



Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Vypracování metodiky experimentálního určování
mechanických parametrů pryží a pryžových kompozitů při
dvousém zatěžování.**

**Design of a method for experimental determination of
mechanical parameters of rubber and rubber composites
biaxially loaded.**



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti

Studijní rok: 2013./2014.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: Miloš Čadek

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Vypracování metodiky experimentálního určování mechanických parametrů pryží a pryžových kompozitů při dvousém zatěžování.


Zásady pro vypracování:

- 1) Navržení metodiky experimentu
- 2) Experimentální měření
- 3) Návrh materiálového modelu
- 4) Návrh metodiky zpracování experimentálních výsledků
- 5) Výpočet parametrů materiálového modelu
- 6) Ověření výsledků simulací na jednoduchém modelu metodou konečných prvků



Plátnost zadaní bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZP). Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

V Liberci dne 5.9.2013.


doc. Ing. Miroslav Mlýnský, CSc.
děkan


prof. Ing. Miroslav Vedralík, CSc.
vedoucí katedry



Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Bohdana Marvalová, CSc.
Konzultant bakalářské práce: Ing. David Čížek, PhD

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):
M. A. Sutton, J. L. Ortu and H. W. Schreier, Image Correlation for Shape, Motion and
Deformation Measurements, Springer, 2009.
Petrková, I., Habr: vlastní docentka práce, 2010
COMSOL, "The Nonlinear Structural Materials Module User's Guide", COMSOL
Holzapfel, G.A., Nonlinear solid mechanics, 2000

- grafické práce: poster ve formátu A3, shrnutí/zejména body práce

- převodní zpráva: cca 50 stran

Forma zpracování bakalářské práce:

Prohlášení

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

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

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

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedených literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum 30.12.2013

Podpis M:105 0283

Poděkování

Děkuji paní prof. Ing. Bohdaně Marvalové, Csc. za věnovaný čas při psaní bakalářské práce a cenné rady při vyhodnocování výsledků z měření. Dále bych rád poděkoval katedře mechaniky pružnosti a pevnosti za umožnění práce s vybavením jejich laboratoře.

Anotace

Tato práce se zabývá metodikou experimentálního měření materiálových vlastností pryžových vzorků za použití stávajícího vybavení laboratoře KMP TUL. Zabývá se i měřicím zařízením, způsobem vyhodnocení výsledků a vhodností použité metody DIC. Další součástí práce je experimentální měření a simulace metodou konečných prvků v softwaru Comsol Multiphysics, poskytnutých vzorků pryže z pásového dopravníku společností Severočeské doly a.s., která vlastní doly Bílina a Nástup Tušimice, kde jsou tyto pásy užívány k přepravě skrývky. Výsledkem této práce je sestavená metodika ověřená experimentálním měřením, sestavený simulační model uvedených experimentů a výpočet modulu pružnosti ve smyku měřených vzorků.

Klíčová slova: pryž, deformace, návrh metodiky, mechanické vlastnosti, modul pružnosti ve smyku, hyperelastická, digitální obrazová korelace, měření

Abstract

This paper contains a method, designed for measurement of material characteristics of rubbish like materials, using devices and other laboratory equipment owned by KMP TUL. This paper also contains following descriptions: devices used in experiment, data evaluation possibilities and DIC method appropriateness. Next part of this paper is an experimental measurement and FEM simulation in Comsol Multiphysics of rubber specimens from conveyor belt, provided by Severočeské doly a.s. which owns mines at Bílina and Nástup Tušimice, where are these belts used to transport the overburden. The results of this work are methodics authenticated by the results from experimental measurements and created simulation model and computed shear modulus.

Key words: rubber, deformation, methodics design, mechanical parameters, shear modulus, hyperelasticity, Digital Image Correlation, measurement

Seznam použitých zkratk a symbolů

DIC	Digital Image Correlation
Pa	Pascal - základní jednotka tlaku
MPa	megapascal, jednotka tlaku
mm	milimetr, jednotka délky
cm	centimetr, jednotka délky
mm/min	milimetr za minutu, jednotka rychlosti
N	Newton , základní jednotka síly
C	uhlík
H	vodík
CH	acetylen
CH ₂	ethylen
CH ₃	methyl
E [Pa]	Youngův modul pružnosti v tahu
G [Pa]	Modul pružnosti ve smyku
ε_x	deformace ve směru osy x
ε_y	deformace ve směru osy y
ε_z	deformace ve směru osy z
ε_1	první hlavní deformace
ε_2	druhá hlavní deformace
σ_x [MPa]	normálové napětí ve směru osy x
σ_y [MPa]	normálové napětí ve směru osy y
σ_z [MPa]	normálové napětí ve směru osy z
σ_1 [MPa]	první hlavní napětí
σ_2 [MPa]	druhé hlavní napětí
μ	Poissonova konstanta

σ	tenzor napětí
ϵ	tenzor deformace
$\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{xz}, \tau_{zx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}$ [MPa]	smyková napětí
$\gamma_{xy}, \gamma_{yx}, \gamma_{xz}, \gamma_{zx}, \gamma_{yz}, \gamma_{zy}$	zkos
φ [°]	úhel pootočení elementu
F_x [N]	zatěžovací síla, působící ve směru osy x
F_y [N]	zatěžovací síla, působící ve směru osy y
W_s	hustota deformační energie
λ	protažení
$\bar{\lambda}_{eli}$	izochorické protažení
C	pravý Cauchy-Greenův tenzor deformace
B	levý Cauchy-Greenův tenzor deformace
F	deformační gradient tenzoru
E_{ij}	složky Greenova tenzoru deformace
I_i	invariant Cauchy-Greenova tenzoru deformace
$I_1(\bar{C}_{e1})$	izochorický invariant Cauchy-Greenova tenzoru deformace
κ	počáteční objemový modul
α_p, μ_p	materiálové parametry
J_{eli}	objemový poměr, poměr mezi deformovaným a původním objemem
A_{0a}	původní plocha měřeného vzorku

Seznam obrázků

Obrázek 2-1 schematický vzorec polyisopropenu - přírodní pryž [3].....	3
Obrázek 2-2 částečná krystalizace polymerní sítě při tahovém zatížení pryže a) výchozí stav, b) deformovaný stav [3]	3
Obrázek 2-3 polymerní řetězec vlevo zrelaxovaný, vpravo s protažením, poddávající se vnějšímu napětí [4]	3
Obrázek 2-4 vliv stupně zesíťování v diagramu σ - ϵ , neplněné přírodní pryže, vulkanizační systém síra-sulfenamid-ZnO. Obsah síry: A - 0.35, B-0.7, C - 1.4, D - 2.4, E - 4.2, F - 5.ém síra-sulfenamid-ZnO. Obsah síry: A - 0.35, B - 0.7, C - 1.4, D - 2.4, E- 4.2, F-5. [4]	4
Obrázek 2-5 diagram závislosti napětí na deformaci neplněné pryže (1) v porovnání s pryží obsahující ztužující plnivo (2). [4]	4
Obrázek 2-6 diagram závislosti napětí na deformaci pro smyk, tah, tlak neplněné pryže. [4] 4	
Obrázek 2-7 pokles napětí při opakovaném stejném protažení, měřený vzorek - pás pryže vyztužený textilií, vyříznutý z pásového dopravníku, bylo provedeno cyklické namáhání tahem na zařízení Tira v laboratoři KMP TUL	5
Obrázek 4-1 obecné rovinné přetvoření.....	8
Obrázek 4-2 Mohrova kružnice pro $\sigma_x > \sigma_y > 0$,	9
Obrázek 4-3 Mohrova kružnice, zatížení ve směru hlavních deformací	9
Obrázek 4-5 Zatížení tahem, ve směrech hlavních napětí, nulové smykové napětí	10
Obrázek 4-4 Mohrova kružnice, ekvivalentní zatížení $F_x = F_y$ ve směrech hlavních deformací, pro které platí $\epsilon_1 = \epsilon_2$	10
Obrázek 5-1 čelist biaxiálního rámu se siloměrem a kolíkem, na obrázku jsou dále vidět koncové spínače, pohybový šroub a dvě vodící tyče.....	12
Obrázek 5-2 měřicí prostředí Dewesoft, kanál A3 nezatížen, kanál A4 zatížen silou 96.1N, obrázek dále ukazuje umístění kalibračního tlačítka Nula, nad pásem karet.	12
Obrázek 5-3 měřicí karta Dewetron DEWE 43 a připojené výstupy siloměrů z biaxiálního rámu jako kanál 3 a 4 do prostředí Dewesoft.....	13
Obrázek 6-1 kalibrační destičky, typ Al 6,8mm.	16
Obrázek 6-2 Q-400 - kalibrační proces.....	17
Obrázek 6-3 kalibrace TIRAtest	17
Obrázek 6-4 kalibrace biaxiálního rámu.....	18
Obrázek 6-5 vzorky krycí vrstvy určené pro dvou-osou zatěžovací zkoušku	19
Obrázek 6-6 vzorky pryže s výtuznou tkaninou, určené pro jednoosou zatěžovací zkoušku, tři příčné a jeden podélný (směr tkaniny) a vzorky pryže vyříznuté z krycí vrstvy pásového dopravníku	20

Obrázek 6-7 zatěžování vzorku	22
Obrázek 6-8 měření jednoosé napjatosti na zařízení Tira.....	23
Obrázek 8-1 měřený vzorek.....	25
Obrázek 8-2 vyhodnocení první a druhé hlavní deformace při maximálním dosaženém protažení- Istra 4D	26
Obrázek 8-3 Spatial plot posuvu v ose X, oblasti definované polygonem uprostřed vzorku - Istra 4D	27
Obrázek 8-4 záznam průběhu posuvů čelistí - Matlab, osa x čas[s], osa y posuv[mm]	27
Obrázek 8-5 záznam průběhu sil - Matlab, osa x čas[s], osa y síla[N].....	27
Obrázek 8-6 průběhy hlavních deformací, v oblasti definované polygonem - Excel, osa x čas[s], osa y deformace[mstrain]	28
Obrázek 8-7 průběh posuvů v oblasti definované polygonem, směr X tedy směr první hlavní deformace - Excel, osa x čas[s], osa y posuv[mm].....	28
Obrázek 8-8 konkrétní naměřené hodnoty v oblasti definované čtyřbodovým polygonem.....	29
Obrázek 8-9 Temporal plot druhé hlavní inženýrské deformace (obr.8-6 vyhodnocení v Excelu).....	29
Obrázek 8-10 diagram 1.hlavní deformace[mstrain] - čas[s]	30
Obrázek 8-11 diagram síla[N] - čas[s].....	30
Obrázek 8-12 diagram síla[N] - deformace[mstrain]	31
Obrázek 8-13 diagram napětí[MPa] - deformace[mstrain].....	31
Obrázek 8-14 diagram závislosti síly[N] na deformaci[mstrain] pro oba hlavní směry	32
Obrázek 8-15 diagram závislosti napětí[MPa] na deformaci[mstrain] pro oba hlavní směry.....	32
Obrázek 9-1 fyzikální moduly [http://www.comsol.com/products].....	33
Obrázek 9-2 rozptyl hodnot konstant C_{10} a C_{01} Mooney-Rivlinova materiálového modelu pro pryž při jednoosém zatěžování tahem, dle stupně vulkanizace pryže [10]	37
Obrázek 9-3 názorná ukázka aplikace podporovaných materiálových modelů na modelu části nafukovacího balónku [11].....	39
Obrázek 9-4 vložená naměřená data	40
Obrázek 9-5 výpočet parametrů [14]	40
Obrázek 9-6 vložení řídicích parametrů	40
Obrázek 10-1 curve fit, modrá - naměřená data, zelená – proložení.	41
Obrázek 10-2 zobrazení posuvů.	42
Obrázek 10-3 zobrazuje průběh prvního hlavního napětí a jeho izočáry. A průběh i směr první hlavní deformace.	42
Obrázek 10-4 síť a geometrie modelu	43

Obrázek 10-5 dostupné materiálové modely.	44
Obrázek 10-6 předepsání okrajových podmínek, zatížení.	44
Obrázek 10-7 zobrazuje průběh prvního hlavního napětí a jeho izočáry. A průběh i směr první hlavní deformace.	45
Obrázek 10-8 zobrazuje průběh druhého hlavního napětí a jeho izočáry. A průběh i směr třetí hlavní deformace.	45
Obrázek 10-9 popisuje průběh prvního hlavního napětí a jeho izočáry. A průběh i směr první hlavní deformace. Data byla zredukována pro snazší porovnání s daty naměřenými.	46
Obrázek 10-10 zobrazuje průběh celkového posuvu a jeho izočáry. A průběh i směr třetího hlavního napětí.	46

Obsah

1. Úvod	1
2. Pryž.....	2
2.1. Struktura a vlastnosti.....	3
2.2. Viskoelasticita	5
2.3. Další pozorovatelné jevy.....	5
3. Digitální optická korelace obrazu DIC (Digital Image Correlation).....	6
3.1. Krátký přehled.....	6
3.2. Vývoj metody DIC	6
4. Dvouosé zatěžování.....	8
5. Vybavení laboratoře	11
5.1. Tira 2810	11
5.2. Biaxiální zatěžovací rám	11
5.3. Dantec Dynamics Q-400 systém.....	13
5.4. Svítidlo	15
6. Experimentální část	16
6.1. Kalibrace Q-400	16
6.2. Kalibrace Tira.....	17
6.3. Kalibrace Dewesoft, biaxiální rám.....	18
6.4. Vzorky.....	19
6.5. Zásady a chyby měření.....	20
6.6. Metodika a experiment na zařízení dvouosého rámu.....	21
6.7. Metodika a experiment na zařízení Tira.....	22
7. Istra 4D - data a postprocessing.....	23
7.1. Polygon	24
7.2. Spatial Plot	24
7.3. Temporal Plot.....	24
7.4. Smoothing	24
8. Vyhodnocení experimentů.....	25
8.1. Měření na zařízení Tira	30
8.2. Měření na biaxiálním rámu	31
9. Materiálový model.....	33
9.1. Nelineární strukturální materiálový modul	34

9.2. Neo-Hookean	35
9.3. Ogden	36
9.4. Mooney-Rivlin	37
9.5. Optimalizační modul.....	39
10. MKP analýza	41
10.1. Jednoosé zatížení tahem	41
10.2. Ekvibiaxiální zatížení tahem	43
11. Závěr.....	47

1. Úvod

Využití pryžových materiálů je nezbytnou součástí dnešního světa, jejich pole použití je velice široké. Většinou se jedná o aplikace, kde je nutné využití velké, vratné deformace nebo tlumícího efektu elastomerů v kombinaci například s těsnícími případně izolačními vlastnostmi. V oboru strojírenství se tak například jedná o pneumatiky, těsnící kroužky nebo pásové dopravníky. Pryž v její nejranější podobě je nám známa pouze jedno století. Vlastnosti těchto materiálů jsou proto stále teprve objevovány s rozvojem měřících metod. Zkoumání pryžových materiálů má na katedře mechaniky, pružnosti a pevnosti poměrně velkou tradici, díky které mohla být také napsána tato práce.

První kapitola začíná stručným úvodem o historii a vlastnostech pryže a použité měřící metodě. V kapitole o historii metody digitální optické korelace DIC je stručně uveden její vývoj a to hlavně z pohledu aplikace metody. Popis vývoje metody DIC je omezen pouze na měření 2D deformací, které je použito v experimentální části této práce. Tato skutečnost vypovídá o vhodnosti použití metody DIC pro experimentální měření uvedené v této práci, neboť samotný vývoj metody byl směřován právě k bezkontaktnímu měření deformace. Práce poté pokračuje stručným teoretickým výkladem druhu napjatosti, uvažovaným v experimentu. V páté kapitole je uveden popis všech použitých zařízení, systémů a stručný popis principu měření použitého systému Q-400 Dantec Dynamics. Zbývající kapitoly rozebírají experiment, vlastnosti a simulace materiálového modelu. V závěrečné kapitole jsou shrnuty a porovnány dosažené výsledky, s hodnocením použitých postupů. Cílem práce je sestavit metodiku pro měření deformace a zatěžovacích sil vzorku pryže, vybrat materiálový model a posoudit zda je sestavená metodika vhodná.

2. Pryž

Obyčejný, tenký pásek pryže může být natažen o několik stovek procent a přesto se po uvolnění vrátí zpět do původních rozměrů, dle mechanických vlastností je tak tento materiál zařazen mezi elastomery. Takto veliký rozsah vratné elasticity představuje nejvýraznější materiálovou vlastnost pryží. Elastické chování je podmíněno řídkým zesíťováním polymeru. Elastomery, které mohou být zesíťovány jsou běžně označovány jako kaučuky, produktem síťování je pryž.

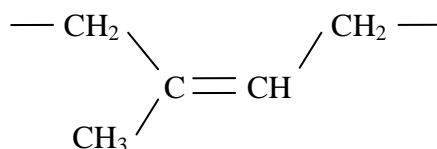
Columbus při své druhé cestě do Ameriky objevil Americké Indiány hrající hry s kaučukovými kuličkami vyrobenými z přírodní pryže. Tyto surové materiály byly nesíťované, ale měly vysokou molekulární hmotnost a proto byly po značnou dobu schopné udržet si svůj tvar. Vývoj pryže a teorie elasticity pryží může být vystopován do několika stádií. Možná vůbec první vědecký výzkum pryže byl proveden Goughem v roce 1805. V roce 1844 byl Goodyerem poprvé proveden proces vulkanizace sírou. V moderní terminologii Goodyear pryž tzv. zesíťoval. Vulkanizace zajistila rozměrovou stabilitu, redukci creepu, tečení a umožnila tak ruční výrobu spousty pryžových výrobků, tyto výrobky byly však většinou využívány pouze pro nepropustnost vody. Za použití nově vulkanizovaných materiálů, navázal na Goughovy výzkumy Kelvin. Kelvin testoval nově popsany druhý zákon termodynamiky. Všechny aplikace výše uvedené byly samozřejmě docíleny bez znalosti molekulární struktury polymerů. Až začátkem roku 1920 publikoval Staundinger svojí teorii dlouhých řetězců polymerů. Staundinger je považován za zakladatele oboru makromolekulární chemie a byl v roce 1953 oceněn Nobelovou cenou. Do roku 1914 byl jediným známým elastomerem přírodní kaučuk. Začátkem roku 1914 byl v Německu vyroben polymer na bázi methyly. Později byl nahrazen butadiene-natrium-styrene kopolymerem. Poté, co byla objevena skutečná molekulární struktura polymerů a naznačen postup, jak by bylo možné látky tvořené ohromnými řetězci cíleně upravovat, došlo k rychlému rozvoji syntézy různých polymerů a zavedení jejich průmyslové výroby. [1]

Roku 1939 zahájila americká vláda vlastní program pro vývoj elastomerů, tzv. Synthetic Rubber Program, kde byl vyroben materiál známý jako GR-S. Oba materiály sehrály rozhodující role ve druhé světové válce. Dnešní elastomery nazývané jako SBR, jsou široce vyráběny jen s nepatrným zlepšením od původního GR-S receptu. [2]

2.1. Struktura a vlastnosti

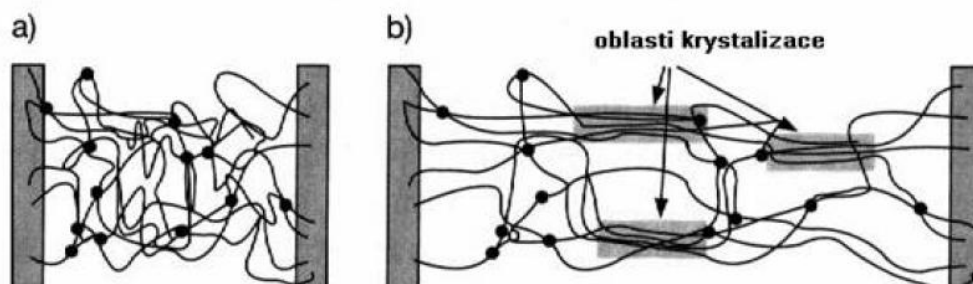
Kaučuk je dle mezinárodní úmluvy definován jako látka, schopna deformace již malou silou nejméně o 100%, která se po uvolnění zatížení rychle vrací do téměř původního stavu.

Přyzž vzniká vulkanizací přírodního kaučuku. Vulkanizace, nebo-li síťování, je proces polymerace, kde vznikají tzv. makromolekulární síť (obr.2-1), tj. chemické vazby mezi řetězci. Tyto vazby působí jako kinematické, umožňují možnost rotace polymerního segmentu. Tvar makromolekul je dán funkcí monomerů. Počet vazebných míst připadající na délku makromolekuly schopné síťování rozhodne o hustotě sítě, která je nejdůležitějším faktorem, jež má vliv na fyzikální charakteristiky a mechanické vlastnosti pryže.

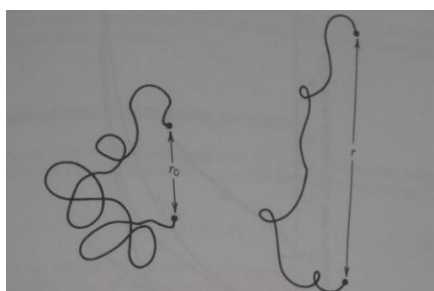


Obrázek 2-1 schematický vzorec polyisopropenu - přírodní pryž [3]

Zesíťováním pryže je zabráněno nevratnému klouzání molekulových řetězců. Tím je soustava ohebných polymerních klubek vratně deformovatelná. Pryž je také typ polymeru se sklonem ke krystalizaci pod napětím za působení deformační síly (obr.2-2). [3] [4]

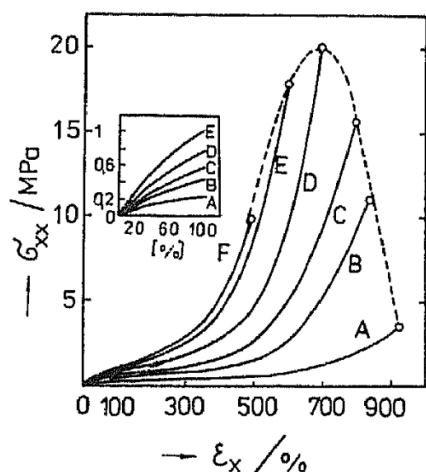


Obrázek 2-2 částečná krystalizace polymerní sítě při tahovém zatížení pryže a) výchozí stav, b) deformovaný stav [3]

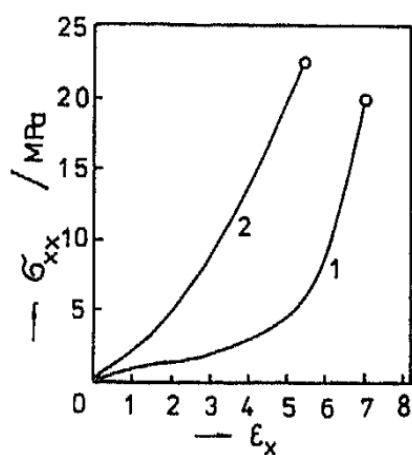


Obrázek 2-3 polymerní řetězec vlevo zrelaxovaný, vpravo s protažením, poddávající se vnějšímu napětí [4]

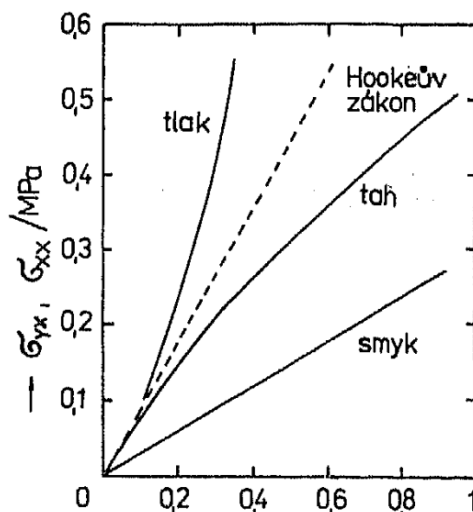
Neplněné pryže mají řádově podobný modul objemové pružnosti K jako polymerní skla. Odlišují se však od nich v řadě ohledů. Jejich Poissonův poměr je blízký hodnotě 0,5. V důsledku toho jsou moduly E , G mnohem nižší než K . Běžná hodnota E , G neplněných pryží je řádu 10^0 MPa. Práce vynaložená na deformaci pryže se téměř zcela mění na teplo. Rovnovážný modul pružnosti je úměrný absolutní teplotě. Elasticita neplněných pryží má entropický charakter. [3] [4] Z těchto poznatků je patrná výrazná závislost mechanických vlastností pryže na teplotě. Následující diagramy ukazují základní a nejčastěji měřené vlastnosti struktury plněné i neplněné pryže (obr.2-4, 2-5, 2-6).



