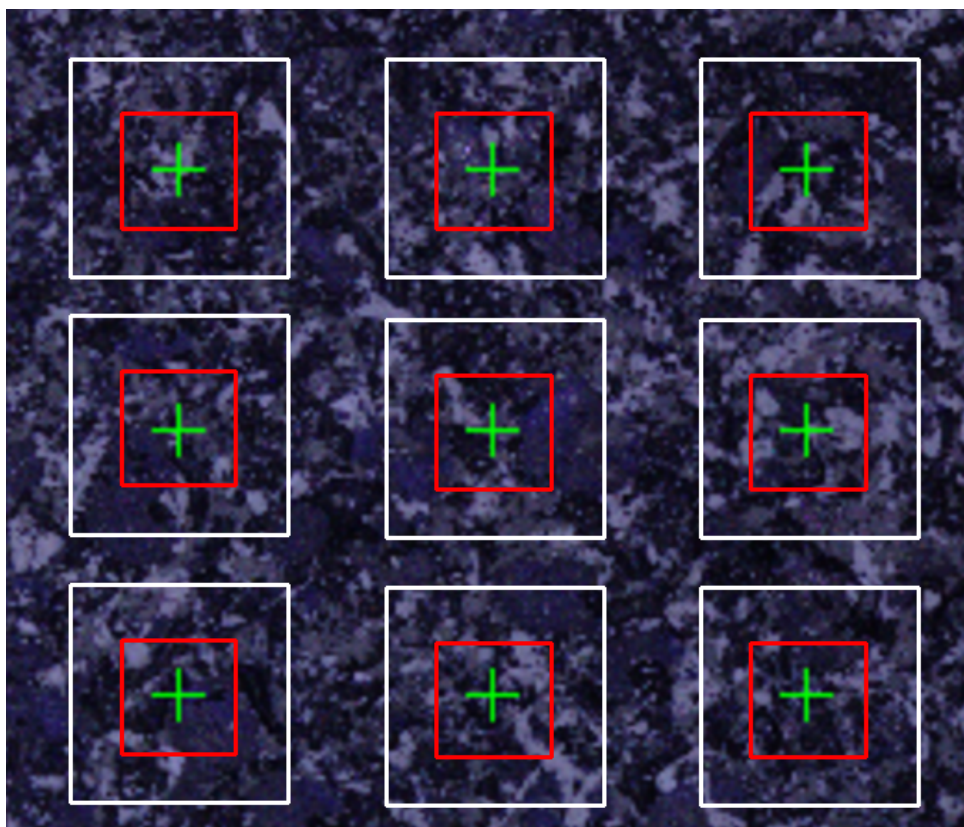
$$(2m + 1) \times (2m + 1) \quad (2.9)$$

Kde  $m$  je velikost subsetu, jehož středem je bod  $P$  o souřadnicích  $(x_0, y_0)$ . Správné nastavení velikosti subsetu je pro úspěch korelace velmi důležité. Subset musí být dostatečně velký, aby mohl být na deformovaných snímcích jednoznačně identifikován, ale zároveň s jeho přibývajícím velikostí roste i délka a náročnost korelačního výpočtu. Dále je nutné

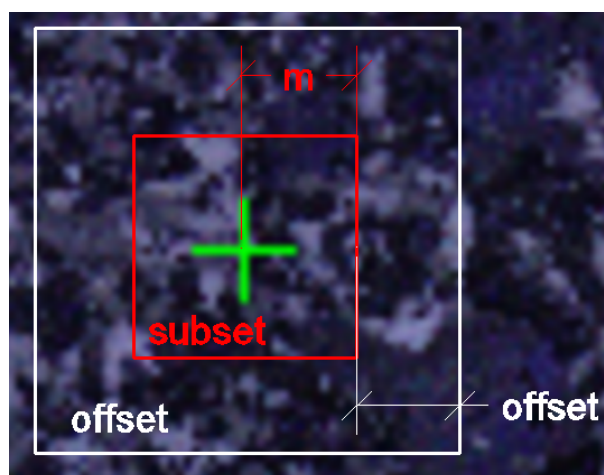


Obrázek 2.7: Mřížka sledovaných bodů na povrchu vzorku s náhodnou texturou

definovat okolí bodů, ve kterém budeme již definovaný subset lokalizovat na dalších snímcích. Tato oblast, označovaná jako *offset*, je vyznačena na Obrázku 2.8 bílou barvou, subset červenou. Detail obou oblastí je pak na obrázku 2.9.



Obrázek 2.8: Znárodnění matice korelovaných bodů, referenčních subsetů a offsetů



Obrázek 2.9: Detail jednotlivých oblastí kolem korelovaného bodu

## 2.4.2 Vzájemná korelace

Vzájemná korelace udává míru podobnosti (shody) dvou entit, v našem případě subsetů na referenčním a deformovaném snímku. Subset na deformovaném snímku může být oproti referenčnímu posunut, různě natočen, zkosen či jinak deformován. Každému bodu

$Q$  o souřadnicích  $(x_i, y_j)$  ležícímu v referenčním subsetu je pak přiřazen odpovídající bod  $Q'(x'_i, y'_j)$  v deformovaném subsetu prostřednictvím tvarovacích funkcí  $\xi$  a  $\eta$ :

$$\begin{aligned}x'_i &= x_i + \xi(x_i, y_j) \\y'_j &= y_j + \eta(x_i, y_j)\end{aligned}\tag{2.10}$$

Rozlišujeme několik stupňů tvarovacích funkcí v závislosti na typu deformace. Pokud je posuv všech bodů v referenčním subsetu stejný, čili nedochází k žádné deformaci a subset se posune celý, lze použít tvarovací funkce nultého řádu ve tvaru:

$$\begin{aligned}\xi_0(x_i, y_j) &= u \\ \eta_0(x_i, y_j) &= v\end{aligned}\tag{2.11}$$

Dochází-li k translačním, rotačním a smykovým deformacím, nebo jejich kombinaci je k popisu možné použít tvarovací funkce prvního řádu:

$$\begin{aligned}\xi_1(x_i, y_j) &= u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \\ \eta_1(x_i, y_j) &= v + v_x \Delta x + v_y \Delta y\end{aligned}\tag{2.12}$$

Pro popis složitějších deformací referenčního subsetu pak slouží tvarovací funkce druhého řádu:

$$\begin{aligned}\xi_2(x_i, y_j) &= u + u_x \Delta x + u_y \Delta y + \frac{1}{2} u_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} u_{yy} \Delta y^2 + u_y \Delta x \Delta y \\ \eta_2(x_i, y_j) &= v + v_x \Delta x + v_y \Delta y + \frac{1}{2} v_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} v_{yy} \Delta y^2 + v_y \Delta x \Delta y\end{aligned}\tag{2.13}$$

Jednotlivé proměnné ve výše uvedených rovnicích jsou definovány:  $\Delta x = x_i - x_0$ ,  $\Delta y = y_i - y_0$ ,  $u$ ,  $v$  jsou postupně jednotlivé složky posunutí bodu  $P$  ve směru osy  $x$  a  $y$ .  $u_x, u_y, v_x, v_y$  jsou gradienty posunutí subsetu prvního řádu a  $u_{xx}, u_{xy}, u_{yy}, v_{xx}, v_{xy}, v_{yy}$  jsou gradienty druhého řádu [11].

Během rozvoje metod DIC bylo vyvinuto mnoho různých korelačních kritérií, která lze rozdělit do dvou základních skupin:

- CC (*Cross Corelation*) kritéria,

$$C_{CC} = \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-m}^m [f(x_i, y_j)g(x'_i, y'_j)] \quad (2.14)$$

- SSD (*Sum of Squared Differences*) kritéria.

$$C_{SSD} = \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-m}^m [f(x_i, y_j) - g(x'_i, y'_j)]^2 \quad (2.15)$$

Podrobnější matematický zápis těchto kritérií je rozepsán například v práci Lucase a Kanadeho [11, 12]. Hledání nové polohy referenčního subsetu je tak převedeno na hledání maximální hodnoty korelačního koeficientu pro všechny polohy v prohledávaném okolí. Je-li tento extrém úspěšně identifikován, je zaznamenán rozdíl souřadnic mezi polohou subsetu v referenčním snímku a snímku deformovaném. Skutečnou deformaci sledovaných vzorků lze následně přepočítat ze záznamu změn souřadnic námi sledovaných bodů. Pro vyhodnocování experimentů v této práci bylo použito jádro programu vyvinutého na Ústavu teoretické a aplikované mechaniky, AV ČR, v.v.i., Ing. Ivanem Jandejskem [13]. Tento program využívá korelační kritérium *ZNSSD* (*Zero-Normalised Sum of Squared Differences*), což je v podstatě normalizované kritérium 2.15:

$$C_{ZNSSD} = \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-m}^m \left[ \frac{f(x_i, y_j) - f_m}{\Delta f} - \frac{g(x'_i, y'_j) - g_m}{\Delta g} \right]^2 \quad (2.16)$$

Proměnné  $\Delta f$ ,  $\Delta g$  a  $f_m$ ,  $g_m$  jsou definovány vztahy:

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=-m}^m \sum_{j=-m}^m [f(x_i, y_j) - f_m]^2}$$

$$\Delta g = \sqrt{\sum_{i=-m}^m \sum_{j=-m}^m [g(x'_i, y'_j) - g_m]^2} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned}
f_m &= \frac{1}{(2m+1)^2} \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-m}^m f(x_i, y_j) \\
g_m &= \frac{1}{(2m+1)^2} \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-m}^m g(x'_i, y'_j)
\end{aligned}
\tag{2.18}$$

Pro potřeby této práce bylo v tomto programu provedl několik úprav, včetně umožnění práce s programem v průběhu samotného experimentu a sledování deformace v reálném čase [10, 11, 12].

