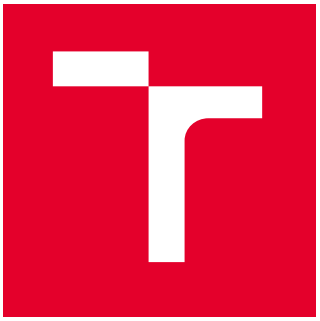


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝVOJ ZAŘÍZENÍ HSBT PRO TAHOVÉ RÁZOVÉ TESTY

DEVELOPMENT OF THE HSBT TENSILE IMPACT TEST EQUIPMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Vladimír Pech**

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Miroslav Jopek, Ph.D.**

SUPERVISOR

BRNO 2024

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Bc. Vladimír Pech**
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	**Ing. Miroslav Jopek, Ph.D.**
Akademický rok:	2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vývoj zařízení HSBT pro tahové rázové testy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh a vývoj nového zkušebního zařízení pro tahové rázové testy na principu Hopkinsonovy měrné dělené tyče. Předpoklad je návrh a realizace tahových zkoušek vybraného materiálu při rázových rychlostech od 20 do 40 m/s.

Cíle diplomové práce:

– Vypracovat literární studii se zaměřením na problematiku vysokých rychlostí deformace.
– Zhodnotit současný stav a problémy spojené se zkouškami materiálů za vysokých rychlostí deformace.
– Navrhnout zkušební zařízení pro tahové rázové testy na principu Hopkinsonovy měrné dělené tyče.
– Sestrojit a prakticky otestovat nově navržené zařízení pro tahový rázový test na principu Hopkinsonovy měrné dělené tyče.
– Porovnat a zhodnotit výsledky experimentů u navrženého zařízení pro konkrétní typ materiálu.

Seznam doporučené literatury:

MEYERS, Marc André. Dynamic Behavior of Materials. Marc. A. Mayers. 1 edice. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1994. 668 s. A Wiley Interscience Publication. ISBN 0-471-58262-X.

GILLIS, Peter a GROSS, Ted. Effect of Strain Rate on Flow Properties. Metals handbook, 9 edice, roč. 8 – Mechanical Testing. American Society for Metals, Ohio, 1985.

NOWACKI, Wojciech a KLEPACZKO Janusz. New Experimental Methods in Material Dynamics and Impact. In Trends in Mechanics of Materials. Roč 3, 2003.

JOPEK, Miroslav. Modelování mechanického chování ocelí za vyšších rychlostí deformace, PhD thesis, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, 2003. ISBN 80-214-2437-0.

KUNČICKÁ, Lenka; JOPEK, Miroslav; KOCICH, Radim a DVOŘÁK, Karel. Determining Johnson-Cook Constitutive Equation for Low-Carbon Steel via Taylor Anvil Test. Materials, 2021, roč. 14, č. 17, s. 1-15. ISSN 1996-1944.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na konstrukci zařízení pro tahové rázové testy na principu Hopkinsonovy měrné dělené tyče. V teoretické části je popsáno chování materiálů za dynamických podmínek zatěžování a popis používaných metod testování. Práce detailně popisuje Hopkinsonův tahový test a různé konstrukční varianty tohoto zařízení, včetně jejich principu, výhod a nevýhod. V praktické části práce je navrženo zkušební zařízení a jsou zde rozebrány jednotlivé části zařízení. U klíčových částí je popis volby materiálu a geometrických parametrů pro správnou funkčnost zařízení. Sestrojené zařízení je otestováno na vzorcích z materiálu PETG. K záznamu dat během testu byly použity kapacitní snímače i tenzometry pro ověření správné funkčnosti zařízení.

Klíčová slova

deformace, dynamické zatěžování, dynamické materiálové testy, Hopkinsonův tahový test, impaktor, vstupní tyč, výstupní tyč, materiál PETG

ABSTRACT

The thesis is focused on the design of a device for tensile impact tests based on the Hopkinson's split bar principle. The theoretical part describes the behaviour of materials under dynamic loading conditions and a description of the testing methods used. The thesis describes in detail the Hopkinson tensile test and different design variants of this device, including their principle, advantages and disadvantages. In the practical part of the thesis is designed the testing device and the individual parts of the device are analyzed. For the key parts, the selection of materials and geometric parameters is described to ensure the proper functionality of the device. The constructed device is tested by samples made from PETG material. Capacitive sensors and strain gauges were used to record data during the test to verify the correct functionality of the device.

Keywords

deformation, dynamic loading, dynamic material tests, the Hopkinson tensile test, impactor, input bar, output bar, PETG material

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PECH, Vladimír. *Vývoj zařízení HSBT pro tahové rázové testy* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157306. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Jopek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vývoj zařízení HSBT pro tahové rázové testy vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno 24.5.2024

Vladimír Pech

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Miroslavu Jopkovi Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Zároveň dekuji mým rodičům za podporu po dobu celého mého studia.

OBSAH

Zadání práce
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

ÚVOD 9
1 ROZBOR ZADÁNÍ 10
1.1 Chování materiálu při deformaci 10
1.1.1 Kvazistatická tahová zkouška 10
1.1.2 Dynamické podmínky zatěžování 11
2 Testy materiálů 14
2.1 Taylorův test 15
2.2 Metoda Hopkinsonovy měrné dělené tyče 16
2.2.1 Typy Hopkinsonova testu 16
2.3 Hopkinsonův tahový test 19
2.3.1 Modifikace tlakového testu na tahový pomocí trubkového pouzdra 19
2.3.2 Modifikace tlakového testu na tahový pomocí límce 19
2.3.3 Vyvození tahové síly rotačním diskem 20
2.3.4 Vyvození tahové síly pomocí trubkového impaktoru 21
2.4 Upnutí vzorku a vyhodnocení Hopkinsonova tahového testu 22
2.4.1 Šíření napěťových vln 24
2.4.2 Měření a vyhodnocení deformace na základě šíření napěťových vln 25
3 Konstrukce zkušebního zařízení 31
3.1 Válcová hlaveň 32
3.1.1 Svařování PPR komponent 36
3.2 Přívod stlačeného vzduchu 37
3.3 Impaktor 37
3.4 Vstupní tyč 40
3.5 Výstupní tyč 41
3.6 Vzorek 42
3.7 Uchycení k rámu 44
3.8 Absorbér nárazu 48
3.9 Systém pro sběr dat 50
4 Testy 53
ZÁVĚR 59

Seznam použitých zdrojů
Seznam použitých symbolů a zkratek
Seznam příloh
Seznam výkresů

ÚVOD

Deformace těles je jev popisující změnu tvaru nebo velikosti objektu v důsledku působení vnějších sil. S tímto dějem se setkáváme všude kolem nás. Příkladem může být jízda na kole, kdy se pod váhou lidského těla deformuje pneumatika, která mění svůj tvar. Také při tvářecích procesech nastává deformace tělesa vlivem aplikovaného silového zatížení, kdy pro správný proces je nutné tento děj umět popsat.

Pro souhrnný popis mechanických vlastností konkrétního materiálu při deformaci a jeho správného pochopení nestačí vycházet pouze z kvazistatických testů, mezi které patří zkouška tahem, tlakem nebo ohybem. U materiálu je také důležité znát jeho chování za dynamických podmínek zatěžování. Dynamické zatěžování je charakterizované rychlým uvolněním energie v krátkém časovém intervalu, které v materiálu vyvolává odlišné chování. Takto mohou být běžné součástky nečekaně vystaveny dynamickému zatížením, příkladem může být nečekaný náraz. Tato kolize může mít vliv na důležité vlastnosti materiálu, jako je mez pružnosti nebo mez pevnosti. Proto je nutné toto možné chování znát a umět popsat.

Praktické využití lze nalézt například v automobilovém průmyslu. Každé vozidlo obsahuje deformační zóny, které mají za úkol při dopravní nehodě pohltit co nejvíce energie a zamezit tím deformaci dalších částí vozidla, které by mohly vést k ohrožení posádky automobilu. Již při konstrukci vozidel je dobré znát chování materiálu při deformaci. Údaje o materiálu lze dále využít v materiálových modelech a tvorbě simulací, jako mohou být simulace crash testů, viz Obr. 1. Další využití zkoumání deformací za vysokých rychlostí lze nalézt ve zbrojním průmyslu, kde většina deformací jsou dynamického charakteru. [1]

a) Numerická simulace nárazu

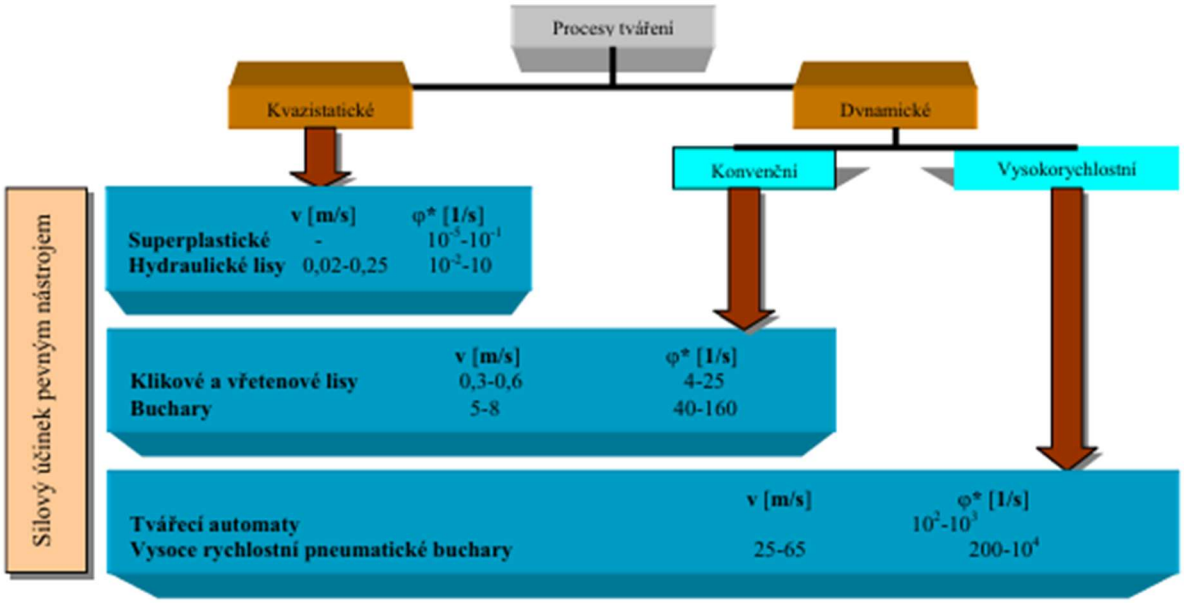
b) Reálná zouška

Obr. 1 Crash test [1].

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Tvářecí procesy lze rozdělit na základě rychlosti deformace na kvazistatické a dynamické. Na Obr. 2 lze vidět rozdělení tvářecích strojů podle rychlosti nástroje a rychlosti deformace.

Při dynamických podmínkách zatěžování jsou vlastnosti materiálu rozlišné od vlastností při kvazistatických podmínkách. Jednotlivé faktory, které způsobují odlišnost jsou blíže popsány v kapitole 1.1.2. [2; 3]



Obr. 2 Rozdělení tvářecích procesů [3].

Tvářecí procesy lze dále rozdělit na základě teplot, protože při změně teploty se mění deformační odpor materiálu. Tvářecí procesy lze rozdělit na tváření za studena, za tepla a tváření za poloohřevu. Teplota tvářecího procesu je vyjádřena v poměru k teplotě tavení materiálu (T_{TAV}). Při změně teploty se mění deformační odpor materiálu. [2]

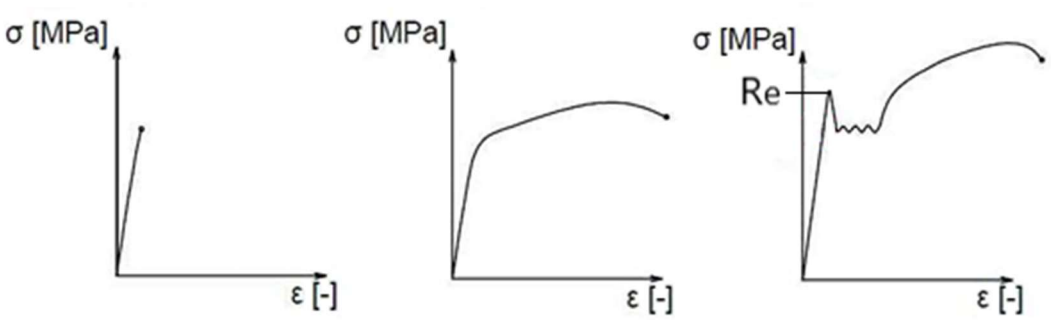
1.1 Chování materiálu při deformaci

Deformací se rozumí změna tvaru tělesa způsobena vnějšími nebo vnitřními silami. Při silovém zatížení tělesa nejprve vzniká elastická (pružná) deformace a poté následuje plastická (trvalá) deformace, která způsobí přetvoření tělesa. Deformace mohou probíhat za kvazistatických nebo dynamických podmínek zatěžování. Jednu z nejrozšířenějších metod pro sledování deformace při zatěžování představuje tahová zkouška. [2; 4; 5]

1.1.1 Kvazistatická tahová zkouška

Ke sledování deformace v závislosti na silovém zatěžování se využívá tahová zkouška, kdy jejím výstupem je tahový diagram a informace o mechanických vlastnostech daného materiálu. Podle tahových diagramů lze materiály rozdělit do několika skupin znázorněných na Obr. 3. U křehkých materiálů nelze dobře definovat mez kluzu, protože nevykazují plastickou deformaci. U materiálů s výraznou mezí kluzu lze rozlišit pružnou a plastickou deformaci. Na mezi kluzu vzniká plastická deformace, která dále narůstá, aniž by bylo zvyšováno silové zatížení. Způsobené plastické deformace jsou důsledkem vnějšího zatížení za vzniku poruch krystalové mřížky v materiálu. Mezi poruchy krystalové mřížky patří bodové, plošné, čárové

a prostorové poruchy. Tyto jednotlivé poruchy mají vliv na pevnost materiálu v tahu. [2; 4; 5; 6]

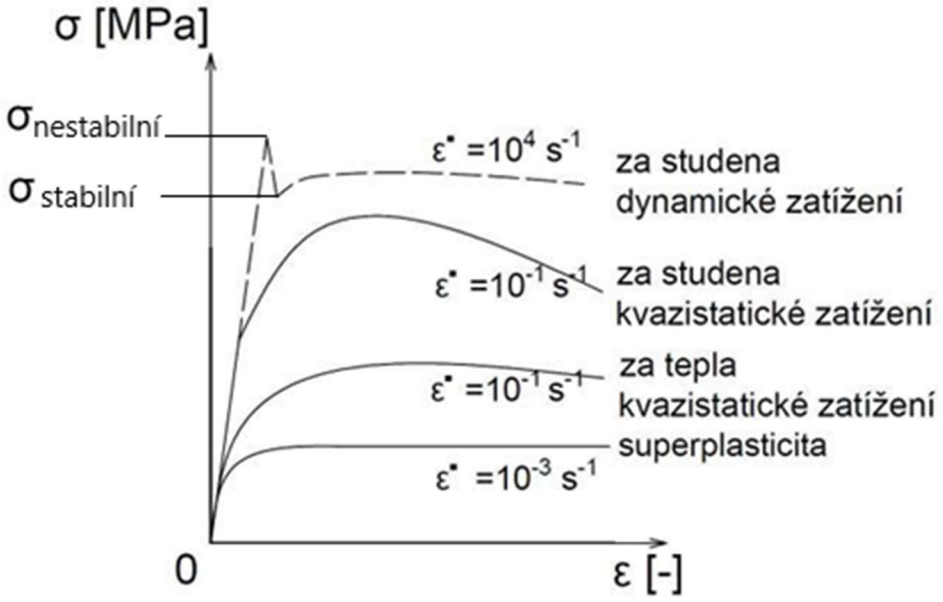


a) křehké materiály b) materiály s nevýraznou mezí kluzu c) materiály s výraznou mezí kluzu

Obr. 3 Tahový diagram – podle [7].

1.1.2 Dynamické podmínky zatěžování

Při dynamickém zatěžování jsou vlastnosti materiálu ovlivňovány různými faktory, jako je rychlost přetvoření, stav napjatosti, šíření napěťových vln a účinky setrvačných sil. Za dynamických podmínek zatěžování se mění modul pružnosti, mez kluzu a mez pevnosti. Také se mění průběh přirozeného přetvárného odporu. Graf průběhu přirozeného odporu materiálu v závislosti na stupni přetvoření, rychlosti deformace a teploty je zobrazen na Obr. 4. Na zařazení technologie mezi kvazistatické nebo dynamické děje má rozhodující vliv fyzikální veličina rychlost deformace. [3; 4]



Obr. 4 Křivky přetvárných odporů v závislosti na rychlosti deformace a teplotě [7].

Při řešení problematiky deformace za vysokých rychlostí je důležitá fyzikální veličina rychlost deformace, která ovlivňuje reakci materiálu na mechanické namáhání. Rychlost deformace lze definovat pomocí procesu tváření, kdy se nástroj pohybuje danou rychlostí, která se odvíjí od druhu použitého stroje. Pohyb nástroje při kontaktu s materiálem je podmíněn deformací materiálu. Rychlost deformace je tedy dána změnou logaritmické deformace za jednotku času, která je popsána následujícím vztahem (1.1). Úpravou vztahu lze rychlost deformace definovat jako poměr okamžité rychlosti pohybu nástroje ku vztažné výšce. [4]

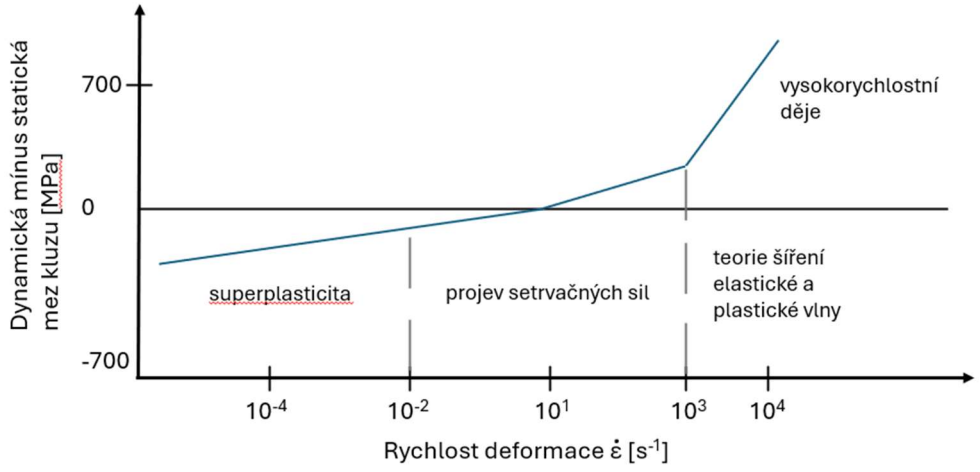
Výpočet rychlosti deformace [4]:

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{dh}{h}\frac{1}{dt} = \frac{v_0}{h}, \tag{1.1}$$

kde: $\dot{\varphi}$ – rychlost deformace $[s^{-1}]$,
v_0 – okamžitá rychlost pohybu nástroje $[m \cdot s^{-1}]$,
h – vztažná výška $[m]$.

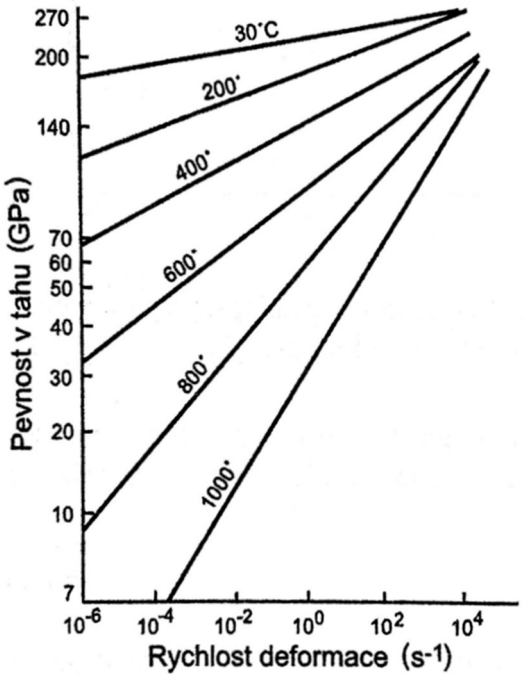
Rychlost deformace má značný vliv na mechanické vlastnosti materiálu. Při rychlostech deformace od 10^3 s^{-1} lze pozorovat výrazné zvýšení meze kluzu, viz Obr. 5. Určitý materiál vykazuje odlišné mechanické vlastnosti při kvazistatických a dynamických podmínkách zatěžování. [7; 8]

Rychlost deformace má vliv na průběh přirozeného přetvárného odporu v závislosti na stupni přetvoření. Při různých rychlostech deformace se mění mez kluzu. Za vyšších rychlostí deformace (již od 100 s^{-1}) má materiál dvě úrovně meze kluzu, nestabilní mez kluzu ($\sigma_{nestabilní}$) a stabilní mez kluzu ($\sigma_{stabilní}$). Při dynamickém zatěžování materiálu se horní mez kluzu nazývá nestabilní mez kluzu a jedná se o ostrý hrot v křivce znázorňující průběh přirozeného přetvárného odporu, viz Obr. 4. Důvod vzniku tohoto ostrého přechodu si někteří autoři vysvětlují jako vnitřní zhroucení materiálu, které souvisí s nestabilitou deformačního procesu [9]. Podle jiných autorů tento jev souvisí s jevem dynamického deformačního stárnutí. Jevy nestabilní meze kluzu lze vysvětlit na základě uchycení dislokací. Při zatěžování materiálu roste vnější napětí nad hodnotu, která je nutná k pohybu dislokací na větší vzdálenosti. V okamžiku dosažení vnějšího napětí na úroveň, kdy se dislokace utrhnou od bodových poruch, kterými jsou uchyceny, dochází k pohybu dislokací. Napětí poklesne na hodnotu, která by odpovídala situaci bez uchycení dislokacemi, to znamená na hodnotu dolní meze kluzu. Bez zvětšujícího napětí se výrazně zvětšuje deformace. [3; 7]



Obr. 5 Vliv rychlosti deformace na mez kluzu – podle [7].

Při vyšších rychlostech deformace a změnách teploty lze také pozorovat změnu pevnostních charakteristik. S rostoucí rychlostí přirozený přetvárný odpor narůstá a je také ovlivněn teplotou. Při vyšších rychlostech deformace lze pozorovat zvýšené pevnostní charakteristiky, jak je vidět na Obr. 6. [8]



Obr. 6 Vliv rychlosti deformace a teploty na pevnost v tahu [8].

2 TESTY MATERIÁLŮ

Podle rychlosti deformace lze provádět zkoušky a zatížení materiálu podle různých testovacích metod zobrazených v Tab. 1 [5].

Tab. 1 Rozdělení testovacích metod podle rychlosti deformace [5].