Obrázek 2-4 vliv stupně zesíťování v diagramu σ - ϵ , neplněné přírodní pryže, vulkanizační systém síra-sulfenamid-ZnO. Obsah síry: A - 0.35, B - 0.7, C - 1.4, D - 2.4, E - 4.2, F - 5.ém síra-sulfenamid-ZnO. Obsah síry: A - 0.35, B - 0.7, C - 1.4, D - 2.4, E - 4.2, F - 5. [4]



Obrázek 2-5 diagram závislosti napětí na deformaci neplněné pryže (1) v porovnání s pryží obsahující ztužující plnivo (2). [4]



Obrázek 2-6 diagram závislosti napětí na deformaci pro smyk, tah, tlak neplněné pryže. [4]

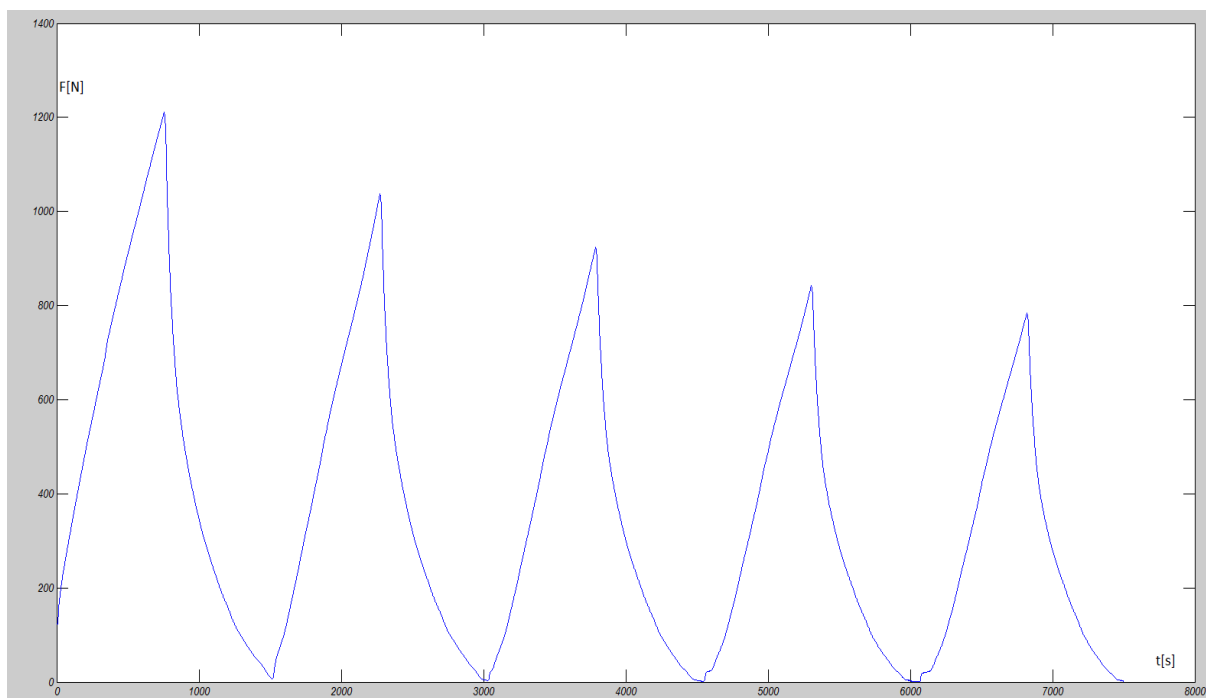
Zesíťováním směsi polymeru s plnivem je docíleno změny mechanických vlastností pryže. U diagramu tahové křivky (obr. 2-4) je pozorovatelné zmenšení tažnosti pryže, nárůst pevnosti, zvětšení plochy pod křivkou diagramu, neboli zvětšení deformační energie nutné k dosažení meze pevnosti pryže. Pokles tažnosti je způsobený vlastností plniva, které má ve srovnání s polymerní sítí pryže nulovou tažnost. Dále je možné např. zaznamenat nárůst Youngova modulu pružnosti atd. [4] Další významné vlastnosti pryží jsou popsány v následujících podkapitolách.

2.2. Viskoelasticita

Viskoelasticita popisuje časovou závislost deformace materiálu vůči zatížení. Viskoelastické materiály reagují na deformaci vždy se zpožděním. [4]

2.3. Další pozorovatelné jevy

U pryžových materiálů je často možné pozorovat tzv. deformační změkčení. Z toho plyne pozorovatelnost anizotropie. Pryž se však většinou označuje jako izotropní materiál, tento předpoklad je však většinou neplatný. Například u návrhu pneumatik není zavedení míry anizotropie materiálu do výpočtů žádnou výjimkou. Deformační změkčení souvisí s tzv. Mullinsovým efektem (obr.2-7). Mullinsov efekt představuje zvětšující se maximální dosaženou deformaci při klesající tuhosti, projevuje se klesající hysterezí při cyklickém zatěžování.



Obrázek 2-7 pokles napětí při opakovaném stejném protažení, měřený vzorek - pás pryže vyztužený textilií, vyříznutý z pásového dopravníku, bylo provedeno cyklické namáhání tahem na zařízení Tira v laboratoři KMP TUL

Jev deformačního změkčení je možné vysvětlit dvěma teoriemi. První vyslovili Payne a Hardwood, druhou Dannenberg, Rigbi a Bueche. První teorie označuje jako příčinu tohoto jevu deformací vyvolanou krystalizací struktury polymerních řetězců (obr. 2-2). Teorie Dannenberga, Rigbiho a Buecheho uvádí jako důvod deformačního změkčení a odtrhávání částic plniva vzhledem k polymerní matici.

3. Digitální optická korelace obrazu DIC (Digital Image Correlation)

3.1. Krátký přehled

Používaný termín „digital image correlation” odkazuje na druh bezkontaktních metod, které pořizují fotografie objektu, ukládají je v digitální podobě a provádí jejich analýzu k extrahování celého tvaru, deformace nebo kinematiky objektu.

Porovnávání digitálních fotografií je prováděno s velkým počtem druhů vzorů na objektu, např. úsečky, sítě, tečky a náhodná pole. Jeden z nejběžněji používaných přístupů využívá náhodných vzorů s následným porovnáváním sub-regionů celého snímku, čímž je docíleno celoplošného měření. Vzory jsou nanášeny na povrch pevného tělesa nebo mohou být tvořeny částicemi v tekutině. [5]

3.2. Vývoj metody DIC

První poznatky o měření využívající fotografie/obrazy se datují až ke spisům Leonarda da Vinci, do roku 1480. V těchto spisech Leonardo da Vinci diskutuje nad perspektivou v obraze. Klíčový rozmach nastal po vynálezu fotografie, Daguerrem v roce 1837 v návaznosti na práci Niepceho. S vynálezem a zlepšením fotografických metod a digitalizací záznamu zaznamenala prudký vývoj fotogrammetrie. Cílem dřívější fotogrammetrie bylo extrahovat třidimenzionální tvar objektu skrze porovnání fotografických záznamů z více pohledů. Další práce v oblasti obrazové korelace probíhala v roce 1950 za účelem zaznamenání dalších rysů a vlastností objektů z různých pohledů. V roce 1961 Hobrough navrhl a postavil nástroj ke korelaci velmi precizních průzkumných fotografií ve vysokém rozlišení tak, aby bylo možné preciznější měření měnících se podmínek terénu, čímž se stal jedním z prvních badatelů pokoušejících se o formu digitální obrazové korelace určené k extrahování pozičních informací z obrazové korelace/porovnávacího procesu.

Jak se digitální fotka stala dostupnou, v 70. a 80. letech 20. století, výzkumníci umělé inteligence a robotiky začali vyvíjet algoritmy stereoskopického vidění a jejich metodiky paralelně s fotogrammetrickou aplikací pro letecké snímky. Jednou z prvních prací, která navrhovala použití počítačem získaných snímků za účelem měření deformace v materiálovém inženýrství byla napsána Petersem a Ransonem v roce 1982. Jejich metoda navrhovala porovnání digitálních snímků s různými malými regiony

(známé jako podmnožiny) se snímky před a po deformaci a nalezení pozic každé z těchto podmnožin po deformaci. Byl navržen koncept základní mechaniky kontinua určující deformaci malých oblastí jako část srovnávacího procesu. Použitím tohoto přístupu vynalezl v roce 1983 Sutton a kol. [5] numerický algoritmus a provedl předběžné experimenty za použití opticky zaznamenaných snímků, aby ukázal, že tento přístup, dnes známý jako 2D Digital Image Correlation (2D-DIC), byl proveditelný za použití opticky zaznamenaných snímků. Dále byly procedury 2D-DIC validovány, modifikovány, zlepšovány a numerické algoritmy byly zprecizněny.

Během posledního desetiletí 20. st., byly provedeny studie k posouzení přesnosti metody 2D-DIC. V několika dalších letech metoda 2D-DIC zažila celosvětový explozivní růst, autoři identifikovali více jak 400 archivovaných článků týkající se použití této metody od roku 2000. Některé studie materiálových charakteristik, zahrnující měření metodou 2D-DIC, jsou uvedeny v [6] pro polymery, [7] kompozity. V nedávné studii, Berfield a kol. provedl experiment metodou 2D-DIC za použití nanosení vysoce kontrastního a náhodného vzoru bodů barvy na rovinu. Rozšiřující tak metodu 2D-DIC způsobem podobajícím se pozorování proudění v kapalinách. [5]

4. Dvouosé zatěžování

Řešení prostorových úloh je velice obtížné, úloha v této práci tak byla zjednodušena na dvojdimenzionální úlohu. Tato kapitola obsahuje shrnutí základních poznatků teorie lineární pružnosti.

Při dvouosém, rovinném zatěžování vzniká prostorová deformace nebo prostorová napjatost. Prostorová napjatost je popsána devíti složkami napětí σ_{ij} , třemi normálovými napětími a šesti smykovými. Můžeme pak sestavit tzv. tenzor napětí a tenzor deformace:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}; \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy} & \gamma_{xz} \\ \gamma_{yx} & \varepsilon_y & \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} & \gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Z důvodů platnosti zákona o sdružených smykových napětích ($\tau_{xy} = \tau_{yx}$), máme šest nezávislých složek napětí a deformace. Tenzory napětí a deformace lze zkráceně zapsat jako vektory.

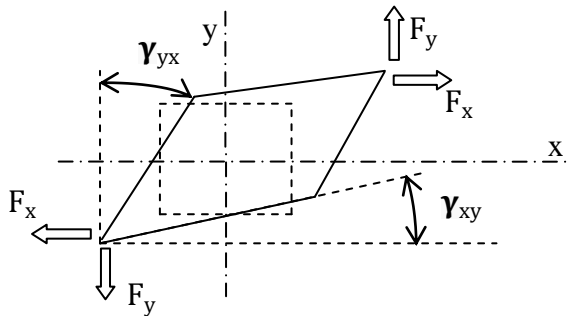
$$\boldsymbol{\sigma} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}\}^T; \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}\}^T \quad (4.2)$$

Dvouosá napjatost je rovinný stav napjatosti, kdy vznikají pouze dvě normálová napětí ve dvou směrech a smykové napětí. Je to tedy speciální případ prostorové napjatosti. Normálová napětí přísluší např. tahové deformaci. Deformace přísluší smykovému napětí je zkso. Deformace a napětí pro rovinnou napjatost pak můžeme zapsat jako:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{bmatrix}; \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \gamma_{xy} \\ \gamma_{yx} & \varepsilon_y \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

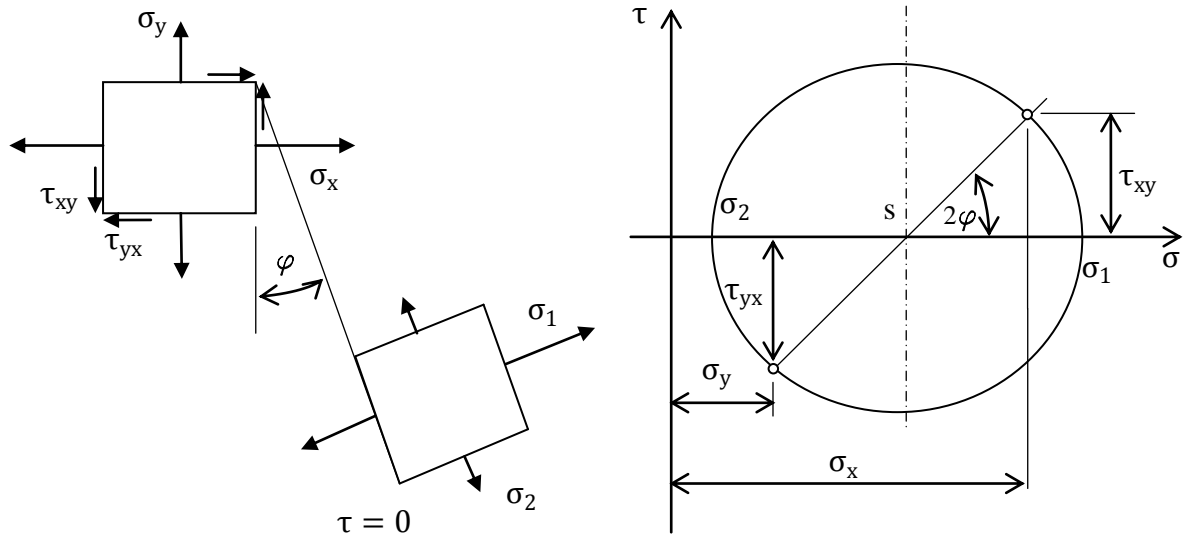
kde podle Hookeova zákona pro rovinnou napjatost platí:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y); \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x); \quad \gamma_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy}; \quad (4.4)$$



Obrázek 4-1 obecné rovinné přetvoření

Grafické znázornění obecné dvouosé napjatosti, pro případ $\sigma_x > \sigma_y > 0$, lze provést Mohrovou kružnicí. (obr. 4-2)



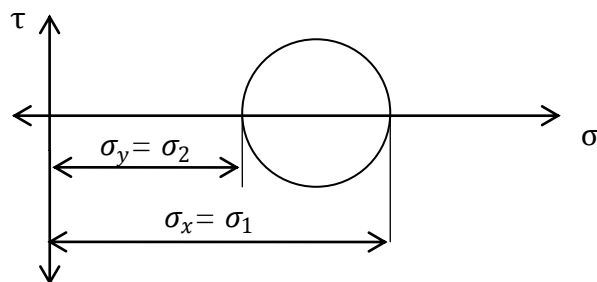
Obrázek 4-2 Mohrova kružnice pro $\sigma_x > \sigma_y > 0$,

Pokud působí zatěžující síly v osách souměrnosti zatěžovaného vzorku, jsou normálová napětí σ_x, σ_y hlavními napětími σ_1, σ_2 . Deformace ve směru zatěžování $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ je pak rovna hlavním deformacím $\varepsilon_1, \varepsilon_2$.

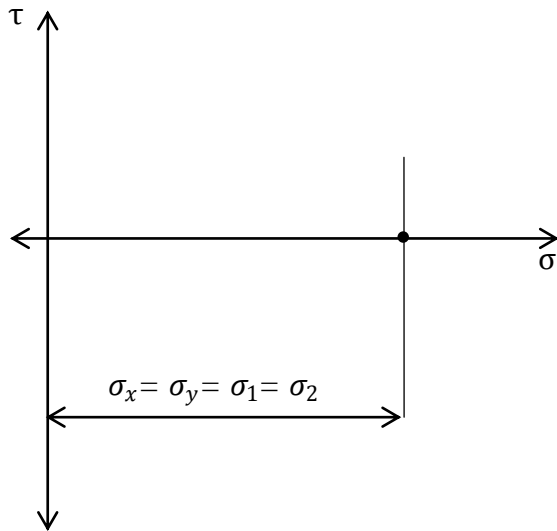
Při tomto druhu napjatosti je smykové napětí $\tau_{xy} = \tau_{yx} = 0$ a tedy i deformace příslušející smykovému napětí, zkos $\gamma = 0$ (obr. 4-3). Přetvoření a deformace pro tuto napjatost je pak možné zapsat:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{bmatrix}; \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

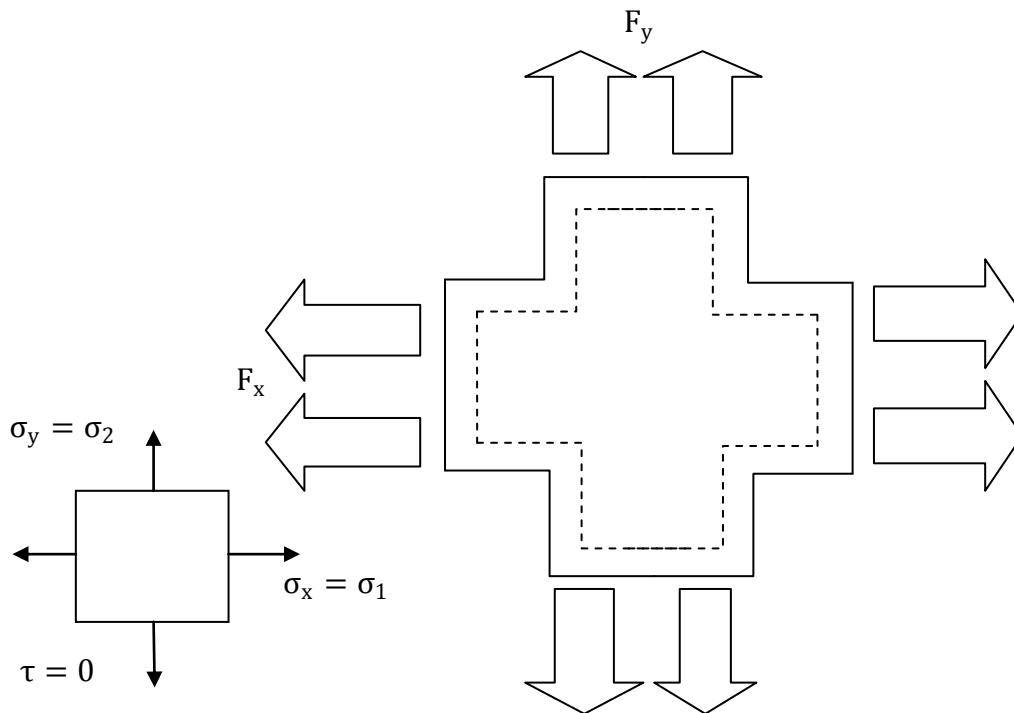
Za dalšího předpokladu rovnosti zatěžovacích sil $F_x = F_y$, pak platí $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$, $\gamma = 0$. Grafické znázornění pomocí Mohrovy kružnice se tím zjednoduší na zobrazení pouze jednoho bodu, který leží na ose ε/σ (obr. 4-4).



Obrázek 4-3 Mohrova kružnice, zatížení ve směru hlavních deformací



Obrázek 4-4 Mohrova kružnice, ekvivalentní zatížení $F_x = F_y$ ve směrech hlavních deformací, pro které platí $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$



Obrázek 4-5 Zatížení tahem, ve směrech hlavních napětí, nulové smykové napětí

5. Vybavení laboratoře

V této kapitole je uvedeno a popsáno vybavení laboratoře KMP TUL použité při experimentech uvedených v této práci.

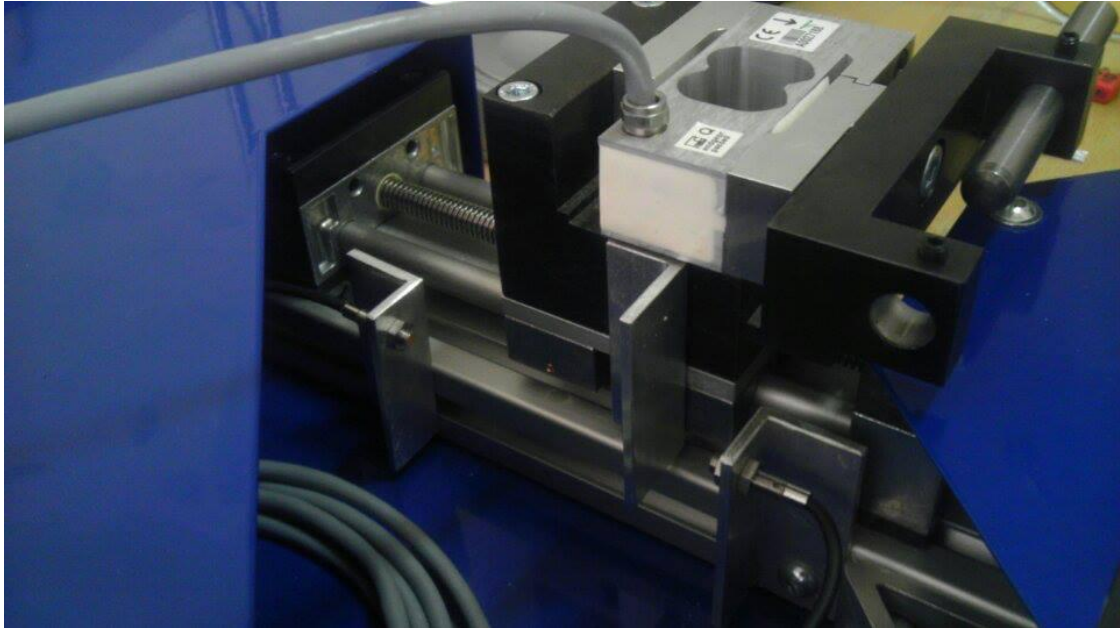
5.1. Tira 2810

Jedná se o zařízení označené jako univerzální zatěžovací stroj, zařízení umožňuje programovatelný pohyb horní čelisti, ve které je umístěn siloměr. Na zařízení Tira lze provádět zkoušky tahem, tlakem, zkoušky tvrdosti atp. podle použitého typu čelistí. V této práci bylo zařízení použito v režimu tahové zkoušky. Maximální dovolené zatížení je 10kN. Byly použity samosvorné čelisti, které samovolnou změnou přtlaku zabráňují prokluzu zkoušeného materiálu z čelistí. Průběh zkoušky může být řízen přes PC softwarem TIRAtest, nebo lze využít postranní ovládací panel.

