

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ



VYHODNOCOVÁNÍ DYNAMICKÝCH EXPERIMENTŮ PROVÁDĚNÝCH
DĚLENOU HOPKINSONOVOU TYČÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MARCEL ADORNA

PRAHA, 2017



K618 Ústav mechaniky a materiálů

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Marcel Adorna

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – IS – Inteligentní dopravní systémy

Název tématu (česky): **Vyhodnocování dynamických experimentů
prováděných dělenou Hopkinsonovou tyčí**

Název tématu (anglicky): Evaluation of Dynamic Experiments Performed Using Split
Hopkinson Pressure Bar

Zásady pro vypracování

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

- Dělená Hopkinsonova tyč (SHPB) je experimentální zařízení pro zjišťování dynamických mechanických vlastností materiálů za vysokých hodnot rychlosti deformace.
- Cílem práce je vytvořit soubor softwarových nástrojů, které budou používány pro zpracování zaznamenaných surových dat, k vyhodnocování dynamických experimentů prováděných v zařízení SHPB (např. napětí a deformace ve vzorku, strain-rate, absorbovaná energie apod.) a pro návrh vstupních podmínek experimentu (např. počáteční tlak ve vzdušníku na základě požadované deformace ve vzorku).
- Výstupem práce bude soubor softwarových řešení pro návrh parametrů a pro vyhodnocení experimentu, včetně uživatelsky intuitivních grafických rozhraní. Funkčnost jednotlivých prvků bude ověřena experimentálními zkouškami.
- Výsledkem práce bude funkční a odzkoušené řešení pro vyhodnocování experimentů prováděných v SHPB.

Rozsah grafických prací: nebyl stanoven

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Shukla A. et al., Dynamic Failure of Materials and Structures, Springer, 2010, ISBN 978-1-4419-0445-4
Chen W. et al., Dynamic Compression Testing of Soft Materials, J. Appl. Mech. 69(3), 2002, pp. 214-223, doi: 10.1115/1.1464871

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Daniel Kytýř, Ph.D.

Ing. Tomáš Fíla

Datum zadání diplomové práce:

25. července 2016

(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce:

30. května 2017

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
- b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia



prof. Ing. Ondřej Jiroušek, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.

vedoucí

děkan fakulty

Ústavu mechaniky a materiálů

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Marcel Adorna
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 25. července 2016

Prohlášení

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

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

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

Praha, 30. května 2017

.....

Marcel Adorna

Poděkování

Na úvod bych rád poděkoval Ing. Danielu Kytýřovi, Ph.D. a Ing. Tomáši Fílovi, vedoucím práce, za čas, který mi věnovali během konzultací a za užitečné rady při psaní této práce. Dále děkuji Ing. Petru Zlámalovi Ph.D, vedoucímu Laboratoře mechaniky, za poskytnutí nezbytného zázemí pro experimentální ověření závěrů předložené práce.

Nelze opomenout poděkovat také rodině a přátelům za jejich podporu a důvěru, kterou ve mě vkládali po celou dobu mého studia.

Tato práce vznikla za podpory grantu studentské grantové soutěže SGS17/148/OHK2/2T/16 a grantu Grantové agentury České republiky 15-15480S.

VYHODNOCOVÁNÍ DYNAMICKÝCH EXPERIMENTŮ PROVÁDĚNÝCH DĚLENOU
HOPKINSONOVOU TYČÍ

MARCEL ADORNA

ČVUT v Praze, Fakulta dopravní

Praha, 2017

Abstrakt

Předložená práce se zabývá vyhodnocováním dynamických experimentů prováděných na instrumentovaném zařízení SHPB modifikovaném pro měření materiálů s nízkou mechanickou impedancí. V rámci práce je navržena a implementována metodika předzpracování zaznamenaných experimentálních dat, vytvořena sada softwarových nástrojů umožňující konzistentní a přesné vyhodnocení. Celé řešení je implementováno v modulárním uživatelském rozhraní, které umožňuje automatizované, rychlé a spolehlivé vyhodnocení zaznamenaných experimentálních dat. Navržené řešení je ověřeno v rámci vyhodnocení experimentů provedených na auxetické struktuře a na vzorku porézní polymerní pěny. Výsledky získané s použitím navrženého řešení jsou konzistentní a odpovídají již dříve publikovaným hodnotám. Výsledkem práce je soubor softwarových řešení implementovaný v uživatelském prostředí, který značně usnadňuje a zrychluje proces vyhodnocení experimentů provedených na SHPB.

Klíčová slova

SHPB, GUI, Kolského tyč, tenzometrie, deformace za vysokých rychlostí

EVALUATION OF DYNAMIC EXPERIMENTS PERFORMED USING SPLIT HOPKINSON
PRESSURE BAR

MARCEL ADORNA

CTU in Prague, Faculty of Transportation Sciences

Prague, 2017

Abstract

This thesis deals with evaluation of dynamic experiments performed using a modified SHPB measuring device, particularly on materials with low mechanical impedance.. Preprocessing methodology of recorded experimental data is proposed and implemented. Furthermore, set of software tools for data processing and results evaluation is created. The software tools are implemented in a modular user interface, which allows for fast and reliable semi-automatic evaluation of SHPB experiments. Functionality of the created interface is demonstrated on two experiments with different materials. For this purpose, the experiments of laser sintered auxetic structure (with negative Poisson's ratio) and nickel-coated open-cell polyurethane foam were selected and evaluated. Obtained results are consistent and correspond with an already published. As a main output of the thesis, the graphical user interface and set of software tools for evaluation of SHPB experiments were developed and implemented.

Keywords

SHPB, GUI, Kolky bar, strain-gauge measurement, high-strain rate impacts

Obsah

1 Úvod	15
1.1 Motivace	15
1.2 Cíle práce	16
2 Problematika a použité metody	17
2.1 Dynamické materiálové zkoušky	17
2.2 Dělená Hopkinsonova tyč	18
2.2.1 Historie	19
2.2.2 Kolského měřicí sestavení	20
2.2.3 Tenzometrická měření	22
2.2.4 Měření optickými branami	26
2.3 Metodika vyhodnocování experimentů	27
2.3.1 Zpracování signálů z optických bran	27
2.3.2 Filtrování signálů z tenzometrů	29
2.3.3 Oříznutí a srovnání signálů	30
2.3.4 Výpočet deformace	30
2.3.5 Výběr pulzů	31
2.3.6 Korekce disperze	31
2.3.7 Vyhodnocované veličiny	32
3 Experimentální zařízení na Fakultě dopravní	35
3.1 Popis experimentálního zařízení	36
3.1.1 Vzduchové dělo	36
3.1.2 Měřicí tyče	37
3.1.3 Instrumentace	38
3.2 Oblast využití experimentálního zařízení	39

3.2.1	Modifikace	39
3.2.2	Kalibrace a korekce nelinearit	39
4	Vyhodnocovací software	40
4.1	Vstupní data a jejich příprava	40
4.1.1	Návrh hlavičky experimentálních dat	41
4.2	Grafické uživatelské rozhraní	42
4.2.1	Funkce jednotlivých karet	43
5	Experimentální ověření navrženého řešení	54
5.1	Měření auxetické struktury	55
5.1.1	Zdrojová data	56
5.1.2	Vyhodnocení s využitím grafického rozhraní	56
5.1.3	Výsledky	62
5.2	Měření pokovené polymerní pěny	64
5.2.1	Vyhodnocení s využitím grafického rozhraní	65
5.2.2	Výsledky	69
5.3	Shrnutí	70
6	Závěr	71
	Literatura	72

Seznam obrázků

2.1	Základní schéma SHPB zařízení	19
2.2	Schéma původního Hopkinsonova experimentu	20
2.3	Šíření elastické vlny v SHPB	22
2.4	Fóliový tenzometr	23
2.5	Závislost deformace polovodičových tenzometů na změně elektrického odporu	24
2.6	Wheatstoneův můstek	24
2.7	Schéma kalibračního měření pro určení zrychlení strikeru	28
2.8	Aplikace Butterworthova filtru na experimentální data	29
2.9	Srovnání signálů	30
2.10	Výběr pulzů	32
2.11	Dynamická rovnováha	33
3.1	Schéma SHPB zařízení se základními rozměry	35
3.2	3D vizualizace SHPB zařízení	36
3.3	Vzduchové dělo a jeho komponenty	37
3.4	Soustava měřících tyčí	38
4.1	Funkční diagram GUI	42
4.2	Náhled grafického uživatelského rozhraní	43
4.3	Vývojový diagram pro načítání dat	44
4.4	Vývojový diagram pro výpočet rychlosti projektilu	45
4.5	Vývojový diagram pro filtraci naměřených signálů	46
4.6	Vývojový diagram pro oříznutí a srovnání signálů	47
4.7	Ovládací prvky karty číslo 5	48
4.8	Vývojový diagram pro přepočet napětí na deformaci měřících tyčí	49
4.9	Vývojový diagram pro výběr pulzů	50

4.10	Vývojový diagram pro korekci disperze	51
4.11	Ovládací prvky karty Results calculation	52
4.12	Ovládací prvky karty Export results	53
5.1	Auxetická struktura <i>2Dmissing – rib</i>	55
5.2	Sekvence postupné deformace vzorku s auxetickou strukturou	56
5.3	Výpočet rychlosti strikeru pro měření provedeného na auxetické struktuře	57
5.4	Filtrace surových dat z měření provedeného na auxetické struktuře	58
5.5	Oříznuté a srovnané signály z měření provedeného na auxetické struktuře	59
5.6	Výběr elastických pulzů v průběhu vyhodnocení měření provedeného na auxetické struktuře	60
5.7	Efekt korekce vlnové disperze na incidentní pulz elastické vlny	61
5.8	Dynamická rovnováha sil pro vzorek auxetické struktury	62
5.9	Efekt korekce pro zrychlení projektilu	63
5.10	Závislost rychlosti deformace vzorku na deformaci	63
5.11	Závislost napětí vyvolaném ve vzorku na deformaci	64
5.12	Testovaný vzorek pokovené polymerní pěny	65
5.13	Sekvence postupné deformace vzorku polymerní pěny	66
5.14	Elastické pulzy nalezené při vyhodnocení měření provedeného na vzorku polymerní pěny	68
5.15	Dynamická rovnováha sil pro vzorek polymerní pěny	69
5.16	Závislost rychlosti deformace vzorku na deformaci	69
5.17	Závislost napětí ve vzorku na deformaci při měření polymerní pěny	70

Seznam tabulek

2.1	Typy zapojení Wheatstoneova můstku a jejich fyzická konfigurace	25
2.2	Přepočet napětí na deformaci můstku a korekce nelinearity můstku	26

Seznam vybraných veličin

symbol	jednotka	veličina
R	[Ω]	Elektrický odpor
ε	[-]	Deformace (poměrné prodloužení)
U	[V]	Elektrické napětí
G	[-]	Zesílení digitálního zesilovače
v_s	[ms^{-1}]	Rychlost projektilu
l_s	[m]	Délka projektilu
a_s	[ms^{-2}]	Zrychlení projektilu
t	[s]	Čas
p	[Bar]	Tlak vzduchu
D	[m]	Vzdálenost mezi optickými bránami
σ	[Pa]	Mechanické napětí
d	[m]	Délka měřicí tyče
F	[N]	Síla
$\dot{\varepsilon}$	[-]	Rychlost deformace
E	[Pa]	Youngův modul pružnosti v tahu
ν	[-]	Poissonovo číslo

Seznam použitých zkratk

SHPB: dělená Hopkinsonova tlaková tyč (Split Hopkinson Pressure Bar)

GUI: grafické uživatelské rozhraní (Graphical User Interface)

drop test: mechanická zkouška pádem vzorku v definované výšce

void test: kalibrační test aparátu bez použití vzorku

SLS: selektivní spékání laserem (Selective Laser Sintering)

Kapitola 1

Úvod

Výroba nových materiálů je velmi úzce spojena s jejich uplatněním v různých odvětvích průmyslu. Rychlý rozvoj materiálového inženýrství posledních desetiletí umožnil vznik konstrukcí, které vykazují vyšší pevnost, tvarovou stálost a zároveň nižší hmotnost než konstrukce zhotovené z konvenčních materiálů. V současné době je trendem vyvíjet materiál s řízenými mechanickými vlastnostmi k předem definovanému účelu, na základě požadavku určitého průmyslového odvětví. Aby bylo možné materiály popsat, je zcela nezbytné nejprve přesně identifikovat, kvantifikovat a analyzovat mechanické procesy probíhající v jejich struktuře.

Předložená práce se zabývá vyhodnocováním dynamických materiálových zkoušek prováděných za použití dělené Hopkinsonovy tyče vyvinuté na Fakultě dopravní ČVUT. Toto zařízení umožňuje testování celé řady materiálů s různými materiálovými vlastnostmi, od kovů, přes kovové pěny až po auxetické materiály a jiné speciálně navržené struktury.

1.1 Motivace

Mechanické testování materiálů s využitím zařízení SHPB je experimentální technika, která je konvenčně používána pro houževnaté materiály (zejména kovové materiály), ale pro materiály s nízkou mechanickou impedancí vyžaduje modifikace a využití pokročilých metod vyhodnocení. V rámci řešení projektů ústavu K618 Fakulty dopravní se takové materiály testují, a proto se na tomto pracovišti používá zařízení SHPB v několika modifikacích. Pokročilé metody vyhodnocení a korekce pro tyto experimenty vychází z řady vědeckých prací, jsou neustále rozšiřovány a vyžadují implementaci ve formě vlastních softwarových nástrojů pro vyhodnocení. Ve světě je v současné době je k dispozici například softwarový nástroj pro vyhodnocení uvedený v [1]. Tento softwarový nástroj je však pro experimenty prováděné na Fakultě dopravní nevhodný. V rámci

této práce bylo tedy třeba zpracovat vlastní modulární řešení, které využívá poznatků z prací mnoha autorů a upravuje je pro použití v experimentech na zařízení SHPB na Fakultě dopravní.

1.2 Cíle práce

Cílem této práce je vytvoření souboru softwarových nástrojů pro zpracování zaznamenaných surových dat (signály z optických bran, tenzometrů apod.), k vyhodnocování dynamických experimentů prováděných v zařízení SHPB a pro návrh vstupních podmínek experimentu. Výstupem práce pak bude modulární grafické uživatelské rozhraní umožňující intuitivní vyhodnocení těchto experimentů. Toto řešení bude následně ověřeno na provedeném experimentu se vzorkem s porézní strukturou a výsledky získané s jeho využitím vhodně graficky prezentovány.

Kapitola 2

Problematika a použité metody

Pro pochopení problematiky dynamického testování materiálů a jejich vyhodnocování je nejprve třeba seznámit se se základními pojmy a metodami, které jsou využity v této práci a mají souvislost s daným tématem. V této kapitole jsou obecně popsány dynamické materiálové zkoušky, včetně samotného zařízení dělené Hopkinsonovy tyče, jeho možnosti využití a princip tenzomerického záznamu deformace.

2.1 Dynamické materiálové zkoušky

V technické praxi dochází jen velmi zřídka k zatěžování součástí pouze staticky. Ve většině případů se jedná o kombinaci celé řady namáhání, která se buď mění skokem (rázem), nebo se cyklicky opakují. Aby bylo možné stanovit materiálové vlastnosti při působení dynamických sil, jsou prováděny dynamické materiálové zkoušky. Tyto zkoušky se podle způsobu namáhání dělí na rázové a únavové (způsobené cyklicky se opakujícím namáháním). Podle způsobu zatěžování je lze ještě dělit na zkoušky:

- v tahu (např. navíjecí zařízení výtahů a zdviží),
- v tlaku (např. karoserie automobilů, ochranné vybavení),
- v ohybu (např. vlaková návěstidla vystavená poryvům větru)
- a krutu (např. strojní hřídele).

Velmi závažný problém představuje skutečnost, že pokud jsou součásti dimenzovány pouze na základě statických zkoušek, může dojít k jejich selhání i při namáhání výrazně nižším než odpovídá statické mezi pevnosti. Touto problematikou se začal jako první zabývat **August Wöhler**

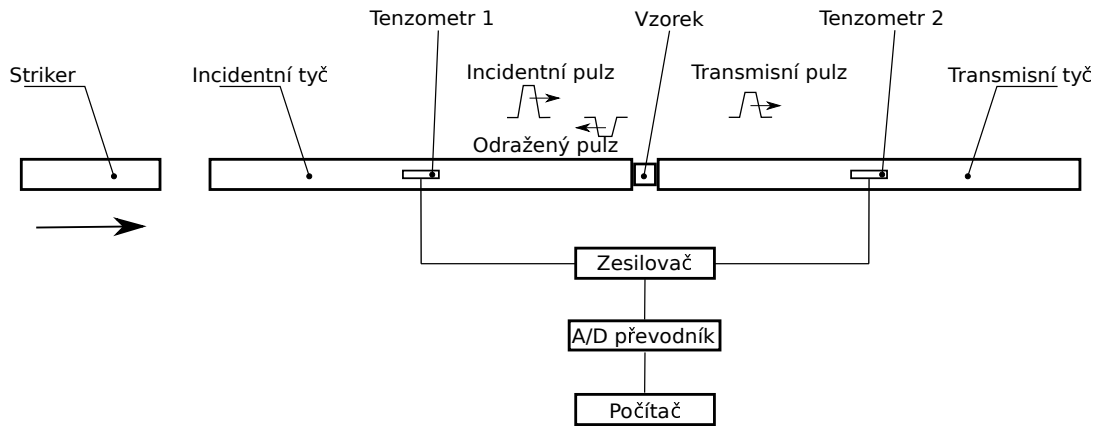
v polovině 19. století, který popsal únavovou křivku materiálu zachycující závislost napětí na počtu cyklů.

Pokud se jedná o rázové namáhání, jeho účinkům je vystaveno mnoho konstrukcí a prvků z různých inženýrských oblastí. V souvislosti dopravou je nutné testovat celou řadu ochranných prostředků jako jsou přilby, celé díly automobilů, letadel a vlaků a v neposlední řadě neprůstřelné vesty. Podle rychlosti provedené deformace jsou rozlišovány materiálové zkoušky s malou ($10^{-8} - 10^{-1} \text{ s}^{-1}$), střední ($10^{-1} - 10^2 \text{ s}^{-1}$) a velkou rychlostí deformace ($10^2 - 10^7 \text{ s}^{-1}$) [2]. Mezi zkoušky s malou rychlostí deformace je možné zařadit např. creepové testy, zkoušku pevnosti v tahu nebo ohybu (kvazistatické testy). Střední rychlost deformace je charakteristická pro různé pádové zkoušky (drop test) a zkoušky vrubové houževnatosti podle Charpyho. Mezi testy s velkou rychlostí deformace řadíme Taylorův test a právě různé testy s využitím dělené Hopkinsonovy tyče či jiných specializovaných zařízení. Vzhledem k velké rychlosti deformace je třeba při vyhodnocování brát v úvahu rychlost šíření deformace a jsou proto vyhodnocovány za použití metod založených na sledování šíření napěťových vln v samotném materiálu. [2]

2.2 Dělená Hopkinsonova tyč

Dělená Hopkinsonova tyč (dále jen SHPB¹) je speciální laboratorní zařízení využívané pro studium mechanických vlastností materiálů při rychlých dynamických zkouškách. Rychlost deformace se typicky pohybuje mezi $10^2 - 10^4 \text{ s}^{-1}$ a k deformaci vzorku dochází jednoosým tlakem v podélné ose vzorku. Experimentálně bylo již dříve prokázáno, že tato metoda testování je vhodná při studiu kujných materiálů jako jsou kovy, kovové pěny a polymery. Naopak metoda je ve svém běžně používaném uspořádání nevhodná při popisu vlastností velmi tvrdých a křehkých materiálů a materiálů s nízkou mechanickou impedancí (měkkých materiálů). Za nevhodné materiály pro testování konvenčním SHPB lze považovat například různé formy keramických materiálů, kovových skel nebo austenitické struktury, či polymerní a kovové pěny a struktury.

¹Z angl. *Split Hopkinson Pressure Bar*- Dělená Hopkinsonova tlaková tyč



Obrázek 2.1: Základní schéma SHPB zařízení

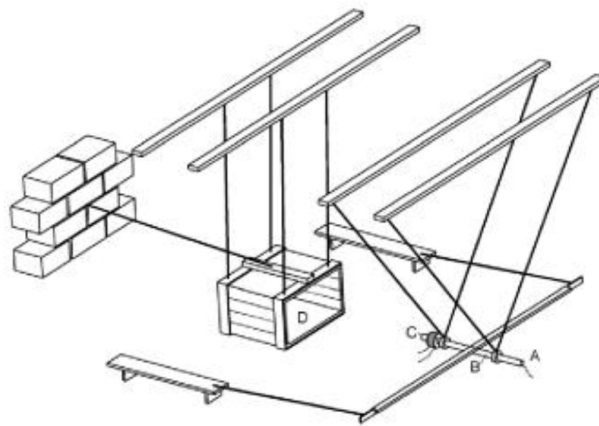
Základní schéma zařízení SHPB zachycené na obrázku 2.1 se skládá z projektilu (tzv. strikeru), incidentní tyče, transmisní tyče a zkoumaného vzorku. Impaktor je zpravidla urychlen za použití vzduchového děla vybaveného kompresorem. Vzorek je umístěn mezi incidentní a transmisní tyčí. Celý aparát je uchycen na pevné konstrukci vybavené vhodným tlumícím mechanismem. Názrazem strikeru do incidentní tyče je generována napěťová vlna, neboli lokální elastické stlačení incidentní tyče, definované vlnové délky (incidentní pulz), který se tyčí šíří směrem ke vzorku. Část signálu se na rozhraní mezi incidentní tyčí a vzorkem odrazí a putuje zpět incidentní tyčí v podobě odraženého pulzu a část projde do transmisní tyče. Průchodem části napěťové vlny vzorkem, je vzorek deformován. Pro záznam šíření takto vzniklých pulzů jsou obě tyče osazeny tenzometrickými snímači. Signál získaný z těchto snímačů je zesílen, předzpracován a následně zaznamenán, navzorkován a uložen. Takto zaznamenaný digitální signál lze využít pro pozdější vyhodnocení [3, 4].

2.2.1 Historie

Za původce Hopkinsonovy metody testování materiálů je označován **John Hopkinson**, který již v 19. století navrhl zařízení pro testování ocelových prutů. V tomto sestavení byl jeden konec zkoumané tyče pevně upevněn, zatímco druhý byl rázově zatížen projektilem. Na jeho práci navázal jeho syn **Bertram Hopkinson**, který navrhl metodu umožňující určit časovou závislost tlaku vyvolaného projektilem a zároveň značně pozměnil celé zařízení. Nově navržené sestavení se skládalo z projektilu, štíhlé tyče, menšího ocelového výlisku a balistického kyvadla. Projektil, urychlený s využitím řízené exploze tak vyvolal elastický pulz v tyči. Ocelový výlisek byl připevněn k druhému konci tyče pouze pomocí vrstvy maziva a při průchodu pulzu rozhraním byl od čela tyče odmrštěn do balistického kyvadla, z jehož kyvu byla určena hybnost udělená výlisku.