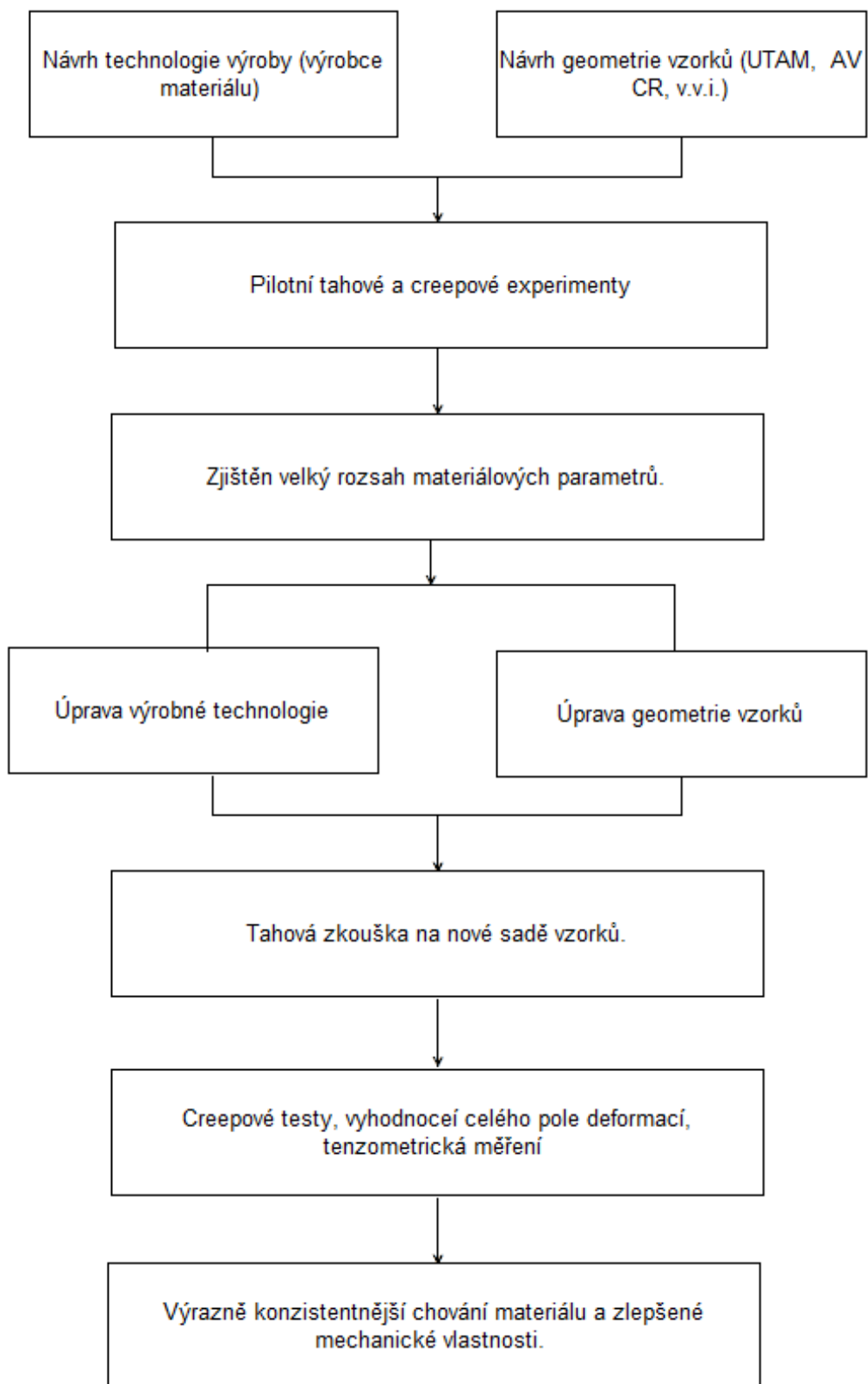


# Kapitola 3

## Příprava a průběh měření

Následující kapitola se zabývá popisem zkoumaných vzorků a měřících zařízení a také principem prováděných měření. Podstatou obou prováděných měření bylo precizní snímání povrchu vzorků pomocí digitálního fotoaparátu pro potřeby vyhodnocení metodou optické korelace obrazu. U zkoušky pevnosti v tahu bylo navíc třeba samotný test správně nastavit a přesně snímat data ze siloměru.

Je třeba zmínit, že od konce roku 2014 až do doby vzniku této práce bylo provedeno velké množství experimentů a to jak tahových zkoušek, tak zkoušek tečení při konstantním zatížení. Během této doby došlo nejen k úpravě zvolených metod pro vyhodnocování těchto experimentů, ale změnila se také samotná geometrie testovaných vzorků a jejich výrobní technologie. Všechny významné výsledky jsou zpracovány v dalších kapitolách. Přehledně je pracovní postup rozkreslen na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Pracovní postup experimentální části práce

### 3.1 Popis vzorků

Hlavní část této práce se zaměřuje na zkoumání mechanických vlastností nově vyvíjeného kompozitního materiálu pro letecký průmysl. Tento materiál je stejně jako výše zmíněný kompozit C/PPS tvořen matricí na bázi polyfenylen-sulfidu vyztužené uhlíkovými vlákny, vyrábí se metodou termoformingu<sup>6</sup> z drobných peletek tvořených kompozitním materiálem označovaným zkratkou Carbon AS4/PPS. Pro zkoušení byly dodány vzorky vyrobené dvěma typy tohoto výrobního procesu, kdy tlak 5 MPa byl dosažen s prodlevou na 2,5 MPa po dobu 5 minut nebo přímo bez prodlevy.

Vzorky pro materiálové testy jsou následně z vylisovaného panelu vyřezávány pomocí vodního paprsku. Vzorky pro tahové a creepové zkoušky mají klasický tvar psí kosti, což je velmi výhodný tvar pro uchycení konců vzorků do čelistí měřících zařízení. Výrobce původně dodané vzorky mají šířku  $20 \pm 0,4$  mm a tloušťku  $2,5 \pm 0,1$  mm. Aby bylo možné vzorky správně upnout do závěsných čelistí experimentálního zařízení, byly koncové části vzorků zesíleny na celkovou tloušťku asi 8 mm. Zesílení bylo docíleno nalepením a následným nanýtováním dvou příložek na původní vzorek. Druhá výrobcem dodaná série rozšířených vzorků se zesílenými konci má šířku  $30 \pm 0,4$  mm, tloušťku  $2,4 \pm 0,1$  mm a délku pracovní části 80 mm. Na obrázku 3.2 je vidět výsledná struktura peletek na povrchu vzorku pro creepovou zkoušku.



Obrázek 3.2: Povrch vzorku z peletek typu Carbon AS4/PPS se zesílenými konci

Vzorek byl opatřen nástřikem sprejem s granitovým efektem pro vytvoření náhodné textury na povrchu vhodné pro měření deformace metodou digitální korelace obrazu (DIC).

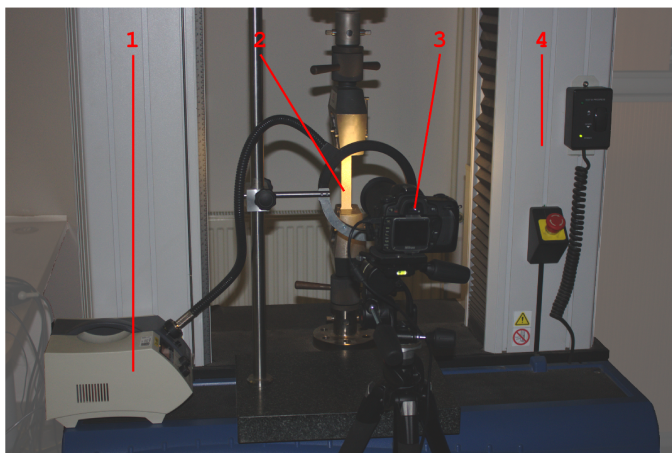
---

<sup>6</sup>*thermoforming* - lisování na vysoké teploty

## 3.2 Experimentální zařízení pro tahovou zkoušku

Experimentální zařízení použité při tahové zkoušce se skládá ze zatěžovacího zařízení Instron 3382 (Instron Inc., MA, USA) vybaveného přesným siloměrem s nominální hodnotou 50 kN, digitálního fotoaparátu a laboratorního osvětlení. Experiment řízený posuvem probíhal rychlostí  $10 \mu\text{ms}^{-1}$ .

Deformace byla měřena opticky pomocí EOS 550D (Canon, Japonsko) fotoaparátu vybaveného makro objektivem EF100mm / 1: 2.8L Makro (Canon, Japonsko). Povrch vzorku s uměle vytvořenou náhodnou texturou byl nasvícen laboratorním LED světelným zdrojem KL 2500 (Shott, Německo). Snímky byly pořizovány v ekvidistantních časových intervalech a označeny unikátní časovou značkou pro následnou synchronizaci mezi deformací vyhodnocenou metodou DIC a silou zaznamenávanou pomocí siloměru. Schéma experimentálního zařízení je na obrázku 3.3. Nejdůležitějším materiálovým parametrem vyhodnoceným z tahové zkoušky je mez pevnosti, pomocí které byla určena velikost konstantního zatížení pro následné creepové zkoušky.