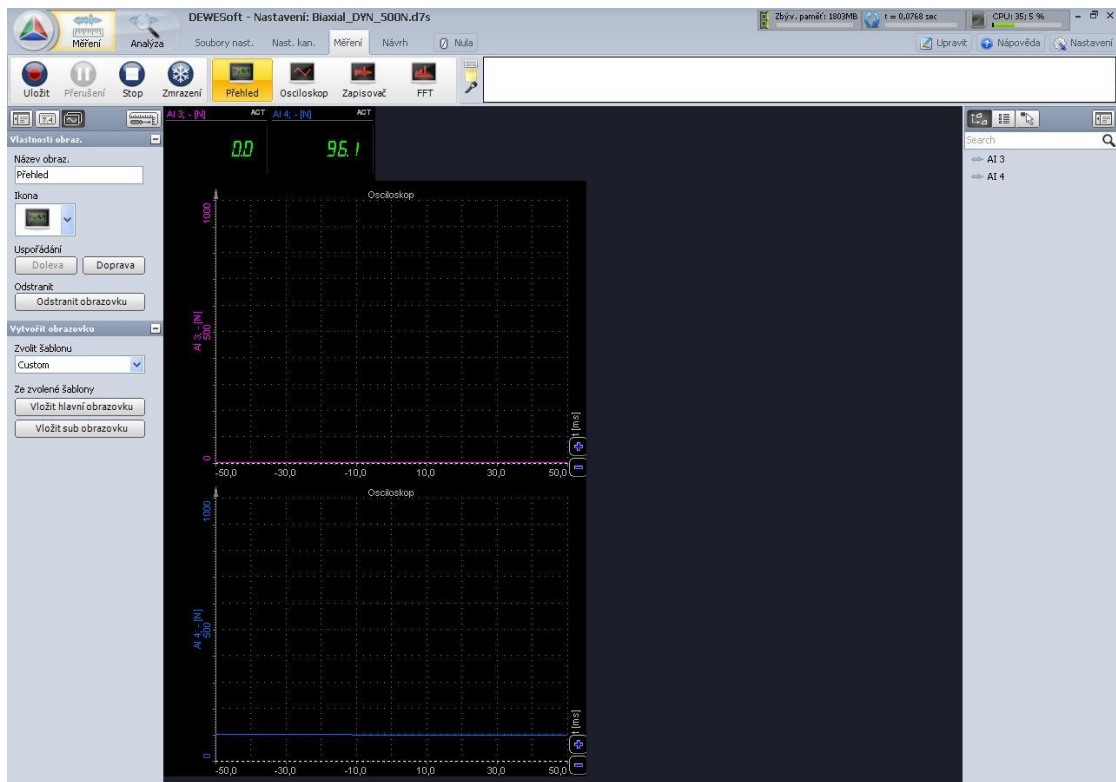
5.2. Biaxiální zatěžovací rám

Zařízení je složeno z několika dílů. Obsahuje dva krokové bezkartáčové motory Maxon EC-max 30 o výkonech 60W. Dále pak řídicí jednotku EPOS 24/5 a dvě planetové převodovky 111:1 GP32 HD. Předepsaný pojezd čelistí je zajištěn dvěma závitovými tyčemi se stoupáním závitu 2 mm na otáčku. Jedná se o lineární šroubový pohon.

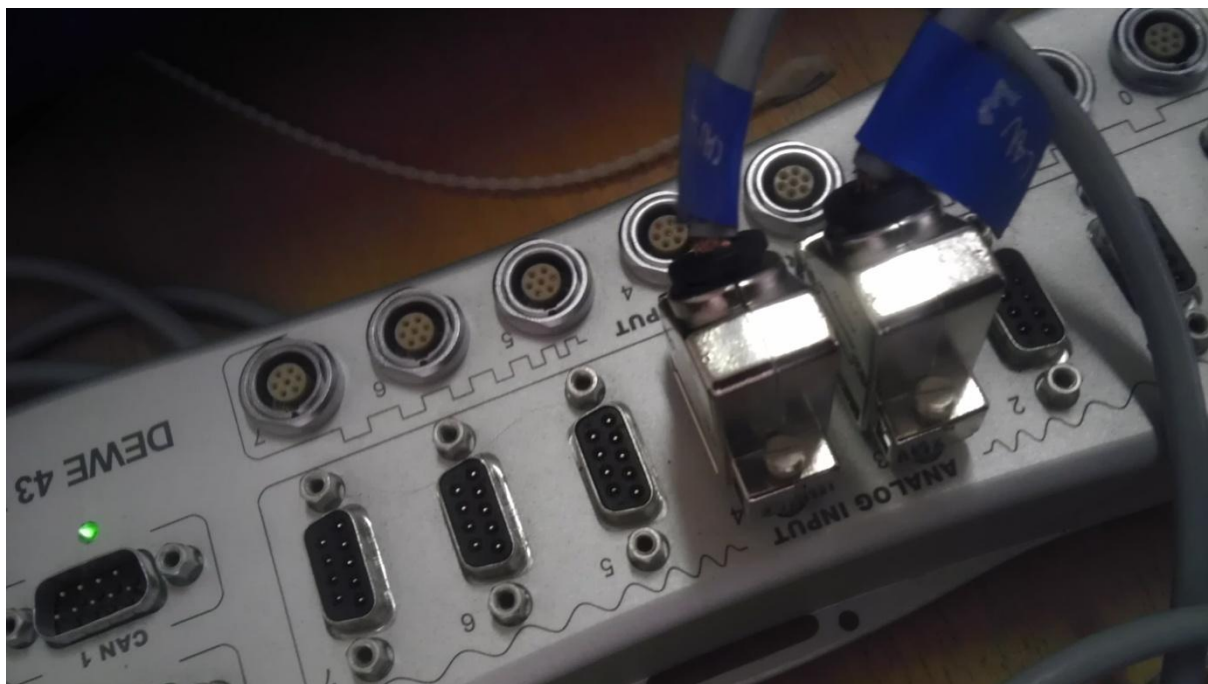
Řídicí jednotka motorů je připojena přes USB port k PC. Ovládání motorů pak probíhá nepřímo skrze software Tester vláken, zadáváním pozic čelistí a rychlosti posuvů těchto čelistí v mm/min (obr. 6-7). Měření osových sil je realizováno dvěma tah-tlak snímači síly. Snímače jsou umístěny mezi jezdcem a čelistí (obr. 5-1). Informace o působících silách je do PC předána dvou kanálovým analogovým signálem (obr. 5-2), přes A/D převodník DEWE 43 připojený k PC přes USB port (obr. 5-3). Maximální rozpětí čelistí rámu je 20cm.



Obrázek 5-1 čelist biaxiálního rámu se siloměrem a kolíkem, na obrázku jsou dále vidět koncové spínače, pohybový šroub a dvě vodící tyče



Obrázek 5-2 měřicí prostředí Dewesoft, kanál A3 nezatížen, kanál A4 zatížen silou 96.1N, obrázek dále ukazuje umístění kalibračního tlačítka Nula, nad pásem karet.



Obrázek 5-3 měřicí karta Dewetron DEWE 43 a připojené výstupy siloměrů z biaxiálního rámu jako kanál 3 a 4 do prostředí Dewesoft

5.3. Dantec Dynamics Q-400 systém

Systém se skládá z SONY CCD kamery, převodníku Dantec Dynamics a vyhodnocovacího softwaru Istra 4D.

Digitální korelační systém Q 400 - Dantec Dynamics je používán hlavně pro stanovení složek posuvů a deformací rovinné i prostorové úlohy. Dovoluje provést měření materiálu jako je kov, pryž, kompozity, dřevo a dalších. Tento systém může být použit pro stanovení Youngova Modulu a Poissonova čísla. Využití také nachází ve fraktálové mechanice. Metoda je vhodná nejen pro statické, ale i dynamické měření. Bezkontaktnost přináší výhodu neovlivněných naměřených parametrů samotným měřicím procesem. Vzájemná izolace procesu experimentu a měření může být zcela stěžejní pro validitu celého experimentu. Například při vyšetření oscilace je zcela nepřipustný přenos vibrací ze zkoumaného objektu na velice citlivý optický systém měřicího zařízení. Největší výhodou této optické bezkontaktní metody je schopnost prostorové analýzy posuvů a deformací. Systém Q-400 je používán pro určení materiálových vlastností v tahu, krutu, ohybu nebo při kombinovaném namáhání. Vyhodnocovaná oblast může být od několika mm² až po m². Další velkou výhodou Q-400 je možnost exportování zaznamenané geometrie a její další aplikace a verifikace použitím metody konečných prvků tzv. FEM. [8], [9]

Princip DIC je založen na generování náhodného vzoru obrazců na pozorovaný povrch vzorku, který je snímán CCD kamerou. Vyšetřovaná část vzorku je automaticky rozdělena softwarem za použití virtuálního rozdělení povrchu na tzv. elementární oblasti. Každá z těchto elementárních oblastí má svůj charakteristický náhodný vzor

(random pattern) s požadovaným kontrastem pozadí a stochastickým vzorem obrazců generovaným na snímaném povrchu.

V případě rovinného objektu stačí zaznamenat povrch zkoumaného vzorku za použití pouze jedné kamery. Kamera je pak k tomuto povrchu nasměrována kolmo. V případě prostorového objektu je 3D vidění umožněno stereoskopickým umístěním dvou kamer. Je důležité, aby zkoumaný povrch obsahoval dostatečně rozsáhlou a jemnou strukturu, dovolující algoritmům korelovat identické body z obou kamer. Pozice jednotlivých bodů jsou vztaženy k jednotlivým pixelům obrazové roviny konkrétní kamery. [8]

Virtuální 2D nebo 3D obrys zkoumaného povrchu je stanoven ze souřadnic identifikovaných měřicím systémem v daném prostoru. Celý proces je rozdělen na určitý počet kroků, snímků, tzv. steps. Vlivem působení zatížení vzorku a jeho následné deformaci se pozice pozorovaných bodů, stejně jako obrys vzorku, mění. Následně jsou tyto digitální snímky v korelačním procesu porovnány s vybraným referenčním bodem, snímkem. Proces DIC rozhodne, zda se jednalo o posuv, rotaci nebo zkroucení elementárních prvků sítě. Výsledkem procesu DIC je zobrazení průběhů posuvů, deformací a napětí v jednotlivých krocích vzhledem k časové ose. Tento typ korelace je schopen určit maximální posuv s přesností do 1/100 pixelu [8], [9]. Proces DIC a tedy i následné vyhodnocení, provádí po ukončení měření automatizovaně software Istra 4D.

Technické specifikace systému Q-400	
typ kamer	JAI-A1 CCD camera with 1392x1040 pixels
čočky kamer	Schneider-Kreuznach, focal lengths 1.4/17 and 1.4/14 mm
Měřené posuvy	0-46mm s přesností na 1 μ m
Spektrální citlivost kamer	525nm
Měřená oblast	14x14cm ²
Pracovní vzdálenost	proměnná
Operační mód	2D-DIC nebo 3D-DIC, v závislosti na měřeném parametru a počtu použitých kamer
Datový soubor typu	HDF5
Frekvence zaznamenávání dat	proměnná, závisí na přenosové rychlosti a snímkovací schopnosti kamery
Analýza dat	Automatické vyhodnocení série snímků nebo manuální jakékoliv dvojice snímků
Nasvícení měřené oblasti	optimalizováno pro jasné a homogenní podmínky
Ovládací a vyhodnocovací jednotka	Dell notebook pro ovládání a měření, Asus notebook pro vyhodnocení
Kalibrace	automatická, kalibrační destička Al 6x6mm ²

5.4. Svítidlo

V rámci práce bylo dle dokumentace Dantec Dynamics Q-400 navrženo svítidlo. Při návrhu byl kladen důraz hlavně na homogenost osvětlované plochy a zabránění vzniku odlesků, které při měření dávají za vznik tzv. slepých míst. Z tohoto důvodu byly jako světelný zdroj vybrány nevýkonové LED diody o relativně vysoké svítivosti a s velkým úhlem vyzařování, s vlnovou délkou $\lambda = 525nm$ zvolenou s ohledem na spektrální citlivost kamer systému Q-400, odpovídající zelené barvě.

Pro snadnou montáž a jednoduchost zapojení byly zvoleny LED diody zpracované ve formě pásků, kde jeden modul o délce 5cm obsahuje 5 diod. Kvůli zachování životnosti diod z pohledu provozních tepelných ztrát, byly přilepeny na tenký plech o rozměrech 180x400x1mm a byla vybrána otevřená, nezalitá konstrukce modulů. Svítidlo obsahuje 50 diod, celková plocha světelného zdroje je přibližně 220 cm². Osvětlovaná plocha je velikosti přibližně 15x15cm a má být rovnoměrně osvětlena. Svítidlo by mělo být umístěno na stojanu kamery tak, aby se shodoval úhel dopadu paprsků a úhel natočení kamery.

Parametry LED diod a rozměry modulu	
Napájecí napětí	12V
Vyzařovací úhel (jedné diody)	120°
Svítivost (jedné diody)	4000 - 5000 mcd
Vlnová délka	520 - 525nm
Spotřeba	12.2W . 15.2 W/m
Délka jednoho modulu	50mm
Šířka modulu	10mm
Počet diod na modul	5.00
Teplotní rozsah	od -25°C do 85°C

6. Experimentální část

Cílem experimentu je stanovení metodiky měření pro určení mechanických vlastností vzorků pryže, krycí vrstvy dopravníkového pásu z dolů Bílina a dolů Nástup Tušimice. Vzorek byl upraven do tvaru kříže a tenkého pásu, viz. kap. 6.4. Klíčové bylo zvolit metodiku vhodnou pro zkoumání velkých deformací měřeného vzorku při dvouosém a jednoosém zatěžování tahem. Pro provedení experimentu byla použita zařízení uvedená v kapitole 5. Daná úloha byla zjednodušena na pozorování rovinné deformace jednou kamerou. To přineslo řadu výhod, jako například menší náročnost měřicího procesu na okolní podmínky, daleko rychlejší vyhodnocení a simulace problému. Experiment probíhal při pokojové teplotě 22°C.

Popis metodiky začíná kalibrací všech zařízení. Pokračuje uvedením doporučeného postupu pro korektní nastavení některých klíčových parametrů a končí ukázkou vhodného způsobu vyhodnocení naměřených dat. Dále jsou uvedeny některé klíčové, snadno opomenutelné zásady.

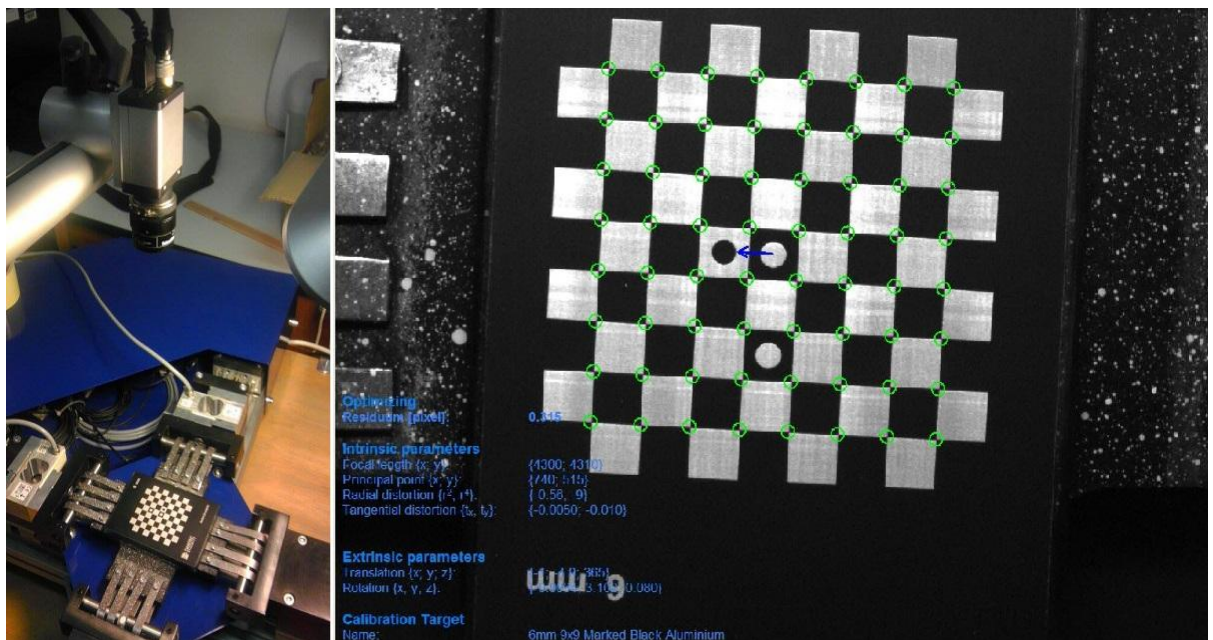
6.1. Kalibrace Q-400

Před samotným měřením je nutné kamery a celý systém kalibrovat, aby byl systém schopen identifikace velikosti objektu vzhledem ke vzdálenosti objektivu od povrchu vzorku. Správné kalibrace je dosaženo za pomoci kalibračních destiček. V laboratoři KMP jsou k dispozici jsou dvě kalibrační destičky o rozměrech 6x6mm a 8x8mm (Obrázek 6-1). Přiřazením souřadnic průsečíků se známou vzájemnou vzdáleností jsou získány geometrické vlastnosti a relativní pozice kamery, což jsou nezbytné informace pro korektní měření touto metodou. Kalibrace tak poskytne možnost identifikace souřadnic každého bodu na povrchu snímané oblasti měřeného vzorku.

Q 400 se kalibruje automatizovaným procesem v Istra (Obrázek 6-2). Díky tomuto procesu je kalibrace systému snadnou a rychlou záležitostí. Výstupem kalibrace je kalibrační soubor, který je nutné pro úspěšnou evaluaci měření uložit. Kritériem správnosti kalibrace je vyhodnocená hodnota residua, která musí být mezi 0.3-0.5. Zde platí pravidlo, čím menší, tím lepší [9]. Uložený kalibrační soubor je nutné načíst před procesem vyhodnocení.



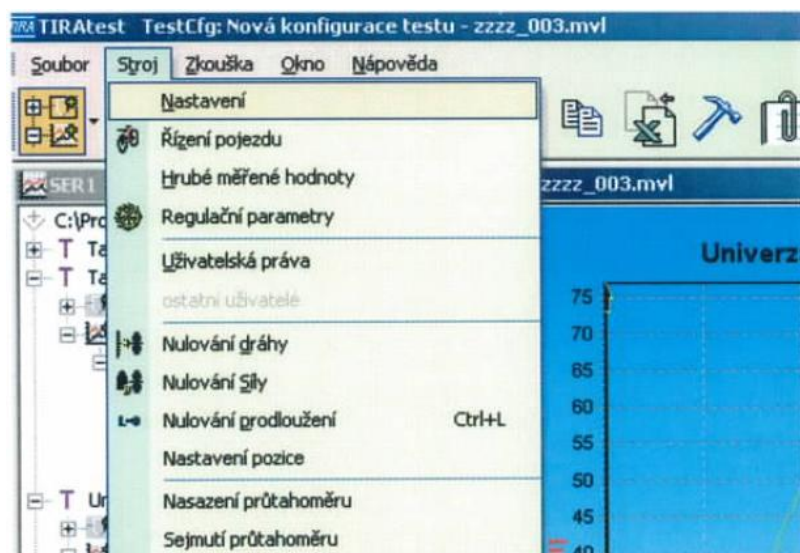
Obrázek 6-1 kalibrační destičky, typ Al 6,8mm.



Obrázek 6-2 Q-400 - kalibrační proces

6.2. Kalibrace Tira

Tira se kalibruje v programu TIRAtest nulováním dráhy a síly po upnutí měřeného vzorku, viz. obr. níže.

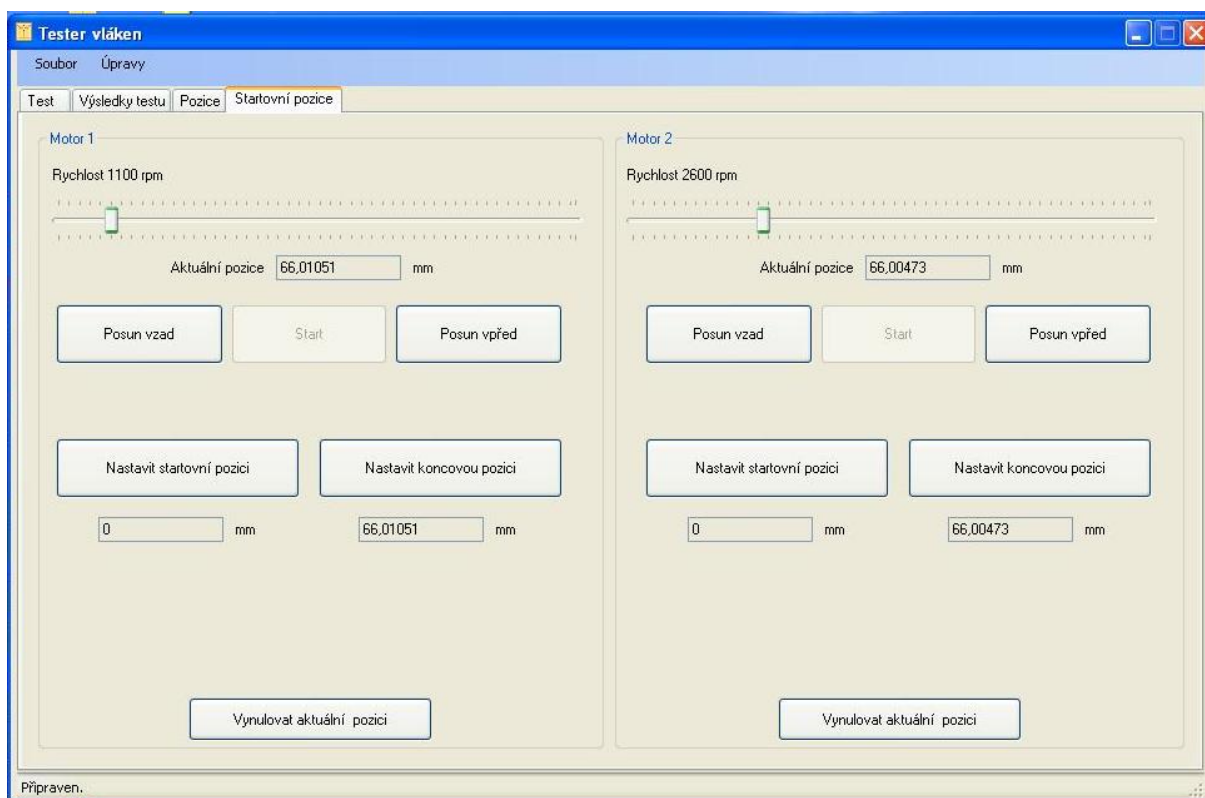


Obrázek 6-3 kalibrace TIRAtest

6.3. Kalibrace Dewesoft, biaxiální rám

Záznam sil v Dewesoftu se kalibruje pouze přepsáním aktuální hodnoty analog. signálu z silových senzorů na hodnotu nulovou. Sensory čelisti jsou nezatížené (obr. 5-1).