Doba působení hybnosti odpovídá přibližně trojnásobku doby, kterou potřebuje pulz k průchodu výliskem. Při opakovaném měření s různě dlouhými ocelovými výlisky o stejné hmotnosti bylo možné získat sadu časových závislostí popisujících průběh dynamické zkoušky. Na obrázku 2.2 je zobrazeno přibližné schéma původního Hopkinsonova zařízení.

Stejnou problematikou se později zabýval také americký fyzik **Herbert Kolsky**, který do sestavení doplnil druhou tyč (odtud také název *dělená* Hopkinsonova tyč). V Kolského sestavení byl vzorek umístěn mezi obě tyče osazené měřicími obvody pro záznam signálů. Právě tato metoda je v dnešní době nejvíce používána a celé zařízení je v literatuře často označováno jako Kolského tyč [5].



Obrázek 2.2: Schéma původního Hopkinsonova experimentu (převzato z [6])

2.2.2 Kolského měřicí sestavení

Kolského měřicí sestavení se oproti obecnému SHPB zařízení vyznačuje několika důležitými charakteristikami. Zařízení lze schématicky rozdělit na 3 hlavní části:

1. zatěžovací zařízení,
2. vlastní aparát měřících tyčí,
3. systém pro záznam a předzpracování dat.

Zatěžovací zařízení

Mechanismus zajišťující urychlení projektilu při SHPB testu je třeba konstruovat tak, aby umožňoval plně kontrolovatelný, stabilní a opakovatelný průběh měření. Za tímto účelem je nejčastěji využíván mechanismus poháněný stlačeným vzduchem. Vzduchové dělo, poháněné vysokotlakým kompresorem a přetlakovým pístem s hlavní umožňuje plnou kontrolu nad rychlostí projektilu, která je přímo závislá na tlaku vzduchu v tlakové komoře. Pro přesné měření rychlosti projektilu těsně před impaktem je hlaveň často osazena optickými branami.

Vlastní aparát měřících tyčí

Typický Kolského aparát se skládá z incidentní tyče, transmisní tyče a tlumičeho mechanismu. V některých případech je aparát doplněn o třetí tyč mezi tlumičem a transmisní tyčí. Všechny tyče mají stejný průměr (stejný jako průměr projektilu) a jsou vyrobeny ze stejného materiálu umožňujícího dobré šíření elastické vlny. Dále je nutné, aby tyče vykazovaly velmi dobrou přímost (do 1 mm/m) a byly upevněny tak, aby byl umožněn jejich pohyb pouze v podélné ose (která je zároveň osou šíření elastických vln). Transmisní a incidentní tyč mají stejnou délku, která by měla být minimálně dvakrát větší než délka projektilu použitého při experimentu a zároveň minimálně 10× delší než průměr tyčí.

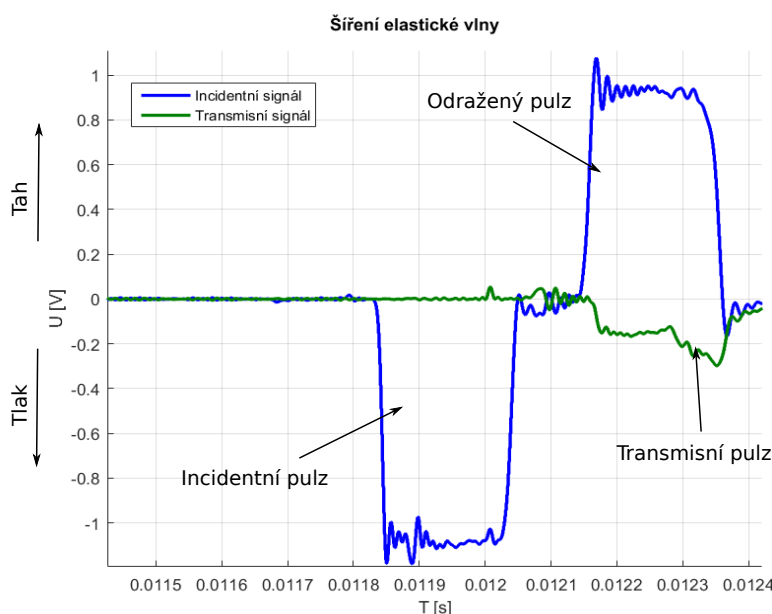
Systém pro záznam a předzpracování dat

Pro záznam elastické vlny šířící se tyčemi Kolského sestavení jsou obě tyče osazeny vhodnými měřicími snímači umístěnými symetricky v jejich střední části. Historicky používané kondenzátorové mikrofony byly v dnešní době nahrazeny různými typy tenzometrů. Tenzometry jsou zpravidla uspořádány symetricky po obvodu celé tyče, zapojeny do tzv. *Wheatstoneova můstku*. Pro zesílení zaznamenaného signálu je často využíván zesilovač, spojený s osciloskopem nebo jiným vhodným zařízením pro předzpracování a případnou digitalizaci naměřeného elektrického signálu [6, 7].

Šíření elastické vlny

Na obrázku 2.3 je zobrazen záznam elastických vln šířících se aparátem měřících tyčí. Incidentní pulz vyvolaný nárazem strikeru do čela incidentní tyče se šíří až na rozhraní mezi incidentní tyčí a zkoumaným vzorkem. Zde se část tohoto pulzu odrazí a v podobě odraženého tahového pulzu putuje incidentní tyčí zpět. Ta část pulzu, která projde celým vzorkem do transmisní tyče jako

transmisní pulz postupuje transmisní tyčí až do tlumiče [7].



Obrázek 2.3: Záznam šíření elastické vlny v incidentní a transmisní tyči

2.2.3 Tenzometrická měření

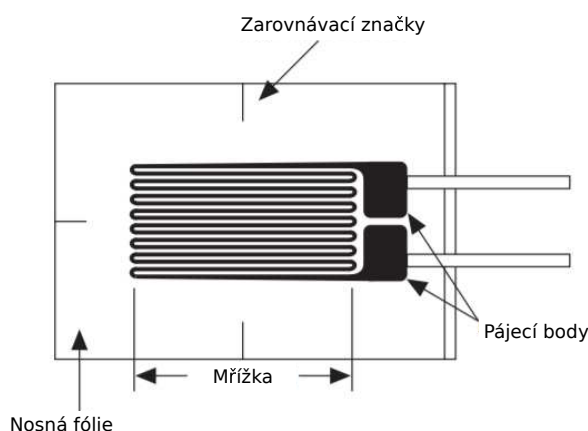
Jak bylo zmíněno výše, v dnešní době jsou pro záznam deformace při SHPB experimentu nejčastěji využívány tenzometry. Tenzometr je pasivní elektrotechnická součástka, jejíž elektrický odpor je přímo závislý na její deformaci. V praxi se využívá celá řada různých provedení a konstrukcí tenzometrů. Nejvíce rozšířeny jsou **tenzometry fóliové**. Tento typ tenzometru je tvořen tenkým odporovým vodičem (často ve formě kovové fólie) uspořádaným do mřížky (obrázek 2.4). Rozměr odporového vodiče ve směru namáhání je maximalizován, aby bylo dosaženo vysoké citlivosti na namáhání v podélném směru a naopak potlačen vliv namáhání ve směru kolmém. Tato mřížka je pevně spojena s nosnou fólií, kterou je možno připevnit na zkoumané těleso. Deformace zkoumaného tělesa je v ideálním případě stejná jako deformace tenzometru, která je podle 2.1 přímo úměrná změně elektrického odporu fóliového tenzometru [8].

$$\frac{\Delta R}{R} = C_1 \varepsilon, \quad (2.1)$$

kde ΔR je změna elektrického odporu tenzometru, R je jeho původní elektrický odpor, ε deformace tenzometru (\sim zkoumaného tělesa) a C_1 je konstanta tenzometru (citlivost).

V technické praxi jsou běžně používány tenzometry s elektrickým odporem o hodnotách 120 Ω , 350 Ω a 1000 Ω . Velkou předností fóliových tenzometrů je lineární závislost změny napětí na

deformaci umožňující měření v širokém rozsahu deformací (až několik tisíc $\mu\varepsilon$) a poměrně malá teplotní závislost měření, umožňující jejich použití v širokém teplotním rozsahu při dostatečné přesnosti.



Obrázek 2.4: Fóliový tenzometr (převzato a upraveno z [8])

Dalším široce využívaným typem jsou **tenzometry polovodičové**. Ty jsou tvořeny tenkým páskem vyříznutým z monokrystalu polovodiče. Mechanické namáhání krystalické mřížky ovlivňuje výrazně pohyblivost nosičů náboje, a tím i měrný odpor materiálu tenzometru. Pro změnu odporu tenzometru platí vztah [8]:

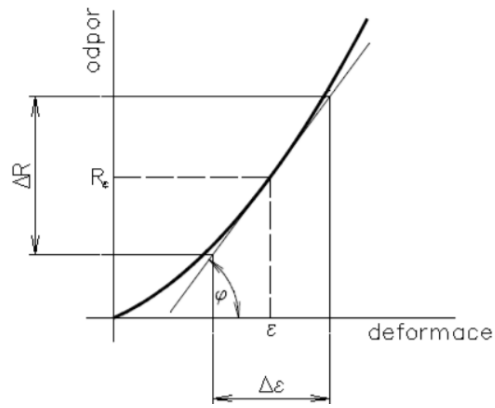
$$\frac{\Delta R}{R} = C_1\varepsilon + C_2\varepsilon^2, \quad (2.2)$$

kde C_1 a C_2 jsou konstanty udávající vlastnosti tenzometru. V porovnání s fóliovými tenzometry vykazují tenzometry polovodičové mnohonásobně větší citlivost, lze s nimi však zaznamenat výrazně menší rozsah měřitelných deformací (až $20\times$ menší [8]) a jejich odpor je také silně teplotně závislý (rozsah měřitelných deformací je pouze asi $2000 \mu\varepsilon$. Změna elektrického odporu je navíc nelineární (viz. obrázek 2.5).

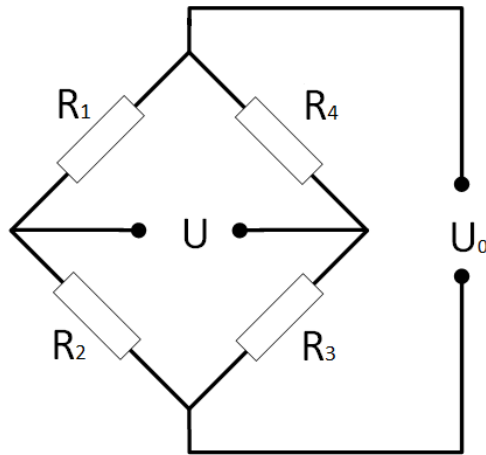
Přímé měření změny odporu tenzometru vyvolané jeho deformací je v praxi problematické. Z tohoto důvodu se změna odporu měří nepřímou jako změna elektrického napětí v můstkovém zapojení, nejčastěji v tzv. *Wheatstoneově můstku*.

Wheatstoneův můstek

Wheatstoneův můstek je elektrický odvod určený k měření neznámé změny elektrického odporu na základě jeho napěťového nevyvážení. Schématické zapojení můstku je na obrázku 2.6. Při deformačních zkouškách jsou pevné rezistory nahrazovány tenzometrem [9].



Obrázek 2.5: Závislost deformace polovodičových tenzometů na změně elektrického odporu (převzato z [10])



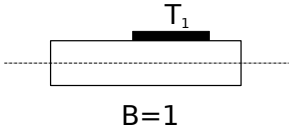
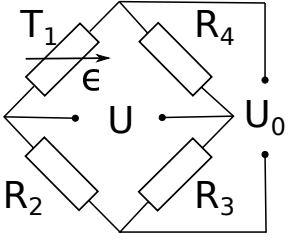
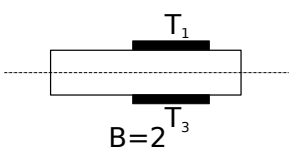
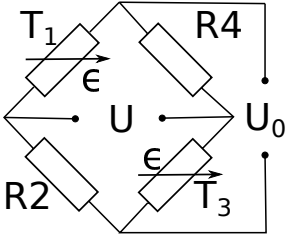
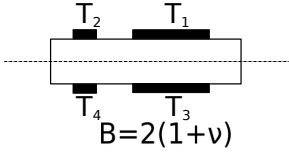
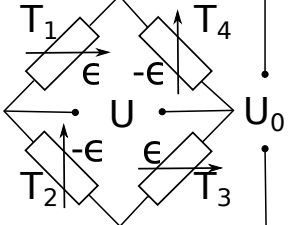
Obrázek 2.6: Základní obvod Wheatstoneova můstku (převzato a upraveno z [9])

Obecný vztah pro přepočítání napětí U naměřeného na můstku na deformaci ε_0 tenzometru má tvar:

$$\varepsilon_0 = \frac{4U}{BKU_0G}, \quad (2.3)$$

kde B je tzv. *Bridge factor*, který odpovídá fyzické konfiguraci tenzometrů na měřeném objektu, K je citlivost tenzometru (pro fóliové tenzometry je $K = C_1$, pro tenzometry polovodičové je $K = C_1 + C_2\varepsilon$), G je zesílení zesilovače a U_0 je napětí zdroje přivedené na tenzometr. Pro měření s využitím SHPB zařízení jsou využívána 3 různá zapojení Wheatstoneova můstku v závislosti na počtu rezistorů, které jsou v obvodu nahrazeny tenzometrem a jejich fyzické konfigurací (viz. tabulka 2.1).

Tabulka 2.1: Typy zapojení Wheatstoneova můstku a jejich fyzická konfigurace

Typ zapojení	Deformace	Konfigurace	Schéma zapojení
(1) Zapojení do čtvrt-můstku	$\varepsilon_0 = \frac{4U}{KU_0G}$	 B=1	
(2) Zapojení do polovičního můstku	$\varepsilon_0 = \frac{2U}{KU_0G}$	 B=2 T ₃	
(3) Zapojení do plného můstku	$\varepsilon_0 = \frac{2U}{(1+\nu)KU_0G}$	 B=2(1+ν)	

Korekce nelinearit tenzometrického měření

Stejně jako každé jiné měření je i měření pomocí tenzometrické aparatury zatíženo chybami, které při větších deformacích způsobují odchylku od lineární závislosti mezi deformací tenzometru a změnou na něm naměřeného elektrického napětí. Chyba způsobená nelinearitou je zpravidla malá a při menších deformacích je jí možné zanedbat. V případě použití polovodičových tenzometrů je závislost deformace na změně napětí výrazně nelineární (2.2) již při velmi malých deformacích. Pro měření provedená na SHPB zařízení je nelinearita způsobená zapojením tenzometrů a jejich typem natolik významná, že je třeba korekci provádět při všech měřeních. Korekční funkce byly v rámci této práce odvozeny ze základních vztahů uvedených v [9, 11]. Výsledné vztahy jsou shrnuty v tabulce 2.2 (ν je Poissonovo číslo).

Tabulka 2.2: Přepočet napětí na deformaci můstku a korekce nelinearity můstku

Typ zapojení	Deformace	Korekce
Fóliový	(1) $\varepsilon_0 = \frac{4U}{C_1 U_0 G}$	$\varepsilon = \frac{2\varepsilon_0}{2-C_1\varepsilon_0}$
	(2) $\varepsilon_0 = \frac{2U}{C_1 U_0 G}$	$\varepsilon = \frac{4\varepsilon_0}{4-C_1\varepsilon_0}$
	(3) $\varepsilon_0 = \frac{1}{2(1+\nu)} \frac{4U}{C_1 U_0 G}$	$\varepsilon = (1+\nu) \frac{4\varepsilon_0}{4(1+\nu)-C_1(1+\nu)\varepsilon_0}$
Polovodičový	(1) $\varepsilon_0 = \frac{-C_1 U_0 + \sqrt{C_1^2 U_0^2 + 16C_2 U U_0}}{2GC_2 U_0}$	$\varepsilon = \frac{-2\varepsilon_0}{C_2 \varepsilon_0^2 + C_1 \varepsilon_0 - 2}$
	(2) $\varepsilon_0 = \frac{-C_1 U_0 + \sqrt{C_1^2 U_0^2 + 8C_2 U U_0}}{2GC_2 U_0}$	$\varepsilon = \frac{-4\varepsilon_0}{C_2 \varepsilon_0^2 + C_1 \varepsilon_0 - 4}$
	(3) $\varepsilon_0 = \frac{-C_1 U_0(1+\nu) + \sqrt{C_1^2 U_0^2(1+\nu)^2 + 8C_2 U U_0(1+\nu)}}{2GC_2 U_0(1+\nu)}$	$\varepsilon = \frac{4(1+\nu)\varepsilon_0}{C_2(1+\nu)\varepsilon_0^2 + C_1(\nu-1)\varepsilon_0 + 4(1+\nu)}$

2.2.4 Měření optickými branami

Kromě tenzometrů je SHPB zařízení velmi často osazováno také sadou laserových fotoelektrických senzorů. Tyto senzory, označované jako optické brány, jsou určeny k detekci polohy. Skládají se ze dvou samostatných částí: zdroje laserového paprsku a jeho přijímače. Obě části jsou instalovány proti sobě tak, aby paprsek emitovaný zdrojem dopadal na senzor přijímače. Ve chvíli, kdy je tento paprsek přerušen detekovaným objektem nacházejícím se mezi přijímačem a emitorem, je v přijímači generován elektrický pulz. Nejčastějším využitím optických bran v aparátu SHPB je měření rychlosti projektilu (strikeru) a ke spouštění záznamu a časové synchronizaci. Z tohoto důvodu se instalují v blízkosti ústí hlavně vzduchového děla.

2.3 Metodika vyhodnocování experimentů

Základem pro vyhodnocování rázové dynamické zkoušky provedené na SHPB zařízení jsou signály získané z tenzometrů a signály z optických bran. Vyhodnocování experimentu lze rozdělit celkem do 7 kroků:

- Zpracování signálů z optických bran
- Filtrování signálů z tenzometrů
- Oříznutí a srovnání signálů
- Výpočet deformace
- Výběr pulzů
- Korekce disperze
- Vyhodnocení

2.3.1 Zpracování signálů z optických bran

Signál získaný z optických bran má podobu napěťového pulzu. V případě, kdy jsou v blízkosti ústí hlavně vzduchového děla instalovány dvě optické brány, je možné z těchto signálů vypočítat přibližnou hodnotu rychlosti projektilu v ústí hlavně. Z rozdílu časů mezi oběma napěťovými pulzy generovanými těmito branami je možné určit čas Δt , udávající dobu průletu strikeru mezi branami. Při znalosti vzdálenosti mezi branami D lze pro rychlost strikeru mezi branami psát:

$$v_s = \frac{D}{t_a - t_b} = \frac{D}{\Delta t}, \quad (2.4)$$

kde t_a a t_b jsou časy jednotlivých pulzů generovaných optickými branami. Vztah 2.4 platí pouze za předpokladu, že se striker v hlavní pohybuje s nulovým zrychlením. Tato podmínka však za normálních okolností splněna není, a proto bylo nutné v případě použitého zařízení odvodit kalibrační proceduru na opravu rychlosti ke konci hlavně.

V tomto případě se jednalo o korekci na konci hlavně, kde jsou časy průletu velmi malé, a proto je možné uvažovat jednoduchý korekční model. Dle tohoto modelu se projektil mezi branami pohybuje s konstantním zrychlením strikeru a_s . Závislost zrychlení a_s a tlaku vzduchu p uvnitř hlavně je lineární:

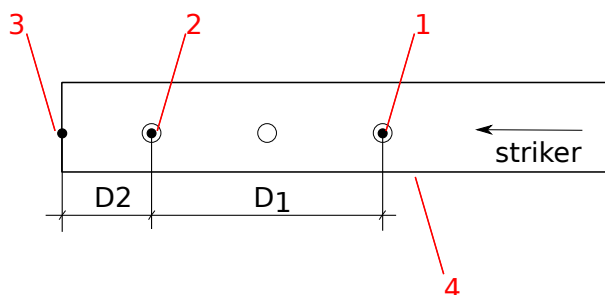
$$a_s = Kp, \quad (2.5)$$

kde K je konstanta, kterou lze určit z kalibračních měření.

Při kalibračním měření je hlaveň vzduchového děla osazena třemi optickými bránami (viz. obrázek 2.7) a pro zrychlení strikeru lze odvodit vztah:

$$a_s = \frac{2(\Delta t_1 D_2 - \Delta t_2 D_1)}{\Delta t_1 \Delta t_2 (\Delta t_1 + \Delta t_2)}, \quad (2.6)$$

kde D_1 je vzdálenost mezi první a druhou optickou bránou, D_2 je vzdálenost mezi druhou a třetí optickou bránou, Δt_1 doba průletu strikeru mezi první a druhou bránou a Δt_2 je doba průletu mezi druhou a třetí bránou.



Obrázek 2.7: Schéma kalibračního měření pro určení zrychlení strikeru: 1-první optická brána, 2-druhá optická brána, 3-třetí optická brána, 4- hlaveň vzduchového děla

Konstantu K lze určit jako aritmetický průměr z konstant K_i odpovídajícím jednotlivým kalibračním měřením při tlacích p_i :

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_{si}}{p_i}}{n}, \quad (2.7)$$

kde a_{si} jsou zrychlení strikeru při kalibračním měření vypočtená ze vztahu 2.6 a n je počet kalibračních měření. Pro rychlost strikeru v_s při nenulovém konstantním zrychlení lze odvodit vztah:

$$v_s = \sqrt{\left(\frac{D}{\Delta t} - \frac{a_s \Delta t}{2}\right)^2 + 2a_s(D + D_0)} = \sqrt{\left(\frac{D}{\Delta t} - \frac{Kp\Delta t}{2}\right)^2 + 2Kp(D + D_0)}, \quad (2.8)$$

kde D_0 je vzdálenost mezi druhou optickou bránou a ústím hlavně vzduchového děla. Dále lze určit teoretickou deformaci ε_e vzorku vyvolanou nárazem strikeru o rychlosti v_s a také hodnotu očekávaného maximálního napětí σ_e ve vzorku v průběhu deformace [12].

$$\varepsilon_e = \frac{v_s}{2C_t}, \quad (2.9)$$

$$\sigma_e = \frac{1}{2}\rho_t C_t v_s, \quad (2.10)$$

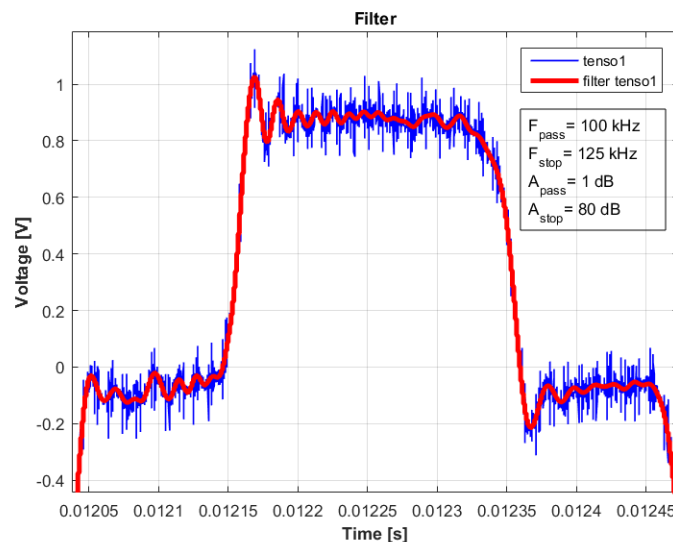
kde C_t je rychlost šíření zvukové vlny v tyčích a ρ_t hustota tyčí.