Rozdělení rychlosti	Rychlost deformace	Testovací metody	Dynamické charakteristiky	Účinek setrvačných sil a šíření napěťových vln
Nízká rychlost (low rate)	0,1 – 1 s^{-1}	Kvazistatické testy, hydraulické stroje	Konstantní napětí a rychlost deformace	Nepodstatný vliv
Střední rychlost (medium rate)	1 – 10^2 s^{-1}	Rychlé zatěžování	Mechanická odezva vzorku a rámu stroje	Malý vliv
Vysoká rychlost (high rate)	10^2 – 10^5 s^{-1}	Dynamické zatěžování, Hopkinsonův test, Taylorův test	Šíření napěťových vln	Ovlivňuje výpočet napětí
Velmi vysoká rycholst (very high rate)	> 10^5 s^{-1}	Impulsní zatěžování, test výbuchem	Šíření rázových vln	Rozhodující vliv na výsledky

Mezi metody k provedení dynamických testů se řadí Taylorův test (TAT) a metoda Hopkinsonovy měrné dělené tyče (SHBS). Metody se využívají pro studium chování materiálů za vysokých rychlostí deformace a slouží ke zjišťování dynamických a mechanických vlastností materiálů. Těmito metodami se získají údaje o materiálech sloužících k tvorbě materiálových modelů, které se dále uplatňují na tvorbu simulací reálných dějů. [5; 10; 11]

Pro dynamické zatěžování při rychlostech deformace $10^2 - 10^5\ s^{-1}$ je charakteristické šíření napěťových vln. Vnitřní napětí se přenáší z atomu na atom určitou rychlostí. Na atomární úrovni si lze vlnu představit jako sled dopadů mezi sousedními atomy. Každý atom, který je urychlen, předá část hybnosti sousednímu atomu. Hmotnost a přitažlivé nebo odpudivé síly mezi atomy určují, jak se pulz napětí přenáší z jednoho místa na druhé. V pevných látkách se v závislosti na pohybu materiálu mohou šířit různé typy elastických vln. [5; 12].

Mezi základní typy elastických vln v pevných látkách patří [12]:

- podélné vlny,
- smykové (příčné) vlny,
- povrchové vlny,
- mezifázové vlny,
- ohybové vlny.

Podélné vlny odpovídají pohybu částic ve směru šíření vln tak, že rychlost částice je rovnoběžná s rychlostí vlny. Pokud je vlna tlakového charakteru, tak rychlosti částic a vln

jsou rovnoběžné. V případě tahového charakteru jsou rychlosti opačného směru. Při interakci vlny s prostředím jiné zvukové impedance se vlna částečně odrazí a částečně projde skrz. [12]

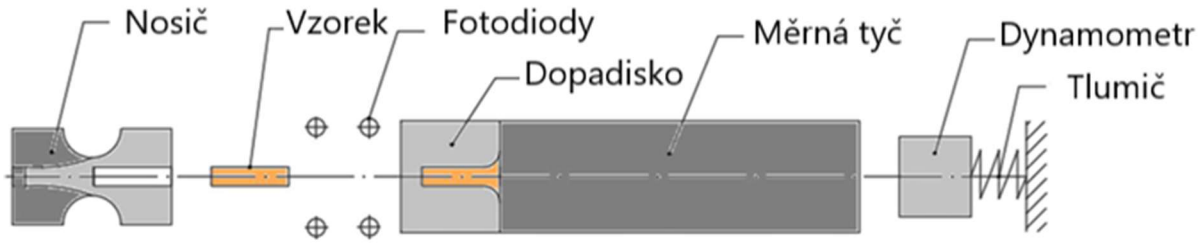
V případě překročení napětí meze pružnosti nastává plastická deformace. Pokud je impuls přenesen na materiál, jehož amplituda překračuje mez pružnosti, tak se impuls rozdělí na elastickou a plastickou vlnu. [12]

Rozlišují se tři základná typy plastických vln [12]:

- plastické vlny v prutech, drátech a tyčích,
- plastické vlny v polo-nekonečných tělesech,
- plastické smykové vlny.

2.1 Taylorův test

Princip Taylorova testu spočívá ve vystřelení vzorku z kanónu proti pevnému dopadisku. Zařízení se skládá z kanónu, dopadiska a systému pro sběr dat z fotodiod a dynamometru. Vzorek je umístěn do nosiče, s kterým je společně vystřelen z kanónu. Po vystřelení vzorek dopadá na předem určené dopadisko a následně se zkoumá jeho deformace a další fyzikální charakteristiky. Před samotným dopadem vzorku je pomocí měřícího systému (fotodiod) změřena jeho rychlost. Celé schéma Taylorova testu je zobrazeno na Obr. 7. [3; 10; 13]



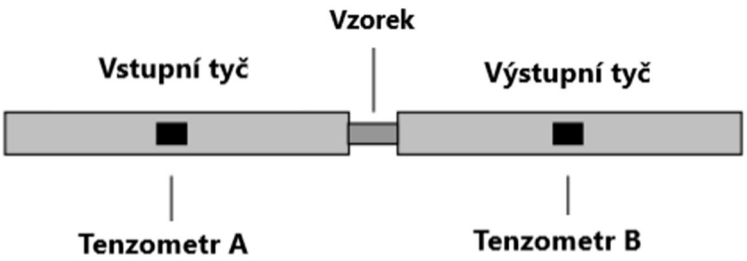
Obr. 7 Schéma Taylorova testu – podle [14]

Taylorův test je využívám v laboratoři vysokých rychlostí deformace na FSI VUT v Brně, viz Obr. 8. Zařízení je konstruované pro průměr nosičů 17 *mm*. Do těchto nosičů je umístěn testovaný vzorek kruhového nebo obdélníkového tvaru. Nosič se vzorkem může dosahovat rychlostí dopadu až 250 $m \cdot s^{-1}$. Dopadová rychlost je měřena pomocí dvou fotodiod umístěných těsně před dopadem vzorku. Fotodiody jsou od sebe vzdáleny určitou vzdálenost a měří dobu průletu vzorku. [10; 14]

Obr. 8 Taylorův kompresní test v laboratoři vysokých rychlostí deformace.

2.2 Metoda Hopkinsonovy měrné dělené tyče

Název metody SHBS je odvozen od pana Hopkinsona, který se zabýval šířením napěťových vln v železném drátu již v roce 1872. Později pan Kolsky vyvinul systém dělených tyčí, kde zkoumaný vzorek je upnutý mezi dvě tyče. Tato metoda se také označuje jako Kolsky bar systém. Metoda SHBS spočívá v umístění materiálového vzorku mezi dvě tyče, vstupní a výstupní tyč, viz Obr. 9. Vzorek je zatížen napěťovou vlnou, která je generována ve vstupní tyči. Vlna se šíří tyčí až na rozhraní tyče a vzorku, kde se částečně odrazí zpátky a částečně projde skrz vzorek do výstupní tyče. Na obou tyčích se pomocí tenzometrů nebo kapacitních snímačů sledují napěťové vlny, pomocí kterých se stanoví deformace vzorku. [5; 11; 15]



Obr. 9 Metoda Hopkinsonovy měrné dělené tyče – podle [16].

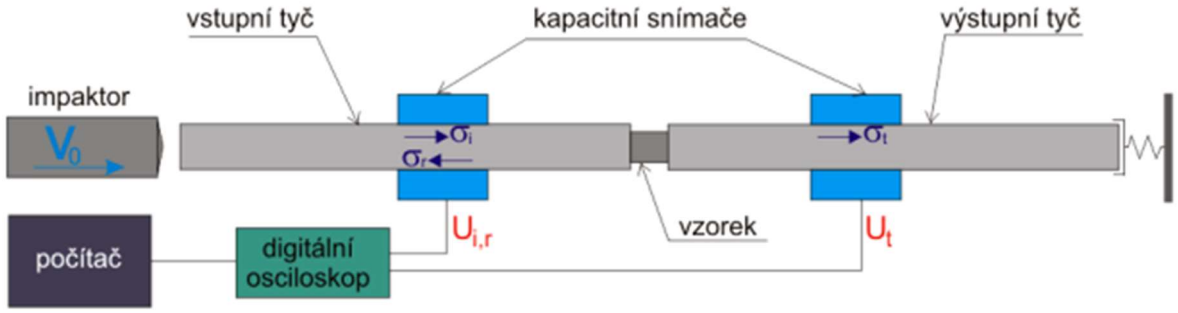
2.2.1 Typy Hopkinsonova testu

Na principu Hopkinsonovy měrné dělené tyče se využívá několik typů zařízení pro zkoumání deformací za vysokých rychlostí. Jednotlivá zařízení se od sebe liší podle způsobu zatěžování zkoumaného tělesa, které vedou k potřebným získaným datům po provedení samotného testu. Dále jsou jednotlivá zařízení rozlišována podle konstrukce provedení, které se liší ve způsobu upnutí vzorku nebo vyvození zatěžovací síly. Metoda se z počátku využívala ke sledování

tlakového zatížení – Hopkinsonův tlakový test (SHPB) a dále byla rozšířena na torzní zatěžování a tahové zatěžování vzorku – Hopkinsonův tahový test (SHTB). [5; 11; 15]

Hopkinsonův tlakový test (SHPB)

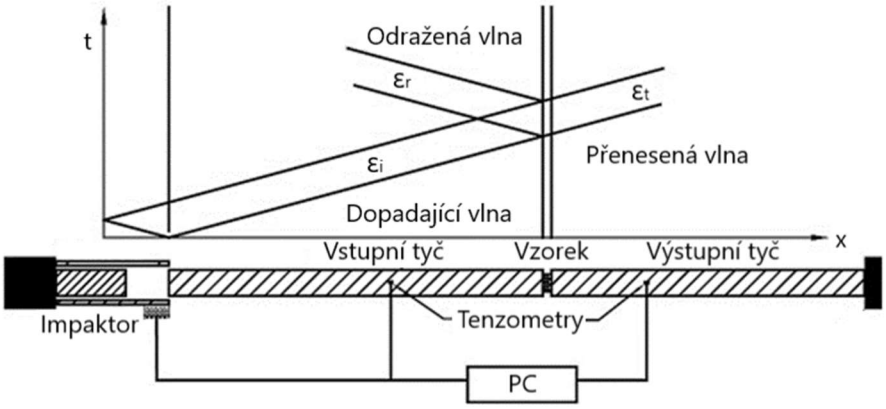
Tento test je založený na teorii jednorozměrného šíření napěťových vln v tyčích. Zařízení se skládá ze dvou tyčí, impaktoru, který slouží jako přenašeč energie, zkušebního vzorku, dvou kapacitních snímačů nebo tenzometrů a systému pro zaznamenávání dat. Schéma tohoto zařízení je znázorněno na Obr. 10. [15; 17]



Obr. 10 Schéma Hopkinsonova kompresního testu [18].

Testovaný vzorek je umístěn mezi vstupní a výstupní tyčí. Poté je impaktor uveden do pohybu, který nárazem do volného konce vstupní tyče vyvolá podélnou tlakovou vlnu. Vlna se šíří v obou směrech. Pro správné vyhodnocení vzorku je důležitá vlna šířící se vstupní tyčí. Tato vlna šířící se směrem ke vzorku, mezi první a druhou tyčí, ($\varepsilon_{i\text{ - dopadající vlna}}$) se po dosažení rozhraní první tyče a vzorku částečně odrazí zpět ($\varepsilon_{r\text{ - odražená vlna}}$) a částečně prochází vzorkem do druhé výstupní tyče ($\varepsilon_{t\text{ - přenesená vlna}}$). Šíření těchto vln je znázorněno na Obr. 11. K zaznamenání pulzu vlny na první vstupní i druhé výstupní tyči slouží kapacitní snímače, popřípadě tenzometry. [15; 17]

Průměry vstupní a výstupní tyče se běžně pohybují od 12 *mm* do 22 *mm* a jejich délka je v rozmezí od 1 200 do 2 400 *mm*. [15; 17; 19]



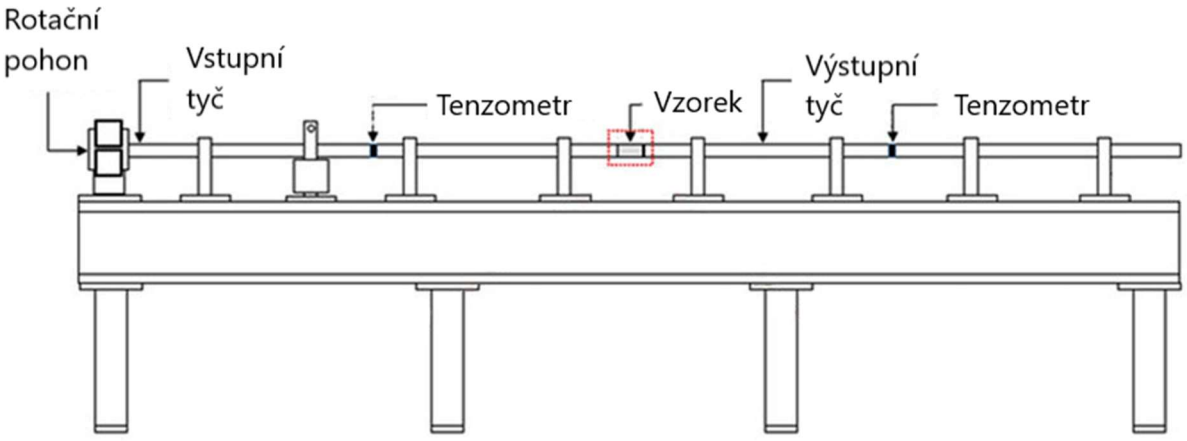
Obr. 11 Schéma šířících se vln – podle [15].

Laboratoř vysokých rychlostí deformace na FSI VUT v Brně je tímto zařízením vybavena. Zařízení využívané v laboratoři bylo původně využíváno na Akademii věd ČR a od roku 1994 je využívané na FSI VUT v Brně. Používané zařízení je zobrazeno na Obr. 12. [10]

Obr. 12 Hopkinsonův tlakový test.

Hopkinsonův torzní test

Při torzním testu je objektem vyhodnocení torzní namáhání zkoušeného vzorku. Zařízení se skládá ze dvou tyčí (vstupní a výstupní tyč), mezi které je umístěn vzorek. Princip spočívá v upevnění vzorku k torzní tyči, která je před začátkem testu napnuta pomocí torzního mechanismu, čímž se v tyči vytvoří potřebná energie. Schéma je zobrazeno na Obr. 13. Následně dojde k uvolnění tyče, což způsobí uvolnění kroutícího momentu vzniklého jejím předchozím napnutím. V důsledku uvolnění se v tyči vytvoří torzní vlna, která způsobí deformaci vzorku. [20; 21]



Obr. 13 Hopkinsonův torzní test – podle [22].

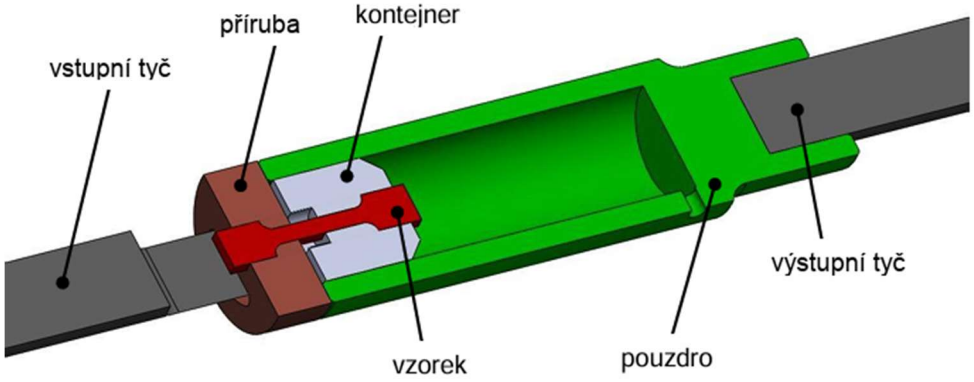
2.3 Hopkinsonův tahový test

Zkušební zařízení pro tahové rázové testy na principu Hopkinsonovy měrné dělené tyče vychází ze zařízení pro tlakové rázové testy. Přesto se konstrukce obou zařízení značně liší, a bez příslušných konstrukčních změn není pro tahové testy použitelné. Konstrukční změna zařízení spočívá v principu upnutí vzorku (modifikace tlakového testu na tahový), nebo v principu vyvození potřebného zatížení. Zatížení následně působí na vzorek a způsobí jeho deformaci. Možné konstrukce zařízení pro tahové rázové testy jsou:

- modifikace tlakového testu na tahový,
- vyvození tahové síly rotačním diskem,
- vyvození tahové síly pomocí trubkového impaktoru.

2.3.1 Modifikace tlakového testu na tahový pomocí trubkového pouzdra

Při této konstrukční změně vzorek není přímo uchycen mezi dvě tyče, ale je umístěn v přípravku trubkového pouzdra, které má na jednom konci odnímatelnou přírubu. Uchycení vzorku a trubkového pouzdra je znázorněno na Obr. 14. Příruba je opatřena otvory pro průchod části vstupní tyče. Dále je opatřena obdélníkovým průchodem, pomocí něhož se vzorek vloží do přípravku. Druhý konec vzorku je upevněn ve válcovém kontejneru, který je konstruován s ohledem na umístění vzorku a společně s přírubou mají symetrická vybrání, která přenáší tahové namáhání vzorku. Na vzdálenější konec vstupní tyče působí tlak a tyčí se šíří tlaková vlna, která přejde do kontejneru a na vzorek je vyvoláno tahové zatížení. [23]

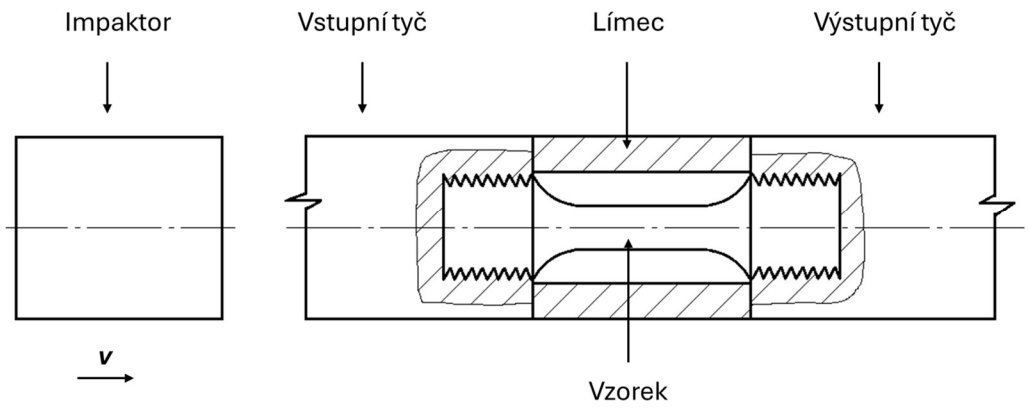


Obr. 14 Upnutí vzorku v přípravku [23].

Nevýhodou tohoto provedení je komplikované uchycení vzorku z důvodu transformace tlakového zatížení na tahové. Při průchodu napěťové vlny vzorkem může dojít k několikanásobnému částečnému odrazu napěťové vlny na rozhraní změny geometrie jednotlivých komponent. Není zde jasný přechod mezi vstupní tyčí, vzorkem a výstupní tyčí. Další nevýhodou je uzavření vzorku v pouzdře a tím znemožněné vizuální pozorování deformace. Tato konstrukce neumožňuje případné umístění vysokorychlostní kamery a snímání deformace vzorku. [24]

2.3.2 Modifikace tlakového testu na tahový pomocí límce

U této konstrukce je vzorek uchycen mezi vstupní a výstupní tyč pomocí závitového spoje. Přes našroubovaný vzorek je umístěn límec, který musí pevně doléhat, jak na vstupní tyč, tak na výstupní tyč. Konstrukce je zobrazena na Obr. 15. [25; 26]



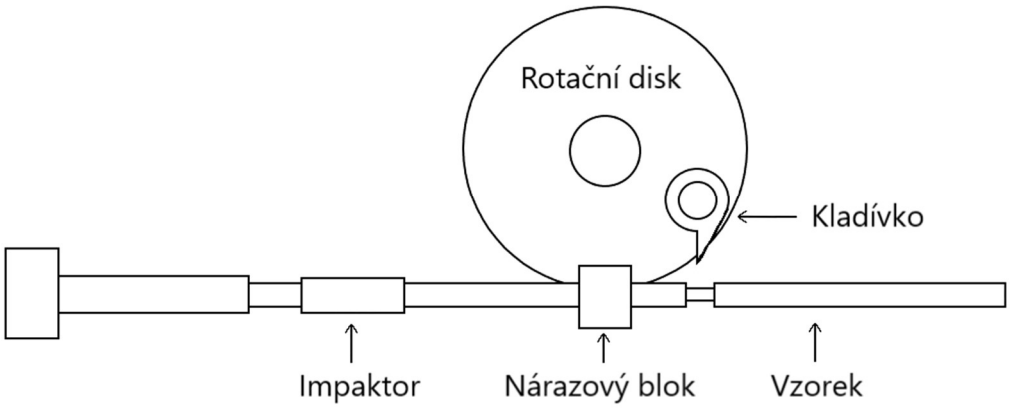
Obr. 15 Upnutí vzorku mezi tyče – podle [26].

Límec má shodný průměr jako obě tyče a je vyroben ze stejného materiálu jako vstupní a výstupní tyč, aby se jím napěťová vlna šířila stejně rychle. Proti první tyči je urychlen impaktor a nárazem do vstupní tyče vznikne tlakový pulz. Pulz projde skrz límec a z důvodu pevného dolehnutí límce na obě tyče se šíří dál výstupní tyčí, aniž by zatížil vzorek. Po dosažení pulzu volného konce výstupní tyče se odrazí jako tahový pulz. Na rozhraní se vzorkem se částečně přenese do vzorku a částečně odrazí zpět do výstupní tyče. Tahový pulz neprojde skrz límec, protože není nijak spojen s tyčemi, pouze na ně pevně doléhá. [25; 26]

Nevýhodou této konstrukce je nutnost opatření vstupní a výstupní tyče závitem a složitá příprava vzorků, kdy musí být opatřeny závitem pro spojení s tyčemi.