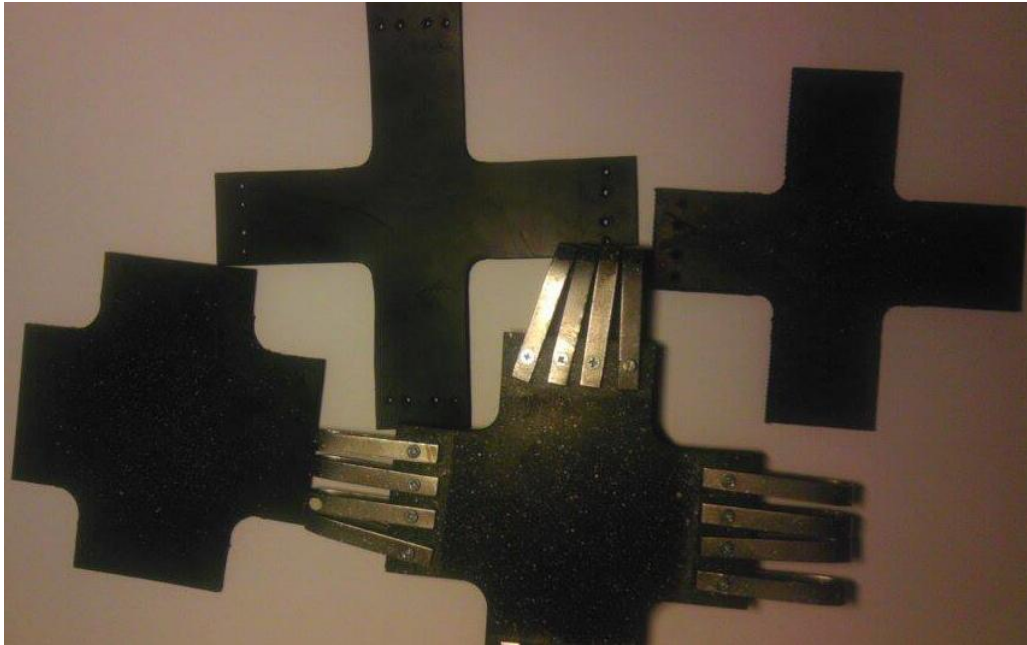
Před samotným měřením, tj. před nastavením zatížení posuvem, je nutné přiřadit relativní nulovou pozici poloze čelistí, kdy je vzorek upnut ale stále nezatížen, nebo zatížen na předem stanovenou hodnotu předpětí, tuto pozici označíme jako výchozí. Samotné určení výchozí polohy však nestačí, je nutné odečíst maximální rozdíl mezi výchozí polohou a koncovou. Koncová poloha je poloha těsně předtím, než je měření z bezpečnostních důvodů zastaveno dotykem koncového spínače, nebo je ještě kratší, v závislosti na požadovaném posuvu. Tato hodnota maximálního rozdílu je tedy hodnotou maximálního možného zatížení posuvem. Její zvětšení lze provést pouze zmenšením měřeného vzorku.



Obrázek 6-4 kalibrace biaxiálního rámu.

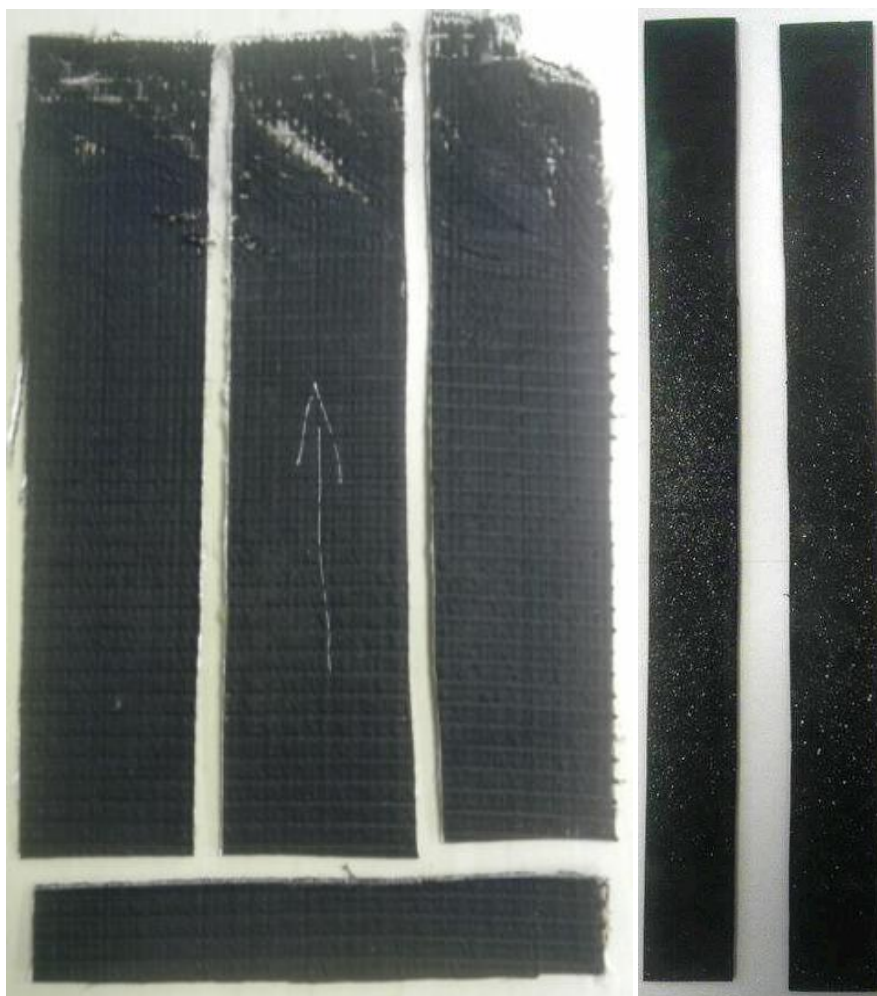
6.4. Vzorky

Typy vzorků měřitelných na těchto zařízeních touto metodikou jsou limitované typem upínání do čelistí a možností nanesení dostatečně kontrastní vrstvy a dalšími podmínkami validního měření systémem Q-400.



Obrázek 6-5 vzorky krycí vrstvy určené pro dvou-osou zatěžovací zkoušku

Kontrastní vrstva použitá v tomto experimentu je nanášena autolakem bílé barvy. Upnutí vzorku do čelistí biaxiálního rámu je provedeno postupným nasunutím háčků (obr. 6-5), které jsou zajištěny šrouby ke vzorku, na kolíky čelistí (obr. 5-1). Tloušťka a tedy i tuhost vzorků je limitována výkonem motorů. Měřený vzorek určený pro biaxiální zatěžování má tvar kříže s rozměry 140x140mm, šířkou zatěžované větve 60mm a tloušťkou 7mm. Geometrie všech měřených vzorků je detailně zaznamenána v kap. 10, kde byl vymodelován CAD model v prostředí Comsol Multiphysics.



Obrázek 6-6 vzorky pryže s výztužnou tkaninou, určené pro jednoosou zatěžovací zkoušku, tři příčné a jeden podélný (směr tkaniny) a vzorky pryže vyříznuté z krycí vrstvy pásového dopravníku

Délky kompozitních vzorků určené pro jednoosé zatěžování jsou 165mm a 88mm, šířky jsou 50mm a 27mm, tloušťka je 2 mm. Rozměry vzorků z krycí vrstvy jsou šířka 28mm, délka 300mm a tloušťka 3 mm. Kontrastní vrstva náhodného vzoru bodů se na vzorky nejlépe nanáší pomocí jemného kartáčku, kde se na štětiny nanese vrstva autolaku a pomalým pohybem prstu po štětinách kartáčku se pak autolak nanese na vzorek.

6.5. Zásady a chyby měření

Během provádění experimentu je klíčové (1) udržení stejné intenzity osvětlení měřené plochy vzorku a doporučené vlnové délky po celou dobu měření, (2) zamezit pohybu kamery, s čímž souvisí izolace stojanu od vibrací z biaxiálního rámu, (4) hodnota residua vyhodnocená po kalibraci Q 400 musí být ve stanovených mezích, (5) vizuální kontrola průběhu měření, zejména pohybu čelistí, kvůli možnému předčasnému ukončení pohybu jedné ze dvou čelistí dotykem koncového spínače, (6) vizuální kontrola průběhu měření v Istra 4D z důvodu možného předčasného ukončení ukládání

snímků, způsobené malým nastavením velikosti post-trigger bufferu, (7) při velkých deformacích/posuvech je doporučena vizuální kontrola průhybu vzorku při návratu do výchozí polohy během cyklického zatěžování, s tímto souvisí nastavení určitého předpětí před samotným měřením, (8) před evaluací výsledků z Istra 4D je doporučena rychlá manuální kontrola všech zaznamenaných snímků kvůli případnému vyškrtnutí nevhodných, a tím urychlení vyhodnocovacího procesu.

6.6. Metodika a experiment na zařízení dvouosého rámu

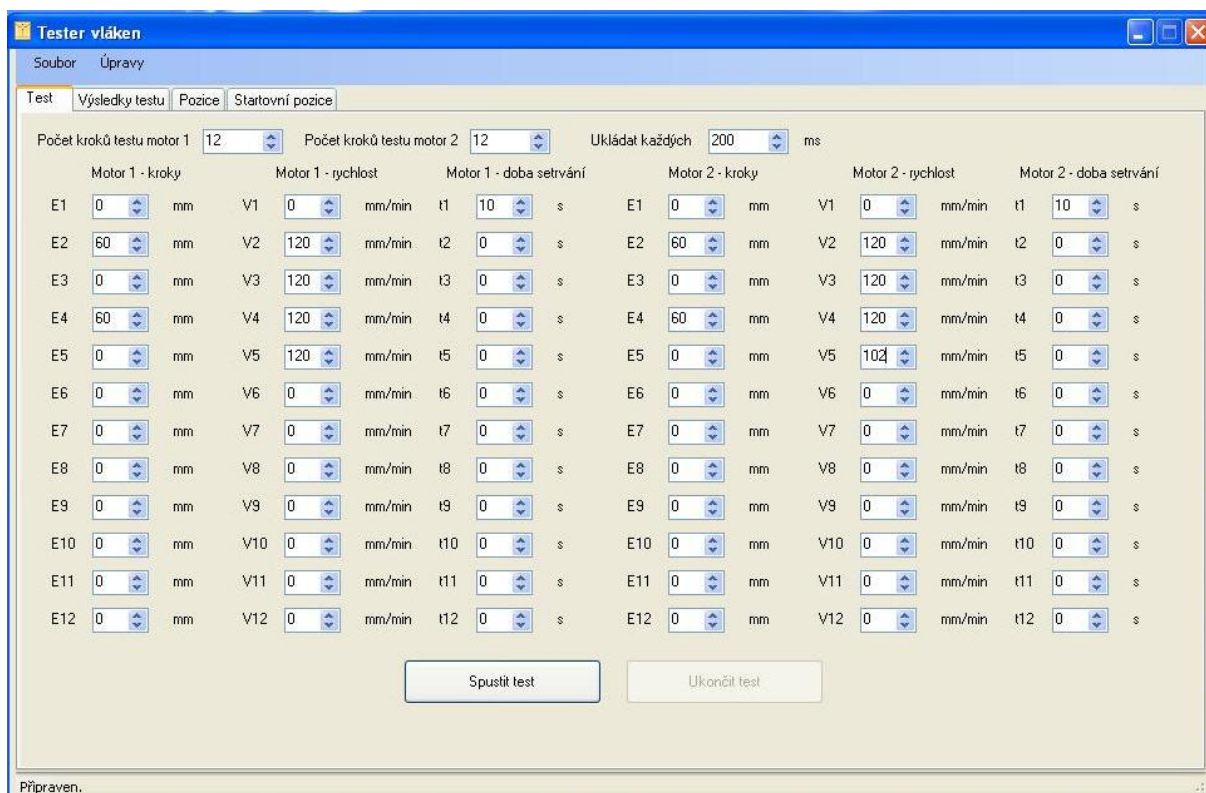
Dle geometrických parametrů měřeného vzorku (obr. 6-5) bylo provedeno seřízení biaxiálního rámu. Měřený vzorek má tvar kříže s rozměry 140x140x50mm a tloušťkou 7mm. Dále bylo provedeno seřízení systému Q-400 dle kapitoly 6.

Určujícím parametrem, nutným jako výstup seřízení biaxiálního rámu je rozsah o jaký může být měřený vzorek zatěžován. Bylo zjištěno maximální možné protažení vzorku o 60 mm na jednu čelist, tzn. o 120mm na osu. Dále byla stanovena rychlost posuvu na 120 mm/min. Nastavení kroků motoru bylo provedeno dle obr. 6-7. Rychlost posuvu určuje celkovou dobu trvání experimentu, z toho důvodu je frekvence záznamu kamery nepřímou dána i rychlostí posuvu čelistí. Frekvence kamery byla stanovena na 1 snímek za vteřinu. Frekvence záznamu kamery je dále omezena rychlostí přenosu kamery, tedy dobou uložení jednoho snímku a velikostí bufferu.

U stanovení frekvencí záznamu dat je obecně důležité také hledisko velikosti souboru dat. Při vysoké vzorkovací frekvenci, kdy již nedochází ke zvýšení přesnosti měření, prodlužuje neúměrná velikost dat proces vyhodnocení měření. Velikost souboru naměřených dat v ISTRÁ lze regulovat počtem uložených snímků tzv. velikostí bufferu. Vzorkovací frekvence v softwaru Dewesoft lze nastavit přímo přepsáním tohoto parametru v Hz, defaultně je v Dewesoftu přednastavena hodnota 5000 Hz, minimální nastavitelná hodnota je pak 100 Hz.

Hlavním účelem sestavení metodiky tohoto experimentu byla synchronizace měřených veličin. Kvůli mechanickým vlastnostem pryže, konkrétně kvůli zpoždění deformace za silou, bylo nutné přidat do počátku procesu měření nezávislou veličinu a to sice čas. Klíčové vlastnosti metodiky jsou správnost, jednoduchost a opakovatelnost. Synchronizace byla proto rozdělena na tři kroky, vzájemně oddělené dobou deseti vteřin.

Prvním krokem je spuštění měření sil v programu Dewesoft. Druhým krokem je odeslání impulsu do řídicí jednotky motorů kliknutím na tlačítko spustit test (obr. 6-7.), a to přesně po uplynutí doby deseti vteřin od spuštění měření sil.



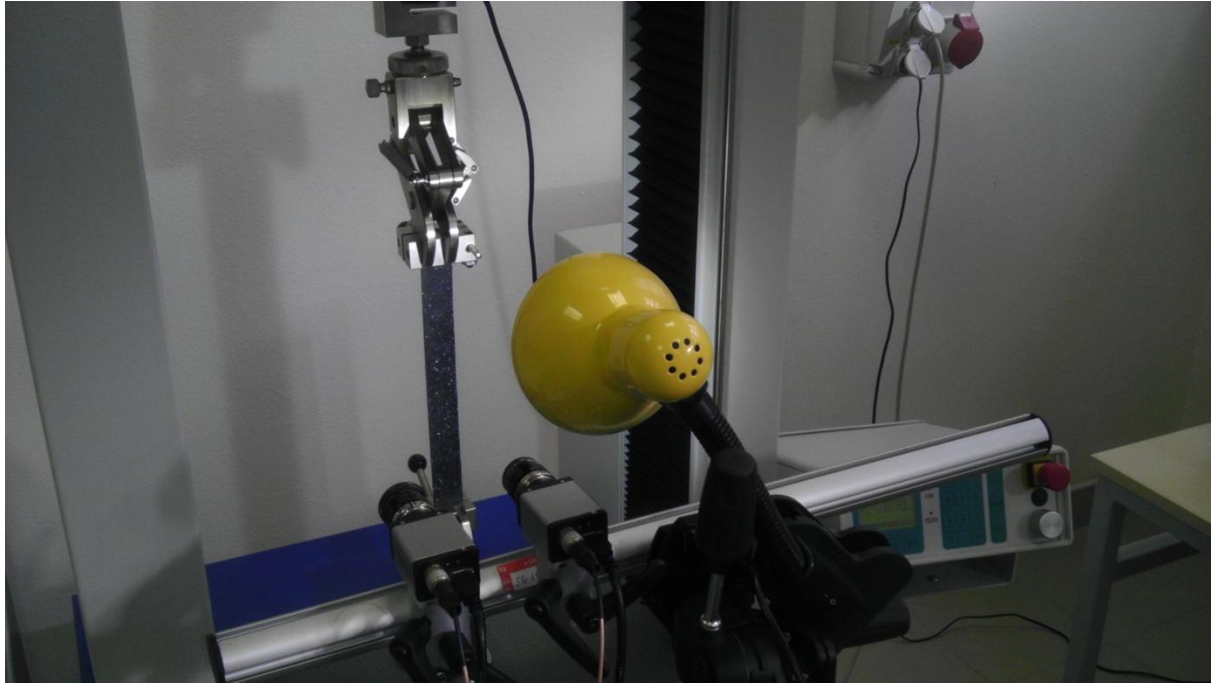
Obrázek 6-7 zatěžování vzorku

Krok motoru E1 je nezbytný prostoje k synchronizaci počátku měření. Během tohoto prostoje je manuálně zapnut trigger mód v ISTRa a po námi daným časovým intervalem nutným pro stihnutí interakce uživatele se zařízeními, trvajícím přesně deset vteřin od kliknutí na Spustit test, je manuálně spuštěn trigger v ISTRa, což je třetím krokem synchronizace.

V okamžiku odeslání trigger impulsu pro Q 400 je současně automaticky zahájen krok E2, tedy spuštění motorů, čímž je zahájeno měření. Touto metodou je ve vyhodnocovací části možné synchronizovat diagram síly a deformace v prostředí Matlab.

6.7. Metodika a experiment na zařízení Tira

K upnutí vzorku byly použity samosvorné čelisti. Vzorek byl upnut tak, aby plocha ošetřená reflexním vzorem pro měření korelací směřovala směrem k objektivu kamery. Vzorek byl upnut bez předpětí. Synchronizace opět probíhala přes časový parametr, kde se v prvním kroku programu TIRAtest nastaví vyčkávání na počáteční pozici. Metodika měření je totožná s metodikou pro biaxiální rám. Polohu horní čelisti a sílu snímá TIRAtest, posuv měříme za pomoci korelace systémem Q-400.



Obrázek 6-8 měření jednoosé napjatosti na zařízení Tira

7. Istra 4D - data a postprocessing

Tato kapitola obsahuje stručný popis grafických nástrojů a funkcí Istra 4D použitých pro vizualizaci a export dat v kapitole o vyhodnocení experimentu a popis zobrazených datových typů.

Data jsou pro vizualizaci v ISTRÁ rozdělena do tří kategorií (1) OBJECT CONTOUR - reprezentující data týkající se obrysu aktuálního kroku, (2) DISPLACEMENT - reprezentující data posuvů mezi aktuálním a referenčním krokem, (3) STRAINS - reprezentující data deformace mezi aktuálním a vybraným referenčním krokem.

Tyto datové typy dále obsahují další podskupiny dat, jako například celkové posuvy nebo posuvy pouze v jednom směru (x,y,z). Podskupina deformace umožňuje zobrazit přetvoření podle několika definic: Lagrangeovská (Lgr.), inženýrská (Eng.) a logaritmická (True). Každá podskupina obsahuje také zobrazení odhadovaných odchylek nebo nejistot pro jednotlivé souřadnice bodů. Istra obsahuje systém jednotek pro zobrazená data. Jednotky pro pozice, posuv i deformace lze libovolně měnit v nastavení. [9]

Pro další vizualizaci a práci s naměřenými daty je možné využít rozšířeného nástroje pro analýzu vyhodnocených dat tzv. Gauge. Tento nástroj poskytuje možnost aplikace bodů, úseček nebo i oblastí na povrch měřeného objektu. To umožňuje velmi efektivně zmenšit množství naměřených dat a zobrazit tak naměřené hodnoty pouze

oblastí takto vyznačených. Následuje popis souboru funkcí nástroje Gauge použitých v kapitole o experimentu.

7.1. Polygon

Polygon je oblast na povrchu měřeného objektu. Je definovaná uzavřeným obrazcem složeným z úseček, které jsou hraniční (obr. 8-3). Pro vymezení požadované oblasti k vyhodnocení je také možné použít funkci Circle.

7.2. Spatial Plot

Zobrazí hodnoty vybrané informace podél zadané úsečky aktuální fotografie. Tato informace může být vykreslena v grafu na spodním panelu.

7.3. Temporal Plot

Zobrazí hodnoty vybrané informace přes všechny fotografie aktuálního procesu vyhodnocení. Tato informace může být vykreslena v grafu na spodním panelu.

7.4. Smoothing

Smoothing je nástroj vyhlazení, definuje metodu a míru vyhlazení naměřených dat. Data jsou vyhlazena online, jakmile je aktivováno zobrazení nových dat. Nastavení pro vyhlazení obrysu a posuvu jsou nezávislá. Filtr lokální regrese je založen na adaptivním polynomickém spline algoritmu (adaptive spline polynomial algorithm - ACSP). Síla vyhlazení se nastavuje přepsáním parametru kernel size. Filtr je optimalizován pro lokalizovaný efekt, jelikož jsou použity pouze sousední body. Vyhlažovací Spline filtr používá k interpretaci všech dat funkce spline. Parametrem Grid Reduction je možné definovat hustotu sítě bodů. Vyšší hodnota redukčního parametru znamená méně bodů sítě a hladší průběhy naměřených dat. Parametr Smoother Factor omezuje globální křivost funkce spline. Vyšší Smoother Factor znamená vyšší stupeň vyhlazení, tento parametr vyhlazuje data globálně. Oba typy filtrů mohou být použity pro obrys i posuv.