2.3.2 Filtrování signálů z tenzometrů

I přes použití nízkošumového zesilovače jsou signály získané z tenzometrů zatíženy nezanedbatelným šumem. Pro redukci tohoto šumu je tak nutné kromě metod pro redukci šumu v elektrickém obvodu na surová data aplikovat vhodný filtr, než je možné přikročit k samotnému vyhodnocování. Pro potřeby této práce byl použit **Butterworthův filtr**, který se vyznačuje maximálně plochou amplitudovou charakteristikou v propustném pásmu a nejmenším fázovým zkreslením. Procedura pro výpočet Butterworthova filtru je implementována v prostředí Matlab (Mathworks Inc.), zde je uveden pouze jeho obecný předpis:

$$|H(f)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{B}\right)^{2n}}}, \quad (2.11)$$

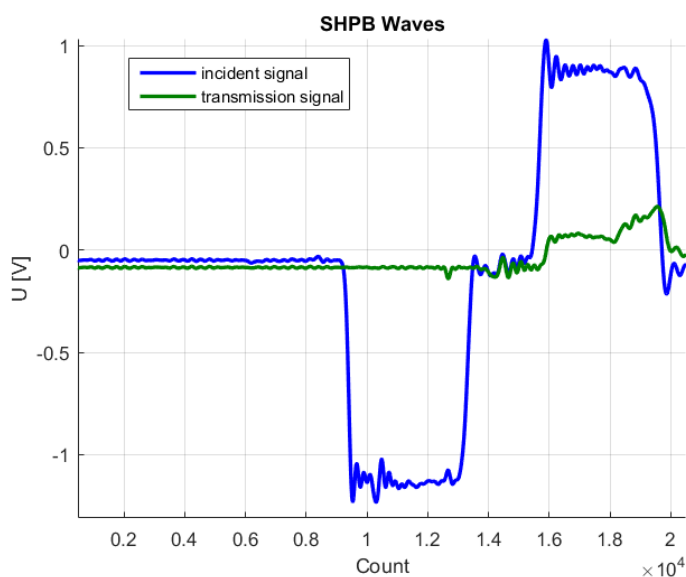
kde f odpovídá původnímu signálu, B je šířka pásmové propusti filtru a n stupeň filtru. Vstupem pro proceduru ve výpočetním prostředí Matlab jsou konstanty F_{pass} , F_{stop} , definující přechodovou oblast za propustným pásmem a A_{pass} , A_{stop} , které odpovídají zesílení v propustném a nepropustném pásmu dB. Na obrázku 2.8 je zobrazen zpracovávaný signál před a po aplikaci Butterworthova filtru.



Obrázek 2.8: Aplikace Butterworthova filtru na experimentální data

2.3.3 Oříznutí a srovnání signálů

Signály zaznamenané tenzometry mají typicky až několik stovek tisíc vzorků. Pro vyhodnocení experimentu jsou však postačující pouze první zaznamenané pulzy odpovídající elastické vlně vyvolané nárazem strikeru do incidentní tyče, vlně odražené na rozhraní incidentní tyče a zkoumaného vzorku a vlně prošlé do transmisní tyče. Za účelem snížení výpočetní náročnosti je třeba ze signálů vybrat pouze tuto část a pro další výpočty použít pouze vybranou část signálu. Dalším krokem je srovnání klidových signálů z tenzometrů na nulovou úroveň. Jak je vidět na obrázku 2.9, část signálu před průchodem elastického pulzu je pod nulovou hodnotou napětí. Pro další vyhodnocení je třeba všechny signály srovnat na nulovou hodnotu, aby byla co nejvíce eliminována případná chyba vyhodnocení a nezanášely se chyby do výpočtu deformace při nelineárních přepočtech.



Obrázek 2.9: Srovnání signálů na nulovou hodnotu

2.3.4 Výpočet deformace

Oříznuté a na nulu srovnané signály je třeba dále přepočítat z hodnot odpovídajících změně napětí na tenzometru na skutečnou deformaci způsobenou nárazem strikeru do soustavy měřicích tyčí. Přepočet je proveden za použití vztahů uvedených v tabulce 2.1 v závislosti na typu použitých tenzometrů a způsobu jejich zapojení. Následně je provedena korekce nelinearit podle vztahů uvedených v tabulce 2.1.

2.3.5 Výběr pulzů

Výběr pulzů elastické deformační vlny šířící se incidentní a transmisní tyčí je nutné provádět s dostatečnou přesností. Často jsou využívány různé softwarové nástroje pro hledání hran, aby byla co nejvíce eliminována chyba při výběru. Časy t_{1i} a t_{2i} odpovídající náběžným hranám incidentního pulzu jsou nalezeny buď pomocí zmíněného algoritmu, nebo vybrány manuálně. Teoretickou šířku incidentního pulzu lze určit pomocí vztahu:

$$\Delta T = \frac{2d_o l_s}{C_t}, \quad (2.12)$$

kde d_o je koeficient šířky časového okna, C_t je rychlost šíření mechanické vlny v tyčích a l_s je délka strikeru. Pro získání skutečných časů t_1 a t_2 odpovídající začátku a konci incidentního pulzu je nutné časový interval ΔT aplikovat symetricky na nalezený incidentní pulz. Označíme-li vzdálenost incidentního tenzometru od čela incidentní tyče jako d_i (v Kolského sestavení odpovídá polovině délky incidentní tyče) a vzdálenost transmisního tenzometru od čela incidentní tyče (v Kolského sestavení odpovídá polovině délky transmisní tyče + délce zkoumaného vzorku), lze pro časy t_3 a t_4 odpovídající začátku a konci odraženého pulzu lze psát vztahy:

$$t_3 = t_1 + \frac{2d_i}{C_t} \quad (2.13)$$

$$t_4 = t_2 + \frac{2d_i}{C_t} \quad (2.14)$$

Obdobně pro časy t_5 a t_6 označující konec transmisního pulzu:

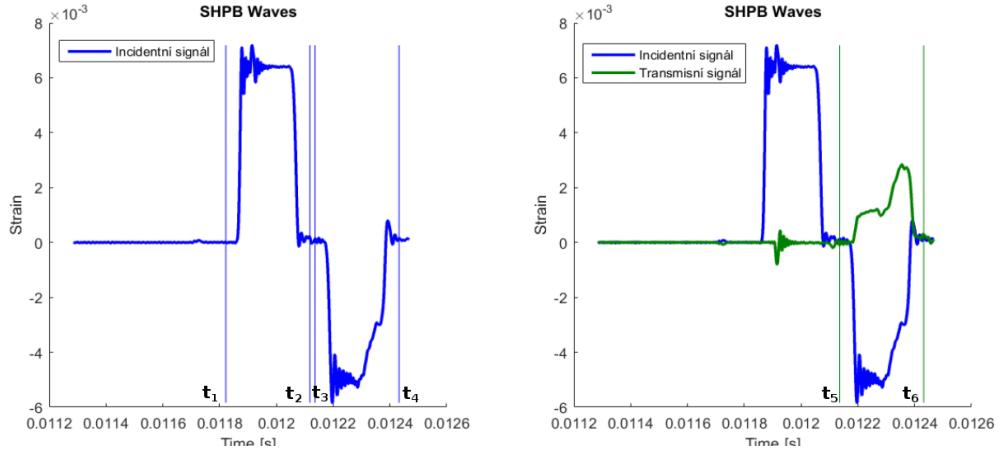
$$t_5 = t_1 + \frac{(d_i + d_t)}{C_t} \quad (2.15)$$

$$t_6 = t_2 + \frac{(d_i + d_t)}{C_t} \quad (2.16)$$

Proces výběru pulzu je naznačen na obrázku 2.10.

2.3.6 Korekce disperze

Rychlost, s jakou se elastické deformační vlny šíří měřicími tyčemi s nenulovým průřezem konečné délky, je závislá na jejich vlnové délce (frekvenci) [12]. Elastické vlny vyšších frekvencí se zpožďují, a tím zkreslují signály v měřících bodech. Tento jev se nazývá vlnová disperze. Bez vhodné korekce se může deformace a napětí vyhodnocené z experimentu výrazně lišit od skutečných hodnot. V rámci úvodních studií byly provedeny korekce založené na teoretických poznatcích o šíření vlny v prostředí [12]. Toto řešení se ukázalo jako neuspokojivé, a proto je v současnosti pro korekci disperze využívána metoda založená na experimentálních poznatcích. Aby bylo možné



Obrázek 2.10: Proces výběru pulzů z naměřeného signálu

provést efektivní korekci disperze, je nejdříve třeba provést tzv. void testy (kalibrační měření) se stejnou měřicí aparaturou. Při prvním kalibračním měření jsou čelní plochy tyčí nastaveny tak, aby se přímo dotýkaly. Pro druhé kalibrační měření čelní plochy tyčí v kontaktu nejsou. Měření deformace v tomto případě probíhá stejně jako při normálním měření. Z kalibračních testů je možné získat průběhy incidentního a reflektovaného popř. transmisního pulzu v jednotlivých měřicích místech. Z nich lze po Fourierově transformaci měřených signálů možné určit přenosovou funkci $H^*(\omega)$ a pomocí ní propagační funkci šíření vln v tyči $\gamma(\omega)$ reprezentovaný zesílením jednotlivých frekvencí v systému a fázovým zpožděním jednotlivých frekvencí v systému. Pomocí přenosové funkce $H^*(\omega)$ lze propagační funkci určit na základě vztahu [13, 14, 15]:

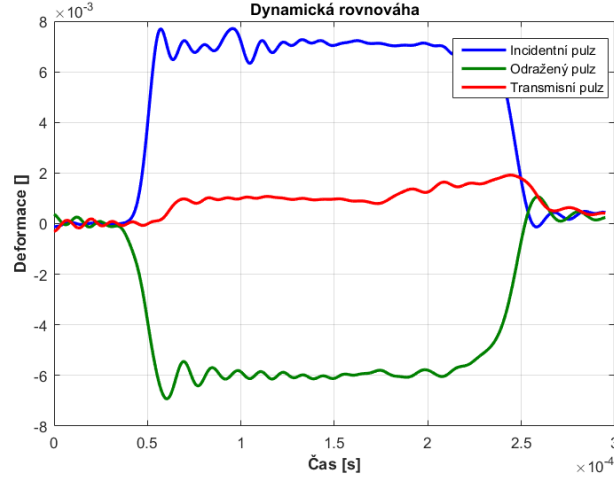
$$H^*(\omega) = -\frac{\tilde{\varepsilon}_1(\omega)}{\tilde{\varepsilon}_2(\omega)} = e^{-\gamma(\omega)2d}, \quad (2.17)$$

kde $\tilde{\varepsilon}_1(\omega)$ a $\tilde{\varepsilon}_2(\omega)$ jsou obrazy deformací ve Fourierově transformaci a d je vzdálenost mezi měřicím místem a čelem měřící tyče.

2.3.7 Vyhodnocované veličiny

Z předcházející analýzy lze určit incidentní, transmisní a odražený pulz šířící se SHPB soustavou měřicích tyčí. Příklad vybraných pulzů je zobrazen na obrázku 2.11. Každý z těchto pulzů je reprezentován průběhem deformace, pro jednoduchost lze zavést označení:

- ε_i pro incidentní pulz
- ε_t pro transmisní pulz
- ε_r pro odražený pulz



Obrázek 2.11: Incidentní, transmisní a odražený pulz

Z jednorozměrné analýzy elastických vln lze určit tyto základní veličiny [14]:

Rychlost deformace vzorku $\dot{\varepsilon}$:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{-C_t}{L_s}(-\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \quad (2.18)$$

Podélná deformace vzorku ε :

$$\varepsilon(t) = \frac{-C_t}{L_s} \int_0^t \dot{\varepsilon}(t) dt = \frac{-C_t}{L_s} \int_0^t (-\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) dt \quad (2.19)$$

Napětí vyvolané ve vzorku σ :

$$\sigma(t) = \frac{EA_t}{2A_s}(\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t), \quad (2.20)$$

kde C_t je rychlost šíření vlny v tyčích, L_s je délka vzorku, t je doba trvání experimentu, E je Youngův modul pružnosti tyčí v tahu, A_t je příčný průřez tyčí a A_s je příčný průřez vzorku. Pro síly, kterými tyče působí na vzorek, lze v případě, že je materiál tyčí lineárně elastický, psát:

$$F_i = A_t E (\varepsilon_i + \varepsilon_r) \quad (2.21)$$

$$F_t = A_t E \varepsilon_t \quad (2.22)$$

Je-li vzorek ve stavu rovnovážné napjatosti, neboli síly F_i , F_t jsou v rovnováze, platí:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_i + \varepsilon_r, \quad (2.23)$$

pak lze vztahy 2.18-2.20 zjednoduřit:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{-2C_t}{L_s} \varepsilon_r \quad (2.24)$$

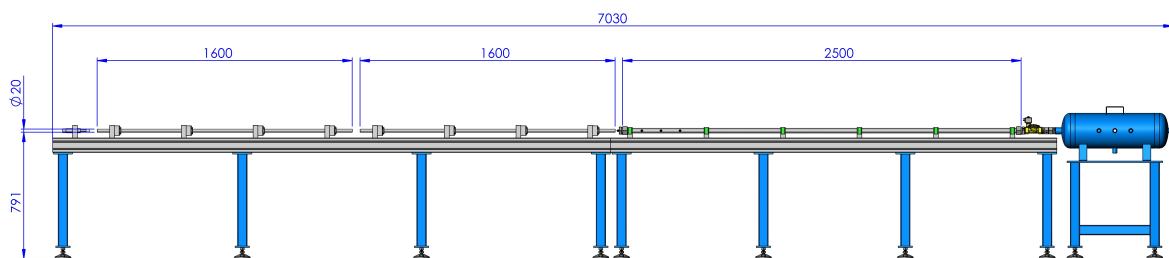
$$\varepsilon(t) = \frac{-2C_t}{L_s} \int_0^t \varepsilon_r(t) dt \quad (2.25)$$

$$\sigma(t) = \frac{EA_t}{A_s} \varepsilon_t \quad (2.26)$$

Kapitola 3

Experimentální zařízení na Fakultě dopravní

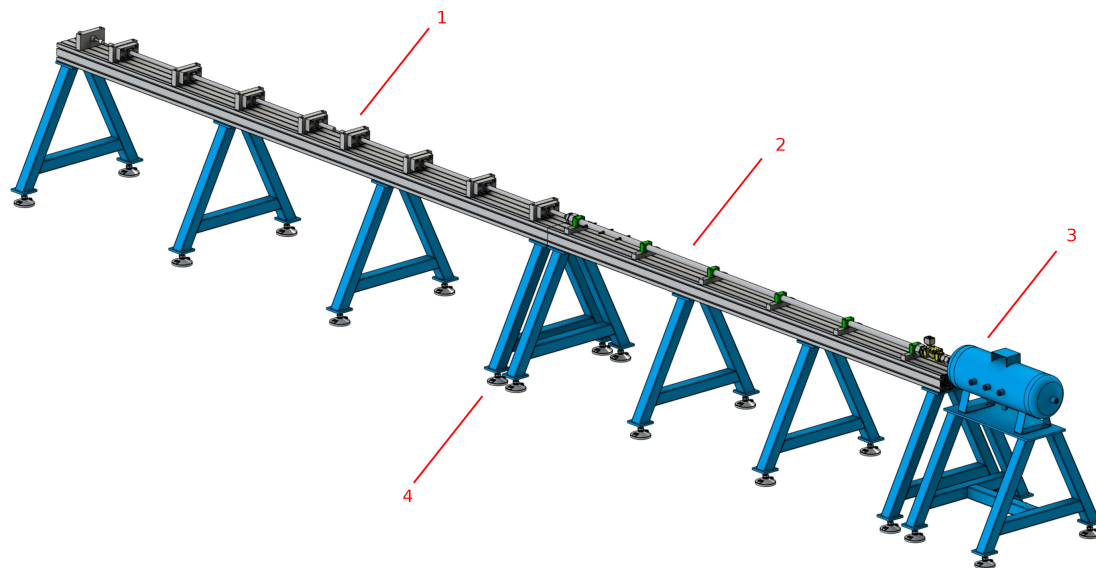
Experimenty vyhodnocované v rámci ověření funkčnosti navrženého uživatelské rozhraní byly prováděny na SHPB zařízení a ústavu K618 Fakulty dopravní ČVUT, pro které je navržen řešení určeno. Zařízení je konstruováno jako Kolského tyč s několika modifikacemi. Na obrázku 3.1 je zobrazeno jeho schéma se základními rozměry. Vlastní Kolského aparát měřicích tyčí a hlavěň vzduchového děla je upevněna na sadě osmi ocelových stojanů s regulovatelným nastavením výšky. Pro zajištění volného pohybu tyčí pouze v podélné ose je sestava vybavena celkem osmi kluznými ložisky z polymerního materiálu s nízkým třením umístěnými v hliníkových ložiskových domcích (Drylin FJUM domek, IGUS, Německo). Vzdušník vzduchového děla o objemu 20 litrů je umístěn na samostatném ocelovém stojanu a je spojena s hlavní přes vysokotlaký ventil s rychlým otevřením (366531, Parker, USA).



Obrázek 3.1: Schéma SHPB zařízení se základními rozměry na ústavu K618 Fakulty dopravní

3.1 Popis experimentálního zařízení

V následující části jsou podrobně popsány jednotlivé funkční části experimentálního zařízení. Na obrázku 3.2 je zobrazena 3D vizualizace celého zařízení s jeho hlavními komponentami.

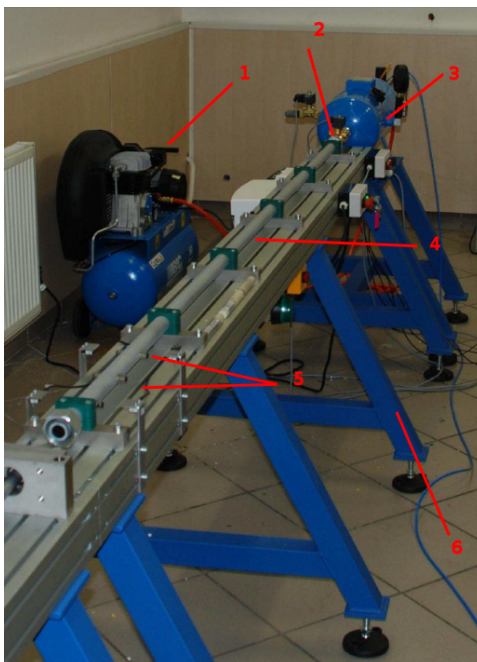


Obrázek 3.2: 3D vizualizace SHPB zařízení s hlavními komponenty: 1-Systém měřících tyčí, 2-hlaveň vzduchového děla, 3 -vzdušník, 4-podpěrná konstrukce

3.1.1 Vzduchové dělo

Vzduchové dělo využívané pro urychlení strikeru je konstruováno na maximální provozní tlak 16 Bar. Nejčastěji je pro měření používán striker délky 500 mm o průměru 20 mm (odpovídající průměru hlavně vzduchového děla). Systém vzduchového děla dále obsahuje tlakovou nádobu o objemu 20 litrů (vzdušník), kompresor, manometr pro kontrolu tlaku v nádobě a vysokotlaký ventil se systémem rychlého otevření. Po otevření tohoto ventilu je striker urychlován v ocelové hlavni o délce 2500 mm. V blízkosti ústí hlavně je hlaveň opatřena třemi otvory, z nichž oba krajní jsou osazeny optickými bránami pro snímání pohybu strikeru v hlavni. Záznam těchto senzorů slouží pro určení ústové rychlosti strikeru. Celé uspořádání je zachyceno na obrázku 3.3.

Dalšími částmi vzduchového děla jsou přívodní vedení vzduchu, elektrická výbava, bezpečnostní výstražné prvky a podpěrná konstrukce s nastavitelnou výškou.

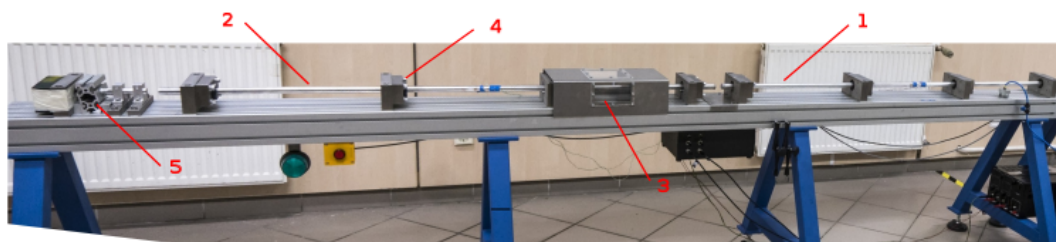


Obrázek 3.3: Komponenty vzduchového děla: 1-kompresor, 2-ventil s rychlým otevřením, 3-vzdušník, 4-hlaveň, 5-optické brány, 6-podpěrná konstrukce

3.1.2 Měřicí tyče

Transmisní a incidentní tyč o délce 1600 mm mají stejně jako striker průměr 20 mm. Jsou vyrobeny z vysokopevnostní slitiny hliníku (EN-AW-7075). Použité extrudované tyče mají minimální podélné zakřivení a jen velmi malé odchylky v průměru (tolerance h11). Povrch tyčí je broušen a velmi pečlivě vyleštěn pro zajištění co nejmenšího tření v ložiskových domcích. Díky tomu je dosaženo přímosti v podélném směru s odchylkou méně než 1 mm/m a tření v domcích je minimalizováno. Čelní plochy tyčí jsou opracovány pomocí přesného broušení a pečlivě vyleštěny. Pomocí ložiskových domků jsou obě tyče ustaveny do polohy, kdy jsou čelní plochy tyčí v plném kontaktu obou ploch. Odchylka kontaktu se pohybuje v řádu desítek mikrometrů. Místo, kde se obě tyče setkávají a kde je také umístěn zkoumaný vzorek, je zabezpečeno krytem opatřeným průzory z tvrzeného plexiskla umožňujícími sledovat deformaci vzorku pomocí rychloběžné kamery. Pevně uchycená tyč z hliníkové slitiny spojená s hydraulickým tlumičem je umístěna za transmisní tyčí a je určena k absorpci zbytkové kinetické energie tyčí. Na čelo incidentní tyče je zpravidla připevněn tzv. pulse-shaper.