Obrázek 3.3: Uspořádání experimentálního zařízení pro tahovou zkoušku: 1-LED světelný zdroj, 2-vzorek, 3-fotoaparát, 4-zatěžovací zařízení [14]

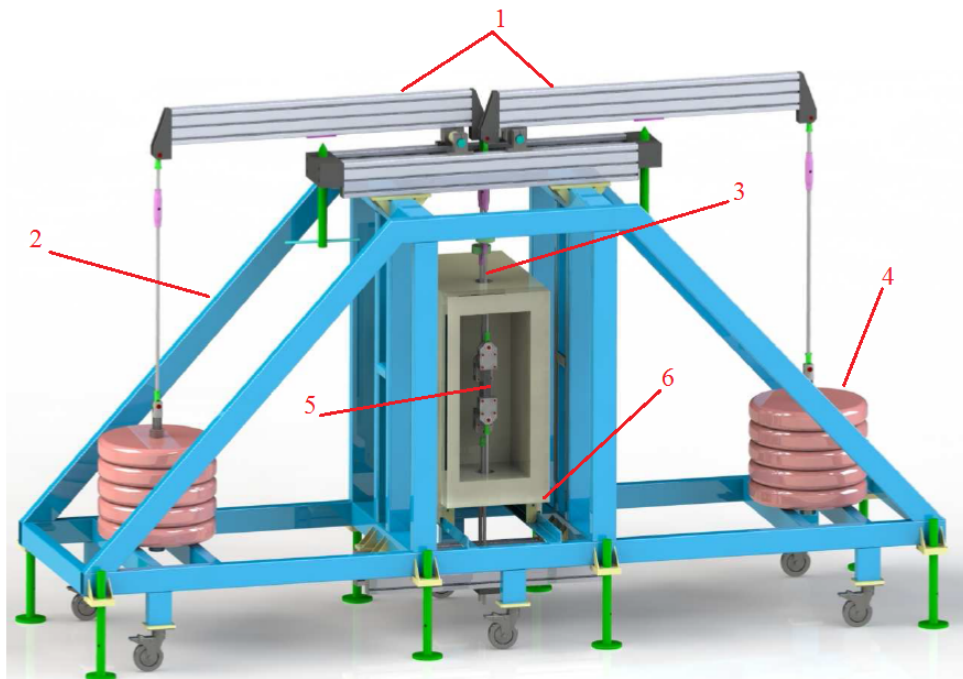
## 3.3 Experimentální zařízení pro creepovou zkoušku

Experimentální zařízení použité pro zkoušku deformačního chování materiálu při konstantním zatížení se skládá ze zatěžovacího zařízení vlastní konstrukce a digitálního fotoaparátu s příslušenstvím. Zařízení se skládá z tuhého ocelového rámu s pojezdovými koly a

výsuvnými podstavci, topné komory SFL 3119 (Instron, USA) integrované do rámu s výhřevností až do  $+350^{\circ}\text{C}$ , dvou zatěžovacích ramen ze slitiny hliníku s pákovým převodem 1:10 a sady závaží. Pákový mechanismus je navrhnut pro použití při maximální zatěžovací síle 10 kN na jedno rameno. Dále je zařízení vybaveno dvěma závěsy pro uchycení vzorků ze žáruvzdorné oceli.

Deformaci vzorků v průběhu experimentu lze vyhodnocovat buď pomocí speciálně navržených tenzometrů, nebo metodou DIC. Speciálně navržené tenzometry (VTS Zlín, Česká republika) umožňují měřit deformaci dvou vzorků najednou až do maximální hodnoty 10 mm, je však schopen odolávat teplotě pouze do  $150^{\circ}\text{C}$ . Metoda digitální korelace obrazu sice umožňuje provádět experiment pouze na jednom vzorku, ale díky umístění fotoaparátu vně tepelné komory není nijak omezena teplota při které je experiment prováděn. Vizualizace experimentálního zařízení je na obrázku 3.4.

Povrch vzorku umístěného v topné komoře byl snímán EOS 550D (Canon, Japonsko) fotoaparátem vybaveným makro objektivem EF100mm / 1: 2.8L Makro (Canon, Japonsko). Vzorek byl nasvícen laboratorním LED světelným zdrojem KL 2500 (Shott, Německo). Celkový pohled na experimentální uspořádání je na obrázku 3.5.



Obrázek 3.4: Vizualizace experimentálního zařízení pro creepovou zkoušku: 1-zatěžovací ramena, 2-tuhý rám, 3-závěs vzorku, 4-závaží, 5-vzorek, 6-topná komora [4]

### 3.4 Tenzometrická měření

Pro testy druhé výrobcem dodané série rozšířených vzorků, byla experimentální zařízení pro tahovou i creepovou zkoušku doplněna o zařízení pro tenzometrické měření. Do střední části pracovní oblasti vzorků byly nalepeny fóliové odporové tenzometry *CEA-06-250UN-120* (Micro-Measurements, USA) s nominální hodnotou odporu  $120\ \Omega$  a K-konstantou 2,03 (K-konstanta vyjadřuje citlivost tenzometru). Pro nalepení tenzometrů na vzorek bylo použito lepidlo Loctite 4687 s teplotní odolností až do  $120^\circ\text{C}$ . Data z tenzometru byla snímána pomocí ústředny GMC plus AB22A (HBM, Německo), připojené k laboratornímu počítači vybavenému příslušným softwarem pro komunikaci s ústřednou.



Obrázek 3.5: Uspořádání experimentální sestavy pro zkoušku tečení 1-vzorek, 2-topná komora, 3-LED osvětlení, 4-digitální fotoaparát [4]

### 3.5 Správné uchycení a nasvětlení vzorku

Pro správný průběh experimentu je nejprve nutné zkoumaný vzorek správně upnout do experimentálního zařízení a pro následné vyhodnocení pomocí metody DIC i rovnoměrně nasvítit. Při zkoušce pevnosti v tahu je nutné vzorky do čelistní upnout co nejpevněji, aby se v průběhu zkoušky nemohly uvolnit. Čelisti v zařízení pro creepovou zkoušku jsou závěsné a vzorek je v nich zajištěn díky zesílení jeho koncových částí. Pro nasvětlení vzorků je použit laboratorní LED světelný zdroj, pro snímání povrchu vzorku digitální fotoaparát vybavený makro objektivem, který je připevněn na stativu. Je nutné dbát na to, aby:

- vzorek nebyl přesvětlen a na výsledné fotce se nevyskytovaly světelné odlesky,
- fotoaparát byl správně zaostřen,
- byla vhodně nastavena světelná clona objektivu fotoaparátu,
- vzorek byl snímán v dostatečném rozsahu pro sledování celého pole deformací,
- bylo zamezeno jakémukoli vzájemnému pohybu fotoaparátu a snímaného vzorku.

# Kapitola 4

## Zpracování naměřených dat

### 4.1 Vyhodnocování v průběhu experimentu

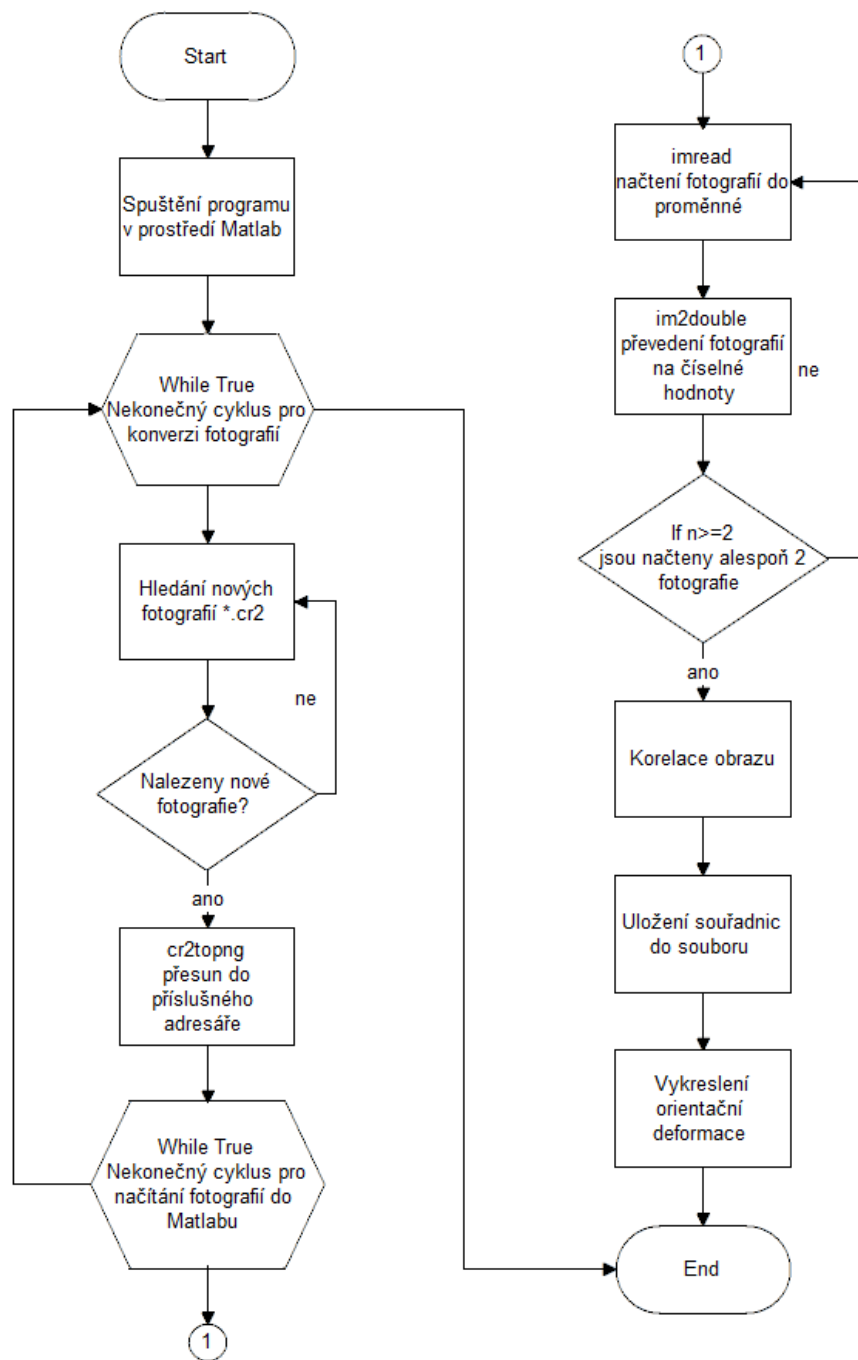
Jedním z hlavních cílů této práce bylo vytvoření sady scritů, které by umožňovali vyhodnocování pole deformací pomocí metody optické korelace obrazu již v průběhu samotného experimentu. Je zřejmé, že tato modifikace současného korelačního softwaru s sebou přináší celou řadu výhod, jmenovitě možnost ukončení experimentu v případě, že vykreslovaná deformace hrubě neodpovídá předpokládanému průběhu, nebo je kvalita pořízených fotografií natolik špatná, že hodnoty získané korelací obrazu nemají se skutečnou deformací vzorku nic společného.