2.3.3 Vyvození tahové síly rotačním diskem

Zkoumaný vzorek je uchycen přímo mezi dvě tyče, kde jedna z tyčí má na konci větší průměr. Mezi velkým průměrem tyče a vzorkem je na tyči umístěn impaktor s nárazovým blokem. Zdrojem energie je rotační disk s kladívkem. Při roztáčení disku se kladívka zatáhnou. Po uvedení disku na požadovanou rychlost se kladívko uvolní a zasáhne nárazový blok. Nárazem kladívka do bloku se předá kinetická energie a blok následně narazí do tyče s větším průměrem. V tyči se generuje vlna tahového napětí, která způsobí zatížení vzorku. Schéma zařízení je zobrazeno na Obr. 16. Na vzorek působí přímá napěťová vlna. [27]

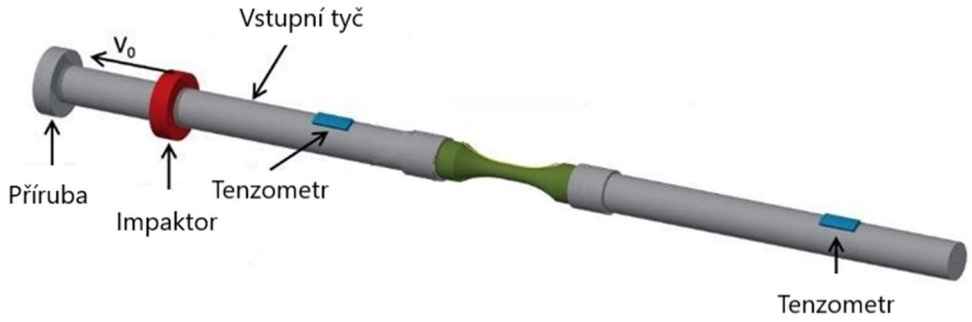


Obr. 16 Vyvození tahové síly rotačním diskem – podle [27].

Tyč, po které se pohybuje impaktor společně s nárazovým blokem má proměnný průměr. To má za následek nežádoucí částečné odražení napěťové vlny v místě změny průměru tyče.

2.3.4 Vyvození tahové síly pomocí trubkového impaktoru

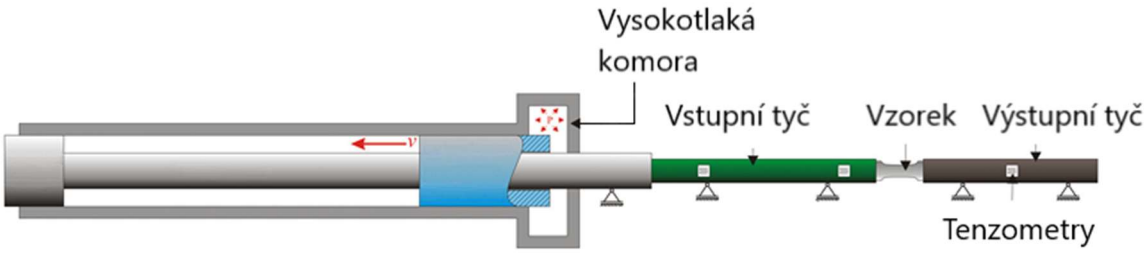
Dalším možným způsobem vyvození zatížení, které působí na vzorek, je pomocí trubkového impaktoru. Schéma tohoto způsobu provedení zařízení je znázorněno na Obr. 17. Vzorek je uchycen mezi dvě tyče, přičemž jedna z nich je na opačném konci spojena s přírubou. Po této tyči se pohybuje impaktor, který je urychlen směrem ke konci tyče. Jakmile impaktor narazí do příruby, jeho kinetická energie se přenese do tyče, což vyvolá tahové napětí ve vzorku. [28; 29]



Obr. 17 Vyvození tahové síly pomocí impaktoru – podle [28].

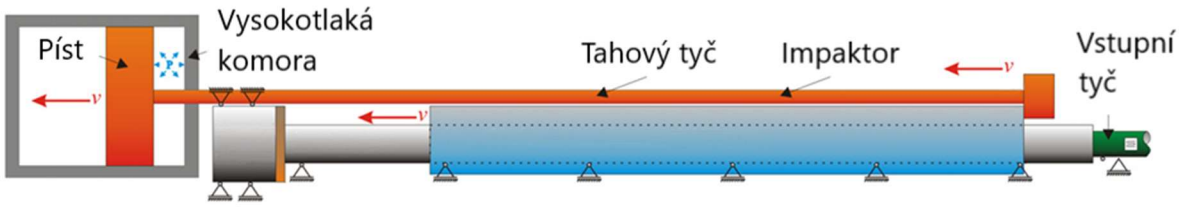
Výhodou této konstrukce je konstantní průměr vstupní tyče, což má za následek dobré šíření napěťových vln a nedochází k částečným odrazům v místech změny průměru tyče jako u vyvození tahové síly pomocí trubkového impaktoru.

Impaktor může být urychlován mechanicky nebo pneumaticky. V případě pneumatického urychlení se pohybuje uvnitř válcové hlavně, viz Obr. 18. Hlaveň musí být opatřena vstupem pro stlačený vzduch, který impaktor akceleruje. [24; 27]



Obr. 18 Pneumatické urychlení impaktoru – podle [24].

Impaktor lze také akcelerovat mechanicky. V tomto případě je k němu připevněna tahová tyč, která na něj přenáší zatížení. Zatížení je generováno mimo zařízení pomocí stlačeného vzduchu, který není v přímém kontaktu s impaktorem. Výhodou této konstrukce je možnost volby velikosti plochy pístu, jež vytváří silové působení přenášené na impaktor, protože tlaková komora se nachází mimo impaktor, jak je znázorněno na Obr. 19. [24; 27]

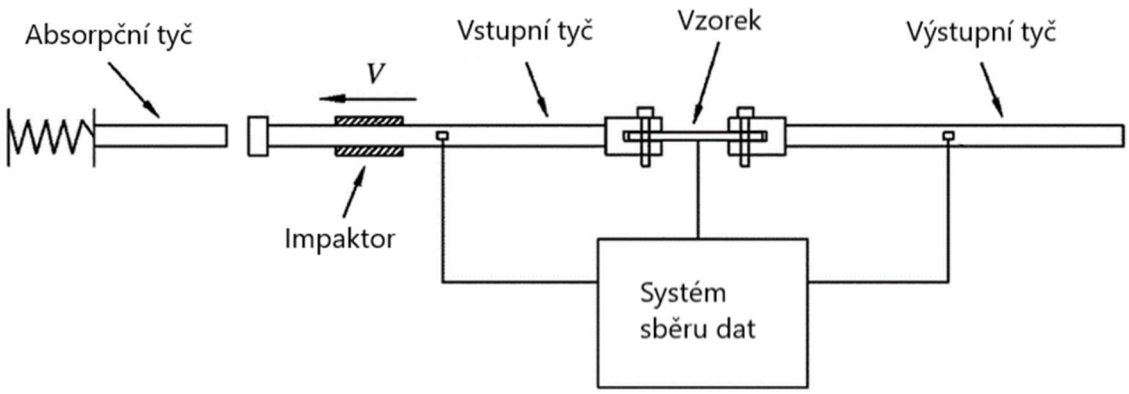


Obr. 19 Mechanické urychlení impaktoru – podle [24].

Pro praktickou část této práce byla vybrána konstrukce zařízení s vyvozením tahové síly pomocí impaktoru, který je pneumaticky urychlován. Důvody vedoucí k volbě této konstrukce jsou:

- vyvolání přímého tahového pulzu,
- konstantní průměr vstupní tyče,
- regulace rychlosti impaktoru pomocí nastavení vstupního tlaku,
- možnost sledování deformace vzorku vysokorychlostní kamerou.

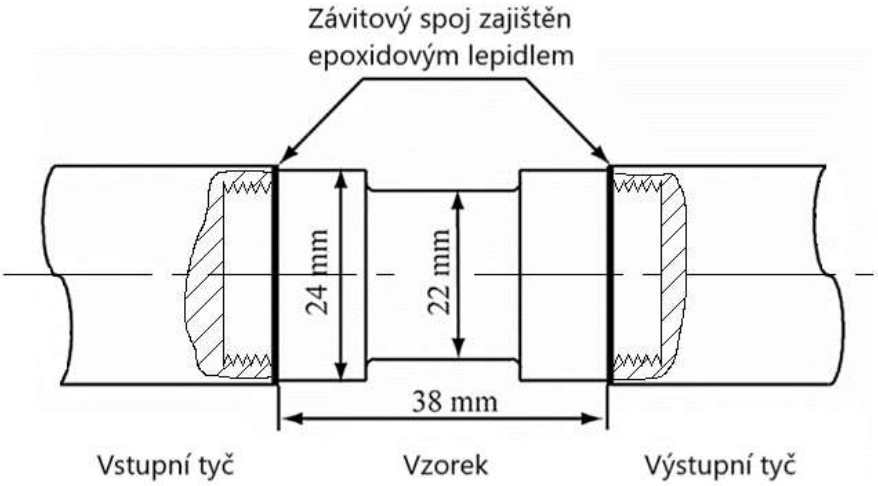
Detailní schéma Hopkinsonova tahového testu s vyvozením tahové síly pomocí pneumaticky urychlovaného impaktoru je zobrazené na Obr. 20. Princip je založen na upnutí vzorku mezi vstupní a výstupní tyč, kdy na první z nich je vyvoláno tahové napětí. Trubkový impaktor je urychlen stlačeným vzduchem a volně klouže po vstupní tyči. Vstupní tyč se vlivem zatížení protáhne, a to má za následek vyvolání tahového napětí v druhé výstupní tyči. Za vstupní tyčí s přírubou je umístěna absorpční tyč pro pohlcení energie v případě přetržení vzorku. Zařízení dále obsahuje systém pro sběr dat. Pro sběr dat se používají tenzometry nebo kapacitní snímače, které jsou umístěny na vstupní a výstupní tyči. [15; 29]



Obr. 20 Schéma SHTB s vyvozením tahové síly pomocí trubkového impaktoru – podle [29].

2.4 Upnutí vzorku a vyhodnocení Hopkinsonova tahového testu

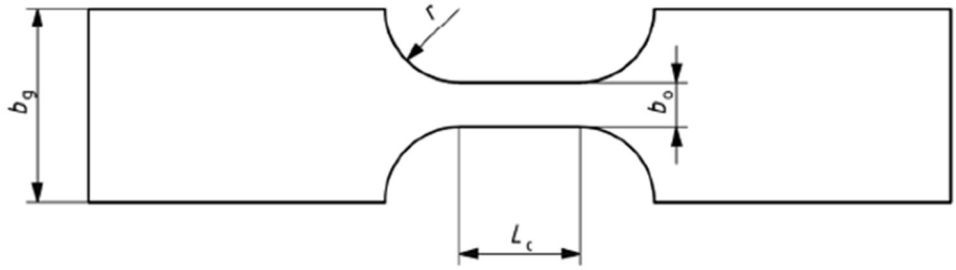
Testu HSTB mohou být podrobeny vzorky z různých materiálů a s tím souvisí jejich tvar. Možným tvarem je vzorek s kruhovým průřezem, viz Obr. 21. Se vstupní a výstupní tyčí je spojen pomocí závitového spoje. V závitovém spoji mohou vznikat nežádoucí vůle, kterým lze předejít použitím epoxidového lepidla a zalepením závitového spoje, který zlepší kvalitu procházejících vln. [15]



Obr. 21 Vzorek kruhového průřezu – podle [15].

Geometrie vzorku zobrazeném na Obr. 21 byla použita pro dynamické testování hornin [15].

Na vzorky kovových materiálů se vztahuje evropská norma Metoda zkoušení tahem při vysokých rychlostech deformace s označením EN ISO 26203-1 z roku 2018. Požadovaný tvar zkušebního vzorku je zobrazen na Obr. 22. [30]



Obr. 22 Požadovaný tvar zkušebního vzorku [30].

Pro dosažení rovnoměrné deformace ve zkoušené délce zkušebního tělesa (vzorku) je nutné zajistit rovnováhu sil na obou koncích vzorku. Pro dosažení rovnováhy je doporučeno dodržet nerovnost, která je popsána vztahem 2.1. [30]

Nerovnost zajišťující rovnováhu sil na koncích vzorku [30]:

$$\frac{L_c}{C} \leq \frac{e_s}{e}, \tag{2.1}$$

kde: L_c – zkoušená délka zkušebního tělesa $[m]$,
C – rychlost šíření elastické vlny ve zkušebním tělese $[m \cdot s^{-1}]$,
e_s – požadovaná smluvní deformace před dosažením rovnováhy,
e – rychlost deformace při zkoušce.

Pro zajištění jednoosé napjatosti během zkoušky je nutné správně stanovit šířku tělesa, kdy je vhodné dodržet nerovnosti dané vztahem 2.2 a 2.3. [30]

Nerovnice vlivu měřené délky a šířky vzorku na jednoosou napjatost [30]:

$$\frac{L_{0m}}{b_0} \geq 2, \tag{2.2}$$

kde: L_{0m} – počáteční měřená délka $[m]$,
b_0 – počáteční šířka ve zkoušené délce plochého zkušebního tělesa $[m]$.

Vliv šířky a tloušťky vzorku na jednoosou napjatost [30]:

$$\frac{b_0}{a_0} \geq 2, \tag{2.3}$$

kde: b_0 – počáteční šířka ve zkoušené délce plochého zkušebního tělesa $[m]$,
a_0 – počáteční tloušťka plochého zkušebního tělesa $[m]$.

V upínací oblasti vzorku by mělo docházet pouze k elastické deformaci. Aby toto bylo dodrženo, tak průřez upínací oblasti musí značně převyšovat průřez zkoušené délky. Poměr šířky v upínací oblasti a v měřené délce by měl odpovídat nerovnosti 2.4. [30]

Nerovnost vylučující plastickou deformaci v upínací oblasti vzorku [30]:

$$\frac{b_0}{b_g} \leq \frac{R_t}{R_m}, \tag{2.4}$$

kde: b_0 – počáteční šířka v oblasti zkoušené délky u plochého vzorku $[m]$,
b_g – šířka upínací oblasti zkušebního tělesa $[m]$,
R_t – smluvní mez kluzu, celkové prodloužení měřené průtahoměrem $[Pa]$,
R_m – mez pevnosti v tahu $[Pa]$.

Poloměr přechodové oblasti ***r*** (Obr. 22) musí být dostatečně velký, aby délka **Lc** mohla být považovaná za počáteční měřenou délku. Doporučené rozměry vzorku jsou v Tab. 2. [30]

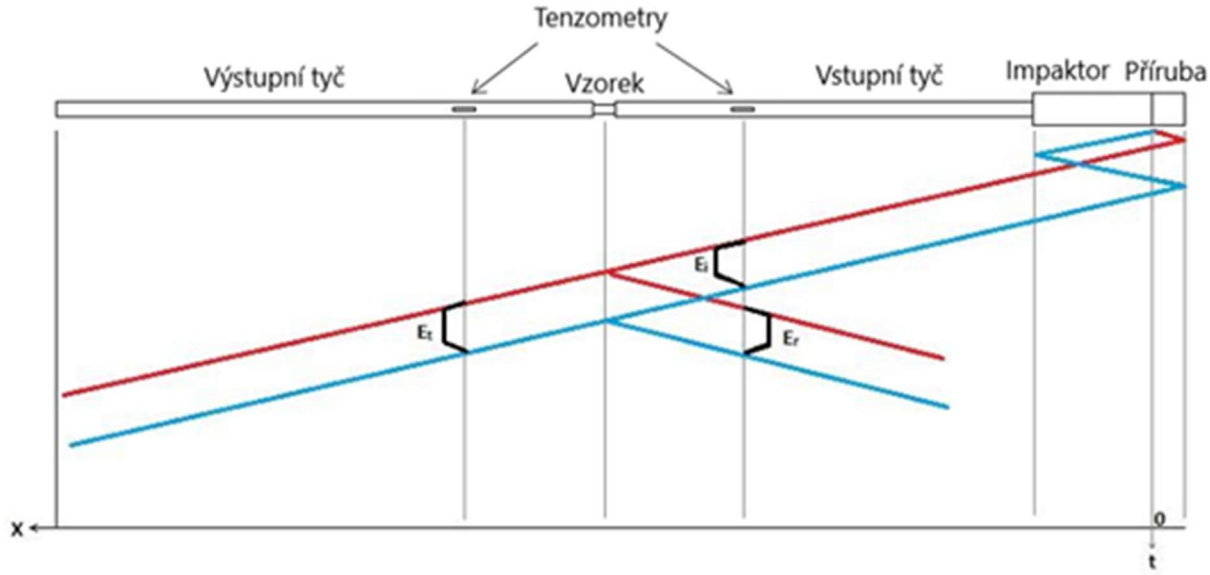
Tab. 2 Doporučené rozměry vzorku [30].

b_0	5 *mm*
L_c	10 *mm*
r	5 *mm*

2.4.1 Šíření napěťových vln

V důsledku nárazu úderníku do příruby vzniknou dvě napěťové vlny znázorněné na Obr. 23. První vlna tlakového napětí (na Obr. 23 znázorněna červeně) se šíří až na konec příruby, kde se odrazí jako tahová napěťová vlna a šíří se skrz vstupní tyč ($\varepsilon_{i\text{ - dopadající vlna}}$). V místě uchycení vzorku se mění průřez a materiál, materiál vzorku není stejný jako materiál tyčí. Tyto geometrické a materiálové změny mají za následek částečný průchod napěťové vlny dále skrz vzorek ($\varepsilon_{t\text{ - přenesená vlna}}$) a částečné odražení napěťové vlny zpět ($\varepsilon_{r\text{ - odražená vlna}}$). Dále se nárazem do příruby generuje druhá tlaková napěťová vlna šířící se opačným směrem (na Obr. 23 znázorněna modře), která se na konci impaktoru odrazí zpět jako tahová napěťová vlna. Tato

vlna se šíří až na konec příruby, kde se odrazí jako tlaková napěťová vlna, která v důsledku inverzní amplitudy ruší tahovou napěťovou vlnu. V místě uchycení vzorku mezi tyčemi se vlna také částečně odrazí a částečně projde skrz vzorek až do výstupní tyče. [15; 29; 31]



Obr. 23 Šíření napěťových vln při SHTB – podle [31].

Metoda SHTB je založena na teorii jednorozměrného šíření napěťových vln v tyčích. Při splnění nerovnice (2.5) o poměru délky ku průměru tyče je vyvolaná napěťová vlna šířící se tyčí považována za jednorozměrnou. [15; 31]

Nerovnice stanovující předpoklad jednorozměrného šíření napěťové vlny [31].

$$\frac{L_t}{D_t} \geq 10, \tag{2.5}$$

kde: L_t – délka tyče $[m]$,
D_t – průměr tyče $[m]$.

Jednorozměrná napěťová vlna se materiálem tyče šíří rychlostí odpovídající rychlosti zvuku v tomto materiálu. Tato fyzikální veličina společně s délkou impaktoru má rozhodující vliv na délku trvání pulzu, který by měl dosahovat hodnoty blízké 0,2 ms. Tato doba umožňuje dobré zaznamenání pulzů na vstupní a výstupní tyči bez rizika vzájemné interference vln. [24; 31]

Délka trvání pulzu [31]:

$$\Delta t = \frac{2 \cdot L_{im}}{C_B}, \tag{2.6}$$

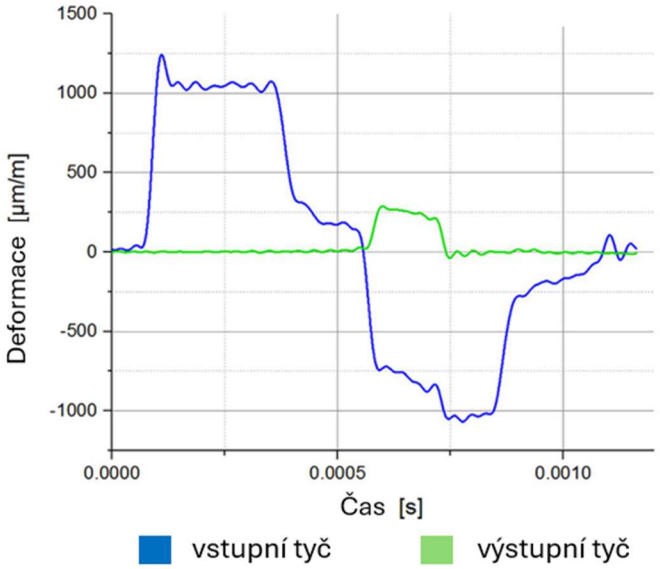
kde: L_{im}– délka impaktoru $[m]$,
C_B – rychlost zvuku v materiálu $[m \cdot s^{-1}]$.

2.4.2 Měření a vyhodnocení deformace na základě šíření napěťových vln

Při jednorozměrné vlně šířící se tyčí je napětí na povrchu tyče stejné jako napětí ve středu tyče. Umístěním kapacitních snímačů nebo tenzometrů lze měřit dopadající, odraženou a přenesenou

napěťovou vlnu. Snímače je nutné umístit do vzdálenosti minimálně jedné vlnové délky od vzorku, aby odražená napěťová vlna nepřekryla dopadající vlnu napětí a nedocházelo k interferenci. Vlnová délka se odvíjí od délky impaktoru. [31]

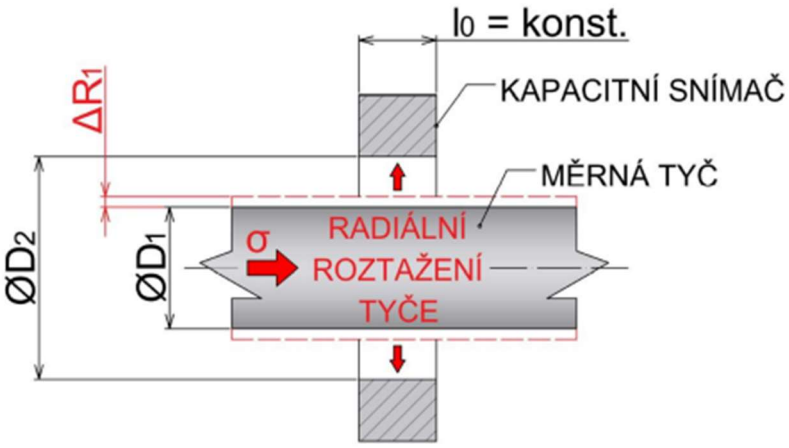
Data zaznamenána na vstupní a výstupní tyči přepočtena na deformaci v závislosti na čase lze vidět na Obr. 24.



Obr. 24 Zaznamenaná data na vstupní a výstupní tyči [32].

Měření deformace pomocí kapacitních snímačů:

Kapacitní snímače fungují na principu změny kapacity, která je vyvolána změnou polohy předmětu v elektrickém poli kondenzátoru, viz Obr. 25. Kapacitní snímač je připojen k osciloskopu, kde se zobrazují měřené hodnoty. [33]



Obr. 25 Poloha předmětu v elektrickém poli kondenzátoru [33].

Kapacitu kondenzátoru kapacitního snímače v klidovém stavu lze určit dle vztahu 2.7. [33]

$$C_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \xi_0 \cdot l_{0ks}}{\ln \frac{R_{2kk}}{R_{1mt}}}, \tag{2.7}$$

kde: ξ_0– permitivita vakua [$F \cdot m^{-1}$],
l_{0ks}– šířka kapacitního snímače [m],
R_{2kk} – poloměr 2. kroužku kondenzátoru [m],
R_{1mt} – poloměr měrné tyče [m].