Pulse-shaper je tenký válcový plíšek z měkkého materiálu (typicky vyžíhané mědi), který svou plastickou deformací při nárazu strikeru mění tvar deformační vlny a omezuje disperzní chování vlny v měřicích tyčích. Celý aparát je zobrazen na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Soustava měřicích tyčí: 1-incidentní tyč, 2-transmisní tyč, 3-bezpečnostní kryt, 4-ložiskové domky, 5-tlumič

3.1.3 Instrumentace

Pro přesný záznam deformace vzorku je měřicí zařízení osazeno celou řadou senzorů. Incidentní i transmisní tyč je ve svém středu osazena tenzometry. Obvykle jsou používány 2 typy tenzometrů:

- fóliové kovové tenzometry (3/120 LY61, HBM, Německo), délky 3 mm o elektrickém odporu 120Ω
- polovodičové tenzometry (AP120-3-12, VTS Zlín, Česká republika), délky 3 mm o elektrickém odporu 1000Ω

Fóliové tenzometry mají výrazně menší citlivost než tenzometry polovodičové, jsou však schopny měřit až $20\times$ větší deformaci. Závislost deformace na změně napětí je navíc lineární, což usnadňuje vyhodnocování experimentu. Délka mřížky používaných senzorů je 3 mm, což snižuje vliv integrace deformačních vln v okolí tenzometru, a tím umožňuje přesnější interpretaci naměřených hodnot deformační vlny. Tenzometry jsou v každém měřicím bodě zapojeny do Wheatstoneova můstku. Používány jsou 3 varianty jeho zapojení uvedené v tabulce 2.1. Signál získaný z tenzometrů je veden na aktivní diferenciální zesilovač (EL-LNA- 2, Elsys AG, Švýcarsko) se zesílením 10 (šířka pásma 20 MHz) nebo 100 (15 MHz). Zesílený signál je následně navzorkován s využitím vysokorychlostního digitalizéru (PCI-9826H, ADLINK Technology, Inc., Taiwan) s maximální vzorkovací frekvencí 20 MHz. Deformace vzorku je v průběhu experimentu obvykle snímána rychloběžnou kamerou pro vizuální kontrolu experimentu a pozdější vyhodno-

čení metodou digitální korelace obrazu. Konec hlavně vzduchového děla je osazen fotoelektrickými laserovými senzory (FS/FE 10-RL-PS-E4, Sensopart, Německo). Záznam napětí tenzometry a případně i rychloběžná kamera jsou triggerovány pomocí optických bran umístěných u ústí hlavně vzduchového děla, čímž je zaručena synchronizace obou záznamů.

3.2 Oblast využití experimentálního zařízení

Experimentální zařízení vyvinuté na ústavu K618 Fakulty dopravní je možné používat pro mechanické zkoušky široké škály materiálů. V první řadě se jedná o celou řadu materiálů používaných v dopravních aplikacích. Oblast využití zahrnuje nejenom běžné kovové materiály pro konstrukci dopravních prostředků, ale také moderní materiály vyvíjené za účelem pohlcování velkého množství kinetické energie. Jako příklad lze uvést materiály tištěné na 3D tiskárně, auxetické materiály, různé druhy kovových pěn atp.

3.2.1 Modifikace

V porovnání s konvenčním Kolského aparátem popsaným v kapitole 1 je použité experimentální zařízení na Fakultě dopravní modifikováno. Použité tyče jsou vyrobeny ze slitiny hliníku (EN-AW-7075) pro snížení jejich mechanické impedance, čímž je docíleno přiblížení se impedanci zkoumaných materiálů. Čelní plocha incidentní tyče je osazována pulse-shaperem pro snížení disperze elastické vlny šířící se měřicími tyčemi. Toto zařízení také umožňuje provádět tenzometrická měření na několika měřících bodech zároveň při použití různých typů tenzometrů.

3.2.2 Kalibrace a korekce nelinearit

Stejně jako všechna ostatní zařízení pro mechanické zkoušky materiálů je i experimentální zařízení na Fakultě dopravní zatíženo mnoha chybami, a je třeba ho kalibrovat popř. provést korekce naměřených signálů. Je používána kalibrace síly na základě signálů ze siloměru a tenzometrů. Dále jsou prováděny tzv. Void testy pro srovnání chování tenzometrů na jednotlivých měřících místech a ověření jejich dostatečné linearity. Tyto testy navíc slouží k získání vstupních dat pro korekci disperze [12]. Dále je prováděna korekce nelinearit tenzometrů podle vztahů uvedených v tabulce 2.2. Korekce pro zrychlení strikeru v hlavní vzduchového děla je prováděna podle vztahu 2.8.

Kapitola 4

Vyhodnocovací software

Hlavním cílem této práce bylo vytvořit soubor softwarových nástrojů, které je možné použít pro zpracování surových dat zaznamenaných v průběhu dynamického kompresního testu na Hopkinsonově dělené tyči. Za tímto účelem byla vytvořena sada externích funkcí pro řešení dílčích úloh vyhodnocení, které byly implementovány do modulárního grafického uživatelského rozhraní umožňujícího rychlé a spolehlivé vyhodnocení. Všechny softwarové komponenty byly realizovány v prostředí Matlab (Mathworks Inc.), které umožňuje snadnou tvorbu vlastního grafického rozhraní a také snadnou implementaci externích funkčních bloků, která byla pro tvorbu této práce klíčová.

4.1 Vstupní data a jejich příprava

Během experimentu je zaznamenávána změna napětí celkem na čtyřech měřících bodech. První dva body představují optické brány umístěné na hlavní kompresního děla. Signál zaznamenaný bránami je klíčový k určení rychlosti projektilu a synchronizaci celého experimentu. Dalšími záznamy jsou změny napětí způsobené deformací tenzometrů umístěných ve střední části incidentní a transmisiční tyče měřícího zařízení. Během testu je běžně zaznamenáno několik milionů záznamů, vzorkovací frekvence záznamů 20 Mhz. Výsledný textový soubor ve formátu *ASCII text file* (zkráceně **.txt*) má celkem 5 sloupců, přičemž pátý sloupec představuje čas pořízení jednotlivých vzorků v sekundách. Všechny zbývající sloupce představují úroveň napětí ve volttech. Ukázka vstupního textového souboru je zobrazena níže. Datový soubor obsahující naměřené úrovně napětí pro jednotlivé měřící body a časovou osu je pro potřeby automatizace vyhodnocení nutno opatřit vhodnou hlavičkou obsahující všechny potřebné informace (např. úrovně budících napětí můstků, tlak a geometrické poměry).

Čas	Optická brána 1	Optická brána 2	Tenzometr 1	Tenzometr 2
0.000000	-0.001221	0.000763	0.099030	0.062866
5.000000E-8	-0.000916	0.001678	0.098724	0.060577
1.000000E-7	-0.000763	0.001678	0.090485	0.056610
1.500000E-7	-0.001068	0.001221	0.089264	0.051880
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0.050000	3.347015	3.345642	0.034180	-0.099182

4.1.1 Návrh hlavičky experimentálních dat

Aby bylo možné experimenty automaticky vyhodnotit, je třeba naměřená surová data pevně spojit s hlavičkou obsahující všechny doplňující parametry měření a informace. Tato hlavička je k souboru přidána s využitím grafického nástroje v prostředí Labview (National Instruments, USA) a výsledný soubor uložen ve formátu **.ini* (z anglického Initialization file), který je vhodný pro načtení do prostředí Matlab. Záznam experimentálních veličin a ovládání experimentů je prováděno s využitím tohoto grafického nástroje v prostředí Labview, jehož tvorba byla náplní diplomové práce kolegy Jana Falty. Samotná hlavička obsahuje několik sekcí, z nichž každá obsahuje parametry týkající se experimentu, vzorku, použitých senzorů atd. Ukázka části hlavičky je uvedena níže, celá hlavička včetně popisu všech veličin, které obsahuje, je uvedena v příloze 1. Pro načtení dat obsažených v hlavičce do prostředí matlab byla použita funkce *inifile.m* (© Primoz Cermelj, Slovinsko) a umístěná k volnému užití na webových stránkách MathWorks Inc.

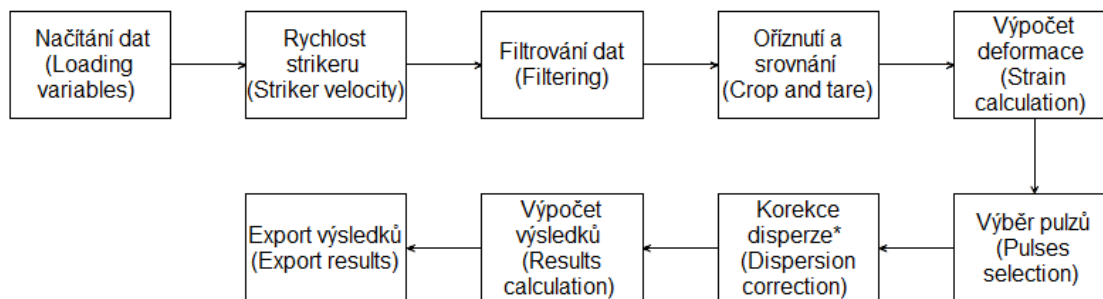
[Experiment] Experiment ID=BF17032017

[Speciment] Speciment ID=BF001 Length=5 Crossection=2 Material= Al Notes= sample
slightly damaged, surface uneven

[Setup settings] Preasure=5000 Sample rate=200e5 Measuring point 1 Strain gage
voltage U1=3.104 Amplification=100

4.2 Grafické uživatelské rozhraní

Grafické rozhraní (dále jen GUI¹) pro vyhodnocování experimentů bylo realizováno v prostředí Matlab. Všechny grafické prvky byly zvoleny tak, aby umožnily intuitivní ovládání a vedly uživatele při vyhodnocování. Okno GUI je vertikálně rozděleno na dvě funkční poloviny. Levá část slouží k vyhodnocování, tj. zadávání číselných hodnot a ovládání výpočtů prováděných implementovanými funkcemi. Pravá část umožňuje zobrazit grafickou reprezentaci veličin vypočtených pomocí voleb na straně levé. Jak bylo zmíněno výše, postup vyhodnocování lze rozdělit do několika samostatných funkčních bloků. Toto rozdělení bylo základem pro rozdělení samotného GUI celkem na 9 samostatných částí, z nichž každá byla realizována na samostatné kartě (záložce). Jak je patrné z diagramu zobrazeného na obrázku 4.1, postup vyhodnocování experimentu je lineární proces. Uživateli není umožněno vynechat některou z karet a postupovat o více než jednu kartu dopředu. Výjimku tvoří pouze karta číslo 7, jelikož korekci disperze není vždy nutné provádět. Postup vpřed je umožněn vždy po ukončení výpočtů na aktivní kartě. Postup zpět je možný kdykoli, a to buď použitím funkčního tlačítka *back* nebo návratem na libovolnou kartu. Při návratu zpět však uživatel ztrácí celý dosud provedený postup vyhodnocování a musí pokračovat ve vyhodnocování od zvolené karty. V horní části je umístěn panel nástrojů určený pro manipulaci s grafy zobrazenými v pravé části okna.

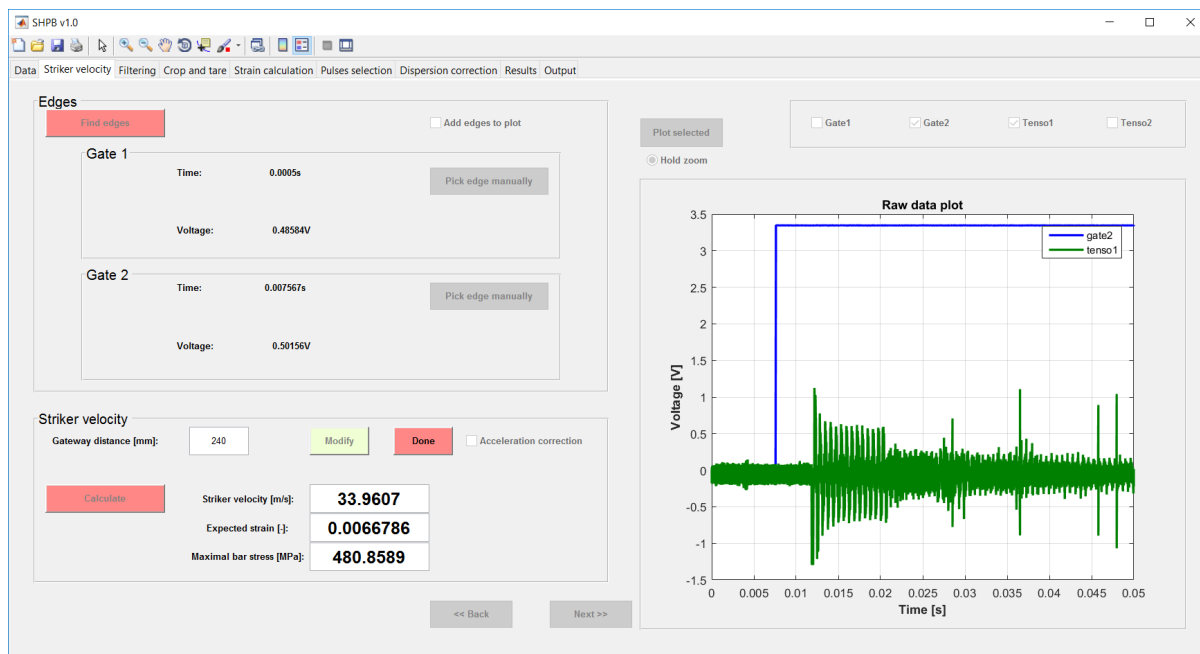


*Korekce disperze je volitelná a tento blok lze při vyhodnocování vynechat

Obrázek 4.1: Postup vyhodnocování experimentu

¹z angl. *Graphic User Interface*

Ukázka GUI je zobrazena na obrázku 4.2. Pro větší intuitivnost byly jednotlivé prvky odděleny také barevně. Prvky, označené červenou barvou je vždy nutné aktivovat při postupu vyhodnocování. Prvky, jejichž funkce čeká na potvrzení uživatelem, jsou označeny žlutou barvou.



Obrázek 4.2: Náhled grafického uživatelského rozhraní

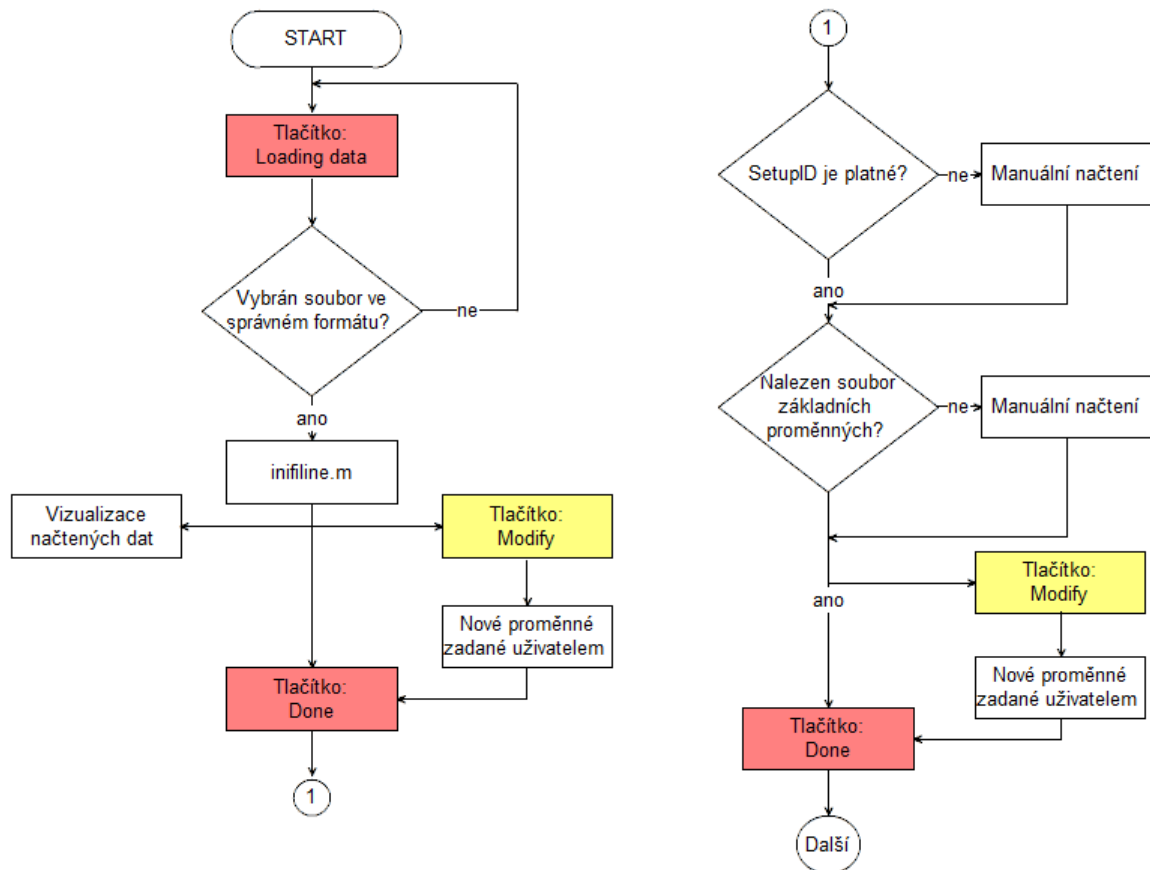
4.2.1 Funkce jednotlivých karet

V dalším textu budou podrobně popsány funkce jednotlivých karet GUI tak, jak jdou chronologicky za sebou.

Karta 1: Data

První karta slouží k načtení surových dat zaznamenaných tenzometrickými snímači a optickými branami, proměnných z hlavičky experimentálních dat a všech zbývajících proměnných potřebných pro vyhodnocení experimentu. Po spuštění GUI jsou všechny prvky karty kromě tlačítka *Loading variables* neaktivní. Bez načtených dat není možné použít žádný z prvků na první kartě. Stisknutím tlačítka je spuštěna funkce načítající soubor ve formátu **.ini* do mezipaměti. Pro načtení dat obsažených v hlavičce je použita převzatá funkce *inifile.m*. Po načtení všech proměnných a dat jsou proměnné zobrazeny v tabulce a zároveň je zpřístupněna vizualizace v pravé části grafického okna. Uživatel má možnost všechny proměnné modifikovat. Po jeho potvrzení stisknutím tlačítka *Done*, jsou na základně unikátního identifikátoru *SetupID* (reprezentující např.

materiál tyčí, použitý striker apod.) načteny další proměnné, které odpovídají zvolenému experimentálnímu setupu. Dále jsou načteny také všechny základní proměnné, které nejsou pevně spojeny s použitým experimentálním setupem a je možné je během vyhodnocování dále modifikovat. Ve chvíli, kdy jsou všechny proměnné a experimentální data načteny, je o tom uživatel informován prostřednictvím *message boxu* a tlačítko pro přechod na další kartu je zpřístupněno. Vývojový diagram postupu vyhodnocování na první kartě je zachycen na obrázku 4.3.

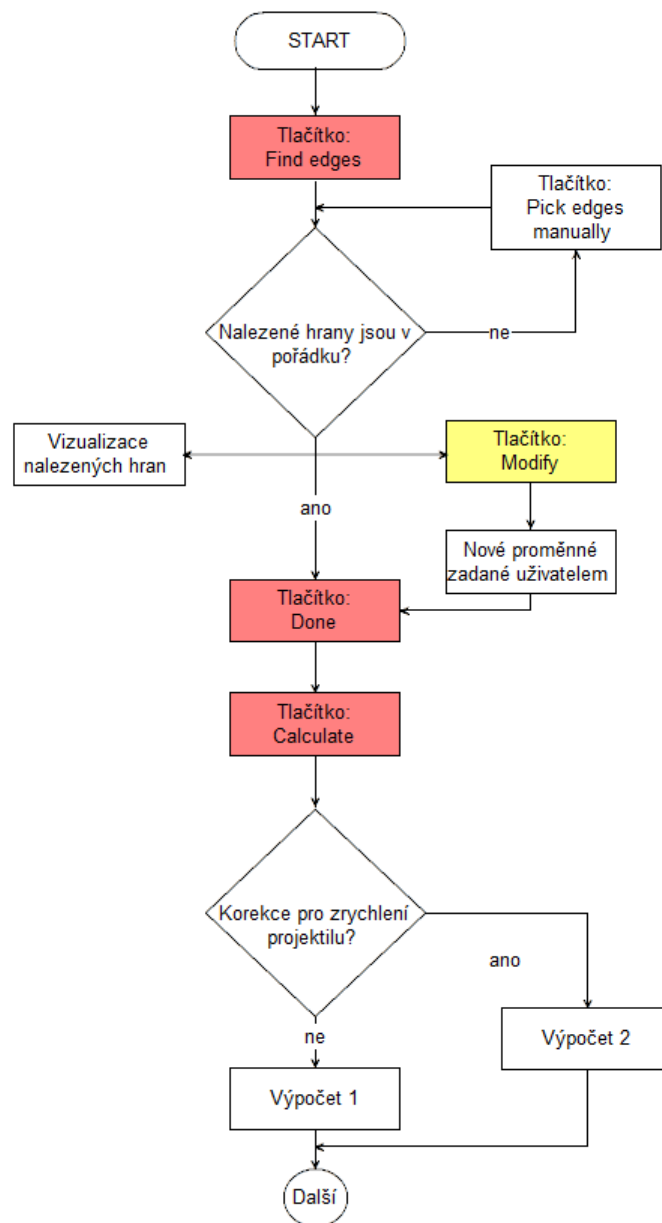


Obrázek 4.3: Vývojový diagram pro načítání dat

Karta 2: Striker velocity

Karta číslo 2 umožňuje uživateli výpočet rychlosti strikeru, očekávané deformace vzorku a maximálního napětí ve vzorku. Po přechodu na tuto kartu je pro uživatele opět přístupný pouze jeden ovládací prvek v podobě tlačítka *Find edges*. Tlačítko spouští proceduru hledání náběžných hran v signálech zaznamenaných optickými branami. Základem této procedury je hledání maxima derivace signálu z optické brány. O nalezení hran je uživatel informován a hodnoty napětí, ve kterých byly hrany nalezeny, jsou zobrazeny v okně aplikace. Alternativně může uživatel náběžné hrany vybrat manuálně v grafu v pravé části aplikace. Dále je možné modifikovat hod-

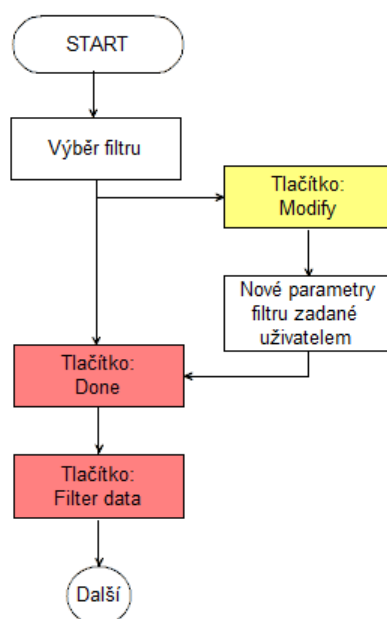
notu vzdálenosti mezi optickými branami výběrem tlačítka *Modify*. Po potvrzení je možné přejít k výpočtu rychlosti strikeru v_s , očekávané deformace vzorku ε_e a maximálního napětí ve vzorku σ_e podle vztahů uvedených 2.3.7. Výpočet zmíněných veličin je spuštěn výběrem tlačítka *Calculate*. Použitím možnosti *Acceleration correction* může uživatel změnit výpočet rychlosti strikeru na výpočet zahrnující zrychlení strikeru v hlavní vzduchového děla podle vztahu 2.8. Proběhne-li výpočet úspěšně, je o tom uživatel informován a hodnoty vypočtených veličin jsou v aplikaci zobrazeny. Následně je umožněn přechod na další kartu. Vývojový diagram postupu vyhodnocování na druhé kartě je zachycen na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4: Vývojový diagram pro výpočet rychlosti projektilu

Karta 3: Filtering

Účelem třetí karty je filtrace signálů zaznamenaných tenzometry. Uživatel má možnost zvolit si typ použitého filtru a nastavit jeho parametry. V současné době je implementován pouze *Butterworthův filtr*, ale do budoucna je díky modularitě řešení možné aplikaci rozšířit o další možnosti filtrace. Po volbě typu a parametrů filtru uživatelem je zpřístupněno tlačítko *Filter data*. Toto tlačítko volá proceduru pro výpočet filtru dle nastavených parametrů a jeho aplikaci na načtené signály. Po úspěšném výpočtu je zpřístupněna možnost vizualizace filtrovaných dat zároveň s možností přechodu na další kartu. Vývojový diagram postupu vyhodnocování na třetí kartě je zachycen na obrázku 4.5.

