

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD

KATEDRA MECHANIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Implementace elasto-plastického modelu s
degradací materiálových parametrů pro
textilní kompozity do komerčního MKP
softwaru**

Vedoucí práce: Ing. Tomáš KROUPA, Ph.D.

PLZEŇ 2013

Bc. Kryštof KUNC

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Kryštof KUNC**
Osobní číslo: **A10N0128P**
Studijní program: **N3918 Aplikované vědy a informatika**
Studijní obor: **Mechanika**
Název tématu: **Implementace elasto-plastického modelu s degradací materiálových parametrů pro textilní kompozity do komerčního MKP softwaru**
Zadávací katedra: **Katedra mechaniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Rešerše stávajících modelů pro daný materiál.
2. Provedení experimentů pro různou orientaci materiálových směrů.
3. Sestavení modelu.
4. Naprogramování modelu do vybraného MKP systému.
5. Identifikace parametrů modelu.
6. Zhodnocení výsledků.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: **40-60 stran A4 včetně příloh**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. PAM-Crash manual, Ladevéze model.
2. Berthelot, J. M.: Composite Materials, Springer-Verlag New York, 1999.
3. Bathe, K. J.: Finite Element Procedures, Prentice Hall, Pearson Education, Inc., 2006.
4. Rossenberg, J., Křen, J.: Mechanika kontinua, Plzeň, 1998.
5. Manuál k vybranému MKP softwaru.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Tomáš Kroupa, Ph.D.

Katedra mechaniky

Datum zadání diplomové práce:

15. září 2012

Termín odevzdání diplomové práce:

31. května 2013



Doc. Ing. František Vávra, CSc.

děkan



Prof. Ing. Vladislav Laš, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. září 2012

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a s použitím uvedené literatury a zdrojů informací.

V Plzni, 31. července 2013

Bc. Kryštof KUNC

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Tomášovi Kroupovi, Ph.D., vedoucímu diplomové práce, za množství rad, trpělivost a poskytnutý čas, který mi při tvorbě této práce věnoval. Dále bych rád poděkoval i Ing. Robertovi Zemčíkovi, Ph.D., za řadu věcných připomínek, které bezpochyby přispěly ke kvalitě této práce. Nemenší dík si pak také zaslouží Ing. Jan Krystek, Ph.D., který byl vždy ku pomoci při kalibraci trhačího stroje.

Nemohu opomenout poděkovat ani svojí nastávající ženě, která mi byla oporou dnem i nocí.

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá procesem vývoje elasto-plastického modelu tkaninových kompozitů a jeho implementace pro komerční konečnoprvkové softwary se zřetelem na efektivní identifikaci materiálových parametrů. Model je navržen s důrazem na jeho maximální jednoduchost a univerzální použití. Byly simulovány tkaninové kompozity s aramidovou, uhlíkovou a skelnou výztuží, které jsou uvažovány jako homogenní a ortotropní média ve stavu rovinné napjatosti s uvažováním velkých deformací.

Byly provedeny základní experimenty, podle nichž byl navržen materiálový model a který byl následně implementován do softwaru Simulia ABAQUS. Dále byl navržen automatický proces identifikace materiálových parametrů, který je řízen softwarem optiSLang. Byla ověřena funkčnost modelu srovnáním numerických simulací tahových zkoušek a experimentů na základě identifikovaných parametrů. Díky tomu bylo překročeno k realizaci dalších rozšiřujících jednoduchých tahových, cyklických a nakonec i tlakových zkoušek.

Za účelem analýzy velkého množství dat z těchto experimentů byla naprogramována aplikace *plTra* v jazyce Python, sloužící k automatizaci analýz experimentu v procesu identifikace materiálových parametrů.

Klíčová slova: plátňová vazba, materiálový model, homogenizace, makro-model, cyklické tahové zkoušky, tlakové zkoušky, kalibrace parametrů materiálu, metoda konečných prvků, automatizace, analýza experimentu

Abstract

This thesis deals with developing of elasto-plastic model for plain weave composite materials and its implementation to FEM computational system and with respect to identification material parameters. Model is proposed as simple as possible, respecting validated universal application. Tensile tests of composites with aramide, carbon and glass reinforcements were simulated. These materials are considered to be homogeneous, orthotropic media in the state of plane stress undergoing large deformations.

Basic tensile tests were performed and proposed material model was implemented to Simulia ABAQUS software. An automatical identification process was designed and identification was performed using optiSLang optimization software. The numerical results were compared with experimental data and the model functionality was verified. By dint of this conclusion new expanding test were performed and analyzed, including pressure tests.

A standalone application *ploTra* was programmed in Python for analysing huge amounts of experimental data and for automatization of the identification process.

Keywords: plain weave, material model, homogenization, macro-model, cyclic tensile tests, pressure tests, material parameters calibration, finite element method, automatization, analysis of experimental data

Obsah

Úvod	3
1 Současný stav v oblasti modelování kompozitních materiálů	5
2 Základní tahové zkoušky plátnových kompozitů	7
2.1 Měřené materiály	8
2.2 Průběh zkoušky	8
2.3 Určení součinitele příčné kontrakce	9
2.4 Vyhodnocení tahových zkoušek	11
3 Materiálový model	14
3.1 Souřadnicové systémy	14
3.1.1 Transformace napětí a deformace	15
3.1.2 Deformace v systému materiálových os	17
3.2 Elasto-plastický model	17
3.2.1 Konstitutivní vztah a deformační energie	18
3.2.2 Funkce plasticity a zpevnění	19
3.3 Hashinovo kritérium porušení	21
4 Proces výpočtu tahové zkoušky	22
4.1 Parametry modelu	22
4.2 Průběh výpočtu	23
4.3 Identifikační proces	24
4.3.1 Stanovení cílové funkce	24
4.3.2 Definice rozdílů tahových křivek	25
4.3.3 Definice rozdílů směrnic cyklů	25
4.3.4 Definice rozdílů indexů porušení	27
4.4 Výsledky tahových zkoušek	27
5 Rozšiřující materiálové zkoušky	31
5.1 Tahové zkoušky	31
5.1.1 Porušení vzorků	32
5.2 Tlakové zkoušky	33

6	Vyhodnocení nových materiálových zkoušek	34
6.1	Tahové zkoušky	34
6.2	Tlakové zkoušky	39
6.3	Zamykání vazby	40
6.4	Průměrování tahových zkoušek	42
6.5	Určení směrnice cyklu	43
	Závěr	45
	Literatura	46
	Příloha A Porušení tkaninových kompozitů	48
	Příloha B Program <i>ploTra</i>	57
B.1	Software ZWICK/ROELL testXpert®	58
B.2	Požadavky a ovládání programu <i>ploTra</i>	60
B.3	Zobrazování a ukládání dat	61
B.4	Analýza křivky cyklické zkoušky	62
B.5	Vývojový diagram	63
	Příloha C Průběh výpočtu MKP	64
	Příloha D Příprava tlakové zkoušky	65
D.1	Příprava vzorků	65
D.2	Nastavení přístrojů	67

Úvod

Tato práce pojednává o vývoji elasto-plastického modelu tkaninových kompozitů pro komerční MKP software. V modelu je uvažována nelineární elasticita, plasticita ve smyku a zamykání vazby tkaniny. Konečnoprvkový model byl od počátku vytvářen jako univerzální nástroj pro co nejjednodušší popis tkaninových kompozitů vyráběných z uhlíkových, aramidových a skleněných vláken s důrazem na zachování minimálního počtu parametrů.

Pro tyto účely byly nejprve provedeny prosté a cyklické tahové zkoušky jednovrstvých tkanin plátnových kompozitů, kdy osnova tkaniny svírala 0° , 45° a 90° vzhledem ke směru zatěžovací síly. Určování Poissonových čísel bylo realizováno metodou korelace digitálních snímků upravených vzorků v programu *mloc*[®] (autor softwaru R. Zemčík) vyvíjeným na Kateře mechaniky.

Získaná data z tahových zkoušek byla zpracována v prostředí MATLAB[®]. Byl vytvořen materiálový model implementovaný nejprve do MKP softwaru MSC.Marc. Z důvodu objevení chyb v softwaru MSC.Marc a nešikovnému způsobu stavby parametrického modelu a vhodnější struktury subroutine v konkurenčním produktu Simulia ABAQUS byl posléze použit tento software. V něm byla s úspěchem využita subroutine UMAT sloužící k uživatelskému popisu mechanického chování materiálu. Samotná implementace materiálového modelu do Simulia ABAQUS byla řešena pomocí této a řady dalších subroutine. Na tomto MKP modelu byly identifikovány parametry, ověřena správnost metodiky přístupu k popisovanému problému a bylo přikročeno k jejímu dalšímu rozvoji a zdokonalení.

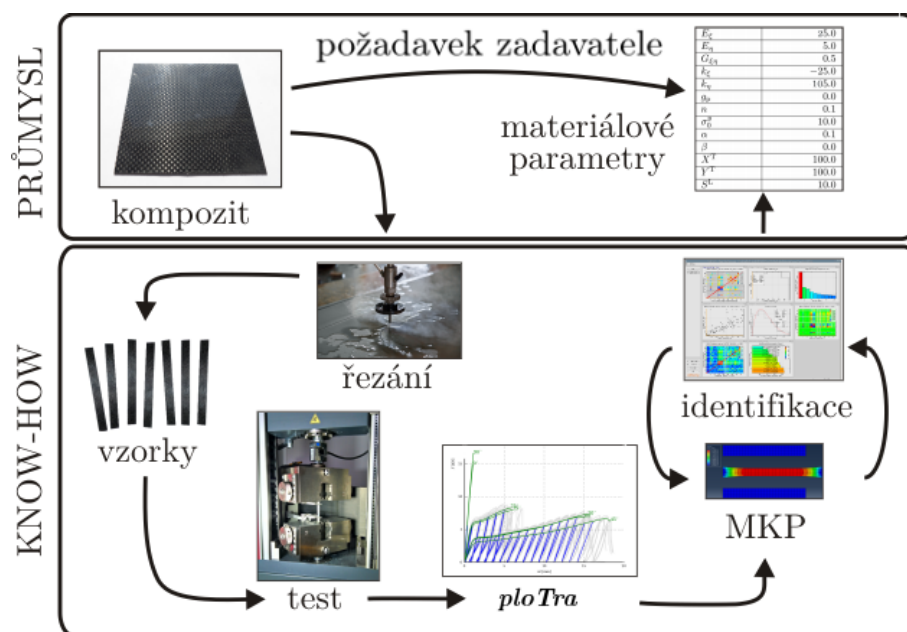
Prvotní výpočtový model, jehož parametry byly identifikovány pomocí výsledků experimentů pro 0° , 45° a 90° , byl tedy ověřen pouze v tahu a pouze pro tři typy plátnových vazeb. Aby bylo v budoucnu možné získat univerzálnější a přesnější výpočtový model, byly provedeny další zkoušky. Byl navýšen počet měřených úhlů (krok po 15° od 0° do 90°), navýšen počet měřených vzorků pro každý úhel a bylo obohaceno portfolio materiálů o jednosměrové varianty. Navíc byly provedeny ve stejném rozsahu i tlakové zkoušky. Celkový počet měřených vzorků kompozitu v této fázi se blížil hranici 1000 kusů.

Protože původní analýza experimentů tahových zkoušek vyžadovala spouštění balíku MATLAB[®], což komplikovalo čtení dat v procesu optimalizace, přičemž se v druhé části práce navíc několikanásobně zvýšilo množství prováděných experimentů, bylo přikročeno k zefektivnění analýz tahových a později i tlakových zkoušek. Byla vyvinuta samostatná aplikace *plTra*, napsaná opět v

Pythonu, která zcela nahrazuje a zrychluje proces zpracování a aplikace naměřených dat v rámci identifikace.

Na Obrázku 1 je vidět schéma procesu, který zprostředkuje rychlou identifikaci materiálových parametrů modelu. Je zde nastíněn aktuální požadavek firem v průmyslu a know-how vyvíjené na Katedře mechaniky Západočeské univerzity. Materiálový model bude využit při výpočtech konkrétních aplikací, např. segmentu kompozitového křídla, kde bude možné snadno porovnat vliv změny nejen vlastností materiálu, ale i úhlu natočení tkaniny na tuhostních parametrech posuzovaného dílce.

Materiálová data potřebná pro vytvoření rozšířeného výpočtového modelu byla získána z tahových zkoušek provedených na trhačím stroji Zwick/Roell Z050 vykonaných podle norem ASTM¹ na Katedře mechaniky Západočeské univerzity v Plzni.



OBRÁZEK 1: Navržený postup pro implementaci materiálového modelu kompozitu

¹Normy ASTM International: D 3039 a D 3410

Kapitola 1

Současný stav v oblasti modelování kompozitních materiálů

Navrhování materiálových modelů kompozitů a jejich implementace do konečnoprvkových softwarů je v současné době velmi aktuální téma. Existuje velké množství vědeckých článků, které se zabývají popisem chování těchto moderních materiálů, a to jak na úrovni mikro-struktury, tak i meso- a makro-struktury materiálu. Cílem této úvodní kapitoly je shrnout zásadní přístupy k modelování meso- a makro-modelů vláknových kompozitních materiálů.

Vůbec prvními pokusy, jak popsat kompozity, byly založeny na lineárních modelech, které byly dále rozšiřovány zaváděním postupného porušování materiálu. Tyto přístupy vůbec nezohledňovaly vlastní mikrostrukturu materiálu a implementace do konečnoprvkového softwaru končila většinou určením několika parametrů, jejichž identifikace byla provedena podle zkušeností s konvenčními materiály. Ve skutečnosti ale použitý typ materiálu a výrobní technologie vedou k vysokému stupni složitosti, která vyžaduje definování řady speciálních materiálových parametrů, k jejichž určení se používají netriviální metody.

Důležitým článkem, jenž publikoval pan profesor P. Ladèveze z pařížské univerzity, se týká poškození makro-modelu laminátu z uhlíkových vláken. Již v roce 1998 prezentoval použitelný materiálový model, který zahrnoval i nelineární odezvu kompozitu v tlaku. Do vyjádření deformační energie zavedl další materiálové charakteristiky, tzv. *faktory vnitřního poškození* a zohlednil i nezanedbatelnou roli rozhraní mezi jednotlivými vrstvami[1]. Tento model je implementován pro explicitní řešič v programu PamCrash v přírůstkovém tvaru [2]. Není zde bohužel příliš zřejmé, jak je v průběhu výpočtu pracováno se zmíněnými materiálovými parametry poškození. Na poli mechaniky dále uvedl na svět tzv. jednokrokovou LATIN metodu (Large Time Increment method) pro konečnoprvkové softwary [3].

Řada modelů předpokládá závislosti chování plátňových kompozitů na rychlosti deformace [4], nicméně doposud zatím nikdo neprezentoval obecně přijatelné závěry a v předkládané práci není uvažována, ačkoliv autor si je vědom nutnosti tuto problematiku v budoucnu dále prozkoumat a zohlednit ji v dalším materiálovém modelu. Také volba pevnostních kritérií je různorodá a převládají známé teorie maximálních napětí či deformací, Hashinova [5], Tsai-Hill [8] a Tsai-Wu [7]. První dvě zmíněná, tzv. *neinteraktivní kritéria* jsou pro vláknové kompozity nevhodná [6]. Pro tuto práci bylo vybráno kritérium Hashinovo.

Vědecké zdroje pojednávající o vlastním procesu identifikace parametrů kompozitu jsou v tomto ohledu velmi skoupé. Pověětšinou se setkáváme pouze s jednoduchou implementací experimentálních dat do různých MKP softwarů a metodika získávání materiálových parametrů je, možná záměrně, utajována. Například článek S. Ogihary popisuje nelineární chování kompozitů s plátňovou vazbou pouze prostřednictvím jednoho parametru [8].

Další z možných způsobů simulace nelineárního chování vláknových kompozitů ve smyku pomocí kubické spline křivky představil tým Conor McCarthyho. Model vhodný jak pro implicitní, tak explicitní řešiče, byl s úspěchem ověřen v MKP softwaru Simulia Abaqus[5].

Model Oliviera Cousigneo, vyvinutý ve spolupráci s univerzitou Lille Nord de France pro koncern DAIMLER AG, uvádí v nelineárních vztazích Ramberg-Osgoodovu formulaci pro výpočet ekvivalentní hodnoty napětí s uvažováním ortotropní plasticity. Jsou zde ukázána srovnání numerických výsledků ze softwaru LS-DYNA a zprůměrovaných tahových křivek z experimentů, avšak bez cyklických testů. Testovány byly vzorky v tahu i tlaku s plátňovou, tak i keprovou vazbou [7]. Experimenty provedené v rámci této práce dále potvrdily skutečnost, že při zatěžování dochází k tuhnutí uhlíkových vláken. Ke stejnému závěru dospěl i tým srbského badatele Djorkievice [9].

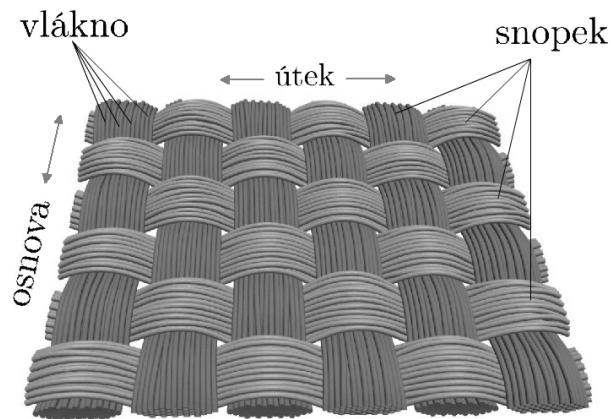
Efekt *zamykání vazby*, který je zevrubně prezentován v předkládané práci, dosud žádný materiálový model pro kompozity nezahrnuje, nicméně začínají se objevovat práce zabývající se konkrétními možnostmi použití konečných prvků pro simulaci tohoto jevu [10].

Na závěr této úvodní kapitoly je vhodné dodat, že materiálový model, popsáný v Kapitole 3, dosud nebyl publikován. Jako první zohledňuje nelineární vlastnosti plátňové vazby při zatěžování způsobené jejím zamykáním a narovnáváním. Stejně tak je poprvé použita kombinace prostých i cyklických zkoušek pro komplexní popis chování plátňových kompozitů. Navíc je oproti ostatním modelům napětí vyjádřeno v úplném a nikoliv přírůstkovém tvaru, což přináší další výhody pro numerické simulace tahových zkoušek.

Kapitola 2

Základní tahové zkoušky plátnových kompozitů

Tkanina je jednou z možných forem uspořádání vláken výztuže kompozitu s využitím různých možností tkaní vazeb ve dvou nebo i více směrech. Vzájemné uspořádání osnovy a útku vytváří tři základní typy vazeb, z nichž jednou je plátnová vazba. Pramenec útku v plátnové vazbě na Obrázku 2.1 prochází vždy pod a nad každým pramenem osnovy (tzv. vyvážená plátnová vazba) [21]. Předložená práce se zabývá právě identifikací materiálových parametrů kompozitů s touto vazbou, a to na úrovni homogenizovaného makromodelu.



OBRÁZEK 2.1: Mikromodel tkaninového kompozitu s plátnovou vazbou s poměrem vláken 1:1 [26]

2.1 Měřené materiály

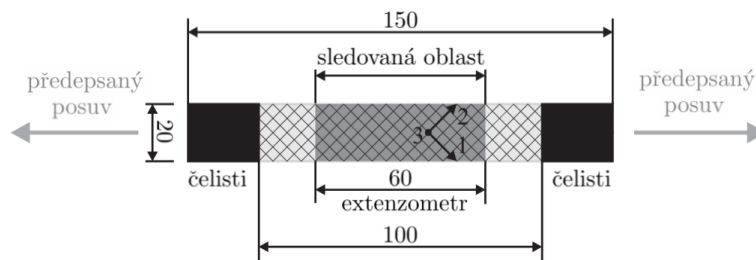
Byly provedeny tahové zkoušky na obdélníkových páscích o velikosti 150×20 mm, které byly vyříznuty pomocí vodního paprsku z kompozitových desek výrobních technologií RTM (*Resin Transfer Molding*) z aramidových, uhlíkových a skelných výtzuží utkaných v plátnové vazbě a epoxidové pryskyřice. Jejich tloušťky jsou uvedeny v Tabulce 2.1. Pro každý materiál byly připraveny vzorky se třemi materiálovými orientacemi pod úhlem $\theta = 0^\circ$, 45° a 90° (viz Obrázek 2.2). V každé kombinaci materiálu a natočení vazby bylo měřeno vždy minimálně pět vzorků použitelných pro další analýzu.