Pro potřeby této práce bylo upraveno jádro programu vyvinutého na Ústavu teoretické a aplikované mechaniky, AV ČR, v.v.i. Jádro vyhodnocovacího programu bylo realizováno pomocí sady skriptů pracujících ve výpočetním prostředí Matlab (Mathwork, Inc.), který však nedokáže zpracovávat obrazová data ve formátu *Canon raw verze 2* (zkráceně *\*.cr2*), která jsou výstupem použitého fotoaparátu EOS 550D (Canon, Japonsko). Prvním problémem tak bylo detekování nově vzniklé digitální fotografie v příslušném adresáři a jejího převedení do formátu *Portable Network Graphics* (zkráceně *\*.png*), ve kterém bylo možné ji dále zpracovávat. K tomuto účelu slouží script `15_Real_time_track_seq_PNG.sh`, realizovaný ve scriptovacím jazyce Bash [15], který v pravidelných intervalech prochází přidělený adresář a všechny nové soubory převádí do správného formátu pomocí procedury `cr2topng` implementované v operačním systému Ubuntu 14.04 na laboratorním počítači. Touto operací dojde k malé kompresi kvality původních fotografií, která je však



zanedbatelná. Script následně převedené fotografie přesouvá do odpovídajících adresářů a spouští script ve výpočetním prostředí Matlab.

Výpočetní script *Real\_time\_cm2D* obdobným způsobem prochází přidělený adresář a všechny fotografie načítá do vnitřních proměnných pomocí příkazu *imread* a převádí na číselné hodnoty reprezentující stupeň šedi pomocí příkazu *im2double*. Pokud jsou načteny alespoň dvě fotografie, program provede korelaci obrazu mezi těmito dvěma snímky v předem definovaných bodech. Pro orientační vyhodnocení deformace vzorku program dále vykresluje hodnotu deformace vzorku ve směru osy Y s využití funkce *plot*. Změny souřadnic X a Y jsou průběžně zaznamenávány do textových souborů pro pozdější vyhodnocení. Po načtení další fotografie se celý proces opakuje, výstupní textové soubory se přepisují a deformace je vykreslována do stejného grafu. Proces končí tehdy, kdy jej ukončí samotný uživatel, jinak oba cykly běží nekonečně dlouho a pravidelně kontrolují vznik nové fotografie, provádějí konverzi a následnou digitální korelaci obrazu. Vývojový diagram výše popsané procedury je zobrazen na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Vývojový diagram korelační procedury probíhající v reálném čase

## 4.2 Zdrojová data

### 4.2.1 Záznam z přístroje Instron pro tahovou zkoušku

V průběhu zkoušky pevnosti v tahu popsané v kapitole 2 je přesně zaznamenávána síla vyvinutá zatěžovacím zařízením a posun příčnicku tohoto zařízení. Výstupem ze zatěžovacího zařízení Instron 3382 jsou textové soubory ve formátu *ASCII text file* (zkráceně *\*.txt*), které představují záznam síly a posuv příčnicku. Každý soubor obsahuje hlavičku, která obsahuje údaje o rychlosti prováděné zkoušky, předem zadaných rozměrech zkoumaného vzorku a maximální síly a deformace dosažené při experimentu. Vzorky byly zatěžovány rychlostí 0,5 mm/min, frekvence záznamu dat byla 10 pts/sec. Výsledný textový soubor má 3 sloupce. První sloupec udává pořadnici záznamu, druhý sílu zaznamenanou siloměrem v kN, třetí pak posun příčnicku přístroje v mm. Část textového souboru je uvedena níže. Hlavička, která obsahuje celkem 86 řádků zde uvedena není.

1,	0.000000,	-0.000566
2,	0.000179,	-0.001120
3,	0.000359,	-0.000320
4,	0.000897,	-0.000294
⋮	⋮	⋮
3509,	2.923347,	13.453988
3510,	2.926217,	3.944065
3511,	2.927593,	-0.004989

### 4.2.2 Optický záznam posuvů

Aby bylo možný vyhodnocovat experimenty blíže popsané v kapitole 2 pomocí metody optické korelace obrazu, je nutné povrch vzorků po dobu trvání experimentu snímat pomocí digitálního fotoaparátu. Výstupem fotoaparátu EOS 550D (Canon, Japonsko) vybaveného makro objektivem EF100mm / 1: 2.8L Makro (Canon, Japonsko) jsou barevné fotografie ve formátu *Canon raw verze 2* s rozlišením 3465 × 5202 px. Tyto fotografie je pro další zpracování třeba konvertovat do formátu *Portable Network Graphics*, čímž dojde ke kompresi pouze asi o 5%. Fotografie jsou prostřednictvím specifikace EXIF (*z angl. Exchangeable image file format*) označovány časovou značkou pro následné zpracování

metodou DIC. Je třeba zmínit, že vzhledem k vysokému rozlišení pořizovaných snímků jsou výrazné také nároky na kapacitu pevných disků laboratorních počítačů. To je ukázalo jako značný problém zvláště při následném zpracování takto naměřených dat.

### 4.2.3 Záznam tenzometru

Pro doplňkové tenzometrické měření deformace byly do střední části pracovní oblasti vzorků nalepeny fóliové odporové tenzometry, jejichž výstup byl snímán tenzometrickou ústřednou. Data, která jsou výstupem ústředny GMC plus AB22A (HBM, Německo) jsou ukládána do textových souborů ve formátu *\*.DAT*. Tyto soubory neobsahují žádnou informační hlavičku, odpor tenzometru  $R$  a  $K$ -konstantu je tak nutné si poznamenat zvlášť. Výsledné soubory mají 2 sloupce, první udává pořadnici záznamu, druhý pak poměrnou deformaci udávanou v tzv. *micro-strainech*, jednotka  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Část záznamu je uvedena níže.

0.000	-4.801
1.000	-4.242
2.000	-4.152
3.000	-4.193
⋮	⋮
94800.000	5240.081
94801.000	5240.113
94802.000	5240.081

## 4.3 Hodnotící parametry

Pro popis chování vzorků byl použit Findleyho model [9], který byl původně vytvořen pro popis tečení polymerních materiálů. Deformace vzorku v daném čase je přepočítána na hodnotu tzv. *predikované creepové poddajnosti*, pro kterou platí vztah:

$$\overline{J_c(t)} = b_o t^{b_1} \quad (4.1)$$

Kde  $\overline{J_c(t)}$  je predikovaná hodnota creepové poddajnosti,  $t$  je čas,  $b_o$  a  $b_1$  jsou materiá-

lové parametry stanovené regresí. Hodnotícími parametry creepové zkoušky materiálu pak jsou:

- deformace v závislosti na čase  $t$ :  $\varepsilon(\sigma, t, T)$ , kde teplota  $T$  a napětí  $\sigma$  jsou konstantní,
- creepová poddajnost v závislosti na čase  $t$ :  $J_c(\sigma, t, T)$ , kde teplota  $T$  a napětí  $\sigma$  jsou konstantní,
- bezrozměrný materiálová parametr  $b_0$  odpovídající tuhosti zkoumaného materiálu, určený regresí za použití vztahu 4.1,
- bezrozměrný materiálová parametr  $b_1$  odpovídající rychlosti tečení materiálu, určený regresí za použití vztahu 4.1.

Velmi důležitý parametr, čas do porušení vzorku, nebyl hodnocen, protože při žádném z šesti měření na zesílených vzorcích nedošlo k porušení vzorku před uplynutím stanovené doby měření.

Hodnotícími parametry zkoušky pevnosti v tahu jsou:

- Youngův modul pružnosti v tahu  $E$
- Mez pevnosti v tahu  $\sigma_{max}$

# Kapitola 5

## Výsledky

### 5.1 Pilotní testy

Pro pilotní testy na konci roku 2014 byly výrobcem dodány dvě sady vzorků, z nichž první byla tvořena dlouhovláknovým kompozitem na bázi C/PPS a druhá již popsáním materiálem lisovaným z peletek Carbon AS4/PPS, na kterých byla provedena série tahových a creepových zkoušek.

#### 5.1.1 Tahová zkouška

Bylo provedeno celkem devět zkoušek pevnosti materiálu v tahu. Čtyři zkoušky na vzorcích z dlouhovláknového kompozitu, pět na vzorcích lisovaných z pelet. Hodnocen byl Youngův modul pružnosti a mez pevnosti v tahu. Tyto parametry jsou shrnuty v následujících tabulkách:

Tabulka 5.1: Mez pevnosti vyhodnocená na základě tahové zkoušky

<b>Dlouhovláknový kompozit</b>	<b>Kompozit lisovaný z pelet</b>
--------------------------------	----------------------------------

$\sigma_{max,2} = 503,69 \text{ MPa}$	$\sigma_{max,1} = 118,40 \text{ MPa}$
$\sigma_{max,3} = 474,57 \text{ MPa}$	$\sigma_{max,2} = 134,87 \text{ MPa}$
$\sigma_{max,4} = 516,23 \text{ MPa}$	$\sigma_{max,3} = 126,52 \text{ MPa}$
$\sigma_{max,5} = 493,80 \text{ MPa}$	$\sigma_{max,4} = 148,80 \text{ MPa}$
	$\sigma_{max,5} = 113,95 \text{ MPa}$
$\sigma_{max} = 497,07 \pm 17,58 \text{ MPa}$	$\sigma_{max} = 128,51 \pm 13,87 \text{ MPa}$