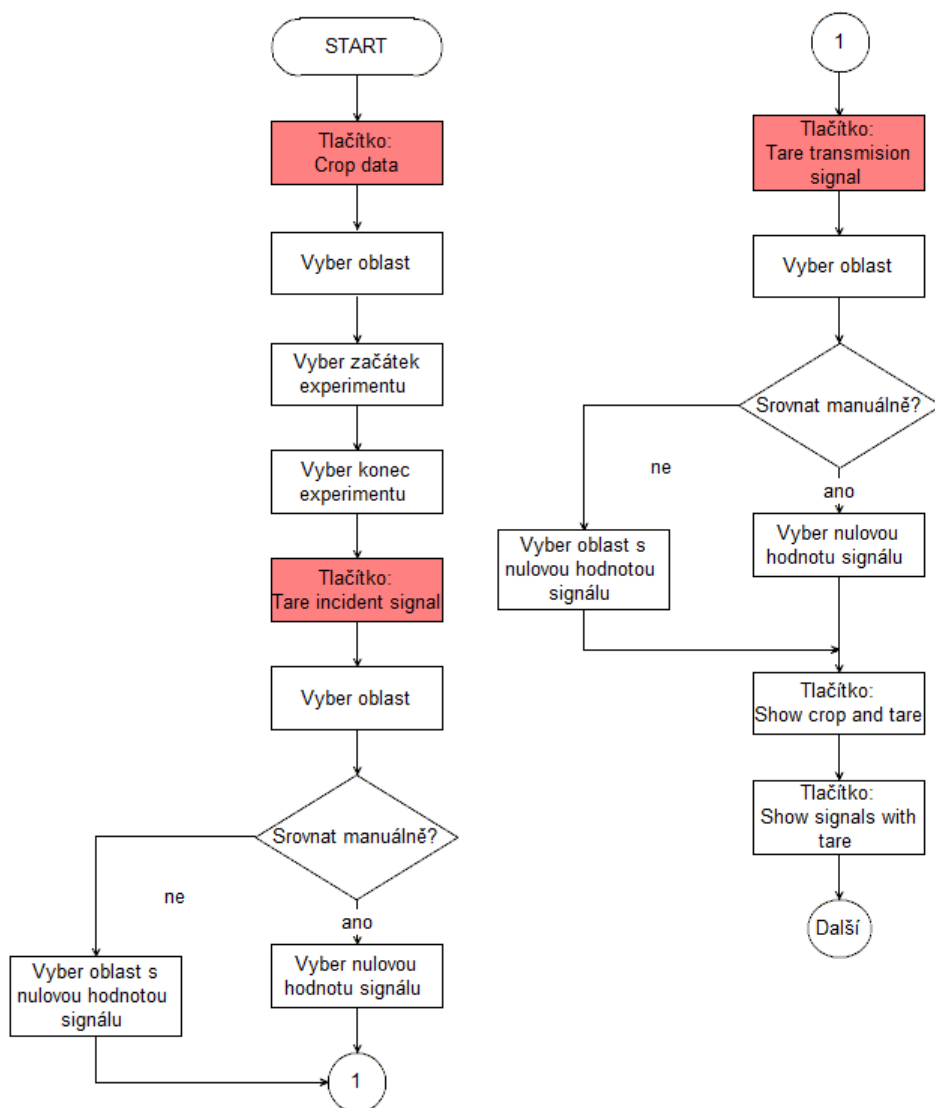


Obrázek 4.5: Vývojový diagram pro filtraci naměřených signálů

Karta 4: Crop and tare

Čtvrtá karta umožňuje uživateli aplikace provést oříznutí signálů a srovnání signálů na nulovou hodnotu. Nejdříve musí uživatel provést oříznutí signálu vybráním tlačítka *Crop data*. Tímto je spuštěna řízená procedura, která dále uživatele vede při ořezávání dat v pravé části okna aplikace. Nejprve uživatel vybere přibližnou oblast oříznutí, která je v grafickém okně přiblížena a následně je vyzván ke zvolení počátečního a koncového času experimentu. Po ukončení procedury jsou uživatelem zvolené hodnoty zobrazeny v aplikačním okně. Následně je uživateli umožněno provést postupně srovnání incidentního a transmisního signálu na nulovou hodnotu napětí (viz. odstavec 2.3.3). Srovnání probíhá pro každý ze signálů odděleně a postupně je lze

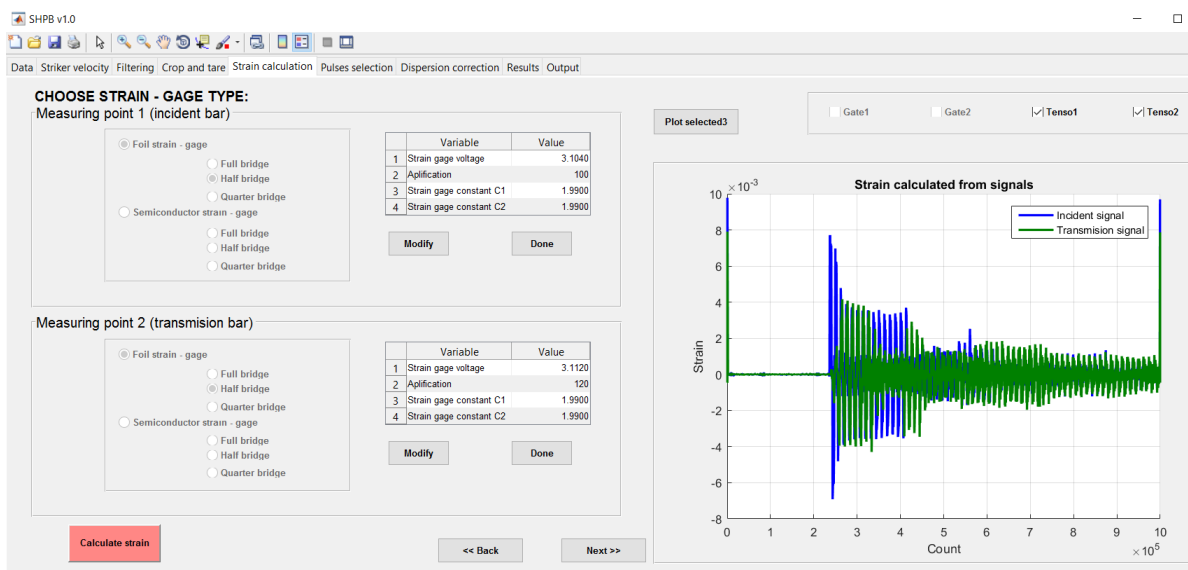
provést výběrem jednoho ze dvou tlačítek *Tare incident signal* a *Tare transmission signal*. Procedura spuštěná jedním z těchto tlačítek také vede uživatele při srovnávání dat. Uživatel nejprve vybere oblast s nulovou hodnotou napětí a následně buď přímo vybere hodnotu, o kterou bude signál posunut, nebo celou nulovou oblast označí. V druhé variantě je hodnota posunu vypočtena jako aritmetický průměr ze všech hodnot ve vybrané oblasti, což eliminuje možnost nepřesného výběru hodnoty uživatelem, avšak je citlivější na případné kmity signálu. Po srovnání obou signálů je umožněn přechod na další kartu a uživatel může výsledek ořezu a srovnání signálů opět vizualizovat v pravé části okna aplikace. Vývojový diagram postupu vyhodnocování na čtvrté kartě je zachycen na obrázku 4.6.



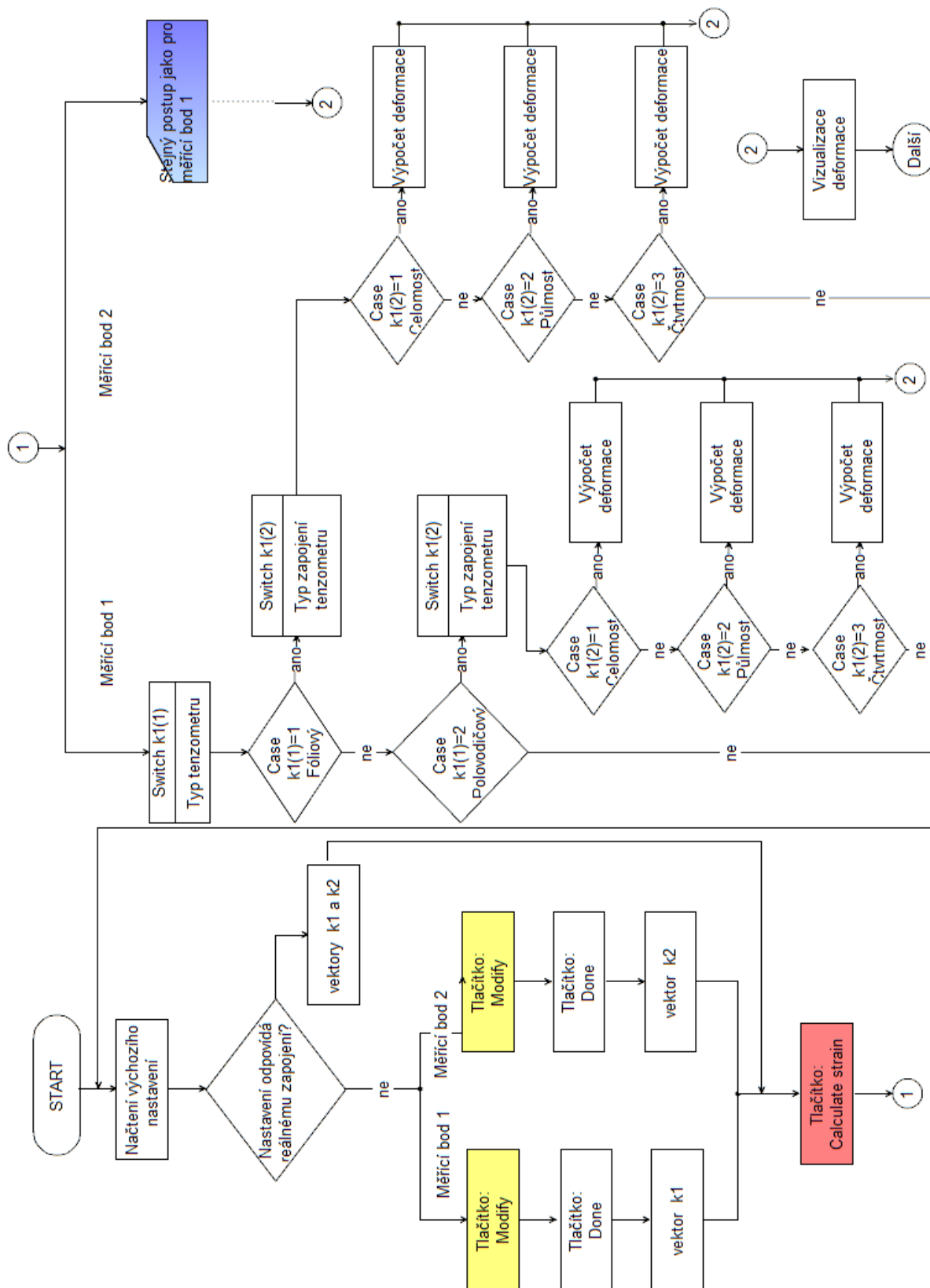
Obrázek 4.6: Vývojový diagram pro oříznutí a srovnání signálů

Karta 5: Strain calculation

Karta číslo 5 slouží k přepočtu elektrického napětí zaznamenaného během experimentu na skutečnou deformaci tyčí v měřících místech. Uživatel má možnost modifikovat všechny proměnné vstupující do tohoto výpočtu (budící napětí na tenzometru U_0 , zesílení G a tenzomerické konstanty C_1 a C_2) a také změnit použitý typ tenzometru a jeho zapojení na měřícím místě (viz. část 2.2.3). Výchozí nastavení proměnných a typů tenzometrů je spojeno s proměnnými funkční hlavičky každého experimentu. Pro každý měřicí bod tak existuje celkem 6 možností výpočtu deformace. Za tímto účelem byla vytvořena externí procedura *Calculate_strain.m*, který na základě řídicích vektorů k_1 a k_2 provede výpočet odpovídající nastavení vybranému uživatelem. Uvedené vektory jsou generovány uživatelskou volbou příslušného přepínače, jak je zobrazeno na obrázku 4.7. Tato procedura je provedena výběrem tlačítka *Calculate strain*. Po úspěšném dokončení výpočtu je uživateli umožněn přechod na další kartu společně s možností vizualizace vypočtené deformace. Vývojový diagram postupu vyhodnocování na páté kartě je zachycen na obrázku 4.8.



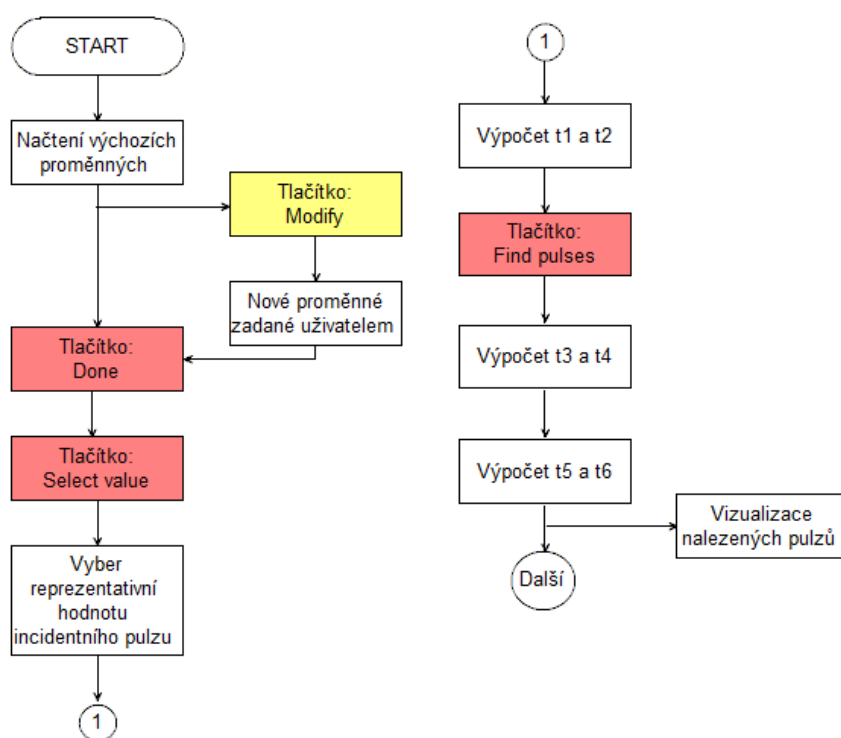
Obrázek 4.7: Ovládací prvky karty číslo 5



Obrázek 4.8: Vývojový diagram pro přepočítání napětí na deformaci měřících tyčí

Karta 6: Pulses selection

Na šesté kartě grafického uživatelského rozhraní dohází k výběru incidentního, transmisního a odraženého deformačního pulzu. Uživatel má možnost modifikovat proměnné, které ovlivňují následný výběr a po jejich potvrzení je zpřístupněno tlačítko *Select value*. Toto tlačítko spouští proceduru pro výběr incidentního pulzu. Uživatel je vyzván, aby zvolil reprezentativní hodnotu incidentního pulzu v grafu v levé části okna aplikace. Na základě této hodnoty je automaticky vybrán incidentní pulz. Reprezentativní hodnoty pulzu i výsledné hranice pulzu jsou uživateli zobrazeny a je zpřístupněno tlačítko *Find pulses*. Po vybrání tohoto tlačítka je spuštěna procedura pro hledání transmisního a odraženého pulzu na základě vztahů 2.14 - 2.16. Časy odpovídající počátkům a koncům nalezených pulzů jsou zobrazeny v levé části pracovního okna a v jeho pravé části je zpřístupněna možnost vizualizace nalezených pulzů. Zároveň je umožněn přechod na další kartu. Vývojový diagram postupu vyhodnocování na šesté kartě je zachycen na obrázku 4.9.

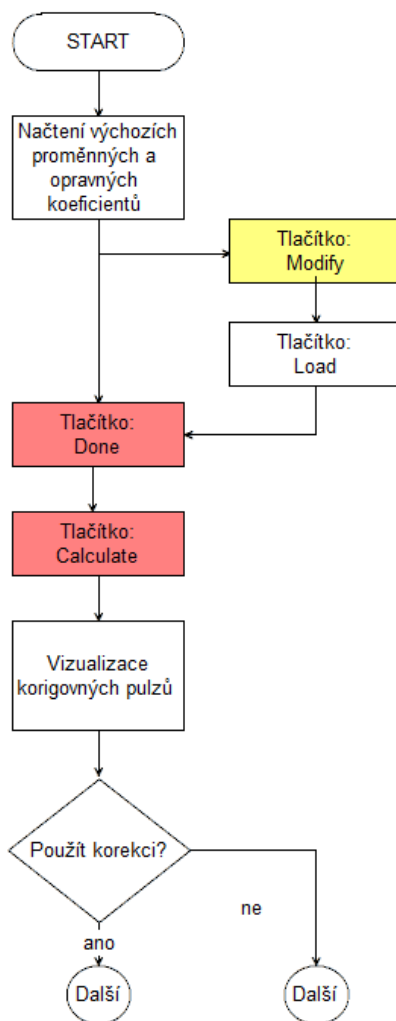


Obrázek 4.9: Vývojový diagram pro výběr pulzů

Karta 7: Dispersion correction

Karta číslo 7 je jediná, kterou je možné při vyhodnocování experimentu zcela vynechat. Pokud uživatel nechce korekci provést, lze po přechodu na tuto kartu přejít přímo na kartu další. Funkcí této karty je korekce disperse naměřených signálů, kterou lze provádět zvlášť pro incidentní

a transmisní měřicí bod. Uživatel může modifikovat proměnné vstupující do výpočtu korekce a také načíst opravné koeficienty získané z kalibračních testů použitím tlačítka *Load*. Po potvrzení je zpřístupněno tlačítko *Calculate*. Toto tlačítko spouští externí funkci pro výpočet korekce. Po úspěšném výpočtu může uživatel korigovaný pulz vizualizovat v levé části okna aplikace. Uživatel nakonec může zvolit možnost použít korigovaný pulz pro další postup vyhodnocování výběrem přepínače *Use correction*. Vývojový diagram postupu vyhodnocování na sedmé kartě je zachycen na obrázku 4.10.