TABULKA 2.1: Průměrné tloušťky kompozitových desek

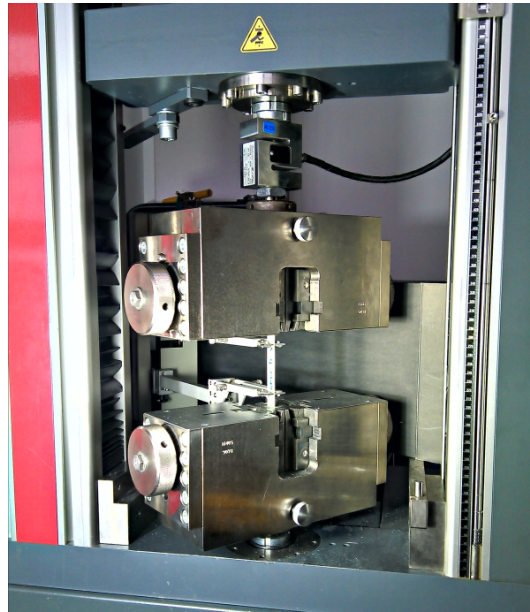
Materiál	t [mm]
Aramid	0.37
Uhlík	0.25
Sklo	0.32

2.2 Průběh zkoušky

Vzorky byly zatěžovány tahem v podélném směru až do porušení. Rychlost příčnicku trhacího stroje byla nastavena na 10 mm/min. Způsob uložení kompozitového pásu v trhacím stroji před započítáním zkoušky je znázorněn na Obrázku 2.2. Cyklickým tahovým zkouškám byly podrobeny všechny typy orientace vazby, ale jejich vliv se projevil pouze u vzorků pro úhel $\theta = 45^\circ$. Okamžik odlehčování u cyklické zkoušky byl řízen v intervalech předem navolenou velikostí síly.



OBRÁZEK 2.2: Rozměry vzorku v [mm] a orientace hlavních materiálových os 1, 2 a 3 vůči směru zatěžování (zde $\theta = 45^\circ$)

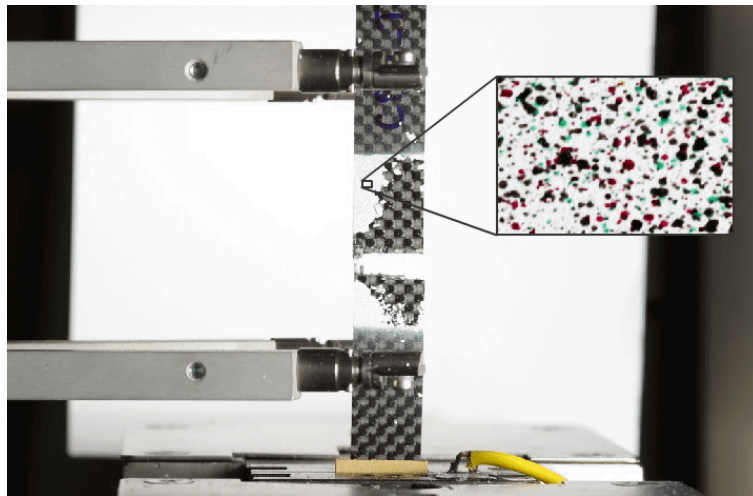


OBRÁZEK 2.3: Vzorek textilního kompozitu na stroji Zwick/Roell Z050 při tahové zkoušce s připnutými rameny extenzometru

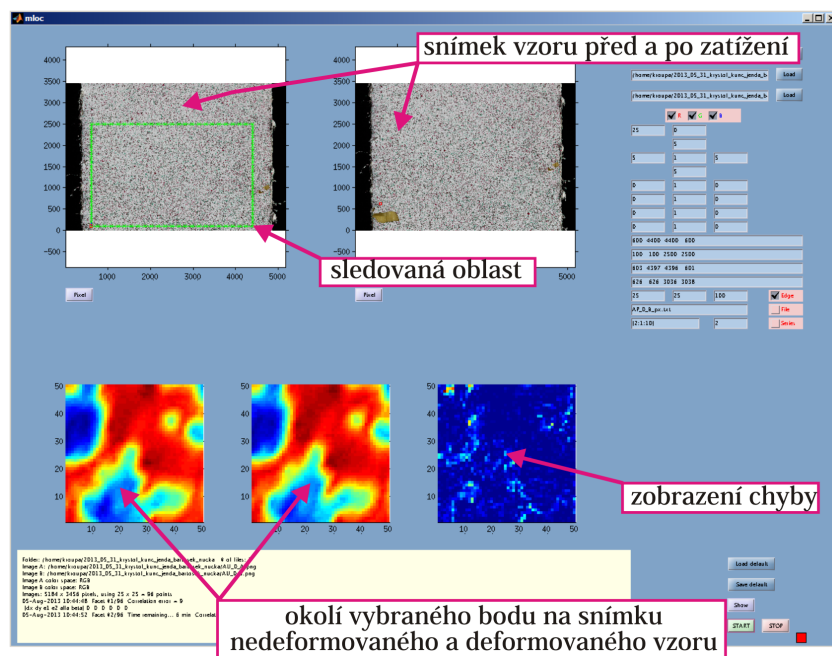
2.3 Určení součinitele příčné kontrakce ve směru materiálových os

Pomocí korelace digitálních snímků softwarem *mloc*, vyvíjeným na Kateře mechaniky R. Zemčíkem, bylo určeno Poissonovo číslo, a to vždy ze dvou vzorků pro úhel $\theta = 0^\circ$ (viz Tabulka 2.2). Tento software využívá vysoce kontrastních náhodných vzorů nanesených přímo na povrch sledovaných vzorků, které jsou následně vyfotografovány ve vysokém rozlišení v trhacím stroji. Nejprve je pořízen snímek v původní konfiguraci před zatížením a pak druhý snímek v deformované konfiguraci po zatížení. V softwaru *mloc* jsou tyto dva snímky porovnány prostřednictvím lokalizace podle světelnosti RGB kanálů vybraných částí nedeformovaného obrazu v obrazu zdeformovaném. Z rozdílů mezi umístěním obrazů (např. ve 20 vybraných bodech) jsou pak vypočteny poměrná prodloužení v podélném (index L) a příčném (index T) směru [22]. Dosazením zprůměrovaných hodnot do vzorce 2.1 pak získáme Poissonovo číslo [11].

$$\nu_{LT} = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \quad (2.1)$$



OBRÁZEK 2.4: Ukázka vzorku po ukončení zkoušky s patrným odrolemíní barvy s nahodilým vzorem, ve výřezu detail vzoru pro software *mloc* (uhlík, $\theta = 0^\circ$)



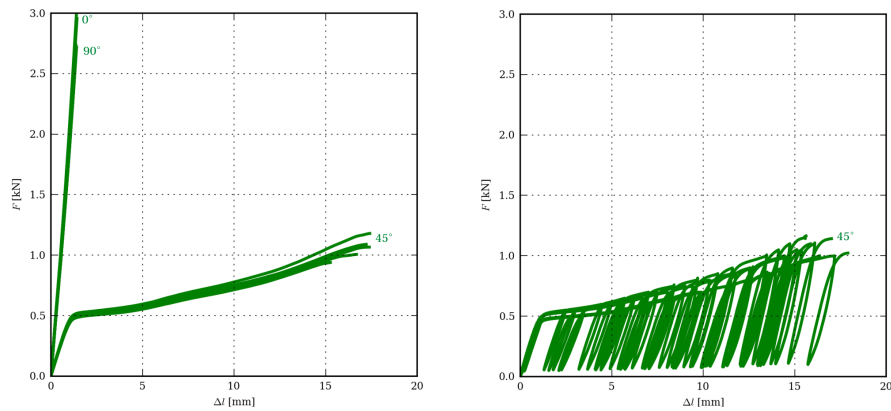
OBRÁZEK 2.5: Uživatelské prostředí programu *mloc* s načtenými snímky vzorů před a po zatížení (autorem softwaru R. Zemčík)

TABULKA 2.2: Poissonova čísla testovaných materiálů

Materiál	$\nu_{\xi\eta}$ [-]
Aramid	0.31
Uhlík	0.19
Sklo	0.24

2.4 Vyhodnocení tahových zkoušek

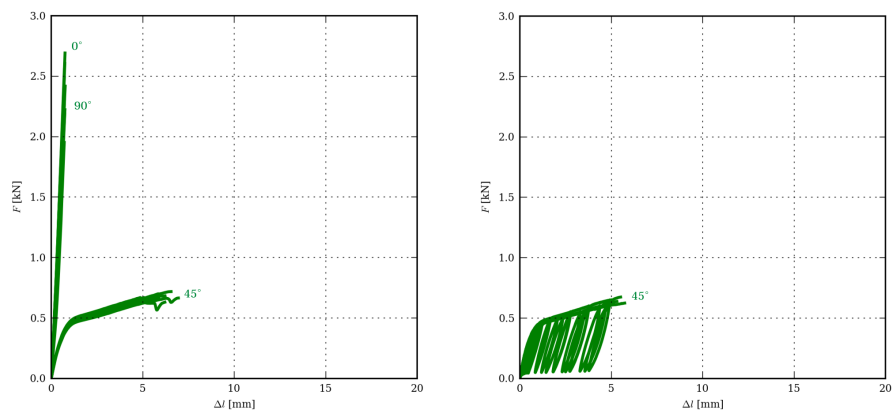
Zpracování dat experimentu bylo provedeno v prostředí MATLAB[®]. Křivky se průměrovaly v bodech v předem definovaném intervalu podél osy prodloužení. Zobrazení zprůměrovaných dat bylo následně naprogramováno v Pythonu s využitím modulu *matplotlib*[23]. Zelené křivky experimentů jsou pro každý testovaný vzorek znázorněny níže na Obrázcích 2.6 - 2.8.



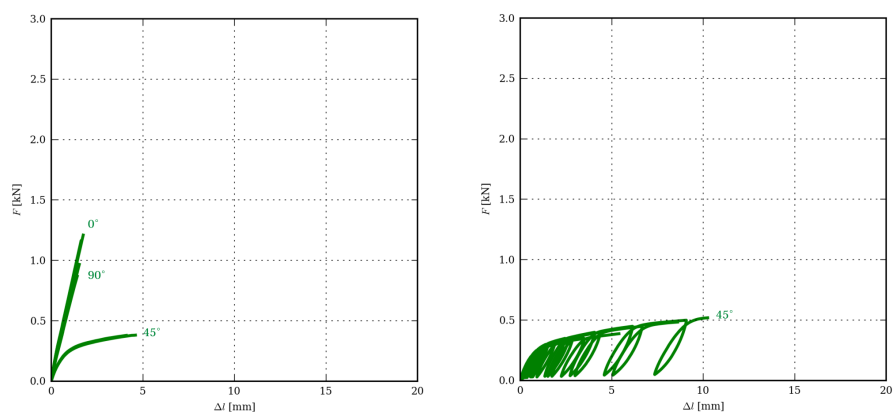
Obrázek 2.6: Diagramy tahové ($\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) a vpravo cyklické zkoušky ($\theta = 45^\circ$) kompozitů z aramidových vláken

Z tahových diagramů lze vysledovat následující skutečnosti:

1. Nelineární závislosti pro $\theta = 0^\circ$ a 90° , u uhlíkových a aramidových je partrné tuhnutí (konvexní křivka) a u skla naopak měknutí (konkávní křivka).
2. Nejvyšší pevnosti v tahu dosahují aramidová vlákna, nejméně pevná jsou vlákna skleněná.
3. Je zřejmé plastické chování materiálu u $\theta = 45^\circ$ (projevuje se plastické tečení).
4. Směrnice hysterezních smyček u cyklických zkoušek nejsou konstantní.
5. Při porušení nejsou již směry snopků navzájem kolmé a zůstávají tak i po odlehčení (zamykání vazby - viz Obrázek 2.9, 6.8).



OBRÁZEK 2.7: Diagramy tahové ($\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) a vpravo cyklické zkoušky ($\theta = 45^\circ$) kompozitů z uhlíkových vláken

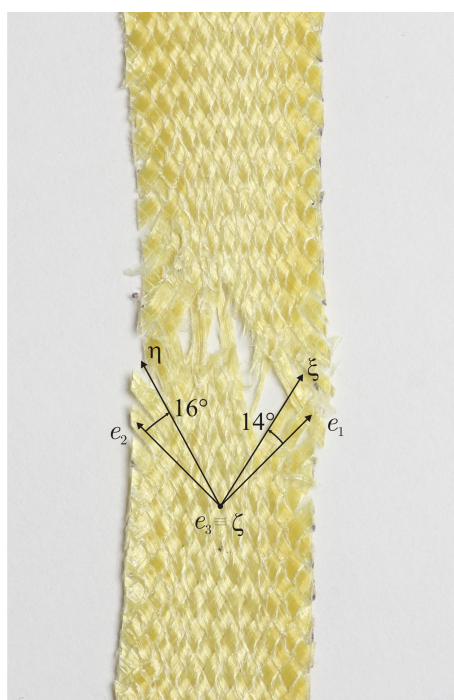


OBRÁZEK 2.8: Diagramy tahové ($\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) a vpravo cyklické zkoušky ($\theta = 45^\circ$) kompozitů ze skelných vláken

Na základě uvedených pozorování byla pokaždé ze dvou vzorků pro $\theta = 45^\circ$ dále změřeno uzamknutí vazby pomocí jednoduché fotogrammetrické metody. Změřené úhly

$$\delta = \delta_1 + \delta_2, \quad (2.2)$$

popisující míru uzamknutí vazby po porušení vzorku, jsou vypsány v Tabulce 2.3. Úhel δ_1 udává odklon od původní materiálové osy 1 (e_1) a podobně δ_2 od 2 (e_2) (viz Obrázek 2.9).



OBRÁZEK 2.9: Uzamknutí vazby a způsob měření úhlů δ_1 , δ_2 (aramid, $\theta = 45^\circ$)

Tabulka 2.3: Úhel zkosení vazby po porušení vzorku $\theta = 45^\circ$.

Materiál	δ [°]
Aramid	30
Uhlík	11
Sklo	7

Kapitola 3

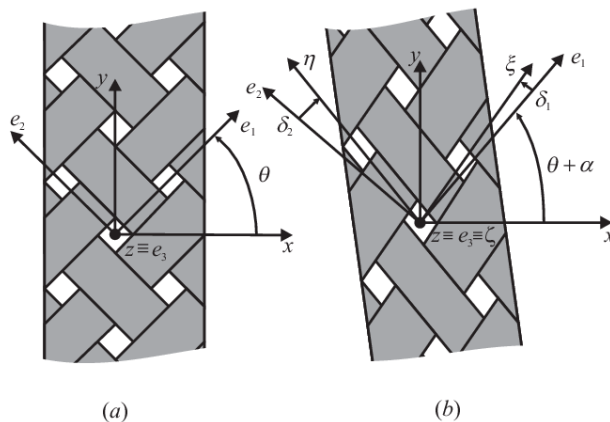
Materiálový model

Tato kapitola pojednává o materiálovém modelu kompozitu s plátnovou vazbou, určeného pro implementaci do konečnoprvkových aplikací. Aby jím bylo možné popsat jevy prozkoumané v předchozí kapitole, je na kompozitový pásek nahlíženo jako na tenkou vrstvu homogeního a ortotropního média ve stavu rovinné napjatosti s uvažováním velkých deformací.

Pro popis vazby (materiálových os) textilních kompozitů byly zavedeny tři souřadnicové systémy. Dále je popsána nelineární závislost mezi deformací a napětím v systému zdeformované konfigurace a tzv. plasticita ve smyku. Poslední důležitou charakteristikou je zohlednění uzamykání plátnové vazby kompozitu.

3.1 Souřadnicové systémy

Chování textilních materiálů je popsáno použitím tří souřadnicových systémů znázorněných na Obrázku 3.1. Globální kartézský souřadnicový systém $O(x, y, z)$ definuje rovinu xy (a její normálu z), ve které je materiálová vazba umístěna. Lokální kartézský souřadnicový systém $O(e_1, e_2, e_3)$ popisuje nedeformovaný stav (kde osy e_1 , e_2 a e_3 označují základní materiálové osy plátnové vazby) a je otočen okolo osy z globálního systému o úhel θ . Lokální afinní souřadnicový systém $O(\xi, \eta, \zeta)$, který se vztahuje k deformovanému stavu (kde osy ξ , η , a ζ označují materiálové osy plátnové vazby po zatížení), je definován dvěma úhly δ_1 a δ_2 mezi příslušnými páry os. Úhel α zastupuje natočení vzorku jako tuhého tělesa.



OBRÁZEK 3.1: Souřadnicové systémy použité pro popis nedeformované a deformované konfigurace textilní vazby kompozitu

3.1.1 Transformace napětí a deformace

Globální systém a systém v nedeformované konfiguraci

Složky rovinného tensoru deformace v souřadnicových systémech $O(x, y, z)$ a $O(e_1, e_2, e_3)$ lze zapsat do vektoru

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{xy} = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}]^T, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{12} = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{12}]^T, \quad (3.1)$$

a podobně složky tensoru napjatosti pro případ rovinné deformace

$$\boldsymbol{\sigma}_{xy} = [\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}]^T, \quad \boldsymbol{\sigma}_{12} = [\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}]^T. \quad (3.2)$$

Transformace napětí a deformace z $O(x, y, z)$ do $O(e_1, e_2, e_3)$ použitím transformační matice [11]

$$\mathbf{T}_r = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -\sin \theta \cos \theta \\ -2 \cos \theta \sin \theta & 2 \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

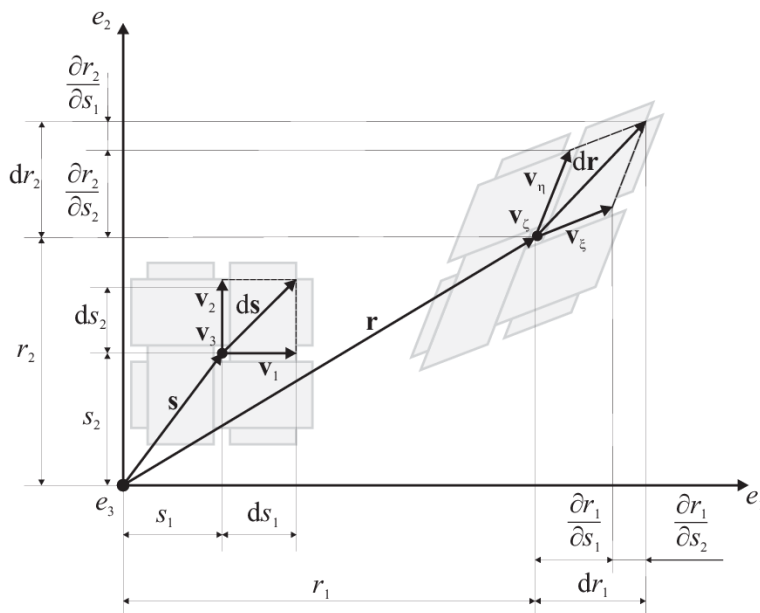
je

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{12} = \mathbf{T}_r \boldsymbol{\varepsilon}_{xy} \quad (3.4)$$

a

$$\boldsymbol{\sigma}_{12} = (\mathbf{T}_r^T)^{-1} \boldsymbol{\sigma}_{xy}. \quad (3.5)$$

Lokální systém a systém v deformované konfiguraci



OBRÁZEK 3.2: Schématicky znázorněná nedeformovaná a deformovaná konfigurace

Transformace složek napětí a deformace mezi systémy $O(\xi, \eta, \zeta)$ a $O(e_1, e_2, e_3)$ je popsána pomocí deformačního gradientu. Ten má ve stavu rovinné napjatosti tvar [12]

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & 0 \\ F_{21} & F_{22} & 0 \\ 0 & 0 & F_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial s_1} & \frac{\partial r_1}{\partial s_2} & 0 \\ \frac{\partial r_2}{\partial s_1} & \frac{\partial r_2}{\partial s_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial r_3}{\partial s_3} \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

kde s_1 , s_2 a s_3 a $r_1 = r_1(s_1, s_2, s_3)$, $r_2 = r_2(s_1, s_2, s_3)$ a $r_3 = r_3(s_1, s_2, s_3)$ jsou souřadnice libovolného bodu ve výchozím a deformovaném stavu, jak je patrné z Obrázku 3.2. Všechny souřadnice jsou zapsány s ohledem na lokální, nikoliv globální systém.