Tabulka 5.2: Youngův modul pružnosti vyhodnocený na základě tahové zkoušky

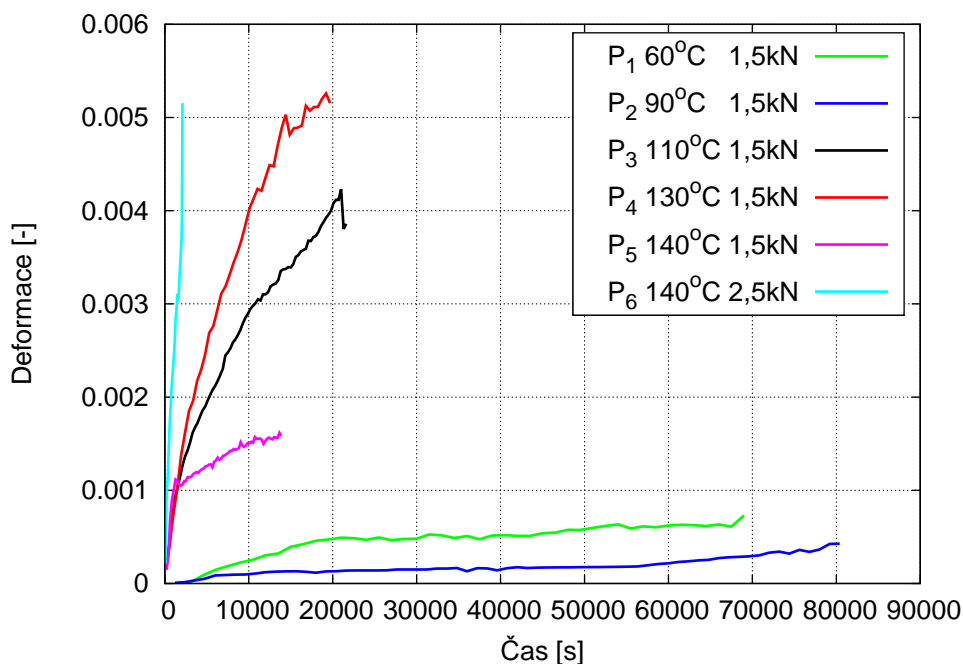
**Dlouhovláknový kompozit    Kompozit lisovaný z pelet**

$E_2 = 23,25 \text{ GPa}$	$E_1 = 17,17 \text{ GPa}$
$E_3 = 22,03 \text{ GPa}$	$E_2 = 17,02 \text{ GPa}$
$E_4 = 23,21 \text{ GPa}$	$E_3 = 17,81 \text{ GPa}$
$E_5 = 21,61 \text{ GPa}$	$E_4 = 17,04 \text{ GPa}$
	$E_5 = 20,61 \text{ GPa}$
$E = 22,55 \pm 0,72 \text{ GPa}$	$E = 17,94 \pm 1,53 \text{ GPa}$

Z tabulek 5.1 a 5.2 je patrné, že rozptyl hodnot meze pevnosti je značný a pevnost materiálu ani zdaleka nedosahuje hodnot požadovaných výrobcem [14].

### 5.1.2 Creepová zkouška

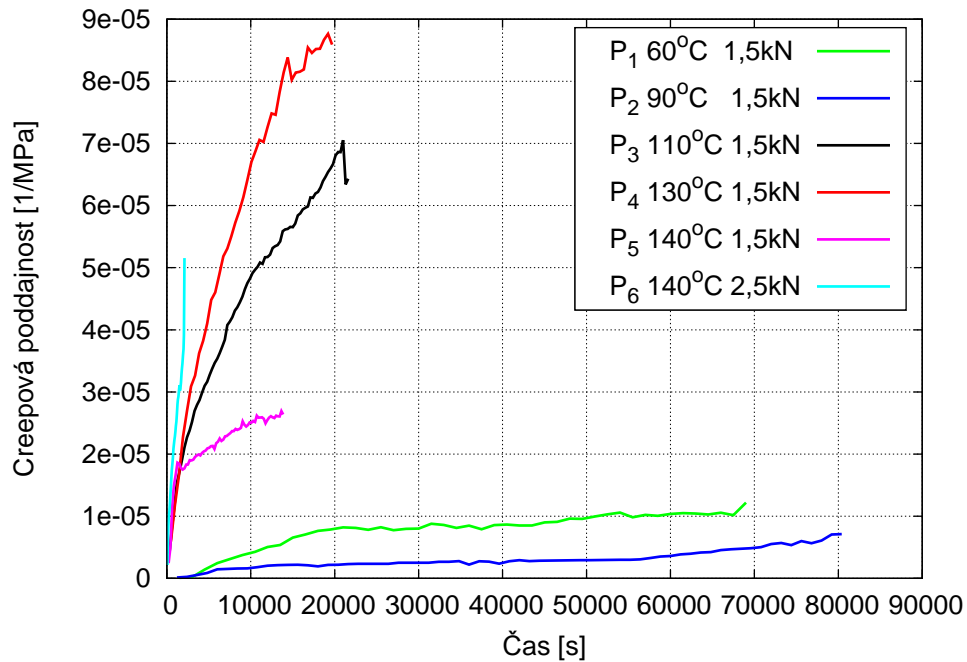
Creepová zkouška byla provedena na sadě šesti vzorků při teplotách od 60 do 140°C při konstantním zatížení o velikosti 1,5 kN (u posledního měření bylo toto zatížení zvětšeno na 2,5 kN). Vyhodnocená závislost deformace vzorku na čase získaná metodou DIC je na obrázku 5.1 [4].



Obrázek 5.1: Graf závislosti naměřené deformace na čase  $t$

Hodnoty deformace vzorku byly následně přepočítány na creepovou poddajnost podle vztahu 2.7. Závislost creepové poddajnosti materiálu na čase je na obrázku 5.2.

Aplikací Findleyho modelu pro tečení polymerů ve tvaru odpovídajícím rovnici 2.8 byly



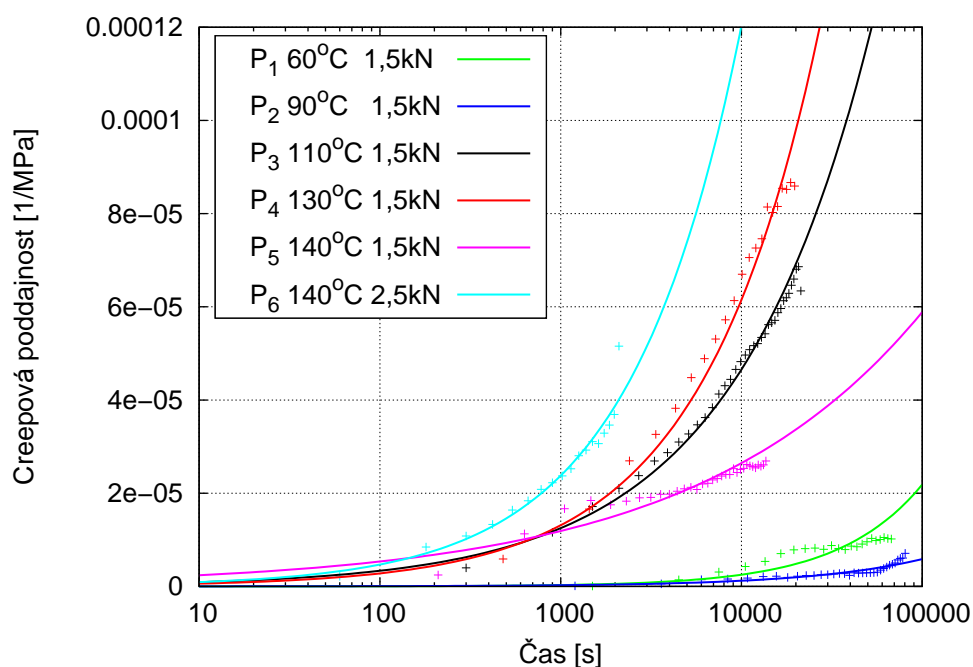
Obrázek 5.2: Graf závislosti creepové poddajnosti na čase  $t$

získány materiálové parametry  $b_o$  a  $b_1$  zaznamenané v tabulce 5.3. Graf creepové poddajnosti proložených funkcemi odpovídajícími Findleyho modelu je na obrázku 5.3 [4].

Tabulka 5.3: Parametry  $b_o$  a  $b_1$  vyhodnocené na základě Findleyho modelu

Vzorek	Teplota	Zatížení	$b_0$	$b_1$
Vzorek 1	60°C	1,5 kN	$4,432 \times 10^{-10}$	0,9386
Vzorek 2	90°C	1,5 kN	$2,286 \times 10^{-9}$	0,6818
Vzorek 3	110°C	1,5 kN	$2,419 \times 10^{-7}$	0,5711
Vzorek 4	130°C	1,5 kN	$1,271 \times 10^{-7}$	0,6712
Vzorek 5	140°C	1,5 kN	$1,078 \times 10^{-6}$	0,3475
Vzorek 6	140°C	2,5 kN	$1,832 \times 10^{-7}$	0,7044





Obrázek 5.3: Graf creepové poddajnosti proložené funkcemi odpovídajícími Findleyho modelu

## 5.2 Testy rozšířených vzorků

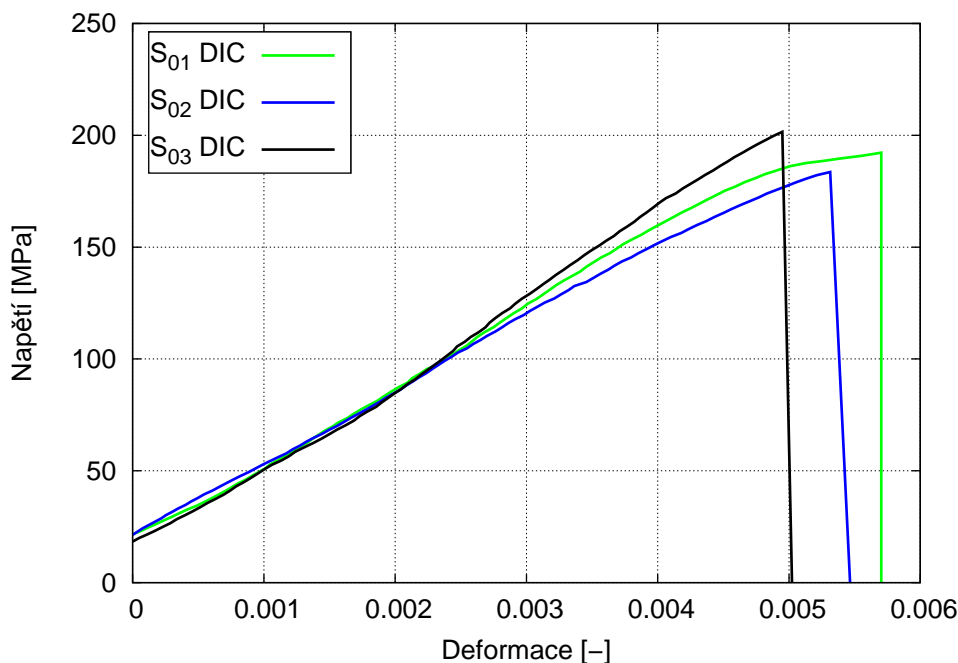
Po úpravě geometrie vzorků a technologie byla v létě roku 2015 výrobcem dodána nová sada osmi rozšířených vzorků pro další testování. Tyto vzorky byly podrobeny tahovým a creepovým zkouškám, doplněným v tenzometrická měření.