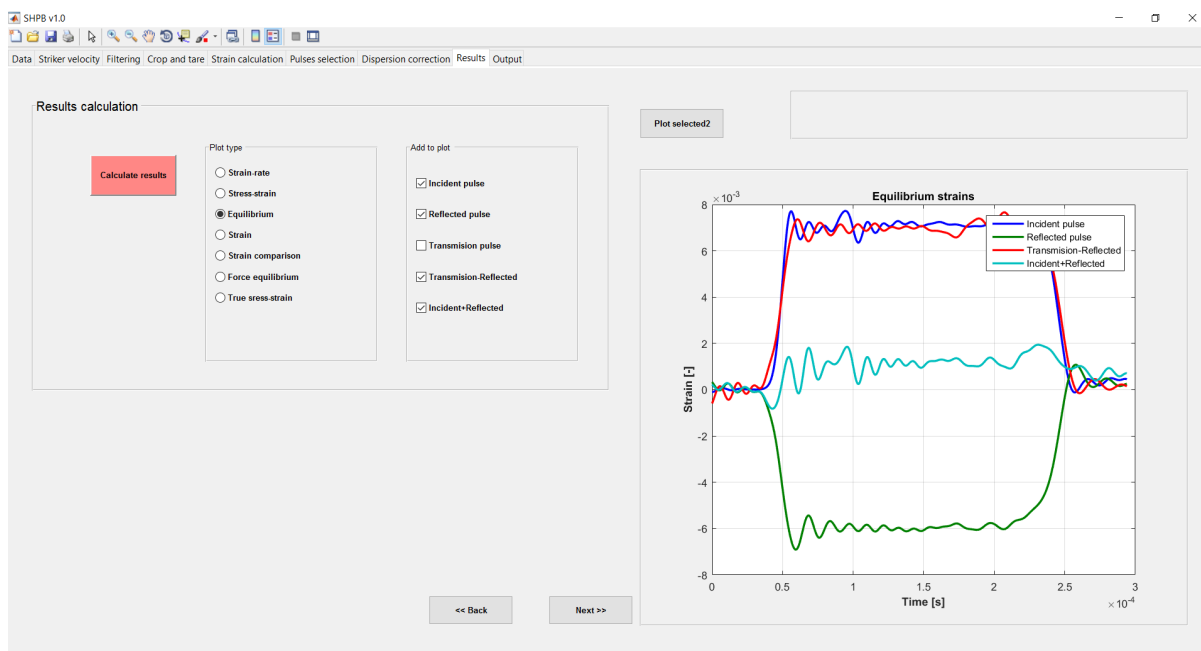


Obrázek 4.10: Vývojový diagram pro korekci disperze

Karta 8: Results calculation

Tato karta slouží k výpočtu všech vyhodnocovaných veličin shrnutých v části 2.3.7. Procedura výpočtu je spuštěna po vybrání tlačítka *Calculate results*. Po úspěšném dokončení výpočtu může uživatel všechny vyhodnocené charakteristiky vizualizovat v pravé části okna aplikace výběrem některé z možností v sadě přepínačů. Celkový vzhled karty je zobrazen na obrázku 4.11. Hlavními výsledky vypočtenými na této kartě jsou:

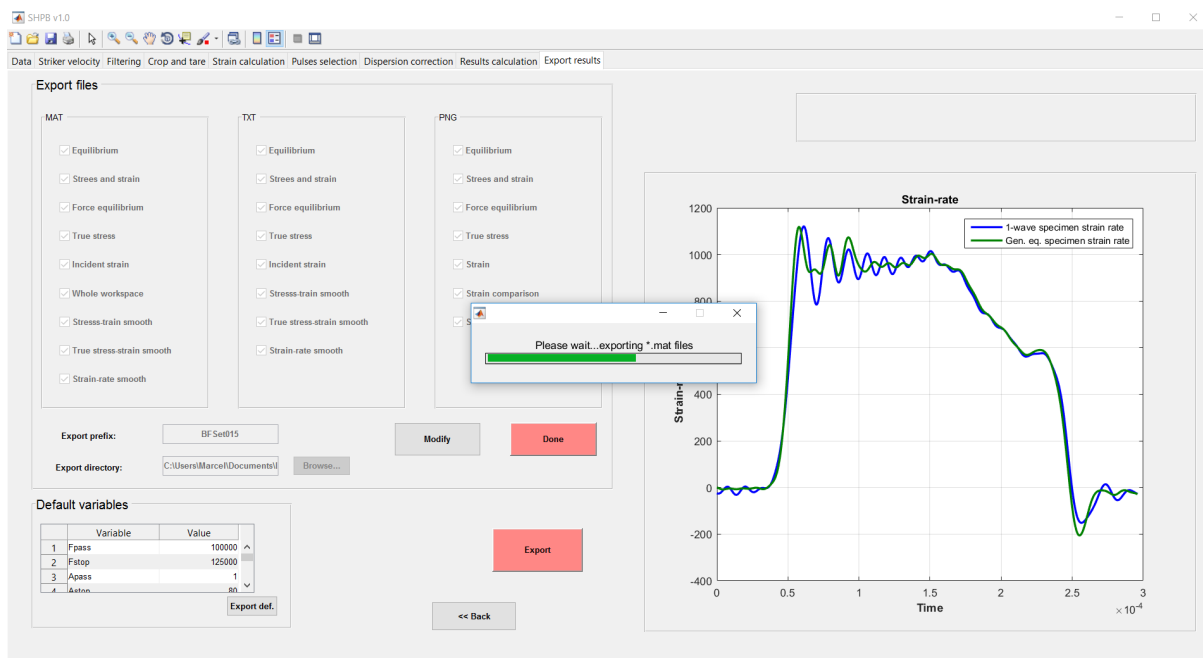
- rychlost deformace vzorku $\dot{\varepsilon}(t)$,
- deformace vzorku $\varepsilon(t)$,
- napětí vyvolané ve vzorku $\sigma(t)$,
- síly, kterým tyče působily na vzorek F_i a F_t .



Obrázek 4.11: Ovládací prvky karty Results calculation

Karta 9: Export results

Poslední karta GUI slouží k uložení všech vyhodnocených veličin. Všechny veličiny lze uložit ve formátu **.mat*. Vybrané veličiny je možné uložit do souboru **.txt* ve formě sloupců oddělených mezerou. Dále je možné uložit všechny grafy vizualizované na kartě číslo 8 ve formátu *.png*. Uživatel může zvolit, které veličiny a grafy budou exportovány, unikátní prefix exportovaných souborů a složku, do které budou soubory uloženy. Procedura pro export je spuštěna po vybrání tlačítka *Export*. Dále je možné exportovat i sadu základních proměnných do souboru ve formátu **.mat* pro použití při vyhodnocování dalšího experimentu. Celá karta a všechny její ovládací prvky jsou zobrazeny na obrázku 4.12.



Obrázek 4.12: Ovládací prvky karty Export results

Kapitola 5

Experimentální ověření navrženého řešení

V rámci projektů ústavu K618 na Fakultě dopravní je prováděna celá řada testů moderních materiálů využitelných pro dopravní aplikace. Jedná se zejména o různé druhy porézních struktur vhodných pro deformační zóny karoserií automobilů, ochranné prostředky a další prvky pasivní bezpečnosti různých forem dopravy. Tyto materiály je nutné vzhledem ke způsobu jejich využití testovat dynamicky, k čemuž je využíváno SHPB zařízení.

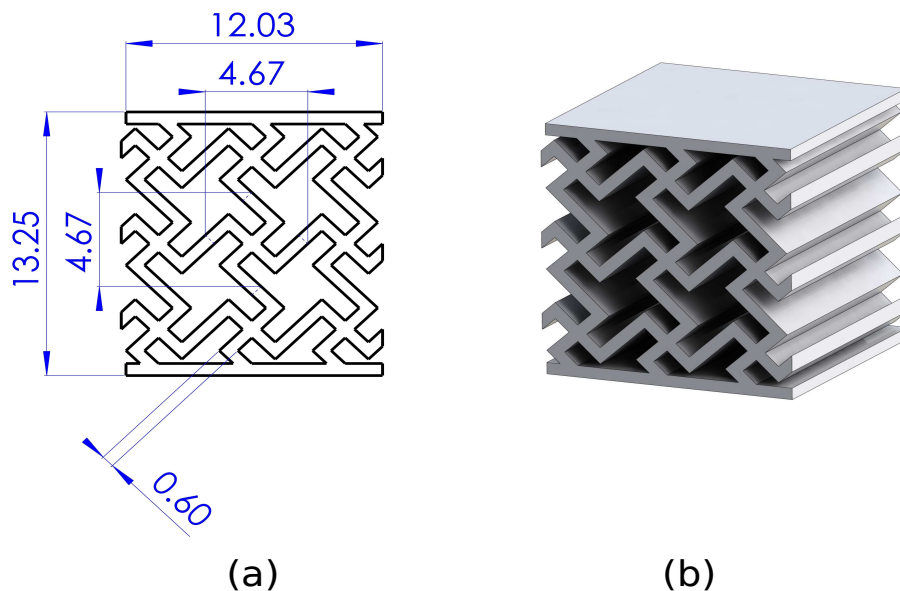
Porézní struktury jsou tvořeny pevnou látkou obsahující vysoký objemový podíl pórů vyplněných plynem (například vzduchem), díky čemuž vykazují dobré mechanické vlastnosti při velmi nízké hmotnosti [16]. Struktura porézních materiálů může být řízená nebo náhodná. Materiály s řízenou strukturou lze vyrábět např. metodou objemové komprese z běžných pěn, nebo využitím 3D tisku. Důležitou skupinou materiálů s řízenou strukturou představují tzv. **auxetické materiály**. Tyto materiálové struktury se vyznačují záporným Poissonovým číslem. Poissonovo číslo je materiálová konstanta charakterizující deformační chování materiálu, která odpovídá zápornému podílu příčného poměrného prodloužení a podélného poměrného prodloužení vzorku materiálu. Pro většinu konvenčních materiálů je toto číslo kladné, což odpovídá zmenšení příčného průřezu vzorku při zatížení tahem a zvětšení příčného průřezu při tlakovém zatížení. Struktury se záporným Poissonovým číslem se chovají opačně, vzorky s auxetickou strukturou při podélném tahovém zatížení zvětšují svůj příčný průřez a při zatížení tlakem se podélný průřez zmenšuje [17]. Materiály s náhodnou strukturou (nejčastěji ve formě různých druhů pěn) lze vyrábět například metodou vstřikováním plynu do taveniny, nebo přidáním plyn-tvořící látky do taveniny. Jako ukázka funkčnosti navrženého grafického uživatelského rozhraní bylo toto rozhraní použito

pro vyhodnocení několika experimentů provedených v rámci projektů ústavu K618 na Fakultě dopravní na SHPB zařízení. Robustnost navrženého řešení je ukázána na měření provedeném na jednom vzorku vyrobeném z auxetického materiálu a také na jednom vzorku z polymerní pěny opatřené niklovým povlakem.

5.1 Měření auxetické struktury

Zvolený vzorek s auxetickou strukturou byl vyroben metodou SLS¹ ze slitiny austenitické nerezové oceli 316L–0407. Typ auxetické struktury tohoto vzorku byl *2D missing-rib*. Základní rozměry této struktury jsou zobrazeny na obrázku 5.1a. Tloušťka stěn této struktury byla navržena s ohledem na možnosti SLS tisku.

Zvolený vzorek (obrázek 5.1b) o rozměrech $12,03 \times 12,09 \times 13,25$ mm a porozitě 53,1 % byl umístěn mezi incidentní a transmisní tyč měřicího zařízení. Tyče byly osazeny fóliovými tenzometry délky 3 mm o elektrickém odporu 120Ω , zapojené do Wheatstoneova můstku v tzv. polovičním můstku 2.2.3. Zesílení zesilovače bylo nastaveno na hodnotu 100. Ústí hlavně vzduchového děla bylo osazeno dvěma optickými bránami. Použitý projektil délky 500 mm byl urychlen tlakem ve vzdušníku o velikosti 8 bar.

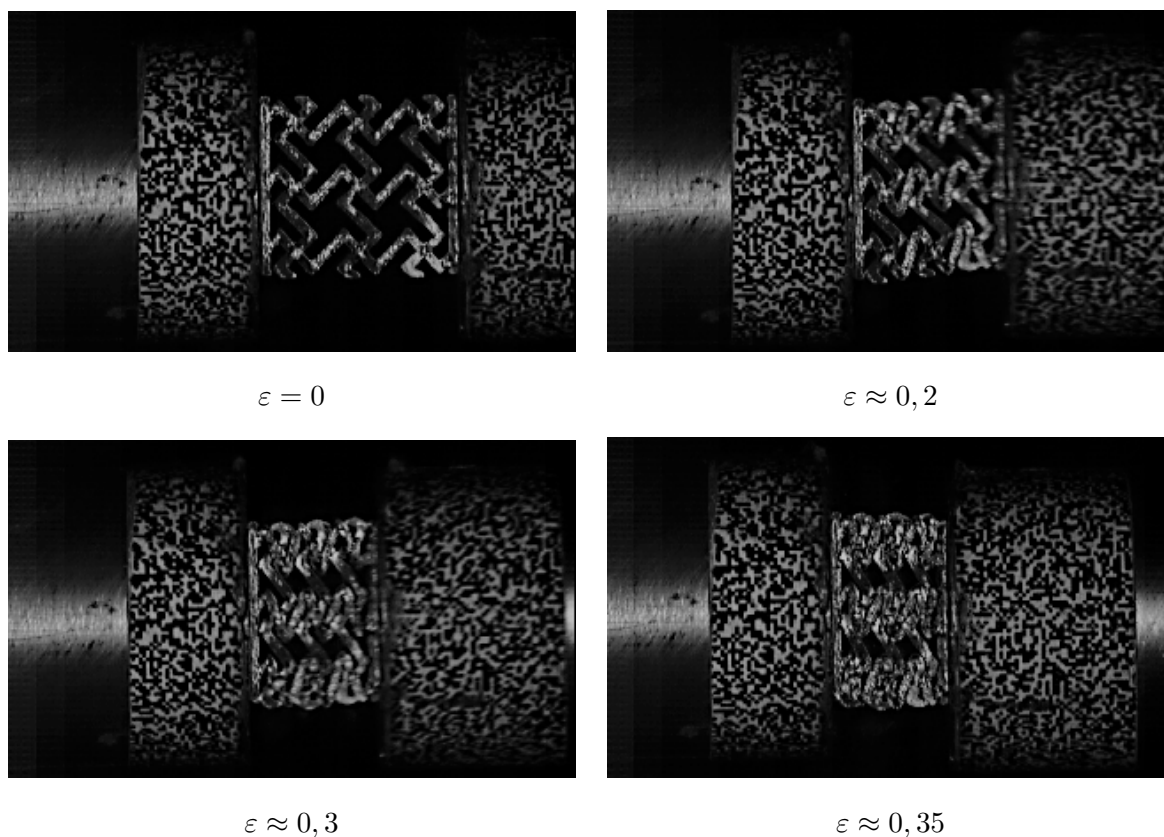


Obrázek 5.1: Auxetická struktura *2D missing-rib*: (a) Základní rozměry struktury, (b) Vizualizace použitého vzorku

¹Z angl. *Selective Laser Sintering*- Selektivní spékání laserem

5.1.1 Zdrojová data

V každém ze čtyř měřicích míst bylo pořízeno 10^6 záznamů, výsledný soubor ve formátu **.ini* byl doplněn o hlavičku experimentálních dat a časovou značku pořízených záznamů. Dále byl použit soubor *BFSet001.mat*, odpovídající použitému experimentálnímu sestavení pro načtení odpovídajících proměnných a také soubor *Defaults.mat* obsahující všechny zbývající proměnné vstupující do procesu vyhodnocení experimentu 4.2.1. Na obrázku 5.2 je zobrazena sekvence postupné deformace vzorku získaná z rychloběžné kamery.



Obrázek 5.2: Sekvence postupné deformace vzorku s auxetickou strukturou

5.1.2 Vyhodnocení s využitím grafického rozhraní

Vyhodnocení experimentu proběhlo podle schématu na obrázku 4.1. Celý postup je podrobně rozepsán níže. Výsledky měření provedené na vzorcích stejného typu byly publikovány v [18].

Načítání dat

Zaznamenané signály byly načteny z vlastního souboru experimentu, na základě proměnné *SetupID* byl načten odpovídající soubor *BFSet001.mat* a dále soubor *Defaults.mat*.

Rychlost strikeru

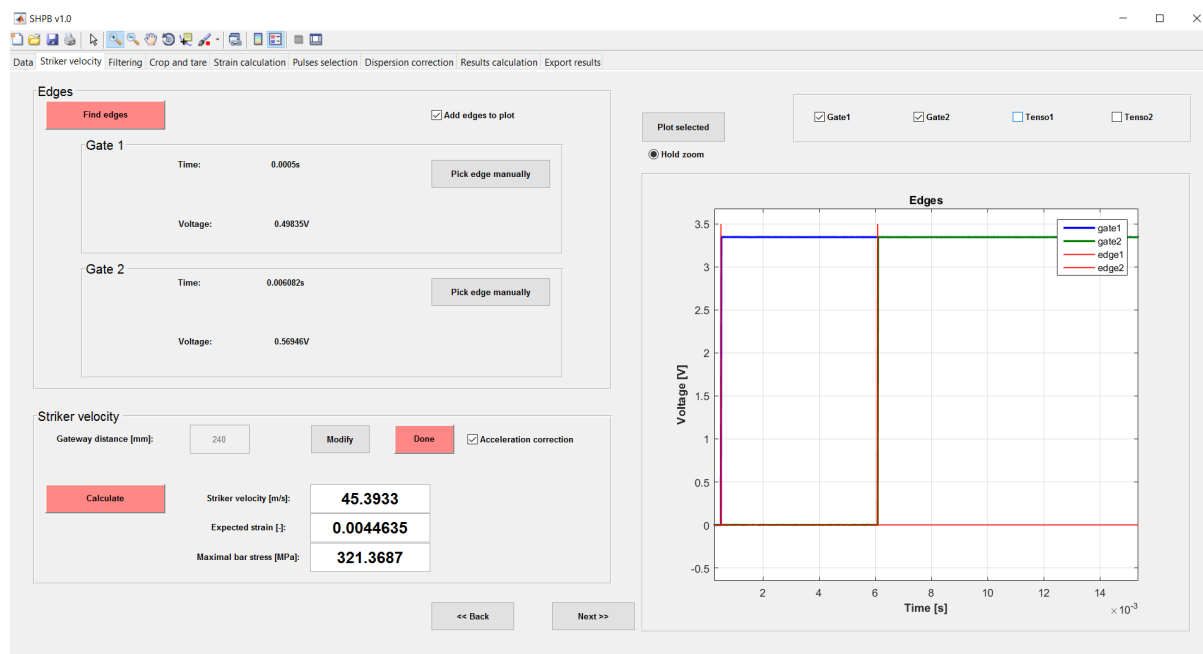
Pro výpočet rychlosti strikeru byly automaticky určeny časy náběžných hran pulzů generovaných optickými branami: $t_a = 0,5$ ms, $t_b = 6,1$ ms. Doba průletu strikeru mezi branami byla $\Delta t = 5,6$ ms. Vzdálenost mezi optickými branami $D = 240$ mm. Dále byla vypočtena rychlost strikeru v_s , očekávaná deformace ε_e a očekávané maximální napětí incidentní tyče σ_e podle vztahů 2.8-2.10:

$$v_s = 45,39 \text{ ms}^{-1},$$

$$\varepsilon_e = 0,0045,$$

$$\sigma_e = 321,37 \text{ MPa}.$$

Uvedené hodnoty byly vypočteny s použitím korekce pro zrychlení projektilu. Bez použití korekce byla rychlost strikeru vypočtená podle 2.4 pouze $v_s = 42,99 \text{ ms}^{-1}$, příspěvek zrychlení pro výslednou ústovou rychlost strikeru byl tedy nezanedbatelný (přibližně 5,3 %). Na obrázku 5.3 je zobrazena druhá karta grafického rozhraní v průběhu vyhodnocování experimentu.



Obrázek 5.3: Výpočet rychlosti strikeru pro měření provedeného na auxetické struktuře

Filtrování dat

Pro odstranění šumových frekvencí z původních signálů získaných z tenzometrů byl na surová data aplikován Butterworthův filtr. Zvolené nastavení filtru bylo následující:

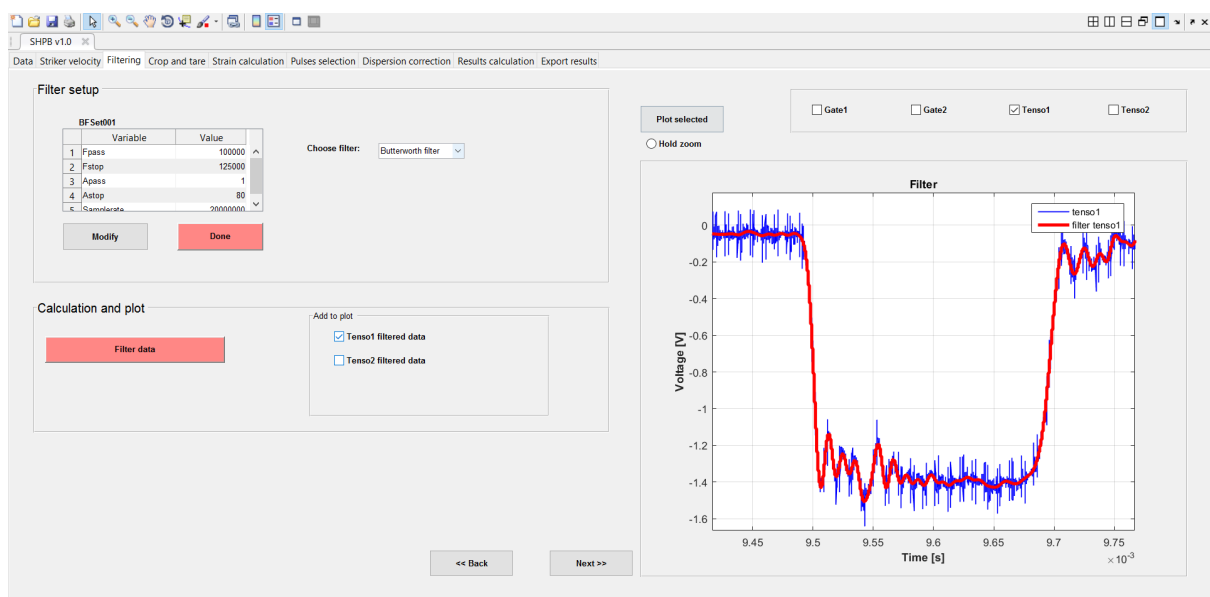
$$F_{pass} = 100 \text{ kHz},$$

$$F_{stop} = 125 \text{ kHz},$$

$$A_{pass} = 1 \text{ dB},$$

$$A_{stop} = 80 \text{ dB}.$$

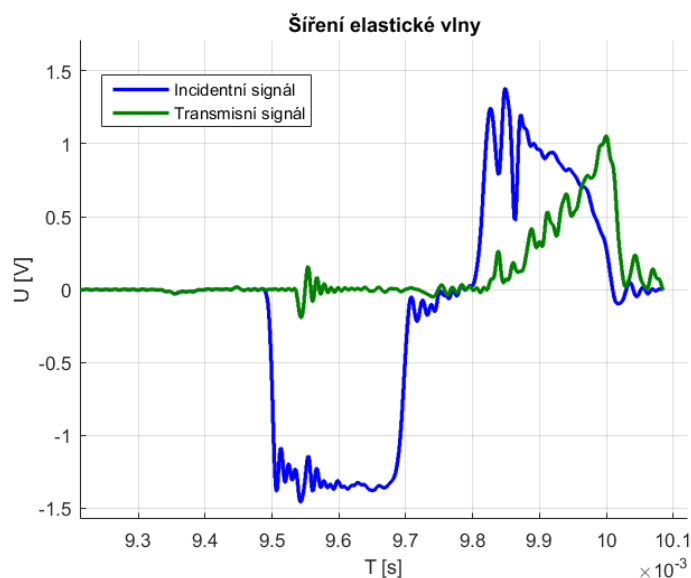
Výsledek filtrace dat je zobrazen na obrázku 5.4.



Obrázek 5.4: Filtrace surových dat z měření provedeného na auxetické struktuře

Oříznutí a srovnání signálů

V tomto experimentu byl vybrán počáteční čas $t_{start} = 8,99 \text{ ms}$ a koncový čas experimentu $t_{stop} = 10,09 \text{ ms}$, pro další vyhodnocení byly použity pouze signály zkrácené na tento časový interval. Dále bylo provedeno srovnání obou signálů na nulovou úroveň napětí použitím tlačítek *Tare incident signal* a *Tare transmission signal*. Pro větší přesnost srovnání byla využita metoda aritmetického průměru. Incidentní signál bylo nutné posunout o hodnotu $U_{i0} = 0,050 \text{ V}$, transmisní signál o hodnotu $U_{t0} = 0,088 \text{ V}$. Výsledné oříznuté a srovnané signály jsou zobrazeny na obrázku 5.5.