Dva vektory jednoznačně určující souřadnicový systém $O(\xi, \eta, \zeta)$ a směr materiálových os po deformaci z Obrázku 3.2 jsou

$$\mathbf{v}_\xi = [F_{11}, F_{21}, 0]^T, \quad \mathbf{v}_\eta = [F_{12}, F_{22}, 0]^T \quad (3.7)$$

Tensor napětí v deformovaném souřadnicovém systému $O(\xi, \eta, \zeta)$ lze přepsat do vektorového tvaru pro rovinnou napjatost jako

$$\boldsymbol{\sigma}_{\xi\eta} = [\sigma_\xi, \sigma_\eta, \tau_{\xi\eta}]^T. \quad (3.8)$$

Podobně tensor deformace v systému $O(\xi, \eta, \zeta)$ je

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\xi\eta} = [\varepsilon_\xi, \varepsilon_\eta, \varepsilon_{\xi\eta}]^T. \quad (3.9)$$

Transformace ze systému $O(e_1, e_2, e_3)$ do $O(\xi, \eta, \zeta)$ s použitím transformační matice [12]

$$\mathbf{T}_d = \begin{bmatrix} F_{11}F_{11} & F_{21}F_{21} & F_{11}F_{21} \\ F_{12}F_{12} & F_{22}F_{22} & F_{12}F_{22} \\ 2F_{11}F_{12} & 2F_{21}F_{22} & F_{11}F_{22} + F_{21}F_{12} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

je

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\xi\eta} = \mathbf{T}_d \boldsymbol{\varepsilon}_{12}, \quad (3.11)$$

a

$$\boldsymbol{\sigma}_{\xi\eta} = \left(\mathbf{T}_d^T\right)^{-1} \boldsymbol{\sigma}_{12}. \quad (3.12)$$

3.1.2 Deformace v systému materiálových os

Pokud je deformace libovolného bodu v materiálovém souřadnicovém systému $O(e_1, e_2, e_3)$ dána posuvy u_1 a u_2 , pro které platí

$$\mathbf{u} = [u_1, u_2]^T = \mathbf{r} - \mathbf{s} \quad (3.13)$$

pak lze vektor deformace v tomto systému vyjádřit jako

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{12} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial e_1} & + & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial e_1^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial e_1^2} \right) \\ \frac{\partial u_2}{\partial e_2} & + & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial e_2^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial e_2^2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial e_2} + \frac{\partial u_2}{\partial e_1} \right) & + & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial e_1} \frac{\partial u_1}{\partial e_2} + \frac{\partial u_2}{\partial e_2} \frac{\partial u_2}{\partial e_1} \right) \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

3.2 Elasto-plastický model

Tensor deformace $\boldsymbol{\varepsilon}$ je vyjádřen užitím aditivní dekompozice jako součet elastické části (vratné) $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ a plastické části (trvalé) $\boldsymbol{\varepsilon}^p$ [15]:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^p. \quad (3.15)$$

Model je navržen tak, že celkovou hustotu deformační energie ψ lze, podobně jako deformaci, vyjádřit ve tvaru [15]

$$\psi = \psi^e + \psi^p, \quad (3.16)$$

kde je elastická část ψ^e oddělena od plastické ψ^p .

Protože uvažovaný elasto-plastický model zahrnuje pouze plasticitu ve smyku, lze zapsat tensor deformace s ohledem na (3.15) ve vektorovém tvaru pro rovinovou napjatost jako

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\xi\eta} = [\varepsilon_\xi, \varepsilon_\eta, \varepsilon_{\xi\eta}]^T = [\varepsilon_\xi, \varepsilon_\eta, \varepsilon_{\xi\eta}^e]^T + [0, 0, \varepsilon_{\xi\eta}^p]^T. \quad (3.17)$$

3.2.1 Konstitutivní vztah a deformační energie v elastick0m stavu

Konstitutivní vztah je navržen v tomto tvaru:

$$\sigma_\xi = \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon_\xi} = C_{11} \left(1 + \frac{k_\xi}{2} \varepsilon_\xi \right) \varepsilon_\xi + C_{12} \varepsilon_\eta \quad (3.18)$$

$$\sigma_\eta = \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon_\eta} = C_{22} \left(1 + \frac{k_\eta}{2} \varepsilon_\eta \right) \varepsilon_\eta + C_{12} \varepsilon_\xi \quad (3.19)$$

$$\tau_{\xi\eta} = \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon_{\xi\eta}} = \frac{2G_{\xi\eta} \varepsilon_{\xi\eta}^e}{\left[1 + \left(\frac{2G_{\xi\eta} |\varepsilon_{\xi\eta}^e|}{\tau^A + 2G_{\xi\eta}^\infty |\varepsilon_{\xi\eta}^e|} \right)^n \right]^{\frac{1}{n}}}, \quad (3.20)$$

kde jsou elastické konstanty vypočteny ze vztahů

$$C_{11} = \frac{E_\xi}{1 - \frac{E_\eta}{E_\xi} \nu_{\xi\eta}^2}, \quad (3.21)$$

$$C_{12} = \nu_{\xi\eta} \frac{E_\eta}{1 - \frac{E_\eta}{E_\xi} \nu_{\xi\eta}^2}, \quad (3.22)$$

$$C_{22} = \frac{E_\eta}{1 - \frac{E_\eta}{E_\xi} \nu_{\xi\eta}^2}, \quad (3.23)$$

$$C_{33} = 2G_{\xi\eta}, \quad (3.24)$$

kde E_ξ a E_η jsou počáteční moduly pružnosti v tahu ve směrech ξ a η pro $\varepsilon_\xi = 0$ a $\varepsilon_\eta = 0$, $\nu_{\xi\eta}$ je Poissonovo číslo a $G_{\xi\eta}$ je počáteční modul ve smyku pro $\varepsilon_{\xi\eta} = 0$.

Dále

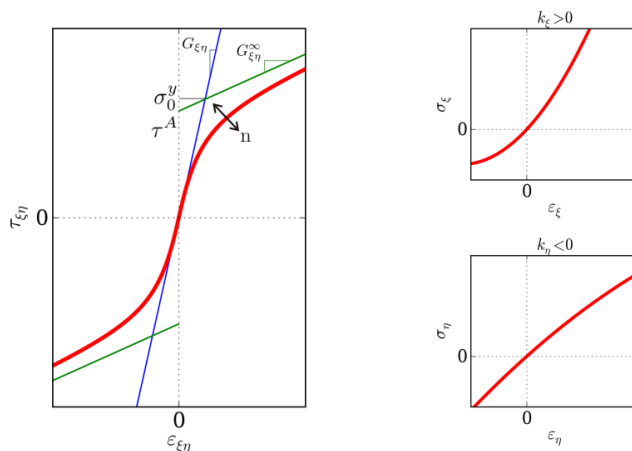
$$G_{\xi\eta}^\infty = g_p G_{\xi\eta}, \quad g_p \in \langle 0, 1 \rangle \quad (3.25)$$

je smykový modul pro $\varepsilon_{\xi\eta}^e = \infty$,

$$\tau^A = \sigma_0^y \left(1 - \frac{G_{\xi\eta}^\infty}{G_{\xi\eta}} \right) \quad (3.26)$$

a k_ξ , k_η jsou materiálové konstanty zohledňující nelineární chování (zpevňování nebo změkčování) svazku vláken. Parametr n je tvarový a jeho vliv je patrný z grafu $\tau_{\xi\eta} - \varepsilon_{\xi\eta}$ na Obrázku 3.3.

Výše uvedené závislosti napětí na deformaci jsou pro úplnost zobrazeny v grafech Obrázku 3.3.



OBRÁZEK 3.3: Grafy závislosti napětí na deformacích v systému materiálových os v deformované konfiguraci

Vztah pro výpočet elastické části deformační energie ψ^e pak vypadá takto

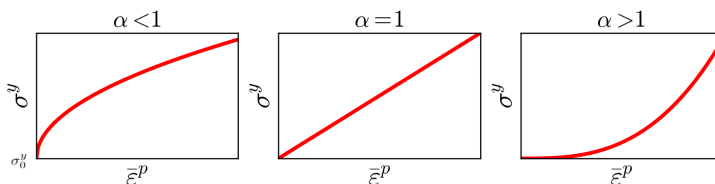
$$\begin{aligned} \psi^e &= C_{11} \left(\varepsilon_\xi + \frac{k_\xi}{6} \varepsilon_\xi^3 \right) + C_{22} \left(\varepsilon_\eta + \frac{k_\eta}{6} \varepsilon_\eta^3 \right) + \\ &+ C_{12} \varepsilon_\xi \varepsilon_\eta + \int_0^{\varepsilon_{\xi\eta}^e} \frac{2G_{\xi\eta} \varepsilon_{\xi\eta}^e}{\left[1 + \left(\frac{2G_{\xi\eta} |\varepsilon_{\xi\eta}^e|}{\tau^A + 2G_{\xi\eta}^\infty |\varepsilon_{\xi\eta}^e|} \right)^n \right]^{\frac{1}{n}}} d\varepsilon_{\xi\eta}^e \end{aligned} \quad (3.27)$$

3.2.2 Funkce plasticity a zpevnění

Funkce zpevnění

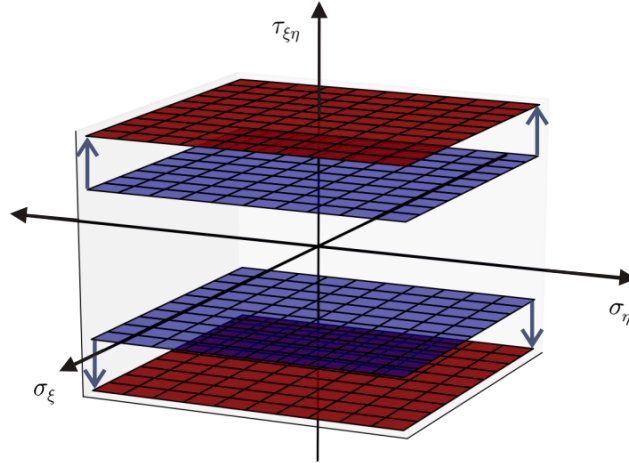
Funkce zpevnění (Obrázek 3.4) je předpokládána ve tvaru tzv. „mocinného zákona“

$$\sigma^y = \sigma_0^y + \beta (\bar{\varepsilon}^p)^\alpha. \quad (3.28)$$



OBRÁZEK 3.4: Grafy funkce zpevnění

Funkce plasticity



OBRÁZEK 3.5: Změna plochy plasticity při tečení materiálu

Funkci plasticity předpokládáme ve tvaru

$$\Phi = |\tau_{\xi\eta}| - \sigma^y = |\tau_{\xi\eta}| - \sigma_0^y - \beta (\bar{\varepsilon}^P)^\alpha, \quad (3.29)$$

což zohledňuje pouze tzv. plasticitu ve smyku. Plasticita je definována v souřadnicovém systému deformované konfigurace $O(\xi, \eta, \zeta)$ a hodnota redukovaného napětí je tedy $\sigma_{red} = |\tau_{\xi\eta}|$. Pokud

$$\Phi \leq 0 \quad (3.30)$$

pak je materiál v elastickém stavu, v opačném případě se projevuje plastické tečení.

Plastická část hustoty deformační energie je

$$\psi^P = \int_0^{\bar{\varepsilon}^P} \beta (\bar{\varepsilon}^P)^\alpha d\bar{\varepsilon}^P = \frac{\beta}{\alpha + 1} (\bar{\varepsilon}^P)^{\alpha+1}. \quad (3.31)$$

3.3 Hashinovo kritérium porušení pro textilní kompozity

Pro popis počátečního porušení textilních kompozitů je použito Hashinovo kritérium [17]. Pět módů porušení a vztahy pro výpočet příslušných indexů porušení \mathcal{F}_ξ^T , \mathcal{F}_ξ^C , \mathcal{F}_η^T , \mathcal{F}_η^C , a $\mathcal{F}_{\xi\eta}$ jsou sepsány na následujících řádcích.

Tahové porušení ve směru ξ

K porušení materiálu dojde, když

$$\mathcal{F}_\xi^T = \left(\frac{\sigma_\xi}{X^T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{\xi\eta}}{S^L} \right)^2 = 1. \quad (3.32)$$

Symbol X^T je tahová pevnost ve směru ξ a symbol S^L je smyková pevnost v rovině $\xi\eta$.

Tlakové porušení ve směru ξ

K porušení materiálu dojde, když

$$\mathcal{F}_\xi^C = \left(\frac{\sigma_\xi}{X^C} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{\xi\eta}}{S^L} \right)^2 = 1, \quad (3.33)$$

Symbol X^C je pevnost v tlaku ve směru ξ .

Tahové porušení ve směru η

K porušení materiálu dojde, když

$$\mathcal{F}_\eta^T = \left(\frac{\sigma_\eta}{Y^T} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{\xi\eta}}{S^L} \right)^2 = 1, \quad (3.34)$$

Symbol Y^T je tahová pevnost ve směru η .

Tlakové porušení ve směru η

K porušení materiálu dojde, když

$$\mathcal{F}_\eta^C = \left(\frac{\sigma_\eta}{Y^C} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{\xi\eta}}{S^L} \right)^2 = 1, \quad (3.35)$$

Symbol Y^C je tlaková pevnost ve směru η .

Smykové porušení v rovině kompozitu ξ - η

Ve stavu rovinné napjatosti ve smyku k poruše dojde právě tehdy, když

$$\mathcal{F}_{\xi\eta} = \left(\frac{\tau_{\xi\eta}}{S^L} \right)^2 = 1. \quad (3.36)$$

Kapitola 4

Proces výpočtu tahové zkoušky a identifikace parametrů

Původně byla uvažována implementace diskutovaného materiálového modelu do MKP softwaru MSC.Marc. Bohužel bylo objeveno množství chyb v programu, díky kterým tento program selhává i na příkladech fundamentálních úloh. Přestože chyby byly nahlášeny vývojovému centru, doposud nebyly ani po několika letech v nových verzích opraveny.

Mimo jiné i z tohoto důvodu byl nakonec pro implementaci vybrán software Simulia ABAQUS, ve kterém je dobře integrován programovací jazyk Python.

4.1 Parametry modelu

V Tabulce 4.1 jsou přehledně seřazeny všechny materiálové parametry vstupující do výpočtu. Neočíslované parametry nejsou identifikovány, ale musejí být definovány pro provedení analýz.

TABULKA 4.1: Identifikovatelné materiálové parametry.

Lineární elastické parametry		
1	E_ξ	Počáteční modul pružnosti ve směru ξ direction, pro $\varepsilon_\xi = 0$.
2	E_η	Počáteční modul pružnosti ve směru η , pro $\varepsilon_\eta = 0$.
–	$\nu_{\xi\eta}$	Poissonovo číslo.
3	$G_{\xi\eta}$	Počáteční smykové napětí, pro $\varepsilon_{\xi\eta} = 0$.
Nelineární elastické parametry		
4	k_ξ	Nelinearita ve směru ξ . Zohledňuje nelineární chování vlastních vláken a narovnávání původně spletených svazků.
5	k_η	Nelinearita ve směru η . Zohledňuje nelineární chování vlastních vláken a narovnávání původně spletených svazků.
6	g_p	Násobitel smykového napětí pro stanovení $G_{\xi\eta}^\infty$.
7	n	Tvarový parametr závislosti smykového napětí na $\varepsilon_{\xi\eta}$.
Plastické parametry		
8	σ_0^y	Počáteční napětí v plastickém stavu.
9	β	Směrnice zpevňující funkce.
10	α	Tvarový parametr zpevňující funkce.
Pevnostní parametry		
11	X^T	Pevnost v tahu ve směru ξ
–	X^C	Pevnost v tlaku ve směru ξ
12	Y^T	Pevnost v tahu ve směru η
–	Y^C	Pevnost v tlaku ve směru η
13	S^L	Smyková pevnost v rovině $\xi\eta$

4.2 Průběh výpočtu

Jak již bylo řečeno, prezentovaný materiálový model byl implementován do konečnoprvkového softwaru ABAQUS pomocí subroutiny UMAT. Další tři subroutiny UDISP, URDFIL a UEXTERNALDB byly použity pro vlastní simulaci experimentu a ukládání výsledků. Průběh výpočtu a okamžiky vstupu jednotlivých subroutin názorně ilustruje vývojový diagram na Obrázku C.1 [18].

Numerický model kompozitového pásku se stává z 4×20 čtyřuzlových bilineárních elementů pro rovinnou napjatost (typ CPS4) s délkou hrany $a = 5$ mm. Simulována byla pouze část pásku mezi čelistmi trhačícího stroje, přičemž byly zaznamenávány hodnoty posuvu a zatížení na „virtuálním extensometru“ o délce 12 elementů.

Kompletní proces identifikace parametrů je řízen prostřednictvím softwaru optiSLang, což je výkonný výpočetní nástroj pro realizaci multidiscipinárních optimalizací či citlivostních analýz. Výhodou OptiSLangu je jeho univerzální použití, které spočívá v možnosti vyčíslení cílových funkcí v téměř libovolném výpočtovém prostředí včetně ABAQUSu. OptiSLang sám pak slouží k sesta-

vení a provedení *optimalizace* parametrů modelu. Komunikace OptiSLangu s ostatními softwary probíhá pomocí jednoduchých textových souborů [22].

OptiSLang v úloze identifikace materiálových konstant hledá pomocí zvolené optimalizační metody takovou kombinaci parametrů (viz Tabulka 4.1), při které se definované závislosti (např. tahové diagramy $F-\Delta l$) experimentu a MKP výpočtu co nejvíce přiblížily - říkáme, že minimalizujeme cílovou funkci sestávající se z residuí (rozdílů) daných závislostí. Sestavení cílové funkce je předmětem následující podkapitoly.

Zpracování výsledků identifikace a grafické porovnání numerických dat s daty experimentu bylo realizováno prostřednictvím programovacího jazyka Python a jeho modulu `matplotlib`. Tyto výstupy jsou přehledně ukázány v Kapitole 4.4.

4.3 Identifikační proces

4.3.1 Stanovení cílové funkce

Identifikace parametrů uvedených v Tabulce 4.1 byla provedena použitím optimalizačních metod dostupných v softwaru optiSLang [19] ve třech krocích. V každém se minimalizuje chyba mezi hodnotami z experimentu (horní index E) a numerické simulace (horní index N). První residuum se skládá z rozdílu tahových křivek r_L , druhé z rozdílu směrnic cyklů r_T a třetí z rozdílu kritéria porušení r_F . V prvním kroku je hledána nejlepší možná shoda závislosti síly na prodloužení, a pokud je nalezena, přejde se k dalším krokům - minimalizaci chyb směrnic cyklů a počátečních hodnot porušení kompozitního pásku. Hraniční hodnoty parametrů optimalizace jsou uvedeny v Tabulce 4.2.

TABULKA 4.2: Hraniční hodnoty parametrů pro optimalizaci, shodné pro všechny testované materiály

Parametr	Spodní hranice	Horní hranice	Jednotky
E_ξ	5.0	50.0	[GPa]
E_η	5.0	50.0	[GPa]
$G_{\xi\eta}$	0.5	5.0	[GPa]
k_ξ	-25.0	75.0	[-]
k_η	-25.0	75.0	[-]
g_p	0.0	1.0	[-]
n	0.1	5.0	[-]
σ_0^y	10.0	50.0	[MPa]
α	0.1	5.0	[-]
β	0.0	1.0	[GPa]
X^T	100.0	500.0	[MPa]
Y^T	100.0	500.0	[MPa]
S^L	10.0	150.0	[MPa]

V softwaru optiSLang byl použit NLPQL (*Nonlinear Programming using a*

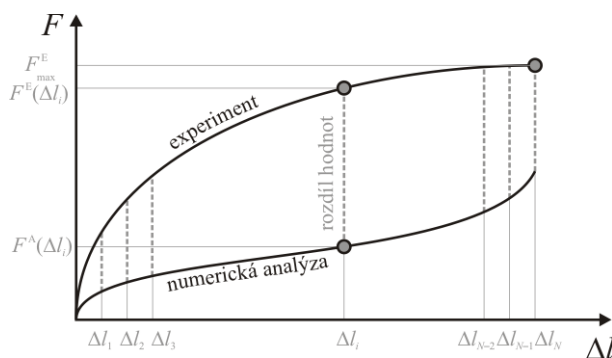
Quadratic or Linear Least-square algorithm) algoritmus založený na gradientních optimalizačních metodách a algoritmus SDI (*Simple Design Improvement*).

4.3.2 Definice rozdílu tahových křivek

Rozdíl mezi daty tahových křivek experimentu a numerické simulace byl zvolen

$$r_L = \sum_{\theta} \sum_{i=1}^N \left(\frac{F^E(\theta, \Delta l_i) - F^N(\theta, \Delta l_i)}{F_{\max}^E(\theta)} \right)^2, \quad (4.1)$$

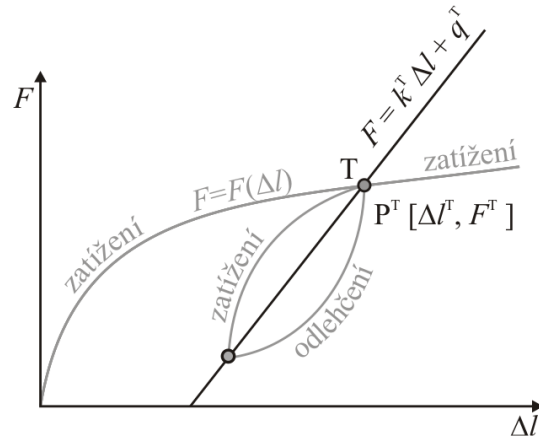
kde Δl_i je hodnota posuvu ve sledované oblasti vzorku, $F^E(\theta, \Delta l_i)$ je hodnota zatěžovací síly experimentu, $F^N(\theta, \Delta l_i)$ je vypočtená hodnota zatěžovací síly z numerické simulace a F_{\max}^E je maximální síla dosažená při experimentu. Jelikož experimentální a numerická data nemají shodné rozložení bodů po ose prodloužení (Δl), bylo provedeno převzorkování křivek vektorem $v = [v_i]$, $v_{i+1} - v_i = C$ čítajícím $i = N = 1000$ prvků. První suma je provedena přes všechny zkoumané materiálové orientace (zde $\theta = 0^\circ$, $\theta = 45^\circ$, a $\theta = 90^\circ$).