8. Vyhodnocení experimentů

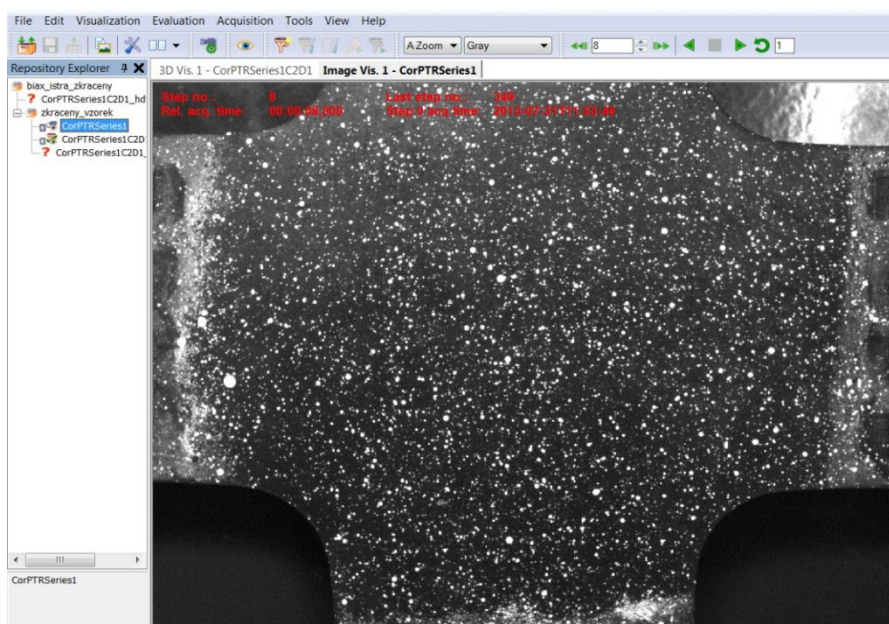
Tato kapitola začíná popisem způsobů vyhodnocení a zobrazení naměřených dat, dále následují dvě podkapitoly věnované konkrétnímu experimentu.

Naměřená data v ISTRÁ je možné vyhodnotit přímo v jejím prostředí. Istra nabízí široké spektrum nástrojů pro vyhodnocení. Např. vyhodnocení pouze určité oblasti definované polygonem, který jednoduše zadá uživatel umístěním volitelného počtu bodů do zkoumané oblasti. Istra dále nabízí různé interpretace zkoumaných veličin např. zobrazení průběhu hlavních deformací v logaritmických souřadnicích, true strains, engineering strains, vyhodnocení oblasti definované úsečkou, zobrazení středních hodnot, 2D graf oblasti středních hodnot - tzv. spatial plot, viz. obrázky níže.

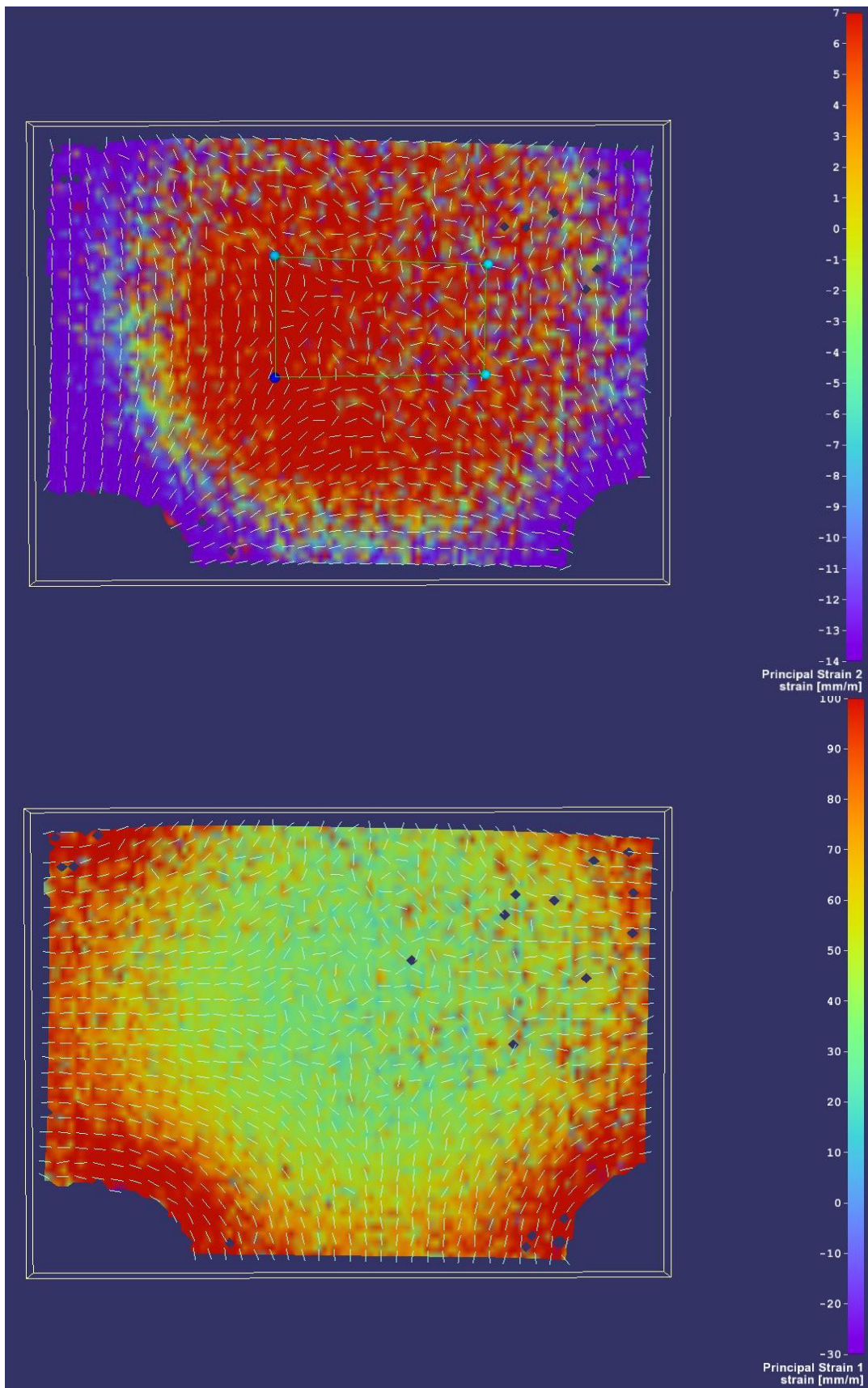
Pro specifičtější práci s daty byl proveden export naměřených dat Istra do prostředí Matlab. Istra nabízí tři typy přímo exportovaných souborů: STL, HDF5, ASCII. Matlab je schopen zpracovat všechny tyto tři typy, závisí tak pouze na osobní preferenci. V tomto experimentu byl proveden export do typu souboru HDF5. Takto exportovaná data již nelze zpět importovat do prostředí Istra, pro ověření správnosti dat před importem do Matlabu je možné také použít například program HDF5viewer, který jsem během vyhodnocování výsledků shledal velice užitečným, zejména pro velice rychlé zobrazení uložených dat v souborech typu HDF5. Istra také nabízí možnost zkopírování dat temporal nebo spatial plotu do clipboardu, tyto lze pak pro další práci za pomoci funkce rychlého vkládání (ctrl+v) vložit například do dokumentu Microsoft Office Excel (obrázek 8-6,7) nebo opět do prostředí Matlab pro další operace postprocessingu.

Dewesoft nabízí prohlížení zaznamenaných průběhů sil. A dále pak export přímo do několika typů souborů, mezi nimiž je i typ .mat, tedy přímo jazyk Matlab.

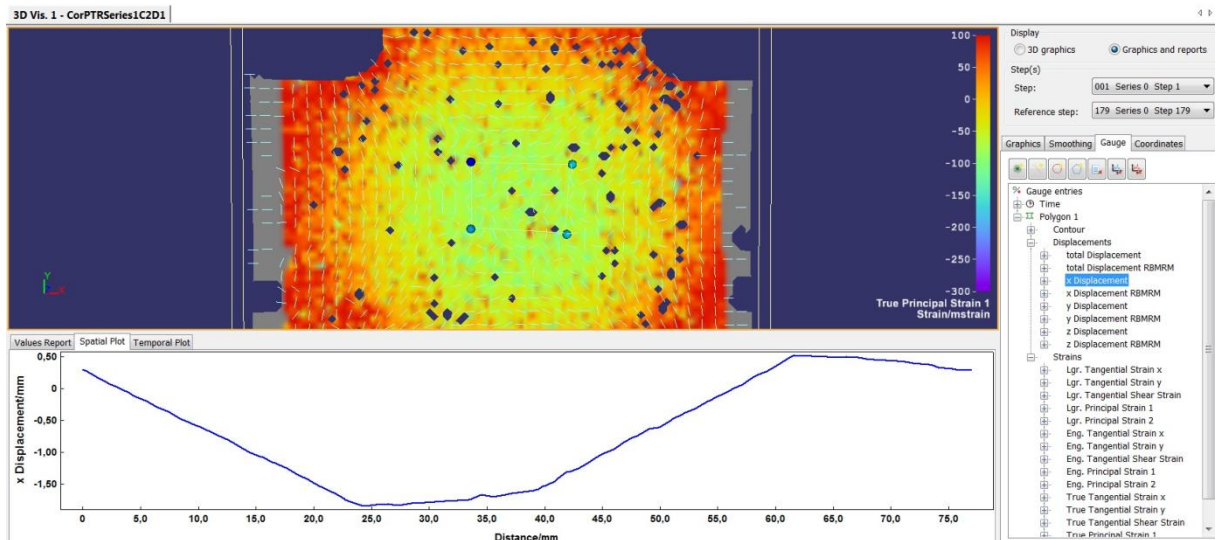
Tester vláken exportuje záznam pohybu čelistí pouze do formátu .csv, který je nutné za použití MS Excel převést na typ .xls a až poté jej vhodně exportovat do Matlabu.



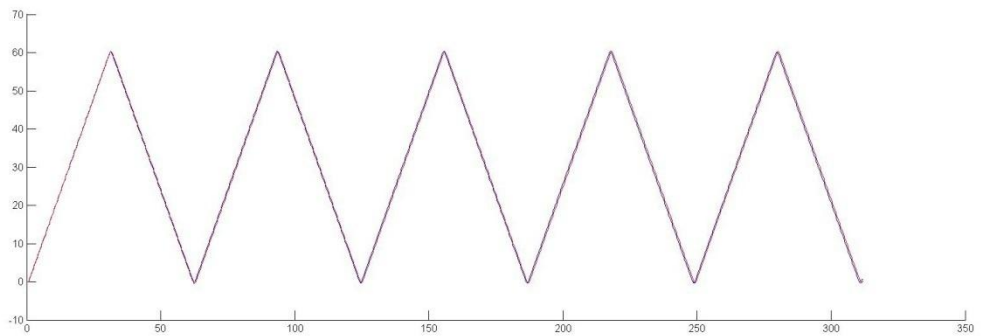
Obrázek 8-1 měřený vzorek



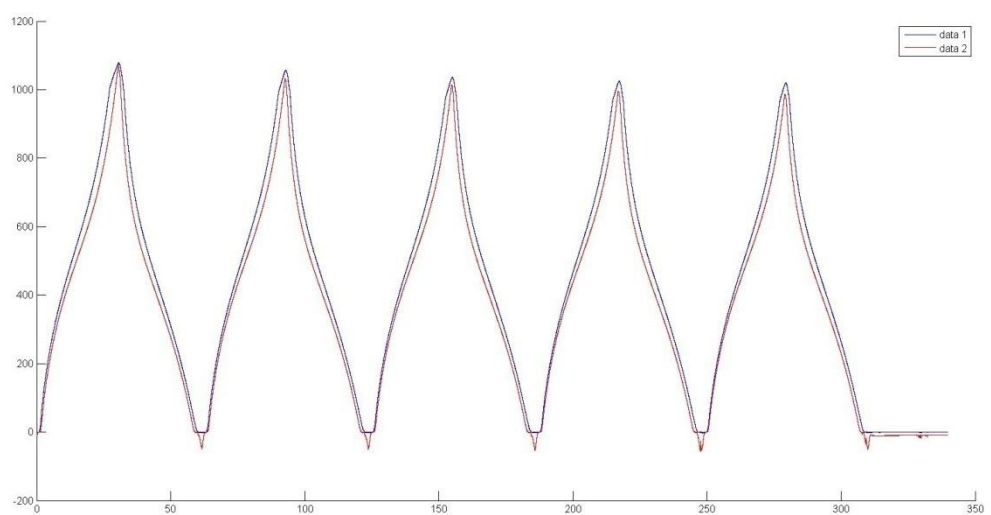
Obrázek 8-2 vyhodnocení první a druhé hlavní deformace při maximálním dosaženém protažení- Istra 4D



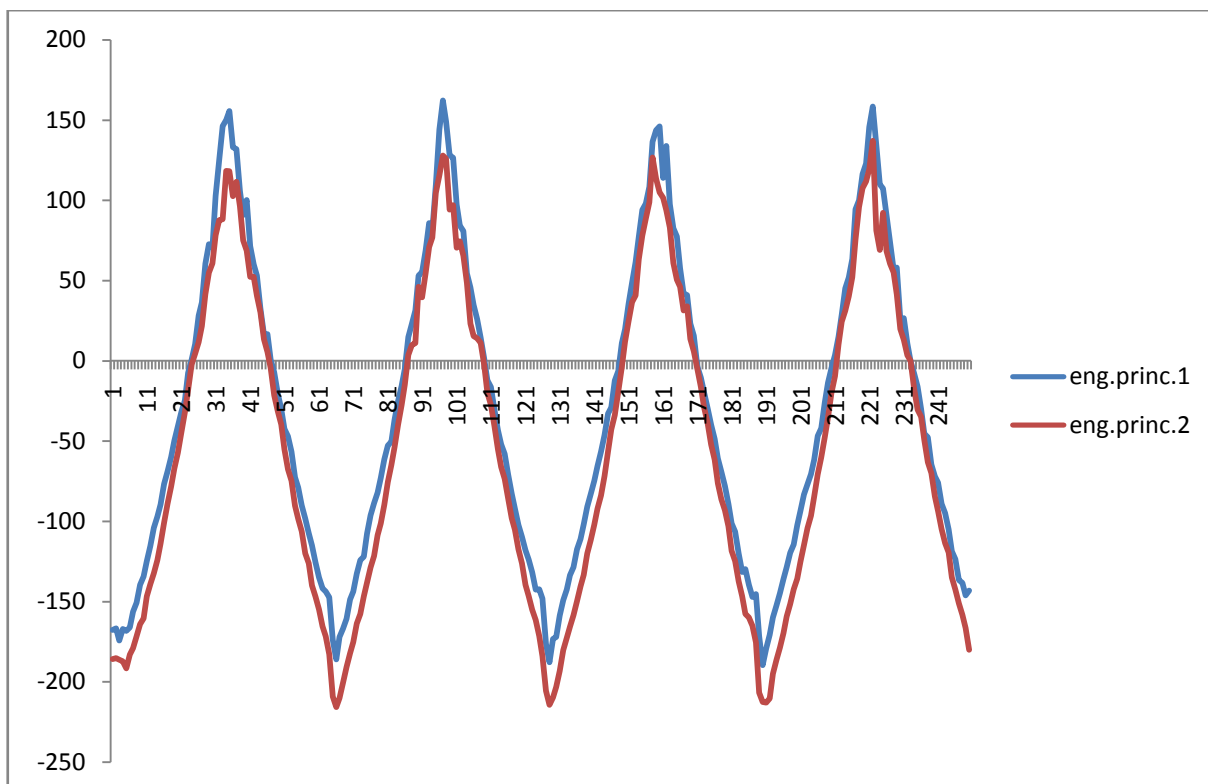
Obrázek 8-3 Spatial plot posuvu v ose X, oblasti definované polygonem uprostřed vzorku - Istra 4D



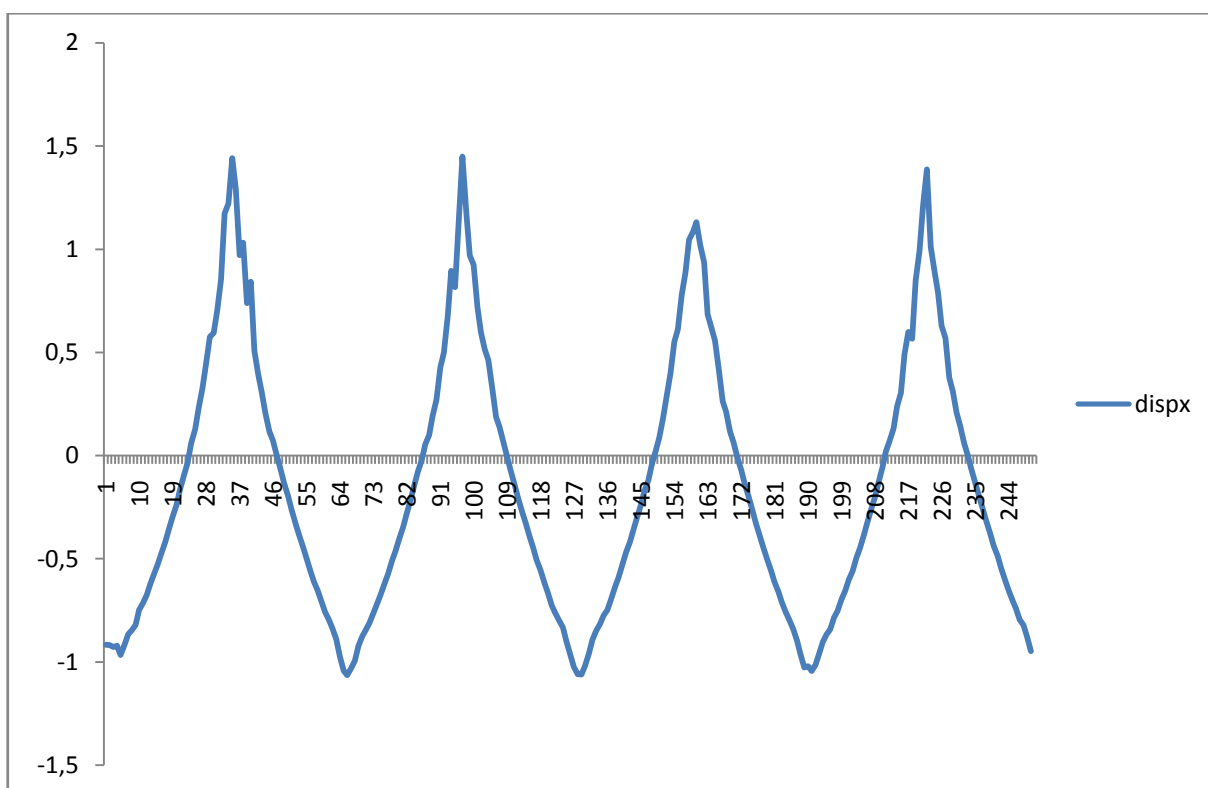
Obrázek 8-4 záznam průběhu posuvů čelistí - Matlab, osa x čas[s], osa y posuv[mm]



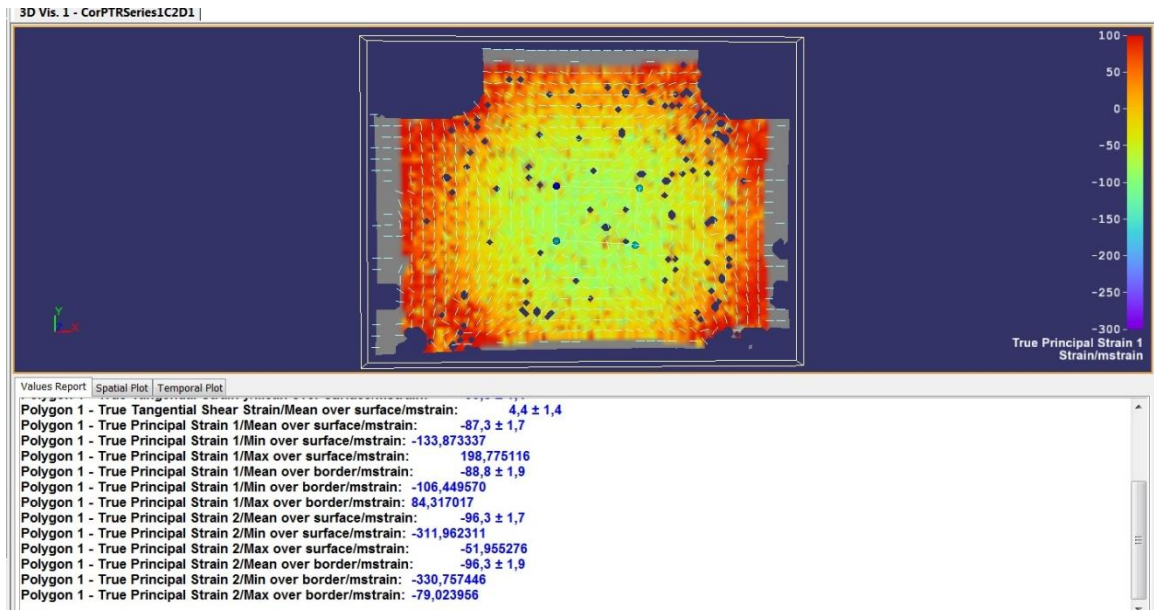
Obrázek 8-5 záznam průběhu sil - Matlab, osa x čas[s], osa y síla[N]



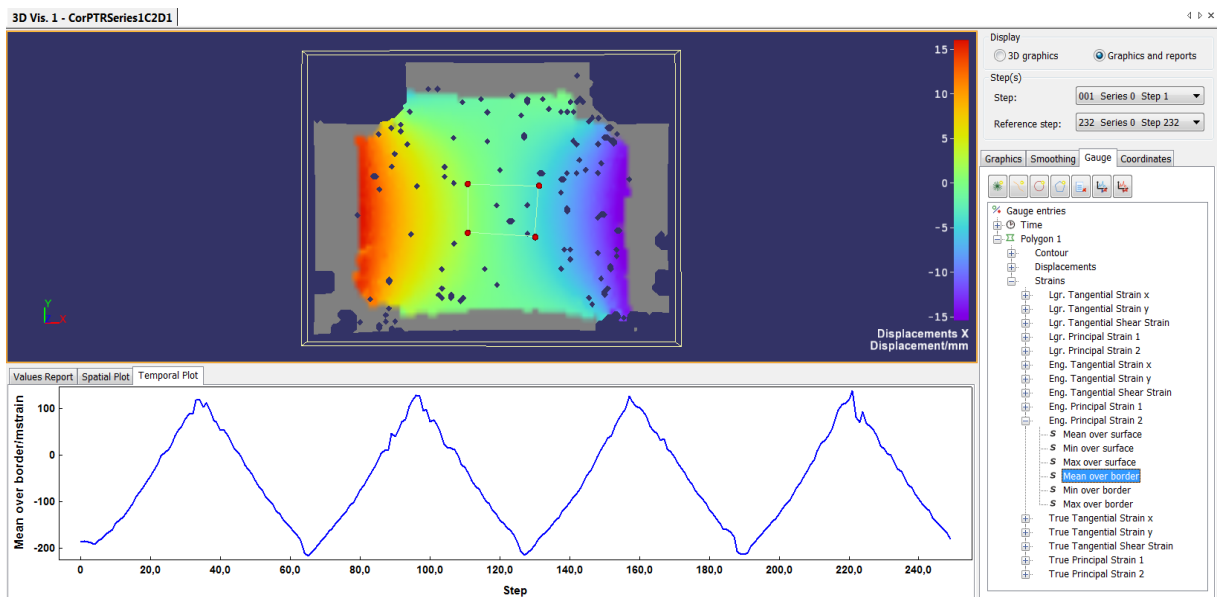
Obrázek 8-6 průběhy hlavních deformací, v oblasti definované polygonem - Excel, osa x čas[s], osa y deformace[mstrain]



Obrázek 8-7 průběh posuvů v oblasti definované polygonem, směr X tedy směr první hlavní deformace - Excel, osa x čas[s], osa y posuv[mm]