Obrázek 5.5: Oříznuté a srovnané signály z měření provedeného na auxetické struktuře

Výpočet deformace

Signály byly následně přepočteny z hodnot odpovídajícím změně napětí na tenzometrech na skutečnou deformaci. Přepočet byl proveden podle vztahu 2.3 pro fóliové tenzometry zapojené do Wheatstoneova můstku v tzv. polovičním můstku. Následně byla provedena korekce nelinearity můstku podle vztahu uvedeného v tabulce 2.2. Napětí zdroje přivedeného na incidentní tenzometrický obvod bylo $U_{0i} = 3,073 \text{ V}$, tenzometrická konstanta tohoto tenzometru $C_{1i} = 1,99$. Napětí na transmisním tenzometru bylo $U_{0t} = 3,079 \text{ V}$, tenzometrická konstanta $C_{1t} = 1,99$.

Výběr pulzů

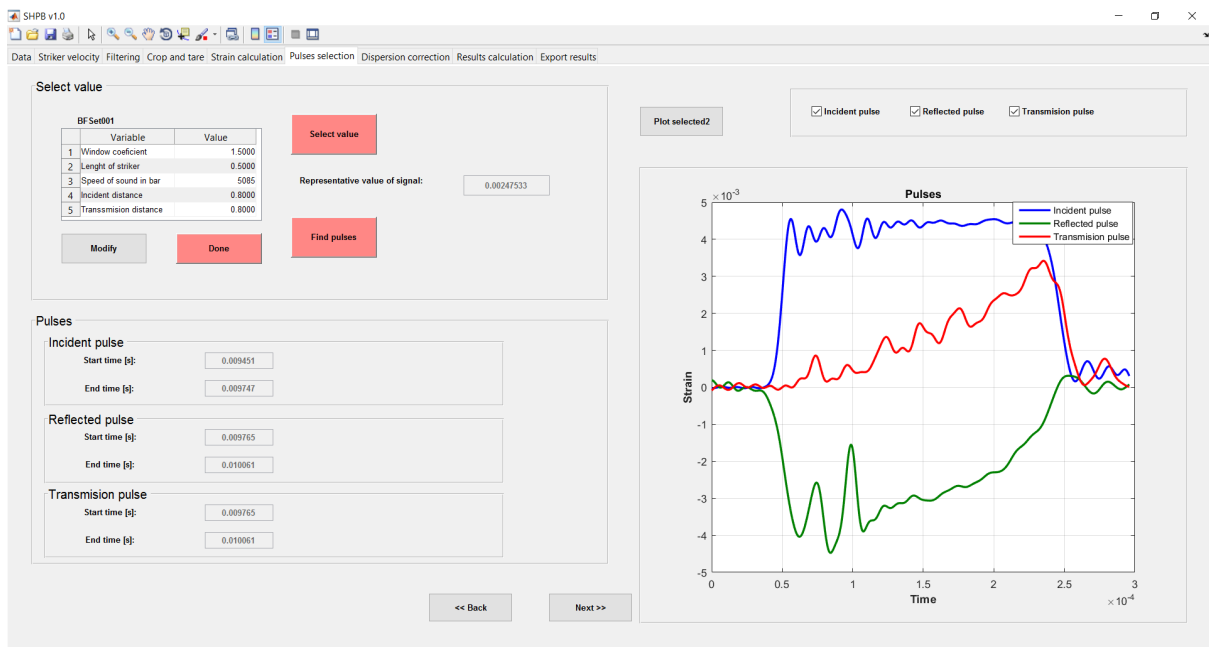
Hranice incidentního pulzu byla nalezena s využitím vztahu 2.12, hranice transmisního a odraženého pulzu následně podle vztahů 2.14- 2.16:

$$t_1 = 9,45 \text{ ms}, t_2 = 9,75 \text{ ms},$$

$$t_3 = 9,77 \text{ ms}, t_4 = 10,06 \text{ ms},$$

$$t_5 = 9,76 \text{ ms}, t_6 = 10,06 \text{ ms}$$

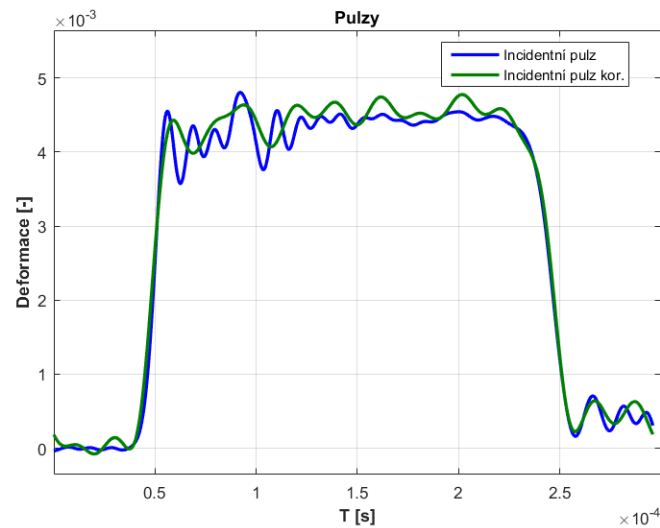
Zvolený koeficient šířky okna pro výběr incidentního pulzu byl $d_o = 1,5$, rychlost šíření elastických vln v tyči $C_t = 5058 \text{ ms}^{-1}$, incidentní vzdálenost $d_i = 800 \text{ mm}$ a transmisní vzdálenost $d_t = 800 \text{ mm}$. Na obrázku 5.6, je zobrazena šestá karta grafického rozhraní v průběhu vyhodnocování experimentu.



Obrázek 5.6: Výběr elastických pulzů v průběhu vyhodnocení měření provedeného na auxetické struktuře

Korekce disperze

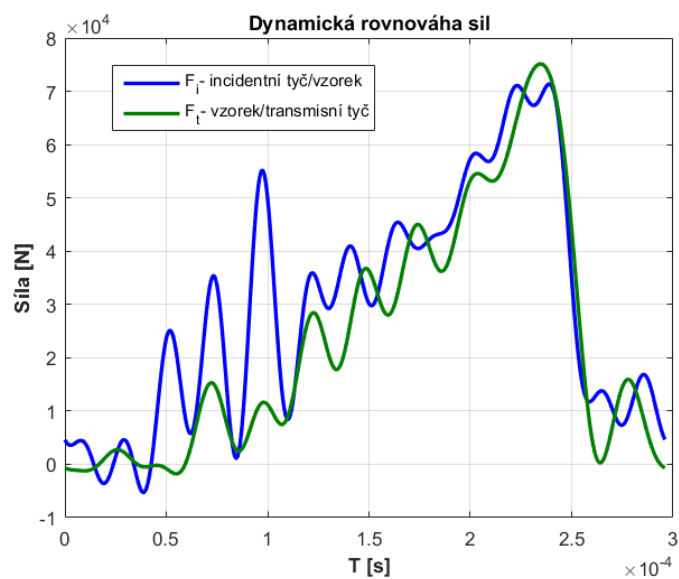
Na takto vybraných pulzech byla provedena korekce disperze. Opravné funkce získané z kalibračních měření byly aplikovány použitím vztahu 2.17. Incidentní pulz před a po aplikaci disperzní korekce je zobrazen na obrázku 5.7. Efekt disperze šíření elastických vln v průběhu tohoto experimentu byl tedy nezanedbatelný a pro další vyhodnocení proto byly použity korigované pulzy.



Obrázek 5.7: Efekt korekce vlnové disperze na incidentní pulz elastické vlny

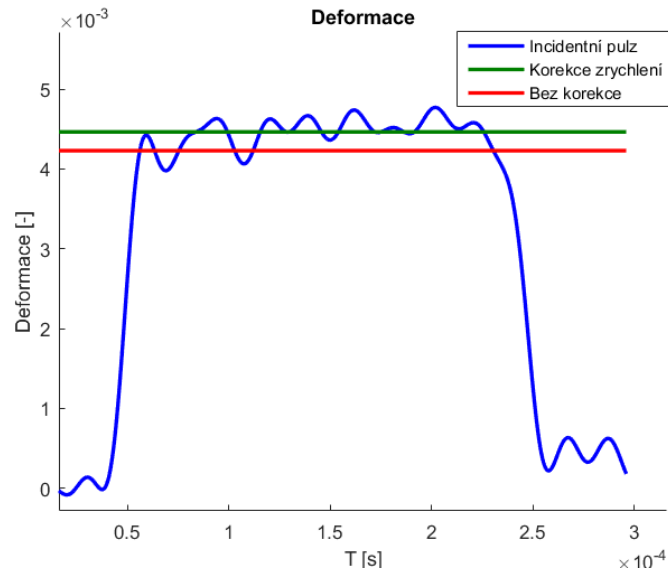
5.1.3 Výsledky

Všechny zbývající vyhodnocované veličiny byly vyhodnoceny pomocí vztahů uvedených v odstavci 2.3.7. Během experimentu bylo dosaženo uspokojivé dynamické rovnováhy, průběhy sil mezi incidentní tyčí a zkoumaným vzorkem F_i a mezi vzorkem a transmisní tyčí F_t jsou zobrazeny na obrázku 5.8. Obě křivky jsou si svým průběhem velmi blízké, experiment tedy lze považovat za platný.



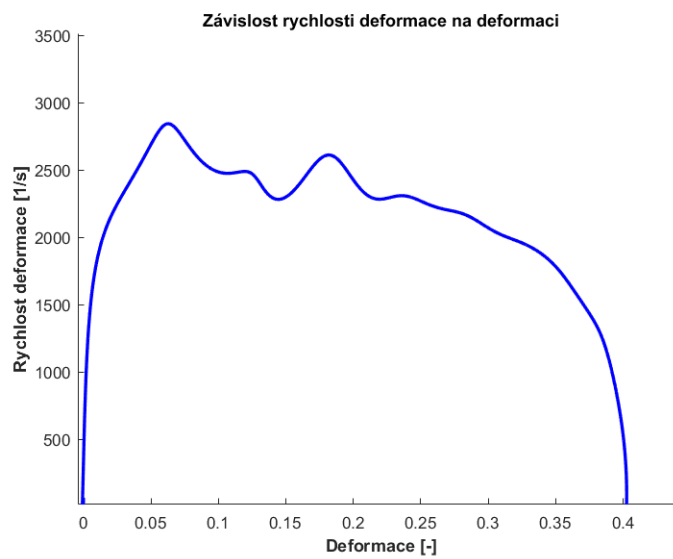
Obrázek 5.8: Dynamická rovnováha sil pro vzorek auxetické struktury

Dále byl ověřen efekt korekce pro zrychlení projektilu. Na obrázku 5.9 je zobrazen průběh incidentního pulzu doplněný o hodnotu očekávané deformace vypočtené s použitím této korekce a o hodnotu očekávané deformace vypočtené bez použití korekce.



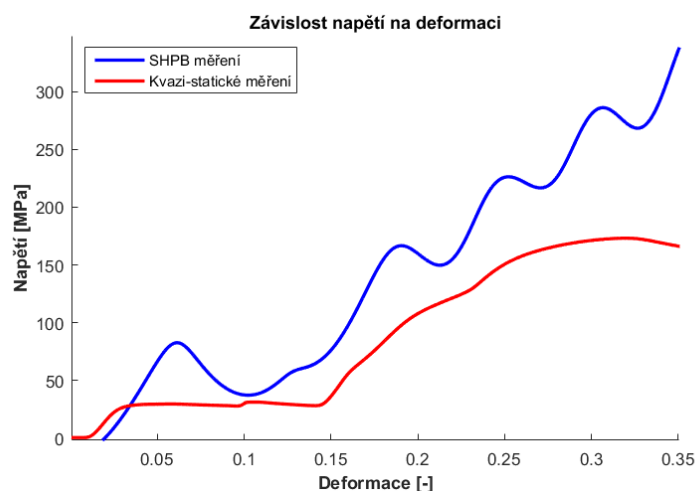
Obrázek 5.9: Efekt korekce pro zrychlení projektilu

Na obrázku 5.10 je zobrazena závislost rychlosti deformace $\dot{\epsilon}$ vzorku na jeho skutečné deformaci ϵ .



Obrázek 5.10: Závislost rychlosti deformace vzorku na deformaci

Na obrázku 5.11 je zobrazena závislost napětí vyvolaného ve vzorku σ na jeho deformaci ε . Pro porovnání je v grafu zanesena stejná závislost při kvazi-statické zkoušce stejné struktury. Pro stejnou deformaci bylo při této zkoušce napětí vyvolané ve vzorku o 50% nižší. Vzhledem k velké rychlosti deformace a asymetričnosti měřené struktury se v zobrazené křivce vyskytují oscilace. Disperze naměřených signálů byla natolik významná, že nebylo možné ji odstranit ani metodou pulse-shapingu, ani provedenou korekcí. Tento experiment bylo možné úspěšně vyhodnotit pomocí vytvořeného uživatelského rozhraní i přes to, že výsledné hodnoty jsou zatíženy velkou chybou měření.



Obrázek 5.11: Závislost napětí vyvolaném ve vzorku na deformaci

Vyhodnocení experimentu proběhlo úspěšně, vyhodnocené veličiny odpovídaly hodnotám naměřených v předchozích experimentech. Na základě výsledků lze tedy tvrdit, že navržená aplikace fungovala bez chyb.

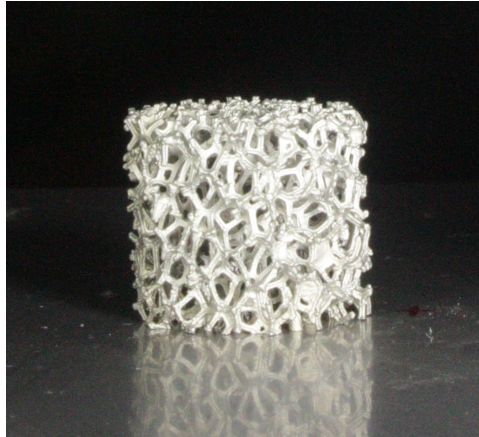
5.2 Měření pokovené polymerní pěny

Zvolený vzorek použitý pro druhý experiment byl vyroben z hybridní pěny. Tato hybridní pěna se skládá z polyuretanového jádra, na které je elektrolyticky nanесena tenká vrstva niklu. Vzniklá kovová pěna má velmi příznivé mechanické vlastnosti při výrazně nižší ceně než např. hliníkové kovové pěny. Hustota této pěny je přibližně 800 kgm^{-3} .

Zvolený vzorek válcového tvaru délky 9,9 mm a průměru 21,5 mm byl umístěn mezi incidentní a transmisní tyč měřicího zařízení (obrázek 5.12). Instrumentace měřících tyčí a hlavně vzduchového děla proběhla stejně jako v předchozím experimentu s auxetickou strukturou. Tlak vzduchu

ve vzdušníku vzduchového děla byl 2 bar. Tyče byly osazeny fóliovými tenzometry délky 3 mm o elektrickém odporu $120\ \Omega$, spojenými do Wheatstoneova půl-mostového zapojení 2.2.3. Zesílení zesilovače bylo nastaveno na hodnotu 100. Ústí hlavně vzduchového děla bylo osazeno dvěma optickými bránami.

Použitý projektil délky 500 mm byl urychlen tlakem vzdušníku o velikosti 2 bar.



Obrázek 5.12: Testovaný vzorek pokovené polymerní pěny

Na obrázku 5.13 je zobrazena sekvence postupné deformace vzorku získaná z rychloběžné kamery.

5.2.1 Vyhodnocení s využitím grafického rozhraní

Vyhodnocení experimentu proběhlo podle schématu na obrázku 4.1, dílčí kroky postupu jsou rozepsány níže.

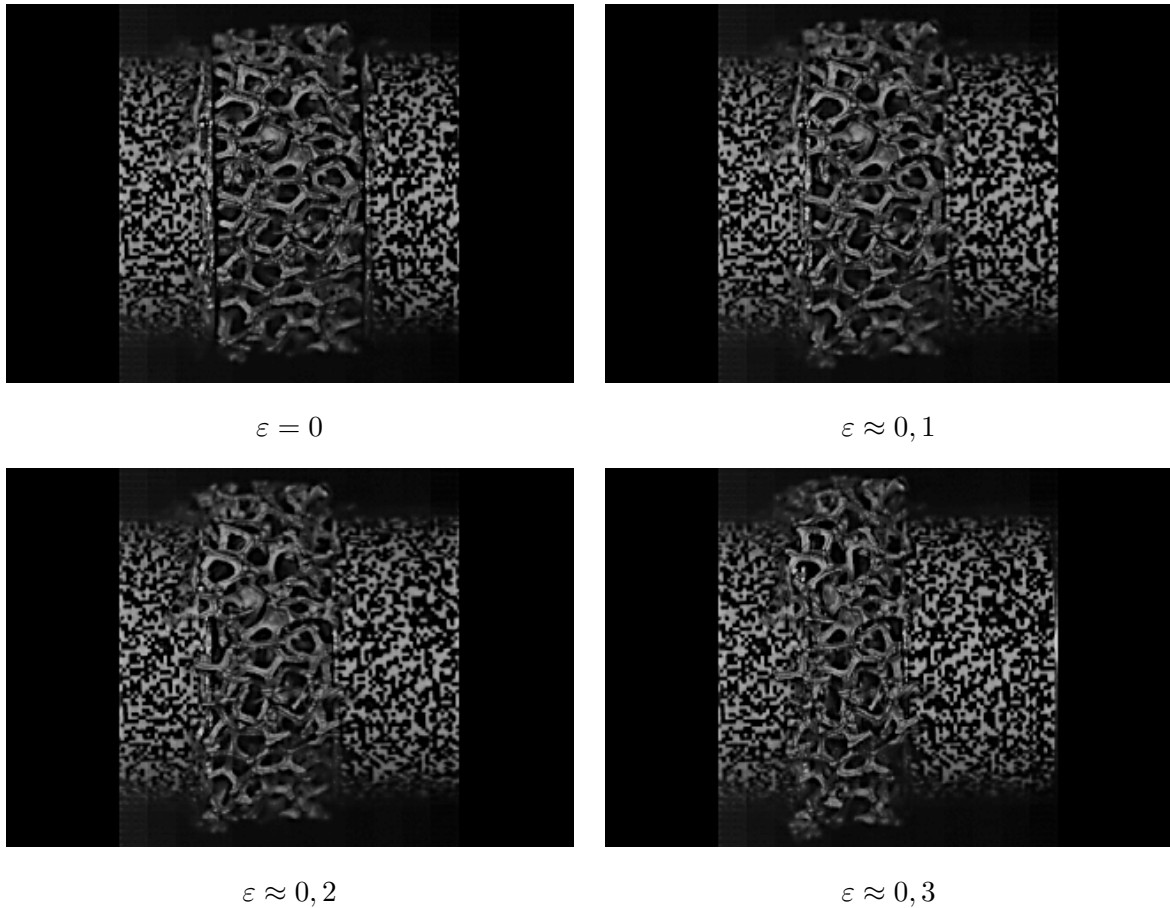
Rychlost strikeru

Pro výpočet rychlosti strikeru byl nejprve automaticky nalezeny časy náběžných hran pulzů generovaných optickými branami: $t_a = 0,5\ \text{ms}$, $t_b = 11,9\ \text{ms}$. Vzdálenost mezi optickými branami $D = 240\ \text{mm}$. Rychlost strikeru v_s , očekávaná deformace ε_e a očekávané maximální napětí incidentní tyče σ_e byla vypočtena podle vztahů 2.8-2.10:

$$v_s = 21,68\ \text{ms}^{-1},$$

$$\varepsilon_e = 0,0021,$$

$$\sigma_e = 153,48\ \text{MPa}.$$



Obrázek 5.13: Sekvence postupné deformace vzorku polymerní pěny

Uvedené hodnoty byly vypočteny s použitím korekce pro zrychlení projektilu. Bez použití korekce byla rychlost strikeru vypočtená podle 2.4 $v_s = 21,07 \text{ ms}^{-1}$, příspěvek zrychlení pro výslednou ústovou rychlost strikeru byl vzhledem k nižšímu tlaku ve vzdušníku vzduchového děla pouze 2,8 %, stále se však jedná o nezanedbatelnou změnu rychlosti.

Filtrace dat

Pro redukci šumu, kterým je jsou zatíženy signály získané z tenzometrů byl na surová data aplikován Butterworthův filtr. Nastavení filtru bylo následující:

$$F_{pass} = 110 \text{ kHz},$$

$$F_{stop} = 125 \text{ kHz},$$

$$A_{pass} = 1 \text{ dB},$$

$$A_{stop} = 80 \text{ dB}.$$

Oříznutí a srovnání signálů

Filtrovaná data byla oříznuta s využitím řízené procedury spouštěné tlačítkem *Crop data*. Počáteční čas experimentu byl stanoven na hodnotu $t_{start} = 17,42$ ms a koncový čas experimentu $t_{stop} = 18,68$ ms. Dále bylo provedeno srovnání obou signálů na nulovou úroveň napětí s využitím metody aritmetického průměru. Incidentní signál bylo nutné posunout o hodnotu $U_{i0} = 0,19$ V, transmisní signál o hodnotu $U_{t0} = -0,09$ V.

Výpočet deformace

Signály byly následně přepočteny z hodnot odpovídajícím změně napětí na tenzometrech na skutečnou deformaci (společně s korekcí nelinearity) podle vztahu uvedeného v tabulce 2.2 pro fóliové tenzometry spojené do Wheatstoneova půl-můstkového zapojení. Napětí zdroje přivedeného na incidentní tenzometrický obvod bylo $U_{0i} = 3,99$ V, tenzometrická konstanta tohoto tenzometru $C_{1i} = 1,99$. Napětí na transmisním tenzometru bylo $U_{0t} = 3,97$ V, tenzometrická konstanta $C_{1t} = 1,99$.