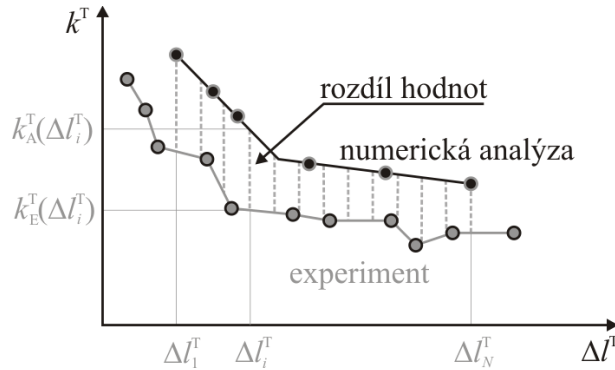
OBRÁZEK 4.1: Stanovení rozdílu tahových křivek z experimentu a numerického modelu

4.3.3 Definice rozdílu směrnic cyklů

Jelikož použitý materiálový model nemůže simulovat hysterézní chování kompozitu při cyklickém zatěžování, byla experimentální data z tohoto důvodu aproximována přímkou procházející vždy nejnižším a nejvyšším bodem hysterézní smyčky (viz Obrázek 4.2).



OBRÁZEK 4.2: Stanovení směrnice cyklu



OBRÁZEK 4.3: Rozdíl směrnic cyklů experimentu a numerického modelu

Residuum udávající rozdíl mezi hodnotami směrnic je vypočteno jako

$$r_T = \sum_{\theta} \sum_{i=1}^N \left(\frac{k_E^T(\theta, \Delta l_i^T) - k_N^T(\theta, \Delta l_i^T)}{k_E^T(\theta, \Delta l_N^T) - k_E^T(\theta, \Delta l_1^T)} \right)^2, \quad (4.2)$$

kde $k_E^T(\Delta l_i^T)$ je hodnota směrnice z experimentu a $k_N^T(\Delta l_i^T)$ je hodnota směrnice z numerické simulace. První suma byla v této části práce pouze pro $\theta = 45^\circ$. Data bylo třeba opět převzorkovat pomocí vektoru v (pro osu Δl^T) s $N = 1000$ prvků.

4.3.4 Definice rozdílu indexů porušení

Maximální hodnota ze všech indexů porušení počítaných ve sledované oblasti konečnoprvkového modelu kompozitního pásku by měla být na konci každé numerické simulace rovna jedné, protože simulace je zastavena právě na hodnotě maximální zatěžovací síly experimentu. Rozdíl hodnot počátečních porušení je

$$r_F = \sum_{\theta} \left(1 - \max(\mathcal{F}_1^T(\theta), \mathcal{F}_1^C(\theta), \mathcal{F}_2^T(\theta), \mathcal{F}_2^C(\theta), \mathcal{F}_{12}(\theta)) \right)^2 \quad (4.3)$$

kde suma je provedena přes všechny testované materiálové orientace (zde $\theta = 0^\circ$, $\theta = 45^\circ$ a $\theta = 90^\circ$).

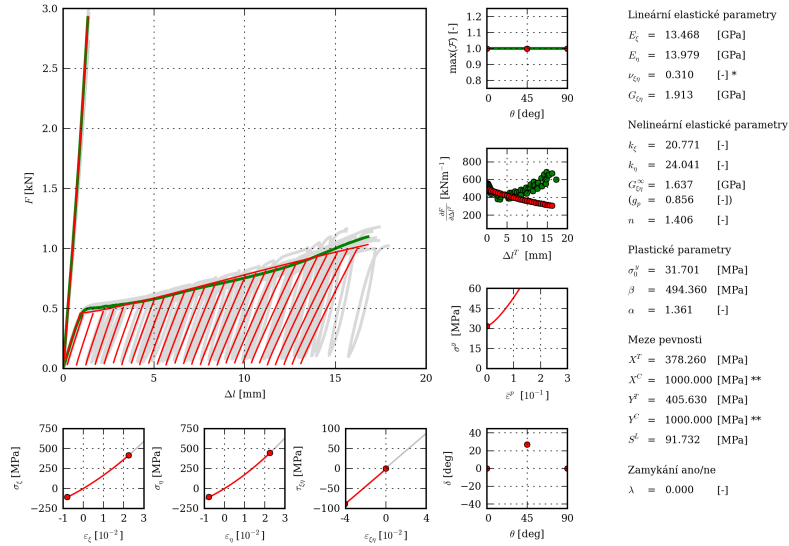
4.4 Výsledky tahových zkoušek

Srovnání výsledků experimentu s numerickým modelem je zobrazeno pro kompozit z aramidových vláken na Obrázku 4.4 a 4.5, pro kompozit s uhlíkovými vlákny na Obrázku 4.6 a konečně pro pásy se skelnými vlákny na Obrázku 4.7. Šedivé křivky představují vždy skutečná naměřená data, zelené křivky a tečky zastupují zprůměrované experimenty a červené křivky a tečky reprezentují data z numerického modelu. Obrázky obsahují grafy závislosti síly na prodloužení na extenzometru pro prosté a cyklické tahové zkoušky a dále pak grafické znázornění dalších parametrů pro názornou ilustraci nelineárního chování testovaných vzorků. Efekt zamykání vazby je popsán dvěma úhly δ_1 a δ_2 , pouze u výsledků kompozitu s aramidovými vlákny na Obrázku 4.4 nebyl pro srovnání uvažován a oba úhly jsou v tomto případě rovny nule. Porovnání tohoto jevu pozorovaného při experimentech s numerickou simulací je v Tabulce 4.3, kde je δ vyjádřeno pomocí rovnice (2.2).

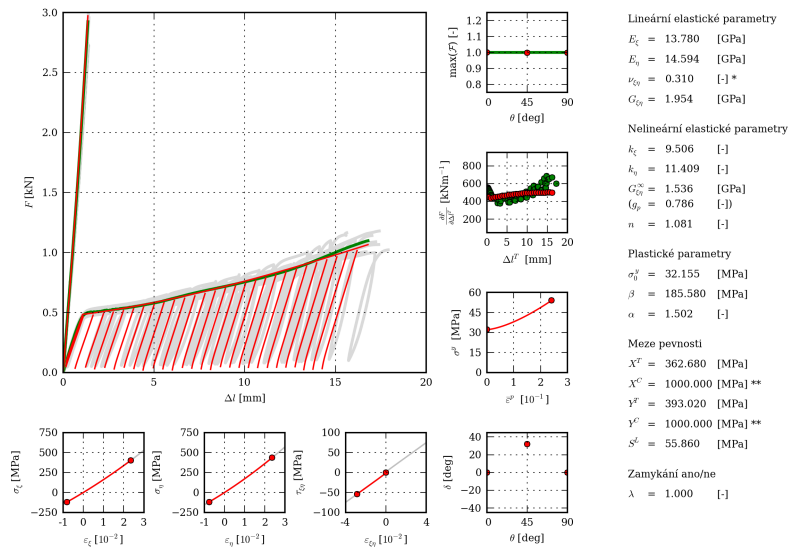
Tabulka 4.3: Porovnání úhlů zkosení vazby δ [$^\circ$] při porušení pro orientaci materiálových os pod úhlem $\theta = 45^\circ$.

Materiál	Experiment	Numerická simulace
Aramid	30	32
Uhlík	11	13
Sklo	7	8

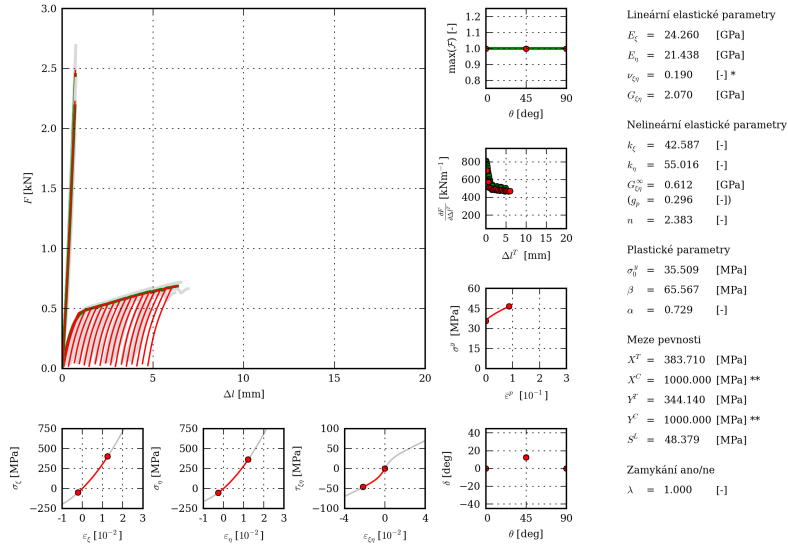
Prezentované výsledky ukazují na dobrou shodu experimentu s numerickým řešením. Materiálový model popisuje (s použitím pouze dvou nelineárních parametrů) chování kompozitu při zatěžování ve směru materiálových os a zároveň dobře simuluje i nelineární odezvu materiálu při zatěžování pod úhlem $\theta = 45^\circ$. Na druhou stranu nelze nepřehlédnout jistou chybu u popisu hysterezních smyček zejména u kompozitů z aramidových vláken, kde zohlednění efektu zamykání výrazně přispělo ke shodě tahových křivek, ale tangenty cyklu přesto nekorespondují s experimentem. Možností, jak hysterezi správně popsat, je rozšířit



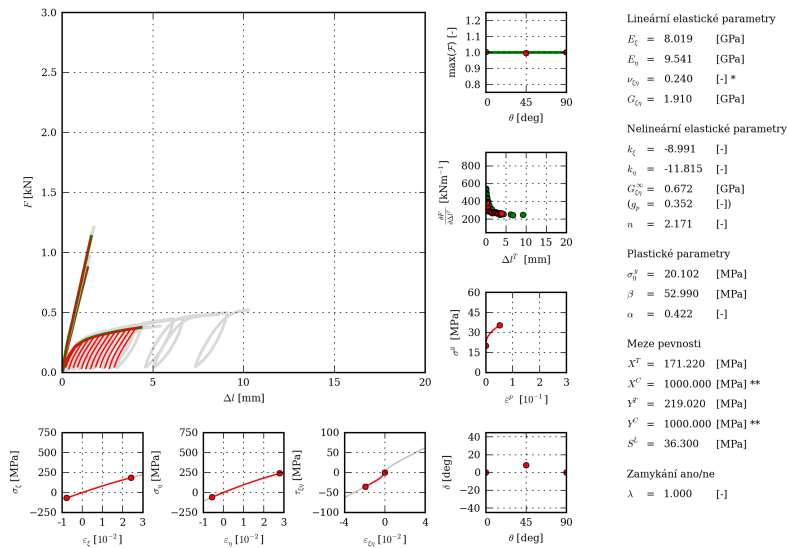
OBRÁZEK 4.4: Výsledky pro kompozit z aramidových vláken bez vlivu zamykání vazby



OBRÁZEK 4.5: Výsledky pro kompozit z aramidových vláken s respektováním zamykání vazby



OBRÁZEK 4.6: Výsledky pro kompozit z uhlíkových vláken s vlivem zamykání vazby



OBRÁZEK 4.7: Výsledky pro kompozit ze skelných vláken s vlivem zamykání vazby

model o viskoelasticitu - v tomto případě by se ale již hledala shodná odezva MKP modelu po celé křivce experimentu.

Velkým přínosem modelu je zohlednění efektu zamykání vazby, s kterým je možné MKP model o poznání lépe nakalibrovat, a to platí pro všechny typy zkoumaných materiálů.

Představený materiálový model nesplnil veškerá očekávání. Proto bylo rozhodnuto o provedení rozšiřujících materiálových zkoušek. Přidáním dalších materiálových orientací do identifikačního procesu se nový, komplexnější model znovu ověří a připraví se pro další možné rozšíření, např. o přesnější popis kompozitů v tlaku či zohlednění i jiných typů vazeb.

Kapitola 5

Rozšiřující materiálové zkoušky

Rozšiřující tahové a tlakové zkoušky byly prováděny dle standardů ASTM (*American Society for Testing and Materials*). Zkoušky byly realizovány v průběhu 6 měsíců. Nejprve byly provedeny jednoduché, pak cyklické tahové na závěr tlakové. Počet měřených vzorků se v této části práce přiblížil počtu 1000 kusů.

Na základě poznatků získaných z prvních testů pro materiálové orientace $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ a 90° bylo přikročeno k dalším experimentům, abychom získali univerzálnější a přesnější výpočtový model. Byl navýšen počet měřených úhlů (krok po 15° od 0° do 90°), navýšen počet měřených vzorků pro každý úhel a bylo obohaceno portfolio materiálů o jednosměrové varianty. Dále byly provedeny i tlakové zkoušky, popsané detailně v druhé části této kapitoly. Od každého typu vazby, materiálu a orientace materiálových os bylo změřeno 6 vzorků, z čehož se pokaždé minimálně pět použilo pro další analýzu dat pomocí programu *plTra*. Schéma (na Obrázku 2.3) a nastavení tahových zkoušek je shodné se základními experimenty popsanych ve druhé kapitole. V rámci rozšiřujících zkoušek byly testovány silnější a užší, 15 mm vzorky, a cyklické zkoušky byly v této části práce řízeny nikoliv silou, ale pozicí na příčnicku $\Delta l_p = 1$ mm. Tloušťky nových vzorků jsou uvedeny v 5.1.

5.1 Tahové zkoušky plátnových a jednosměrových kompozitů

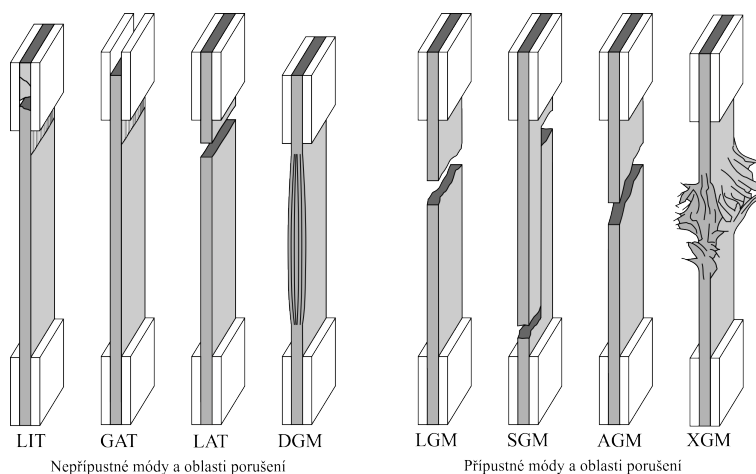
Tahové zkoušky plátnových kompozitů jsou méně problematické než zkoušky jednosměrových, kde zejména u vláken orientovaných ve směru zatížení dosahují průměrné hodnoty síly při porušení u aramidu a uhlíku až 30 kN. V těchto případech je nutné vzorky vystužit hliníkovými příložkami, neboť jinak dochází v místech upnutí do trhacího stroje díky samosvorným čelistem k předčasné destrukci vzorku.

TABULKA 5.1: Průměrné tloušťky kompozitových desek (nové experimenty)

Materiál	t [mm] (jednosměr)	t [mm] (plátno)
Aramid	2.0	2.2
Uhlík	1.5	2.0
Sklo	1.75	1.75

5.1.1 Porušení vzorků

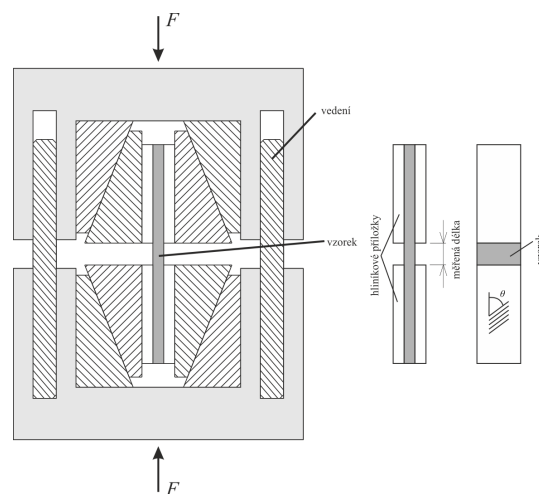
Každému testovanému vzorku by měl být přiřazen podle norem ASTM tzv. identifikační kód porušení, podle kterého je rozhodnuto o platnosti či vyřazení experimentu. Jedná se o označení porušení zahrnující informaci o módu, oblasti a místě porušení. Identifikační kódy se skládají ze tří znaků, kde první udává mód porušení, druhý rozsah porušení a třetí místo porušení [20]. Z Obrázku 5.1 jsou patrné přípustné módy porušení pro tahové zkoušky kompozitních materiálů.



OBRÁZEK 5.1: Přípustné a nepřípustné módy a oblasti porušení pro tah [13], [20]

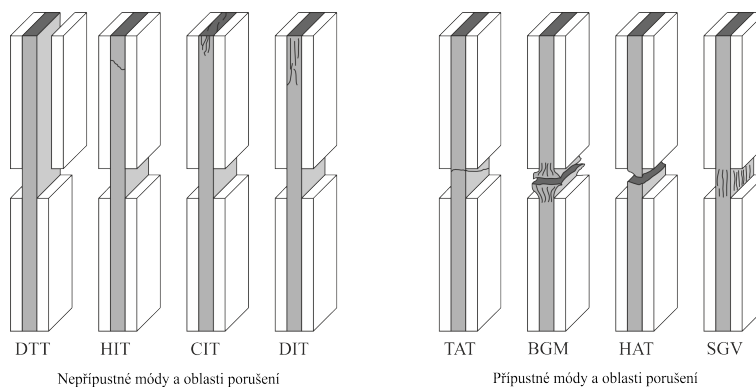
V Příloze A je možné nahlédnout na vybrané snímky všech testovaných typů vzorků pořízených právě při porušení anebo po ukončení tahové zkoušky.

5.2 Tlakové zkoušky plátňových a jednosměrových kompozitů



OBRÁZEK 5.2: Schéma tlakové zkoušky [20]

Tlakové zkoušky kompozitních pásků, jejichž schéma je na (Obrázku 5.2), byly specifické svou náročností na přípravu, tak i poměrně komplikovaným nastavením a prováděním samotné zkoušky. Bylo třeba obsluhovat najednou tři počítače - jeden řídil zkoušky na trhacím stroji, další ukládal snímky z fotoaparátů a třetí ovládal synchronizované samospouště. Z Obrázku 5.3 jsou patrné přípustné módy porušení pro tlakové zkoušky, podle kterých byla prováděna selekce dat použitých pro další analýzu. Skupiny měřených vzorků byly shodné s tahovými zkouškami, vždy po 6 kusech od každé materiálové orientace o rozměrech 150×20 mm a tloušťkách uvedených v 5.1.



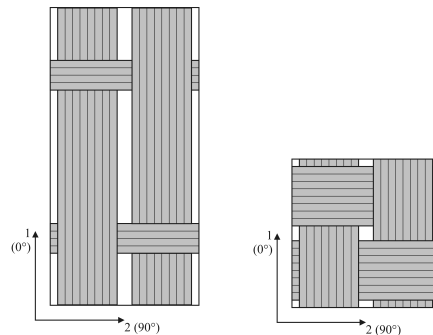
OBRÁZEK 5.3: Příjímavé a nepřijímavé módy a oblasti porušení pro tlak [14],[20]

Kapitola 6

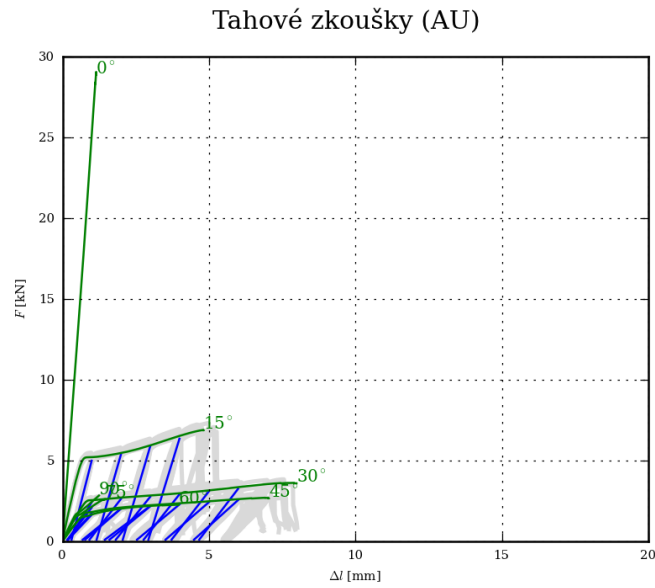
Vyhodnocení nových materiálových zkoušek

6.1 Tahové zkoušky

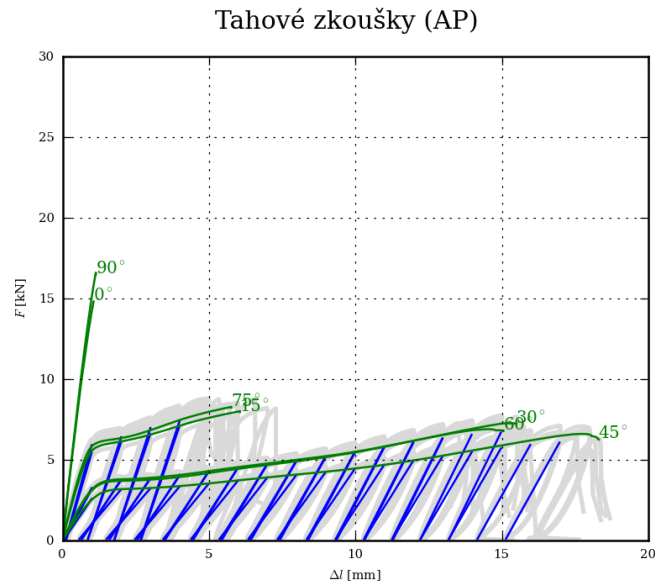
Jak již bylo zmíněno, byly provedeny experimenty na třech typech materiálů - na kompozitech s uhlíkovými, aramidovými a skelnými snopky vláken zapletených v plátňové vazbě. Každá tato skupina pak dále čítala dvě podskupiny podle podílu vláken v každém směru, a to na jednosměrovou s podílem vláken 1:9 a vyváženou variantu s podílem 1:1(Obrázek 6.1)[22].



