



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

METODY MĚŘENÍ PARAMETRŮ VE TVÁŘENÍ KOVŮ METHOD OF MEASUREMENT PARAMETERS IN METAL FORMING.

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTIN KNEBL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN FOREJT, CSc.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Martin Knebl

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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:

Metody měření parametrů ve tváření kovů.

v anglickém jazyce:

Method of measurement parameters in metal forming.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Shrnutí současných metod měření tvářecích a vyhazovacích sil, měření dráhy a rychlostí pohybu nástrojů a kontaktní i bezkontaktní způsoby měření teploty. Posouzení jejich vhodnosti pro kvázistatické a dynamické procesy tváření se zaměřením na rázové kompresní testy.

Cíle diplomové práce:

1. Vypracujte literární studii se zaměřením na měření sil, dráhy, rychlosti pohybu a měření teplot ve tváření kovů a slitin.
2. Zhodnoťte současný stav měřících metod a jejich vhodnosti s ohledem na dynamické testy tvařitelnosti.
3. Vypracujte návrh metodiky měření a vyhodnocování průběhu deformačních napětí, sil a rychlostí deformace u Hopkinsonova kompresního testu.
5. Zpracujte technické hodnocení práce.
6. Formulujte závěry a doporučení.

Seznam odborné literatury:

- [1] DRASTÍK, František, ELFMARK, Jiří a kol. Plastometry a tvařitelnost kovů. 1. vyd. Praha : SNTL, Inc.,1977. 392 s.
- [2] MEYERS, Marc André. Dynamic Behavior of Materials. Marc. A. Mayers. 1st edition. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1994. 668 s. A Wiley Interscience Publication. ISBN 0-471-58262-X.
- [3] FOREJT, Milan, et al. Experimentální metody : Sylabus. Sestavil Milan Forejt. 1. vyd. Brno : FSI VUT , 2003. 83 s. Dostupný z WWW: <ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory/Experimentální metody.pdf>.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Milan Forejt, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 18.11.2009

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

KNEBL Martin: Metody měření parametrů ve tváření.

Diplomová práce se zabývá problematikou měření termomechanických parametrů při tváření kovů za vyšších rychlostí deformace. V první části je vypracována obecná literární studie, obsahující přehled metod měření požadovaných parametrů. Je popsán princip jejich funkce a použití. Dále je zhodnocen současný stav a doporučení vhodných metod pro dynamické procesy tváření, zvláště pak jejich testování.

Druhá část práce je věnována měření dynamických vlastností materiálu. Jedná se o Hopkinsonův test měrnou dělenou tyčí. V teoretické části je test popsán včetně postupu matematického vyhodnocení. V praktické části je detailní popis postupu a vyhodnocení reálného testu s hliníkovou slitinou AlMg4,5Mn,07-EN AW 5083 provedeného v rámci junior projektu.

Klíčová slova: Hopkinsonův test, vysoké rychlosti tváření, metody měření

ABSTRACT

KNEBL Martin: Method of measurement parameters in metal forming

This master's thesis deals with the problem of measurement for thermomechanical parameters during metal forming under higher deformation rate. The first part works up general literary studies, comprising a summary of measurement methods for required parameters. There is described a principle of their function and usage. Further assessed the current situation and recommendation of appropriate methods for the dynamic processes of forming, especially their testing.

The second part is devoted to the measurement for dynamic features of the material. This is a problem specified by Split Hopkinson pressure bar test. The test is described, including the mathematical evaluation process, in the theoretical part. In the practical part, there is a detailed description of the process and evaluation of the real test with aluminum alloy AlMg4, 5Mn ,07-EN AW 5083 performed within the framework of the junior project.

Keywords: Split Hopkinson pressure bar test, high strain rate, method of measurement

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KNEBL, M. *Metody měření parametrů ve tváření kovů..* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 68 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Milan Forejt, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 28.5.2010

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu prof. Ing. Milanu Forejtovi, CSc. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

1. ÚVOD.....	11
2. ZPŮSOBY A ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ SÍLY, RYCHLOSTI, DRÁHY A TEPLoty.....	12
2.1 Měření síly.....	12
2.1.1 Tenzometrické siloměry.....	12
2.1.2 Piezoelektrické siloměry.....	16
2.1.3 Indukční siloměry.....	18
2.1.4 Kapacitní siloměry.....	19
2.1.5 Siloměry s magnetoelastickými snímači.....	21
2.1.6 Mechanické siloměry.....	22
2.2 Měření dráhy.....	23
2.2.1 Indukční snímače dráhy.....	23
2.2.2 Kapacitní snímače dráhy.....	24
2.2.3 Odporové snímače dráhy.....	25
2.2.4 Magnetostrikční snímače dráhy a rychlosti.....	26
2.2.5 Snímače dráhy s magnetickým páskem – magnetické měřítko.....	28
2.2.6 Optické snímače dráhy – moderní řešení.....	29
2.3 Měření rychlosti.....	30
2.3.1 Indukční snímače rychlosti.....	30
2.3.2 Kapacitní snímače rychlosti.....	31
2.3.3 Fotodiodové snímání rychlosti průletu.....	32
2.4 Měření teploty.....	32
2.4.1 Termoelektrické teploměry	32
2.4.2 Optické teploměry – pyrometry.....	34
2.4.3 Infračervené termočlánky.....	36
2.4.4 Termovizní teploměry.....	36
2.5 Zhodnocení současného stavu.....	37
3. HOPKINSONŮV TEST MĚRNOU DĚLENOU TYČÍ.....	42
3.1 Úvod.....	42
3.2 Laboratoř vysokých rychlostí deformace	42
3.3 Princip Hopkinsonova testu	43
3.3.1 Princip.....	43
3.3.2 Popis hlavních částí.....	44
3.4 Vyhodnocení testu.....	45
3.4.1 Výpočtový model.....	45

4. PRŮBĚH MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ HOPKINSONOVA	
TESTU	52
4.1 Vzorek.....	52
4.2 Zkušební zařízení.....	53
4.3 Postup experimentu.....	54
4.4 Vstupní a naměřené hodnoty.....	56
4.5 Vyhodnocení.....	60
4.6 Zhodnocení výsledků.....	66
4.7 Doporučení.....	67
5. ZÁVĚR	68

Seznam veličin

Seznam příloh

Přílohy

Metody měření parametrů ve tváření.

Method of measurement parameters in metal forming

1. ÚVOD

Tváření kovů je proces, při kterém se vlivem působení vnějších sil mění tvar, struktura a mechanické vlastnosti polotovaru. Podstatou tváření je vyvolání plastických deformací, ke kterým dochází po překročení meze kluzu daného materiálu.

Aby bylo možné materiály efektivně tvářet, musíme znát jejich mechanické (plastické) vlastnosti. Pro správné vyhodnocení tvařitelnosti je nutné přesné stanovení jednotlivých vstupních veličin, jako je tvářecí síla, dráha (deformace), rychlost nástrojů a teplota tvářeného materiálu.

Dříve se většina metod měření těchto parametrů zakládala na mechanických způsobech měření, což bylo vzhledem k nepřesnostem převodů nedostatečné. Z tohoto důvodu jsou mechanické způsoby používány jen výjimečně a jen k orientačnímu zjišťování daných veličin. Rychlý rozvoj technologií v oblasti elektroniky a elektrotechniky však umožňuje využívat k měření mnohem přesnější metody, založené na elektronickém snímání a vyhodnocení daných termomechanických veličin.

Dnešní doba, rychle se rozvíjejícího průmyslu, klade vysoké nároky na efektivnost a kvalitu výrobků, úsporu energií a především na rychlost výrobního procesu. Aby bylo možné všem těmto požadavkům vyhovět, je nutné znát chování materiálů při rychlých tvářecích procesech. Materiál není deformován jen statickou silou, ale projevují se vlivy mechanické rezonance, setrvačných sil a šíření elastických napěťových vln. Mechanické vlastnosti materiálů byly až doposud získávány běžnými tzv. statickými zkouškami, jako jsou např. zkoušky tahové, tlakové, zkoušky tvrdosti aj. Takto získané hodnoty mají však význam jen pro technologie, u kterých není rychlost deformace vyšší než 10^2 s^{-1} . Z tohoto důvodu byly vyvinuty dynamické zkoušky materiálových vlastností. Nejpoužívanější metody jsou Hopkinsonův test měrnou dělenou tyčí (v anglickém překladu Split Hopkinson Pressure Bar Test – SHPB) a Taylorův test – TAT.

Hopkinsonův test, kterému je věnována praktická část této diplomové práce, je založen na měření tlakových (tahových) elastických pulzů v měrných tyčích. Vyhodnocení je založeno na průbězích napětí deformujících vzorek. Zatěžující pulz je vyvolán nárazem projektilu do měrné tyče. Dopadová rychlost projektilu je až 22 m/s. V práci je detailně popsán postup reálného testu, provedeného na vzorcích ze slitiny hliníku. Test je vyhodnocen a jsou popsány získané materiálové charakteristiky. Na závěr je celý experiment zhodnocen a jsou navrženy možné inovace testovacího zařízení.

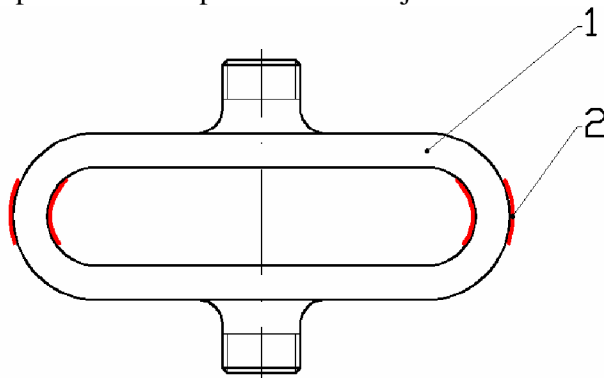
2. ZPŮSOBY A ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ SÍLY, RYCHLOSTI, DRÁHY A TEPLoty

Pro zjišťování mechanických (plastických) vlastností kovů je důležité znát přesně jednotlivé vstupní veličiny pro vyhodnocení tvažitelnosti, jako je tvářecí síla, dráha (deformace), rychlost nástrojů a teplota tvářeného materiálu (uplatnění v simulačních metodách).

V této kapitole jsou popsány principy a možnosti využití jednotlivých metod, sloužících k měření požadovaných termomechanických vlastností materiálů.

2.1. Měření síly

K měření tvářecích sil se používají tzv. siloměry. Jde o speciální zařízení umístěné do prostoru zkušebního stroje, kde na ně působí měřená tvářecí síla. Sestávají většinou z deformačního (zatíženého) členu a měřicího systému, který deformaci měří obr.2.1. Podle jednotlivých způsobů měření deformace, dělíme siloměry na mechanické a elektronické a ty se dále dělí na tenzometrické, piezoelektrické, indukční a kapacitní. Funkce a použití jednotlivých systémů je podrobně rozepsaná v následující části .



Obr. 2.1 Schematické znázornění siloměru. [2]
1- deformační člen, 2- měřící členy (tenzometry).

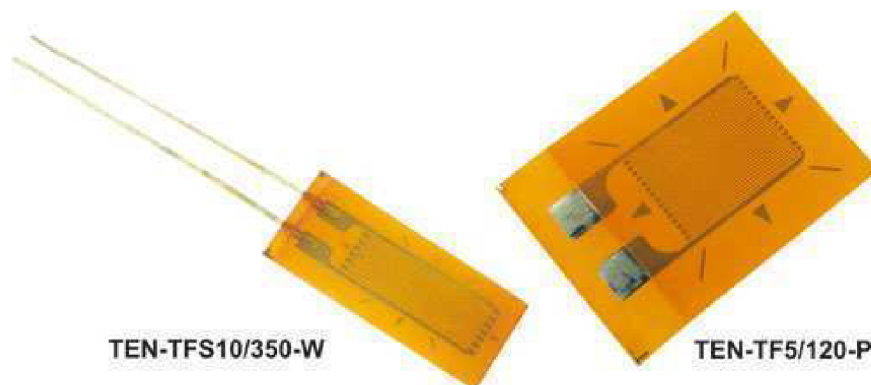
2.1.1 Tenzometrické siloměry

Tenzometrický snímač , obr 2.2, je s deformačním členem spojen velmi tenkou vrstvou tmelu. Kovová mřížka je napájena stejnosměrným nebo střídavým proudem a v závislosti na povrchové deformaci, deformačního členu siloměru, mění svůj ohmický odpor. Tmely se však neřídí Hookovým zákonem a jejich charakteristickou veličinou omezující použití je tečení. Používané tmely, nejčastěji na bázi epoxidové pryskyřice, bývají tedy zdrojem dominantní chyby měření. U kovových tenzometrů je zajištěn dostatečný odstup měřicího signálu a šumu ($U_{\text{sum}} = 10^{-8}$ V). Základní vztah charakterizující funkci tenzometru je:

$$dR / R = k \cdot \frac{dl}{l} , \quad (1)$$

kde k je součinitel deformační citlivosti (pro konstantan je $k=2,1$), R je odpor tenzometru, dR je změna odporu při deformaci a dl/l je poměrná deformace deformačního členu siloměru. Pro

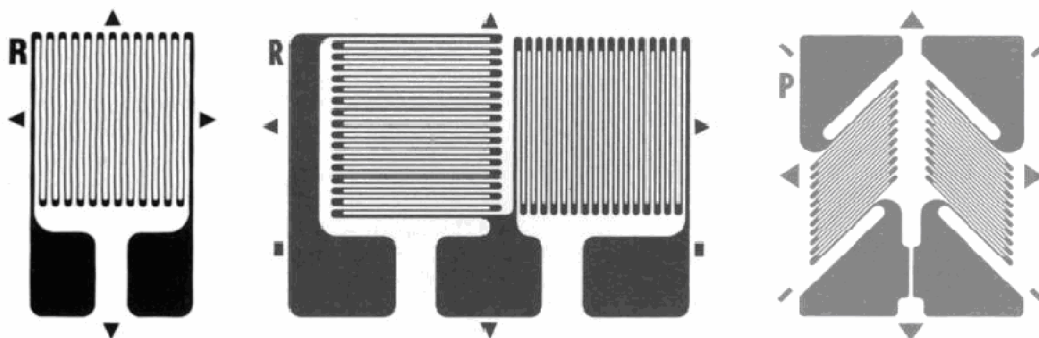
přesná měření se tenzometry zapojují do můstkových obvodů a měřicí systémy jsou vybaveny zdrojem napájecího proudu a měřicí elektronikou, včetně vhodného vyhodnocovacího softwaru.



Obr 2.2 Ukázka fóliových tenzometrů firmy TME Czech Republic s.r.o.[10]

Tenzometry:

Mřížky tenzometrů se původně vyráběly z konstantanového drátu o průměru cca 10^{-2} mm, ale v dnešní době se spíše leptají z konstantanové fólie tloušťky 10^{-3} mm, která se pak přitmelí k papírové podložce [1], což umožňuje přesnější tvar mřížky a rychlejší a levnější velkosériovou výrobu. Rozsah teplot měření je udáván většinou od -30°C do $+40^{\circ}\text{C}$. Pro speciální metody měření, za zvýšených teplot, se vyrábějí senzory s kovovými tenzometry s rozsahem od -20°C do 200°C . Dosahovanou přesnost můžeme charakterizovat sloučenou chybou, která zahrnuje vliv nelinearity kalibrační závislosti a hystereze. U běžných snímačů je tato chyba 0,02% až 0,5% jmenovitého napětí a u nejpřesnějších snímačů pouze 0,01% jmenovitého napětí. Do průměru deformačního členu 150mm stačí čtyři tenzometry zapojené do plného můstku, pro větší průměry se používá osm snímačů a zapojí se po dvou do každé větve mostu.



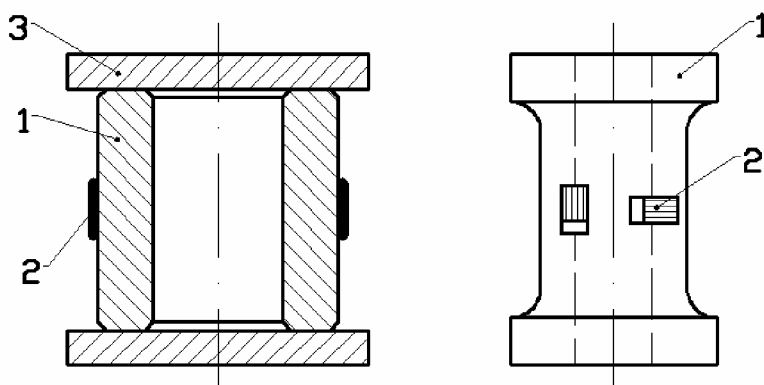
Obr.2.3 Ukázka různých tvarů tenzometrických mřížek. [1]

Siloměr :

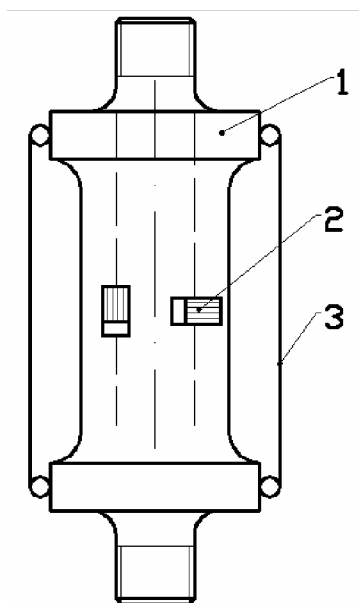
Deformační členy se vyrábí z kvalitních, nejlépe pružinových ocelí tepelně zušlechťených na 49 až 51 HRC a jsou po celém povrchu broušené.

Tvar deformačního členu závisí především na velikosti měřené síly. Hranice dělící síly na velké a malé je asi 200 kN, což plyne z požadavků na tuhost a citlivost siloměru. Dále je také nutné zohlednit rozměry siloměru podle zařízení, do kterého je umístěn, aby nijak neomezoval jeho funkci a zároveň musí být dodrženy určité rozměry deformačního členu, např. nejmenší výška, pro jeho správnou funkci. Výška siloměrů se volí 100 mm pro síly do 6 MN nebo podle okolností a velikosti zatížení 150 mm a více.

Pro síly nad 200 kN jsou těla siloměrů válcového tvaru. Většinou je tělo duté, tzv. prstencové obr.2.4. Z plného materiálu jsou těla siloměrů pro extrémně vysoké nebo tahové zatížení (obr.2.5). Prstencové siloměry jsou vhodné např. pro práci v kovárnách, jelikož na ně můžeme položit spodní díl zápustky a nevádí jim otvor ve stole lisu.