Pomocí klidové kapacity kondenzátoru lze určit změnu poloměru tyče, viz rovnice 2.8. [33].

$$\Delta R_{Ii} = R_{2kk} \cdot e^{\frac{2 \cdot \pi \cdot \xi_0 \cdot (U_0 + \Delta U_{Ii})}{C_p \cdot \Delta U_{Ii} \cdot - C_0 \cdot U_0}}, \tag{2.8}$$

kde: U_0– napětí na kondenzátoru [V],
U_{Ii} – měřené napětí ze záznamu [V],
C_p – parazitní kapacita [F].

Veličiny $\boldsymbol{\Delta R_{Ii}}$a $\boldsymbol{U_{Ii}}$ označeném index „I“ jsou vztaženy k dopadající vlně. Podle výpočtového vztahu 2.8 lze určit změnu poloměru tyče vztaženou na odraženou vlnu s indexem „R“ a přenesenou vlnu s indexem „T“. Takovéto indexování je použito i u ostatních výpočtových veličin. Všechny veličiny a jejich označení je znázorněno v Tab. 3. [33]

Tab. 3 Veličiny a jejich označení vztažené k jednotlivým vlnám [33].

Veličina	Označení vztažené k dopadající vlně	Označení vztažené k odražené vlně	Označení vztažené k přenesené vlně
Změna poloměru tyče	ΔR_{Ii}	ΔR_{Ri}	ΔR_{Ti}
Měřené napětí	U_{Ii}	U_{Ri}	U_{Ti}
Poměrná změna poloměru tyče	ε_{rIi}	ε_{rRi}	ε_{rTi}
Poměrná osová deformace	ε_{zIi}	ε_{zRi}	ε_{zTi}
Osové napětí dle Hookova zákonu	$\sigma_{zI(t)}$	$\sigma_{zR(t)}$	$\sigma_{zT(t)}$

Na základě poměru změny poloměru tyče $\boldsymbol{\Delta R_{Ii}}$ ku poloměru měrné tyče $\boldsymbol{R_{1mt}}$ lze stanovit poměrnou změnu poloměru [33].

$$\varepsilon_{rIi} = \frac{\Delta R_{Ii}}{R_{1mt}}, \tag{2.9}$$

Poměrnou změnu poloměru lze stanovit jak pro dopadající, odraženou, tak i pro přenesenou vlnu.

Z poměrné změny poloměru lze stanovit poměrnou osovou deformaci [33].

$$\varepsilon_{ZIi} = -\frac{\varepsilon_{rIi}}{\mu}, \tag{2.10}$$

kde: μ– Poissonovo číslo [-].

Poměrnou osovou deformaci lze stanovit také pro odraženou a přenesenou vlnu.

Pomocí poměrné osové deformace lze podle vztahu 2.11 stanovit osové napětí dle Hookova zákonu. [33]

$$\sigma_{ZI(t)} = E_{tyč} \cdot \varepsilon_{ZIi}, \tag{2.11}$$

kde: $E_{tyč}$– modul pružnosti v tahu [MPa].

Osové napětí také lze stanovit pro další vlny, jako je odražená a přenesená vlna.

Výsledné osové napětí $\boldsymbol{\sigma_{di(t)}}$ [MPa] ve vzorku se stanoví podle vztahu 2.12 [33].

$$\sigma_{di(t)} = \frac{S_{tyč}}{S_{vzorek}} \cdot \frac{1}{2} \left| \left[\sigma_{ZIi(t)} + \sigma_{ZRi(t)} + \sigma_{ZTi(t)} \right] \right|, \tag{2.12}$$

kde: $S_{tyč}$– průřez měrné tyče [mm^2],
S_{vzorek}– průřez vzorku [mm^2].

Rychlost deformace vzorku lze stanovit dle vztahu 2.13 [33].

$$\dot{\varepsilon}_{p(t)} = \frac{\left| \sigma_{ZIi(t)} - \sigma_{ZRi(t)} - \sigma_{ZTi(t)} \right|}{z_b \cdot L_0}, \tag{2.13}$$

kde: z_b– měrná akustická impedance [$MPa \cdot m^{-1} \cdot s$],
L_0– počáteční délka vzorku [m].

Celková poměrná deformace vzorku se stanoví podle vztahu 2.14 [33].

$$\varepsilon = -\frac{L_0 - L_1}{L_0}, \tag{2.14}$$

kde: L_1– délka vzorku po zkoušce [m],
L_0– počáteční délka vzorku [m],

Logaritmická deformace vzorku [33]:

$$\varphi = \ln \frac{L_1}{L_0}, \tag{2.15}$$

Měření deformace pomocí tenzometrů:

Mezi nejpoužívanější snímače napětí a deformace zkušebního vzorku patří odporové tenzometry. Princip měření pomocí tenzometrů je založen na deformaci kovového, popřípadě

polovodičového prvku, který je umístěn na měřené těleso. Při deformaci se mění elektrický odpor vodiče v závislosti na jeho deformaci. Změna odporu je zaznamenávána a následně se z ní stanoví deformace měřeného tělesa. [34; 35]

Tenzometry lze rozdělit na základě typu měřící mřížky a použitého materiálu na [34]:

- kovové tenzometry,
- polovodičové tenzometry.

Kovové tenzometry jsou dle konstrukce příložné nebo lepené. Lepené tenzometry s kruhovým průřezem mají průměr odporového drátu 5 až 25 μm. Odporový drát má tvar vlásenky a je nalepen na podložku z plastické hmoty nebo kovu. Podložka je nalepená na měřené těleso a konce odporového drátu přiletovány pomocí silnějších vodičů na zesilovač. [34; 35]

Polovodičové tenzometry (Obr. 26) fungují na principu piezorezistivního efektu. Při tomto efektu se silovým působením na polovodičový PN přechod mění jeho vlastnosti. Polovodičové tenzometry obsahují tenká vlákna, které jsou obvykle vyrobeny z křemíku nebo germania. Tenká vlákna jsou umístěna na podložce, která je nalepena na měřené těleso a vlákna jsou přiletována k zesilovači. Polovodičové tenzometry mají vyšší citlivost než kovové a jsou vhodné pro měření malých deformací. [34; 35]

Obr. 26 Polovodičový tenzometr [36].

Relativní prodloužení vodiče je stanoveno rovnicí 2.16 [2]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \tag{2.16}$$

kde: Δl– prodloužení vodiče (polovodiče) $[m]$,
l_0 – původní délka vodiče (polovodiče) $[m]$.

Odpor válcového vodiče lze stanovit pomocí rovnice 2.17 [34]:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \tag{2.17}$$

kde: ρ– měrný odpor materiálu vodiče (polovodiče) $[\Omega \cdot m]$,
l – délka vodiče (polovodiče) $[m]$,
S – průřez vodiče (polovodiče) $[m^2]$.

Při prodloužení vodiče ***l***, zmenšení jeho průřezu ***S*** vodič vykáže větší odpor a konečný stav relativní změny odporu lze vyjádřit rovnicí 2.18 [34].

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon \cdot \left(\frac{d\rho}{\rho} \cdot \frac{l}{\varepsilon} + 1 + 2 \cdot \mu\right), \tag{2.18}$$

kde: ε– relativní prodloužení vodiče (polovodiče) [-],
ρ– měrný odpor materiálu vodiče [$\Omega \cdot m$],
l – délka vodiče (polovodiče) [m],
μ – Poissonovo číslo [-].

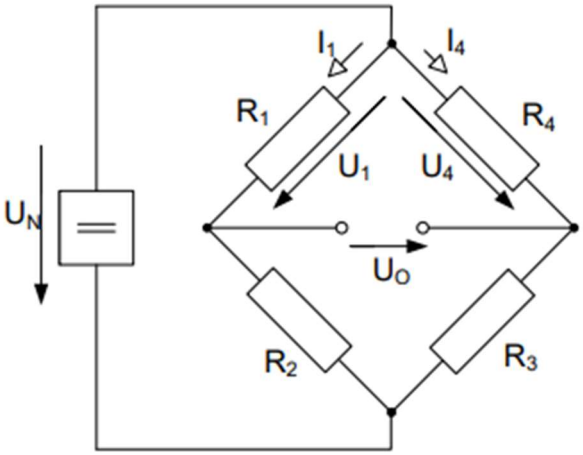
Výraz v závorce u rovnice 2.18 v oblasti pružného přetvoření je závislý na prodloužení a lze jej nahradit jako součinitel deformační citlivosti tenzometru ***k*** (k-faktor). [34]

Relativní změnu odporu pomocí součinitele deformační citlivosti lze vyjádřit rovnicí 2.19 [34].

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon \cdot k, \tag{2.19}$$

kde: ε– relativní prodloužení vodiče (polovodiče) [-],
k– součinitel deformační citlivosti [-].

Při měření deformace tenzometry je poměrná změna odporu velmi malá, a proto se využívá jejich zapojení do mostu. Velmi častým způsobem pro měření malých odporových změn je zapojení do Wheatstonova můstku (Obr. 27). Wheatstonův můstek je tvořen čtyřmi větvemi a každá větev obsahuje rezistor, který je nahrazen tenzometrem. Výstupní napětí je závisle na poměrech zapojených odporů a napájecího napětí. [34; 37]

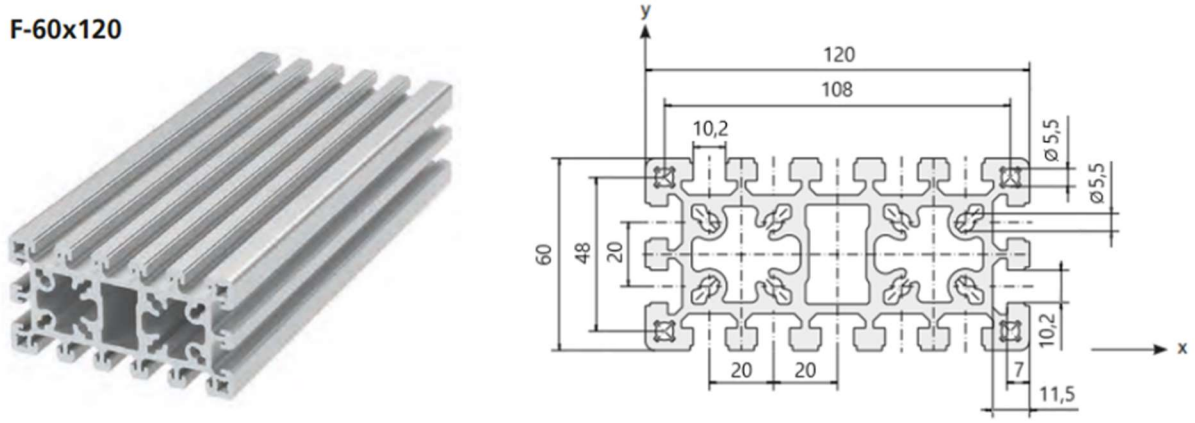


Obr. 27 Wheatstonův můstek [37].

3 KONSTRUKCE ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ

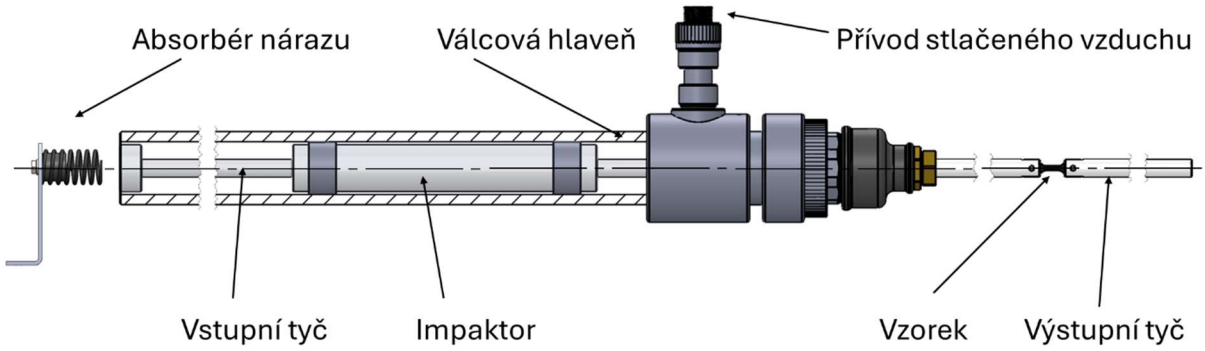
Náplní praktické části je návrh a následná konstrukce zkušebního zařízení pro tahové rázové testy na principu Hopkinsonovy měrné dělené tyče. Zařízení je konstruované primárně pro testování dřeva a plastových vzorků. Celé zařízení je konstruováno a uchyceno na hliníkový obdélníkový profil o rozměru 120 x 60 *mm* s obchodním označením F – 60 x 120 (Obr. 28), který je vhodný pro konstrukce rámů strojů. [38].

Obdélníkový profil má délku 4 700 *mm* a je umístěn na kovové konstrukci, která je součástí laboratoře vysokých rychlostí deformace na FSI VUT Brně.



Obr. 28 Profil F-60 x 120 [38].

Celé zkušební SHTB zařízení je konstruované s ohledem na rozměry profilu F – 60 x 120 *mm*, na který je uchycen. Při návrhu jednotlivých komponent je brán ohled na rozměrové možnosti laboratoře vysokých rychlostí deformace a umístění celého zařízení. Navrhovaná konstrukce je zobrazena na Obr. 29.



Obr. 29 Navrhovaná konstrukce SHTB zařízení.

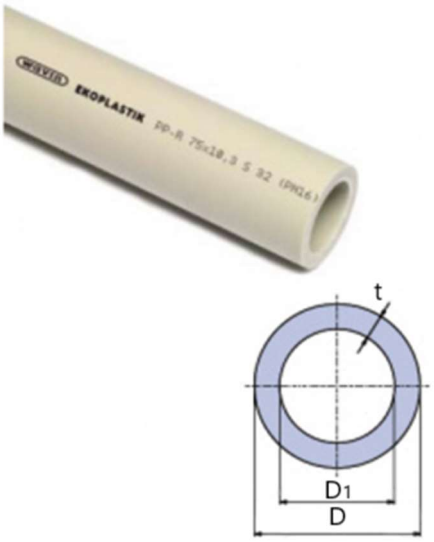
Konstrukce kompletního testovacího zařízení vyžaduje detailní specifikaci následujících komponent:

- válcová hlaveň,
- přívod stlačeného vzduchu,
- impaktor,
- vstupní tyč,
- výstupní tyč,

- vzorek,
- absorbér nárazu,
- uchycení k rámu,
- systém pro sběr dat.

3.1 Válcová hlaveň

Tělo válcové hlavně je tvořeno z PPR trubky PN16 63 x 8,6 *mm* (Obr. 30) délky 1 500 *mm*. Zvolený materiál umožňuje vnitřní tlak až 16 barů a vnitřní průměr trubky 45,8 *mm* umožňuje vhodnou konstrukci impaktoru, který je umístěn uvnitř trubky [39]. Jeden konec trubky je navařen na PPR T-kus redukovaný 63 x 32 x 63 *mm* (dále T-kus), viz Obr. 31 a druhý konec je ponechán volný. T-kus je dále navařen na mezikus PPR trubky PN16 63 x 8,6 *mm* délky 60 *mm* z důvodu následné montáže dalších komponent. Na tento mezikus je navařena PPR přechodka 63 x 2“ s kovovým vnějším závitem (Obr. 32). Kovový závit zajistí rozebíratelný spoj mezi tělem válcové hlavně a dalších komponent, které jsou na tuto součástku dále namontovány z důvodu redukce konce válcové hlavně na požadovaný průměr.



Trubka S 3,2 / PN 16 / SDR 7,4

D	D_1	t	l	Balení
mm	mm	mm	mm	m
16	11,6	2,2	4 000	160
20	14,4	2,8	4 000	100
25	18,0	3,5	4 000	60
32	23,2	4,4	4 000	40
40	29,0	5,5	4 000	24
50	36,2	6,9	4 000	16
63	45,8	8,6	4 000	12
75	54,4	10,3	4 000	8
90	65,4	12,3	4 000	4
110	79,8	15,1	4 000	4
125	90.8	17.1	4 000	4

Obr. 30 PPR trubky PN16 – podle [40].

Obr. 31 PPR T-kus redukovaný 63 x 32 x 63 *mm* [41].

Obr. 32 PPR přechodka 63 x 2“ s kovovým vnějším závitem [42].

Na vnější kovový závit PPR přechodky 63 x 2“ jsou našroubované následující komponenty v tomto pořadí:

- nátrubek redukovaný pozink 2“ x 1“ (Obr. 33),
- mosazná redukovaná vsuvka 3/4" x 1“ (Obr. 34),
- mosazné víčko 3/4“ (Obr. 35).

Obr. 33 Nátrubek redukovaný pozink 2“ x 1“.

Obr. 34 Mosazná redukovaná vsuvka 3/4" x 1“.

Mosazné víčko 3/4“ (Obr. 35) je nutné upravit z důvodu průchodu vstupní tyče o průměru 15 *mm*, která je umístěna uvnitř válcové hlavně. Víčko je opatřeno otvorem větším, než je průměr vstupní tyče. Tato úprava umožňuje pohyb tyče při zatížení a potřebném posunutí při deformaci vzorku. Z tohoto důvodu je v ose mosazného víčka vyvrtán otvor o průměru 16,5 *mm*, který zaručí volný pohyb vstupní tyče.

a) Mosazné víčko před úpravou b) Mosazné víčko po úpravě

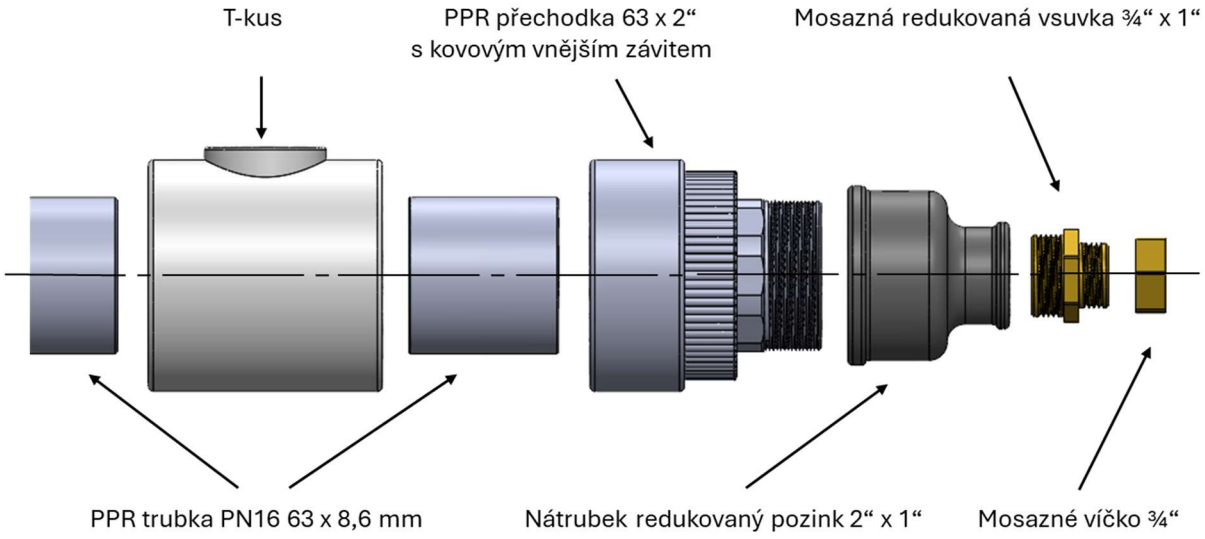
Obr. 35 Mosazné víčko 3/4“.

Uvnitř válcové hlavně proudí stlačený vzduch, který akceleruje impaktor ve směru k volnému konci navařené PPR trubky. Cílem konstrukce je co nejvíce eliminovat únik stlačeného vzduchu směrem k místu uchycení vzorku. Nechtěnému úniku vzduchu zamezí pouzdro na principu labyrintového těsnění (Obr. 36), které je pomocí lepidla Super Glue 100LL nalepené na vnitřní straně většího průměru mosazné redukované vsuvky 3/4“ x 1“. Pouzdro je vytisknuté na 3D tiskárně Original Prusa MINI+ z materiálu PLA. Jeho vnější průměr je 25,6 *mm*, vnitřní průměr 16 *mm* a je opatřeno dvěma drážkama. Drážky zpomalí proudění vzduchu a tím minimalizují jeho únik.

a) model pouzdra b) pouzdro uvnitř mosazné vsuvky

Obr. 36 Pouzdro na principu labyrintového těsnění.

Montáž popisovaných komponent a jejich pozice umístění je vyobrazena na Obr. 37.



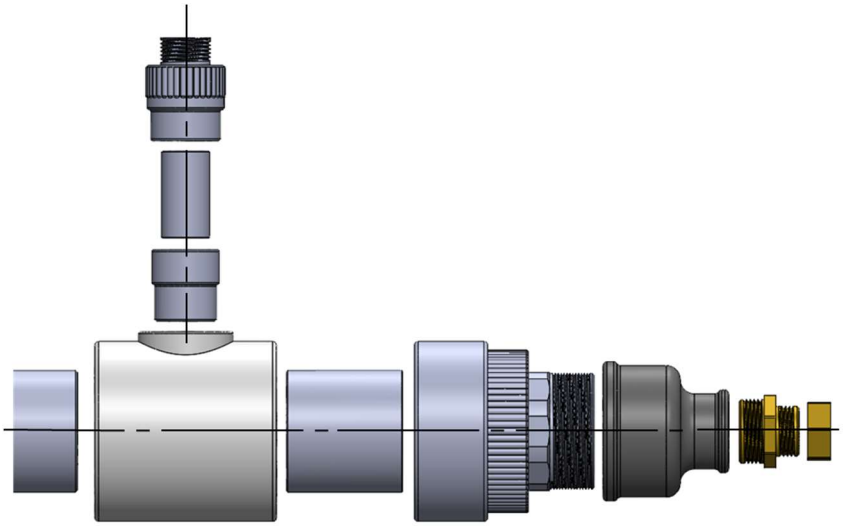
Obr. 37 Popis a pozice umístění jednotlivých komponent.

T-kus je v horizontálním směru opatřen vývodem o průměru 32 *mm*, který je součástí válcové hlavně a slouží k přívodu stlačeného vzduchu. Vývod je nutné opatřit přechodkou 25 x 3/4“ s vnějším kovovým závitem (Obr. 38), na který lze připojit zdroj stlačeného vzduchu. Aby bylo možné tuto komponentu upevnit na T-kus, tak na něj je nejprve navařen PPR nátrubek 32 x 25 *mm* (Obr. 39). Tento nátrubek je s přechodkou s vnějším kovovým závitem spojen přes PPR trubku PN16 25 x 3,5 *mm* délky 45 *mm*.