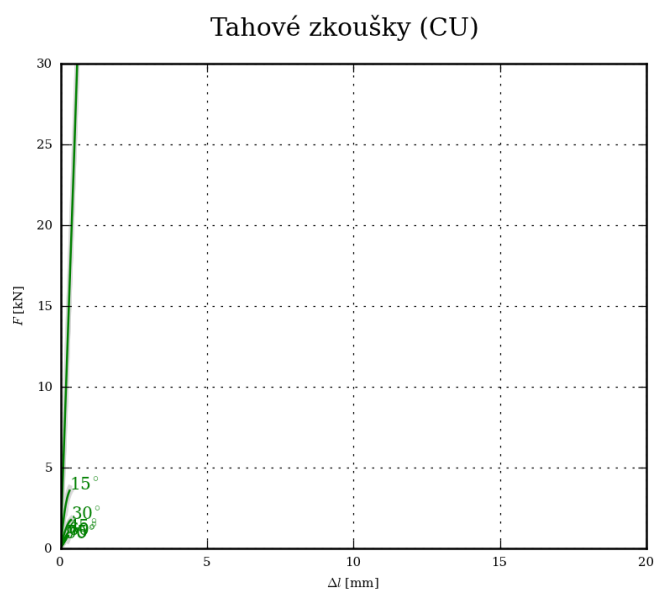
OBRÁZEK 6.1: Jednosměrová a vpravo vyvážená plátňová vazba [22]



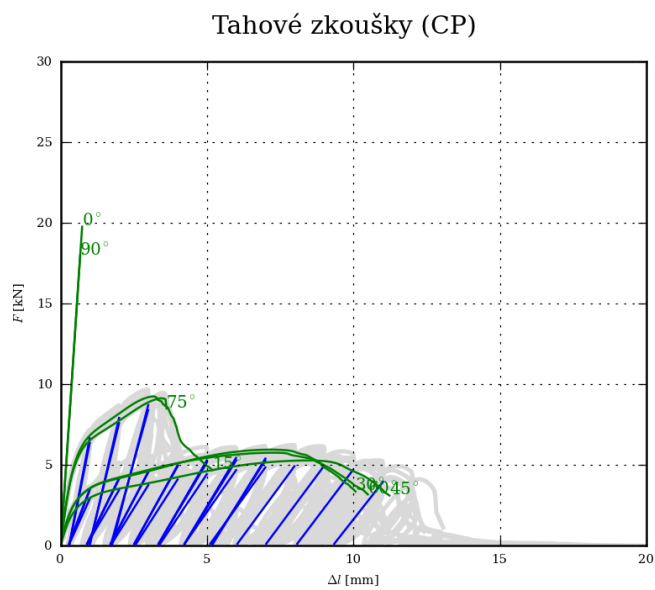
OBRÁZEK 6.2: Výsledek analýzy vzorků s jednosměrovou plátnovou vazbou z aramidových vláken



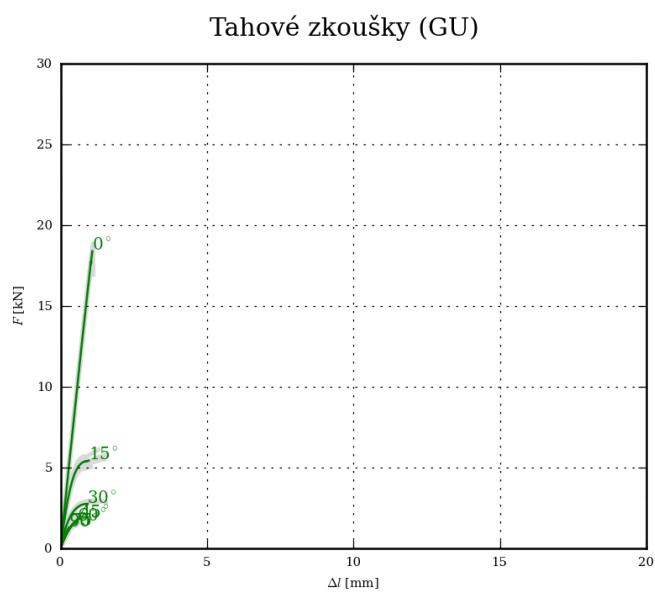
OBRÁZEK 6.3: Výsledek analýzy vzorků s vyváženou plátnovou vazbou z aramidových vláken



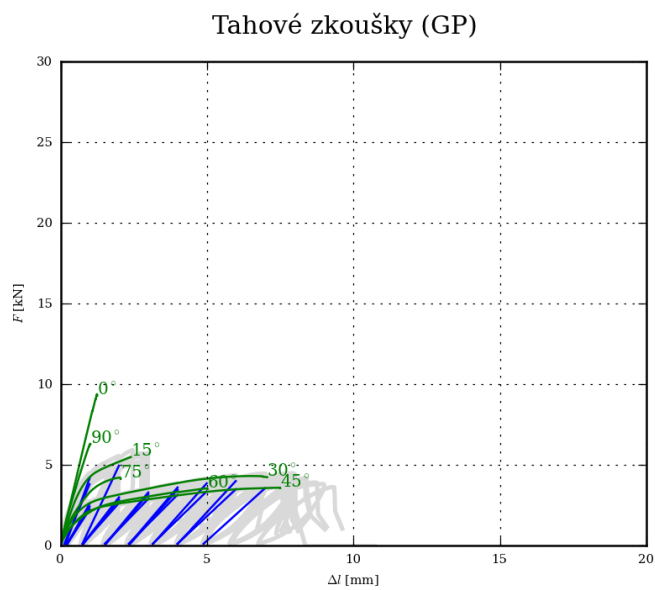
OBRÁZEK 6.4: Výsledek analýzy vzorků s jednosměrovou plátnovou vazbou z uhlíkových vláken



OBRÁZEK 6.5: Výsledek analýzy vzorků s vyváženou plátnovou vazbou z uhlíkových vláken



OBRÁZEK 6.6: Výsledek analýzy vzorků s jednosměrovou plátňovou vazbou ze skelných vláken



OBRÁZEK 6.7: Výsledek analýzy vzorků s vyváženou plátňovou vazbou ze skelných vláken

Významné směrodatné odchylky σ v tabulkách níže jsou uvedeny v závorce. Odchylky do $\sigma \leq 0.2$ nejsou uváděny.

TABULKA 6.1: Průměrná maximální síla zatížení v tahu při porušení kompozitů s jednosměrovou plátňovou vazbou v [kN]

Materiál	$\theta = 0^\circ$	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Aramid	29.50 (0.80)	7.03 (0.32)	3.66	2.73	2.3	2.67	2.87
Uhlík	39.71 (2.15)	3.66	1.80	0.99	0.82	0.60	0.57
Sklo	18.45 (0.36)	5.63 (0.33)	2.78 (0.31)	1.91	1.67	1.39	1.36

TABULKA 6.2: Průměrné maximální prodloužení v tahu při porušení kompozitů s jednosměrovou plátňovou vazbou v [mm]

Materiál	$\theta = 0^\circ$	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Aramid	1.17	5.23	7.99 (0.33)	7.05 (0.43)	4.01 (0.59)	1.48	1.27
Uhlík	0.78	0.34	0.37	0.27	0.27	0.20	0.20
Sklo	1.09	1.18	1.02 (0.31)	0.77	0.65	0.45	0.36

TABULKA 6.3: Průměrná maximální síla zatížení v tahu při porušení kompozitů s vyváženou plátňovou vazbou v [kN]

Materiál	$\theta = 0^\circ$	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Aramid	16.01 (0.4)	8.25 (0.34)	7.33	6.63	7.01 (0.33)	8.37	17.37 (0.41)
Uhlík	20.20 (0.98)	9.33	5.96	5.28	5.77 (0.33)	9.18	19.09 (1.1)
Sklo	9.50 (0.59)	5.68 (0.31)	4.33	3.63	3.66	4.23	6.40 (0.30)

TABULKA 6.4: Průměrná maximální deformace v tahu při porušení kompozitů s vyváženou plátňovou vazbou v [mm]

Materiál	$\theta = 0^\circ$	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Aramid	1.20	6.68 (0.44)	15.68 (0.40)	18.37 (0.27)	15.15 (0.68)	6.00	1.23
Uhlík	0.76	5.20 (0.36)	10.20 (0.76)	11.55 (0.57)	10.62 (0.81)	4.25	0.72
Sklo	1.26	2.75	7.46 (0.72)	8.62 (1.26)	5.58 (0.85)	2.10	1.03

6.2 Tlakové zkoušky

Přestože bylo věnováno velké usilí získat přesné hodnoty poměrných deformací v tlaku pomocí digitální korelace obrazu či laserových snímačů, nepodařilo se získat uspokojivá data pro jejich určení. V Tabulce 6.5 a 6.6 jsou uvedeny pouze průměrné maximální hodnoty sil, při kterých došlo k porušení vzorku.

TABULKA 6.5: Průměrná maximální síla zatížení v tlaku při porušení kompozitů s jednosměrovou plátňovou vazbou v [kN]

Materiál	$\theta = 0^\circ$	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Aramid	5.36	5.37 (0.33)	3.99 (0.41)	3.46	3.37	3.45	3.52
Uhlík	11.70 (1.61)	5.74 (0.89)	3.75	3.16	2.81	2.55 (0.32)	2.54
Sklo	13.21 (2.45)	4.71 (0.84)	4.25 (0.78)	4.01	3.96	4.04 (0.39)	4.05 (0.91)

TABULKA 6.6: Průměrná maximální síla zatížení v tlaku při porušení kompozitů s vyváženou plátňovou vazbou v [kN]

Materiál	$\theta = 0^\circ$	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Aramid	4.89	4.69	3.77	3.70	4.01	4.68	4.70
Uhlík	12.01 (0.96)	7.32 (0.76)	4.91 (0.55)	4.51	4.75	7.13 (1.04)	11.6 (2.26)
Sklo	8.32 (1.37)	6.71 (0.98)	4.03 (0.58)	3.67	3.96	4.85 (0.61)	4.20 (0.71)

6.3 Zamykání vazby

U nových experimentů byl znovu změřen úhel δ (2.2) uzamykání vazby kompozitních pásků, a to pro všechny úhly natočení materiálových os $\theta = 0^\circ$ až 90° (krok 15°). Efekt uzamykání vazby se neprojevil u krajních případů zatěžování ve směru os, stejně jako u kompozitů s jednosměrovou plátnovou vazbou ze skelných a uhlíkových vláken. Pouze u jednosměru s aramidovými vlákny došlo ve třech případech k pozorovatelné změně směru snopků, a to pro $\theta = 15^\circ, 30^\circ$ a 45° . V Tabulce 6.7 a 6.8 jsou uvedeny průměrné hodnoty úhlů δ a na Obrázku 6.8 a 6.9 vybrané ukázky deformovaných vazeb.

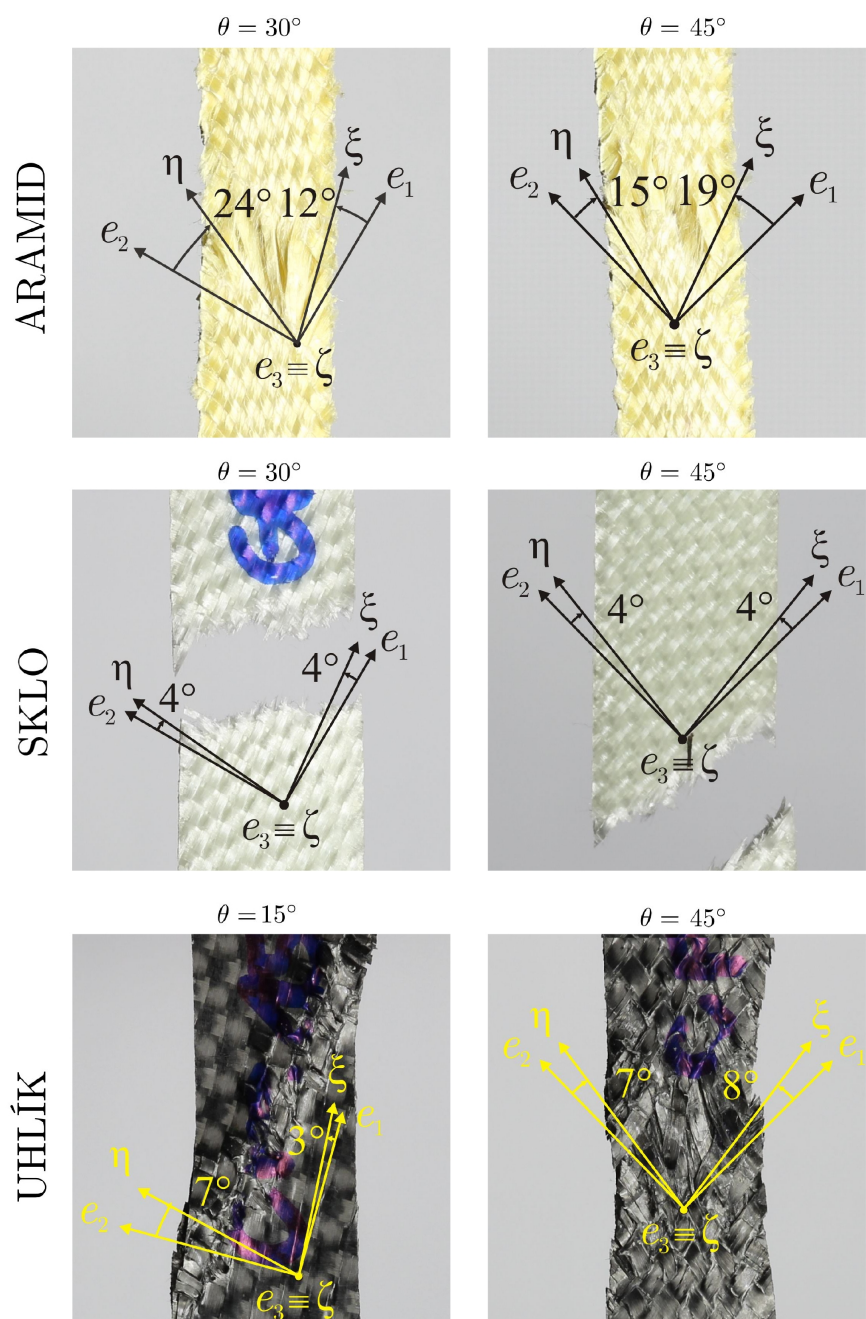
Z experimentů vyplynulo, že efekt uzamykání vazby se nejvíce objevuje u kompozitů z aramidových vláken a jen minimálně u kompozitů s vlákny skelnými. Zajímavostí u kompozitů z uhlíkových vláken je specifický způsob porušování, kdy kromě krajních orientací snopků nikdy nedošlo k úplnému přetržení vzorku (viz Příloha A).

TABULKA 6.7: Průměrné úhly zkosení δ_1, δ_2 vyvážené plátnové vazby pro $\theta = 0^\circ$ - 90° ve $[\circ]$

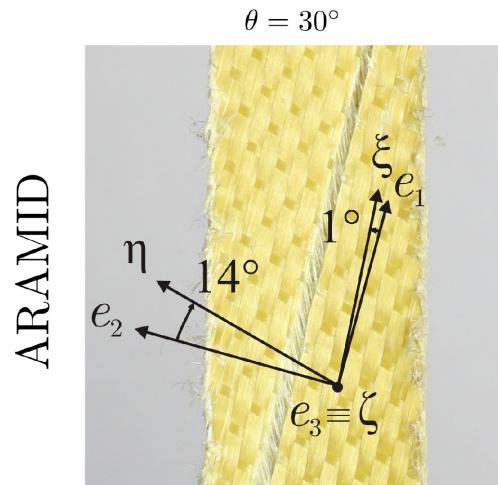
Materiál	$\theta = 0^\circ$	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Aramid	0, 0	18, 2	24, 12	15, 19	9, 24	4, 12	0, 0
Uhlík	0, 0	7, 3	8, 5	7, 8	5, 8	2, 10	0, 0
Sklo	0, 0	2, 2	4, 4	4, 4	3, 3	4, 1	0, 0

TABULKA 6.8: Průměrné úhly zkosení δ_1, δ_2 jednosměrové plátnové vazby kompozitu s aramidovými vlákny ve $[\circ]$

Materiál	$\theta = 0^\circ$	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Aramid	0, 0	14, 1	8, 2	2, 2	0, 0	0, 0	0, 0



OBRÁZEK 6.8: Úhel zkosení vazby po porušení u kompozitů s vyváženou plátovou vazbou



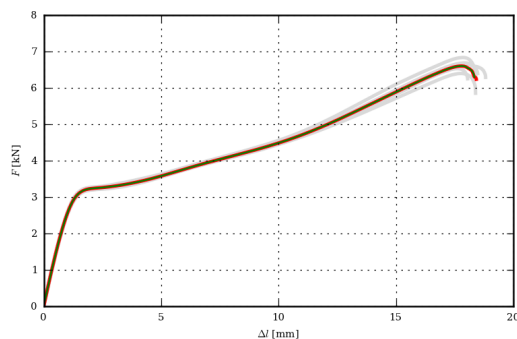
OBRÁZEK 6.9: Úhel zkosení vazby po porušení vzorku s jednosměrovou plátňovou vazbou z aramidových vláken $\theta = 15^\circ$

6.4 Průměrování tahových zkoušek

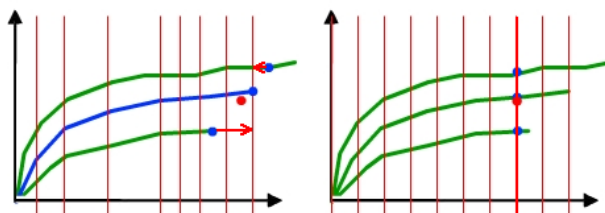
Zatím jsou v programu *ploTra* implementovány dva způsoby, jak z několika prostých tahových křivek identických vzorků určit jednu průměrnou. První metoda načte souřadnice bodů vždy z první tzv. *master* křivky z jedné sady experimentů (jedné sady vzorků se shodnou materiálovou orientací vůči zatěžovací síle a se stejným typem materiálu a vazby) a hledá k nim nejbližší body v datech dalších zkoušených vzorků v této sadě. Aritmetický průměr všech nejbližších bodů je následně uložen a celý proces se opakuje pro další bod. Jistá nevýhoda je zde ve volbě *master* křivky, která do značné míry ovlivňuje tvar zprůměrované tahové zkoušky, což se projeví zejména v případě, kdy je například první experiment ze sady zatížen určitým šumem v měření. Je na místě pak tento experiment úplně vyloučit. Tento způsob průměrování funguje pouze pro převážně rostoucí tahové závislosti.

Druhou možností, jak v programu *ploTra* průměrovat data z prostých tahových zkoušek, je průměrování bodů křivky tahové zkoušky z jedné sady experimentů v předem definovaném intervalu. Zvolenou hodnotou je rozdělena osa prodloužení tahového diagramu a v ní je určena průměrná hodnota ze všech dat experimentů v sadě. Porovnání obou přístupů je patrné z Obrázku 6.10, kde lze vidět dvě téměř identické křivky s různými konci - červená se vztahuje k první metodě průměrování křivek. Schematické vysvětlení tohoto rozdílu je na Obrázku 6.11, kde vlevo je první způsob založený na volbě *master* křivky (modrá) a vpravo druhá varianta - dělení podle intervalu. Červený bod představuje poslední bod výsledné tahové křivky, jehož x souřadnice je určena aritmetickým

průměrem x souřadnic modrých nalezených bodů. V programu je implicitně vybrána první, rychlejší metoda.