### 5.2.1 Tahová zkouška

Pro zkoušku pevnosti v tahu byly připraveny tři vzorky z dodané sady. Hodnocen byl opět Youngův modul pružnosti v tahu a mez pevnosti. Na obrázku 5.4 je graf závislosti napětí na deformaci vzorků vyhodnocený metodou DIC, v tabulce 5.4 jsou pak shrnuty hodnotící parametry.

Tabulka 5.4: Youngův modul pružnosti a mez pevnosti vyhodnocené na základě tahové zkoušky

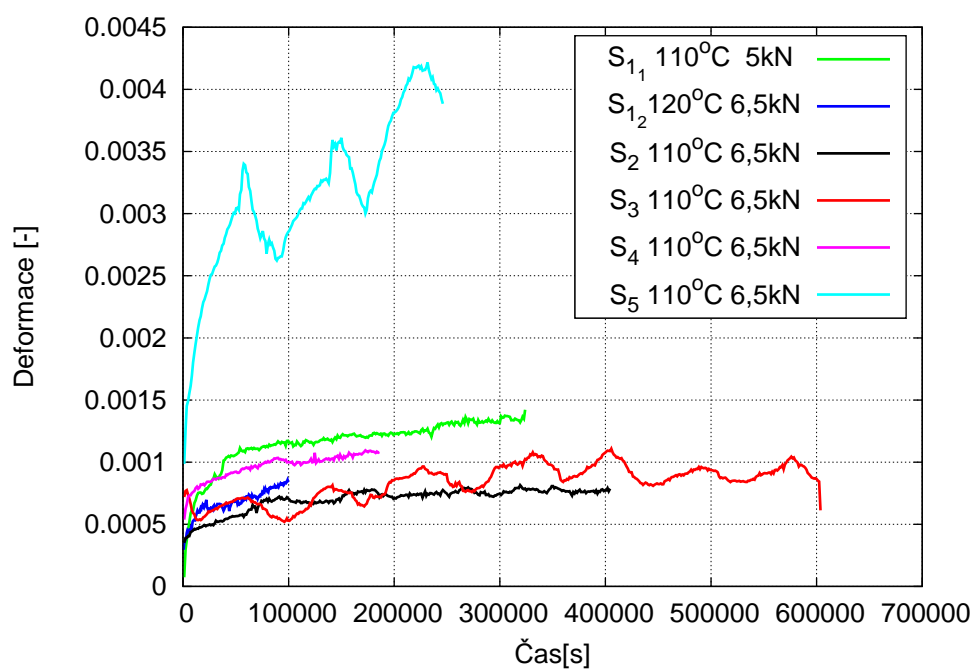
Youngův modul pružnosti	Mez pevnosti
$E_1 = 34,80 \text{ GPa}$	$\sigma_{max,1} = 192,24 \text{ MPa}$
$E_2 = 31,68 \text{ GPa}$	$\sigma_{max,2} = 183,58 \text{ MPa}$
$E_3 = 38,09 \text{ GPa}$	$\sigma_{max,3} = 201,53 \text{ MPa}$
$E = 34,86 \pm 2,62 \text{ GPa}$	$\sigma_{max} = 192,45 \pm 7,33 \text{ MPa}$



Obrázek 5.4: Graf závislosti napětí na deformaci při zkoušce pevnosti v tahu

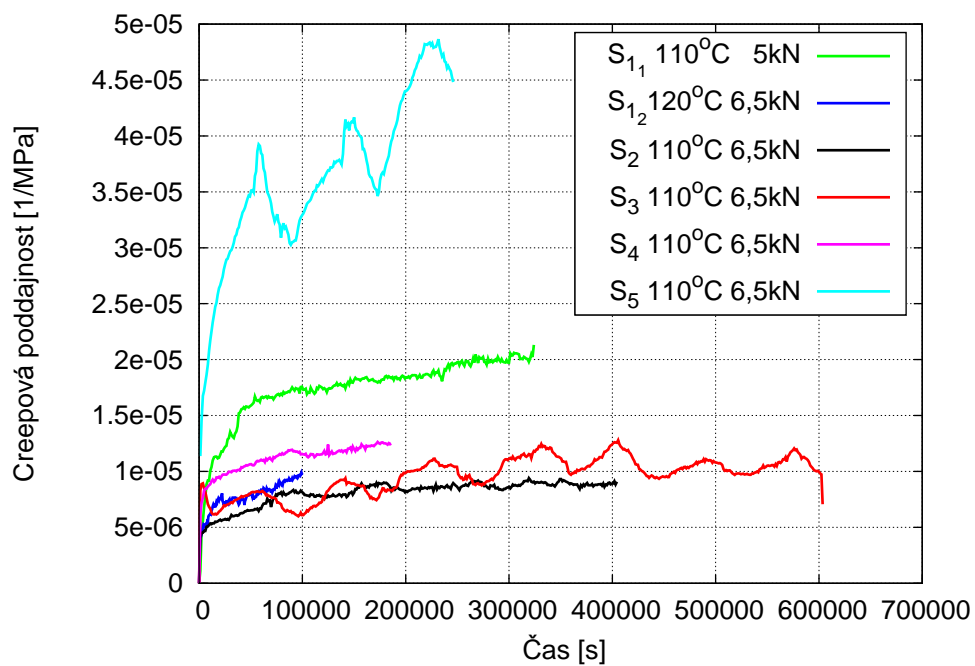
### 5.2.2 Creepová zkouška

Creepová zkouška byla provedena na zbývajících pěti rozšířených vzorcích. Teplota byla zvolena vzhledem k omezení odolnosti lepidla použitého v doplňkovém tenzometrickém měření na  $110^\circ\text{C}$ , zatížení bylo původně stanoveno na 5 kN. Po provedení testu na prvním vzorku bylo toto zatížení zvětšeno na 6,5 kN. Na vzorku číslo 1 byla provedena měření dvě, první při teplotě  $110^\circ\text{C}$  a zatížení 5 kN, druhé pak při zvýšené teplotě  $120^\circ\text{C}$  a zatížení 6,5 kN. Vyhodnocená závislost deformace vzorku na čase získaná metodou DIC je na obrázku 5.5.



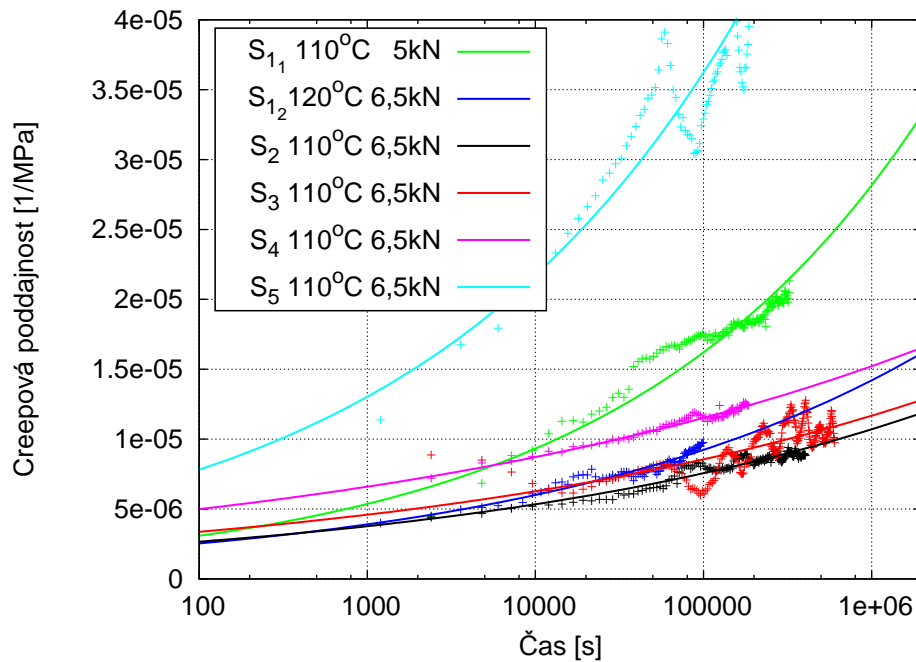
Obrázek 5.5: Graf závislosti naměřené deformace na čase  $t$

Deformace vzorku byla následně přepočítána na creepovou poddajnost podle vztahu 2.7. Závislost creepové poddajnosti materiálu na čase je na obrázku 5.6.



Obrázek 5.6: Graf závislosti creepové poddajnosti na čase  $t$

Aplikací Findleyho modelu pro tečení polymerů ve tvaru odpovídajícím rovnici 2.8 byly opět získány materiálové parametry  $b_0$  a  $b_1$  zaznamenané v tabulce 5.5. Graf creepové poddajnosti proložených funkcemi odpovídajícími Findleyho modelu je na obrázku 5.7.