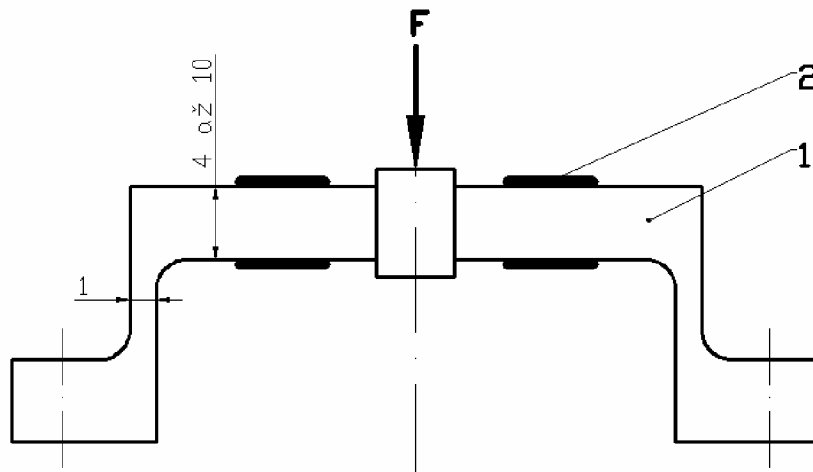


Obr.2.4 Různé tvary prstencových siloměrů. [2]
1-tělo siloměru, 2- tenzometry, 3-víko.



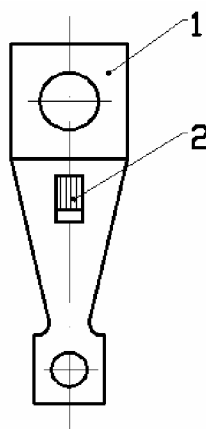
Obr.2.5 Siloměr pro tah a tlak. [2]
1-tělo siloměru, 2- tenzometry, 3-ochranný plášť.

Pro měření menších zatížení, tj. pod 200 kN se používá ohybový deformační člen obr. 2.1., který je považován za jeden z nevhodnějších tvarů, používaný firmou Wazau nebo tvar na obr.2.6, který byl vyvinutý VÚTS v Brně.



Obr.2.6 Ohybový tenzometrický siloměr pro měření sil do 2kN (VÚTS Brno). [2]
1-tělo siloměru, 2- tenzometry.

Pro nejmenší síly v řádu N volíme jako těleso siloměru ohybový nosník. Tvar na obr.2.7 má výhodu rovnoměrné deformace po celé délce, nezáleží proto na tom, do kterého místa snímač nalepíme. Lepí se však ve větší vzdálenosti od vetknutí, kde dochází k deformaci silokřivek [2].



Obr.2.7 Tenzometrický siloměr pro velmi malé síly. [2]
1-tělo siloměru, 2- tenzometr.

Materiál siloměru vždy nemusí být jenom ocel. Pro měření malých zatížení v řádu N nebo menší lze používat např. dural nebo umaplex . Tyto „náhradní“ materiály se však musí nejprve laboratorně vyzkoušet, než se použijí v provozu . Jejich výhoda je především v tom, že tenzometr na ně lze přilepit „dokonalými“ lepidly, které mají velmi podobné vlastnosti jako daný materiál.

Tenzometrické snímače jsou v dnešní době jedny z nejpoužívanějších vzhledem ke své přesnosti a velkému rozsahu měření, který můžeme dosáhnout. Stejnou aparaturou můžeme měřit zatížení od několika N až do řádů MN. Nesporná výhoda je také to, že tyto siloměry se dají vyrobit podle specifických požadavků poměrně rychle a levně i v průměrně vybavené

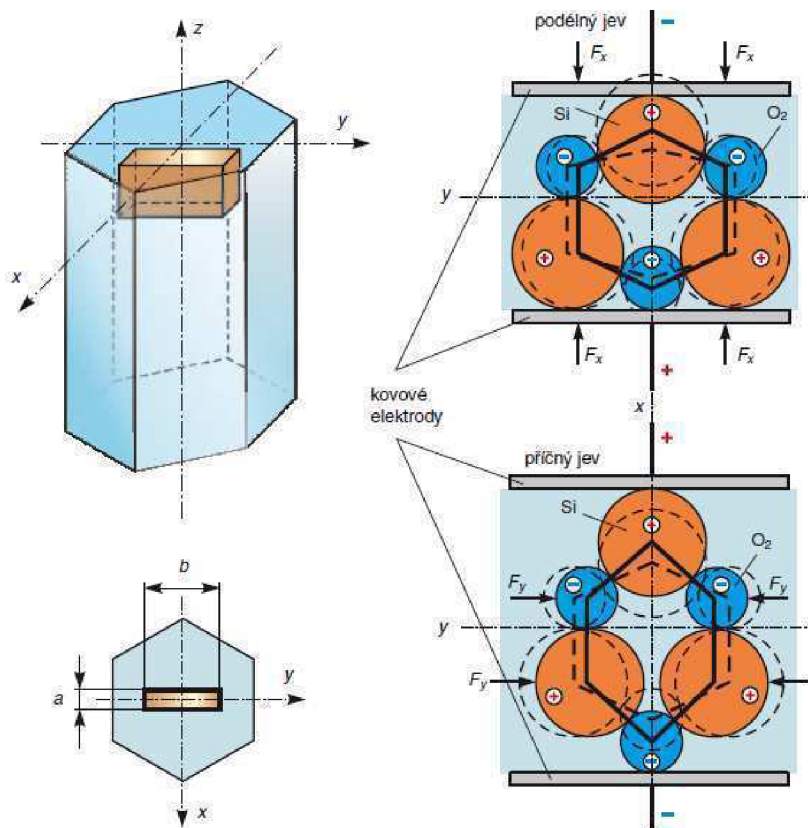
dílně a pokud se dodrží zásady aplikace odporových snímačů (tenzometrů) mají vynikající stabilitu měření.

2.1.2 Piezoelektrické siloměry

Metoda využívající piezoelektrické krystaly k měření sil je jedna z nejstarších a nachází široké uplatnění ve snímačích, které měří rázové děje nebo obecně s proměnlivými průběhy v trvání řádu mikrosekund. "Piezosiloměry" jsou co, se týče kmitočtu, srovnatelné s tenzometrickými, ale dávají vyšší napětí na výstupu.

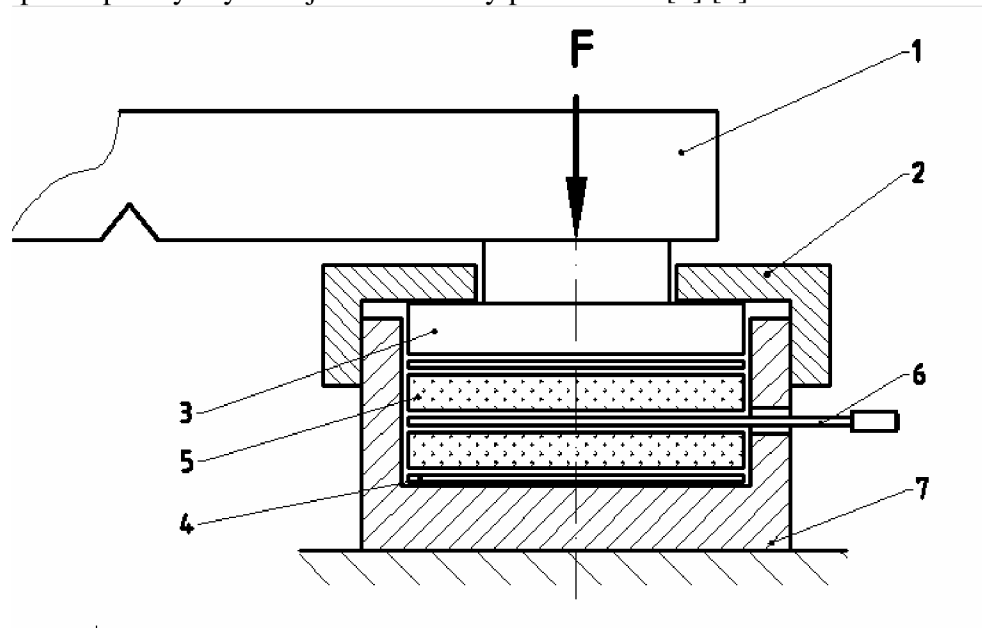
Metoda je založena na piezoelektrickém jevu, který spočívá v tom, že uvnitř krystalických dielektrik s asymetrickou krystalickou strukturou vzniká vlivem mechanické deformace elektrická polarizace. Deformací se ionty opačných nábojů posunou v krystalové mřížce tak, že elektrická těžiště záporných a kladných iontů, která v nezdeformovaném krystalu souhlasí, se od sebe vzdálí a na plochách krystalu se objeví zdánlivé elektrické náboje, které v přiložených elektrodách vážou nebo uvolňují náboje skutečné obr.2.8. Napětí na elektrodách mizí, pokud deformace zanikne. Nejpoužívanější materiál na výrobu je křemen (SiO_2), který se vyznačuje vysokou tuhostí a deformace jeho krystalu při měření se pohybuje v řádech několika mikrometrů. Používají se i některé druhy keramických a polykrystalických materiálů. Například čidla na bázi piezoelektrické keramiky (BaTiO_3) jsou až 10x citlivější než křemenné, ale mají nižší dovolenou pracovní teplotu (cca 200°C).

Výhody těchto snímačů jsou především jejich malé rozměry, jednoduchost a lineární charakteristika výstupu, jelikož mají vestavěný kompenzátor parazitního působení vibrací. Mohou taky pracovat za zvýšených teplot (až 500°C).



Obr.2.8 Znáornění piezoelektrického jevu [3].

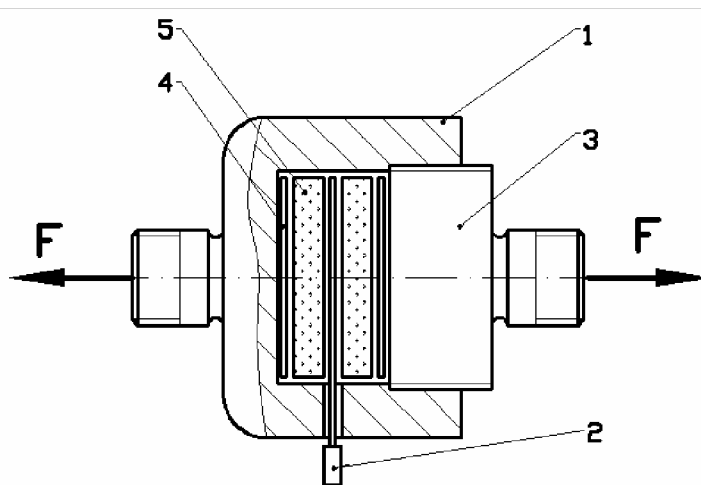
Ukázka konstrukce piezoelektrického siloměru pro tlakovou sílu je na obr.2.9. Jde o siloměr používaný k měření dopadové síly Charpyho kladiva při zkoušce vrubové houževnatosti. Zkušební vzorek 1 je jedním koncem opřen o pevnou podpěru a druhý konec je opřen o přenosný člen (víčko) siloměru. Objímka 2 pevně stahuje tlumící vložky 4 vyrobené z olověného plechu a krystaly 5. Vytváří tak předpětí a brání prasknutí křehkých krystalů při rázu. Měkká, stříbrná vložka 6, vložená mezi krystaly, slouží zároveň jako „živý“ přívod. Opačné plošky krystalů jsou uzemněny přes kostru. [3] [4]



Obr.2.9 Tlakový piezoelektrický siloměr. [2]

1- vzorek, 2- objímka, 3- přenosový člen (víčko), 4- tlumící vložky,
5- krystaly, 6- stříbrná vložka, 7- tělo siloměru

Princip zařízení se dá obrátit, jak ukazuje obrázek 2.10 a použit k měření tahových sil. Přenosový člen 3 se našroubuje do těla siloměru 1 a jeho dotažením se v krystalech vyvolá předpětí, které je rovné maximální dovolené síle pro stlačení krystalů 5. Tahovou silou se pak zmenšuje napětí v krystalech a to se projeví nábojem opačné polarity.



Obr.2.10 Tahový piezoelektrický siloměr. [2]

1- tělo siloměru, 2- stříbrná vložka, 3- přenosový člen (víčko),
4- tlumící vložky, 5- krystaly

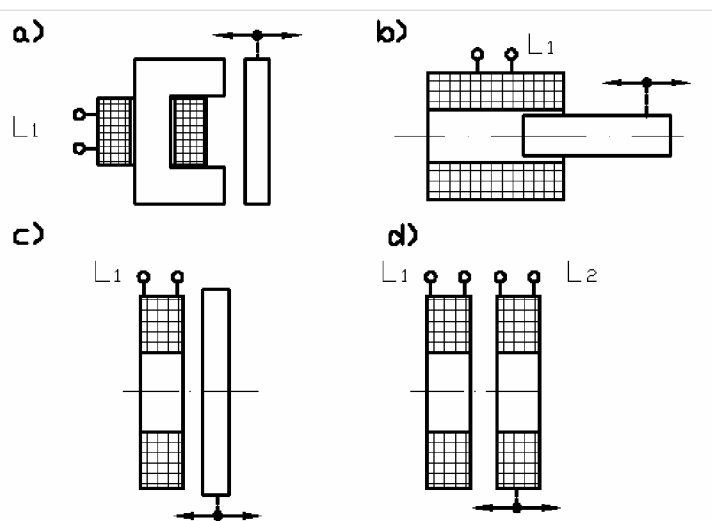
Na výstupech z obou variant dostaneme, nezávisle na polaritě, napětí úměrné zatěžující síle. V obou případech však dochází k tečení měkkých vložek pod krystaly a je tedy nutné kontrolovat a upravovat předpětí v zařízení.

2.1.3 Indukční siloměry

Podobně jako tenzometrické siloměry, potřebují i tyto přenosný (deformační) člen a indukčním snímačem se při zatížení měří jeho deformace. Indukční snímač se skládá z cívky nebo soustavy cívek a jádra, které může být buď feromagnetické nebo neferomagnetické elektricky vodivé. Jedna z těchto částí je spojena s deformačním členem a vlivem jeho deformace dochází k jejich vzájemnému posunutí nebo změně jejich elektrických vlastností. Velikost indukčnosti cívky závisí na počtu jejích závitů, rozměrech a vlastnostech jádra (magnetických a elektrických) a na rozměrech cívky. Změnou těchto veličin v závislosti na deformaci deformačního členu se mění indukčnost cívky. Aby byl výstupní signál dostačující, je nutné vyvodit deformaci minimálně 10^{-1} mm až 1 mm, s menší deformací pracují jenom speciální přístroje. Podle principu funkce se indukční snímače dělí do čtyř hlavních skupin :

- snímač s malou vzduchovou mezerou
- snímač s otevřeným magnetickým obvodem
- snímač s potlačeným polem
- snímač bez feromagnetika

Schematické znázornění je na obrázku 2.11.



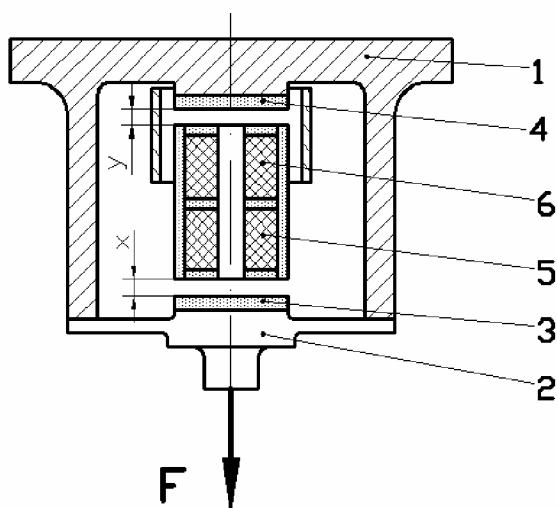
Obr.2.11 Základní typy indukčních snímačů. [4]

- a) s malou vzduchovou mezerou, b) s otevřeným magnetickým obvodem,
c) s potlačeným polem, d) bez feromagnetika

Pro měření sil se využívají snímače s malou vzduchovou mezerou a snímače s otevřeným magnetickým obvodem. Kmitočtový rozsah snímače je dán kmitočtem napájecího proudu, což je 5 až 8 kHz, ale použitím běžných feritových materiálů na jádra cívek lze zvýšit až na 50 kHz. Snímače se zapojují do mostového zapojení. Pro spojení snímače a měřicího přístroje (např. osciloskop) je nutné použít velmi kvalitní kabely a precizní stínění vlastního snímače, z důvodu rušivých signálů z vnějších zdrojů.

Na obr. 2.12 je schematicky znázorněn indukční siloměr pro měření malých sil. Deformačním členem je zde membrána 2, která je působící silou deformována a mění se tak

mezera x mezi kotoučem 3 a cívkou 5. Mezi cívkou 6 a kotoučem 4 je mezera y , která se však nemění a tím dojde k rozladění mostu, do kterého jsou obě cívky zapojeny a signál na výstupu je úměrný zatěžující síle F . Kotouče 3 a 4 jsou vyrobeny z magneticky měkkého materiálu. Seřízení snímače před měřením se provádí změnou velikosti mezery y . [2][4]



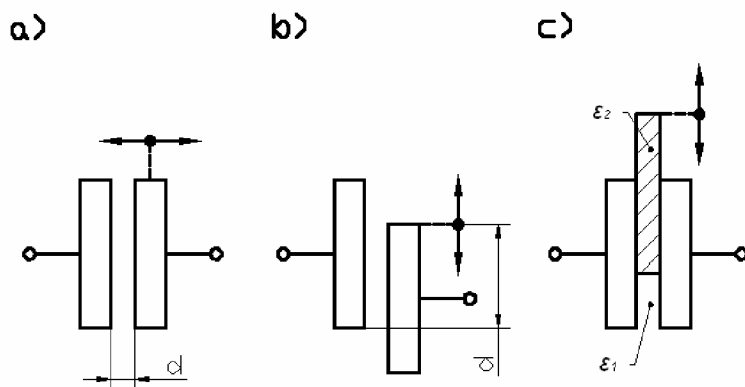
Obr.2.12 Membránový indukční siloměr pro měření malých sil. [2]
 1-tělo, 2- membrána, 3,4- kotouče z magneticky měkkého materiálu,
 5,6- cívky o indukčnosti L_1 a L_2

2.1.4 Kapacitní siloměry

Stejně jako předchozí, skládají se i tyto siloměry z deformačního a měřícího členu. V tomto případě je měřícím členem kapacitní snímač založený na principu jednoduchého rovinného (deskového) kondenzátoru o kapacitě C . Velikost kapacity je závislá na ploše elektrod S , vzdálenosti mezi nimi d a na vlastnostech (permitivitě) dielektrika mezi elektrodami. Podle funkce se kap. snímače dělí do tří hlavních skupin:

- mezerové (mění se velikost mezery)
- překrývací (mění se plocha elektrod)
- s proměnnou permitivitou ϵ_2 dielektrika

Schematické znázornění je na obr.2.13.