OBRÁZEK 6.10: Porovnání dvou volitelných způsobů průměrování tahových křivek v programu *ploTra*

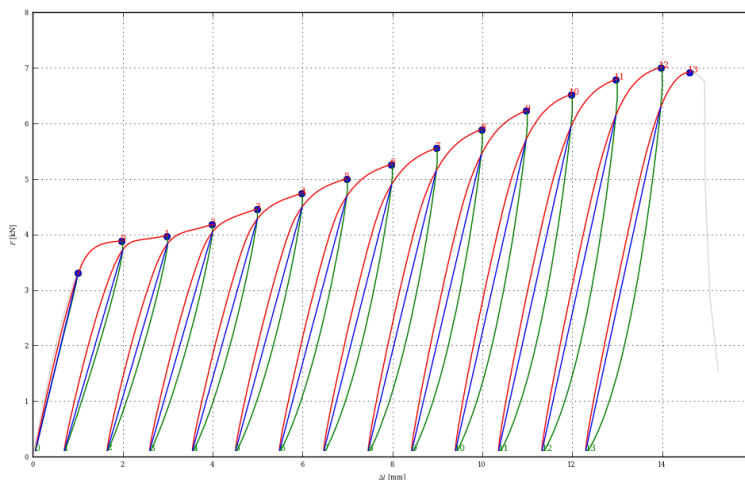


OBRÁZEK 6.11: Možné způsoby hledání bodu výsledné tahové křivky

6.5 Určení směrnice cyklu

Popis chování zkušebního vzorku kompozitu v průběhu cyklického zatěžování je vyjádřen prostřednictvím směrnice každé hysterézní smyčky v grafu závislosti experimentu $F-\Delta l$. Pro její stanovení je zapotřebí přesně určit vždy nejvyšší a nejvyšší bod každého cyklu. Pokud bychom uvažovali tvar křivky experimentu znázorněné na Obrázku 4.2, stačilo by v našem případě křivku rozdělit po intervalech Δl (odlehčování nových cyklických experimentů bylo již řízeno prodloužením po $\Delta l = 1$ mm), ve kterých by byl snadno nalezen bod s nejvyšší hodnotou síly. Skutečná křivka experimentu však vypadá jinak a z Obrázku 6.12 je patrné, že horní bod směrnice (průsečík křivky cyklu) leží vždy o něco níže. Proto byla zprogramována vektorová metoda hledání průsečíku dvou křivek, jež bude stručně popsána na následujících řádcích.

Dále z důvodu požadavku univerzálního použití programu *ploTra* pro široké spektrum experimentů by hledání horních bodů směrnic zadáním Δl jistě nebylo vhodné. Byl tedy naprogramován striktně analytický postup k určení směrnice cyklu.

OBRÁZEK 6.12: Určení směrnice cyklu v programu *ploTra*

Každá křivka experimentu, skládající se z tisíců bodových hodnot, je na počátku rozdělena podle všech inflexních bodů. Protože data z experimentu nejsou nikdy dokonalá, je nutné ještě před tímto krokem provést další kontrolu dat a zajistit tak, že pokaždé bude určena směrnice pouze skutečných smyček - kritérium pro tuto kontrolu je, že hodnota síly ve spodním bodě směrnice se musí pohybovat v blízkosti nuly (dochází k úplnému odlehčení vzorku). Pak zbývá už jen rozdělit každou hysterezní křivku na dvě části, které jsou na Obrázku 6.12 zobrazeny červeně a zeleně.

Problém nalezení průsečíku dvou přímek v rovině, jedné jdoucí z bodu P_0 do P_1 a druhé z Q_0 do Q_1 , lze matematicky zapsat rovnicí

$$P_0 + s \cdot \vec{u} = Q_0 + t \cdot \vec{v} \quad (6.1)$$

kde $\vec{u} = P_1 - P_0$ a $\vec{v} = Q_1 - Q_0$ představují směrové vektory úseček s krajními body P_0, P_1 a Q_0, Q_1 , přičemž parametry $s, t \in \langle 0; 1 \rangle$ [24]. Tuto soustavu lineárních rovnic lze snadno vyřešit a provedeme-li výpočet přes všechny segmenty červené a zelené křivky, obdržíme pro každou hysterezní smyčku právě jeden průsečík. Nakonec jsou stanoveny směrnice modrých úseček v Obrázku 6.12, které jsou dále využity v identifikačním procesu.

Na závěr je ještě vhodné zdůraznit, že je prakticky nemožné nalézt „ideální“ křivku závislosti $F-\Delta l$ pro libovolnou sadu experimentů. Do hry zde totiž vstupuje tolik vlivů (počínaje výrobou a konče podmínkami experimentu), díky kterým de facto nelze identicky zopakovat jeden experiment dvakrát. Stejně tak by se dalo polemizovat o definici směrnic cyklů, které nikdy přesně nepopíší tvar hysterezních smyček.

Závěr

V předložené práci bylo zanalyzováno chování textilního kompozitu s vyváženou plátňovou vazbou v tahu, při cyklickém tahovém zatěžování a v tlaku. Na základě výsledků těchto testů byl navržen materiálový model dobře popisující odezvu tohoto kompozitu při simulaci tahových zkoušek pro orientace materiálových vazeb 0° , 45° a 90° vzhledem k zatěžovací síle. Byly identifikovány materiálové parametry pomocí automatického identifikačního procesu provedeného pomocí softwarů Python, Simulia ABAQUS a optiSLang.

Z nových poznatků pak dále vyplynula nutnost provést další experimenty na kompozitových páscích (s orientací vazeb rozdělenou po 15° krocích od 0° do 90°) s cílem důkladnější validace modelu. Byly navíc provedeny tahové i tlakové zkoušky i pro kompozity s jednosměrovou plátňovou vazbou.

Model je schopný popsat nelineární elastické chování tkaninových kompozitů a jejich plasticitu ve smyku, a to s uvažováním efektu zamykání vazby tkaniny. Byl navržen a otestován identifikační proces, pro jehož zefektivnění byla kvůli potřebě rychlých analýz experimentů naprogramována aplikace *plTra*, která bude dále rozšiřována podle požadavků. Do budoucna bude vhodné zahrnout do modelu i chování v závislosti na rychlosti deformace a dále se zabývat například postupným porušováním vláknových kompozitních materiálů.

Dalším přínosem práce je, že každý ze tří hlavních výsledků práce, tj. materiálový model, proces identifikace parametrů a aplikace *plTra*, je možné použít samostatně a tím například zpřesnit či urychlit proces identifikace parametrů modelu, a to buď předkládaného a nebo modelu zadavatelem požadovaného.

Výsledky předložené práce lze v praxi dále využít pro tuhostní a pevnostní výpočty přípravků a dílců z plátňových vláknových kompozitů. Podle vyhodnocení těchto výpočtů je pak možné aplikovat nejvhodnější kombinaci materiálu snopků a jejich orientace vůči směru zatěžování pro konkrétní funkci a použití.

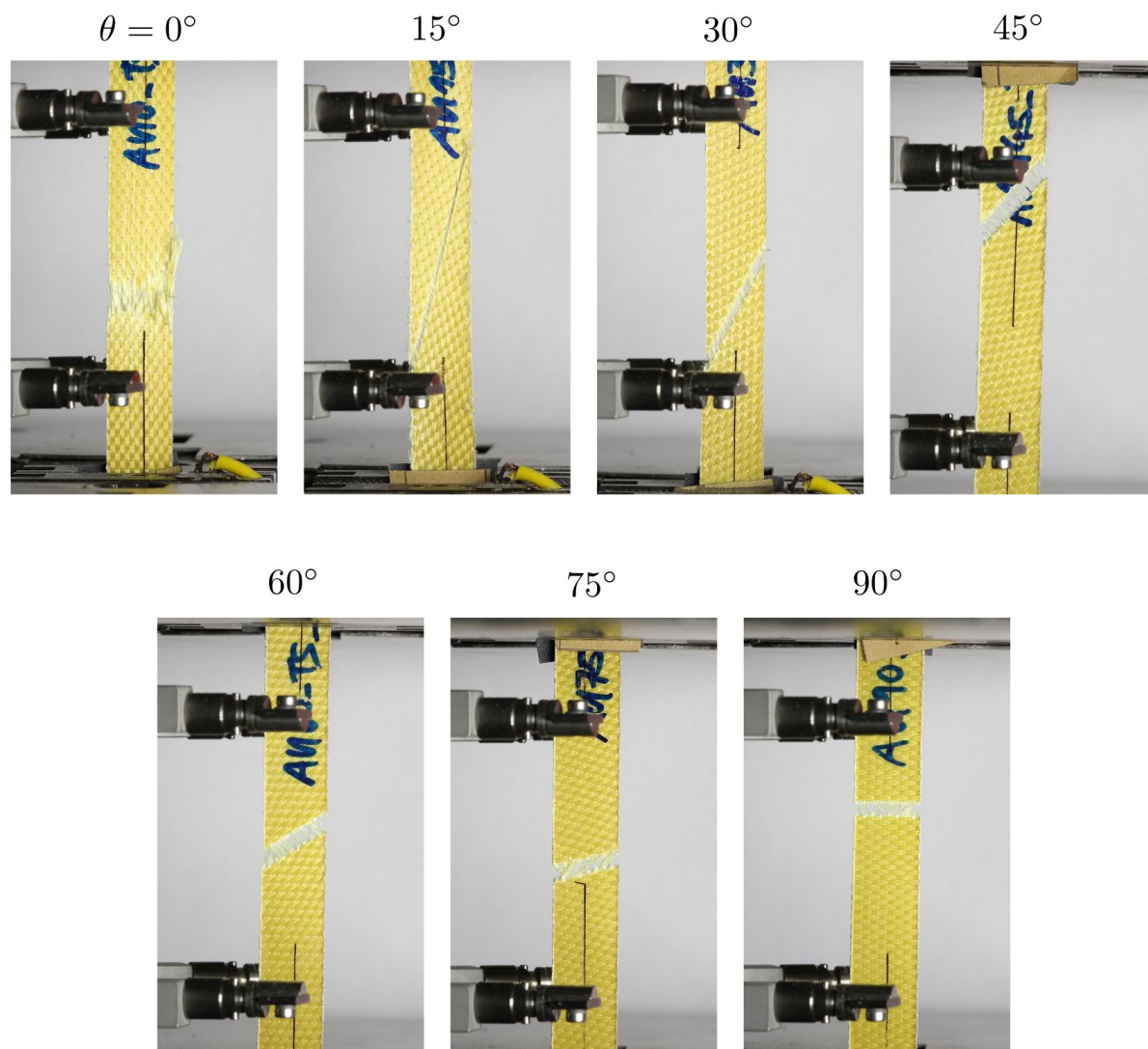
Literatura

- [1] Ladevèze, P., Allix, O., Deü, J. F., Lèvêque, D.: A mesomodel for localisation and damage computation in laminates, *Computational methods in applied mechanics and engineering* 183, pp. 105-122, Elsevier 2000.
- [2] PAM-Crash 2007 Solver Notes Manual, Ladevèze model
- [3] Boucard, P.,A., Ladevèze, P., Poss, M., Rouguee, P.: A nonincremental approach for large displacement problems, *Computers and structures*, vol. 64, no. 1-4, pp. 499-508, Pergamon 1997.
- [4] Foroutan, R., Nemes, J., Ghiasi, H., Hubert, P.: Experimental investigation of high strain-rate behaviour of fabric composites, *Composite structures*, vol. 106, pp. 264-269, doi <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.06.014>, Elsevier 2013
- [5] McCarthy, C.T., O'Higgins, R.M., Frizzell, R.M.: A cubic spline implementation of non-linear shear behaviour in three-dimensional progressive damage models for composite laminates, *Composite Structures* 92, pp. 173-181, doi:10.1016/j.compstruct.2009.07.025, Elsevier 2010
- [6] Hinton, M., J., Kaddour, A., S., Soden, P., D.: *Failure Criteria in Fibre Reinforced Polymer Composites*, The World-Wide Failure Exercise, Elsevier 2004
- [7] Cousigne, O., Moncayo, D., Coutellier, D., Camanho, P., Naceur, H., Hampel, S.: Development of a new nonlinear numerical material model for woven composite materials accounting for permanent deformation and damage, *Composite Structures*, vol. 106, pp. 601-614, Elsevier 2013.
- [8] Ogihara, S., Reifsneider, K.: Characterization of nonlinear behavior in wovnen composite laminates, *Applied composite materials*, vol. 9, pp. 249-263, Kluwer Academic Publishers 2002
- [9] Djorkievic, M., I., Sekulic, D., R., Stevanovic, M., M.: Non-linear elastic behaviour of carbon fibres of different structural and mechanical characteristic, *Journal of Serbian chemical society*, vol. 72, no. 5, pp. 513-521, 2007

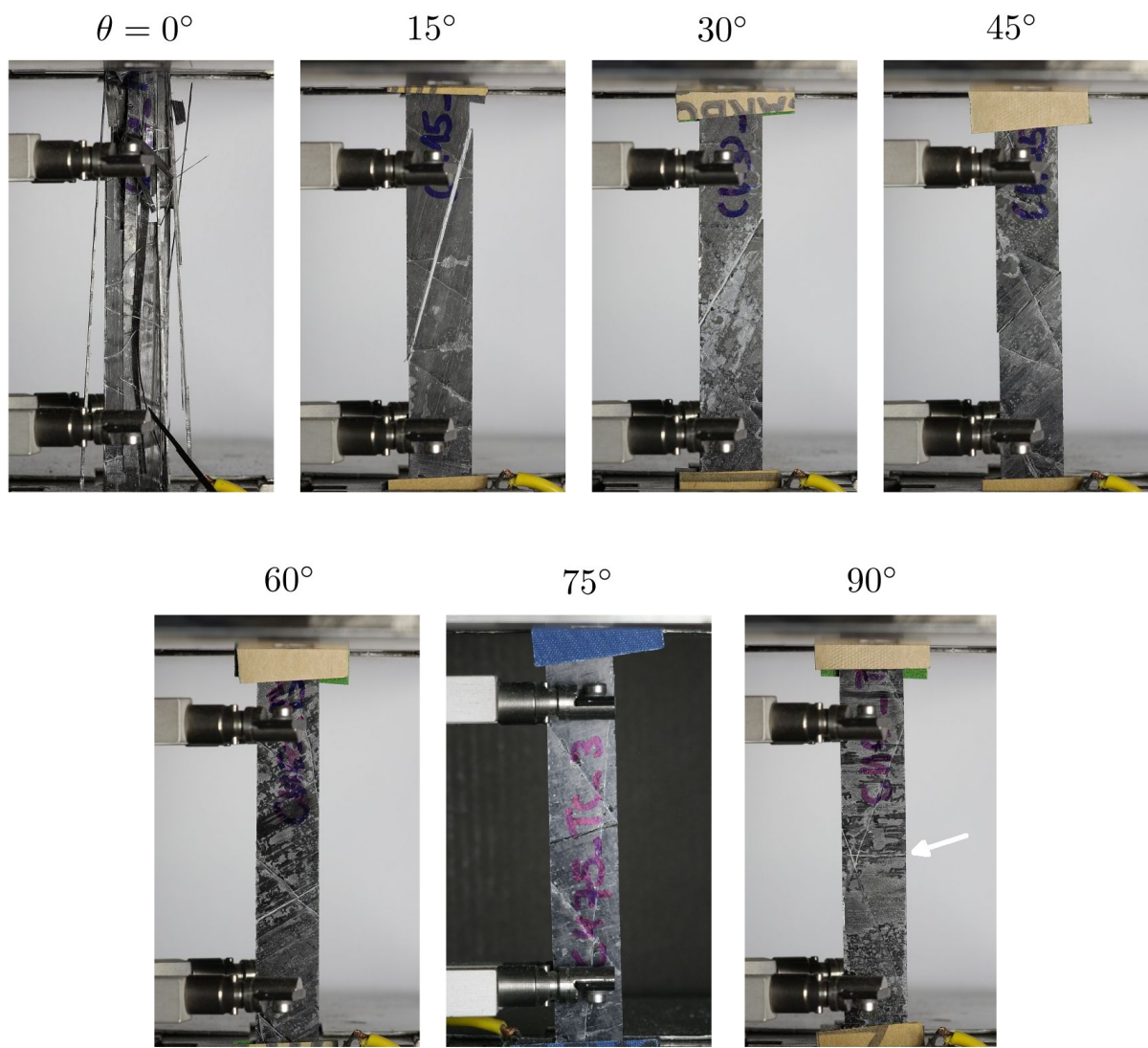
- [10] Hamila, N., Boisse, P.: Locking in simulation of composite reinforcement deformations. Analysis and treatment, Composites, Part A, vol. 53, pp. 109-117, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.06.001>, Elsevier 2013
- [11] Laš, Vladislav : Mechanika kompozitních materiálů, Západočeská Univerzita, Plzeň 2008
- [12] Rosenberg, J., Křen, J. : Mechanika kontinua, Západočeská Univerzita, Plzeň 1998
- [13] ASTM International: D 3039 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM International, USA.
- [14] ASTM International: D 3410 Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading. ASTM International, USA.
- [15] de Souza Neto, E.A., Peri, D., Owen R.J.: Computational methods for plasticity, theory and applications, Civil and Computational Engineering Centre, Swansea University, 2008 John Wiley & Sons Ltd
- [16] Arora, J. S.: Introduction to Optimum Design, 2012, Elsevier Inc. All rights reserved.
- [17] Hashin, Z., Rotem, A. A: Fatigue Failure Criterion for Fiber-Reinforced Materials, Journal of Composite Materials, 1973, Vol. 7
- [18] Abaqus 6.12 Online Documentation. Dassault Systemes, 2011. <http://www.3ds.com/products-services/simulia/portfolio/abaqus/>
- [19] optiSLang Documentation, Version 3.2.0. Dynardo GmbH, 2011. <http://www.dynardo.de/en/software/optislang.html>
- [20] Krystek, Jan: Pevnostní kritéria pro kompozitní materiály, Západočeská Univerzita, Plzeň 2012. http://seminare.fav.zcu.cz/media/document/krystek_pevnostni-kriteria-pro-kompozitni-materialy.pdf
- [21] Kunc, Kryštof: Mikromechanický model tkaninového kompozitu, Bakalářská práce, Západočeská Univerzita, Plzeň 2010
- [22] <http://www.kme.zcu.cz/kmet/>
- [23] <http://matplotlib.org/>
- [24] http://geometrie.kma.zcu.cz/index.php/www/content/download/114/362/file/G1_texty.pdf
- [25] <http://www.e-chembook.eu/cz/prace-v-laboratori/anorganicka-chemie/reakce-hliniku>
- [26] Druville, D.: Finite Element Simulation Of Textile Materials At The Fiber Scale, Ecole Centrale Paris 2009