Výběr pulzů

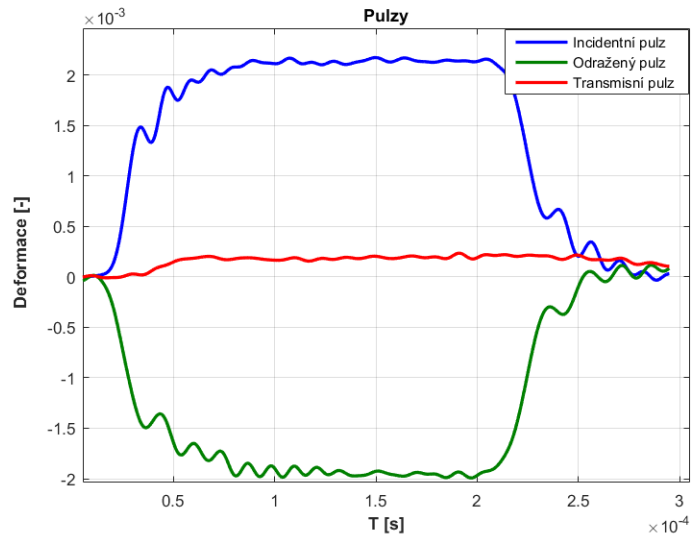
Hranice incidentního pulzu byla nalezena s využitím vztahu 2.12, hranice transmisního a odraženého pulzu následně podle vztahů 2.14- 2.16:

$$t_1 = 17,95 \text{ ms}, t_2 = 18,24 \text{ ms},$$

$$t_3 = 18,26 \text{ ms}, t_4 = 18,56 \text{ ms},$$

$$t_5 = 18,27 \text{ ms}, t_6 = 18,58 \text{ ms}$$

Zvolený koeficient šířky okna pro výběr incidentního pulzu byla $d_o = 1,5$, rychlost šíření elastických vln v tyči $C_t = 5058 \text{ ms}^{-1}$, incidentní vzdálenost $d_i = 800$ mm a transmisní vzdálenost $d_t = 800$ mm. Na obrázku 5.14 jsou zobrazeny výsledné pulzy.



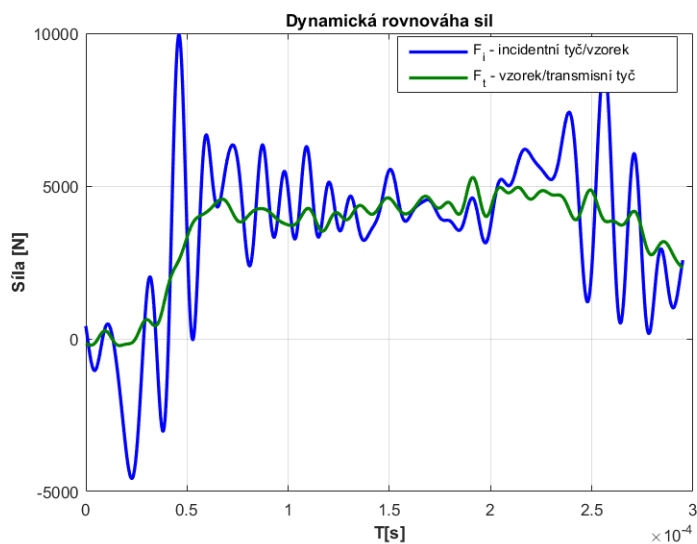
Obrázek 5.14: Elastické pulzy nalezené při vyhodnocení měření provedeného na vzorku polymerní pěny

Korekce disperze

Při vyhodnocování tohoto experimentu nebyla provedena korekce disperze signálů. Disperze signálů nebyla při takto nízké rychlosti strikeru výrazná a k její redukci stačil použitý pulse-shaper.

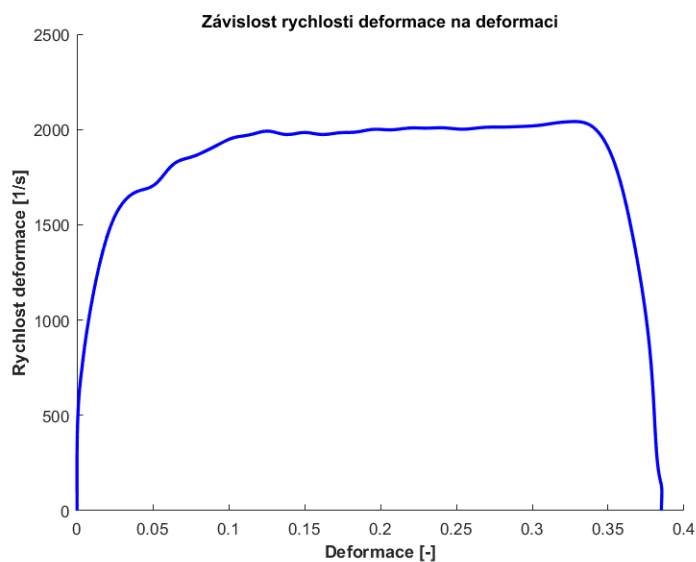
5.2.2 Výsledky

Vyhodnocované veličiny byly vyhodnoceny pomocí vztahů uvedených v odstavci 2.3.7. Během experimentu bylo dosaženo uspokojivé dynamické rovnováhy, průběhy sil mezi incidentní tyčí a zkoumaným vzorkem F_i a mezi vzorkem a transmisní tyčí F_t jsou zobrazeny na obrázku 5.15.



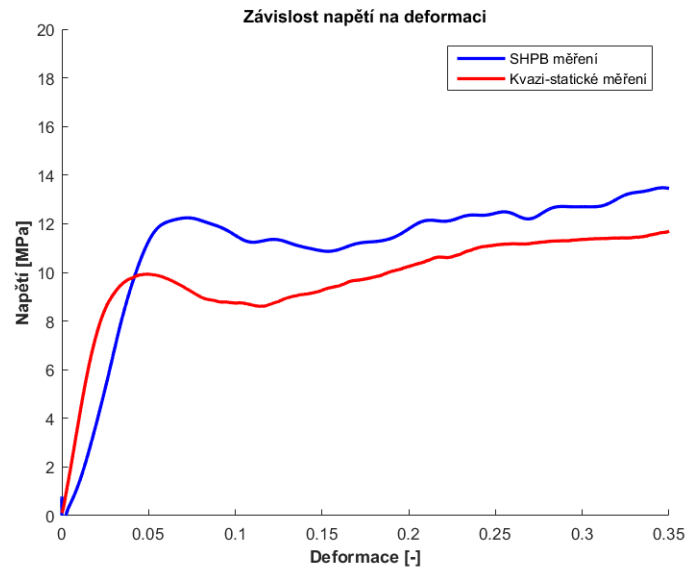
Obrázek 5.15: Dynamická rovnováha sil pro vzorek polymerní pěny

Na obrázku 5.16 je zobrazena závislost rychlosti deformace $\dot{\epsilon}$ vzorku na deformaci ϵ .



Obrázek 5.16: Závislost rychlosti deformace vzorku na deformaci

Na obrázku 5.17 je zobrazena závislost napětí vyvolaného ve vzorku σ na jeho deformaci ε . Pro porovnání je v grafu zanesena stejná závislost při kvazi-statické zkoušce stejné struktury. Pro stejnou deformaci bylo při této dynamické zkoušce napětí vyvolané ve vzorku přibližně o 20% vyšší.



Obrázek 5.17: Závislost napětí ve vzorku na deformaci při měření polymerní pěny

S použitím vytvořeného uživatelského rozhraní bylo možné vyhodnotit experiment provedený na vzorku materiálu s nízkou mechanickou impedancí a to i bez použití korekce disperze.

5.3 Shrnutí

Funkčnost navrženého uživatelského rozhraní byla ukázána při vyhodnocování dvou experimentů provedených v rámci řešení projektů ústavu K618 na Fakultě dopravní. Bylo prokázáno, že s využitím tohoto rozhraní je možné vyhodnocovat jak experimenty provedené na vzorcích se složitou auxetickou strukturou za vysoké rychlosti deformace, tak i na vzorcích vyrobených z polymerní pokovené pěny s nízkou mechanickou impedancí. I přes silný vliv vlnové disperze a dalších negativních vlivů fungovalo navržené uživatelské řešení dobře a výsledky jím vyhodnocené byly konzistentní a porovnatelné s dříve již publikovanými výsledky.

Kapitola 6

Závěr

V rámci této práce bylo vytvořeno modulární grafické uživatelské rozhraní v prostředí Matlab spolu s funkcemi pro vyhodnocování dynamických mechanických experimentů prováděných na SHPB zařízení v rámci řešení projektů prováděných na ústavu K618 Fakulty dopravní ČVUT. Za tímto účelem byla vytvořena sada softwarových nástrojů, které byly v tomto prostředí implementovány. Toto řešení umožňuje podrobnou analýzu naměřených experimentálních dat včetně pokročilé korekční analýzy založené na kalibračních měřeních a exportu získaných výsledků.

Uvedení uživatelského rozhraní do běžného provozu umožnilo výrazně zkrátit čas potřebný pro vyhodnocení experimentu. Celý vyhodnocovací proces byl značně automatizován, čímž byl minimalizován vliv lidského faktoru při zadávání konstant a parametrů experimentu. Funkčnost celého rozhraní a všech jeho funkcí byla pro účely této práce ukázána na vyhodnocení experimentů dvou typů materiálů. Byly prezentovány jak výsledky vyhodnocené s využitím tohoto řešení při měření vzorku materiálu se složitou auxetickou strukturou tak i výsledky měření vzorku polymerní pěny s nízkou mechanickou impedancí. Bylo ukázáno, že navržené řešení je vhodné pro vyhodnocování SHPB experimentů s vysokou dopadovou rychlostí strikeru přesahující 45 ms^{-1} a značnou disperzí naměřených signálů.

Modularita navrženého řešení zaručuje snadnou rozšiřitelnost o nové funkční bloky či úpravu stávající bloků a tím možnost dále rozvíjet proces vyhodnocování pro budoucí potřeby prováděných experimentů na SHPB zařízení. Do budoucna je dále uvažováno rozšíření grafického rozhraní o možnost vyhodnocování experimentu s využitím metody optické korelace obrazu a také o rozšíření experimentálního aparátu o možnost tenzometrického měření na více místech měřících tyčí, čímž by bylo možné celý vyhodnocovací proces ještě zpřesnit.

Literatura

- [1] Francis, D. K., Whittington, W. R., Lawrimore II, W. B., Allinson, P. G., Turnage, S. A., Bhattacharyya, J. J. :*Split Hopkinson Pressure Bar Graphical Analysis Tool*, Experimental Mechanics (2016), DOI: 10.1007/s11340-016-0191-9
- [2] Meyers, M. A.:*Dynamic behaviour of materials*, New York: John Wiley and Sons. 1994,668 s. ISBN: 0-471-58262-x.
- [3] Sunny,G., Yuan,F., Prakash, V., Lewandowski,J.:*Design of Inserts for Split-Hopkinson Pressure Bar Testing of Low Strain-to-Failure Materials*, Experimental Mechanics,DOI: 10.1007/s11340-008-9145-1.
- [4] Song,B.,Chen,W. :*Split Hopkinson pressure bar techniques for characterizing soft materials*,Schools of Aero/Astro and Materials Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, USA 0-471-58262-x.
- [5] Kolsky,H.: *An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading*, Proc Phys Soc, B 62:676–700
- [6] Di Donato,H., Garbezza, J. P., Infante,A., Lopez, R. :*STRIKER MECHANISM UPGRADE FOR THE SPLIT-HOPKINSON PRESSURE BAR EXPERIMENT*,EML 4551 Senior Design Project.
- [7] Song,B.,Chen,W. :*Split Hopkinson (Kolsky) bar: design, testing and applications*,New York: Springer, c2011. Mechanical engineering series. ISBN: 9781441979827.
- [8] National Instruments Corporation:*Strain Gauge Measurement – A Tutorial*, National Instruments Catalogue, 1998, ID: 341023C-01
- [9] Hoffmann,K. : *Applying the Wheatstone Bridge Circuit*, [online], [cit. dne 5.5.2017], Dostupné z: <http://fab.cba.mit.edu>.

- [10] *Výroba tenzometrů a snímačů Zlín*, [online],[cit. dne 5.5.2017],Dostupné z: <http://vtsz.cz/image.ashx?i=157313.pdf&fn=>.
- [11] Young, K.:*Development of a Tensile Split Hopkinson Pressure Bar Testing Facility*,(2015). Electronic Theses and Dissertations. Paper 5513.
- [12] Bacon, C.:*An Experimental Method for Considering Dispersion and Attenuation in a Viscoelastic Hopkinson Bar*,1998, 38, 242, DOI:10.1007/BF02410385
- [13] Janiszewski, J., Buzantowicz, W., Barnowski, P.: *Correction Procedure of Wave Signals for a Viscoelastic Split Hopkinson Pressure Bar*, Problems of Mechanics. Armament, Aviation, Safety Engineering [online]. 2016-3-31, 7(1), 17-30 [cit. 2017-05-14]. DOI: 10.5604/20815891.1195198. ISSN 2081-5891. Dostupné z: <http://9139.indexcopernicus.com/abstracted.php?level=5ICID=1195198>
- [14] Gama, B. A., Lopatnikov S. L.,John W Gillespie, J. W.: *Hopkinson bar experimental technique: A critical review. Applied Mechanics Reviews* [online]. 2004, 57(4), 223- [cit. 2017-05-14]. DOI: 10.1115/1.1704626. ISSN 00036900.
Dostupné z: AppliedMechanicsReviews.asmedigitalcollection.asme.org
- [15] Ren, L., Larson, M., Gama,B. A., Gillespie, J., W. : *Wave Dispersion in Cylindrical Tubes: Applications to Hopkinson Pressure Bar Experimental Techniques*,2004,Center for Composite Materials University of Delaware
- [16] Erjavec,M.: *Mechanical properties of cellular materials*,2011,University of Ljubljana, Faculty of Mathematics and Physics
- [17] Koudelka, P., Jiroušek, O., Fíla, T., Doktor, T.: *Compressive Properties of Auxetic Structures Produced by Direct 3D Printing*, Matriali in tehnologije : Materials and technology, ISSN: 1580-2949
- [18] Fíla, T., Zlámal, P., Jiroušek, O., Falta, J., Koudelka, P., Kytýř, D., Doktor, T., Valach, J.: *Impact Testing of Polymer-filled Auxetics Using Split Hopkinson Pressure Bar*, DOI: 10.1002/adem.201700076

Příloha 1

Hlavička experimentálních dat

Pro načtení proměnných obsažených v hlavičce experimentálních dat do prostředí matlab byla použita funkce *inifile.m* ((c) Primoz Cermelj, Slovinsko) a umístěná k volnému užití na webových stránkách MathWorks Inc. Pro správné načtení všech proměnných je nutné, aby navržená hlavička měla odpovídající formát. Hlavička je tak rozdělena do sekcí, podsekcí, klíčových slov a hodnot odpovídajícím klíčovým slovům. Jednotlivé sekce jsou charakterizovány textovým řetězcem (názvem sekce) ve hranatých závorkách. Podsekce jsou charakterizovány textovým řetězcem (názvem podsekce) ve složených závorkách. Klíčová slova a jejich hodnoty jsou odděleny znaménkem = , řetězec na levé straně odpovídá klíčovému slovu a řetězec na pravé straně jeho hodnotě. Hlavička experimentálních dat navržená pro měření s využitím SHPB zařízení je rozdělena celkem do devíti sekcí:

- *Experiment* (obsahuje identifikátor experimentu)
- *Specimen* (specifikace zkoumaného vzorku)
- *Setup settings* (informace o nastavení experimentálního sestavení)
- *Camera settings* (informace o nastavení rychloběžné kamery)
- *Pulse shaper* (informace o pulse-shaperu)
- *Striker* (specifikace použitého strikeru)
- *Setup* (specifikace použitého experimentálního sestavení)
- *Data* (zaznamenaná experimentální data)

Experiment

Sekce *Experiment* obsahuje pouze jedno klíčové slovo *Experiment ID*. Hodnota tohoto klíčového slova je libovolný textový řetězec, který představuje unikátní identifikátor provedeného experimentu.

Specimen

Sekce *Speciment* obsahuje pět klíčových slov:

- *Speciment ID* - textový řetězec, unikátní identifikátor použitého vzorku,
- *Length* - kladná číselná hodnota, délka použitého vzorku v $[mm]$,
- *Crossection* - kladná číselná hodnota, nebo dvě číselné hodnoty oddělené čárkou, průměr vzorku (kruhový průřez) nebo délky hran vzorku (obdelníkový průřez) v $[mm]$,
- *Material* - kladná číselná hodnota, hustota materiálu použitého vzorku v $[kgm^{-3}]$,
- *Notes* - textový řetězec, doplňující specifikace použitého vzorku.

Setup settings

Sekce *Setup settings* obsahuje tři klíčová slova a dvě podsekce:

- *Pressure* - kladná číselná hodnota, tlak vzdušníku vzduchového děla v $[Pa]$,
- *Sample rate* - kladná číselná hodnota, frekvence záznamu napětí na měřících místech v $[Hz]$,
- *Notes* - textový řetězec, doplňující specifikace nastavení experimentálního sestavení
- **Podsekce *Messuring point 1***
 - *Strain gage voltage* - kladná číselná hodnota, napětí zdroje přivedené na měřící obvod na měřícím místě 1 ve V ,
 - *Apmplification* - kladná číselná hodnota, zesílení zesilovače signálu naměřeném na měřícím místě 1.

- **Podsekce *Messuring point 2***

- *Strain gage voltage* - kladná číselná hodnota, napětí zdroje přivedené na měřicí obvod na měřicím místě 2 ve V ,
- *Amplification* - kladná číselná hodnota, zesílení zesilovače signálu naměřeném na měřicím místě 2.

Camera settings

Sekce *Camera settings* obsahuje dvě klíčová slova:

- *Sample rate* - kladná číselná hodnota, frekvence záznamu jednotlivých snímků rychloběžnou kamerou v $[Hz]$,
- *Notes* - textový řetězec, doplňující specifikace nastavení rychloběžné kamery.

Pulse shaper

Sekce *Pulse shaper* obsahuje tři klíčová slova:

- *Geometry* - dvě kladné číselné hodnoty, průměr a tloušťka použitého pulse-shaperu v $[mm]$,
- *Material* - kladná číselná hodnota, hustota materiálu použitého pulse-shaperu v $[kgm^{-3}]$,
- *Notes* - textový řetězec, doplňující specifikace použitého pulse-shaperu.

Striker

Sekce *Striker* obsahuje čtyři klíčová slova:

- *Striker ID* - textový řetězec, unikátní identifikátor použitého strikeru,
- *Length* - kladná číselná hodnota, délka použitého strikeru v $[mm]$,
- *Material* - kladná číselná hodnota, hustota materiálu použitého strikeru v $[kgm^{-3}]$,
- *Notes* - textový řetězec, doplňující specifikace použitého strikeru.

Setup

Sekce *Setup* obsahuje tři klíčová slova a tři podsekcce:

- *Setup ID* - textový řetězec, unikátní identifikátor použitého experimentálního sestavení,
- *Gateway distance* - kladná číselná hodnota, vzdálenost mezi optickými bránami v $[mm]$,
- *Gate to bar distance* - kladná číselná hodnota, vzdálenost mezi druhou optickou bránou a ústním hlavně vzduchového děla v $[mm]$,
- **Podsekcce *Bars specification***
 - *Length* - kladná číselná hodnota, délka použitých měřících tyčí v $[mm]$,
 - *Material* - kladná číselná hodnota, hustota materiálu použitých měřících tyčí v $[kgm^{-3}]$,
- **Podsekcce *Messuring point 1***
 - *Strain gage type* - kladná číselná hodnota 1 nebo 2, typ použitého tenzometru na měřícím místě 1 (1 - fóliový tenzometr, 2- polovodičový tenzometr),
 - *Strain gage constant C1* - kladná číselná hodnota, tenzometrická konstanta C_1 pro tenzometr použití na měřícím místě 1,
 - *Strain gage constant C2* - kladná číselná hodnota, tenzometrická konstanta C_2 pro tenzometr použití na měřícím místě 1,
 - *Bridge* - kladná číselná hodnota 1, 2 nebo 3, typ použitého zapojení tenzometrů na měřícím místě 1 (1 - plný Wheatstoneův můstek, 2- poloviční Wheatstoneův můstek, 3- čtvrtinový Wheatstoneův můstek),
 - *Start face to strain gage distance* - kladná číselná hodnota, vzdálenost měřícího místa 1 od čela měřící tyče v $[mm]$,
 - *Notes* - textový řetězec, doplňující specifikace měřícího místa 1.
- **Podsekcce *Messuring point 2***
 - *Strain gage type* - kladná číselná hodnota 1 nebo 2, typ použitého tenzometru na měřícím místě 2 (1 - fóliový tenzometr, 2- polovodičový tenzometr),
 - *Strain gage constant C1* - kladná číselná hodnota, tenzometrická konstanta C_1 pro tenzometr použití na měřícím místě 2,

- *Strain gage constant C2* - kladná číselná hodnota, tenzometrická konstanta C_2 pro tenzometr použití na měřícím místě 2,
- *Bridge* - kladná číselná hodnota 1, 2 nebo 3, typ použitého zapojení tenzometrů na měřícím místě 2 (1 - plný Wheatstoneův můstek, 2- poloviční Wheatstoneův můstek, 3- čtvrtinový Wheatstoneův můstek),
- *Start face to strain gage distance* - kladná číselná hodnota, vzdálenost měřícího místa 2 od čela měřící tyče v $[mm]$,
- *Notes* - textový řetězec, doplňující specifikace měřícího místa 2.

Data

Sekce *Data* obsahuje pouze jedno klíčové slovo *Delimiter*, jehož hodnota je 0 a slouží k oddělení hlavičky od zaznamenaných dat pro usnadnění načítání.

Ukázka hlavičky experimentálních dat

[Experiment]
ExperimentID = Experiment1

[Speciment]
Speciment ID = polymer_nikl
Length = 9.9
Crossection = 21.2
Material = 1005
Notes = Speciment slightly damaged

[Setupsettings]
Pressure = 2000
Sample rate = 200e5
{Measuring point 1}
Strain gage voltageU1 = 4.03
Amplification = 100
{Measuring point 2}
Strain gage voltageU2 = 4.01
Amplification = 100
Notes = None

[Camera settings]
Sample rate = 20000000
Notes = None

[Pulse shaper]
Geometry = 5,12
Material = 950
Notes = None

[Striker]
Striker ID = Striker1
Length = 500
Material = 2700
Notes = None

[Setup]

Setup ID = Setup1
Gateway distance = 240
Gate to bar distance = 120
{Bars specification}
Length = 1600
Material = 2700
{Measuring point 1}
Tensometertype = 1
Strain gage constant C1 = 1.99
Strain gage constant C2 = 1.99
Bridge = 2
Start face to strain gage distance = 800
Notes = None
{Measuring point 2}
Tensometer type = 2
Strain gage constant C1 = 1.99
Strain gage constant C2 = 1.99
Bridge = 2
Start face to strain gage distance = 800
Notes = None
[Data]
Delimiter = 0

Příloha 2

Uživatelské rozhraní

Celé grafické uživatelské rozhraní včetně jeho externích funkčních bloků je k práci přiloženo ve formě elektronické přílohy. Celou aplikaci je možné vyzkoušet spuštěním souboru *SHPB.m* a její funkčnost lze ověřit načtením ukázkového souboru naměřených dat *test_file.ini*.