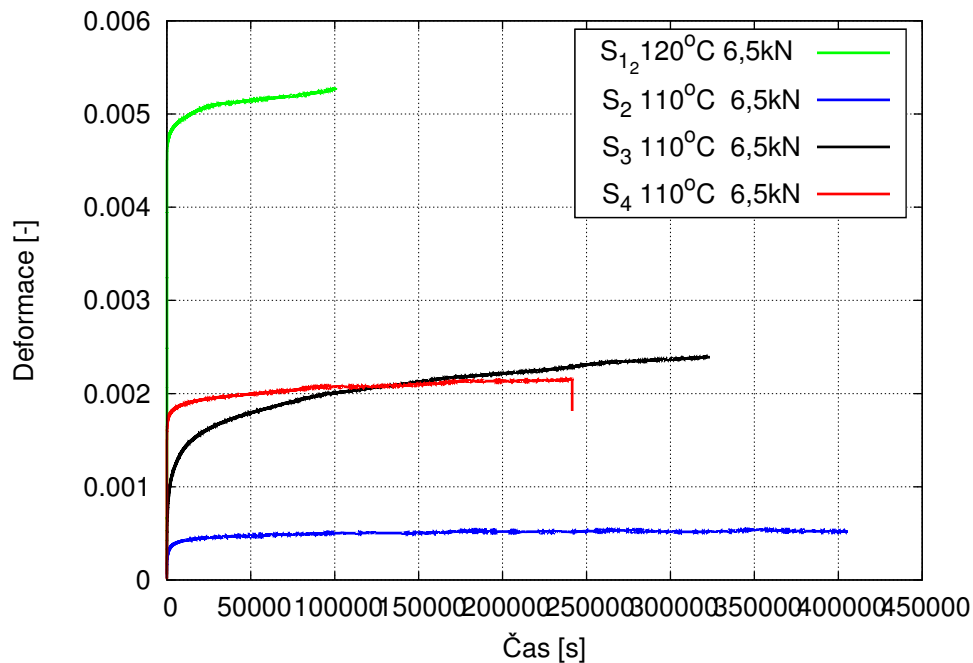
Obrázek 5.7: Graf creepové poddajnosti proložené funkcemi odpovídajícími Findleyho modelu

Tabulka 5.5: Parametry  $b_0$  a  $b_1$  vyhodnocené na základě Findleyho modelu

Vzorek	Teplota	Zatížení	$b_0$	$b_1$
Vzorek 1 <sub>1</sub>	110°C	5 kN	$1,022 \times 10^{-6}$	0,2401
Vzorek 1 <sub>2</sub>	120°C	6,5 kN	$1,073 \times 10^{-6}$	0,1874
Vzorek 2	110°C	6,5 kN	$1,329 \times 10^{-6}$	0,1519
Vzorek 3	110°C	6,5 kN	$1,809 \times 10^{-6}$	0,1351
Vzorek 4	110°C	6,5 kN	$2,861 \times 10^{-6}$	0,1213
Vzorek 5	110°C	6,5 kN	$2,812 \times 10^{-6}$	0,2228

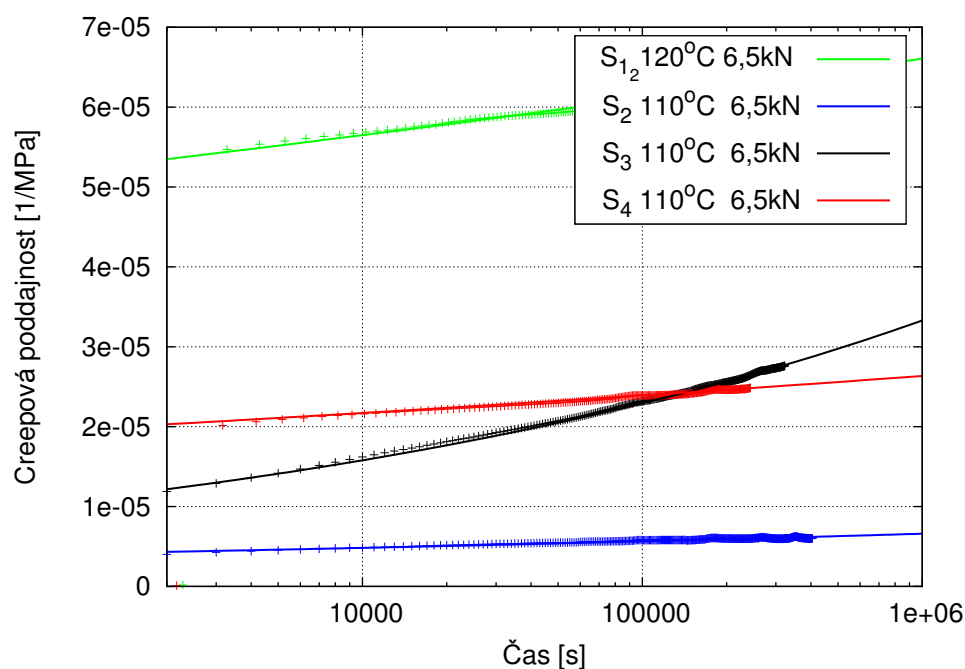
## Tenzometrická měření

Při všech šesti výše vyhodnocených creepových zkouškách byla deformace vzorku snímána také tenzometrem umístěným na zadní straně vzorku. Tato měření se bohužel nepodařilo správně provést u prvního vzorku, kdy došlo k chybnému napájení počítače určeného pro obsluhu tenzometrické ústředny a také u vzorku posledního, kdy došlo k chybnému nalepení tenzometru na vzorek, díky čemuž tenzometr po zahájení měření odpadl. Zbývající čtyři měření se podařilo vyhodnotit použitím Findleyho modelu. Graf deformace odečtené z tenzometru v závislosti na čase je na obrázku 5.8.



Obrázek 5.8: Graf závislosti deformace odečtené z tenzometru na čase  $t$

Aplikací Findleyho modelu byly získány materiálové parametry  $b_0$  a  $b_1$  zaznamenané v tabulce 5.6. Graf creepové poddajnosti proložených funkcemi odpovídajícími Findleyho modelu je na obrázku 5.9.



Obrázek 5.9: Graf creepové poddajnosti získané z tenzometrů proložené funkcemi odpovídajícími Findleyho modelu

Tabulka 5.6: Parametry vyhodnocené na základě Findleyho modelu- tenzometrická měření

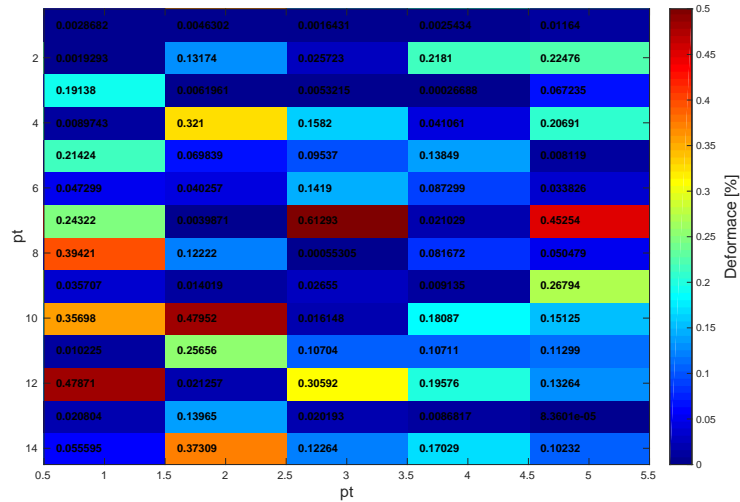
Vzorek	Teplota	Zatížení	$b_0$	$b_1$
Vzorek 1 <sub>2</sub>	120°C	6,5 kN	$4,131 \times 10^{-5}$	0,0348
Vzorek 2	110°C	6,5 kN	$2,579 \times 10^{-6}$	0,0682
Vzorek 3	110°C	6,5 kN	$3,551 \times 10^{-6}$	0,1624
Vzorek 4	110°C	6,5 kN	$1,475 \times 10^{-5}$	0,0421

Jak je z těchto grafů vidět, jsou data získaná měřením na nové sadě zesílených vzorků konzistentnější a došlo k výraznému zlepšení materiálových vlastností materiálu. Z porovnání naměřených závislostí získaných metodou DIC a tenzometry je patrné, že tato dvě současně prováděná měření si vzájemně neodpovídají. Tuto skutečnost si lze vysvětlit silnou nehomogenitou zkoumaného materiálu a také tím, že metodou DIC je vyhodnocována deformace celého vzorku, zatímco tenzometrem jsme schopni snímat deformaci pouze lokálně.

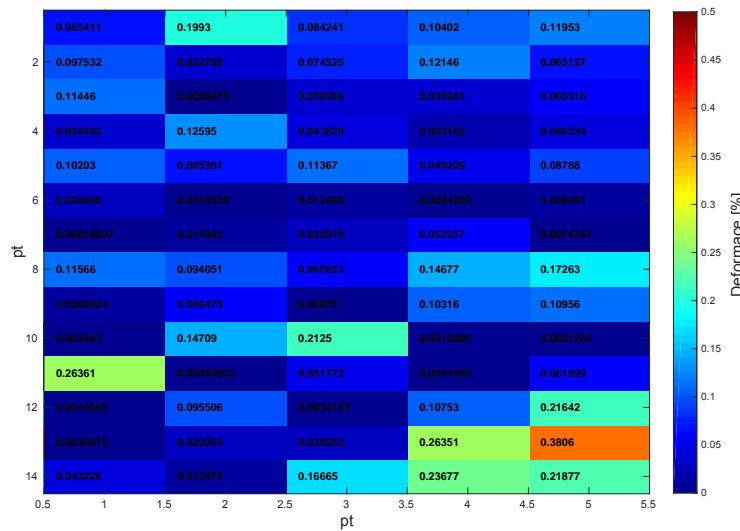
### Vyhodnocení pole deformací

Na čtyřech vzorcích, na kterých bylo provedeno také tenzometrické měření, byla provedena analýza deformace v celé ploše povrchu vzorku. Byla vyhodnocena celá matice korelačních

bodů metodou DIC a ze získaných deformací byly následně vykresleny deformační mapy zobrazené na obrázcích 5.10 a 5.11. Tyto mapy byly vyhodnoceny s použitím softwaru vyvinutého na Ústavu teoretické a aplikované mechaniky, AV ČR, v.v.i. [14].