Příloha A

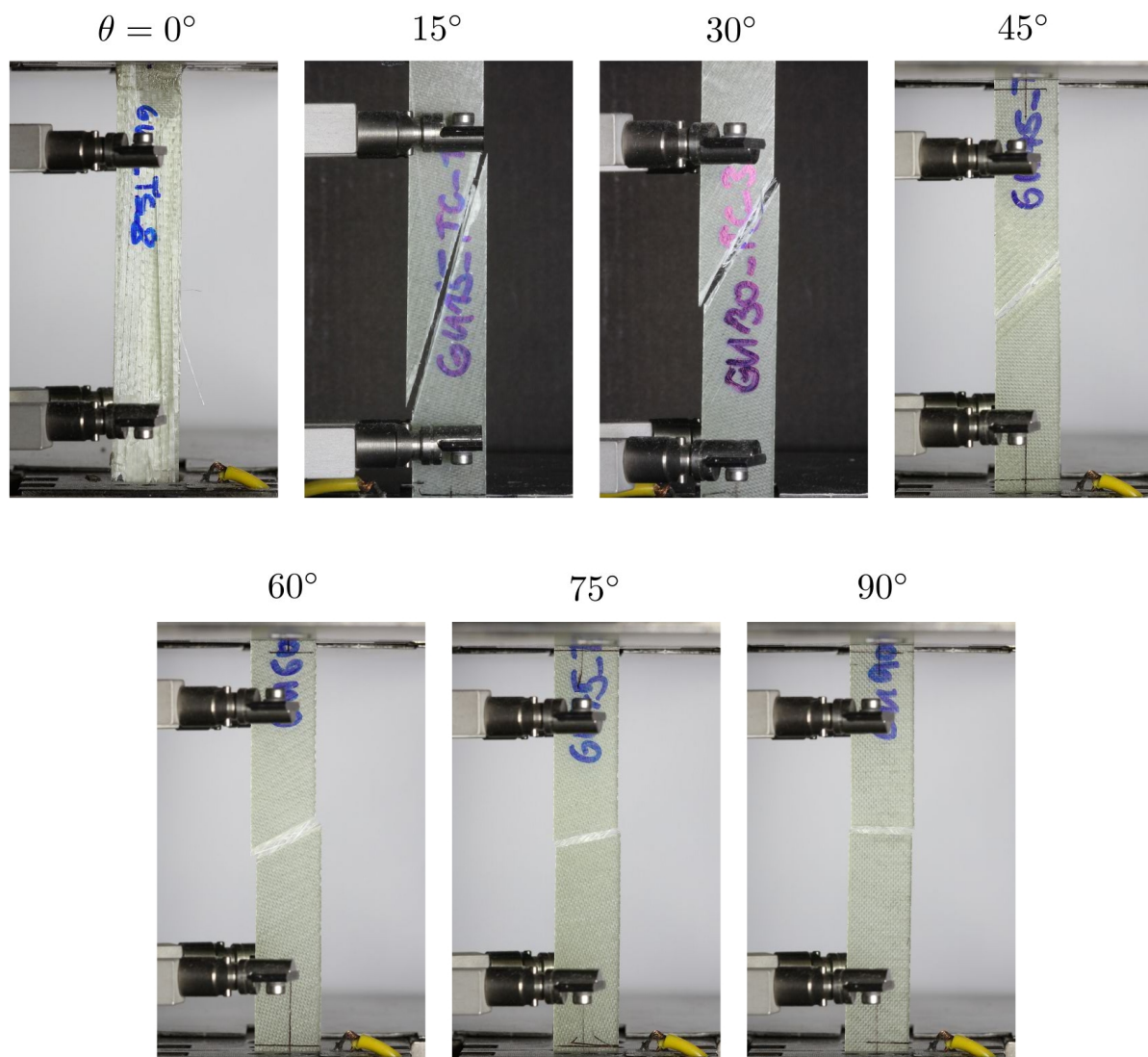
Porušení tkaninových
kompozitů



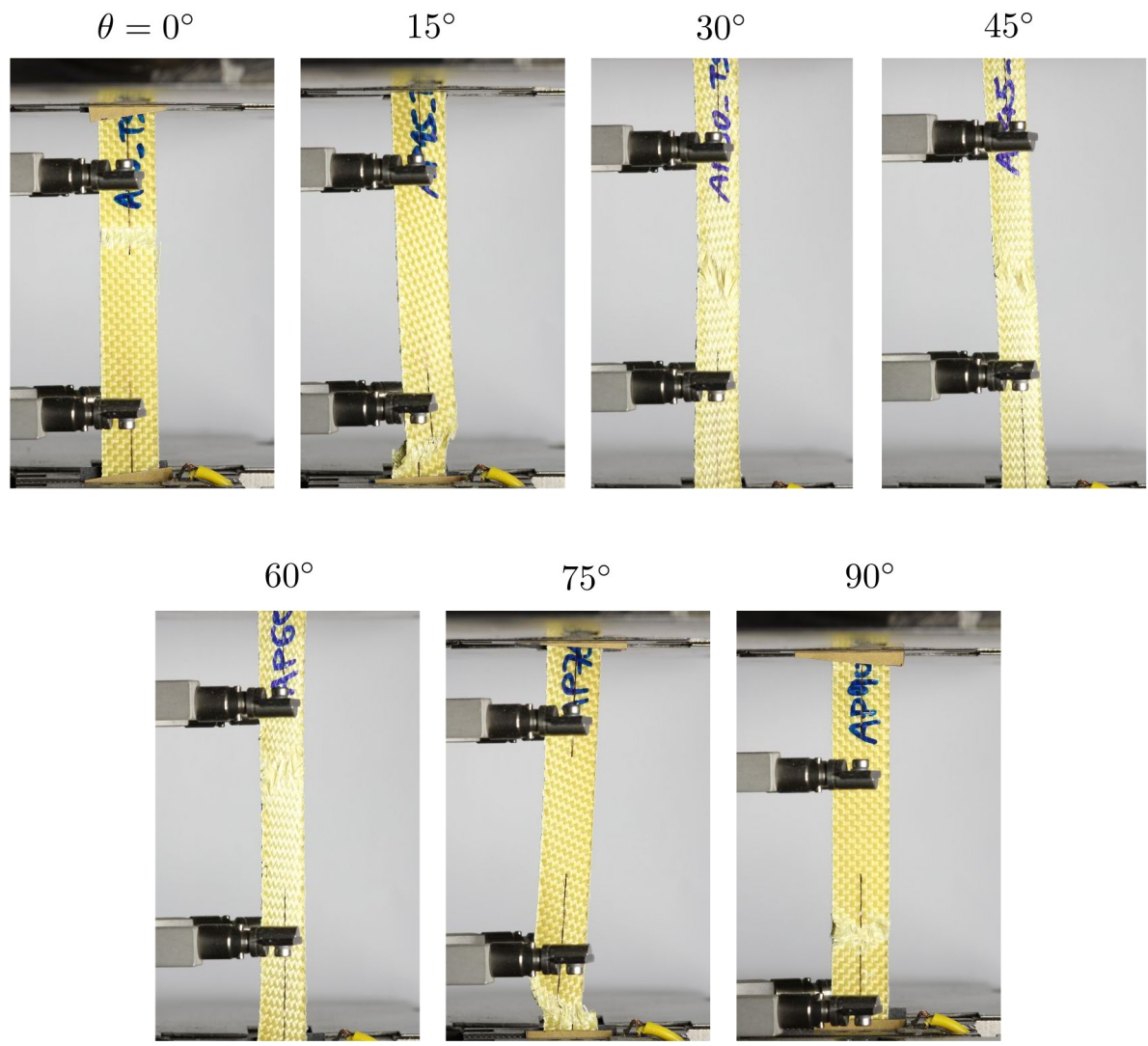
PŘÍLOHA A.1: Porušení kompozitu s jednosměrnou plátňovou vazbou z aramidových vláken



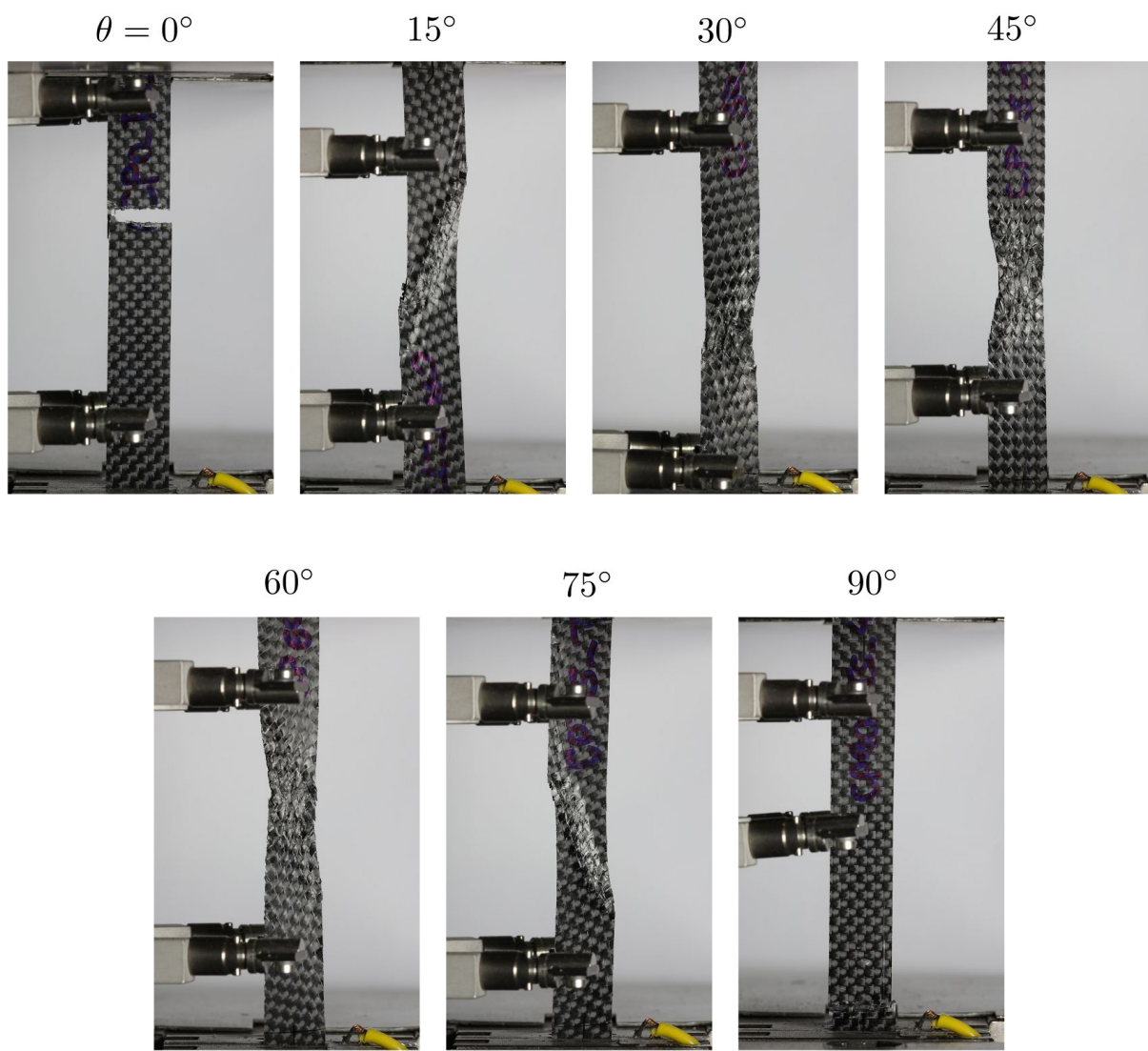
PŘÍLOHA A.2: Porušení kompozitu s jednosměrnou plátovou vazbou z uhlíkových vláken



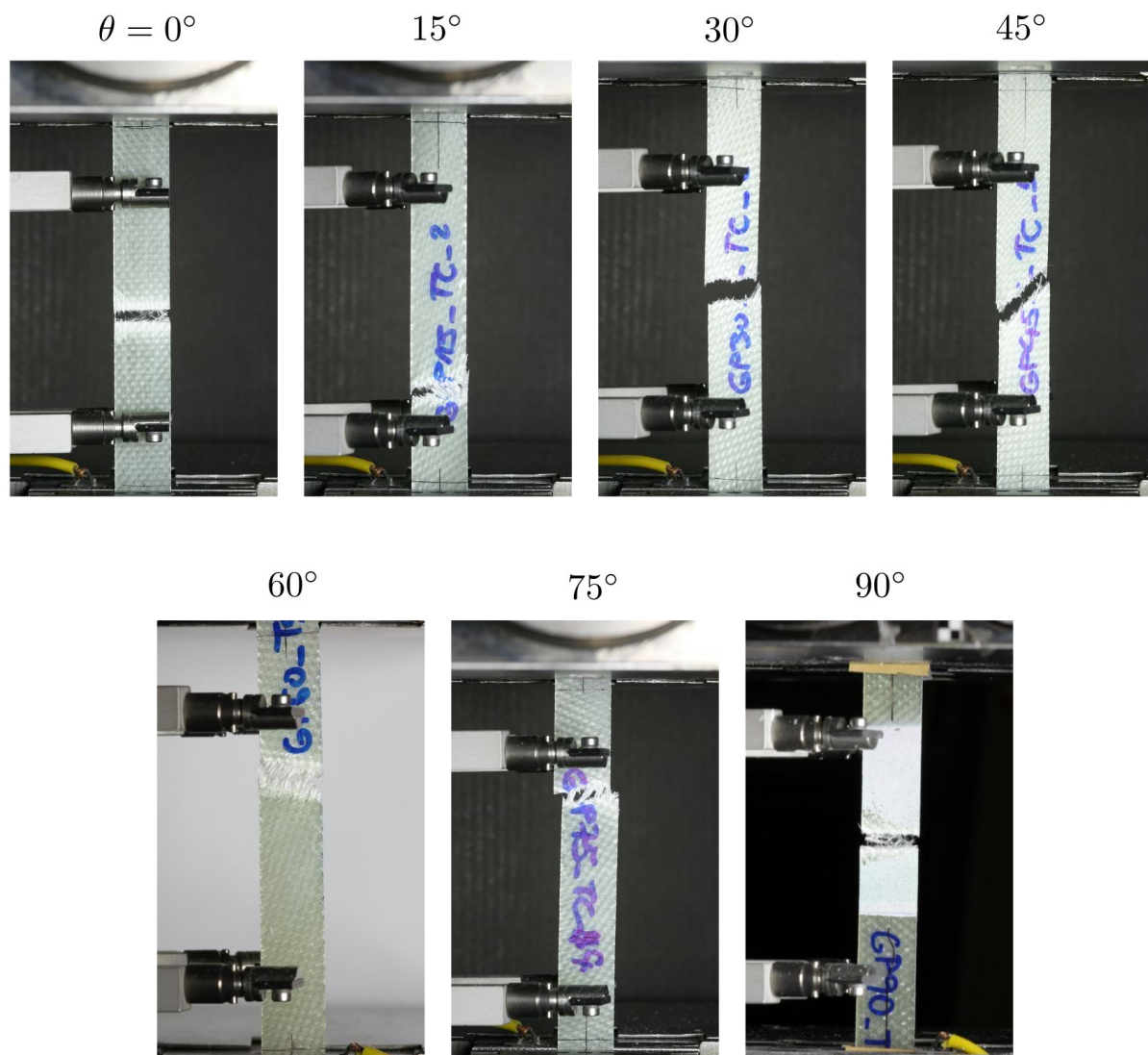
PŘÍLOHA A.3: Porušení kompozitu s jednosměrnou plátňovou vazbou ze skelných vláken



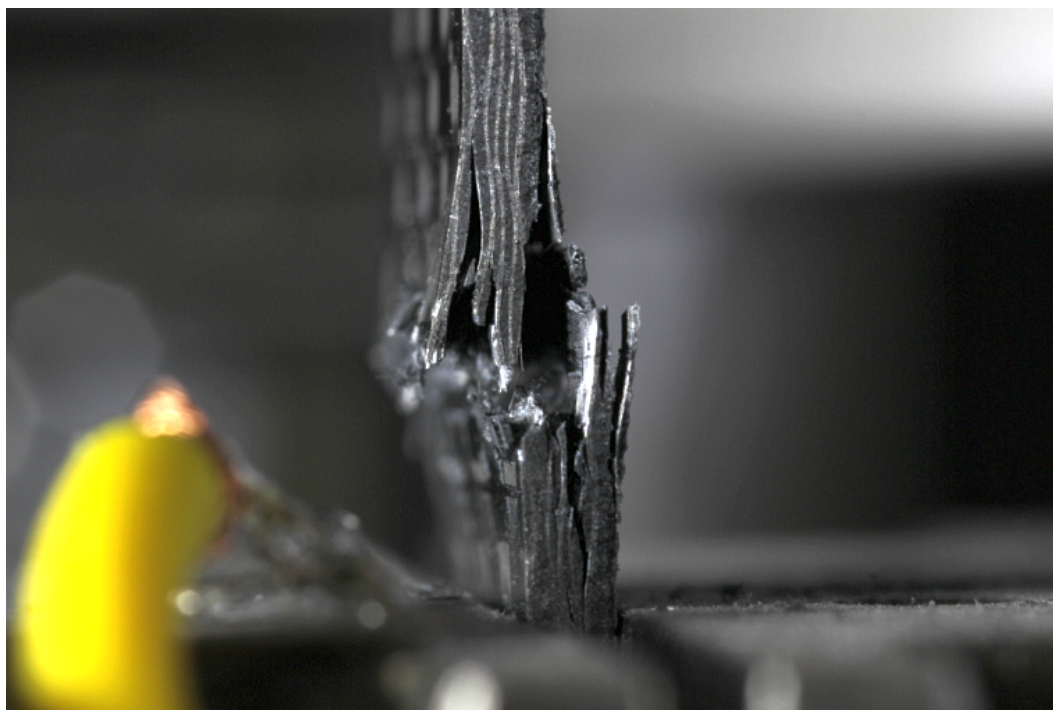
PŘÍLOHA A.4: Porušení kompozitu s vyváženou plátnovou vazbou z aramidových vláken



PŘÍLOHA A.5: Porušení kompozitu s vyváženou plátnovou vazbou z uhlíkových vláken



PŘÍLOHA A.6: Porušení kompozitu s vyváženou plátňovou vazbou ze skelných vláken



OBRÁZEK A.7: Detail porušení z boku vzorku kompozitu s vyváženou plátnovou vazbou(uhlík, $\theta = 0^\circ$)

Příloha B

Program *ploTra*

Kvůli potřebě zpracovat velké množství naměřených dat bylo věnováno nemalé úsilí efektivnímu a rychlému vyhodnocování zkoušek. Pro naplnění tohoto požadavku byl vybrán moderní, objektově orientovaný, multiplatformní a interpretovaný jazyk se silným důrazem na čitelnost kódu - Python.



OBRÁZEK B.1: Logo programovacího jazyka Python - www.python.org

Tento jazyk převažuje v řadách open-source programátorů a je využíván v mnoha nadnárodních vědeckých institucích. Jeho překladač je v základu nainstalován v téměř každé linuxové distribuci. Největší výhodou je široké portfolio knihoven a rozšíření vytvořených samotnými uživateli jazyka, které jsou dostupné včetně propracované dokumentace. Avšak i bez nich je Python vybaven bohatou standardní knihovnou. Díky jednoduché syntaxi je vhodný i pro začátečníky jako první programovací jazyk. Jeho filozofie je zřejmá - za prvé jednoduchost a čitelnost kódu, za druhé modularita a za třetí jasná cesta k cíli (plyne z předešlých dvou).

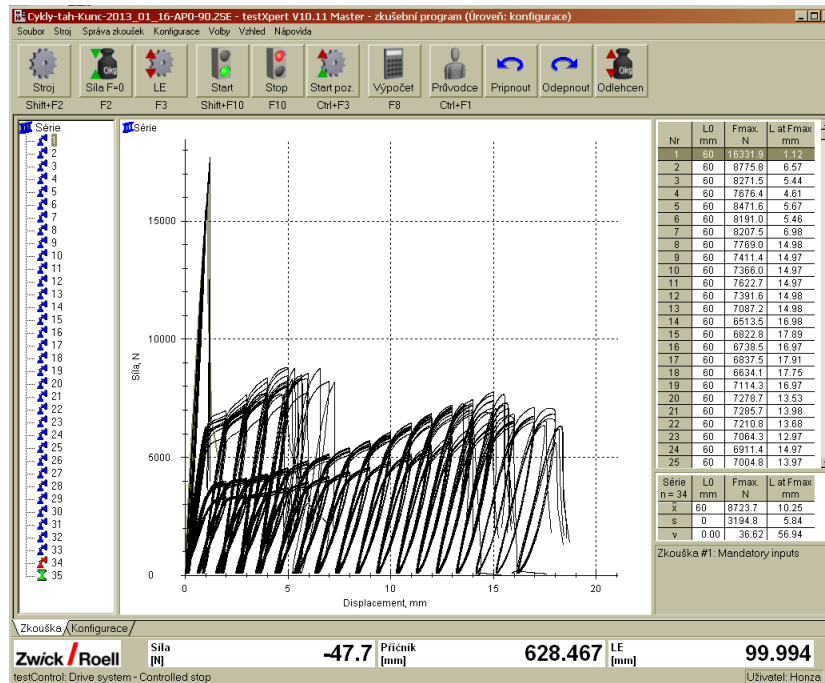
Díky volbě MKP softwaru Simulia ABAQUS se naskytla možnost vytvořit skript pro stavbu modelu (autorem T. Kroupa) a analýzu výsledků v jednom programovacím jazyce a opustit tak MATLAB[®], ve kterém nebyla práce s daty v podobě *.MAT souborů v procesu identifikace příliš efektivní. Hlavní výhodou oproti MATLABu je tedy snadnější zpracování a orientace v datových souborech, a to díky modulu `csv.Dictreader`.

Pomocí programovacího jazyka Python a rozšiřující knihovny *matplotlib* byla

vytvořena plnohodnotná aplikace *ploTra* „šitá na míru“ výstupům ze softwaru testXpert®, který slouží k obsluze trhačích stroje.

B.1 Software ZWICK/ROELL testXpert®

Software testXpert® je ovládací systém trhačích strojů ZWICK/ROELL. Veškeré experimenty v této práci byly naměřeny v testXpert® V12. Ukázka prostředí použitého softwaru je na obrázku B.2.



OBRÁZEK B.2: Pracovní prostředí testXpert® V12

TestXpert® V12 umožňuje ukládat data z měření jako tabulkový typ souboru CSV (z ang. *Comma Separated Values*) s volitelným rozdělovačem a s individuálním výběrem měřených veličin. V našem případě jde zejména o závislosti síly, deformace a času u tahových zkoušek a u tlakových navíc ještě informace o uvolnění samospouště fotoaparátu při synchronizaci s trhačím strojem pro obrazové měření deformace. Každé měření jednoho vzorku je vyexportováno jako *.TRA soubor, jehož úryvek je pro představu znázorněn na obrázku B.3.

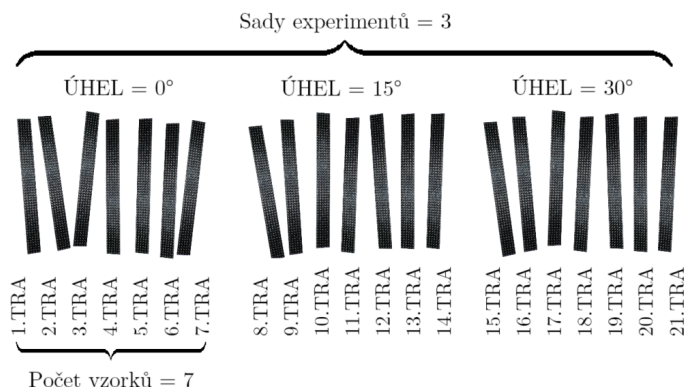
```

1 "Standardní snímač F";"Deformace";"Čas trvání zkoušky";"Nominální deformace"
2 "N";"mm";"s";"mm"
3 -0.789532;0.000449408;0.0199805;-5.3136e-006
4 -0.824933;-5.92041e-007;0.0399805;-5.3136e-006
5 20.5452;0.000449408;0.25998;0.00186643
6 28.4277;0.000449408;0.26998;0.00407997
7 37.3447;0.000899408;0.27998;0.00692828
8 47.1074;0.000899408;0.28998;0.0100858
9 57.5505;0.00134941;0.29998;0.0134061
10 68.2887;0.00134941;0.30998;0.0168241
11 78.7319;0.00134941;0.31998;0.0202421
12 88.4709;0.00179941;0.32998;0.0236112
13 97.3289;0.00224941;0.33998;0.0269315
14 105.365;0.00224941;0.34998;0.0302193
15 112.63;0.00224941;0.35998;0.0335071
16 119.222;0.00224941;0.36998;0.0368111
17 125.193;0.00269941;0.37998;0.040164
18 130.696;0.00269941;0.38998;0.0435005
19 135.967;0.00314941;0.39998;0.0468209
20 140.942;0.00314941;0.40998;0.0501412

```

OBRÁZEK B.3: Obsah *.TRA souboru

Celkové měření pro jeden materiál představuje v našem případě 7 sad různých vzorků ($0 - 90^\circ$) násobeno 7 stejnými vzorky pro každý úhel, což dává dohromady 49 měření a identický počet *.TRA souborů. Předpokladem pro bezproblémovou analýzu dat programem *ploTra* je dodržování správného sledu zkoušek, tzn. vždy měřit po sadách stejných vzorků a ne nahodile. Pro snadné načítání dat je doporučeno exportovat *.TRA soubory pojmenované od jedné do celkového počtu zkoušek pro daný materiál, tedy „1.TRA, 2.TRA, ...“. Řazení *.TRA souborů je patrné z obrázku B.4.