Obrázek 8-8 konkrétní naměřené hodnoty v oblasti definované čtyřbodovým polygonem

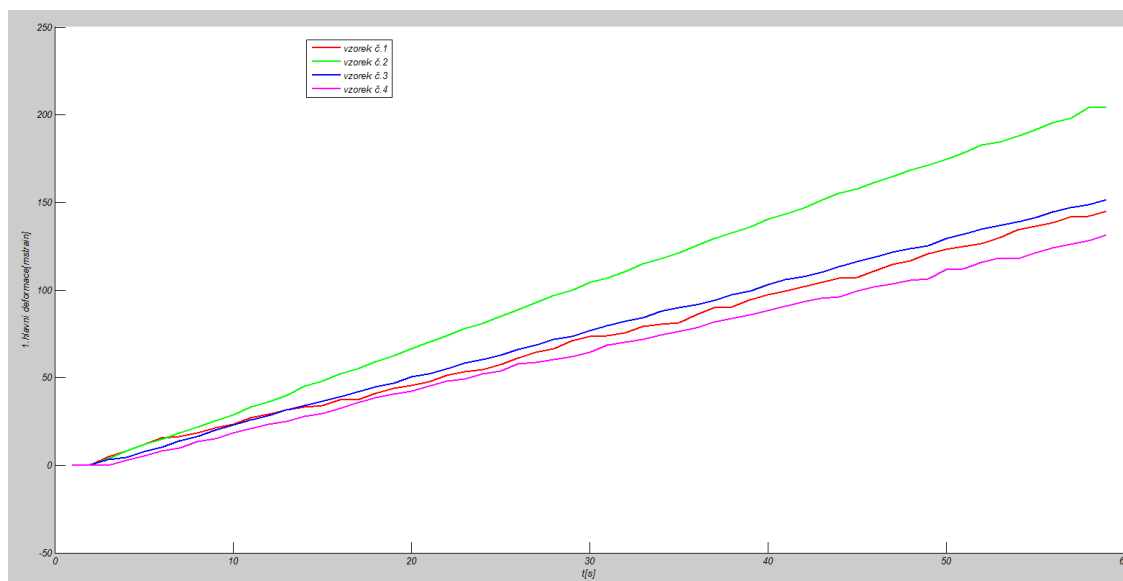


Obrázek 8-9 Temporal plot druhé hlavní inženýrské deformace (obr.8-6 vyhodnocení v Excelu)

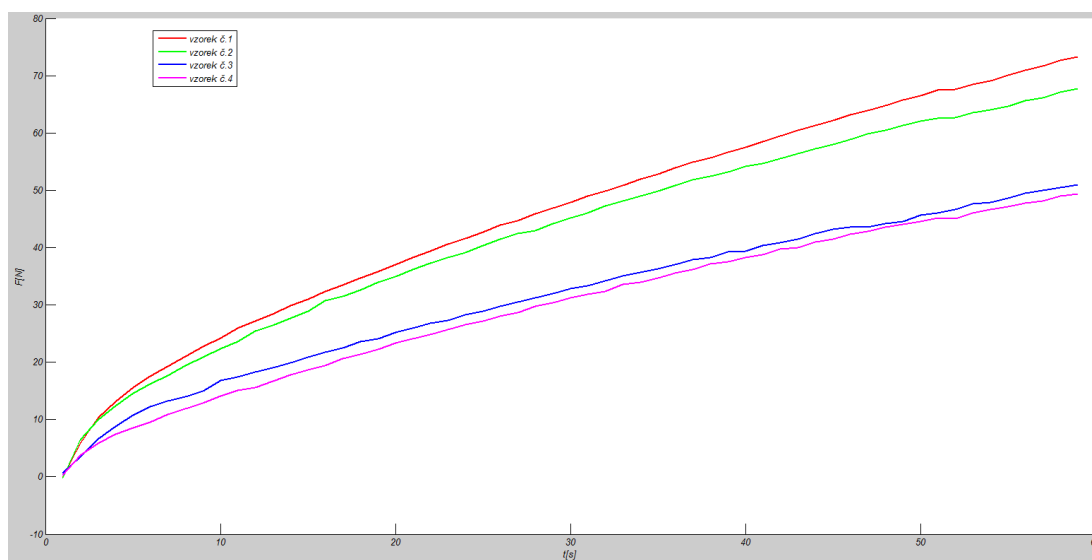
8.1. Měření na zařízení Tira

Dále bylo provedeno i několik experimentů na zařízení Tira, kde byly vzorky (viz. kap. 6.4) o stejných rozměrech vyříznuty z krycí vrstvy dopravníkového pásu, podrobeny jednoosému zatížení tahem.

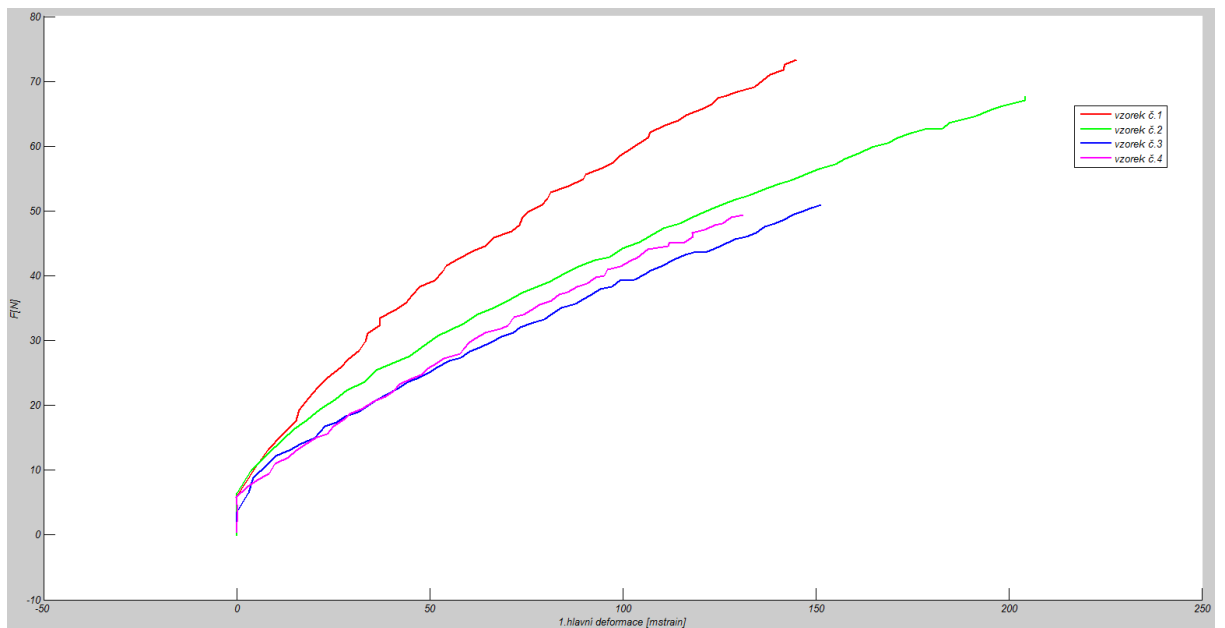
Při těchto experimentech byl s výhodou použit systém Q-400. Použití korelačního systému měření posuvu je totožné s měřením na biaxiálním rámu. Zatěžující síla byla měřena zařízením Tira.



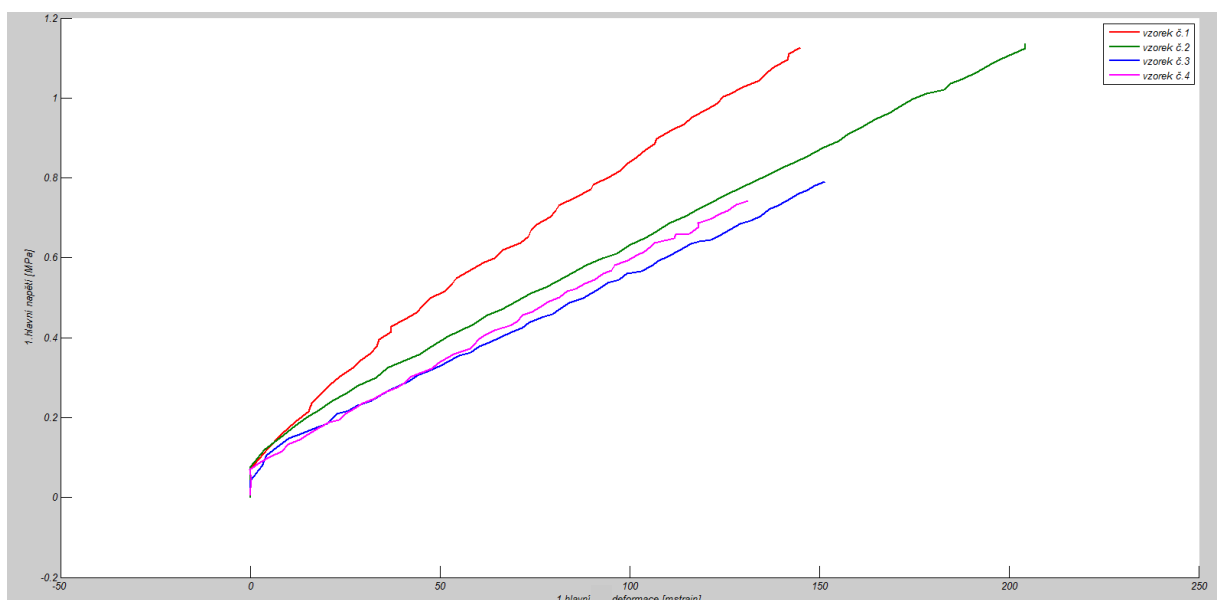
Obrázek 8-10 diagram 1. hlavní deformace [mstrain] - čas [s]



Obrázek 8-11 diagram síla [N] - čas [s]



Obrázek 8-12 diagram síla[N] - deformace[mstrain]

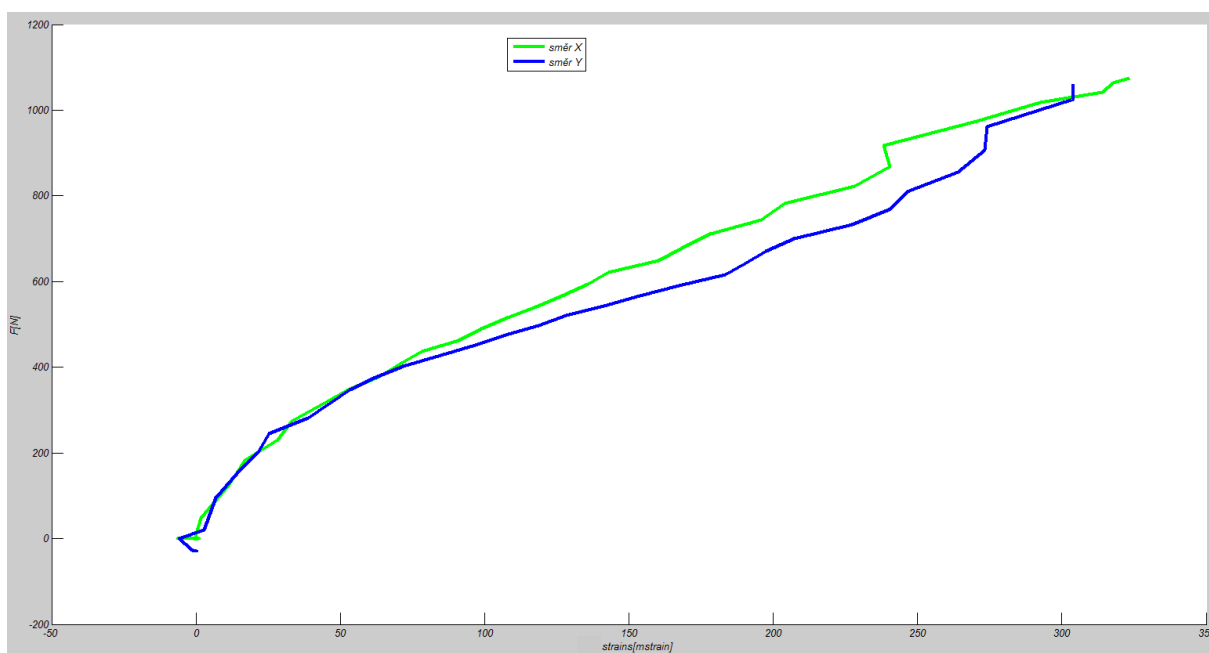


Obrázek 8-13 diagram napětí[MPa] - deformace[mstrain]

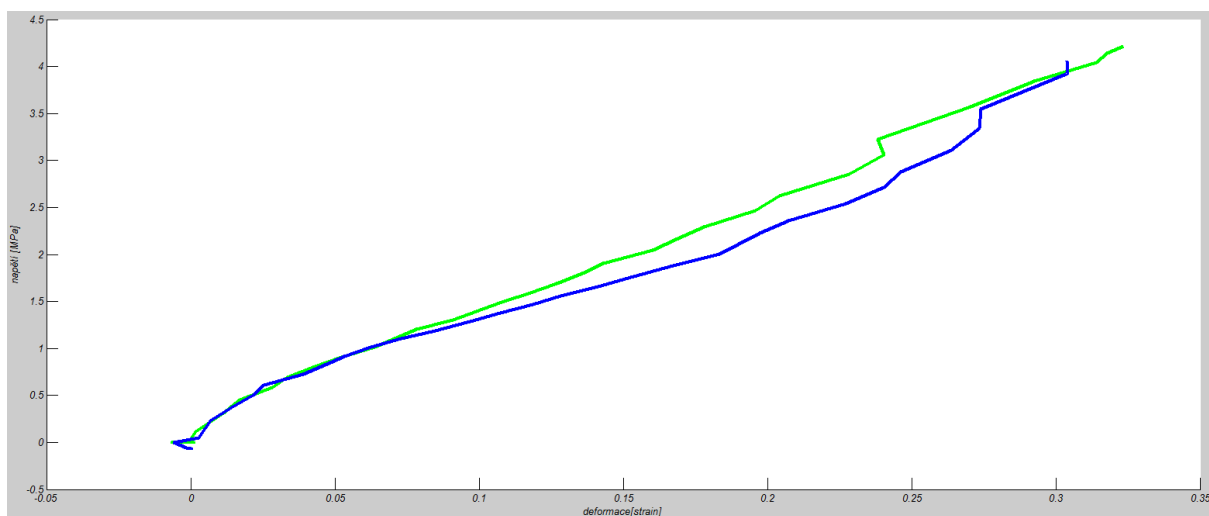
8.2. Měření na biaxiálním rámu

Měření bylo provedeno dle postupů a doporučení uvedených v předchozích kapitolách. Měřený vzorek byl ve tvaru kříže (Obrázek 6-5), rozměry jsou uvedeny v kapitole o vzorcích. Bylo provedeno ekvibiaxiální cyklické zatěžování tahem typ a průběh měření je dobře znázorněn v obr. 8-2 až 8-9.

Pro určení materiálových parametrů je nutné znát závislost napětí - deformace zatěžovací křivky (obrázek 8-15).



Obrázek 8-14 diagram závislosti síly[N] na deformaci[mstrain] pro oba hlavní směry



Obrázek 8-15 diagram závislosti napětí[MPa] na deformaci[mstrain] pro oba hlavní směry

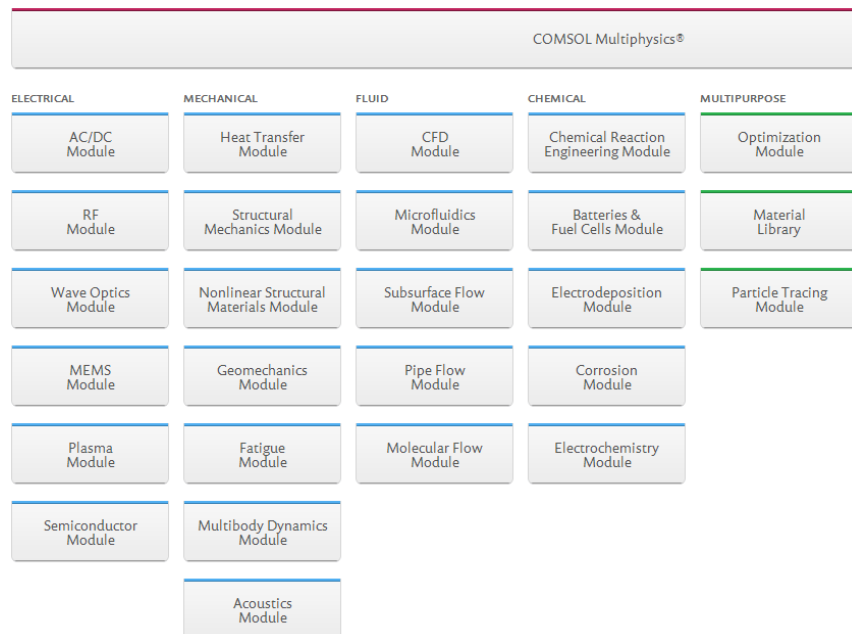
Z naměřených dat byly určeny křivky (Obrázky 8-13,15) nutné ke stanovení parametrů Mooney - Rivlinova materiálového modelu (viz. kapitola 9.4. a 10.1).

9. Materiálový model

Návrh konstrukce obsahující pryžový materiál je zejména pro jeho nestálé mechanické vlastnosti obtížný úkol. Je nutné znát základní vztahy, závislosti a mít k dispozici vhodné numerické metody. Pokrok v této problematice je připisován rozmachu výpočetní techniky, tak bylo možné aplikovat numerické metody na okrajové úlohy mechaniky kontinua. Vývoj této metody začal v 50. - 60. letech 20. století, jedná se o tzv. metodu konečných prvků. První software určený k řešení úloh v oblasti strojního inženýrství, pracující na principu MKP, NASTRAN byl vyvinut v NASA v sedmdesátých letech 20.st. Dnes je MKP stále na vzestupu, v této práci byl použit výpočtový software Comsol.

Matematické modelování praktických úloh se většinou rozděluje podle zkoumané veličiny nebo zkoumaného jevu. U pryže se mezi základní jevy řadí tyto: viskoelastičita, porušení materiálu, Mullinsův efekt, nelineární elasticita, plastické deformace, únavové namáhání, teplotní závislost, elektrická vodivost, atd. Některé z těchto obvyklých jevů, týkajících se pryže jsou popsány v kapitole 2.

V prostředí Comsol je toto rozdělení řešeno přiřazením odpovídajícího fyzikálního modulu (obr. 9-1). Rozdělení jevů neznamená ztrátu možnosti zkoumání jejich vzájemné závislosti, moduly se sice do řešiče vkládají a nastavují individuálně, avšak tam jejich vzájemná izolace končí.



Obrázek 9-1 fyzikální moduly [<http://www.comsol.com/products>]

Kvůli velice odlišným vlastnostem pryže od ocelových materiálů vyžaduje MKP analýza speciální materiálový model a nelineární řešič analýzy MKP. [10]

Pro nelineární analýzu obsahuje Comsol předdefinované materiálové modely určené přímo pro modelování elastomerů. Pro přístup k těmto modelům je třeba zakoupit Nelineární strukturální materiálový modul.

Analýza MKP elastomerů závisí hlavně na nastavení několika důležitých bodů.

(1) Nelineární chování materiálu - stlačitelný nebo nestlačitelný model, vliv teploty, přítomnost anizotropie, hystereze vlivem cyklického namáhání.

Pryž vykazuje vysoce nelineární vztah mezi napětím a deformací a je nestlačitelná, její objem se nijak výrazně s napětím nemění. Vliv teploty není předmětem této práce. Vzorek považujeme za isotropní.

(2) Určení parametrů materiálu z experimentu, velikost deformací. Pravděpodobně jeden z nejobtížnějších kroků pro většinu inženýrů zabývajících se analýzou elastomerů spočívá v tzv. proložení naměřených dat a odvozením parametrů nezbytných pro charakteristiku materiálu.

Vzorek pryže byl podroben velkým deformacím. Bude proto nutné zvolit odpovídající hyperelastický materiálový model.

(3) Automatický Remeshing - úprava sítě modelu, pro efektivnější řešení problémů, zahrnuje například zkroucenou síť, která může vést k předčasnému ukončení analýzy. [10]

Vzhledem k 2D modelu a čistému biaxiálnímu namáhání není nutné provádět nijak výrazný zásah do sítě modelu. Je však nutné zkontrolovat vliv konvergence řešení vzhledem k hustotě sítě.

9.1. Nelineární strukturální materiálový modul

Nelineární Strukturální Materiálový modul prodlužuje Strukturální Mechanický Modul. Umožňuje provádění studií, které zahrnují strukturální mechaniku s nelineárním materiálem. Je navrhnut pro simulaci nelineárních materiálů za použití širokého spektra různě kombinovatelných fyzikálních jevů.

Modul poskytuje rozsáhlý soubor strukturálních nelineárních materiálových modelů, zahrnující následující materiály: uživatelem definované a předdefinované hyperelastické materiály jako například Neo-Hookean, Mooney-Rivlin, Saint-Venant Kirchhoff, Ogden a další. Modely pro velké nebo malé plastické deformace. Nebo uživatelem definované a předdefinované viskoplastické, creep modely: Norton, Garofalo, Anand, potential, volumetric, deviatoric, atd.