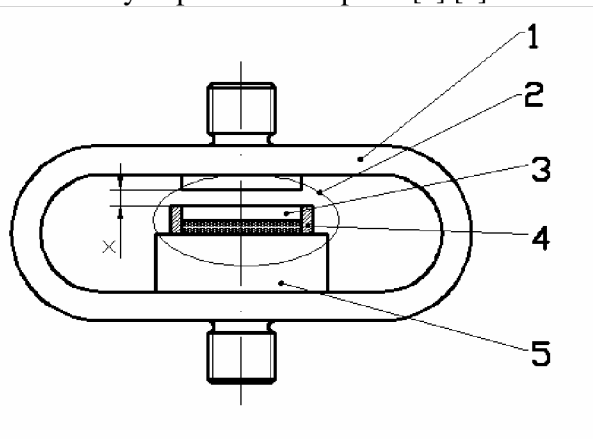


Obr.2.13 Základní principy funkce kapacitních snímačů. [4]
 a) mezerový, b) překrývací, c) s proměnnou permitivitou

Pro měření tlakových sil se používají mezerové snímací prvky, kde se vlivem deformace deformačního členu mění velikost mezery mezi elektrodami a tedy kapacita vlastního snímače, která odpovídá zatěžující síle. Jak už bylo řečeno, kapacita snímače je závislá, mimo jiného, na rozměrech snímače a proto je nutné dbát, aby při měření nedocházelo ke změnám teploty okolí, jelikož jednotlivé části snímače jsou vyrobeny z různých materiálů a mají tudíž různé součinitele teplotní roztažnosti, což by mohlo způsobit značné chyby měření. Vliv teploty jde částečně eliminovat správnou volbou geometrie elektrod v závislosti na součinitelích teplotních roztažností a chybu tak částečně odstranit.

Citlivost kapacitních snímačů je srovnatelná s ostatními pasivními snímači. Výhodami použití těchto siloměrů je jednoduchá konstrukce, montáž i obsluha, dále časová stálost a nulový vliv rušivých magnetických polí na funkci snímače.

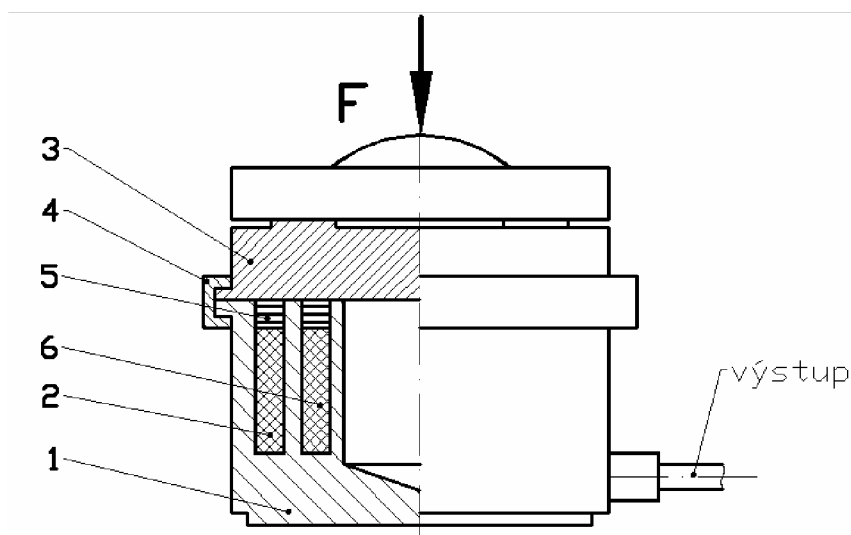
Funkce kapacitního siloměru je schematicky znázorněna na obr.2.14. Na deformační člen 1, který má v tomto případě tvar „Wazau“ je připevněn kapacitní snímač 2 s živou elektrodou 3. Tato elektroda je zalita do polystyrenu nebo dentakrylu a stíněna krytem 4. Funkci druhé elektrody kondenzátoru má ploška na horní části třmene deformačního členu. Tento „kondenzátor“ je součástí kmitavého obvodu oscilátoru 5 s kmitočtem 2 až 5 MHz. Vlivem deformace při zatížení se změní velikost mezery x a tím pádem i kapacita kondenzátoru. Změna kapacity způsobí přeladění oscilátoru na jiný kmitočet. Tato změna se převede na výstupní signál měřený např. osciloskopem. [2] [4]



Obr.2.14 Schéma kapacitního siloměru. [2]
 1-deformační člen, 2-kapacitní snímač, 3- živá elektroda, 4- stínící kryt, 5- oscilátor

2.1.5 Siloměry s magnetoelastickými snímači

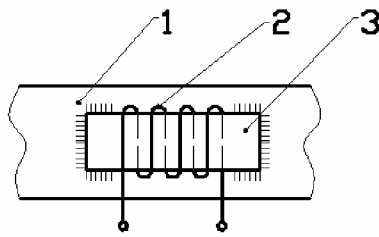
Magnetoelastické snímače jsou tvořeny uzavřeným magnetickým obvodem (deformační člen), který využívá změny magnetických vlastností (permeability) feromagnetika při jeho deformaci. Vlivem této změny se mění impedance celého obvodu a indukčnost cívky. Pokud je použito více cívek mění se jejich vzájemná indukčnost. Jako materiál snímačů se využívá Permaloyová slitina s 78,5% Ni [4]. Pro běžné použití, i když s menší citlivostí, je možné snímače vyrobit i z obyčejného měkkého železa. Výhodou je, že pro malé deformace je závislost *síla-deformace* téměř lineární. Konstrukční řešení takového snímače je na obr.2.15. Vinutí snímače 2 je uloženo v magnetickém obvodu 1, vyrobeného např. ze slitiny Permaloy G (78,5% Ni). Horní kryt 3 je spojen s magnetickým obvodem nalisovanou objímkou 4 a kroužky 5 uzavírají obvod magnetického toku. Vnitřní vnutí 6 slouží k vyrovnání vlivu okolních teplot na snímač. Tyto snímače mohou měřit zatížení v rozsahu od 0 až do 10 MN tlakové síly a výhodou je, že ani 100%-tní přetížení snímač nepoškodí.



Obr.2.15 Schéma magnetoelastického snímače. [4]

1- magnetický obvod (deformační člen), 2- vinutí snímače, 3- kryt,
4- objímka, 5- kroužky, 6- vnitřní vnutí

Magnetoelastické vlastnosti jsou také využívány u magnetoelastických tenzometrů (tzv. lístkové snímače) obr.2.16. Tyto tenzometry jsou vhodné pro dynamický provoz až do 10 kHz a jsou vhodnou náhradou odporových tenzometrů (kap. 2.2.1) do obzvláště náročných podmínek. Délka a šířka těchto snímačů bývají 10 až 15 mm a tloušťka 0,1 až 0,3 mm. Jejich instalace je podobná jako u klasických odporových tenzometrů. [4]

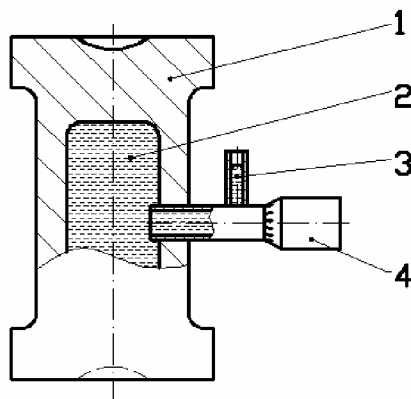


Obr.2.16 Příklad magnetoelastického tenzometru. [4]

1- deformační člen, 2- vinutí tenzometru, 3- proužek z magnetoel. materiálu

2.1.6 Mechanické siloměry

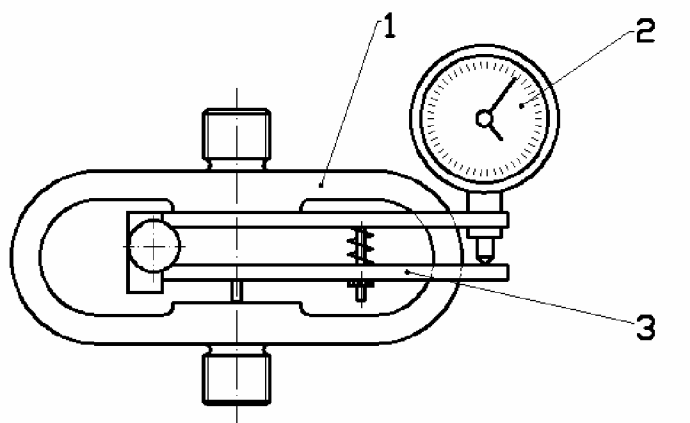
Také u tohoto typu siloměrů se zatěžující síla zjišťuje na základě deformace přenosového členu. Mechanických systémů se většinou využívá při cejchování elektronických siloměrů, jelikož mají vysokou stálost a přesnost, ale postrádají všestrannost a kmitočtové charakteristiky elektroniky. Na obr.2.17 je schematicky znázorněn Amslerův mechanický siloměr. Deformační člen 1 je naplněn rtuť 2, která je při jeho zatížení vlivem zmenšení vnitřního objemu vytlačena do indikační kapiláry 3. Pomocí mikrometrického šroubu 4 se zvětší objem měřící dutiny a podle hodnoty na mikrometrické stupnici se z tabulek určí velikost zatěžující síly. Nevýhodou je, že vlivem teplotní roztažnosti mohou být při nesprávné manipulaci měření (např. bez rukavic) naměřené hodnoty nepoužitelné.



Obr.2.17 Schéma rtuťového siloměru [2]

1- deformační člen, 2- rtuť, 3- indikační kapilára s rýskou,
4- mikrometrický šroub

Mechanický siloměr fy. Wazau (obr2.18) využívá k měření deformace přenosového členu 1 setinového úchylkoměru 2. Pro zvětšení a tudíž lepší měření malých deformací je úchylkoměr umístěn na pákový systém 3. V tomto případě je nutně dodržet vysokou kvalitu materiálu deformačního členu, jeho dokonalé tepelné zpracování a vysokou kvalitu všech dosedacích ploch mezi jednotlivými částmi siloměru. [2] [4]



Obr.2.18 Schéma mechanického siloměru „Wazau“. [2]
1- deformační člen, 2- úchylkoměr, 3- pákový systém

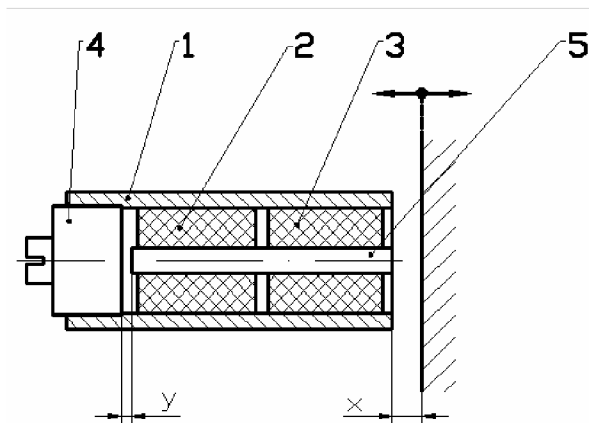
2.2 Měření dráhy

Další veličinou nutnou pro správný a přesný popis tvářecích postupů je dráha nástroje, při dané tvářecí operaci. Taky by se dalo mluvit o deformaci materiálu způsobenou daným nástrojem. Jedná se samozřejmě o měření činné délky dráhy, tzv. od počátku do konce deformace materiálu zkušebního vzorku nebo tvářeného polotovaru.

Snímače dráhy jsou založeny na podobných principech jako snímače pro měření sil, popsané v předešlé kapitole. Mezi nejpoužívanější patří v dnešní době optické, magnetické nebo magnetostrikční. Mechanická zařízení se už moc nevyužívají.

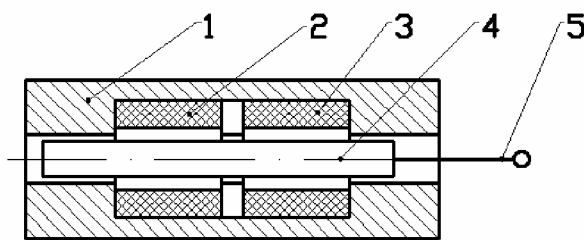
2.2.1 Indukční snímače dráhy

Pro měření dráhy se využívají dva principy indukčních snímačů, s malou vzduchovou mezerou a snímače s otevřeným magnetickým obvodem, viz. kap. 2.2.3. Pro měření krátkých drah (deformací) od 0,1 mm do 1mm je to snímač s malou vzduchovou mezerou, obr.2.19. Snímač se skládá ze dvou cívek, jedné měřicí 2 a druhé 3, pro hrubé vyvážení (seřízení) snímače podle měřené mezery x . Seřízení se provádí dolad'ovacím členem 4, kterým se mění velikost mezery y . Jde o typ tzv. bezdotykového snímače, který nijak neovlivňuje pohyb měřeného členu.



Obr.2.19 Bezdotykový indukční snímač krátké dráhy (deformace). [2]
1-plášť, 2,3- cívky, 4- doladřovací řlen, 5- jádro

Pro snímání větších délek drah nástrojů od několika až po stovky milimetrů se používají snímače s otevřeným magnetickým obvodem. Jde o snímače označované jako LVDT (Linear Variable Differential Transformer) obr.2.20. Uvnitř plášť 1 jsou uloženy dvě stejné cívky 2 a 3 zapojené do můstku. Posunem jádra 4 s pólovými nastavci na obou koncích se mění plocha, kterou protéká magnetický tok a to vede ke změně indukčnosti, která je stejná u obou cívek, ale s různými znaménky. Toto tzv. diferenciální zapojení má dvojnásobnou citlivost než při použití jedné cívky. Jádro je táhlem 5 spojeno s měřeným objektem jednoduchými úchytkami, stejně jako plášť s nepohyblivou částí stroje. Jádro má sice nízkou hmotnost, ale při měření je nutné uvažovat se setrvačnými silami, kterými pohybující se jádro působí na měřené součásti. Mohly by totiž ovlivnit pohyb měřeného elementu. [2] [4]

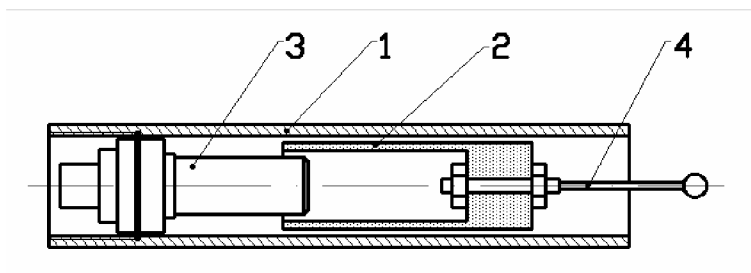


Obr.2.20 Schéma LVDT snímače dráhy. [2]
1- plášť, 2,3- cívky, 4- jádro, 5- táhlo

2.2.2 Kapacitní snímače dráhy

Jak bylo popsáno v kap.2.1.4, kapacitu kondenzátoru lze měnit například změnou ploch elektrod nebo druhem a tloušťkou dielektrika. Pomocí změny tloušťky dielektrika se měří dráhy v řádech 10^{-1} mm, jde o kapacitní tlakoměry s membránou. Tlak vyvolaný v kapalině, vlivem posunu měřeného řleny, deformuje membránu a její průhyb zmenší výšku vzduchové mezery, což způsobí změnu kapacity kondenzátoru (snímače). Pro měření drah až 400 mm se používají snímače s proměnnou plochou elektrod v kombinaci se změnou permitivity dielektrika. Schéma takového snímače je na obrázku 2.21. Plášť snímače 1 slouží jako zemnicí elektroda, vedení posuvného dielektrického řleny 2 a zároveň i jako stínění snímače. Živá elektroda 3 je nepohyblivá a její aktivní část má délku požadované měřené dráhy

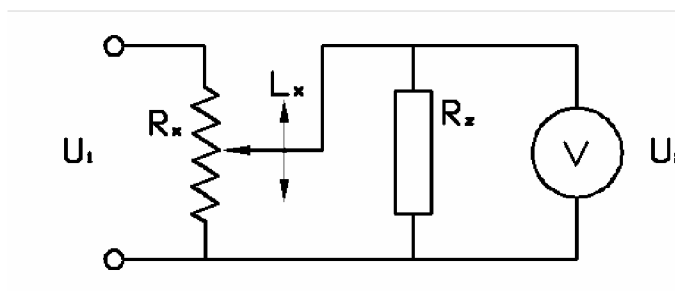
zvětšenou o přídavek na vyloučení vlivu rozptylové (koncové) části snímače, kde už neplatí lineární závislost mezi posunutím a změnou kapacity.



Obr.2.21 Schéma kapacitního snímače dráhy. [2]
1- plášť, 2- posuvné dielektrikum, 3- živá elektroda, 4- táhlo

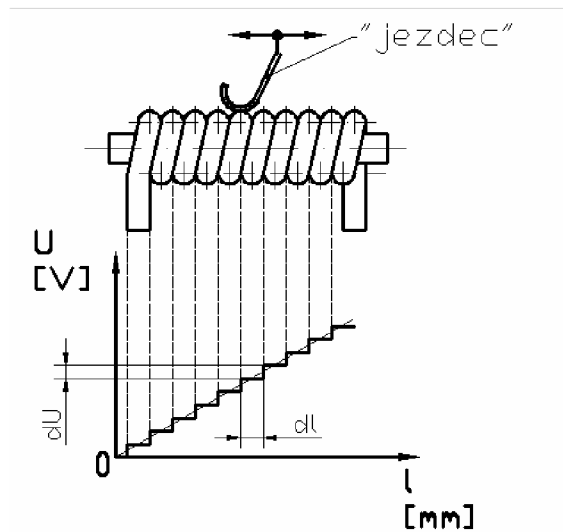
2.2.3 Odporové snímače dráhy

Tyto snímače slouží k měření drah s délkou až do 600mm a pracují na principu lineárních potenciometrů. Jde o odporový prvek, drát nebo vinutý rezistor z odporového drátu, po kterém se pohybuje jezdec. Jezdec je pevně spojen s měřenou částí stroje a při jeho posunutí se mění výstupní napětí obvodu. Schéma el. zapojení je na obr.2.22.