OBRÁZEK B.4: Doporučený postup při exportu *.TRA souborů

Logicky pojmenovaná složka (např. „2012_11_01-tah-CP“), obsahující tyto soubory, a její umístění jsou pak základní vstupní informace pro program *ploTra*.

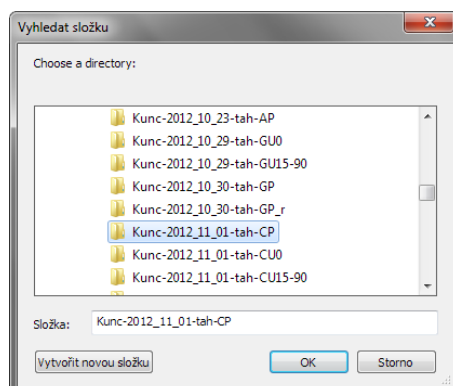
B.2 Požadavky a ovládání programu *ploTra*

Program byl vyvíjen na distribuci Python 2.7.3 Enthought Python Distribution (EPD_free 7.3-2 (32-bit)), která je zdarma ke stažení na www.enthought.com. Pro samotné použití programu však není nutné ji instalovat, spustitelný soubor „ploTra.exe“ má již vše potřebné zabaleno v sobě.

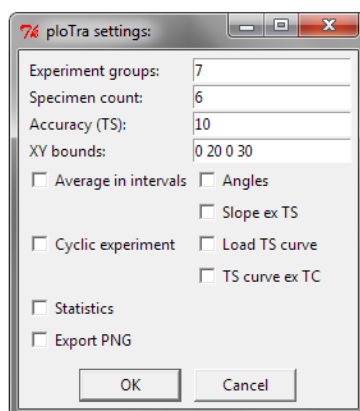
Skript programu je samozřejmě možné spouštět i příkazem z řádky pomocí „python ploTra.py“. Instalací výše uvedeného EPD balíku pak bude zaručena dostupnost všech potřebných knihoven pro případné další modifikace programu.

Program *ploTra* po spuštění vyžaduje výběr složky s *.TRA soubory (Obrázek B.5) a posléze vyzve k zadání počtu sad vzorků a počtu vzorků v jedné sadě (Obrázek B.6) do polí *Experiment groups* a *Specimen count*. Pokud tyto hodnoty neodpovídají počtu *.TRA souborů ve vybrané složce, pak program vypíše chybu „*TRA fail!*“ a skončí, v opačném případě vypíše „*TRA match!*“ a přejde k dalšímu výpočtu na zprůměrování křivek u jednoduché tahové nebo směrnic cyklů u cyklických tahových zkoušek podle zaškrtnutí příslušných políček. Uživatelskou proměnnou *Accuracy* lze nastavit četnost hledání bodů a efektivně tak zkrátit dobu výpočtu. Testováním bylo ověřeno, že při průměrné hustotě cca. 1500 bodů na 1 mm prodloužení dostačuje hledat průměr v každém desátém bodě. V případě, že je nutné měnit *master* křivku (viz Podkapitola 6.4) pro defaultní nastavení průměrovacího algoritmu, stačí zaměnit pořadí příslušného *.TRA souboru ve složce s naměřenými daty, čímž se de facto tato křivka změní. Pokud je třeba, lze vybrat druhý způsob průměrování zaškrtnutím políčka *Average in intervals*. Šířka intervalu je i v tomto případě definována uživatelskou proměnnou *Accuracy*.

V poli *XY bounds* lze nastavit rozměry grafu výstupu ve tvaru $x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}$. Zaškrtnutím *Angles* je možné měnit popisek a *Slope ex TS* vykreslí směrnice u zprůměrovaných grafů jednoduchých tahových zkoušek. Volba *Select TS curve* v případě analýzy cyklických experimentů vyvolá další výběr složky s již vypočtenými průměrnými křivkami jednoduché tahové zkoušky a nahraje je do grafů cyklických zkoušek. Pokud tato data nejsou k dispozici, je možné tuto křivku nechat vygenerovat z cyklických závislostí zaškrtnutím políčka *TS curve ex TC*. Pokud je dále vybráno i *Export PNG*, po doběhnutí programu se ve vybrané složce vytvoří *.PNG obrázek s názvem shodným jako je název složky a *.CSV soubor s výsledky výpočtu průměrných křivek anebo směrnicemi pro další použití v procesu indentifikace parametrů. Políčko *Statistics* slouží k rychlé analýze dat, které během okamžiku vytvoří další *.CSV soubor s průměrnými maximálními hodnotami sil a prodloužení experimentů včetně směrodatných odchylek.



OBRÁZEK B.5: Výběr složky obsahující *.TRA soubory



OBRÁZEK B.6: Nastavení analýzy zkoušek

B.3 Zobrazování a ukládání dat

Pro vizualizaci naměřených dat je použit pythonovský modul `matplotlib.pyplot`, jenž v mnoha ohledech předčí vykreslovací schopnosti MATLABu[®]. V kombinaci s L^AT_EX je možné přímo využívat jeho syntaxi pro tvorbu publikací.

Dalším klíčovým modulem je `csv`, který standardně implementuje čtení a zápis *.CSV souborů. Zejména pak `csv.DictReader` je mocným nástrojem pro parsování dat nejen z *.TRA souborů.

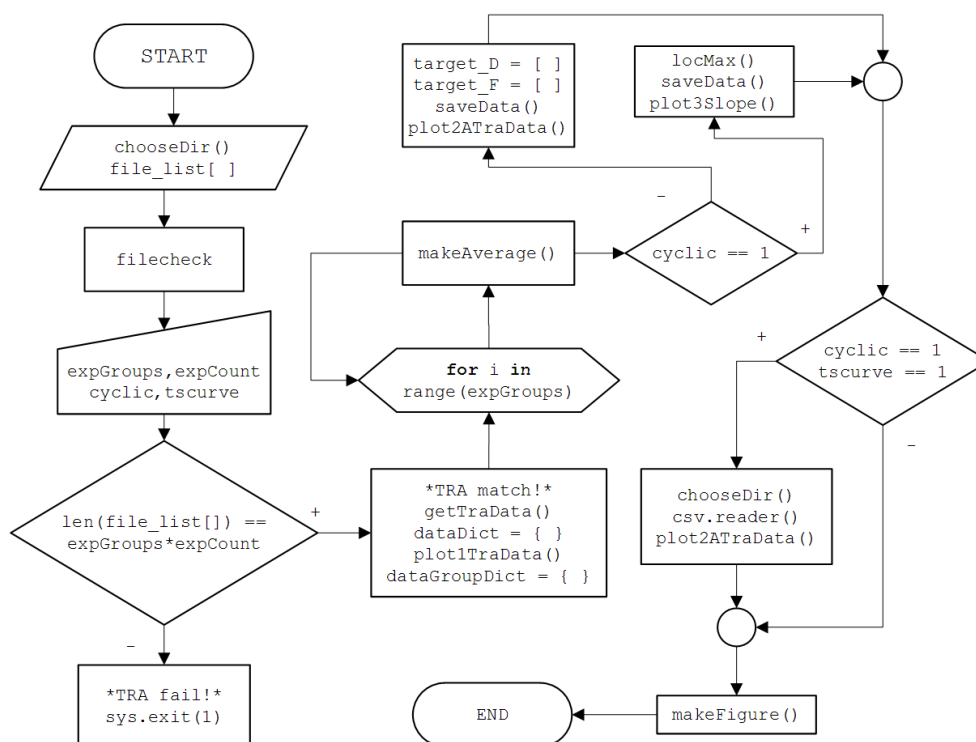
B.4 Analýza křivky cyklické zkoušky

Každá křivka experimentu, skládající se z tisíců bodových hodnot, je na počátku rozdělena podle všech inflexních bodů. Tyto jsou snadno nalezeny díky Pythonu pomocí jediné řádky kódu

```
numpy.where(numpy.diff(numpy.diff(sila) > 0))[0] + 1 .
```

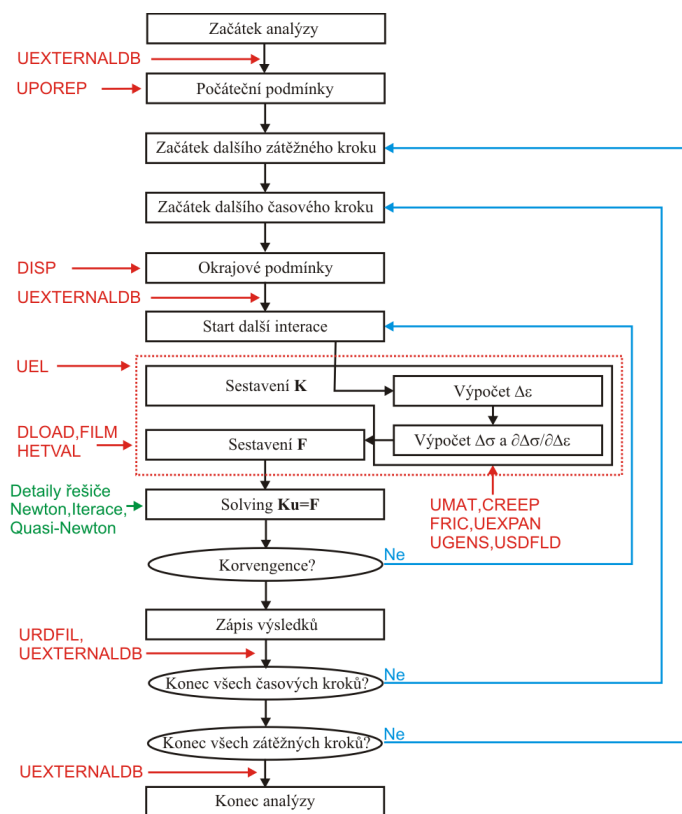
Klíčová je zde práce s modulem *numpy*, a to konkrétně s funkcí `numpy.diff`, která z pole hodnot `sila` (zde y souřadnice bodů reprezentující velikost síly) vytvoří pole rozdílů po sobě jdoucích hodnot podle předpisu $y_n^{dif} = y_{n-1} - y_n$. Pole vrácené touto funkcí jasně definuje, v kterých bodech je křivka experimentu rostoucí a kdy klesající. Protože nás zajímají právě jen ty body, v nichž dochází ke změně, stačí převést pole rozdílů pomocí jednoduché podmínky `numpy.diff(sila) > 0` na pole *booleanových* hodnot a opět zavolat funkci `numpy.diff`. V mnohých jiných programovacích jazycích by tento postup zkolaboval, ale protože v Pythonu nejen že 0 je `False` a 1 je `True`, ale i `False = 0` a `True = 1`, dostaneme jako výsledek další booleanové pole obsahující hodnoty `True` pouze na pozicích bodů, před nimiž došlo ke změně znaménka. A konečně `numpy.where(sila)[0]` vrátí pouze indexy těch hodnot, které jsou `True`. Zbývá přičíst ke každému indexu 1 a pole indexů inflexních bodů je připraveno pro další krok - tím je rozdělení tahové křivky podle nalezených bodů a určení průsečíku každé hysterezní smyčky.

B.5 Vývojový diagram

OBRÁZEK B.7: Vývojový diagram programu *ploTra*

Příloha C

Průběh výpočtu MKP



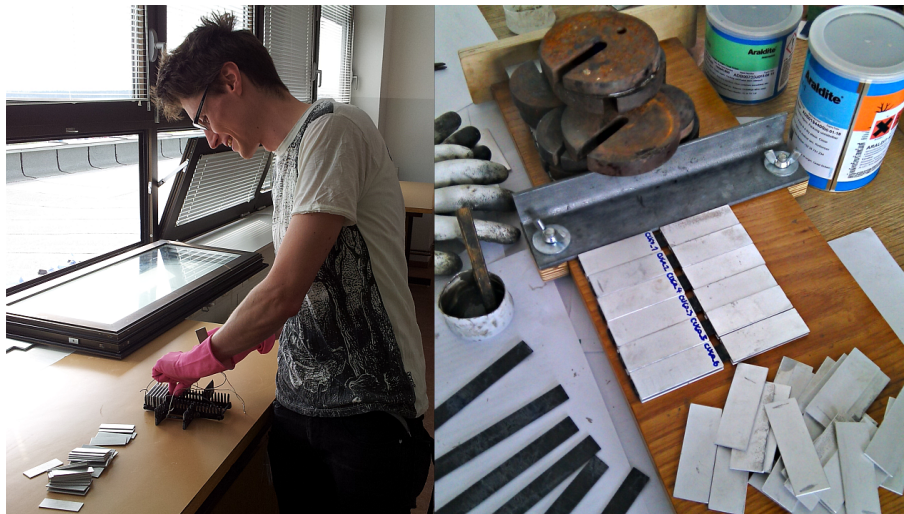
OBRÁZEK C.1: Vývojový diagram procesu simulace tahové zkoušky v ABAQUSu

Příloha D

Příprava tlakové zkoušky

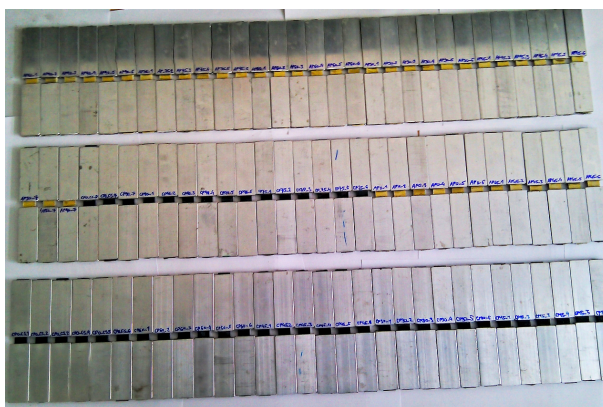
D.1 Příprava vzorků

Aby bylo zajištěno co nejlepší upnutí vzorků do trhacího stroje, bylo nutné na každý vzorek nalepit 4 hliníkové příložky (Obrázek ??). Jelikož bylo třeba tímto způsobem upravit celkem přes 250 vzorků, trvala samotná příprava nesrovnatelně déle než vlastní zkoušky.



OBRÁZEK D.1: Příprava vzorků pro tlakovou zkoušku - vkládání hliníkových příložek do kazety před leptáním a vpravo nalepené vzorky

Povrch každého vzorku byl před lepením zbrúšen a očišten z dŕvodu zajištení maximální adheze lepidla. Stejně tak bylo třeba zdrsnit povrch hliníků a protože při počtu blížícímu se 1000 kusů by další ruční broušení neúnosně



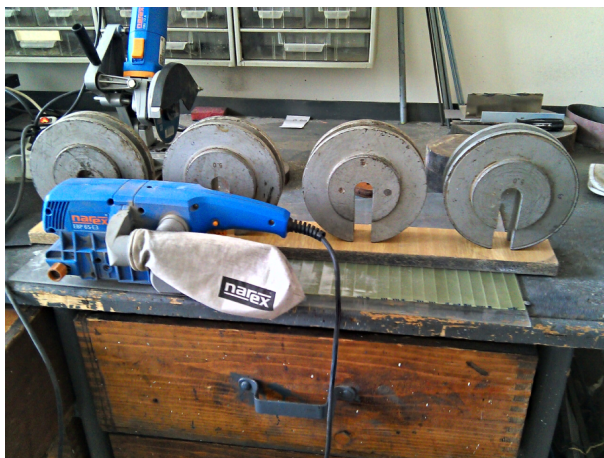
OBRÁZEK D.2: Dvě sady vzorků připravené pro tlakovou zkoušku (uhlík a aramid, vyvážená plátňová vazba)

prodlužovalo čas přípravy, bylo přikročeno k chemickému leptání hliníků. Pro tyto účely byla vyrobena kazeta zamezující styku jednotlivých kusů, která se po naplnění hliníkovými příložkami (vpravo na Obrázku D.1) ponořila na 15 minut do horkého ustáleného roztoku louhu (hydroxid sodný - běžně dostupná chemikálie pro čištění odpadních trubek). Roztok byl připraven ve vysokém 20 l vědru vždy ze 100 g hydroxidu sodného a 2 l vroucí vody. Je zapotřebí provádět leptání v dostatečně velké nádobě a na dobře větraném prostoru, protože při chemické reakci roztoku s hliníkem dochází k prudkému uvolňování vodíku, které je popsáno chemickou rovnicí [25]



Po řádném opláchnutí a neutralizaci kyselinou citronovou získáme dokonale upravené hliníkové příložky o hrubosti jemného pilníku.

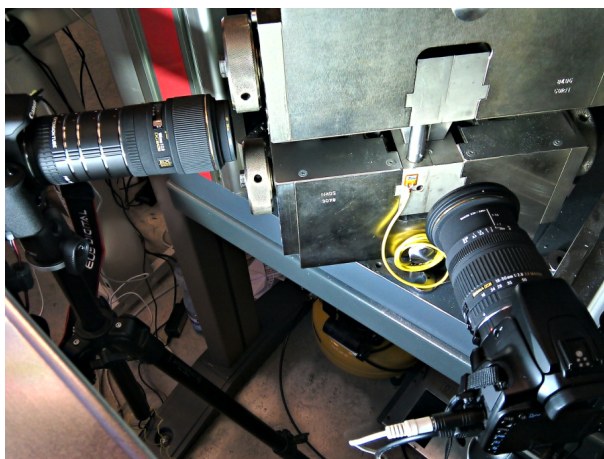
K lepení hliníkových příložek na kompozitové pásky bylo použito speciální lepidlo s vysokou smykovou pevností Araldite AV139 s tvrdidlem HV 5323. Vzorky tvrdly uloženy ve třech řadách na fixačním přípravku, (viz vpravo na Obrázek D.1), který zamezil možnému nežádoucímu posunutí lepených hliníkových příložek. Na každý pásek byl v závěru nanesen ještě vysoce kontrastní vzor pro pozdější identifikaci deformace pomocí metody korelace digitálních snímků. Na Obrázku D.2 jsou vidět dvě nalepené sady vzorků uhlíkových a aramidových plátňových kompozitů, každá čítající 45 kusů.



OBRÁZEK D.3: Úprava povrchu vzorků pásovou bruskou

D.2 Nastavení přístrojů

Průběh tlakové zkoušky byl monitorován dvojicí digitálních fotoaparátů Canon z předu a z boku vzorku, jak je vidět na Obrázku D.4. Samospouště obou fotoaparátů byly řízeny jednoduchým programem (autorem J. Bartošek) v softwaru LabView od společnosti National Instruments spolu se zařízením NI CompactDAQ, který vysílal signály jak do fotoaparátů, tak trhacího stroje. Díky tomu je možné pro každý snímek určit přesnou hodnotu síly v okamžiku jeho pořízení a vytvořit tak například animaci zkoušky včetně pohybu po tahovém diagramu.



OBRÁZEK D.4: Postavení fotoaparátů vůči měřenému vzorku

Jelikož snímaná plocha vzorku je ve skutečnosti přibližně 2×1 cm velká, byly použity sady přibližovacích kroužků a makroobjektivy. K nasvícení sloužil výkonný 100 W světelný LED zdroj. Bohužel výsledky těchto tlakových zkoušek ze softwaru *mloc* nepřinesly kýžená očekávání, protože rozdíl posuvu obrazů před a po ukončení zkoušky byl 3 - 7 jednotek pixelů na 1000 pixelů. Proto je třeba do budoucna dále tuto metodu rozvíjet, popřípadě nalézt nové způsoby, jak přesně určit deformaci v tlaku.

Příprava dalších vzorků pro tlakové zkoušky bude pravděpodobně efektivnější, pokud se větší hliníkové pláty nalepí přímo na desku kompozitu ještě před řezáním vodním paprskem. Při dalších experimentech by jistě také stálo za zvážení, zda neupravit trojúhelníkové svírací čelisti, dobře viditelné na Obrázku 5.2, tak, aby do úzkého prostoru mezi nimi pronikalo více světla (například zaoblením vyčnívající hrany), díky čemuž bychom získali kvalitnější fotografie pro identifikaci poměrných deformací.