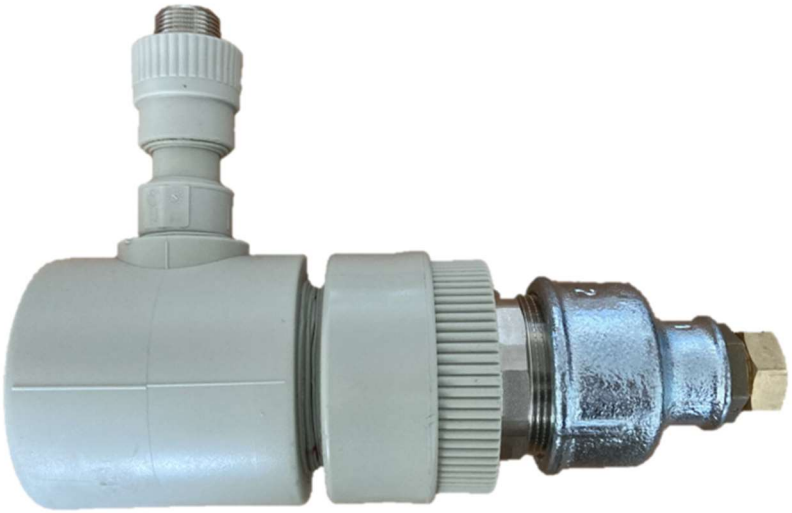
Obr. 38 Přechodka 25 x 3/4“ s vnějším kovovým závitem [43].

Obr. 39 PPR Redukovaný nátrubek 32 x 25 *mm* [44].

Sestavení kompletní válcové hlavně se všemi potřebnými komponenty je vizualizováno na Obr. 40.



a) model válcové hlavně



b) fotografie válcové hlavně

Obr. 40 Válcová hlaveň.

3.1.1 Svařování PPR komponent

Proces svařování plastových PPR komponent byl proveden pomocí elektronické polyfúzní svářečky POLYS P – 4 950 *W*, viz Obr. 41. Z důvodu odlišnosti průměrů jednotlivých navařovaných komponent byly k provedení svarů použity dva nástavce. Jeden nástavec pro svařování komponent o průměru 25 *mm* a druhý nástavec pro průměry komponent 63 *mm*. Při procesu svařování je nutné dodržet dobu nahřívání jednotlivých komponent a hloubku tavení trubky či tvarovky. Tyto parametry jsou specifikovány v Tab. 4.

Obr. 41 Elektronická polyfúzní svářečka POLYS P – 4 s nástavcem Ø 63 *mm*.

Tab. 4 Parametry svařování plastových trubek – podle [45].

Průměr trubky/tvarovky [*mm*]	**Hloubka tavení [*mm*]**	**Doba nahřívání [*s*]**
16	13	5
20	14	5
25	16	7
32	17	8
40	18	12
50	20	18
63	26	24

3.2 Přívod stlačeného vzduchu

Stlačený vzduch je přiváděn do válcové hlavně přes přechodku 25 x 3/4“ s vnějším kovovým závitem (Obr. 38). Na přechodku je našroubován kulový kohout MF ¾“ s ucpávkou (Obr. 42), na který je dále upevněn pozinkovaný T-kus ¾“ FFF (Obr. 43).

Obr. 42 Kulový kohout MF ¾“ s ucpávkou – podle [46].

Obr. 43 Pozinkovaný T-kus ¾“ FFF – podle [47].

Pozinkovaný T-kus je opatřen dalšími komponenty znázorněnými na Obr. 44. K pozinkovanému T-kusu jsou připojeny 2 kulové kohouty a jedna bajonetová rychlospojka ¾“ s vnějším závitem. Spodní ventil slouží k regulaci stlačeného vzduchu do válcové hlavně, kterým je urychlován impaktor. Horním ventilem lze odvést vzduch z připojeného natlakovaného zařízení, jinam než do válcové hlavně. K bajonetové rychlospojce je připojeno tlakové zařízení, znázorněno na Obr. 45.

Obr. 44 Pozinkovaný T-kus s komponenty.

Obr. 45 Připojení stlačeného vzduchu.

3.3 Impaktor

Při návrhu impaktoru je klíčové zvážit výběr materiálu a jeho vlastností, které mají vliv na funkčnost celého zařízení. Při volbě materiálu je důležité brát ohled na jeho hustotu, která souvisí s hmotností dílce a rychlost zvuku v materiálu. Příliš vysoká hmotnost impaktoru vede k obtížnějšímu rozpohybování stlačeným vzduchem, neboť je zapotřebí vyvození vysokého tlaku pro akceleraci a následný pohyb ve válcové hlavni. Rychlost zvuku v materiálu je

společně s délkou impaktoru klíčová pro výpočet doby trvání vzniklého pulzu. Tato doba je důležitá pro vyhodnocení celého testu a její optimální hodnota se běžně pohybuje kolem 0,2 *ms* [24].

V Tab. 5 je podle výpočetního vztahu 2.6 stanovena doba trvání pulzu a hmotnost komponenty pro různé délky impaktoru z dvou odlišných materiálů. Hmotnost komponenty je vypočtena pomocí softwaru Solidworks 2022, kdy těleso má tvar dutého válce o vnějším průměru 40 *mm* a vnitřního průměru 15 *mm*. Rozměry jsou voleny s ohledem na vnitřní průměr válcové hlavně ve které se impaktor pohybuje a jejím středem prochází vstupní tyč o průměru 15 *mm*. První z vybraných materiálu je ocel o hustotě materiálu 7 850 $kg \cdot m^{-3}$ s rychlostí šíření zvuku v materiálu5 850 $m \cdot s^{-1}$ [48]. Druhý z materiálů je Polymethylmethakrylát (PMMA) o hustotě materiálu 1 190 $kg \cdot m^{-3}$ [49]. Rychlostí šíření zvuku v PMMA materiálu je 2 750 $m \cdot s^{-1}$ [50].

Tab. 5 Hmotnost impaktoru a doba trvání pulzu.

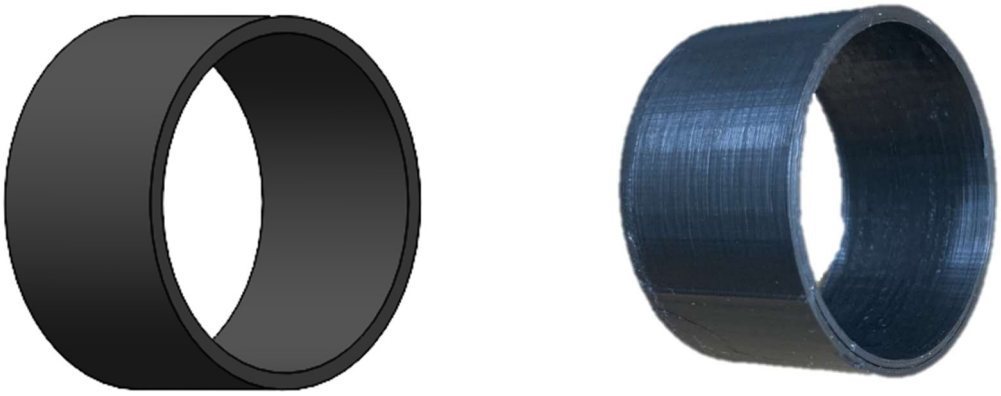
Materiál	**Rychlost šíření zvuku v materiálu** $[m \cdot s^{-1}]$	**Délka impaktoru** $[m]$	**Hmotnost impaktoru** $[kg]$	**Doba trvání pulzu** $[ms]$
Ocel	5 850	0,28	2,37	0,10
Ocel	5 850	0,35	2,97	0,12
Ocel	5 850	0,55	4,66	0,19
PMMA	2 750	0,20	0,26	0,15
PMMA	2 750	0,25	0,32	0,18
PMMA	2 750	0,28	0,36	0,20

Vzhledem k hmotnosti tělesa a doby trvání pulzu byl vybrán Materiál PMMA a délka impaktoru 0,28 *m*. v případě konstrukce impaktoru z oceli by musela být upravena válcová hlaveň na menší průměr, protože při této konstrukci válcové hlavně by z důvodu adekvátní doby trvání pulzu musel mít impaktor délku 0,55 *m*. Při takovéto délce by jeho hmotnost byla 4,66 *kg*. Takováto hmotnost je vzhledem k potřebné akceleraci a celkové konstrukci zařízení neadekvátní. Mechanické vlastnosti materiálu PMMA jsou znázorněny v Tab. 6.

Tab. 6 PMMA mechanické vlastnosti [49; 50].

Materiál	**Hustota** $[g \cdot cm^{-3}]$	**Youngův modul pružnosti** $[MPa]$	**Mez kluzu** $[MPa]$	**Pevnost v tahu** $[MPa]$	**Rázová houževnatost** $[KJ \cdot m^{-3}]$	**Poissonovo číslo** [-]
PMMA	1,19	3 200	103	73	15	0,37

Vzhledem k vnitřnímu průměru válcové hlavně a k dostupnému sortimentu PMMA tyčí na trhu je impaktor vyroben z přířezu tyče o vnějším průměru 40 *mm* s výrobní tolerancí +1,2 *mm* [51]. Celý impaktor se pohybuje ve válcové hlavni, u které byl posuvným měřítkem změřen její vnitřní průměr, který se pohybuje v rozmezí 44,8 – 45,06 *mm*. Vůle mezi impaktorem a válcovou hlavní je příliš velká a docházelo by k velkým ztrátám stlačeného vzduchu, který by obtékal impaktor po jeho vnějším průměru. Nežádoucímu obtékání vzduchu zamezí dva vymezovací kroužky vytištěné na 3D tiskárně Original Prusa MINI+ z materiálu PLA, viz Obr. 46. Vnitřní průměr kroužku je 40,4 *mm* a vnější průměr 44,4 *mm*, aby byl zajištěn hladký pohyb ve válcové hlavni. Délka každého vymezovacího kroužku je 25 *mm*. Kroužky jsou pomocí lepidla Super Glue 100LL přilepeny na impaktor z každé strany, vždy 15 *mm* od jeho okraje.

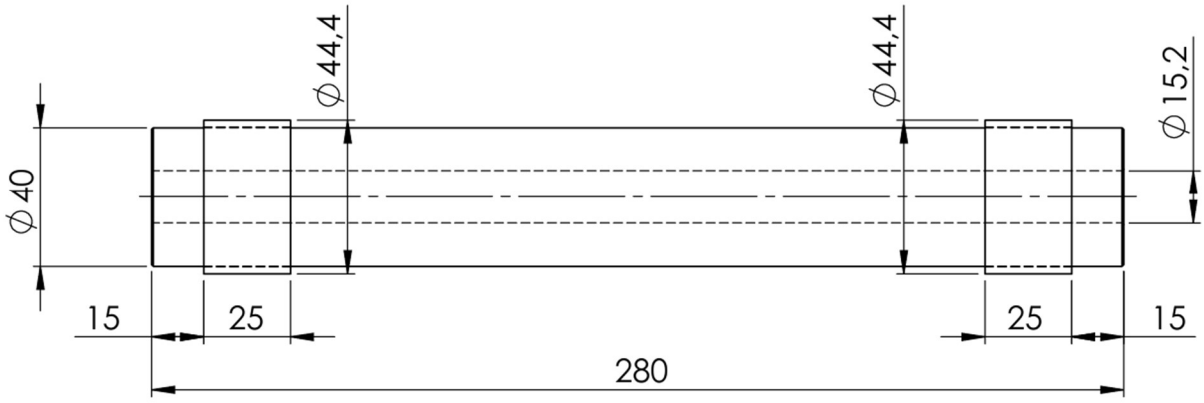


a) 3D model vymezovacího kroužku b) 3D výtisk vymezovacího kroužku

Obr. 46 Vymezovací kroužek.

Osou impaktoru prochází vstupní tyč o průměru 15 *mm*. Vyvrtaný průchozí otvor musí mít větší průměr než vstupní tyč, čímž se zajistí plynulý pohyb tyče. Vůle však nesmí být příliš velká, aby nedocházelo k úniku vzduchu. Z těchto důvodů je volen průměr vrtané díry 15,2 *mm*.

Impaktor opatřen dvěma vymezovacími kroužky je znázorněn na Obr. 47.



a) rozměry impaktoru

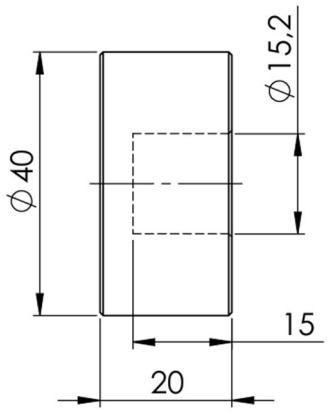
b) fotografie impaktoru

Obr. 47 Impaktor s vymezovacími kroužky.

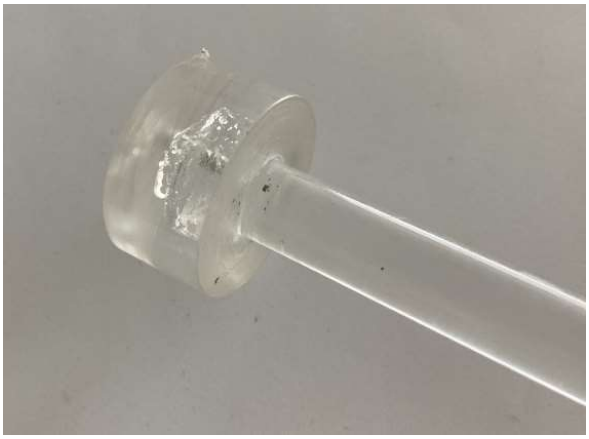
3.4 Vstupní tyč

Vstupní tyč je z materiálu PMMA. Materiál je volen stejný, jako materiál impaktoru z důvodu stejných materiálových vlastností. Vzniklé napěťové vlny se šíří jak impaktorem, tak vstupní tyčí. Pokud by byly použity odlišné materiály, vlny by se v každém materiálu šířily odlišnou rychlostí, což by mohlo vést ke komplikacím při zaznamenávání a vyhodnocování jednotlivých vln. Dalším důvodem pro volbu materiálu PMMA je testovaný materiál, kterým je primárně dřevo a plast. Rychlost šíření zvuku v plastech je bližší hodnotě rychlosti šíření zvuku v materiálu PMMA než v oceli. Při přechodu napěťové vlny vzorkem tak nevzniká příliš velký rozdíl v rychlosti šíření napěťové vlny. Rychlost šíření zvuku v plastových materiálech se pohybuje kolem 2 000 až 3 000 $m \cdot s^{-1}$ [48].

Vstupní tyč má délku 2 000 *mm* a vnější průměr tyče je 15 *mm* s výrobní tolerancí ±0,4 *mm* [51]. Jeden konec tyče je opatřen přírubou (Obr. 48) taktéž z PMMA materiálu o vnějším průměru 40 *mm* a délky 20 *mm*. V ose příruby je vyvrtán otvor o průměru 15,2 *mm* do hloubky 15 *mm*. Konec vstupní tyče je přilepen do otvoru příruby pomocí lepidla Super Glue 100LL.



a) rozměry příruby



b) vstupní tyč s přírubou

Obr. 48 Přiruba.

Druhý konec tyče je opatřen drážkou pro uchycení vzorku. Vyříznutá drážka obdélníkového tvaru šířky 5 *mm* je vyříznutá symetricky k ose kruhového průřezu tyče do hloubky 16 *mm*. Kolmo k obdélníkové drážce 7,5 *mm* od konce tyče je vyvrtán průchozí otvor o průměru 4 *mm*. Otvor slouží k zajištění vzorku kolíkem. Vyříznutá drážka s vyvrtaným otvorem je znázorněná na Obr. 49.

Obr. 49 Uchycení vzorku k vstupní tyči.

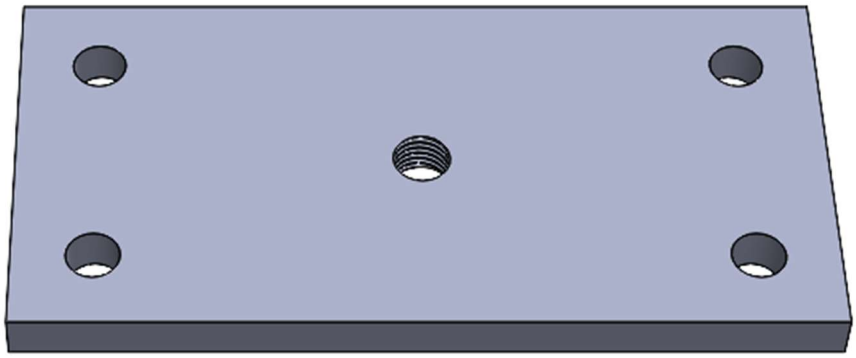
3.5 Výstupní tyč

Výstupní tyč je taktéž z přířezu trubky materiálu PMMA o průměru 15 *mm* a délky 2 000 *mm*. Tyčí se šíří napěťová vlna, která projde vzorkem a je zde zaznamenávána. Rychlost šíření zvuku je stejná jako ve vstupní tyči a v impaktoru. Z tohoto důvodu je volen stejný materiál jako u vstupní tyče. Jeden konec tyče je opatřen stejnou drážkou jako vstupní tyč, viz Obr. 49.

Druhý konec tyče je pevně fixován a upevněn k základnímu hliníkovému profilu. Konec tyče je uchycen jednošroubovou kloubovou objímkou s hlavou M8 12 – 16 *mm*, viz Obr. 50.

Obr. 50 Jednošroubová kloubová objímka s hlavou M8 12 – 16 *mm* [52].

Objímka je spojena závitovou tyčí M8 s obdélníkovou patkou 100 x 50 *mm* tloušťky 6 *mm* znázorněnou na Obr. 51.



Obr. 51 Patka 100 x 50 x 6 *mm*.

V jejím středu je díra s vnitřním závitem M8. Patka je dále opatřena čtyřmi vyvrtanými otvory o průměru 6,5 *mm*, které slouží k upevnění pomocí šroubů s šestihrannou hlavou M6 k základnímu profilu. Pro vymezení vůlí v závitu a lepší tuhost uchycení kloubové objímky je závitová tyč k patce dotažena maticí M8. Kompletní pevné uchycení konce výstupní tyče je zobrazeno na Obr. 52.

Obr. 52 Uchycení konce výstupní tyče.

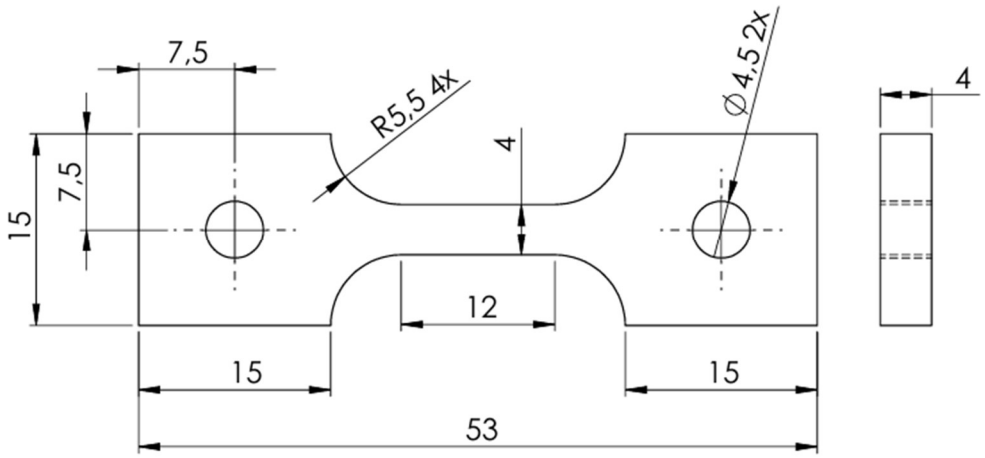
3.6 Vzorek

Jako testované těleso je vybrán plochý vzorek, z důvodu jednoduššího uchycení mezi vstupní a výstupní tyč. Vzorky pro testování jsou vytisknuté na 3D tiskárně Original Prusa MINI+ z materiálu PETG. Dalším důvodem pro výběr tohoto materiálu je rychlost šíření zvuku v plastových materiálech, která je například u termoplastu PVC 2 395 $m \cdot s^{1}$ [48]. Vzorky vytvořené pomocí 3D tisku představují levnou a rychlou výrobní možnost. Vlastnosti materiálu PETG jsou zobrazeny v Tab. 7.

Tab. 7 Mechanické vlastnosti materiálu PETG [53].

Materiál	Hustota [$g \cdot cm^{-3}$]	Mez pevnosti v tahu [*MPa*]	Modul pružnosti v tahu [*GPa*]
PETG	1,27	46	1,5

Testované vzorky nejsou z kovového materiálu a nepodléhá jim norma EN ISO 26203-1 pro tahové zkoušky při vysokých rychlostech deformace [30]. Přesto jsou rozměry zkušebního vzorku navrhovány tak, aby se přibližovaly rozměrům vzorku dle normy pro kovové materiály a byly dodrženy některé podmínky. Geometrie vzorku s rozměry je znázorněna na Obr. 53.



Obr. 53 Rozměry vzorku.

Vzorek daných rozměrů splňuje podmínku vlivu měřené délky a šířky vzorku na jednoosou napjatost dle vztahu (2.2):

$$\frac{L_{0m}}{b_0} \geq 2$$

$$\frac{0{,}012}{0{,}004} \geq 2$$

Podmínka vlivu šířky a tloušťky vzorku na jednoosou napjatost dle vztahu (2.3) není splněna:

$$\frac{b_0}{a_0} \geq 2$$

$$\frac{0{,}004}{0{,}004} \ngeq 2$$

Vzorek z materiálu PETG byl testován i s počáteční tloušťkou vzorku 2 *mm,* aby byla splněna podmínka (2.3), ale takovýto vzorek nebyl vhodný pro testování. K přetržení vzorku byla zapotřebí malá zatěžující síla, která nebyla dostatečná k zaznamenávání potřebných dat k následnému vyhodnocení deformace. Z tohoto důvodu je tloušťka vzorku volena 4 *mm*.

U vzorku je vyloučená plastický deformace v upínací oblasti vzorku dle vztahu (2.4). U polymerů bývá napětí na mezi kluzu totožné, nebo velmi blízké s napětím na mezi pevnosti. Proto je možné stanovit, že poměr meze kluzu ku mezi pevnosti je roven jedné. [54]

$$\frac{b_0}{b_g} \leq \frac{R_t}{R_m}$$
$$\frac{0{,}004}{0{,}015} \leq 1$$
$$0{,}267 \leq 1$$

Vzorek je k vstupní a výstupní tyči upevněn pomocí kolíků o průměru 4 *mm* délky 40 *mm*, viz Obr. 54.

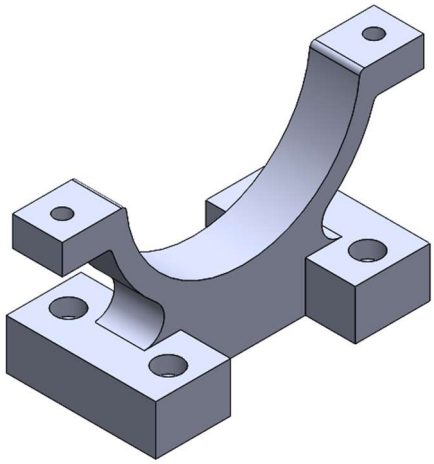
Obr. 54 Uchycení vzorku.

3.7 Uchycení k rámu

Sestrojené zařízení je nutné uchytit k hliníkovému profilu F – 60 x 120 *mm*, který je součástí konstrukce, kde bude sestrojené zařízení umístěné. Komponenty k uchycení jsou válcového tvaru a k připevnění k profilu jsou využity objímky a 3D tištěné komponenty z materiálu PLA.