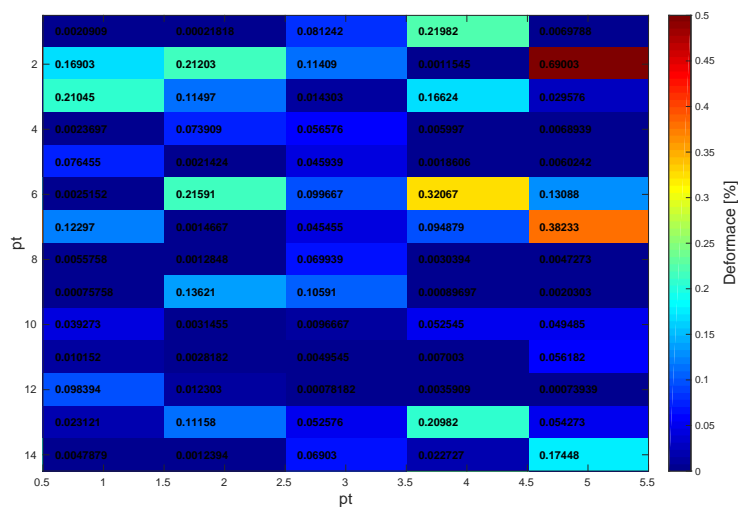


(a) Mapa deformací vzorku 1<sub>2</sub>

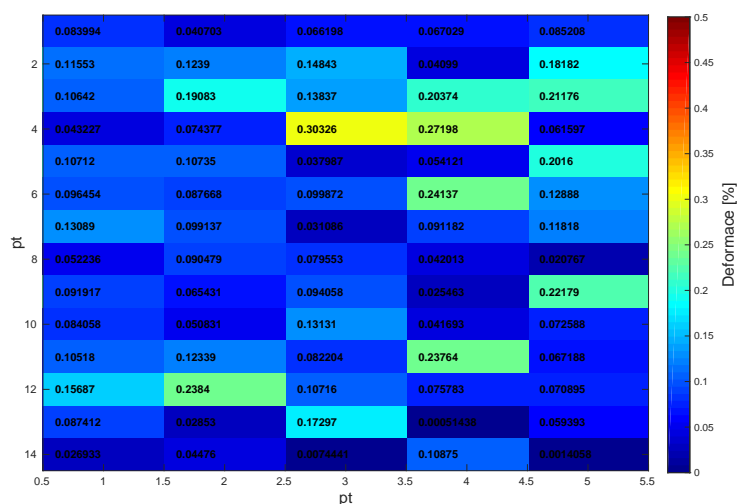


(b) Mapa deformací vzorku 2

Obrázek 5.10: Mapy plošných deformací vzorků 1



(a) Mapa deformací vzorku 3



(b) Mapa deformací vzorku 2

Obrázek 5.11: Mapy plošných deformací vzorků 2

Na těchto mapách je zaznamenána celková deformace vzorku v jednotlivých bodech, ve kterých byla provedena korelace obrazu. Korelace obrazu byla provedena na mřížce o rozměrech  $14 \times 5$  bodů a každé pole mapy tak odpovídá deformaci jednoho korelačního bodu. Je patrné, že deformace vzorku není homogenní a hodnoty deformace se v jednotlivých bodech značně liší.



# Kapitola 6

## Závěr

V této práci byla potvrzena vhodnost metody optické korelace obrazu pro kvantifikaci deformací vzniklých na vzorcích z kompozitního materiálu při tahové a creepové zkoušce demonstrováné na sadě ya tímto účelem vytvořených skriptů. Bylo také potvrzeno, že Findleyho model pro popis tečení polymerů je vhodný také pro popis námi zkoumaných vzorků vyztužených uhlíkovými vlákny. Ukázalo se, že změna technologie výroby a geometrie testovaných vzorků vedla ke zlepšení jejich mechanických vlastností a ke zlepšení konzistentnosti naměřených dat. Mechanické vlastnosti zkoumaného kompozitu vyráběného metodou termoformingu z drobných peletek materiálu C/PPS se však neprokázali být ani tak dostatečně homogenní v celém objemu dodaných vzorků a je tedy třeba další výzkum a úprava výrobní technologie.

Pro potřeby této práce bylo dále upraveno jádro programu vyvinutého na Ústavu teoretické a aplikované mechaniky, AV ČR, v.v.i. tak, aby bylo možné vyhodnocovat deformaci vzorků již po dobu průběhu experimentu (*Real time evaluation*). Na tomto nově vniklém softwaru je třeba provést ještě celou řadu drobných úprav a především vytvořit vhodné uživatelské rozhraní pro jeho snazší použití přímo v laboratoři, případně dalšími uživateli. Bylo také prokázáno, že metoda optické korelace obrazu je vhodná nejen pro vyhodnocování deformace vzorků mezi krajními polohami, ale je s jejím využitím možné vyhodnocovat také celá pole deformací i u tak složitého materiálu, jako je právě kompozit lisovaný z malých peletek. Touto metodou je tak možné detekovat nehomogenity ve struktuře materiálu jen velmi obtížně detekovatelné tenzometricky a predikovat místa možného porušení při zátěži.

# Kapitola 7

## Cíle do budoucna

Mezi hlavní cíle do budoucna patří další úprava laboratorního softwaru pro vyhodnocování deformací pomocí metody optické korelace v průběhu experimentu. Jedním z nejdůležitějších kroků by mělo být vytvoření uživatelského rozhraní pro snadnou obsluhu. Dále by bylo vhodné upravit samotný algoritmus korelace pro zlepšení a hlavně zrychlení celé procedury pro lepší možnost využití v reálném čase a použití vyšších snímkovacích frekvencí této procedury.

Jak již bylo výše zmíněno, výzkum kompozitního materiálu vyráběného z malých peletek není zdaleka u konce a bylo by vhodné dále upravit jak technologii výroby tak geometrii zkoumaných vzorků a podrobit je nové sérii materiálových testů včetně testování celých dílů vyrobených z tohoto materiálu. Na konci celého výzkumu pak doufáme získat levný materiál s uspokojivými mechanickými vlastnostmi, který by bylo možné reálně uplatnit jak v automobilovém, tak i v leteckém průmyslu v méně zatěžovaných částech konstrukce.

# Literatura

- [1] CALLISTER, W.D.: *Materials science and engineering: an introduction*. 5th ed. New York: John Wiley & Sons, c2000, xxi, 871 s. ISBN 0471320137
- [2] CMH-17 ORGANIZATION: *Composite materials handbook volume 3.*, SAE International 2011, 952 S., ISBN-13: 978-0768078138
- [3] PTÁČEK, L. a kolektiv: *Nauka o materiálu II.* . 2. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM,s.r.o. Brno 2002. 394s. ISBN 80-7204-248-3.
- [4] FÍLA, T., KOUDELKA P., HOS, J., KYTÝŘ, D., ŠLEICHT, J.: *Creep behaviour of short fibres C/PPS composite*, Materials and Technology 49(3) 2016, *article in press*
- [5] MALLIC, P.K.: *Fiber-reinforced composites, Materials, Manufacturing and Design*. 1. vydání. New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2008, 616 s. ISBN 13:978-0-8493-4205-9.
- [6] *Springer handbook of experimental solid mechanics*. Berlin: Springer, 2008, 1097 s. ISBN 9780387268835.
- [7] *Boeing: The Boeing Company* [online]. 2008, [cit. dne 18.8.2015]. BOEING 787 FROM THE GOUND UP. Dostupné z: [http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr\\_4\\_06/article\\_04\\_2.html](http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html).
- [8] RAAB, M.: *Materiály a člověk: netradiční úvod do současné materiálové vědy*. 1. vydání. Praha: Encyklopedický dům, 1999. 228s. ISBN 80-86044-13-0.
- [9] HORVATH, J.S.: *Mathematical Modeling of the Stress-Strain-Time Behavior of Geosynthetics Using the Findley Equation: General Theory and Application to EPS-Block Geofoam*, Manhattan college, Bronx, New York 10471-4098 U.S.A., 1998.

- [10] LOMOV, S.V., BOISSE, Ph., DLUYVKER, E., MORESTIN, F., VANCLOOSTER, K., VANDEPITTE, D., VERPOEST, I., WILLEMS, A.: *Full-field strain measurements in textile deformability studies*. Department of Metallurgy and Materials Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Kasteelpark Arenberg, 44, B-3001 Leuven, Belgium, 2007.
- [11] PAN, B., QIAN, K., XIE, H., ASUNDI, A.: *Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review*. Measurement Science and Technology 20(6) 2006.
- [12] LUCAS, B. D. a KANADE, T.: *An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision*. Proceedings of Imaging Understanding Workshop. 1981, s. 121 - 130.
- [13] JANDEJSEK, I., VALACH, J., VAVŘÍK, D.: *Optimization and calibration of digital image correlation method*, 8th International Scientific Conference on Experimental Stress Analysis, EAN 2010
- [14] ŠLEICHT, J., ADORNA, M, NEÜHAUSEROVÁ , M., FENCLOVÁ, N., PETRÁ-  
ŇOVÁ, V.: *Deformation Characteristics of Chopped Fibre Composites Subjected to Quasi-static Tensile Loading* in proceedings of YSESM2015, *article in press*
- [15] COOPER, M.: *Advanced bash scripting guide 5.3: an in-depth exploration of the art of shell scripting*. Lexington: Lulu, 2008, v, 510 s. ISBN 9781435752184.