Hyperelastický materiál je definován hustotou deformační energie W_s , která je funkcí elastické deformace. Často je nazývána pouze jako hustota energie. Formulace hyperelastivity obvykle poskytuje nelineární závislost mezi deformací a napětím, na rozdíl od Hookeova zákona lineární pružnosti. [11] [10]

Většinou je k popsání současného stavu deformace použit pravý Cauchy-Greenův tenzor deformace \mathbf{C} (někdo může použít levý Cauchy-Greenův tenzor deformace \mathbf{B} , nebo deformační gradient tenzoru \mathbf{F} , a tak dále), hustota deformační energie je pak popsána jako $\mathbf{W}_s(\mathbf{C})$. Derivací této funkce podle deformace získáme napětí. Funkce hustoty deformační energie je většinou popisována pomocí invariant tenzoru deformace, které jsou definovány třemi protaženími, označenými jako λ_i . [11] [10] Například pro jednoosé protažení platí vztah.

$$\lambda = \frac{L}{L_0} \quad (9.1.1)$$

Invarianty tenzoru deformace vypadají takto:

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (9.1.2)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (9.1.3)$$

$$I_3 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \quad (9.1.4)$$

Jestliže je materiál úplně, dokonale nestlačitelný, pak platí $I_3 = 1$. Pro specifikaci různých výrazů deformační energie jsou sestaveny různé hyperelastické materiálové modely. Tento modul má několik předdefinovaných materiálových modelů a má taky možnost vložit vlastní, uživatelem definovaný výraz pro hustotu deformační energie. Podrobný popis vybraných modelů v softwaru Comsol jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

9.2. Neo-Hookean

Nejjednodušší materiálový model popisující hyperelastický materiál je Neo-Hookeovský model. Hustota deformační energie pro stlačitelnou verzi Neo-Hookeovského materiálu je popsána objemovým poměrem a prvním invariantem pravého Cauchy-Greenova tenzoru deformace $I_1(\mathbf{C}_{e1})$. [11]

$$W_s = \frac{1}{2} \mu (I_1 - 3) - \mu \ln(J_{e1}) + \frac{1}{2} \lambda [\ln(J_{e1})]^2 \quad (9.2.1)$$

Téměř nestlačitelná verze používá izochorický invariant $I_1(\overline{\mathbf{C}}_{e1})$ a počáteční objemový modul κ . [11]

$$W_s = \frac{1}{2} \mu (\overline{I}_1 - 3) + \frac{1}{2} \kappa (J_{e1})^2 \quad (9.2.2)$$

Neo-Hookeovský model má dobré výsledky do 40% deformace v tahu a do 90% deformace při čistém smyku. Pro vyšší hodnoty deformací je nutné použít jiné modely. [12]

9.3. Ogden

Neo-Hookeovský materiálový model obvykle odpovídá velice dobře experimentálním datům naměřením v oblasti středně velkých deformací. Pro modelování pryžových materiálů v oblasti velkých deformací Ogden upravil výraz deformační energie Neo-Hookeovského materiálu na:

$$W_s = \sum_{p=1}^N \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\lambda_{el1}^{\alpha_p} + \lambda_{el2}^{\alpha_p} + \lambda_{el3}^{\alpha_p} - 3) \quad (9.3.1)$$

Zde α_p a μ_p představují parametry popisující materiál a $\lambda_{el1}, \lambda_{el2}, \lambda_{el3}$ představují hlavní protažení. Objemový poměr je definován jako:

$$J_{el1} = \lambda_{el1} \lambda_{el2} \lambda_{el3}. \quad (9.3.2)$$

Parametr α_p rozhoduje o změkčení nebo zpevnění materiálu při deformaci. Pro $\alpha_p > 2$ se bude materiál během rostoucí deformace změkčovat. V opačném případě bude docházet při rostoucí deformaci ke zpevnění. [12] [11]

Ogdenův model nevztahuje parametry materiálu α_p, μ_p k fyzikálnímu jevu. Parametry α_p a μ_p jsou získány nafilováním křivky naměřených dat, což může být pro $N > 2$ velmi obtížné. Nejběžnější implementace Ogdenova materiálu je pro $N=2$, takže jsou zapotřebí pouze čtyři parametry. Téměř nestlačitelná verze používá izochorické protažení definované jako:

$$\bar{\lambda}_{eli} = \frac{\lambda_{eli}}{J_{el}^{1/3}}, \text{ takže } \bar{\lambda}_{el1} \bar{\lambda}_{el2} \bar{\lambda}_{el3} = 1 \quad (9.3.3)$$

a počáteční objemový modul κ [11].

$$W_s = \sum_{p=1}^N \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\bar{\lambda}_{el1}^{\alpha_p} + \bar{\lambda}_{el2}^{\alpha_p} + \bar{\lambda}_{el3}^{\alpha_p} - 3) + \frac{1}{2} \kappa (J_{e1} - 1)^2 \quad (9.3.3)$$

Ogdenův materiálový model je tedy model hyperelastického materiálu, vhodný k popisu nelineárního chování deformace a napětí komplexního materiálu jako pryže, polymerů a biologické tkáňe. Ogdenův model, jako jiné hyperelastické materiálové modely, předpokládá, že chování materiálu může být popsáno funkcí hustoty deformační energie, z které může být odvozena závislost napětí na deformaci. Tyto materiály jsou obecně považovány za isotropní a nestlačitelné. [13] Ogdenův materiálový model vykazuje velmi dobrou shodu s experimentálně naměřenými daty v oblasti velkých deformací. Model se tak stal celkem populární a byl úspěšně aplikován například na analýzu O-kroužků. Aplikovatelnost tohoto modelu je vhodná až do 700% deformace. [12]

9.4. Mooney-Rivlin

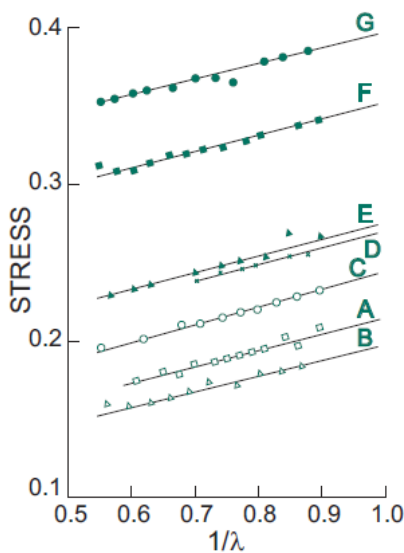
Mooney-Rivlinův materiálový model je rozšířením Neo-Hookeovského materiálového modelu. Mooney-Rivlinův materiálový model má několik verzí, podle počtu použitých parametrů. Přesnější proložení naměřených dat tak může být závislé na počtu těchto parametrů, prakticky se začíná na dvou parametrech a tento počet se nadále zvyšuje dokud nedojde k požadované shodě popsání naměřených dat materiálovým modelem. [10] [12]

V Comsolu je k dispozici pouze téměř nestlačitelná verze tohoto materiálového modelu. Je možné použít Mooney-Rivlin materiálový model se dvěma, pěti nebo devíti parametry. V této práci je použit materiálový model se dvěma parametry, tato verze má vepsanou hustotu elastické deformační energie W_s ve tvaru dvou isochorických invariant pravého elastického Cauchy-Greenova deformačního tensoru $I_1(\overline{C}_{el})$, $I_2(\overline{C}_{el})$ a elastického objemového poměru J_{el1} . [11]

$$W_s = C_{10}(\overline{I}_1 - 3) + C_{01}(\overline{I}_2 - 3) + \frac{1}{2}\kappa(J_{e1} - 1)^2 \quad (9.4.1)$$

Materiálové parametry C_{10} a C_{01} jsou vztaženy k Lamého parametru a lze je získat proložením naměřené závislosti napětí - deformace. [11]

$$\mu = 2(C_{10} + C_{01}) \quad (9.4.2)$$



Obrázek 9-2 rozptyl hodnot konstant C_{10} a C_{01} Mooney-Rivlinova materiálového modelu pro pryž při jednoosém zatěžování tahem, dle stupně vulkanizace pryže [10]

Tento model vykazuje dobré výsledky do 100% deformace v případě tahového zatížení a 30% deformace v případě tlakového zatížení. Využitím modelů s vyšším stupněm polynomu vede k lepším výsledkům. [12]

Rovnici (9.4.1) lze podle [14] psát také jako:

$$\Psi = C_1(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + C_2(\lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2} - 3) \quad (9.4.3)$$

kde (9.4.4 až 9.4.6.):

$$\lambda_1^2 = 2E_{11} + 1 \quad (9.4.4 \text{ až } 9.4.6.)$$

$$\lambda_2^2 = 2E_{22} + 1$$

$$\lambda_3^2 = 2E_{33} + 1$$

Kde E_{ij} jsou složky Greenova tenzoru deformace z experimentu (Istra 4D).

vztah mezi napětím a deformací je pak podle [14]:

$$\sigma_a = \lambda_a \frac{\partial \Psi}{\partial \lambda_a} - p \quad \text{a zároveň platí} \quad \sigma_a = \frac{F_a \lambda_a}{A_{0a}} \quad (9.4.7, 9.4.8.)$$

kde A_{0a} je původní plocha měřeného vzorku

pro izochorické protažení platí:

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 \quad \text{takže} \quad \lambda_3 = \frac{1}{\lambda_1 \lambda_2} \quad (9.4.9, 9.4.10.)$$

po dosazení a úpravách dostáváme:

$$\sigma_1 = 2C_1 \left(\lambda_1^2 - \frac{2}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} \right) + 2C_2 (-\lambda_1^{-2} + 2\lambda_1^2 \lambda_2^2) \quad (9.4.11)$$

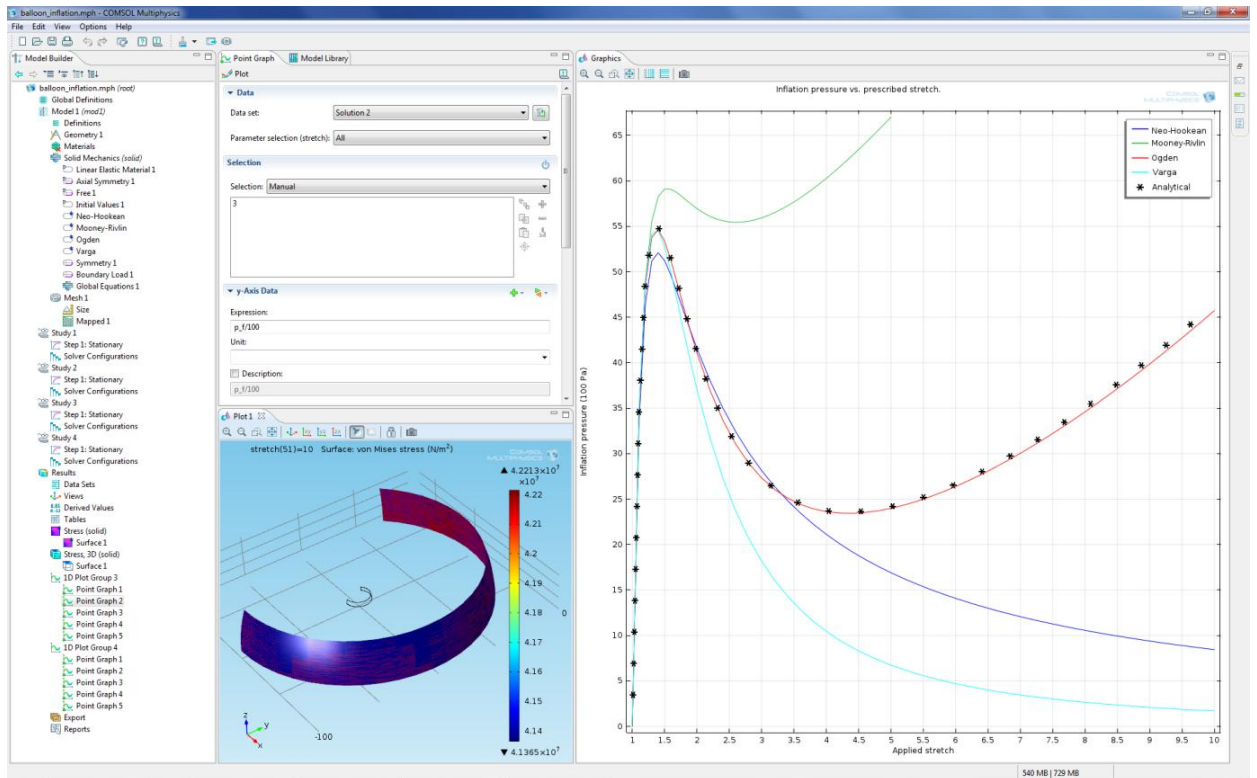
$$\sigma_2 = 2C_1 \left(\lambda_2^2 - \frac{2}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} \right) + 2C_2 (-\lambda_2^3 + 2\lambda_1^2 \lambda_2^2) \quad (9.4.12)$$

Konstanty C_1 a C_2 se dále určí metodou nejmenších čtverců. Pro materiál měřený na biaxiálním rámu tak dostáváme:

$$C_1 = 0.4982 \text{ MPa}$$


$$C_2 = 0.5552 \text{ MPa}$$

A Lamého parametr pak je $\mu = 2(C_1 + C_2) = 2.1068 \text{ MPa}$, kde μ je v tomto případě podle [10] G, tedy modul pružnosti ve smyku.



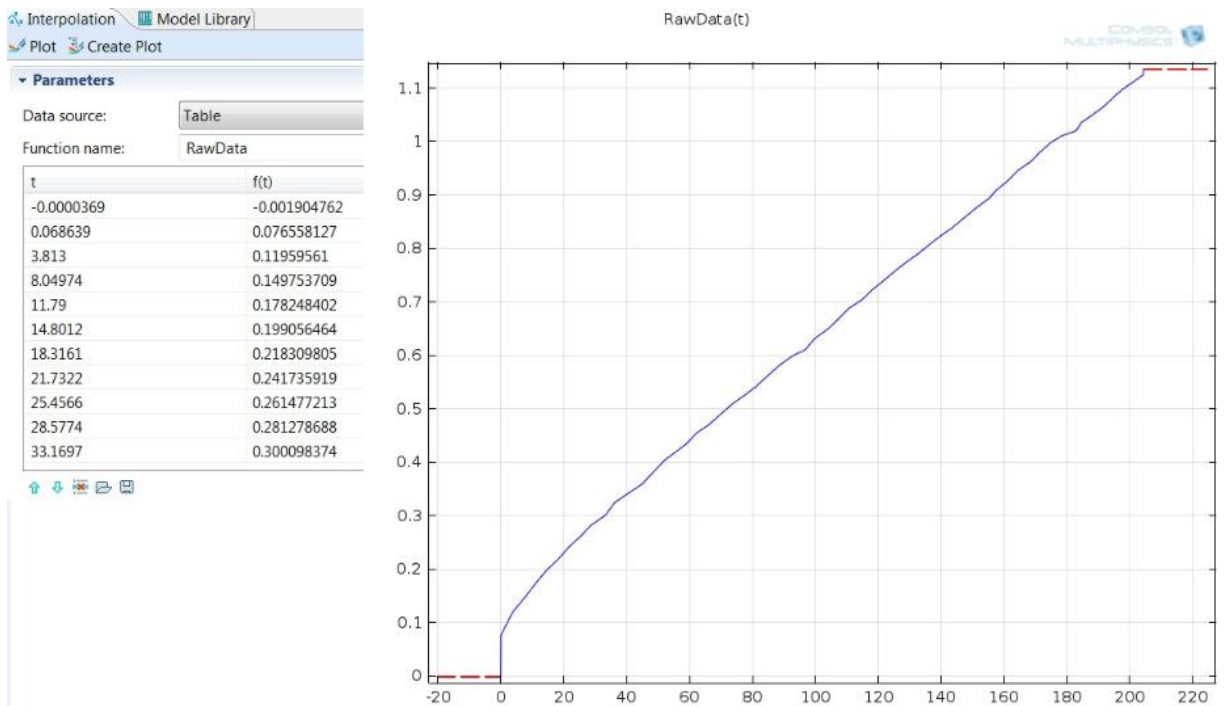
Obrázek 9-3 názorná ukázka aplikace podporovaných materiálových modelů na modelu části nafukovacího balónku [11]

9.5. Optimalizační modul

Optimalizační modul přidává další možnosti k uživatelskému rozhraní v prostředí Comsol: Optimalizační rozhraní (), které je možné najít v sekci Mathematics. Optimalizační prostředí zahrnuje široké spektrum funkcí pro definování optimalizačního problému, jakým může být například stanovení globálních konstant, vazeb, proměnných atd.

V této práci je Optimalizační modul použit pro curve fitting (Obrázek 10-1), což je odhad parametrů. V tomto případě je úkolem odhadnout dva parametry, C_{10} a C_{01} , které definují nelineární materiálový model v mechanice pevných těles, vzhledem k naměřeným hodnotám. Materiálový model je hyperelastický Mooney-Rivlin, který je dostupný v Nelineárním Strukturálním Materiálovém Modulu. Problém optimalizace a určení parametrů C_{10} a C_{01} bude v této kapitole řešen na 1D modelu. [14] [11]

Prvním krokem pro odhad integračních konstant je interpolace dat. Interpoláční funkce využívá naměřenou závislost napětí - deformace, kterou je možné zadávat tabulkou nebo odkazem na soubor typu Matlab. [11]



Obrázek 9-4 vložená naměřená data

Výpočet dále pokračuje určením parametrů Mooney-Rivlinova modelu L a P odpovídající λ a P. A také určením chyby metody nejmenších čtverců pro rozdíl mezi modelem a naměřenými daty. [14]

NAME	EXPRESSION	DESCRIPTION
L	$1+x [1/m]$	Mooney-Rivlin parameter, lambda
P	$2 * (L-1/L^2) * (C10+C01/L)$	Mooney-Rivlin parameter, P
SquareDiff	$\text{intop1}((\text{RawData}(x[1/m]) - P)^2)$	Least-squares error

Obrázek 9-5 výpočet parametrů [14]

Hlavním úkolem je nyní minimalizovat chybu metody nejmenších čtverců mezi naměřenými daty a modelem, nastavením parametrů C01 a C10 jako řídicí. [14]

Variable	Initial value	Lower bound	Upper bound
C01	0		
C10	0		

Obrázek 9-6 vložení řídicích parametrů

Optimalizační modul je nyní připraven, zbývá již pouze vytvoření modelu vzorku a výpočet parametrů, viz. následující kapitola.

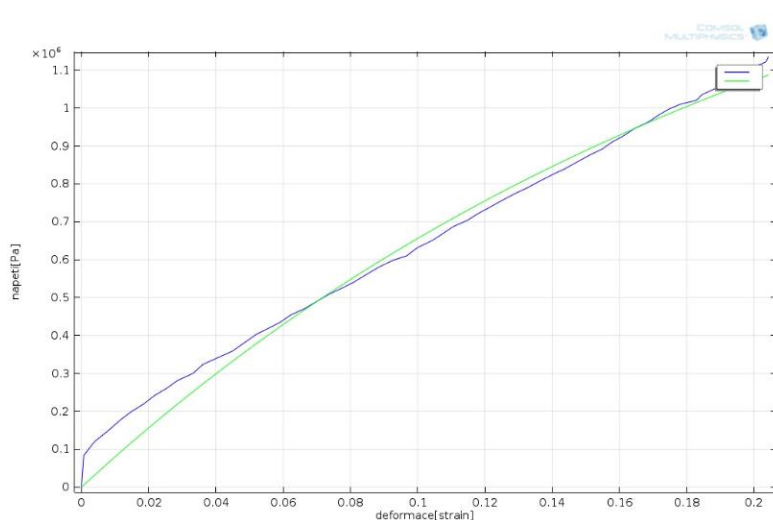
10. MKP analýza

Tato kapitola slouží jako průvodce tvorby geometrického modelu s jeho převodem na model matematický - zadáním okrajových podmínek a definováním zatížení, ukázkou volby vhodné sítě a zobrazením výsledků. Návrh modelu začíná vždy volbou dimenze, proto je kapitola rozdělena do dvou podkapitol. Vzhledem k tomu, že tato práce se má zabývat především biaxiálním zatěžováním, je detailněji popsána pouze tato část.

10.1. Jednoosé zatížení tahem

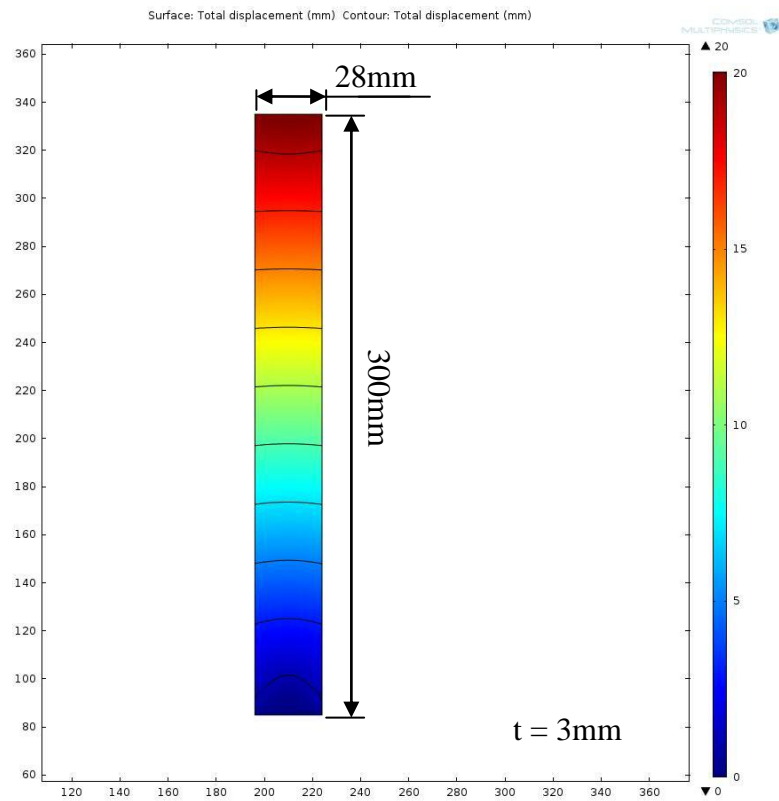
Pro úlohu určení parametrů Mooney-Rivlinova materiálového modelu, pro vzorky měřené na zařízení Tira, byl zvolen 1D geometrický model a patřičný řešič s optimalizačním modulem. V prostředí Comsol byl vymodelován geometrický model, který byl zjednodušen na pouhou úsečku o určité délce. Hustota sítě, tedy velikost elementu, tak mohla být s ohledem na jednoduchost geometrického modelu nastavena na "Extremely Fine" bez obav dlouhého výpočtového času.

Vypočtené parametry mají hodnotu $C_{01} = 1.71591$ MPa a $C_{10} = 0.148025$ MPa. A Lamého parametr, tedy modul pružnosti ve smyku G , pak je $\mu = 2(C_1 + C_2) = 3.72787$ MPa.

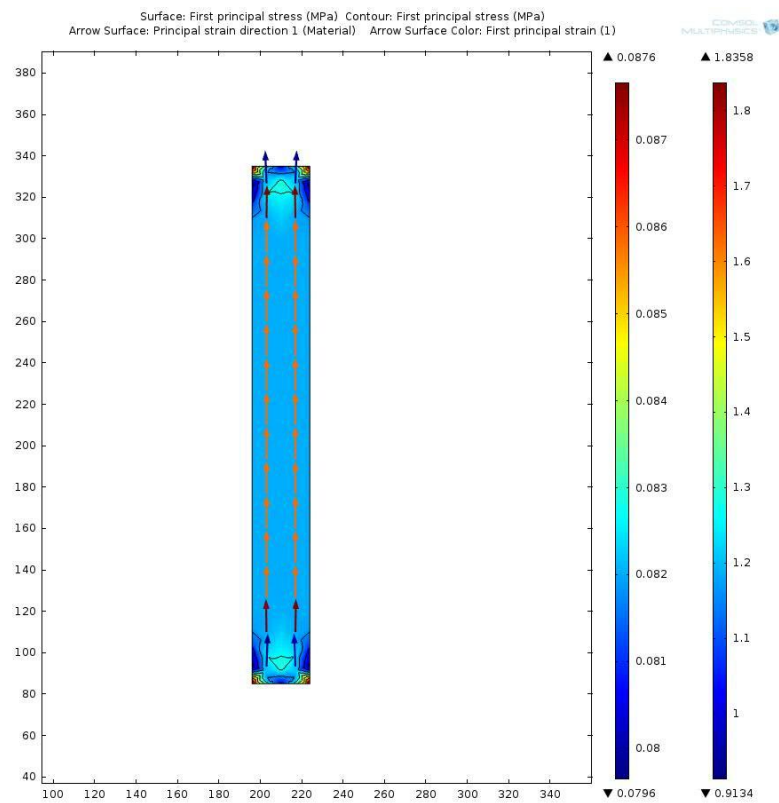


Obrázek 10-1 curve fit, modrá - naměřená data, zelená – proložení.