Válcová hlaveň je uchycena za PPR přechodku 63 x 2“ s kovovým vnějším závitem a dále za PPR trubku PN16 63 x 8,6 mm. Držáky pro uchycení obou komponent se skládá ze dvou částí. Dolní část tvoří 3D tištěný díl a horní část tvoří jedna část dvoudílné objímky s gumou. Dolní část úchytu je opatřena dvěma průchozími dírami o průměru 6,5 *mm*, které slouží ke spojení s horní částí úchytu. Spoj je proveden pomocí šroubu s šestihrannou hlavou M6 x 30.

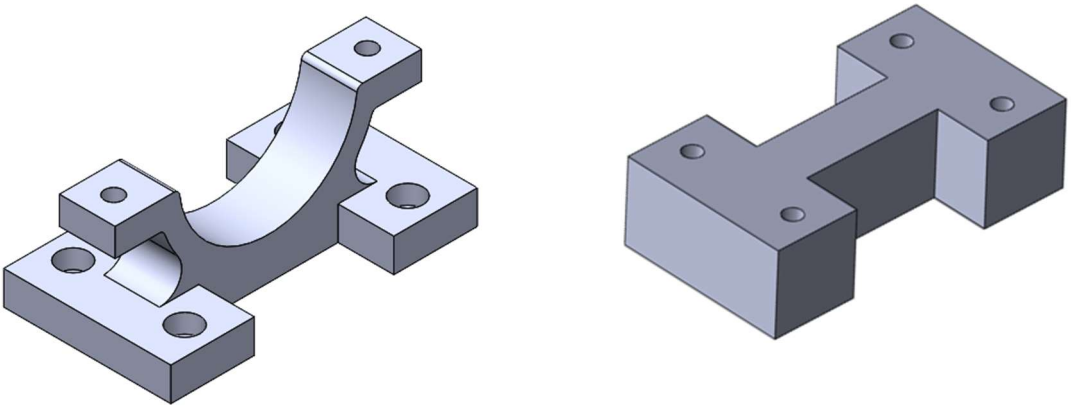
PPR přechodka je uchycena za její vnější průměr 93 *mm*. Dolní část úchytu (Obr. 55) je opatřena vybráním válcového tvaru o průměru 94 *mm*, aby bylo zajištěné hladké usazení těla kanónu do úchytu. Horní část úchytu tvoří jedna část dvoudílné objímky s gumou 87 – 92 *mm* (Obr. 56). Spodní část držáku je opatřena čtyřmi dírami s válcovým zahloubením pro šrouby s válcovou hlavou k uchycení k rámu. K upevnění jsou použity šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem M6 x 20.



Obr. 55 Dolní část úchytu PPR přechodky.

Obr. 56 Část dvoudílné objímky s gumou.

PPR trubka je uchycena za její vnější průměr 63 *mm*. Vzhledem ke změně vnějšího průměru oproti PPR přechodce je úchyt trubky přizpůsoben průměru 63 *mm*. Dolní část úchytu (Obr. 57) je rozdělena na dva dílce, samostatný úchyt a dílec k vypodložení úchytu o výšce 30 *mm*. Toto rozdělení na dva samostatné dílce v případě prasknutí úchytu při montáži nebo jiného poškození dílce ušetří značné množství materiálu při 3D tisku nového dílce. Horní část úchytu tvoří jedna část dvoudílné objímky s gumou 60 – 64 *mm*. Dolní část úchytu je opatřena vybráním válcového tvaru o průměru 64 *mm*. Dále je opatřena čtyřmi dírami s válcovým zahloubením pro šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem. Dílec k vypodložení úchytu je opatřen čtyřmi průchozími dírami o průměru 6,5 *mm*. K upevnění jsou použity šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem M6 x 45.

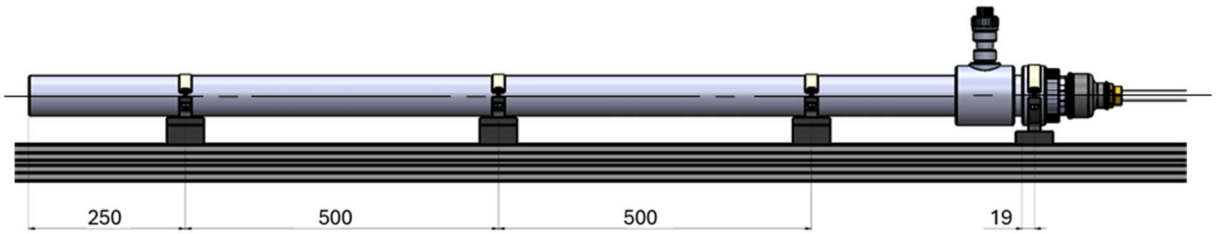


a) dolní část úchytu PPR trubky

b) vypodložení dolní části úchytu

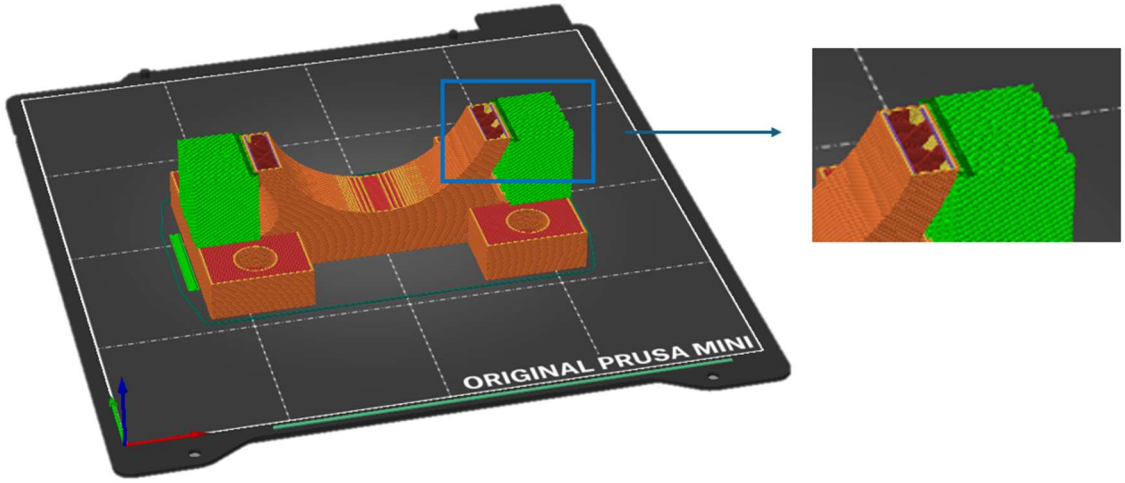
Obr. 57 Úchyt PPR trubky o vnějším průměru 63 *mm*.

K upevnění válcové hlavně k profilu jsou použity celkem 4 úchyty. Rozložení jednotlivých úchytů trubkového kanónu je zobrazeno na Obr. 58.



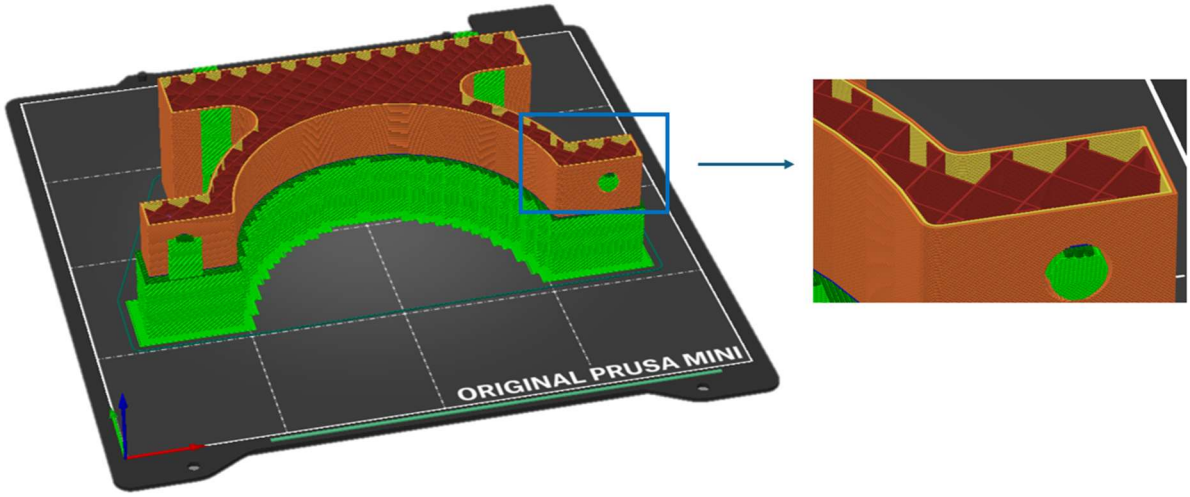
Obr. 58 Rozložení úchytů válcové hlavně.

Při 3D tisku dolních částí úchytu byly provedeny dva způsoby tisku. Při prvním způsobu byla komponenta tisknuta horizontálně (Obr. 59). Takto vytisknutý díl po sešroubování a dotažení s horní částí úchytu praskl (Obr. 60). Jednotlivé vrstvy při 3D tisku v místě sešroubování s horní částí úchytu nejsou spojeny s celou komponentou a při zatížení dochází k praskání materiálu po hranicích jednotlivých vrstev. Aby se tisknutá komponenta stala pevnější v místě spoje s horní částí úchytu, tak se těleso pro 3D tisk umístilo na podložku otočené o 90°, viz Obr. 61. Při tisku v takovéto pozici jsou jednotlivé vrstvy při 3D tisku v místě úchytu s horní komponentou spojené s celou součástí a těleso se při daném zatížení stává pevnější.



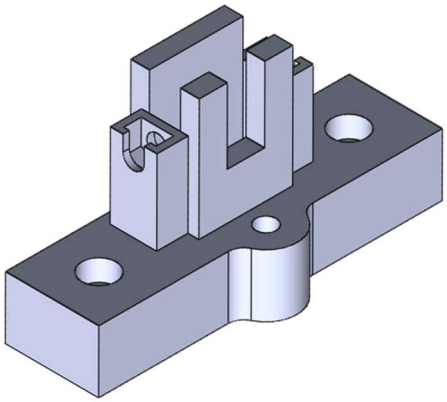
Obr. 59 První varianta umístění dílce na podložku pro 3D tisk.

Obr. 60 Prasknutý díl vyrobený technologií 3D tisku.

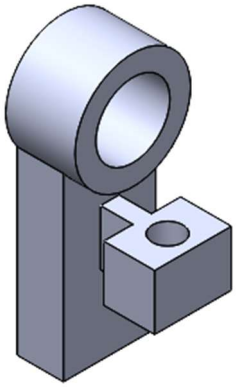


Obr. 61 Druhá varianta umístění dílce na podložku pro 3D tisk.

Vstupní a výstupní tyč je na několika místech podepřena úchyty, aby nedocházelo k jejímu prohnutí. Úchyt se skládá ze dvou částí a je konstruovaný tak, aby bylo možné pomocí šroubů M6 nastavit jeho výšku a zregulovat pozici v kolmém směru k procházející tyči úchytem. Obě části jsou vytištěny na 3D tiskárně z materiálu PLA. Dolní část (Obr. 62) je opatřena dvěma průchozími dírami s válcovým zahloubením pro šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem. Horní část (Obr. 63) je opatřena válcovým vybráním o průměru 16 *mm* pro průchod vstupní/výstupní tyče.

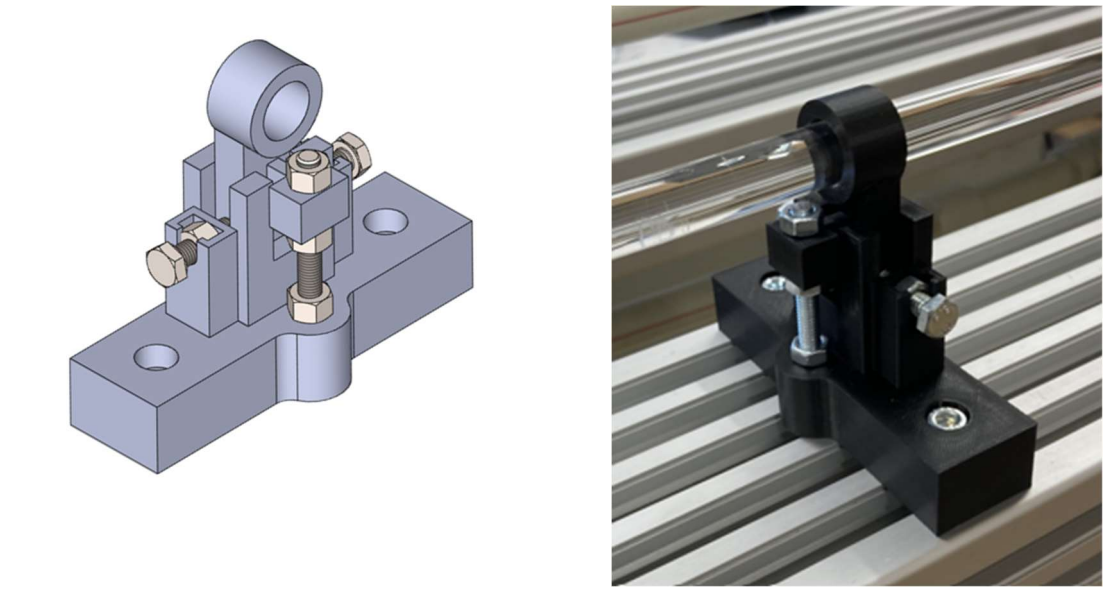


Obr. 62 Dolní část úchytu vstupní/výstupní tyče.



Obr. 63 Horní část úchytu vstupní/výstupní tyče.

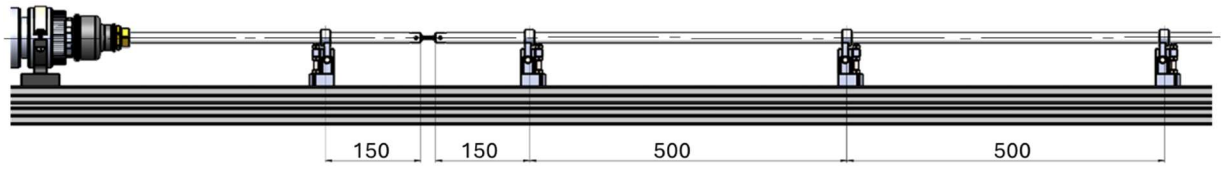
Kompletní úchyt vstupní/výstupní tyče s nastavitelnou výškou a regulací pozice v kolmém směru k procházející tyči je zobrazen na Obr. 64.



a) 3D model úchytu vstupní/výstupní tyče b) fotografie uchycení tyče

Obr. 64 Úchyt vstupní/výstupní tyče.

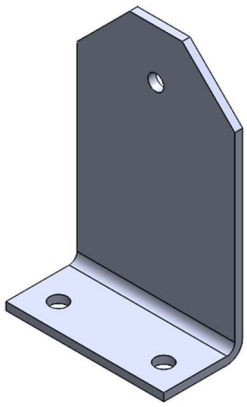
Rozmístění úchytů na vstupní a výstupní tyči je zobrazeno na Obr. 65.



Obr. 65 Rozložení úchytů na vstupní a výstupní tyči.

3.8 Absorbér nárazu

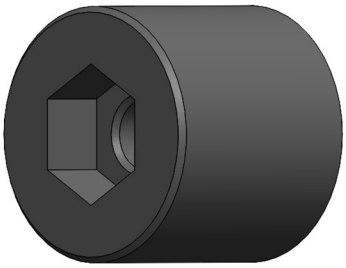
Vstupní tyč pohybující se uvnitř válcové hlavně není pevně uchycena k základnímu profilu. Tyč je pouze spojená přes vzorek s výstupní tyčí, kdy její konec je pevně uchycen ke konstrukci. Při přetržení vzorku během testu je nutné absorbovat energii vstupní tyče s přírubou a zamezit jejímu pohybu z válcové hlavně ven. K absorpci energie a zastavení vstupní tyče je použit absorbér nárazu na principu pružiny. Konstrukce absorbéru je tvořena kovovou patkou (Obr. 66) na které je umístěna tlačná vinutá pružina o vnějším průměru 28 *mm* a délky 50 *mm* (Obr. 67).



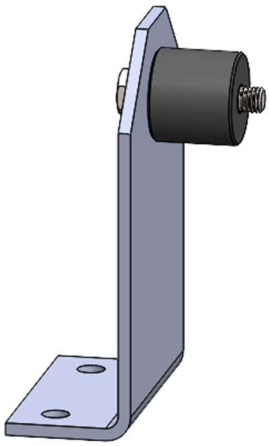
Obr. 66 Kovová patka tlumicího zařízení.

Obr. 67 Tlačná vinutá pružina.

V kovové patce jsou vyvrtané dvě díry o průměru 6,5 *mm* k uchycení k profilu pomocí šroubů s šestihrannou hlavou M6 x 12. V patce je dále jedna díra o průměru 6 *mm* do které je umístěn šroub s šestihrannou hlavou M6 x 30. Šroub je z druhé strany patky dotažen maticí z důvodu zamezení jeho pohybu. Na šroub je nasunut 3D tištěný mezikus (Obr. 68), na kterém je umístěna pružina. Otvor je vyvrtán v takové výšce, aby po uchycení patky k profilu byl společně s mezikusem a pružinou soustředný s tělem válcového kanónu (76,5 *mm* nad profilem, viz Obr. 69). Mezikus má tvar dutého válce o vnějším průměru 20 *mm*, vnitřním průměru 6 *mm* a délky 20 *mm*. Nasunutý mezikus na šroub M6 je na jednom konci vnitřního průměru opatřen osazením pro matici M6, aby plně doléhal na kovovou patku.



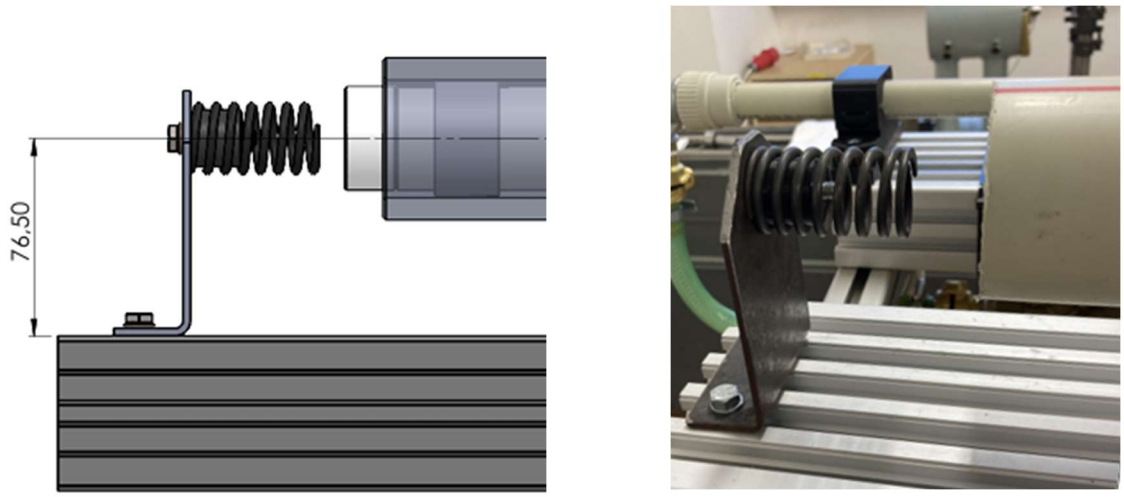
a) 3D tištěný mezikus



b) mezikus umístěn na patce absorbéru nárazu

Obr. 68 3D tištěný mezikus.

Uchycení absorbéru nárazu k profilu je zobrazeno na Obr. 69.

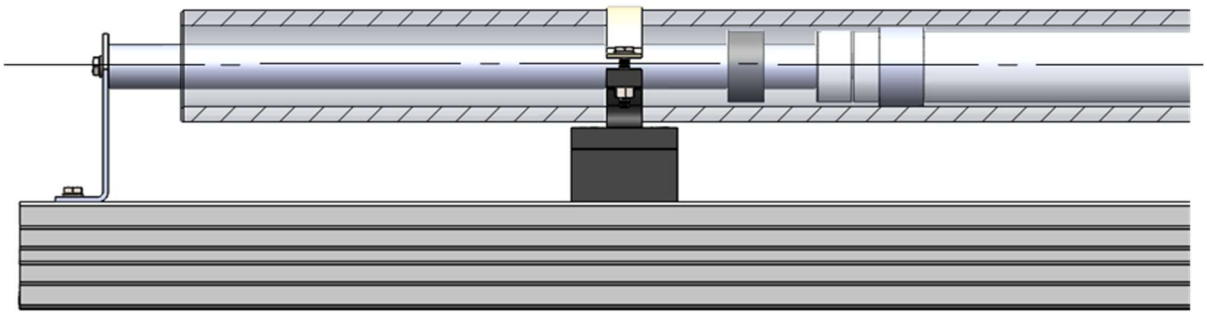


a) 3D model b) fotografie

Obr. 69 Uchycení absorbéru nárazu.

Tato konstrukce absorbéru nárazu utlumí náraz vstupní tyče až v místě mimo válcové hlavně. V případě nutnosti utlumení vstupní tyče dříve, ještě v trubce válcové hlavně, lze absorbér modifikovat. Na 3D tištěný mezikus lze umístiti místo pružiny dutou trubku potřebné délky, která vstupní tyč utlumí ihned po nárazu impaktoru. Tuto konstrukci lze využit v případě, kdy jsou na vstupní tyči nalepené tenzometry a v případě delší dráhy vstupní tyče ven z válcové hlavně by hrozilo jejich poškození.

Při této konstrukci absorbéru nárazu je požit tištěný mezikus o vnějším průměru 17 *mm* na který je nasunuta plastová trubka o vnitřním průměru 17 *mm*, vnějším 25 *mm* a délky 400 *mm*. Na trubku je umístěn ve vzdálenosti 30 *mm* od jejího konce kroužek o vnitřním průměru 25 *mm*, vnějším průměru 40 *mm* a délky 20 *mm*. Tento kroužek zajistí, aby trubka byla v ose válcové hlavně. Konstrukci s utlumeným nárazem vstupní tyče uvnitř válcové hlavně lze vidět na Obr. 70.



Obr. 70 Utlumení vstupní tyče uvnitř válcové hlavně.

3.9 Systém pro sběr dat

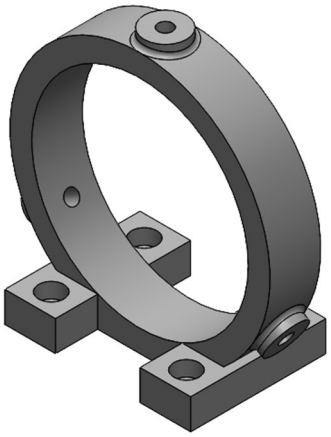
Jako měřící zařízení napěťových pulzů byly použity dva kapacitní snímače. Poté byl jeden kapacitní snímač nahrazen tenzometry pro ověření správnosti získaných dat. Kapacitní snímače

i tenzometry byly zapojeny do osciloskopu Tektronix TDS 210 (Obr. 71) pro zobrazení průběhů napěťových pulzů.