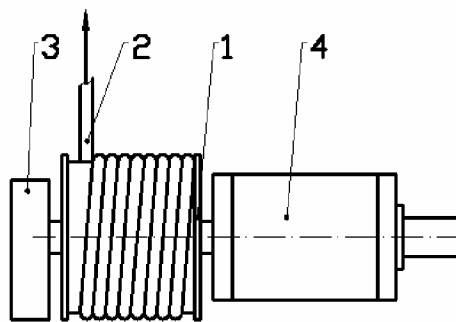
Obr.2.22 Schéma potenciometrického snímače dráhy. [5]
V- voltmetr, Rz- zatěžující odpor, Rx- odpor potenciometru,
U₁– napájecí napětí, U₂ –měřené napětí

Nevýhodou potenciometrů s vinutým odporem je skokový průběh signálu obr.2.23, jelikož jezdec nevyužívá celou délku odporového drátu ale „přeskakuje“po jednotlivých závitech a je potřeba průběh signálu upravit. Další nevýhodou je rychlé opotřebení jednotlivých členů (odpor, jezdec), které vede k postupnému znehodnocení měření.[5]



Obr.2.23 Průběh výstupního napětí reálného potenciometru. [5]

Dalším typem odporového snímače dráhy je lankový mechanismus se spirálovým potenciometrem. Na buben je v jedné vrstvě namotáno, závit vedle závit, přesně kalibrované nerezové lanko. Při odvíjení se rotačními senzory nebo potenciometrem měří úhlový pohyb bubnu a z něj se určí vzdálenost sledovaného objektu. Lanko je napínáno pérovým motorem nebo pružinou (při krátkých posuvech) viz. obr.2.24, aby nedocházelo k jeho průvěsu. Jde o snímače velkých vzdáleností až 60m s rychlostí pohybu do 20m/s.



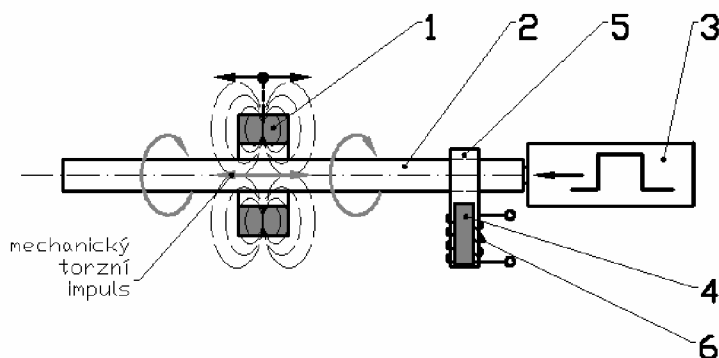
Obr.2.24 Snímač dráhy s lankem. [8]

1- buben 2- kalibrované lanko, 3- pružinový motor, 4- potenciometr

2.2.4 Magnetostrikční snímače dráhy a rychlosti

V dnešní době se dává přednost takzvaným bezdotykovým snímačům. Nedochází u nich k opotřebení součástí, které se přímo podílí na měření. U tohoto typu zařízení jde o posuvný budící magnet. Princip magnetostrikčního snímače je založen na dvou magnetomechanických jevech ve feromag. materiálu a na přesném měření šíření torzního impulsu (ultrazvukové vlny). Tyto jevy jsou Wiedemanův - magnetostrikční a Villariho - magnetoelastický. Wiedemanův jev spočívá v tom, že pokud tenkou dlouhou tyčí z feromagnetika prochází proud a je umístěna do podélného magnetického pole, namáhá se tyč krutem. To způsobí podélnou deformaci v tyči a podle Villariho magnetoelastického jevu se změní magnetické vlastnosti (permeabilita) feromagnetické tyče.

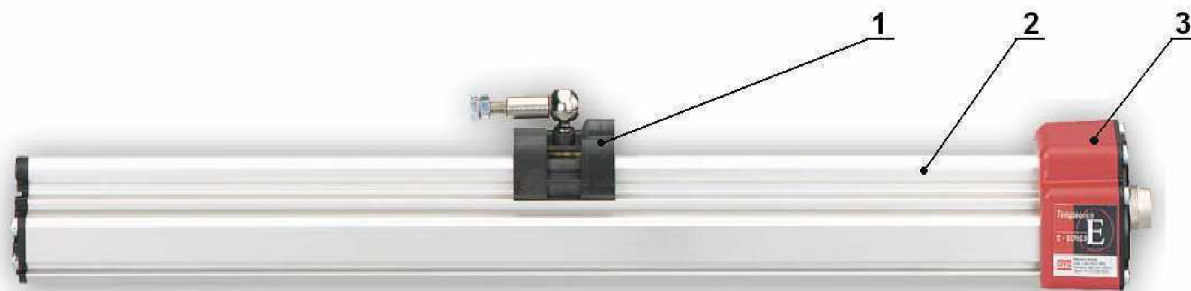
Princip funkce je zobrazen na obr.2.25. Základními částmi jsou tyčový feromagnetický měřící prvek – vlnovod 2, který vede torzní ultrazvukovou vlnu k měniči impulsu a posuvný permanentní magnet 1, který vytváří na vlnovodu podélnou magnetickou vlnu. Tento posuvný prvek je pak vhodně spojen s měřeným objektem. Elektronika senzoru 3 vysílá do vlnovodu krátké proudové impulzy, které vytváří proměnné magnetické radiální pole šířící se podél vlnovodu spolu s proudovými impulzy rychlostí zvuku. V místě setkání tohoto radiálního magnetického pole s podélným magnetickým polem pracovního magnetu 1 vznikne, podle Wiedemanova jevu, mechanická torzní deformace vlnovodu. Vzniklý torzní pulz se šíří vlnovodem na obě strany až k jeho okrajům. Na volném konci tyče je pulz utlučen aby neovlivňoval při odrazu měření. Na druhém konci je tento pulz zachycen speciálním měničem torzních impulzů. Ten se skládá z magnetostrikčního kovového pásku 5 spojeného s vlnovodem, indukční cívky 6 a permanentního magnetu 4. Dle Villaryho jevu způsobí torzní vlna v kovovém pásku změnu permeability, což se projeví časovou změnou magnetického pole magnetu 4, které v cívce indukuje elektrický impulz. Vzdálenost mezi snímací cívkou a pohyblivým magnetem popř. i jeho rychlost se určí z doby, která uplyne od vyslání budícího proudového impulzu a vznikem elektrického impulzu indukovaného v cívce. [6]



Obr.2.25 Princip magnetostrikčního snímače dráhy. [6]

1- permanentní pracovní magnet, 2- vlnovod, 3- elektronika senzoru,
4- permanentní pevný magnet, 5- kovový pásek, 6- snímací cívka

Na obrázku 2.26. je ukázka reálného snímače fy. MTS Sensors Group, kde vlnovod je uložen v ochranném těle přístroje a po něm se volně suvně pohybuje pouzdro s pracovním magnetem.



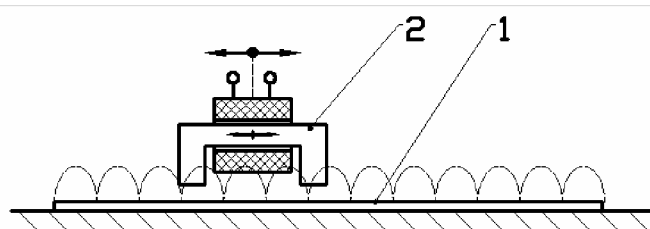
Obr.2.26 Lineární snímač polohy - Temposonics EP.[7]

1- pouzdro s pracovním magnetem, 2- tělo přístroje, 3- elektronika snímače

U nejpřesnějších zařízení je možné dosáhnout rozlišitelnosti v řádech $1\mu\text{m}$ při nelinearitě menší než $0,01\%$ a reprodukovatelnosti $0,001\%$ a jak už bylo řečeno jsou schopné měření nejenom polohy ale i rychlosti strojních součástí, přičemž se dá měřit v rozsahu i několik metrů (záleží na délce vlnovodu). Magnetostrikční snímače dráhy mají široké možnosti použití jak vzhledem ke své přesnosti, životnosti (i ve velmi nepříznivých pracovních podmínkách), tak i díky své univerzálnosti použití na různých strojních zařízeních, jako jsou válcovací stolice, lisy nebo stroje na vstřikování plastů aj.

2.2.5 Snímače dráhy s magnetickým páskem – magnetické měřítko

Jde opět o bezkontaktní způsob měření s vysokým rozlišením, pro dráhy velkých délek (i několik desítek metrů). Zařízení se skládá z měřicí hlavy a ocelového pásku, na kterém je nanášena magnetická vrstva. Tato vrstva je zmagnetizována severními a jižními póly, které jsou v pravidelných intervalech po celé její délce. Z důvodu ochrany této vrstvy před poškozením, je přes ni nalaminován ochranný nerezový pásek. Magnetický pásek je většinou přilepen nebo přichycen montážními lištami a snímací hlava, upevněná na měřené součásti, se pohybuje ve vzdálenosti do 2 mm nad (od) pásku a snímá magnetické sinusové pole nad páskem. Tak určí svou polohu. Pro snímání magnetického záznamu se většinou využívá principu změny magnetické indukce, obr.2.27. Velikost indukovaného napětí je přímo úměrná rychlosti s jakou se snímací hlava pohybuje. Při malých rychlostech posuvu se indukované napětí blíží nule. Z tohoto důvodu se relativní pohyb mezi snímací hlavou a magnetickým páskem vyvodí kmitáním, např. piezoelektrickým pohonem. Přesnost těchto snímačů je standardně až $5\mu\text{m}$. Snímače jsou necitlivé na znečištění a nedochází u nich k opotřebení funkčních částí, proto mají dlouhou životnost i v náročných pracovních podmínkách. [8] [4]



Obr.2.27 Princip snímání magnetického měřítka. [8]
1- pásek se záznamem, 2- snímací hlava



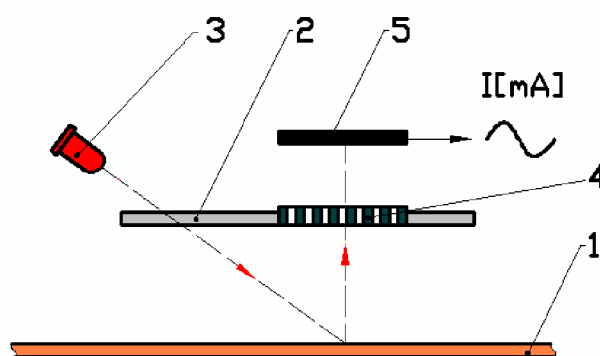
Obr.2.28 Snímač POSIMAG fy. ASM se znázorněným magnetickým záznamem.[8]

2.2.6 Optické snímače dráhy – moderní řešení

Základem klasického optického snímače je optický paprsek odrážející se nebo procházející přes stupnici vytvořenou na měřítku. Tento paprsek projde přes masku se stupnicí s identickým dělením a dopadá na fotodiody generující elektrický signál. Na masce jsou políčka se čtyřmi stupnicemi, které jsou vzájemně fázově posunuté. Při pohybu pravítka proti masce tak vzniká dvojice signálů, sinusového typu, které jsou vzájemně fázově posunuty o 90° , s periodou úměrnou dělení stupnice. Pomocí těchto signálů určíme směr pohybu i délku dráhy. I přes precizní výrobu všech komponentů mají tyto snímače omezené možnosti a nevýhody. Základní nedostatky jsou např. různá délková roztažnost stupnice a zařízení na kterém je umístěna, vzdálenost čtecí hlavy od měřítka, při které difrakce (ohyb) paprsků znemožní její správnou funkci a v neposlední řadě prašnost prostředí, nečistoty nebo mechanické poškození měřítka.

Nové řešení firmy Renishaw tyto konstrukční nedostatky eliminuje a tím rozšiřuje možnosti použití optického snímání. Princip tohoto řešení je zobrazen na obr.2.29. Měřítko je na tenké kovové pásce s relativně malou tuhostí ale vynikající podélnou stabilitou. Měřítko se přilepí přímo na vedení nebo základ stroje a jeho konce se zajistí epoxidem. Pokud je vedení (základ) dělené je měřítko uloženo v nosiči a jde tak v případě potřeby demontovat. Tímto spojením je měřítko „vnucen“ koeficient teplotní roztažnosti podkladu (např. vedení stroje) a přesnost měření závisí pouze na přesnosti výroby fazetové stupnice pokovené zlatem. Linearita stupnice je srovnatelná s klasickými optickými měřítky, u kterých je $3 \mu\text{m}/\text{m}$. Infračervená LED dioda s periodou $20 \mu\text{m}$ osvětluje řadu fazet na měřítku. Odražené světlo jde přes difrakční mřížku na pole fotodetektorů. Je tedy nutná dostatečná vzdálenost od měřítka k difrakční mřížce a zároveň mezi difrakční mřížkou a fotodetektozem. Ze světla odraženého fazetami stupnice, se po průchodu mřížkou vytvoří na fotodetektoru difrakční obrazec s čistým sinusovým průběhem intenzity světla. Fotodetektor optický signál převede na elektrický a ten je po zesílení veden z hlavice buď jako digitální nebo analogový výstupní signál.

Rozlišení snímače je na běžné stupnici (s periodou $20 \mu\text{m}$ od $5 \mu\text{m}$) až do 50 nm (a s interním interpolátorem až 10 nm) a cyklická chyba je $0,15 \mu\text{m}$ nebo i menší, nezávisle na vzdálenosti čtecí hlavy a čistotě či poškození stupnice (díky optické filtraci signálu odraženého od měřítka). [9]



Obr.2.29 Princip optického snímače dráhy Renishaw. [9]
1- měřítko se stupnicí, 2-čtecí hlava, 3- LED (zdroj paprsku),
4- difrakční mřížka, 5- fotodetektor

2.3 Měření rychlosti

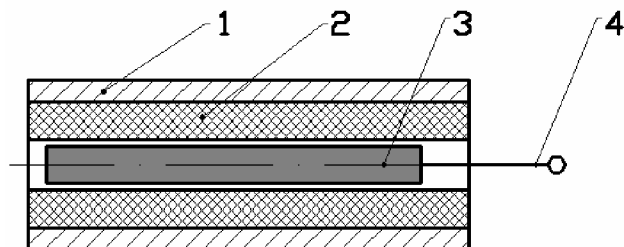
Rychlost nástrojů nebo pohyblivých částí strojů (beran, vyhazovače,...) lze měřit několika způsoby. Snímače rychlosti jsou většinou založeny na stejných principech jako při měření síly nebo dráhy (polohy). Jde především o snímače indukční, kapacitní nebo magnetostrikční (kap. 2.3.4). Principy funkce jednotlivých zařízení jsou popsány v předešlých kapitolách, proto zde uvádím jenom schémata jednotlivých zařízení, popřípadě použití.

2.3.1 Indukční snímače rychlosti

Jde o přímé měření rychlosti, založené na principu magnetické indukce. Pro měření rychlosti se vychází z rovnice

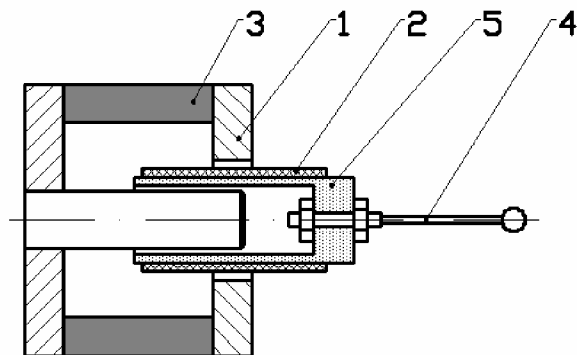
$$u = B.l.v \quad , \quad (2)$$

kde u je napětí na vodiči, B je indukce pole, l je délka vodiče a v je rychlost pohybu vodiče. Snímač je tedy realizován tak že se pohybuje magnet v cívce nebo cívka v magnetickém poli (obr.2.31). V první variantě (obr.2.30), pohyblivý magnet indukuje v cívce napětí podle uvedené rovnice. Vinutí cívky by nemělo být silnější než 2 mm, jelikož pak klesá indukce magnetického pole, i když počet závitů protínající magnetické pole je vyšší. Nevýhodou této varianty je vyšší hmotnost magnetického jádra a tím pádem velké setrvačné síly, které můžou ovlivnit chování měřených součástí.



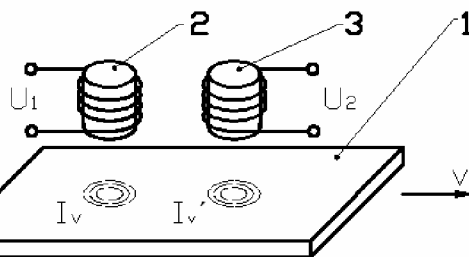
Obr.2.30 Snímač rychlosti s pohyblivým magnetem. [2]
1- plášť, 2- vinutí cívky, 3-pohyblivý magnet, 4- táhlo

Druhá varianta s pohyblivou cívkou je vhodnější, jelikož hmotnost cívky a tedy i velikost setrvačných sil, je oproti magnetu podstatně nižší. Schéma je znázorněno na obrázku 2.31. Většinou je dostačující vinutí ve dvou 2 vrstvách.



Obr.2.31 Snímač rychlosti s pohyblivou cívkou. [2]
1- tělo, 2- vinutí cívky, 3- magnet, 4- táhlo, 5- jádro cívky

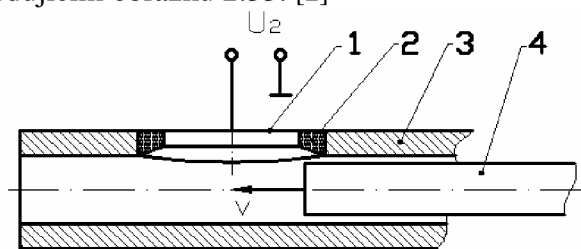
Na obr.2.32 je princip indukčního snímače přímočaré rychlosti se dvěma cívkami. Nad elektricky vodivou tenkou deskou 1 je umístěna budící cívka 2 a měřicí cívka 3. Budící cívka je připojena na střídavé napětí U_1 . Magnetický tok budící cívky indukuje na desce vířivé proudy I_v a v měřicí cívce střídavé napětí. Při pohybu desky rychlostí v , se vířivé proudy přesunou do polohy pod měřicí cívku, na které vznikne dodatečné napětí U_2 . [2]



Obr.2.32 Indukční snímač přímočaré rychlosti. [4]
1- vodivá deska, 2- budící cívka, 3- měřicí cívka, I_v - vířivý proud, v - rychlost pohybu,

2.3.2 Kapacitní snímače rychlosti

U kapacitního snímače se rychlost určí derivací průběhu dráhy v závislosti na čase. Průběh dráhy změří osciloskop při průletu projektilu 4 hlavní 3 pomocí měřicí elektrody 1. Schéma snímače je na následujícím obrázku 2.33. [2]



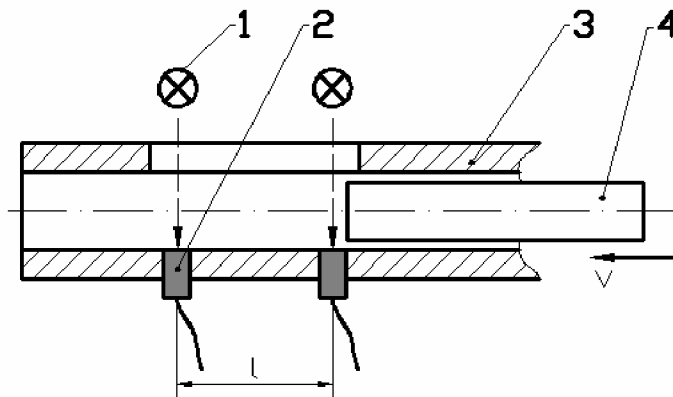
Obr.2.33 Schéma kapacitního snímače rychlosti. [2]
1- měřicí elektroda, 2- izolace, 3- hlaveň, 4- projektil, v - rychlost pohybu

2.3.3 Fotodiodové snímání rychlosti průletu

Tato metoda se používá např. v Laboratoři vysokých rychlostí deformace na VUT v Brně k měření dopadové rychlosti razníku při Hopkinsonově testu. Jde o jednoduchý princip, kdy se změří čas průletu razníku mezi fotodiodami a rychlost v se vypočítá ze vzorce

$$v = \frac{l}{t} \text{ [m/s]} , \quad (3)$$

kde l je vzdálenost fotodiod (daná konstrukcí rychloměru) a t je doba průletu. Princip je naznačen na obr.2.34.