Nyní bylo nutné kvůli absenci licence 1D modulu pro strukturální mechaniku použít 2D prostředí, kde byl vytvořen jednoduchý model geometricky odpovídající měřenému vzorku. Vypočtené parametry C_{01} a C_{10} se zpětně dosadí do prostředí Comsol, kde se geometrickému modelu přiřadí hyperelastický Mooney - Rivlinův materiál se dvěma parametry. Byly zadány okrajové podmínky vetknutí pro spodní hranu vzorku a předepsaného posuvu o 20mm pro horní hranu vzorku (obrázek 10-2) a byla spuštěna simulace.



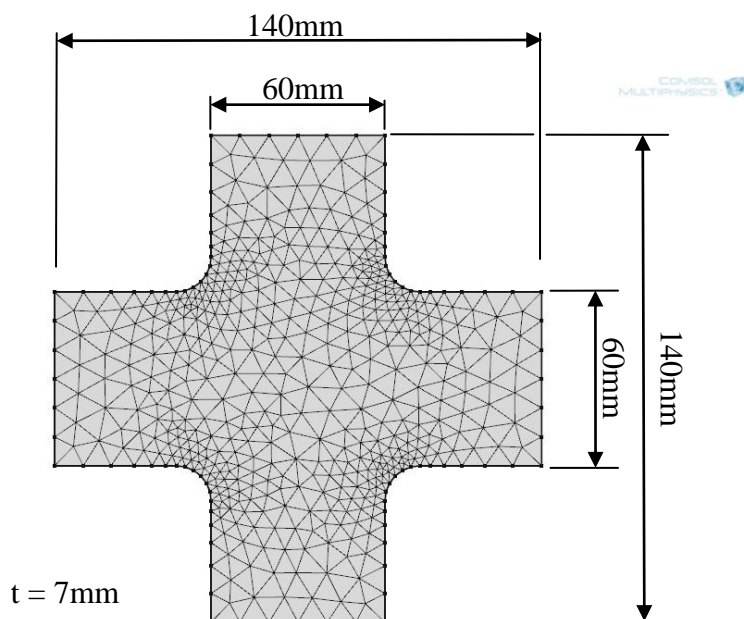
Obrázek 10-2 zobrazení posuvů.



Obrázek 10-3 zobrazuje průběh prvního hlavního napětí a jeho izočáry. A průběh i směr první hlavní deformace.

10.2. Ekvibiaxiální zatížení tahem

Pro tuto úlohu byl zvolen 2D geometrický model a patřičný řešič s fyzikálním modulem. V prostředí Comsol byl vymodelován geometrický model o rozměrech a tvaru měřeného vzorku, jako typ elementu byl zvolen tzv. Plate s patřičnou tloušťkou. Převod geometrického modelu na matematický byl proveden za použití funkce Mesh. Mesh je funkce automatické generace sítě s možností několika modifikací uživatelem, např. přednastavení typu základního elementu, rozměru nejmenšího a největšího prvku sítě, nastavení míry růstu elementů atd.

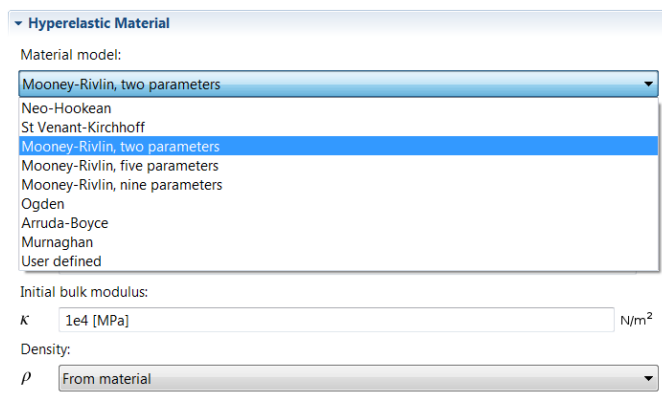


Obrázek 10-4 síť a geometrie modelu

Elementárním prvkem sítě byl zvolen trojúhelník. Generovaná síť má jemnější strukturu v rozích modelu, jinak je její struktura přibližně homogenní. Tento typ struktury (Obrázek 10-6) se zdá být vhodný pro plánovanou simulaci.

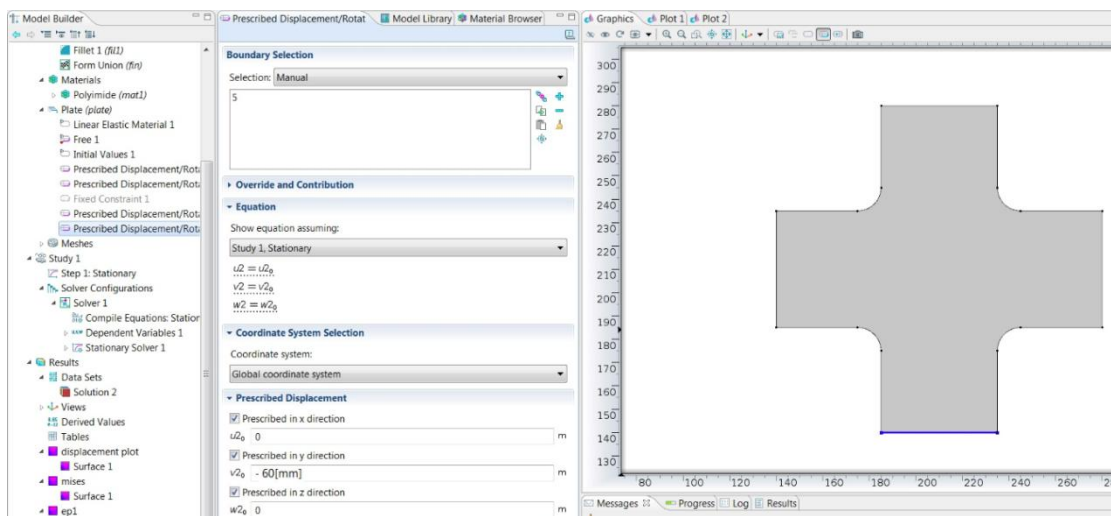
Dále byly zadány patřičné okrajové podmínky odpovídající zatížení vzorku v experimentu. Okrajové podmínky/zatížení jsou předepsané posuvem 60mm, čtyř obrysových hran modelu (Obrázek 10-7). Je nutné tyto čtyři okrajové podmínky zadat postupně a zvlášť.

Zbývá již pouze přidat odpovídající typ materiálu. Ten je definován vhodným hyperelastickým materiálovým modelem (obrázek 10-5). Comsol podporuje více materiálových modelů, ukázka a popis jejich aplikace je uvedena v předchozí kapitole. Podpora těchto hyperelastických nelineárních modelů je novinkou v aktuální verzi Comsolu 4.3a. Vzhledem k relativně jednodušší aplikaci byl použit Mooney-Rivlinův materiálový model se dvěma parametry, kam byly doplněny již dříve Matlabem vypočtené hodnoty parametrů C_1 a C_2 .

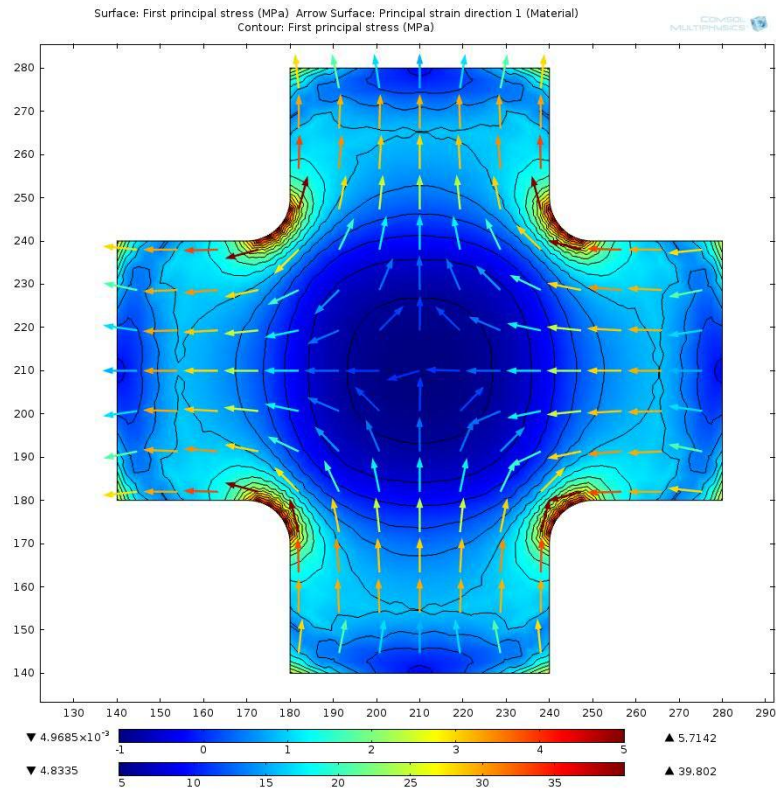


Obrázek 10-5 dostupné materiálové modely.

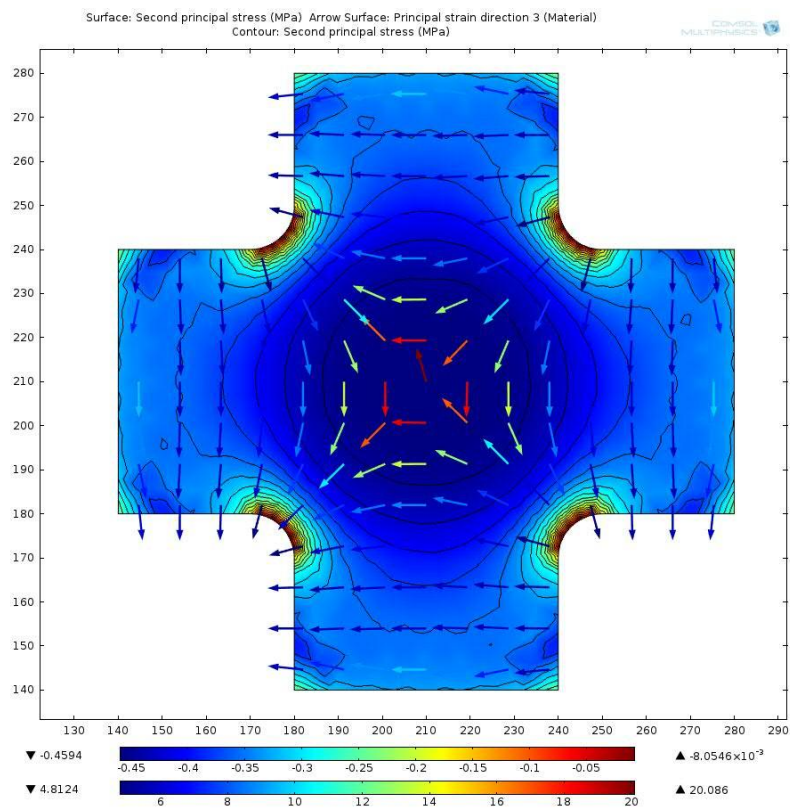
V této fázi je převod na matematický model úplný. Zbývá zvolit odpovídající typ studie a řešič simulace, volím jeden ze základních typů tzv. Stationary. Tím je řešení v Comsolu připraveno k simulaci a můžeme přejít k fázi postprocessingu.



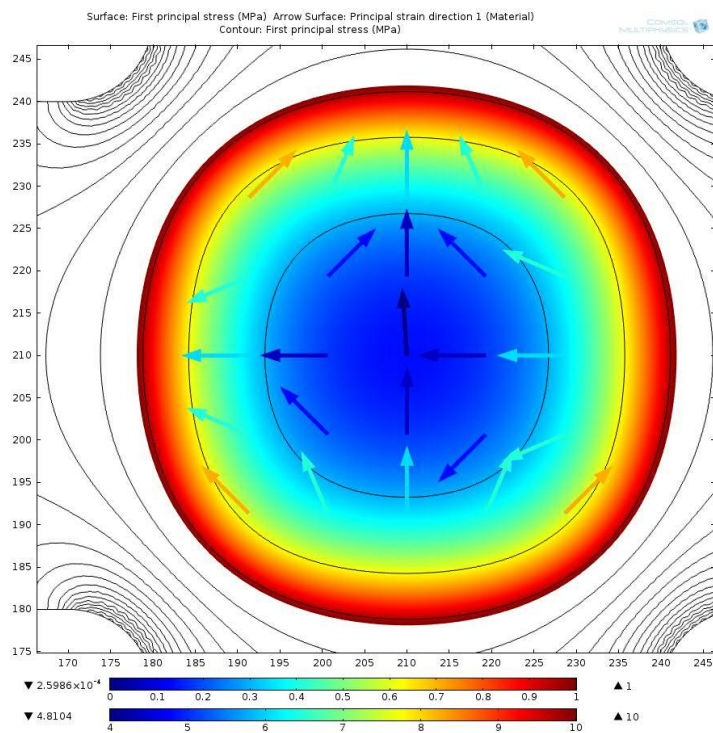
Obrázek 10-6 předepsání okrajových podmínek, zatížení.



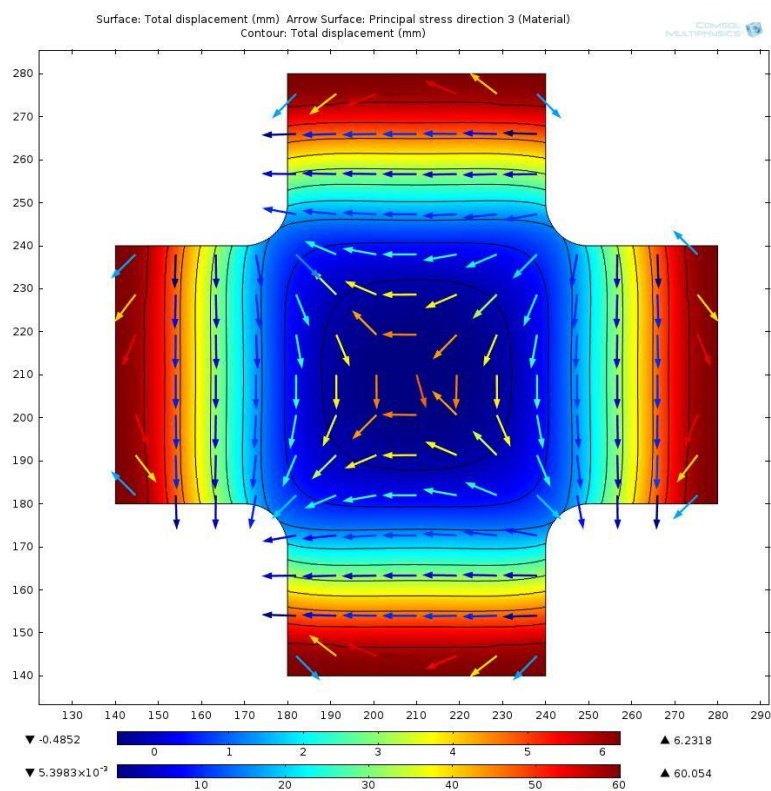
Obrázek 10-7 zobrazuje průběh prvního hlavního napětí a jeho izočáry. A průběh i směr první hlavní deformace.



Obrázek 10-8 zobrazuje průběh druhého hlavního napětí a jeho izočáry. A průběh i směr třetí hlavní deformace.



Obrázek 10-9 popisuje průběh prvního hlavního napětí a jeho izočáry. A průběh i směr první hlavní deformace. Data byla zredukována pro snazší porovnání s daty naměřenými.



Obrázek 10-10 zobrazuje průběh celkového posuvu a jeho izočáry. A průběh i směr třetího hlavního napětí.

11. Závěr

Tato práce obsahuje experimentálně ověřenou metodiku, vhodnou pro měření mechanických vlastností pryžového materiálu. Měřené vzorky byly vystaveny dvouosému a jednoosému zatěžování tahem. Práce navazuje na ostatní diplomové a jiné práce týkající se této problematiky, které vznikly na katedře mechaniky, pružnosti a pevnosti Technické Univerzity v Liberci. [16] Jsou zde uvedeny naměřené závislosti napětí - deformace pro dva druhy zatížení a pět pryžových vzorků z krycí vrstvy pásového dopravníku, stanovení modulu pružnosti ve smyku G a sestavené dva simulační modely pro porovnání výsledků.

Ze zaslanych dopravníkových pásů byly vyrobeny vzorky vhodné pro měření na zařízeních laboratoře KMP s ohledem na dané zatížení. Pro jednoosý tah mají vzorky tvar pásků, zatímco pro dvouosý tah mají tvar symetrického kříže. Během zatěžování byla měřena síla a posuv, z kterých byly sestaveny závislosti napětí - deformace (obrázky 8-13 a 8-15). V této práci jsou takto zobrazeny možné způsoby vyhodnocení naměřených dat.

K měření deformace bylo využito zařízení Dantec Dynamics, systém Q-400, Istra 4D využívající metodu Digital Image Correlation. Měření sil bylo provedeno zařízením Dewesoft a TIRAtest. Jednoosé zatěžování bylo provedeno na zařízení Tira, řízené přes PC softwarem TIRAtest. Dvouosé zatěžování bylo provedeno na speciálním dvouosém zatěžovacím zařízení s krokovými motory, řízenými přes PC. Systém měření deformace Q-400 se poměrně snadno přesunul a adaptoval pro měření i na druhém zařízení. Analýza MKP byla provedena v softwaru Comsol Multiphysics, kde byl využit Mooney - Rivlinův hyperelastický materiálový model. Vyhodnocení naměřených dat proběhlo v softwaru Istra 4D, Matlab, Microsoft Office Excel.

Dále bylo provedeno stanovení konstant Mooney-Rivlinova materiálového modelu. Pro tento úkol jsou v této práci ukázány dva postupy. První způsob je pro jednoosý tah, výpočtem v Comsolu, v druhém případě je výpočet proveden v Matlabu podle rovnic v kapitole 9.4. V obou případech jsou využita data z naměřených závislostí napětí - deformace a metoda nejmenších čtverců. Po výpočtu konstant bylo provedeno jejich zpětné dosazení do výpočtového prostředí Comsol a v kapitole 10 byla provedena simulace obou experimentů.

Z poznatků získaných při experimentech a jejich následném vložení do simulačního softwaru Comsol, pro výpočet materiálových konstant plyne, že při jednoosém tahu by pro určení modulu pružnosti ve smyku G stačil materiálový model s jedním parametrem, např. Neo-Hookeovský, bude to dáno zejména díky malým deformacím, kterých bylo při experimentu dosaženo, materiál se tak pohyboval ve stále téměř lineární části zatěžovací křivky. Naproti tomu pro druhý typ experimentu, kde bylo dosaženo větších deformací, zejména díky tužšímu upnutí vzorku v čelistech rámu, byl správně stanoven dvouparametrový materiálový model.

Výsledky simulací znázorňují průběhy deformačních polí a dosažené hodnoty napětí vzhledem k deformaci při maximální hodnotě posuvu. Porovnáním deformačních polí, jak ukazují obrázky v kapitole 8, kde dostáváme shodnou první a druhou hlavní deformaci, které jsou navíc totožné s deformací ve směru x a y, dále platí: $\varepsilon_1 \cong \varepsilon_2 \cong \varepsilon_x \cong \varepsilon_y$, $\gamma \cong 0$ a zároveň $F_x \cong F_y$. Jedná se tak dle poznatků uvedených v kapitole 4 o ekvibiaxiální zatěžování, které tvarem deformačních polí odpovídá také analýze MKP viz. obrázky v kapitole 10. Předpoklad homogenního pole deformace uprostřed vzorku při ekvibiaxiálním zatížení se také ukázal jako správný (obrázek 8-2 a 10-9).

Při porovnání konkrétních hodnot závislosti napětí - deformace z experimentů (obrázek 8-13 a 8-15) a simulace (obrázek 10-3 a 10-9) lze říci, že bylo dosaženo shody výsledků přibližně s rozptylem 0,5 MPa pro danou deformaci. Tím je ověřena správnost metodiky, experimentu a simulace.

Rozdíl vypočtených hodnot nejen modulu pružnosti ve smyku G, ale i rozdíl mezi simulací a měřením je dán měřicími nejistotami, numerickou aproximací a zanedbáním řady dalších faktorů, jako například zjednodušení úloh na 2D, vliv anizotropie, tedy vliv trvalé deformace, která mohla vzniknout v materiálu vzorku při strhávání krycí vrstvy z dopravníkového pásu. Je tak třeba konstatovat, že vypočtené moduly pružnosti ve smyku G, platí pouze pro konkrétní měřené vzorky a to pouze do rozsahu docílené deformace při stejném charakteru zatížení. Konkrétní rozdíl 1.62107MPa mezi vypočtenými moduly pružnosti ve smyku je pro tuto materiálovou konstantu stále zanedbatelně malý.

Reference

- [1] I. Prokopová, Makromolekulární chemie. 2nd ed., Praha: ŠCHT Praha. ISBN 978-80-7080-662-3, 2007.
- [2] L. Sperling, Introduction to physical polymer science/ L.H.Sperling - 4th. ed., printed in the United States of America, 2006.
- [3] V. Švorčík, Polymery, VŠCHT, www.vscht.cz/ipl/osobni/svorcik/Polymery.pdf.
- [4] C. Ing. Bohumil Messner a C. Doc. Ing. Václav Zilvar, Fyzika polymerů, Struktura a vlastnosti polymerních materiálů, Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury Alfa, vydavatel'stvo technickej a ekonomickej literatúry, Bratislava, 1987.
- [5] M. A. Sutton, J.-J. Orteu and H. W. Schreier, Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements, Springer, 2009.
- [6] W. Knauss a W. Zhu, Nonlinearly viscoelastic behavior of polycarbonate. I. Response under pure shear. Mechanics of Time-Dependent Materials, 6(3):231-269,, 2002.
- [7] M. Fouinneteau a A. Pickett, Failure characterisation of heavy tow braided composites using digital image correlation (DIC). Applied Mechanics and Materials, 5-6:399-406,, 2006.
- [8] M. Kalina, F. Šimčák, M. Hagara, M. Schrötter and M. Štamborská, "The use of the experimental optical technique for investigation of shear strains of the samples exposed to shear stress beyond the yield point, Procedia Engineering 48(2012) 264-272," 2012.
- [9] D. Dynamics, „Q - 400 SYSTEM Operation Manual,“ 2013.
- [10] M. software, Whitepaper - Nonlinear Finite Element Analysis of Elastomers, http://www.mssoftware.com/Submitted-Content/Resources/WP_Nonlinear_FEA-Elastomers.pdf.
- [11] COMSOL, „The Nonlinear Structural Materials Module User’s Guide,“ COMSOL.
- [12] R. H. Martin Fusek, „MKP a MHP - interaktivní studijní materiál,“ ZČU v Plzni, 2012.
- [13] K. Weinberg, Lecture Notes for Zur Methode der finiten Elemente in der Mechanik II: Nichtlineare Probleme, TU Berlin [in English], TU Berlin .

[14] G. A. Holzapfel, „Nonlinear Solid Mechanics,“ John Wiley & Sons, Ltd, 2000.

[15] „National Computational Infrastructure, <http://nf.nci.org.au/>“.

[16] I. Petříková, „Mechanické vlastnosti pryží,“ TUL, KMP, Liberec, 2008.