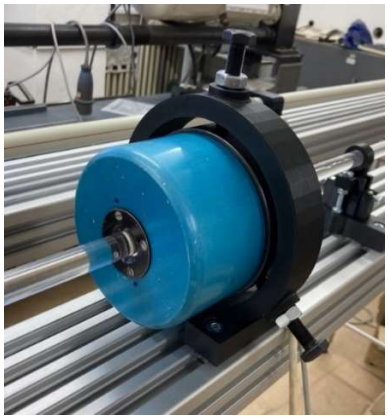
Obr. 71 Osciloskop Tektronix TDS 210.

Měření napěťových pulzů pomocí kapacitních snímačů

Pro měření kapacitními snímači je na vstupní a výstupní tyč umístěn vždy jeden snímač. Pro jeho správné umístění na tyč je použit držák vyrobený pomocí 3D tisku z materiálu PLA (Obr. 72). Držák snímače je opatřen čtyřmi průchozími dírami s válcovým zahloubením pro šrouby s válcovou hlavou M8 x 20, kterými je držák uchycen k rámu. Držák je dále opatřen třemi průchozími dírami se závitem s jemným stoupáním M10 x 1. Kapacitní snímač je v držáku uchycen třemi šrouby s šestihrannou hlavou M10 x 1 x 50, viz (Obr. 73). Snímač je nutné umístit na tyč tak, aby jeho středem procházela osa tyče a byl zajištěn hladký pohyb tyče snímačem. Šrouby s jemným stoupáním závitu zajišťují přesné ustanovení snímače vůči ose tyče. Kapacitní snímač na vstupní tyči je umístěn 500 *mm* a na výstupní tyči 400 *mm* od konce tyče v místě uchycení vzorku.



Obr. 72 3D model držáku kapacitního snímače.

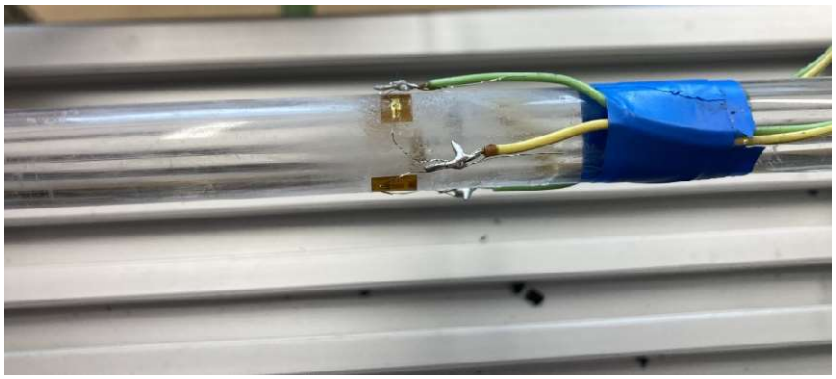


Obr. 73 Uchycení kapacitního snímače.

Měření napěťových pulzů pomocí tenzometrů a kapacitního snímače

Pro ověření naměřených průběhů napěťových pulzů byl kapacitní snímač na vstupní tyči nahrazen tenzometry ve vzdálenosti 500 *mm* od konce tyče v místě uchycení vzorku. Kapacitní snímač na výstupní tyči byl ponechán beze změny.

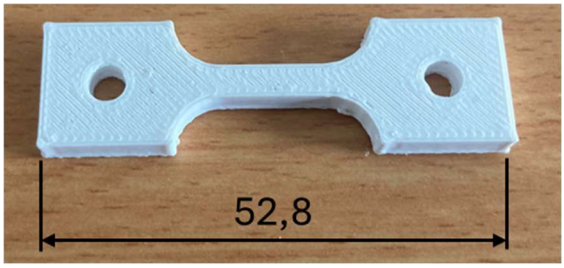
Při měření napěťových pulzů na vstupní tyči pomocí tenzometrů jsou na tyč nalepeny čtyři tenzometry a zapojeny do Wheatstonova můstku (Obr. 74). Tenzometry jsou připojené k zesilovači a následně k osciloskopu pro zobrazení naměřených dat.



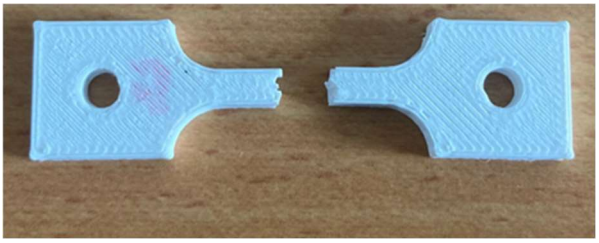
Obr. 74 Zapojení tenzometrů.

4 TESTY

Vzorek z materiálu PETG byl podroben tahovému testu při vstupním tlaku 1 *bar*, který urychluje impaktor. K zaznamenávání dat byly použity kapacitní snímače, jeden na vstupní tyči, druhý na výstupní tyči. Při testu došlo v přetržení vzorku, viz Obr. 75.



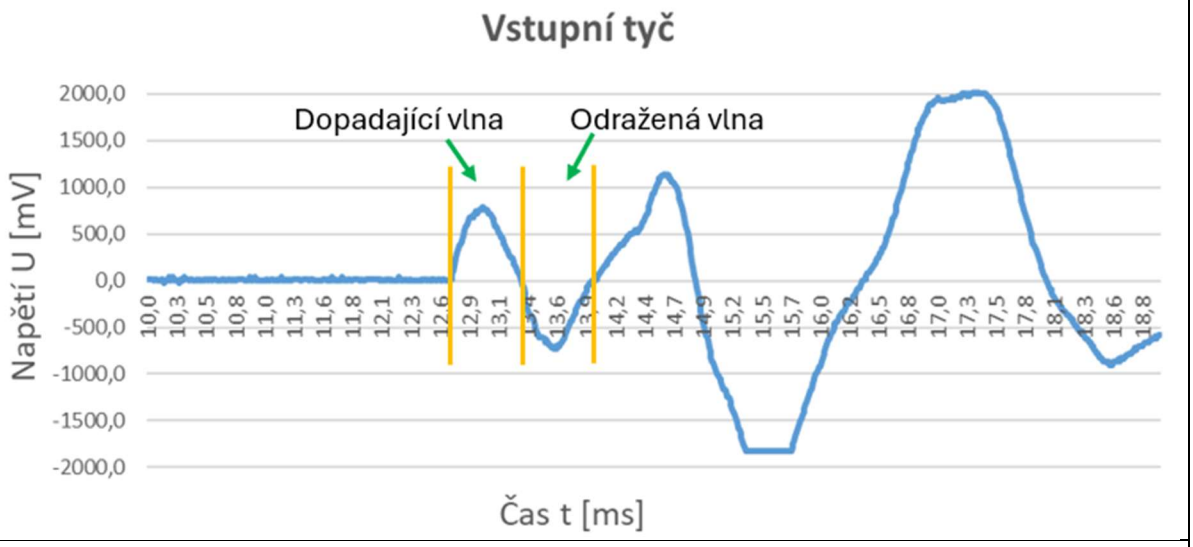
a) před provedením test



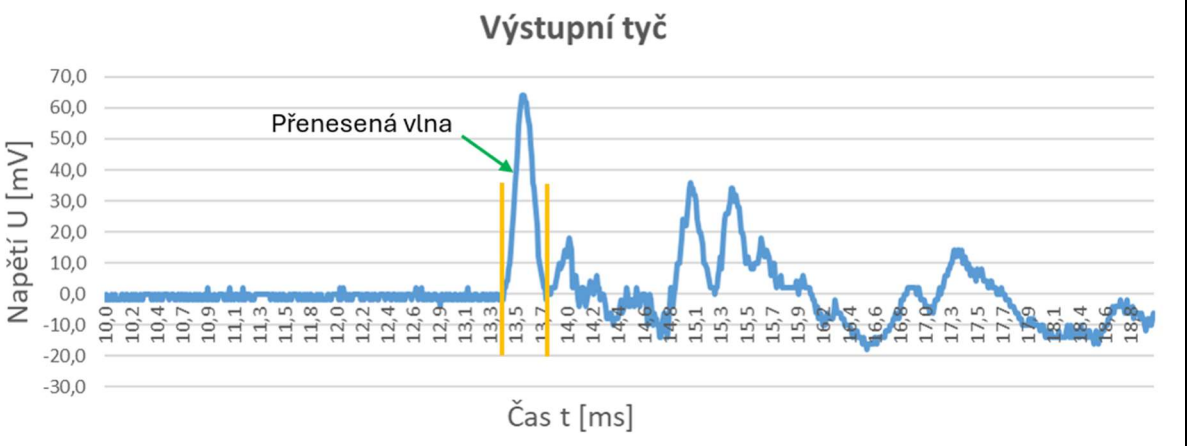
b) po provedení testu

Obr. 75 Zkušební vzorek.

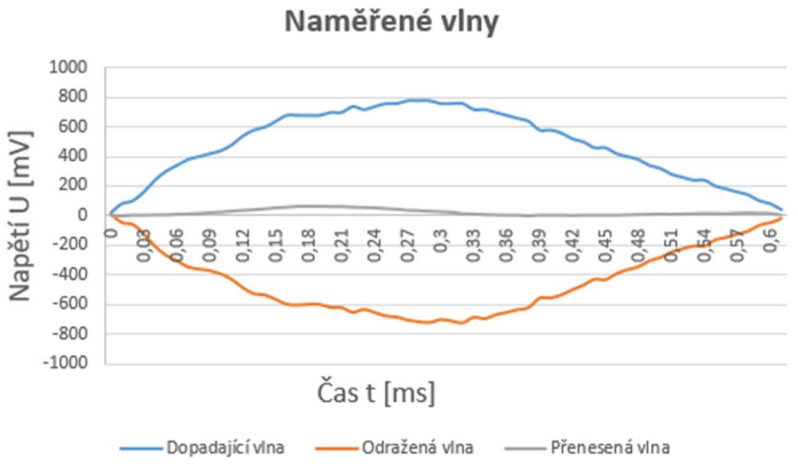
Během testu kapacitní snímače zaznamenávaly data na obou tyčích. Jejich záznam s označením jednotlivých vln lze vidět na Obr. 76.



a) vstupní tyč



b) výstupní tyč



c) naměřené vlny

Obr. 76 Záznam naměřených vln.

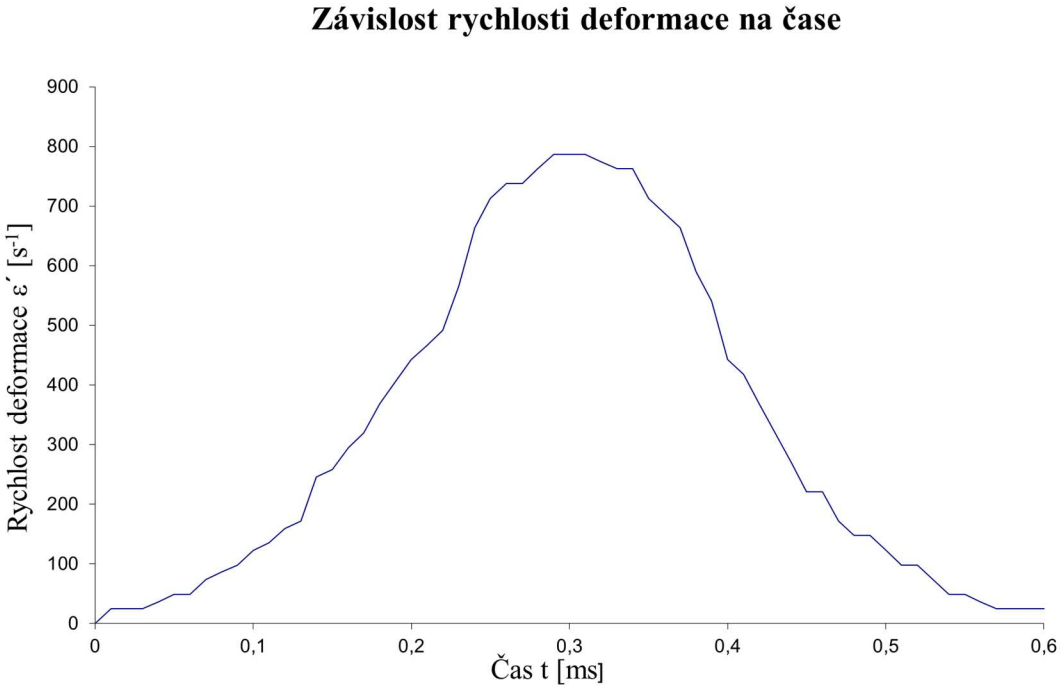
Tab. 8 Veličiny a jejich hodnoty potřebné k výpočtům [33].

Veličina:	Označení:	Hodnota:	Jednotka:
Permitivita vakua	ξ_0	$8{,}854 \cdot 10^{-12}$	$[F \cdot m^{-1}]$
Šířka kapacitního snímače	l_{0ks}	0,002	$[m]$
Poloměr 2. kroužku kondenzátoru	R_{2kk}	0,0077	$[m]$
Poloměr měrné tyče	R_{1mt}	0,0075	$[m]$
Napětí na kondenzátoru	U_0	70	$[V]$
Parazitní kapacita	C_p	$21{,}86 \cdot 10^{-12}$	$[F]$
Plocha měrné tyče	$S_{tyč}$	176,71	$[mm^2]$
Počáteční plocha vzorku	S_{vzorek}	16	$[mm^2]$
Měrná akustická impedance	z_b	40,67	$[MPa \cdot m^{-1} \cdot s]$

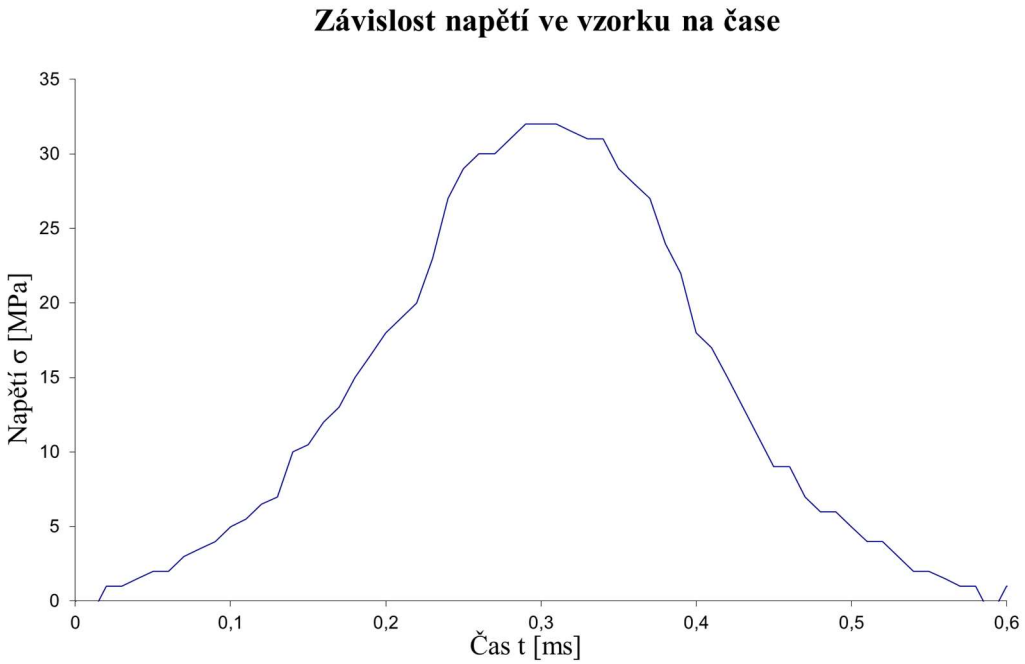
Dle rovnice 2.7 je vypočtena kapacita kondenzátoru kapacitního snímače v klidovém stavu:

$$C_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \xi_0 \cdot l_{0ks}}{\ln \frac{R_{2kk}}{R_{1mt}}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 8{,}854 \cdot 10^{-12} \cdot 0{,}002}{\ln \frac{0{,}0077}{0{,}0075}} = 4{,}2277 \cdot 10^{-12}\ F$$

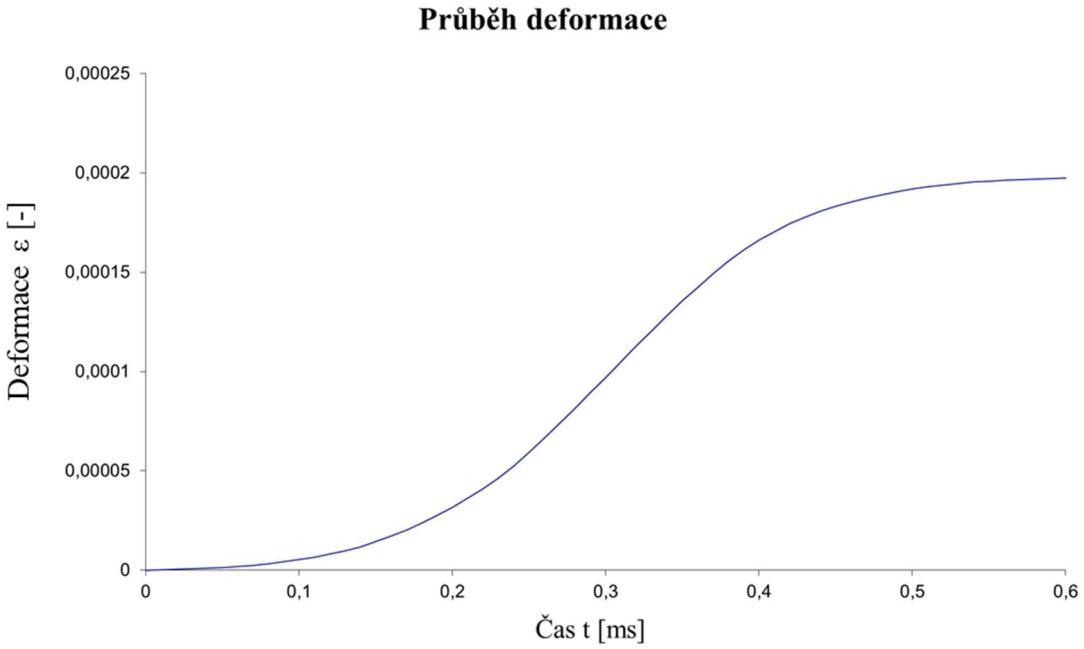
Podle výpočetních vztahů v kapitole 2.4.2 pro měření deformace pomocí kapacitních snímačů a hodnot v Tab. 8 byly pomocí software MS Excel stanovy průběhy rychlosti deformace (Obr. 77), napětí ve vzorku (Obr. 78) a průběh deformace (Obr. 79) v závislosti na čase.



Obr. 77 Závislost rychlosti deformace na čase.



Obr. 78 Závislost napětí ve vzorku na čase.



Obr. 79 průběh deformace.

Z Obr. 78 lze stanovit, že maximální dosažené napětí na vzorku, kdy došlo k jeho přetržení a tuto hodnotu lze považovat za mez pevnosti, je 31,32 *MPa*. Uváděná mez pevnosti v tahu výrobcem u materiálu PETG je 46 *MPa* při teplotě 24 °*C*, vlhkosti 22 % a vnitřní výplně 100 % [53]. Rozdíl naměřené hodnoty může být způsoben odlišnou teplotou a vlhkostí při testování. Největší vliv na snížení pevnosti u testovaného vzorku oproti uváděné hodnotě má vnitřní výplň, která je u testovaného vzorku pouze 40 %.

Posuvným měřítkem byla změřena počáteční délka vzorku 52,8 *mm*. Při měření délky přetrženého vzorku po provedení testu nebyl v délce vzorku rozdíl. Pomocí výpočetního vztahu 2.14 a maximální deformace 0,000198 stanovené z Obr. 79 lze stanovit délku vzorku po přetržení:

$$L_1 = L_0 \cdot (\varepsilon + 1) = 0{,}0528 \cdot (0{,}000197 + 1) = 0{,}05281\ m = 52{,}81\ mm$$

Prodlužení vzorku je velmi malé, 0,01 *mm* a lom lze považovat za křehký.

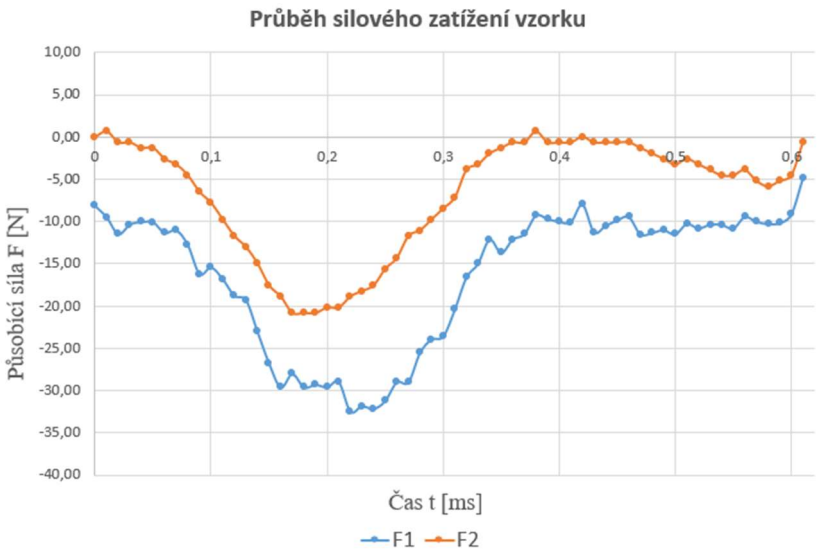
Na základě deformací na tyči byly stanoveny průběhy působících sil na vzorek (Obr. 80) dle vztahu 4.1 a 4.2.

$$F_{1(t)} = S_{tyč} \cdot\ E_{tyč} \cdot (\varepsilon_{I(t)} + \varepsilon_{R(t)}), \tag{4.1}$$

kde: $\varepsilon_{I(t)}$ – poměrná deformace tyče dopadající vlnou [-],
$\varepsilon_{R(t)}$ – poměrná deformace tyče odraženou vlnou [-].

$$F_{2(t)} = S_{tyč} \cdot\ E_{tyč} \cdot (\varepsilon_{T(t)}), \tag{4.2}$$

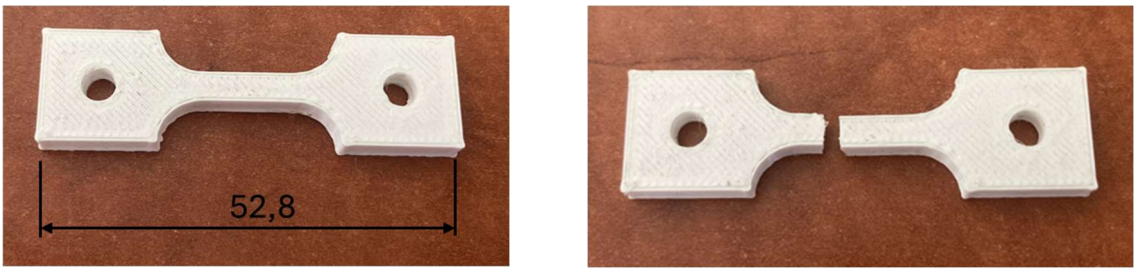
kde: $\varepsilon_{T(t)}$ – poměrná deformace tyče přenesenou vlnou [-].