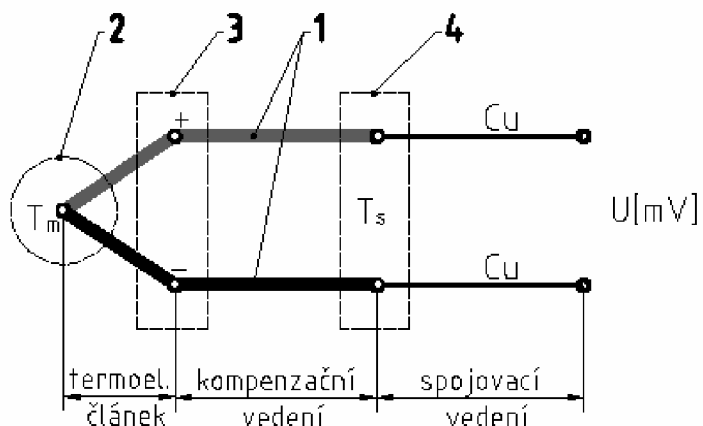
Obr.2.34 Princip fotodiodového měření rychlosti projektilu.
1- zdroj světla, 2- fotodiody, 3- hlaveň, 4- projektil

2.4 Měření teploty

Měření vnitřní teploty tuhých těles vyžaduje vyvrtání díry pro instalaci daného teplotního snímače. Toto však může způsobit narušení mechanických vlastností jeho konstrukce. Z tohoto důvodu se teploty měří většinou jenom na povrchu daných předmětů. Při tváření kovů lze měření teploty realizovat dotykovými termoelektrickými teploměry nebo bezdotykovými teploměry jako jsou pyrometry, infračervené termočlánky a speciálními teploměry (např. termovizními).

2.4.1 Termoelektrické teploměry

Princip těchto teploměrů je založen na Seebeckově jevu, tj. na jevu převodu tepelné energie na elektrickou. Pokud spojíme dva vodiče z různých kovů do uzavřeného obvodu a umístíme oba spoje do prostředí o různých teplotách, začne se v obvodu generovat malé napětí, měřitelné např. milivoltmetrem. Princip je znázorněn na obr.2.35

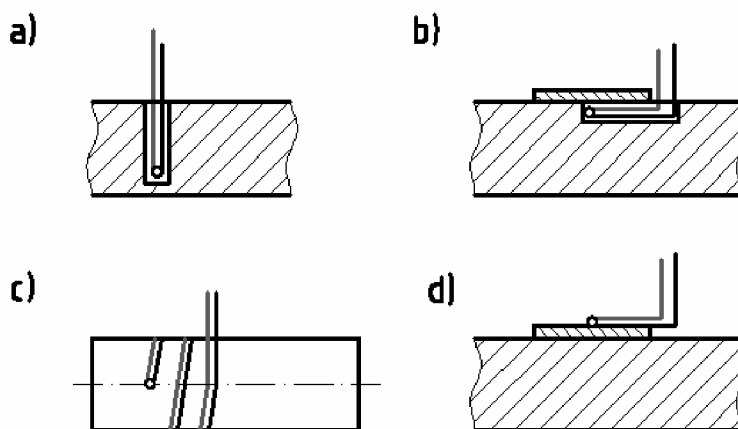


Obr.2.35 Princip termoelektrického teploměru. [20]

- 1- vodiče, 2- měřící spoj, 3- svorkovnice, 4- srovnávací spoj
 T_m - měřená teplota, T_s - srovnávací teplota

Měřící spoj se taky označuje jako teplý a srovnávací spoj jako studený. Kombinace používaných termoelektrických materiálů jsou například Cu-CuNi (měď-konstantan), NiCr-CuNi (chromel-konstantan), Fe-CuNi (železo-konstantan), aj. Jednotlivé dvojice jsou normalizovány, s uvedením jejich vlastností a použitelnosti (ČSN EN 60584-1).

Průměry vodičů jsou u běžných termočlánků od 0,5 do 4mm a u vodičů z ušlechtilých kovů od 0,2 do 0,5 mm, dle podmínek měření. Podle použití termočlánku se mění jejich konstrukce. Ukázky aplikace je na obrázku 2.36.



Obr.2.36 Ukázky aplikace termočlánků. [20]

- a) měření teploty v tuhém tělese b,c,d) měření povrchové teploty
 b)

Termočlánkové teploměry mají velmi široký rozsah měřených teplot. Můžeme pomocí nich měřit teploty od -270°C až do 2320°C . Jde o jedny z nejpoužívanějších teploměrů ve strojírenství, především pro svou jednoduchost a univerzálnost použití. [20] [21]

2.4.2 Optické teploměry – pyrometry

Pyrometry jsou bezdotykové teploměry, kterými se měří povrchová teplota těles. Princip je založen na snímání elektromagnetického záření vysílaného tělesem. Senzor (detektor) zachycuje záření o vlnových délkách 0,4 μm až 25 μm , což odpovídá rozsahu teplot od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+10000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výhody bezdotykového měření jsou především :

- zanedbatelný vliv na měřený objekt
- možnost měření teploty pohybujících těles
- možnost měření velmi rychlých změn teploty
- možnost měření a zobrazení celých povrchů těles

Pyrometry jsou proto vhodné i pro měření pohybujících se těles s malou hmotností. Podle způsobu měření se dělí na jasové, barvové, radiační, pásmové a infračervené. [20] [21]

Jasové pyrometry

Teplota se měří porovnáním jasu měřeného tělesa s jasnem porovnávacího zdroje pyrometru, např. vláknem žárovky. Jas zdroje se nastaví tak, aby splynul s jasnem měřeného objektu. Ukazatelem měřené teploty je zde žhavicí proud žárovky. Těmito pyrometry se měří teploty od $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $3500\text{ }^{\circ}\text{C}$. [20] [21]

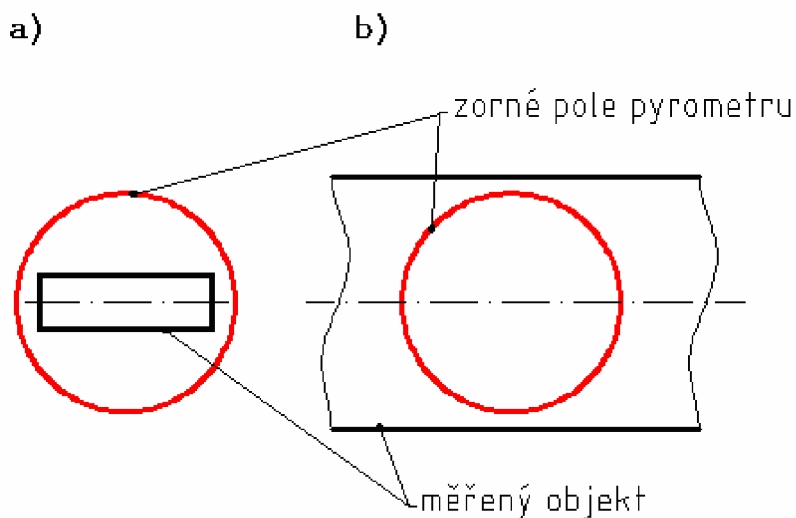
Barvové pyrometry

Pracují na podobném principu jako jasové. Používají se na měření objektů, u kterých se během měření mění emisivita. Rozsah měřených teplot je od $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z konstrukčního hlediska se dělí na:

- porovnávací, které pracují se dvěma vlnovými délkami (červenou a zelenou). Tyto vlnové délky jsou doplňkové, tzn. že se doplňují na bílou barvu.
- poměrové, u kterých je záření tělesa rozděleno na dva svazky, z nichž jeden prochází přes zelený filtr a druhý přes červený filtr. Tyto dva svazky se porovnají jako u jasového pyrometru.
- Automatické, u kterých se paprsky rozdělí jako u poměrového a přes rotující clonu dopadají na fotocitlivý prvek měřícího obvodu.

Radiační pyrometry

U těchto pyrometrů je záření měřeného tělesa optickou soustavou soustředěno do ohniska objektivu nebo zrcadla. V tomto ohnisku je umístěn termočlánek, který udává teplotu, kterou je však ještě nutné upravit emisním součinitelem. Rozsah použití je od $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ a ve speciálních případech od $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+5000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výhodou těchto pyrometrů je možnost jejich použití při relativně nízkých teplotách. Při měření je nezbytně nutné, aby měřený objekt překryl celé zorné pole objektivu (obr.2.37). [20] [21]



Obr.2.37 Ukázka zaměření snímače.
a) špatné, b) správné

Pásmové pyrometry

Využívají stejný princip měření jako radiační pyrometry, ale s tím rozdílem, že reagují jenom na záření v určitém rozsahu vlnových délek. Tento rozsah je vymezen použitou optikou, filtry a příslušným fotocitlivým prvkem (fototranzistor, fotobuňka, fotoodpor, aj.). Výhodou je velmi rychlá reakce na změnu teploty a možnost měření teploty i velmi malých objektů o nízkých teplotách od cca -40°C . [20] [21]

Infračervené pyrometry

Jedná se buď o pyrometry jasové nebo barvové. Skládají se z elektrické části, která zpracovává naměřený signál a optické, u které je důležitá ohnisková vzdálenost (nejčastěji pevná 500-1500mm). Používají se tam, kde není možné použít dotykového měření (např. v zamořených prostorech). Měřicí rozsah je od -30°C do 1370°C a pro speciální použití od 400°C do 3000°C . [20] [21]

Pyrometry se vyrábí buď jako přenosné nebo jako statické, pevně spojené s daným zařízením. Ke správnému zaměření pyrometru na měřený objekt bývají vybaveny optickým zaměřovačem (zaměření zrakem) nebo laserovým zaměřovačem, který bývá buď bodový nebo kruhový (obr. 2.38).



Obr.2.38 Ukázka laserového kruhového zaměřovače. [22]

2.4.3 Infračervené termočlánky

Princip těchto teploměrů je ve spojení infračerveného snímače a obyčejného termočlánku, připojeného na standardní vyhodnocovací zařízení. Přístroj vyfiltruje pouze záření v rozsahu infračervených vlnových délek, popřípadě odfiltruje nežádoucí složky záření z měřeného objektu. Toto tepelné záření (elektromagnetické vlnění) je nejprve převedeno na teplo a pak pomocí detektorů tepla (termistory, diody, monokrystalické polovodiče, termočlánky, aj.) převedeno na elektrický signál. Rozsah měřených teplot je od -70°C do 2800°C . Základní dvě skupiny termočlánků jsou:

- termočlánky s volitelnou vzdáleností od povrchu tělesa, která se pohybuje v rozsahu 0-10mm (mají malou ohniskovou vzdálenost a měří se jimi teploty do cca 300°C)
- termočlánky s pevnou ohniskovou vzdáleností od povrchu tělesa, která může být až 2m (mají velkou ohniskovou vzdálenost a používají se k měření vysokých teplot)



Obr.2.39 Kompaktní bezdotykový teplotní infračervený senzor. [23]

Infračervené termočlánky bývají pevně spojeny se zařízením a používají se k měření malých nebo pohybujících se (popř. rotujících) povrchů. V případě vysokých okolních teplot je nezbytné jejich chlazení, aby nedoházelo k ovlivnění měření. [21]

2.4.4 Termovizní teploměry

Tato skupina měřících přístrojů využívá k měření teploty infračervené spektrum záření. Povrch objektu je snímán speciální kamerou s detektorem infračerveného záření. Termogram měřeného objektu je buď v barevných odstínech, nebo v odstínech šedé barvy. Teplotní rozsah bývá obvykle od -30°C do 200°C s rozlišitelností $0,2^{\circ}\text{C}$, popřípadě do 1200°C , ale se zhoršenou rozlišitelností. Na následujícím obrázku 2.40, je termovizní kamera fy. Fluke. [21]



Fluke Ti10/Ti25

Obr.2.40 Ukázka termovizní kamery. [24]

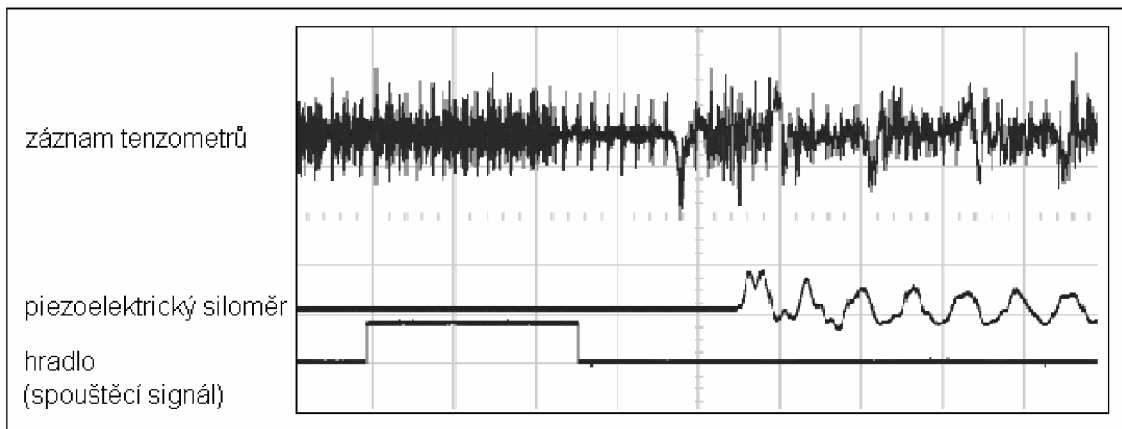
2.5 Zhodnocení současného stavu

V dnešní době, rychle se rozvíjejících technologií, především v oblasti elektroniky a elektrotechniky se do popředí dostávají měřicí metody, které jsou založeny na elektrotechnickém snímání a elektronickém vyhodnocení.

Pro měření sil jsou nejrozšířenější a nejpoužívanější siloměry piezoelektrické, kapacitní a tenzometrické. Piezoelektrické snímače mají nespornou výhodu ve své přesnosti, jednoduchosti a univerzálnosti. Výstupní průběhy z těchto snímačů nejsou ovlivněny vnějšími vlivy (jako je např. chvěním měřících soustav) a jsou tedy mnohem přesnější a vhodnější k vyhodnocení, než při měření tenzometry. Pro srovnání uvádím ukázkou výstupního signálu při měření piezoelektrickým siloměrem fy. Kistler (obr.2.41) a klasických kovových tenzometrů. Jak je vidět na grafu (obr.2.42) záznam piezoelektrického siloměru je téměř bez šumu a proto není nutná jeho filtrace, která i když by byla poměrně přesná může vnést do měření jisté odchylky.



Obr.2.41 Siloměr Kistler - typ 9301B. [25]

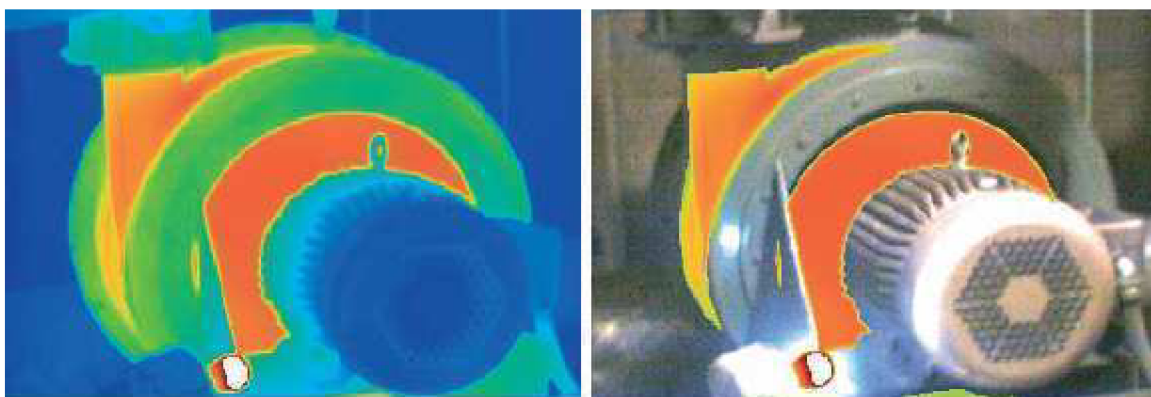


Obr.2.42 Srovnání záznamu měření piezoelektrickým siloměrem a kovovými tenzometry

K měření rychlostí a dráhy se pro svou univerzálnost využívají zařízení, kterými je možné měřit obě tyto veličiny současně. Jedná se převážně o bezdotykové měřicí zařízení, u kterých nedochází k opotřebení funkčních částí a mají tedy dlouhou dobu životnosti a přesnost měření se nemění. Jde především o optické snímače, snímače s magnetickým páskem nebo magnetostrikční snímače.

K měření vysokorychlostních procesů při dynamickém tváření se používá měření rychlosti pomocí fotodiod, jelikož nejsou spojeny s rychle se pohybujícími objekty a tedy nijak neovlivňují jejich chování.

V oblasti měření teploty ve strojírenství se využívají bezdotykové způsoby měření pyrometry, infračervenými čidly nebo termovizními kamerami. Výhody těchto zařízení jsou kromě jejich přesnosti hlavně v mobilitě a možnosti měření teplot pohybujících se předmětů přímo při provozu, což není dotykovými zařízeními vždy realizovatelné. Jedním zařízením (např. přenosným pyrometrem) je také možné sledovat více částí objektu, popřípadě infrakamerou zobrazit průběh povrchových teplot nástrojů při procesu tváření. Moderní termokamery umožňují skládání obrazů nebo zobrazení pouze oblastí s určitou teplotou, ve zvoleném rozsahu, na pozadí reálného obrazu (obr.2.43). Tato funkce slouží především ke kontrole popřípadě rychlé indikaci problémových míst.



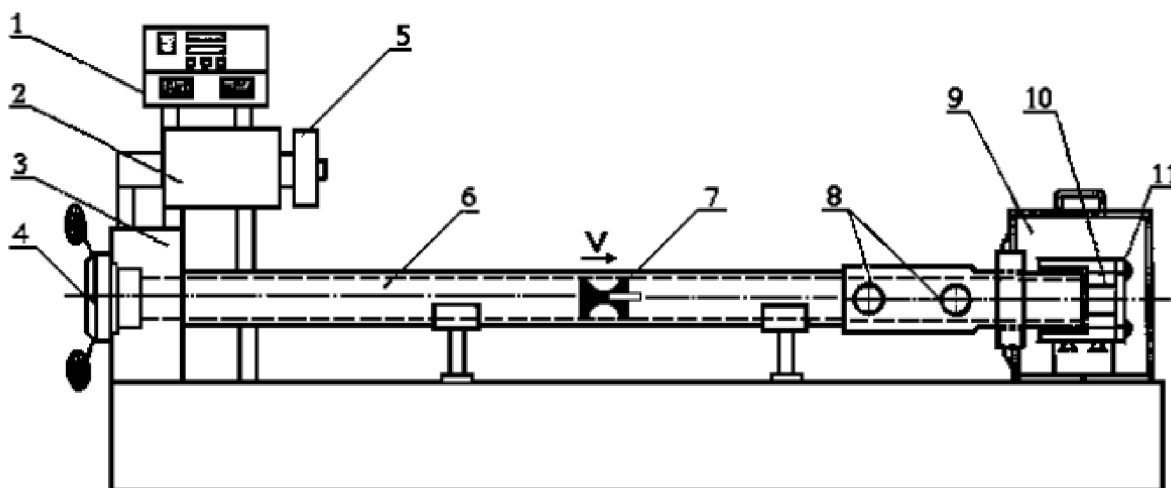
Obr.2.43 Srovnání plného a složeného obrazu termovizní kamery. [24]

Jednoznačné rozdělení jednotlivých způsobů měření daných veličin na používané a nepoužívané není zcela možný. V mnoha případech není měřící zařízení závislé pouze na konkrétních požadavcích daného provozu, ale slevuje se na požadavcích dle finančních možností dané laboratoře. V dnešní době probíhá jak rozvoj a výroba všech výše popsanych způsobů měření, tak i vývoj nových metod, jakou je např. optické snímání dráhy a rychlosti pohybu fy. Renishaw (kap.2.2.6) jejichž bezkontaktní optický snímač má rychlost polohování až 10 m/s s rozlišením až 5 nm pro lineární i rotační aplikace [26].

Dynamické testy tvařitelnosti

K testování dynamických vlastností materiálu se používají dvě základní metody, Hopkinsonův test měrnou dělenou tyčí – SHPB a tzv. Taylorův test-TAT (obr. 2.44). U obou těchto metod se funkční části zařízení pohybují vysokými rychlostmi, projektil u SHPB až 22 m/s a vystřelený vzorek u Taylorova testu rychlostí od 40 m/s do 250 m/s. Působení deformačních sil probíhá po dobu několika mikrosekund. To klade vysoké nároky na měřící a zaznamenávací techniku vzhledem k její přesnosti a schopnost zaznamenat takto rychlé děje s dostatečnou hustotou záznamu.

V současné době jsou obě zařízení vybavena pro měření rychlosti fotodiodovými hradly a rychlost projektilu (SHPB) nebo vzorku (TAT) se stanoví z naměřené doby průletu a známé vzdálenosti mezi měřícími fotodiodami. Toto zařízení nijak neovlivňuje funkční části a zároveň slouží jako spouštěcí zařízení pro záznamovou techniku. Drobné poruchy způsobují pouze nedostatečné odstínění vodičů, na kterých se může indukovat parazitní napětí od vnějších elektromagnetických polí. Jde však o drobný nedostatek, který je snadno odstranitelný a proto si myslím, že je toto zařízení plně dostačující.



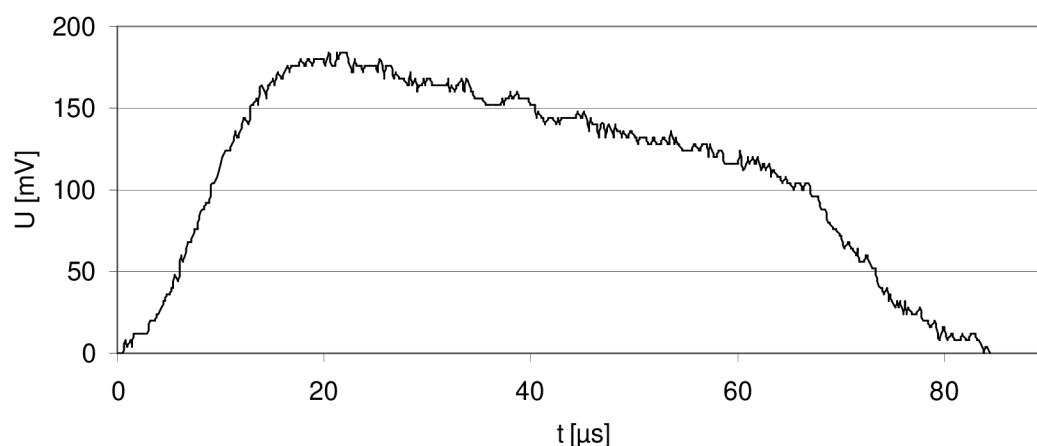
Obr.2.44 Schéma Taylorova testu. [16]

1- ovládací panel, 2- vzdušník, 3- expanzní komora, 4- uzávěr hlavně, 5- přepouštěcí ventil, 6- hlaveň kanónu, 7- vzorek s nosičem, 8- snímačí fotodiody, 9- dopadová komora, 10- dopadiště, 11- tuhá deska

Co se týče měření zatěžujících sil se metody testování (HMDT, TAT) rozcházejí. Taylorův kompresní test je založen na měření síly, kterou působí vzorek na dopadovou tyč. Napětí, které vzorek při dopadu v tyči vyvolá, je měřeno tenzometry a přepočítáno na sílu. Z průběhu působící síly se stanoví průběh zatížení vzorku. Na tenzometrické snímače mají však velký vliv napájecí napětí a rozkmitání měřící soustavy. Z tohoto důvodu je záznam do značné míry ovlivněn šumy a chybami (obr.2.42). Doporučil bych, pro toto zařízení, nahradit stávající metodu měření sil mnohem efektivnějším a přesnějším piezoelektrickým snímačem.

Za tímto účelem byla provedena i pokusná měření k porovnání obou způsobů měření. Jak je vidět z obr.2.42, vedlo by toto ke zjednodušení a zpřesnění vyhodnocení. Piezoelektrický siloměr postrádá šum způsobený zdrojem napájení. Jde o záznam měření dynamických mechanických vlastností slitiny Ti-6Al-4V metodou Taylorova testu, kterého jsem se zúčastnil v rámci řešení praktické části mé DP.

Hopkinsonův test je založen na měření tlakových (tahových) elastických pulzů v měrných tyčích. Vyhodnocení je založeno na průbězích napětí deformujících vzorek. Průběhy těchto pulzů jsou v laboratoři rychlých deformací na VUT v Brně měřeny kapacitními snímači, v případě zařízení na Yonsei University v Soulu [27] jsou tyto pulzy zaznamenávány pomocí tenzometrů. Jak je vidět z obrázku 2.45, je i signál z kapacitních snímačů ovlivněn šumy. I v tomto případě by bylo vhodné nahradit kapacitní snímače piezoelektrickým siloměrem a sílu zpětně přepočítávat na napětí, ale vzhledem ke konstrukci zařízení by to bylo možné pouze pro měření pulzu ve výstupní tyči (kap.3.3.1). Zvýšený počet rozhraní *tyč – snímač-tyč-vzorek*, u tyče vstupní, by měl zřejmě velký rušivý vliv a bylo by potřeba toto uspořádání otestovat.



Obr.2.45 Ukázka šumu na záznamu z kapacitního snímače – odražený pulz vzorku Al-5-34.

K měření teploty vzorků před a po deformaci bych vzhledem k jejich malým rozměrům doporučil infračervený teplotní snímač s pohyblivou ohniskovou vzdáleností (viz kap.2.4.3). Tyto bezdotykové snímače pevně spojené se zařízením jsou přímo určené pro měření teploty povrchové teploty malých předmětů i z velmi malé vzdálenosti. Je však nutné změřit teplotu vzorku bezprostředně po jeho deformaci. Při jeho malých rozměrech dochází k velmi rychlé změně teploty vlivem okolí. Na obr.2.46 je infračervená měřící hlava s rozsahem měření od -40 °C do 900 °C s odezvou 150 ms. V případě, že se testované vzorky indukčně ohřívají, je toto zařízení bohužel nepoužitelné a teplota se musí měřit dotykový termočlánkovými teploměry.



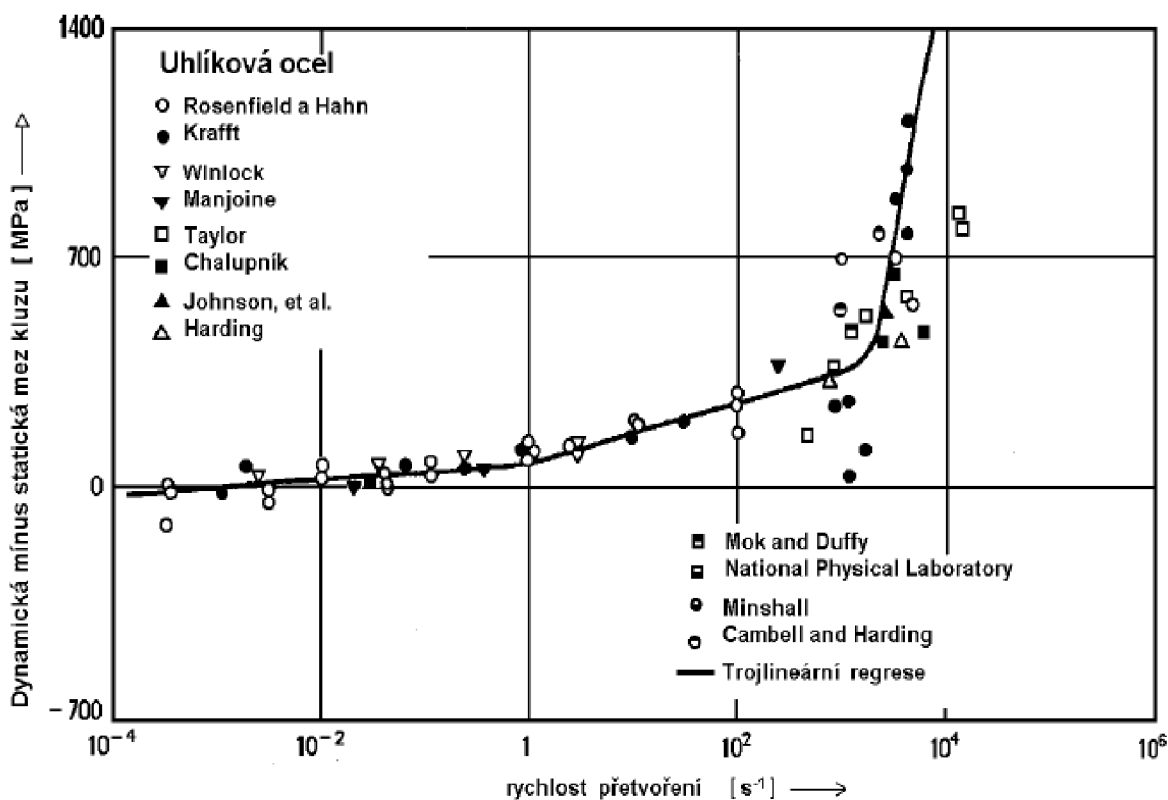
Obr.2.46 Infračervené snímací zařízení teploty- Optris CT [26]

3. HOPKINSONŮV TEST MĚRNOU DĚLENOU TYČÍ

3.1. Úvod

Většina mechanických vlastností materiálů, používaná v matematických výpočtových modelech a pro simulační programy, vychází z hodnot získaných běžnými tzv. statickými zkouškami, jako jsou např. zkoušky tahové, tlakové, zkoušky tvrdosti, aj. Tyto zkoušky však mají požadovanou vypovídací hodnotu jen v oblasti malých tvářecích rychlostí, zhruba do 10^2 s^{-1} , viz. graf na obr.3.1. Hodnoty jimi získané, tedy zcela nevyhovují výpočtovým modelům moderních způsobů tváření a simulačním programům.

Z tohoto důvodu byly vyvinuty tzv. dynamické zkoušky materiálových vlastností, při kterých jsou zohledněny vlivy setrvačných sil, mechanické rezonance a šíření elastických napěťových vln [12]. Jednou z těchto metod je Hopkinsonova metoda měrné dělené tyče - HT (v anglickém překladu Split Hopkinson Pressure Bar Test – SHPB). Výhody této metody spočívají především v přímém vyhodnocení závislosti *napětí – deformace*, *rychlost deformace-deformace*.



Obr.3.1 Vliv rychlosti deformace na dynamickou mez kluzu dle ASM [16]

3.2 Laboratoř vysokých rychlostí deformace

Laboratoř vysokých rychlostí deformace - LVRD byla zřízena na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně při Ústavu strojírenské technologie, odboru technologie tváření v roce 1994 za podpory ÚFM AV České republiky.

Experimentální pneumatické zařízení – “kanón“, který umožňuje provádět Hopkinsonův test-HT (Split Hopkinson Pressure Bar Test – SHPBT). Jde o unikátní zařízení. Laboratoř je vybavena měřicím a vyhodnocovacím zařízením (tenzometrické, kapacitní snímače, bezkontaktní snímače teploty, digitální paměťové osciloskopy Tektronix 210 a HP54624A s řídicími počítači PCi III. generace s vyhodnocovacím software) a je především využívána při řešení grantových projektů a výzkumných záměrů, dále ve výuce a při řešení současných problémů průmyslové a vojenské praxe. [13].

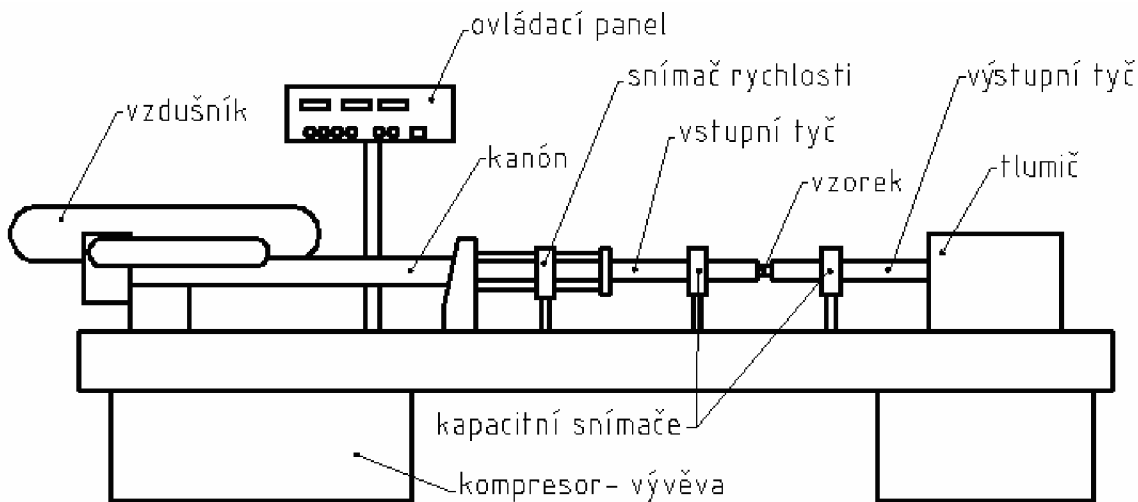


Obr.3.2 Laboratoř vysokých rychlostí deformace - LVRD na VUT v Brně

3.3 Princip Hopkinsonova testu

3.3.1 Princip

Vzorek je uchycen mezi vstupní a výstupní tyčí. Pomocí stlačeného vzduchu je z kanónu vystřelen impaktor (projektil) a jeho nárazem do vstupní tyče je vyvolán elastický kompresní puls. Tento puls (tzv. zatěžující) se šíří vstupní tyčí až na rozhraní *vstupní tyč - vzorek*, kde část pulzu projde přechovaným vzorkem do výstupní tyče (prošlý puls) a část se odrazí zpět (odražený puls). Tyto tři pulzy (vstupní, odražený a prošlý) jsou zaznamenány pomocí kapacitních snímačů a osciloskopu a převedeny do PC k filtraci (odstranění šumu). Zařízení je konstruováno jak pro tlakové, tak po úpravě i pro tahové zatížení [12].



Obr. 3.3 Schematické zobrazení zařízení pro Hopkinsonův test [13]

3.3.2 Popis hlavních částí:

Jednotlivé části zařízení byly vyvinuty, vyrobeny a přizpůsobeny konkrétním požadavkům zařízení a měření.

Měrné tyče - jsou vyrobeny z vysokopevné tepelně odolné MARAGING oceli VascoMax T350 (mech. vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 3.1). Délka obou tyčí je 800 mm a průměr 15 mm. Obě tyče jsou broušené a je kladen velký důraz na válcovitost z důvodu jednoosé napjatosti při průchodu elastické vlny a rovinnost “vnitřních“ čel, mezi kterými je uchycen vzorek.

Tabulka 3.1 Mechanické vlastností materiálu VascoMax T350 [14]

R _m [MPa]	R _e [MPa]	Z [%]	A [%]	HB [-]	HRC [-]	HV [-]
2310	2242	6	25	529	53	559

Impaktor (projektil) – je vyroben ze stejného materiálu jako dělené tyče. Průměr je stejný jako průměr vrtání v hlavní kanónu tj. 19 mm a je k dispozici v délkách 100, 150, 200 a 300 mm, aby bylo možné přizpůsobit měření testovanému materiálu a požadavcích na velikosti a délku vyvolané elastické napěťové vlny ve vstupní tyči. Razník má sférické čelo, aby docházelo k bodovému osovému nárazu a k vyvolání jednoosé napjatosti (pokud by měl čelo rovné, v případě jeho vychýlení před dopadem by bylo měření nevyhovující)

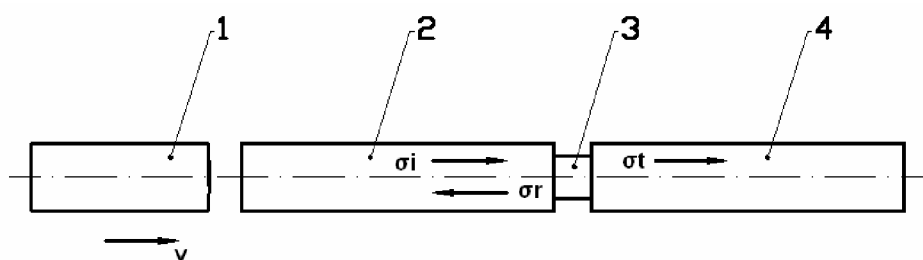
Spouštěcí zařízení při měření – dvě fotodiody vzdálené od sebe 15 mm, připojené jak k řídicímu panelu tak k osciloskopu. Při průletu impaktoru mezi fotodiodami je spuštěno měření a zároveň je zaznamenána doba průletu, ze které se stanoví dopadová rychlost impaktoru.