Obr. 80 Průběh silového zatížení vzorku.

Na vzorku by měla platit silová rovnováha a působící síly by se měly rovnat. Z Obr. 80 plyne, že dané síly se nerovnají a je mezi nimi rozdíl pohybující se okolo 10 *N*. Tento rozdíl může být způsoben nepřesností při určení časového okna doby trvání dopadající, odražené a přenesené vlny.

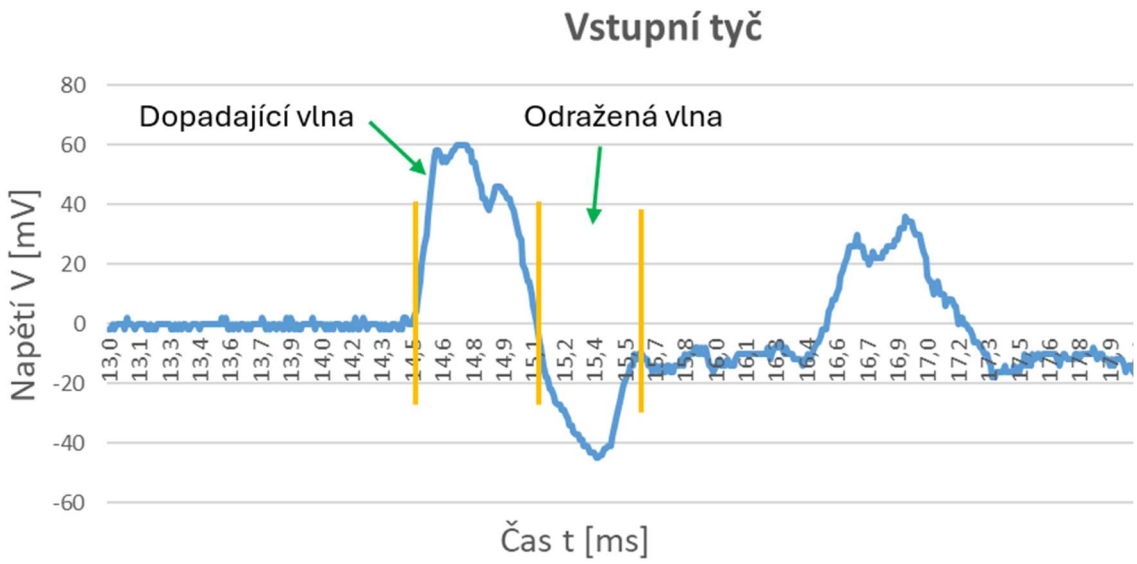
Pro ověření zaznamenávání vln byly v dalším testování k zaznamenávání dat na vstupní tyči použity tenzometry. Na výstupní tyči byl k zaznamenávání dat ponechán kapacitní snímač. Po provedení testu došlo k porušení vzorku viz Obr. 81.



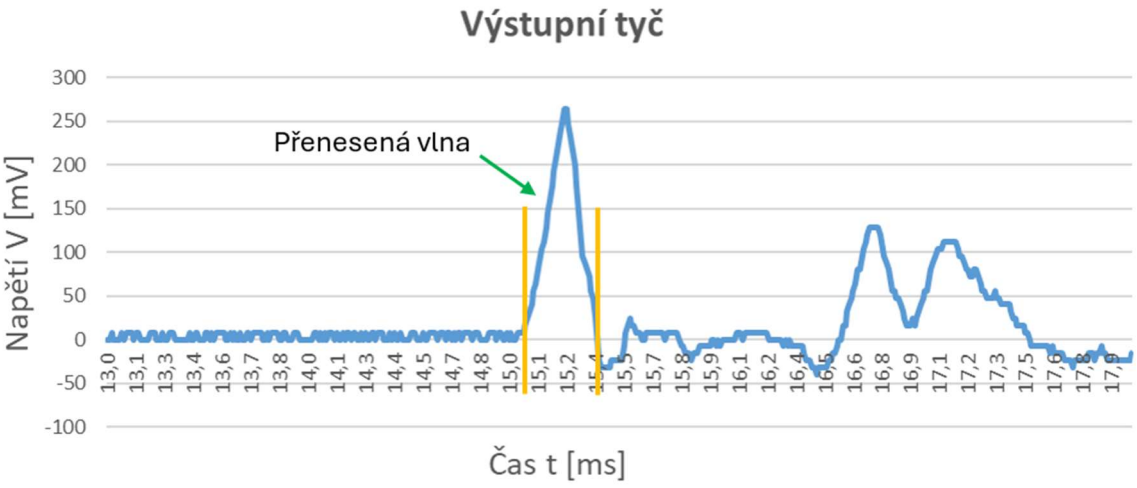
a) před provedením test b) po provedení testu

Obr. 81 Zkušební vzorek.

Na Obr. 82 zle vidět záznam z tenzometrů na vstupní tyči a z kapacitního snímače na výstupní tyči.



a) vstupní tyč



b) výstupní tyč

Obr. 82 Záznam naměřených vln.

Dle Obr. 82 lze vidět, že jednotlivé naměřené vlny mají velmi podobný charakter jako vlny na Obr. 76. Naměřené hodny jsou v jiném měřítku z důvodu odlišného zesílení tenzometrů. Na základě podobného charakteru naměřených průběhů vln pomocí kapacitních snímačů a tenzometrů lze konstatovat, že zkonstruované zařízení je funkční.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo sestrojení zkušebního zařízení pro rázové tahové testy na principu Hopkinsonovy měrné dělené tyče. Při konstrukci zařízení a jeho jednotlivých částí byly brány v potaz materiálové vlastnosti a geometrické parametry klíčových částí zařízení.

Válcová hlaveň byla sestrojena z PPR trubky PN16, která umožňuje vnitřní tlak až 16 *bar*, což je dostatečná hodnota pro testování vzorků na tomto zařízení. Zařízení bylo konstruováno primárně pro plastové a dřevěné vzorky, které byly podrobeny testu při vstupním tlaku do válcové hlavně 1 *bar*. Pro impaktor byl zvolen materiál PMMA s rychlostí šíření zvuku v tomto materiálu 2 750 $m \cdot s^{-1}$, která je blízká hodnotě šíření zvuku v plastových materiálech, která je například u termoplastu PVC 2 395 $m \cdot s^{1}$. Další klíčové komponenty, kterými jsou vstupní a výstupní tyč, byly vyrobeny ze stejného materiálu jako impaktor, z PMMA. Stejný materiál těchto komponentů zajišťuje stejnou rychlost šíření napěťové vlny v jednotlivých částech zařízení. Blízká hodnota šíření zvuku v impaktoru, vstupní tyči, výstupní tyči a ve vzorku zajišťuje stejně rychlé šíření napěťových vln těmito komponenty. Délka impaktoru je volena 280 *mm*. Tato délka zaručí dobu trvání vzniklých pulzů alespoň 0,2 *ms*, která je klíčová pro správné zaznamenávání šířících se jednotlivých vln.

Testovanými vzorky byly ploché vzorky vytištěné na 3D tiskárně Original Prusa MINI+ z materiálu PETG o tloušťce 4 *mm* a vnitřní výplni 40 %.

Při provádění testů byly k zaznamenávání dat použity kapacitní snímače a tenzometry, které měří napětí vln na tyčích. Nejprve byly použity kapacitní snímače na obou tyčích. Na základě naměřených hodnot byla vypočtena závislost rychlosti deformace a napětí ve vzorku na čase. Maximální naměřené napětí na vzorku bylo 31,32 *MPa*, tuto hodnotu lze považovat za mez pevnosti. Udávané napětí na mezi pevnosti výrobcem materiálu PETG je 46 *MPa* při vnitřní výplni vzorku 100 %. Naměřené napětí u vzorku na mezi pevnosti je nižší z důvodu použití nižší vnitřní výplně vzorku. Pro ověření správné funkčnosti zařízení byl kapacitní snímač na jedné z tyčí doplněn tenzometry. Záznam dopadající a odražené vlny byl stejného charakteru jako záznam dopadající a odražené vlny naměřených pomocí kapacitního snímače. Na základě tohoto poznatku lze konstatovat, že navržené a sestavené zařízení pro tahové rázové testy na principu Hopkinsonovy měrné dělené tyče je plně funkční.

Do budoucna by bylo žádoucí provést podrobné vyhodnocení vln naměřených pomocí tenzometrů a z nich také stanovit závislost rychlosti deformace, napětí ve vzorku a průběh deformace na čase. Dále by bylo vhodné opatřit zařízení měřením rychlosti dopadajícího impaktoru na přírubu vstupní tyče. Měření rychlosti bylo sestavené, ale při implementaci na zařízení nebylo úspěšné z důvodu volby neadekvátních senzorů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Karoserie. *Bezpecnecesty* [online]. [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: https://www.bezpecnecesty.cz/cz/bezpecnost-automobilu/pasivni-prvky-bezpecnosti/karoserie
2. FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2764-7.
3. JOPEK, Miroslav. *Modelování mechanického chování ocelí za vyšších rychlostí deformace: Disertační práce*. Vysoké učení technické v Brně. Brno, 2003. ISBN 80-214-2437-0.
4. FOREJT, Milan a PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN ISBN 80-214-2374-9.
5. GILIS, P. P. a T.S. GROSS. Effect of Strain Rate on Flow Properties. Metals handbook.: Volume 8 – Mechanical Testing. Ninth Edition. Ohio: American Society for Metals, 1985.
6. *Zkouška tahem: Výsledky zkoušky*. Online. Dostupné z: https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1566. [cit. 2024-05-10].
7. KUDLÁČOVÁ, Barbora. *Dynamické materiálové modely ve tváření kovů a slitin*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2017.
8. SAMEK, Radko a ŠMEHLÍKOVÁ, Eva. *Speciální technologie tváření, Část I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010. ISBN 978-80-214-4220-7.
9. FARLÍK, Alois a ONDRÁČEK, Emanuel. *Teorie dynamického tváření*. Praha: SNTL, 1968.
10. FOREJT, Milan; HUMÁR, Anton; PÍŠKA, Miroslav a JANÍČEK, Libor. *Experimentální metody: sylabus*. Brno, 2003.
11. STAAB, G.H. a GILAT, A. A Direct-tension Split Hopkinson Bar for High Strain-rate Testing. Online. *Experimental Mechanics*. 1991, s. 232-235. [cit. 2024-04-22].
12. MEYERS, Marc André. *Dynamic Behavior of Materials*. New York: John Wiley, 1994. ISBN 0-471-58262-X.
13. PANTALÉ, Olivier a MING, Lu. AnOptimized Dynamic Tensile Impact Test for Characterizing the Behavior of Materials. Online. *Applied mechanics*. 2022, č. 3, s. 1107-1122. Dostupné z: https://doi.org/10.3390/applmech3030063. [cit. 2024-04-22].
14. MÜLLER, Samuel. *Vývoj impaktoru pro Taylorův test*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2022.
15. XIA, Kaiwen a YAO, Wei. Dynamic rock tests using split Hopkinson (Kolsky) bar systém - A review. Online. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2015, č. 7, s. 27-59. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.07.008. [cit. 2024-04-22].
16. KAISER, Michael Adam. *Advancements in the Split Hopkinson Bar Test*. Thesis. Virginia: Virginia State University, 1998.
17. *Split Hopkinson Pressure Bar*. Online. Tampere University. Dostupné z: https://research.tuni.fi/impact/equipment/454-2/. [cit. 2024-04-22].
18. ŠLAJS, Miroslav. *Studium vlivu rychlostních a teplotních parametrů na tvařitelnost Ti slitin*. Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012.
19. TANIGUCHI, Norihiko; NISHIWAKI, Tsuyoshi a KAWADA, Hiroyuki. Tensile strength of unidirectional CFRP laminate under high strain rate. Online. *Advanced Composite Materials*. 2007, č. 16, s. 167-180. Dostupné z: https://doi.org/10.1163/156855107780918937. [cit. 2024-04-22].

20. NIE, X; PRABHU, R; CHEN, W.W.; CARUTHERS, J.M. a WEERASOORIYA, T. A Kolsky Torsion Bar Technique for Characterization of Dynamic Shear Response of Soft Materials. Online. *Experimental Mechanics*. 2011, s. 1527-1534. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/s11340-011-9481-4. [cit. 2024-05-04].
21. ARMSTRONG, R.W. a WALLEY, S.M. High strain rate properties of metals and alloys. Online. *International Materials Reviews*. 2008, č. 53. Dostupné z: https://doi.org/10.1179/174328008X277795. [cit. 2024-05-04].
22. *Hybrid Computational and Experimental Approach to Identify the Dynamic Initiation Fracture Toughness at High Loading Rate: Schematic of torsional split Hopkinson bar (TSHP) and spiral notch specimen*. Online. In: FAHEM, A.F. a KIDANE, A. University of South Carolina: The Society for Experimental Mechanics, 2018. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/320737485/figure/fig1/AS:593134782271489@1518425760524/Schematic-of-torsional-split-Hopkinson-bar-TSHP-and-spiral-notch-specimen.png. [cit. 2024-05-04].
23. IVO, Dohnal. *Ověření možnosti využitá tahové deformace při Hopkinsonově testu*. Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014.
24. GERLACH, Robert; KETTENBEIL, Christian a PETRINIC, Nik. A new split Hopkinson tensile bar design. Online. *International Journal of Impact Engineering*. 2012, s. 63-67. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.08.004. [cit. 2024-04-21].
25. NICHOLAS, Theodore. Tensile testing of materials at high rates of strain. Online. *Experimental Mechanics*. 1981, s. 177-185. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/BF02326644. [cit. 2024-05-21].
26. LI, Dian. *Rebuild The Niu Split-Hopkinson Pressure Bar Apparatus For High Strain Rate Tensile Test*. Thesis. Northern Illinois University, 2021.
27. CHEN, Weinong a SONG, Bo. *Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design, Testing and Applications*. Springer Nature, 2010. ISBN 1441979824.
28. REIMER, Albert. *Horizons in World Physics: Volume 298*. Online. New York: Nova Science Publishers, 2019. ISBN 978-1-53614-796-4(eBook). Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/328779611_Nanofractals_Their_Properties_and_Applications. [cit. 2024-04-21].
29. XU, Ze-Jian; LI, Yu-Long a HUANG, Feng-Lei. Application of split Hopkinson tension bar technique to the study of dynamic frac ture properties of materials. Online. *Acta Mechanica Sinica*. 2012, s. 424-431. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/s10409-012-0046-2. [cit. 2024-04-21].
30. EVROPSKÝ VÝBOR PRO NORMALIZACI. ČSN EN ISO 26203-1, *Kovové materiály - Metoda zkoušení tahem při vysokých rychlostech deformace - Část 1: Systémy typu pružné tyče*. 2018.
31. YOUNG, Kevin. *Development of a Tensile Split Hopkinson Pressure Bar Testing Facility*. Thesis. Ontario: University of Windsor, 2015.
32. *Split-hopkinson bars for direct tensile testing (SHTB)*. Online. In: Thiot Ingenierie. Dostupné z: https://www.thiot-ingenierie.com/wp-content/uploads/2017/05/SHTB-03.jpg. [cit. 2024-05-21].
33. JOPEK, Miroslav, vedoucí odboru technologie tváření kovů a plastů na FSI VUT v Brně [ústní sdělení]. Brno, 11.4.2024
34. ČECH, Jaroslav; PERNIKÁŘ, Jiří a PODANÝ, Kamil. *Strojírenská metrologie*. Brno, 2005. ISBN 80-214-3070-2.

35. VLK, Miloš; HOUFEK, Lubomír; HLAVOŇ, Pavel; KREJČÍ, Petr; KOTEK, Vladimír et al. *Experimentální mechanika*. Online. Brno, 2003. Dostupné z: http://ean2011.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/Experimentalni_mechanika.pdf. [cit. 2024-04-29].
36. *Strain Gauge*. Online. In: Iqsdirectory. Dostupné z: https://www.iqsdirectory.com/articles/load-cell/strain-gauge/semiconductor-strain-gauge.jpg. [cit. 2024-05-01].
37. NOVÁK, Petr. *Průmyslové řídící systémy*. Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3032-2.
38. *BLOCAN® ALUMINIUM CONSTRUCTION PROFILES*. Online. RK-ROSE-KRIEGER. Dostupné z: https://www.rk-rose-krieger.com/english/products/profile-system/construction-profiles. [cit. 2024-04-22].
39. *PPR TRUBKY*. Online. VTP tvarovky. Dostupné z: https://www.vtp-tvarovky.cz/ppr-trubky/. [cit. 2024-05-07].
40. *PPR a PP-RCT trubky*. Online. In: Triker. Dostupné z: https://triker.cz/pool/TN_PPR_trubka.jpg. [cit. 2024-04-23].
41. *PPR T-kus redukovaný 63 x 32 x 63 mm*. Online. In: Aquatophome. Dostupné z: https://www.aquatophome.cz/fotky75447/fotos/61836_544_61836_543_61836_542_61836_541_61836_540_61836_539_61836_538_61836_537_61836_536__vyr_535PPR-T-kus-redukovany.jpg. [cit. 2024-04-28].
42. *PPR Přechodka 63 x 2" s kovovým závitem vnějším (SZE06363XX)*. Online. In: Obchod-vtp. Dostupné z: https://www.obchod-vtp.cz/image/cache/catalog/HTTPS%20NEW%20CLEAN/_vyr_358_PPR-prechodka-vnejsi-zavit-540x360.jpg. [cit. 2024-04-28].
43. *PPR DG přechodka 25 x 3/4" MZV vnější závit*. Online. In: Aquatophome. Dostupné z: https://www.aquatophome.cz/fotky75447/fotos/_vyr_357DG-prechodka-vnejsi-DGV.jpg. [cit. 2024-04-28].
44. *PPR nátrubek redukovaný 32 x 25 mm*. Online. In: Aquatophome. Dostupné z: https://www.aquatophome.cz/fotky75447/fotos/61836_555_61836_554__vyr_553PPR-redukce-natrubkova.jpg. [cit. 2024-04-28].
45. *Jak na plastové vodovodní trubky svářečkou*. Online. Zahradni-eshop. 2020. Dostupné z: https://www.zahradni-eshop.cz/blog/navod-svarovani-plastovych-trubek-polyfuzni-svareckou/. [cit. 2024-04-24].
46. *Kulový kohout MF 3/4" s UCPÁVKOU, Páka, PN30*. Online. In: OBCHOD-VTP. Dostupné z: https://www.obchod-vtp.cz/image/cache/catalog/HTTPS%20NEW%20CLEAN/KULAKY/461100B-540x360.jpg. [cit. 2024-04-26].
47. *T-kus pozinkovaný č. 130 3/4" FFF*. Online. In: DEK. Dostupné z: https://cdn1.idek.cz/dek_cz/img/product-eshop/-1947223918_ew800_eh800.webp. [cit. 2024-04-26].
48. *Rychlost zvuku v materiálu*. Online. OLYMPUS. Dostupné z: https://www.olympus-ims.com/cs/ndt-tutorials/thickness-gauge/appendices-velocities/. [cit. 2024-04-27].
49. *Polymethylmethakrylát*. Online. Polyplasty. Dostupné z: https://www.polyplasty.cz/polymethylmethakrylat.html. [cit. 2024-04-27].
50. *PLEXIGLAS Technický list XT, GS*. Online. Zenit. 2013. Dostupné z: https://www.zenit.cz/public/media/Plasty/Zenit_Technicke_Vlastnosti_Plasty_Plexiglas_XT-GS_CZ.pdf. [cit. 2024-04-27].

51. *Plné tyče PMMA*. Online. Akplast. Dostupné z: http://www.akplast.cz/pmma-v. [cit. 2024-04-27].
52. *Objímka kloubová jednošroubová s hlavou M8 12-16 1/4"*. Online. In: Acomponents. Dostupné z: https://eshop.acomponents.cz/images/thumbs/0001570_IMG_1898.JPG.jpeg. [cit. 2024-05-08].
53. *Technický list: Prusament PETG by Prusa Polymers*. Online. Prusament. Dostupné z: https://storage.googleapis.com/prusa3d-content-prod-14e8-wordpress-prusament-prod/2023/10/095f088c-tds_prusament-petg_n_cs.pdf. [cit. 2024-05-08].
54. BĚHÁLEK, Luboš. *Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání*. Online. Dostupné z: https://publi.cz/books/180/09.html. [cit. 2024-05-12].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
$\dot{\varphi}$	rychlost deformace	[s^{-1}]
b_0	počáteční šířka zkoušené délky plochého vzorku	[m]
L_c	zkoušená délka zkoušeného tělesa	[m]
L_0	počáteční délka vzorku	[m]
L_1	délka vzorku po zkoušce	[m]
C	rychlost šíření elastické vlny ve zkušebním tělese	[ms^{-1}]
a_0	počáteční tloušťka plochého vzorku	[m]
r	poloměr přechodové oblasti zkoušeného tělesa	[m]
b_g	šířka upínací oblasti vzorku	[m]
L_t	délka tyče	[m]
D_t	průměr tyče	[m]
Δt	délka trvání pulzu	[ms]
L_{im}	délka impaktoru	[m]
C_B	rychlost zvuku v materiálu	[ms^{-1}]
C_0	kapacitu kondenzátoru kapacitního snímače v klidovém stavu	[F]
ξ_0	permitivita vakua	[Fm^{-1}]
l_{0ks}	šířka kapacitního snímače	[m]
ΔR	změna poloměru tyče	[m]
ε_r	Poměrná změna poloměru tyče	[-]
μ	Poissonovo číslo	[-]
$E_{tyč}$	modul pružnosti v tahu tyče	[MPa]
$S_{tyč}$	průřez měrné tyče	[mm^2]
S_{vzorek}	průřez vzorku	[mm^2]
σ	napětí	[MPa]
ε‘	rychlost deformace	[s^{-1}]
ε	deformace	[-]
F	síla	[N]

Zkratky

Označení	Legenda
T_{TAV}	teplota tavení materiálu
VUT	Vysoké učení technické
FSI	Fakulta strojního inženýrství
TAT	Taylorův test
SHBS	Metoda Hopkinsonovy měrné dělené tyče (split Hopkinson bar system)
SHPB	Hopkinsonův tlakový test (split Hopkinson pressure bar)
SHTB	Hopkinsonův tahový test (split Hopkinson tensile bar)
PPR	polypropylenový kopolymerní random
PMMA	Polymethylmethakrylát
PLA	polylactic acid
PETG	polyethylentereftalát

SEZNAM PŘÍLOH

SEZNAM VÝKRESŮ

Výkres sestavy	2024-DP-217523-1
Kusovník	2024-DP-217523-2