Měřicí a vyhodnocovací zařízení – jsou dva kapacitní snímače umístěné na měrných tyčích a připojené k digitálnímu paměťovému osciloskopu Tektronix 210, který je připojen k PC s požadovaným vyhodnocovacím software Scope 5.5.

3.4. Vyhodnocení testu

3.4.1 Výpočtový model [11][12]

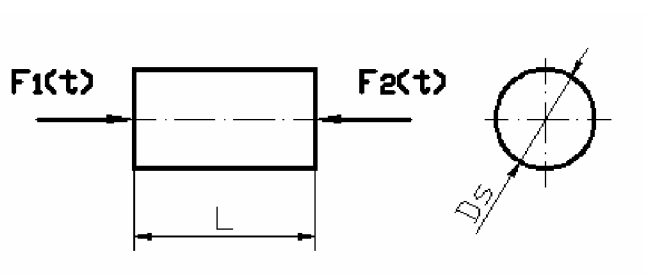
Podstata testu je založena na teorii šíření jednorozměrného elastického kompresního pulsu v měrných tyčích a na interakci mezi napěťovým pulsem a vzorkem, který je umístěn mezi vstupní a výstupní tyčí Obr.3.4.



Obr. 3.4 Schéma Hopkinsonova testu. [11]
 1- impaktor, 2- vstupní tyč, 3-vzorek, 4-výstupní tyč
 σ_i –zatěžující puls, σ_r –odražený puls, σ_t –prošlý puls

Výpočet napětí ve vzorku:

Napětí ve vzorku můžeme vyjádřit z hlediska působení interakčních sil od obou měrných tyčí dle obr.3.5.



Obr. 3.5. Zatížení vzorku. [11]

Na vzorek tedy působí síly $F_1(t)$ a $F_2(t)$, ze kterých vypočítáme střední sílu $F_{stř}$ působící na vzorek o okamžitém průměru D_s a délce L

$$F_{stř} = \frac{F_1(t) + F_2(t)}{2} [N] \quad (4)$$

a z této síly pak střední napětí $\sigma_{stř}$

$$\sigma_{stř} = \frac{F}{S} = \frac{4.F_{stř}(t)}{\pi.D_s^2} = \frac{4.[F_1(t) + F_2(t)]}{\pi.D_s^2} [N]. \quad (5)$$

Z Hookova zákona víme, že

$$\sigma = E.\varepsilon [MPa] \quad (6)$$

a zároveň

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{4.F}{\pi.D^2} [MPa], \quad (7)$$

z čehož se dá vyjádřit vztah pro sílu

$$F = E.\varepsilon \frac{\pi.D^2}{4} [N], \quad (8)$$

kde E je modul pružnosti v tahu a ε je poměrná deformace.

Pro vzorek v dynamické rovnováze mohou být interakční síly $F_1(t)$ a $F_2(t)$ na koncích tyčí vyjádřeny pomocí vztahu (9) jako

$$F_1(t) = E.[\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)] \frac{\pi.D_{tyč}^2}{4} [N] \quad (9)$$

pro tyč vstupní a

$$F_2(t) = E.[\varepsilon_t(t)] \frac{\pi.D_{tyč}^2}{4} [N] \quad (10)$$

pro tyč výstupní. $D_{tyč}$ je průměr vstupní (výstupní) tyče a ε_i , ε_r , ε_t jsou poměrné deformace tyčí od jednotlivých pulzů (i-vstupní, r-odtažený, t-prošlý).

Po dosazení vztahů (9) a (10) do (5) získáme pro střední hodnotu napětí vzorku vztah

$$\sigma_{stř} = E.\frac{1}{2} \frac{D_{tyč}}{D_s} .[\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] [MPa]. \quad (11)$$

Jestliže se vzorek deformuje symetricky (z válce na válec), což v případě malých plastických deformací můžeme předpokládat, pak poměrné deformace ve vstupní tyči (ε_i , ε_r) se rovnají poměrné deformaci ve výstupní tyči (ε_t).

$$\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) = \varepsilon_t(t) \quad [-] \quad (12)$$

Po dosažení vztahu (12) do (11) se vztah pro střední hodnotu napětí ve vzorku zjednoduší na

$$\sigma_{stř} = E \cdot \frac{D_{tyč}^2}{D_s^2} \cdot \varepsilon_t(t) \quad [MPa] \quad (13)$$

Tato rovnice dokazuje, že napětí ve vzorku je přímo úměrné amplitudě napětí přenesené do výstupní tyče.

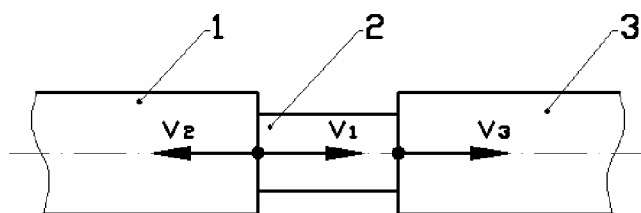
Výpočet rychlosti deformace a deformace:

Pro rychlost pohybu rozhraní tyč-vzorek platí dle [11] pro kladný směr pohybu vlny

$$v(z,t) = C_0 \varepsilon(z,t) \quad [ms^{-1}] \quad (14)$$

a pro negativní směr pohybu vlny

$$v(z,t) = -C_0 \varepsilon(z,t) \quad [ms^{-1}]. \quad (15)$$



Obr. 3.6 Rozložení rychlostí pohybu rozhraní tyč-vzorek. [11]
1- vstupní tyč, 2-vzorek, 3-výstupní tyč

Z toho se dá odvodit, že rychlost pohybu rozhraní vstupní tyč – vzorek je

$$v_{roz1} = C_0 \varepsilon_i - C_0 \varepsilon_r = C_0 (\varepsilon_i - \varepsilon_r) \quad [ms^{-1}] \quad (16)$$

a pro rozhraní výstupní tyč – vzorek je

$$v_{roz2} = C_0 \cdot \varepsilon_t \quad [m.s^{-1}]. \quad (17)$$

Rychlost poměrné deformace je obecně vyjádřena jako

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{v}{L} [s^{-1}], \quad (18)$$

kde v je okamžitá rychlost pohybu nástroje (v našem případě rozhraní tyč – vzorek) a L je okamžitá délka vzorku. Proto po dosazení (16) a (17) do (18) a úpravě podle (12) můžeme napsat vztah pro rychlost deformace vzorku

$$\dot{\varepsilon}_{stř} = \frac{C_0 \cdot (\varepsilon_t - \varepsilon_i + \varepsilon_r)}{L} = -\frac{2C_0 \cdot \varepsilon_r}{L} [s^{-1}]. \quad (19)$$

Znaménko mínus značí, že jde o kompresi vzorku. Odtud integrací získáme rovnici poměrné osové deformace vzorku.

$$\varepsilon_{stř} = -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \varepsilon_r(t) dt [-] \quad (20)$$

Vstupní hodnoty:

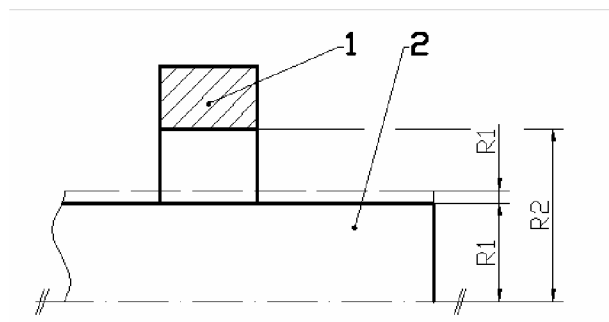
Vstupní hodnoty pro dosazení do vztahů (13), (19) a (20) získáme z měření změn napětí na kapacitních snímačích, umístěných na měrných tyčích, při průchodu elastického pulsu (vstupní, odražený a prošlý). Pomocí následujících vztahů vypočítáme z naměřených hodnot napětí požadované vstupní veličiny.

Kapacita kondenzátoru (kapacitního snímače) je dána vztahem pro válcový kondenzátor

$$C_{ko} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \xi_0 \cdot L}{\ln \frac{R_2}{R_1}} [F] \quad (22)$$

$$\xi_0 = 8,85417817 \cdot 10^{-12} Fm^{-1}$$

Kde ξ je permitivita vakua, L je výška (délka) kapacitního snímače, R_1 poloměr tyče (vstupní, výstupní) a R_2 vnitřní poloměr kapacitního snímače, viz Obr.3.7.



Obr.3.7 Schéma kapacitního snímače při průchodu pulzu.
1- kapacitní snímač, 2- měrná tyč

Změna poloměru tyče při průchodu elastické vlny (pulzu) se vypočítá ze vzorce

$$\delta R_1 = R_2 \cdot \exp\left\{\frac{2 \cdot \pi \cdot \xi_0 \cdot L(U_0 + \delta U)}{c_p \cdot \delta U - C_{ko} \cdot U_0}\right\} - R_1 \quad [mm], \quad (22)$$

odtud pak spočítáme poměrné deformace tyčí ε_R , ve směru poloměru R při průchodu pulzů tyčemi dle následujícího vztahu

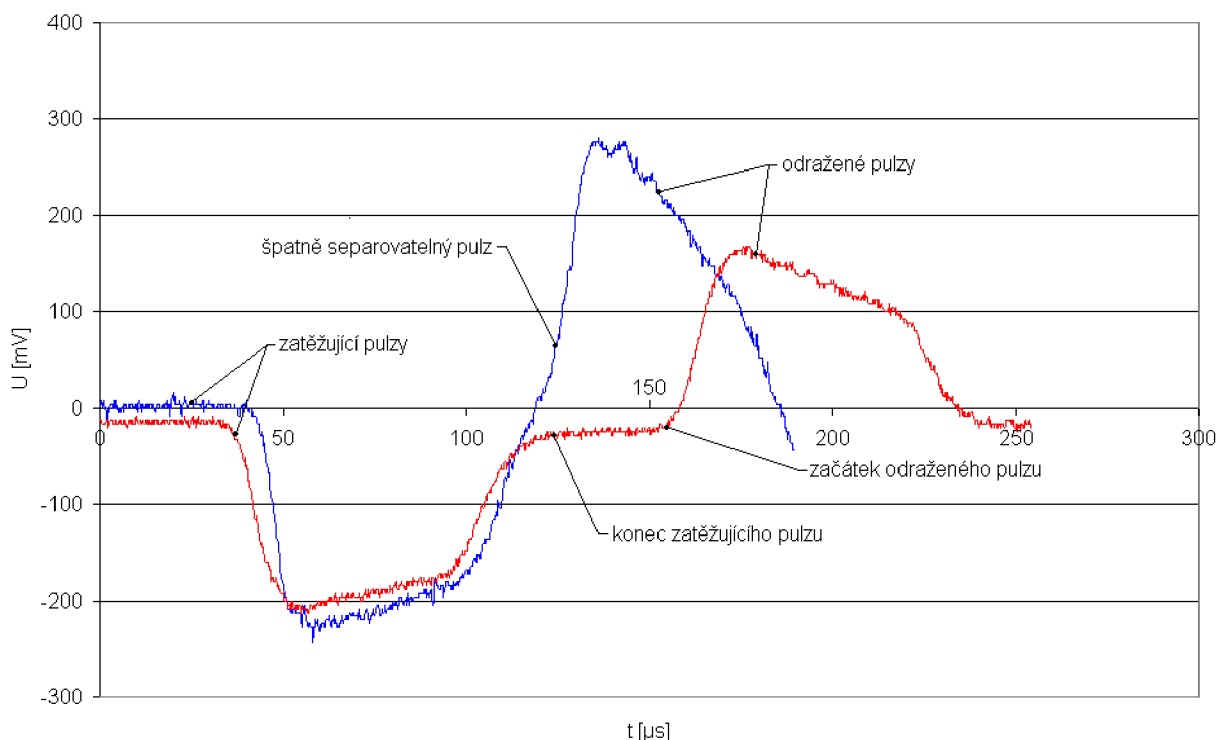
$$\varepsilon_R = \frac{\delta R_1}{R_1} [-] \quad (23)$$

a pomocí poissonova čísla μ přepočítáme poměrnou deformaci ε_R ve směru poloměru na osovou ε_z , která se dosadí do vztahů (13), (19) a (20)

$$\varepsilon_z = -\frac{\varepsilon_R}{\mu} [-] \quad (24)$$

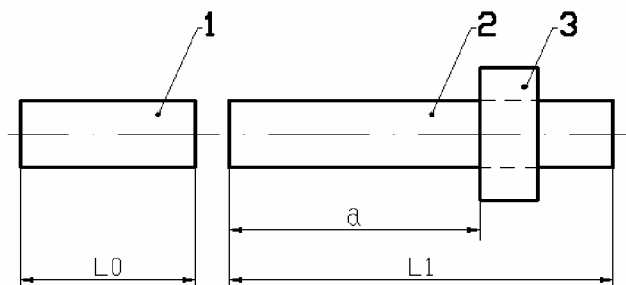
Podmínky měření:

Aby bylo měření a následné vyhodnocení realizovatelné, musí být dodrženy následující podmínky, týkající se umístění kapacitního snímače na vstupní měrné tyči. Pokud by toto nebylo zajištěno, byly by zaznamenány křivky, průběhů pulzů (vstupní a odražený), špatně rozlišitelné a tím pádem nevyhovující viz obr.3.8.



Obr 3.8 Ukázka záznamu špatně separovatelného pulzu.

Ke správnému u oddělení vstupního a odraženého pulzu je nutné dodržet podmínku nerovnosti (25) [12], ve které L_0 je délka impaktoru, L_1 je délka vstupní tyče a a je vzdálenost kapacitního snímače od začátku měrné tyče, viz. Obr. 3.9



Obr.3.9 Délkové schéma polohy snímače.
1- impaktor, 2- vstupní tyč, 3- kapacitní snímač [13]

$$L_0 < (L_1 - a) \tag{25}$$

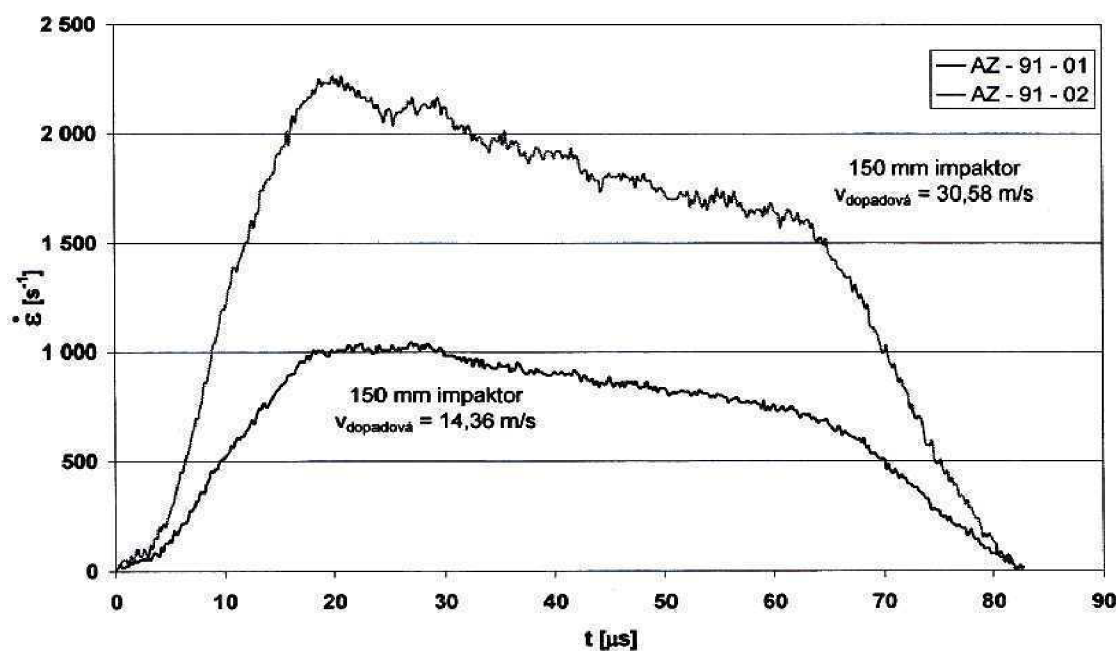
a odtud můžeme stanovit dobu maximálního trvání pulzu

$$T = \frac{2L_0}{C_0} < \frac{2(L_1 - a)}{C_0} \quad [\mu s] \tag{26}$$

Jak jde vidět ze vztahu (26) doba trvání pulzu je přímo úměrná délce impaktoru, viz tab.3.2. Různé délky impaktorů a různé dopadové rychlosti nám tedy umožňují dosáhnout různé rychlosti deformace požadované pro konkrétní zkoušené materiály.

Tab.3.2 Doby trvání pulzu pro různé délky impaktorů

Délka impaktoru [mm]	doba trvání pulzu [μs]
50	20
100	40
150	60
200	84
300	120



Obr. 3.10 Porovnání průběhů rychlostí deformace pro různé dopadové rychlosti impaktoru délky 150 mm. [12]

Korekce a filtrace pulzů :

Vlivem nerovností na měrných tyčích, nedokonalého celoplošného styku mezi tyčemi a vzorkem, mechanickou impedancí, rozkmitáním soustavy tyčí a elektrickými šumy vznikají na zaznamenávaných průbězích pulzů značné disperze, které musí být před samotným vyhodnocením odfiltrovány vhodnou matematickou filtrací. V laboratoři vysokých rychlostí tváření na VUT k tomu slouží program SCOPE 5.5.

4. PRŮBĚH MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ HOPKINSONOVA TESTU

V následující kapitole je rozepsán průběh a vyhodnocení Hopkinsonova testu provedeného na hliníkové slitině dne 4.3.2010 za účasti vedoucího diplomové práce.

Vzorek je uchycen mezi zkušebními tyčemi. Nárazem impaktoru je ve vstupní tyči vyvolán elasticky pulz, který se šíří tyčí až ke vzorku. Pulz se z části odrazí a z části projde deformovaným vzorkem do výstupní tyče. Všechny tyto dílčí pulzy jsou zaznamenány kapacitními snímači a dle příslušných vztahů vyhodnoceny na závislosti rychlost deformace-deformace a napětí-deformace.

4.1 Vzorek

Zkoušeným materiálem byla hliníková slitina AlMg4,5Mn0,7 - EN AW 5083. Jedná se o nevytvrditelnou slitinu střední pevnosti, velmi dobře svařitelnou metodami TIG a MIG. Slitina je dobře obrobitelná a má výbornou korozní odolnost v normální i mořské atmosféře. Používá se ve strojírenství, v automobilovém a lodním průmyslu, pro svařované konstrukce, základové desky střížných nástrojů, formy na pěnové a gumové nástroje, aj. Vzorky byly vyrobeny z válcovaného polotovaru. Základní mechanické vlastnosti jsou :

Pevnost $R_m = 270$ MPa

Smluvní mez kluzu $R_{p0,2} = 115$ MPa

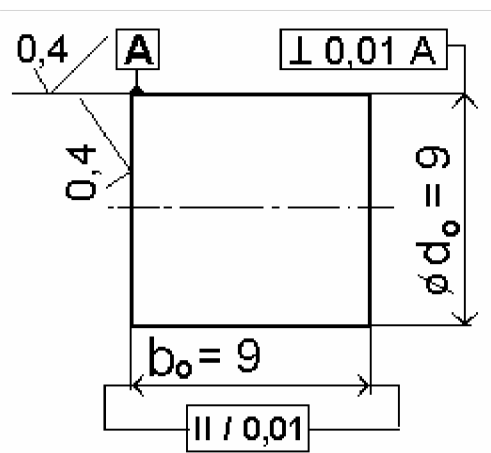
Tažnost $A_{50} = 14\%$

Tvrdość: 65 HB

V rámci mé diplomové práce byly experimentu podrobeny celkem čtyři vzorky daného materiálu o rozměrech viz. tabulka 4.1 a obr 4.1. [19] [15]

Tabulka 4.1 Rozměry zkoušených vzorků.

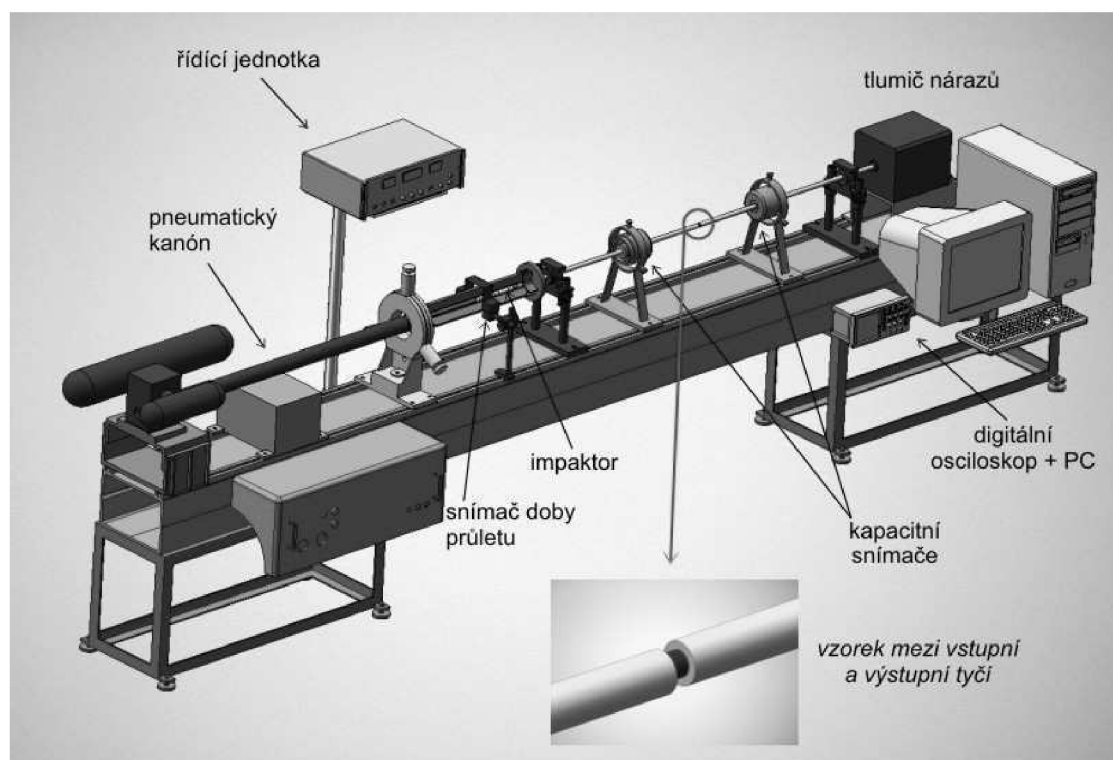
Označení vzorku	průměr [mm]	délka [mm]
Al-5-34	9,01	9,04
Al-5-35	9,01	9,06
Al-5-36	9,01	9,06
Al-5-37	9,00	9,05



Obr. 4.1 Zadané rozměry vzorků.

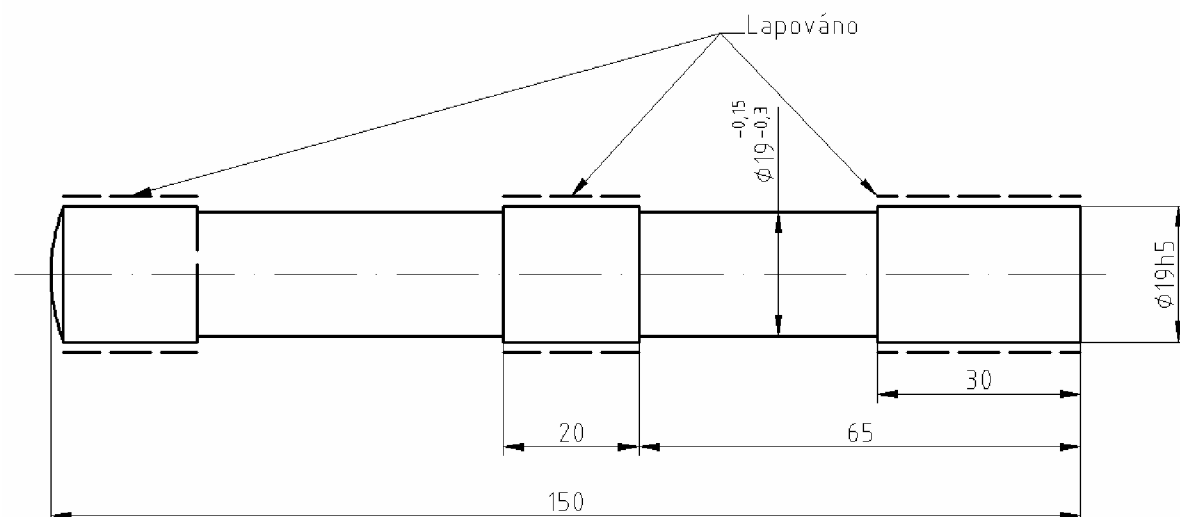
4.2 Zkušební zařízení

K experimentu bylo použito stávající zařízení laboratoře vysokých rychlostí deformace na VUT Brno dle následujícího obrázku. Zkušební tyče jsou vyrobeny z vysokopevnostní tepelně odolné oceli Vascomax T350, délky 800 mm a průměru 15 mm. Mechanické vlastnosti daného materiálu jsou v tabulce 3.1.



Obr.4.2 Schéma zkušebního zařízení pro Hopkinsonův test. [17]

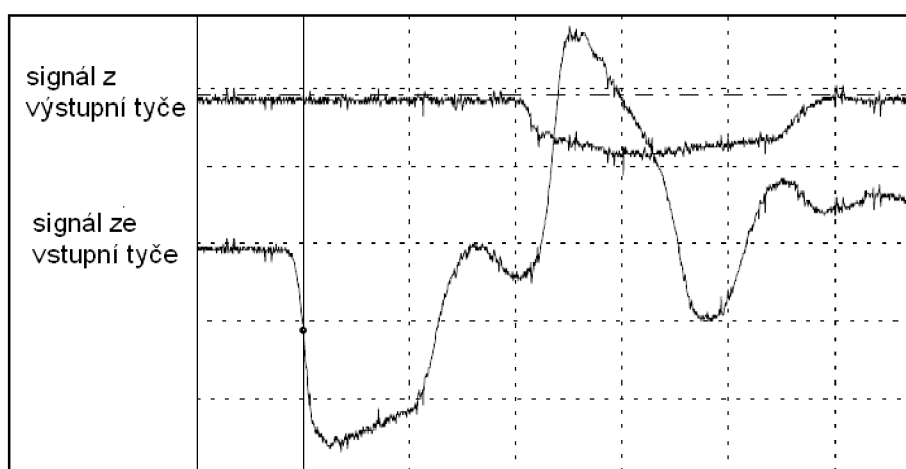
Pro všechny vzorky byl elastický puls ve vstupní tyči vyvolán impaktorem o délce 150 mm se sférickým čelem, aby bylo zajištěno vyvolání osově elastické deformace. Impaktor je na obrázku obr.4.3.



Obr.4.3 Impaktor 150B.

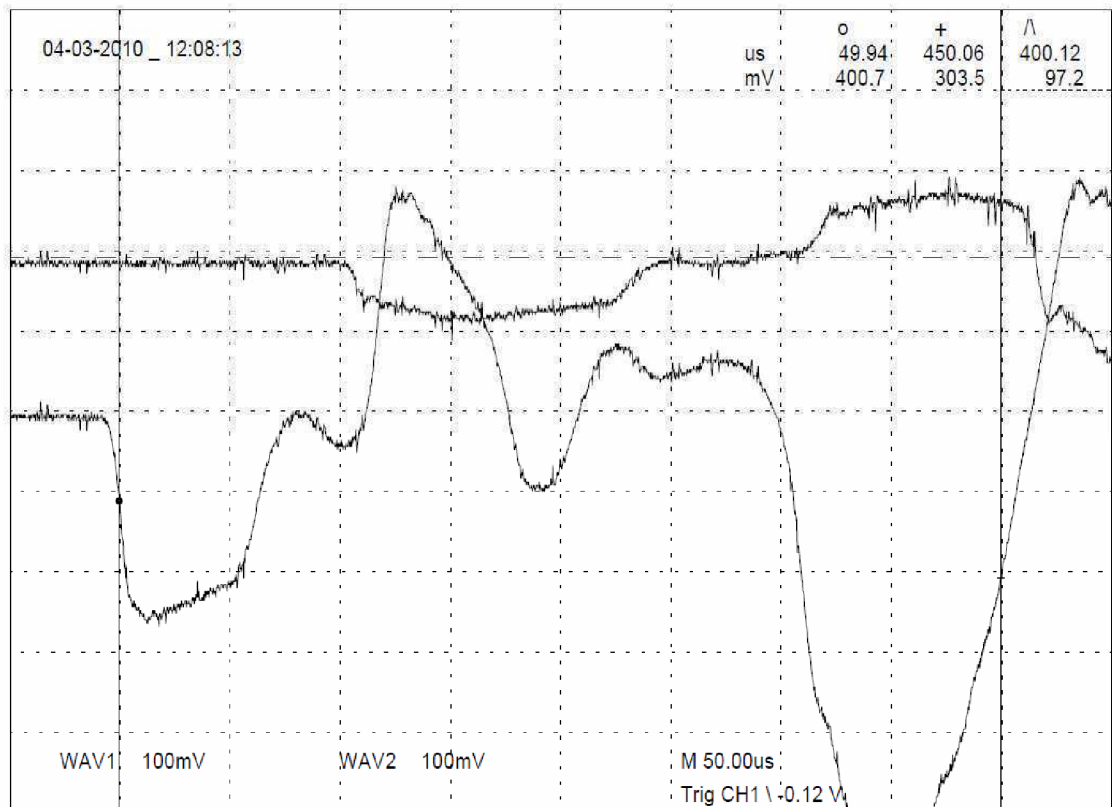
4.3 Postup experimentu

Každému vzorku bylo přiděleno číslo, vzorek byl popsán a byly zkontrolovány a zapsány jeho přesné rozměry, aby nedošlo k jejich záměně a byla možná zpětná kontrola, popřípadě další možná manipulace, např. další zatěžování. Bylo zkontrolováno i vlastní zařízení, především čistota a vzájemná rovinnost dosedacích ploch, mezi kterými bude vložen vzorek. Rovinnost se kontroluje tzv. na průsvit. Taky je důležitá kontrola souososti obou tyčí, která se dá, v případě rozladění sestavy, upravit stavěcími šrouby. Dále bylo provedeno nastavení osciloskopu na požadované rozsahy experimentálně zjištěné v předešlých měřeních. Osciloskop zaznamenává průběhy jednotlivých pulzů ve vstupní a výstupní tyči (obr.4.4). Měření je spuštěno při průletu projektilu (impatkoru) mezi fotodiodami, proto je nutná jejich správná komunikace s osciloskopem. Zároveň je pomocí těchto fotodiod změřena nárazová rychlost impaktoru. Celé, takto zkontrolované a seřízené zařízení se ještě, před vlastním experimentem, odzkouší tzv. zkušebním výstřelem, který se provede např. s vyřazeným nebo nevyhovujícím vzorkem, aby bylo zajištěna správná funkce celé sestavy.



Obr.4.4 Ukázka záznamu osciloskopu pro vzorek A15-34.

AI 5-34 (AA-5083 H111) Knebl-Forejť

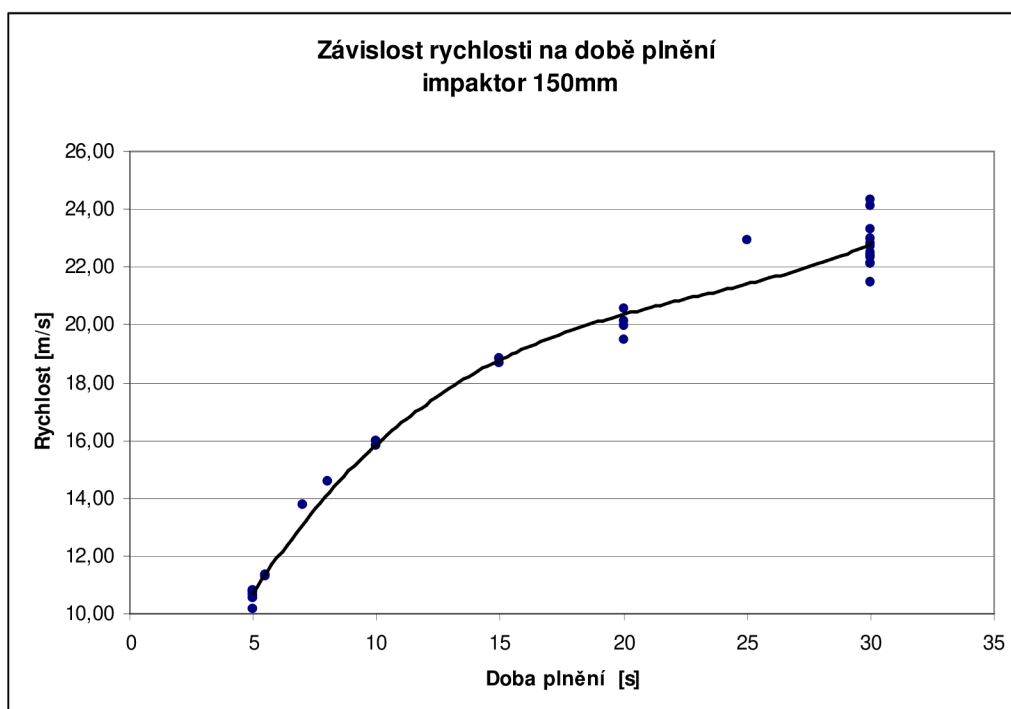


do=9,013 mm, d1= 9,79 mm
 bo=9,044 mm, b1= 7,665 mm
 tp= 25s, tv=746 um, v=20,107m/s
 To=21°C, ImpB=150mm

Vytištěno dne : 04-03-2010_12:21:34

Obr.4.5 Ukázka protokolu měření vzorku AI5-34.

Pro vlastní experiment byla pro každý vzorek odhadem zvolena dopadová rychlost impaktoru a z ní dle grafu na obrázku 4.6 odpovídající přibližná doba plnění vzdušníku pneumatického děla. Přesná rychlost nejde z důvodů malých tlakových ztrát systému nastavit, proto se zvolí přibližná hodnota a přesná se změří až při průletu impaktoru mezi fotodiodami.



Obr.4.6 Závislost dopadové rychlosti na době plnění vzdušníku.

Jelikož ve výpočtech se uvažuje s rovnoměrnou deformací vzorku, je nutné zajistit co možná nejmenší součinitel tření mezi zkušebními tyčemi a vzorkem, proto se čela tyčí zlehka mažou vazelínou, která jednak zajišťuje „nulové“ tření, tak i dokonalejší styk ploch čel vzorků a zkušebních tyčí. Vzorek se umístí mezi zkušební tyče a ty se k němu zlehka přitlačí, aby nevypadl (vzorek drží pouze sevřením tyčí !) Po umístění se vystředí a zkontroluje se jeho souosost a celoplošné dosednutí na obě tyče (pohledem na “průsvit“).

Pomocí podtlaku se impaktor nasaje do hlavně kanónu. Na ovládacím panelu se nastaví doba plnění vzdušníku a spustí se kompresor. Po naplnění vzdušníku se provede výstřel.

Pokud vše proběhne v pořádku, jsou osciloskopem zaznamenané průběhy pulzů převedeny do PC s odpovídajícím vyhodnocovacím software (Scope 5.5). Co se týče vzorku, ten je opět přeměřen a všechny hodnoty jsou zapsány do karty pro následné vyhodnocení a archivaci.

4.4 Vstupní a naměřené hodnoty

V následující tabulce 4.2 jsou uvedeny rozměry jednotlivých vzorků a podmínky jejich zatěžování při daném experimentu. Průměr vzorku po deformaci d_1 však není měřený, ale dopočítaný (zákon zachování objemu) z důvodu eliptické deformace vzorků v příčném řezu. Toto bylo způsobeno anizotropií materiálu, jelikož polotovary pro výrobu vzorků nebyly tyčové, ale šlo o válcovaný pech. Testování hliníkových slitiny probíhá už delší dobu. Rozměry vzorků byly navrženy na základě praktických zkoušek a doby plnění vzdušníku byly zvoleny v závislosti na předešlých měřeních, tak aby pokryly, pro daný materiál, celý rozsah možných dopadových rychlostí impaktoru.

Tabulka 4.2 Rozměry vzorků a podmínky jejich zatěžování.

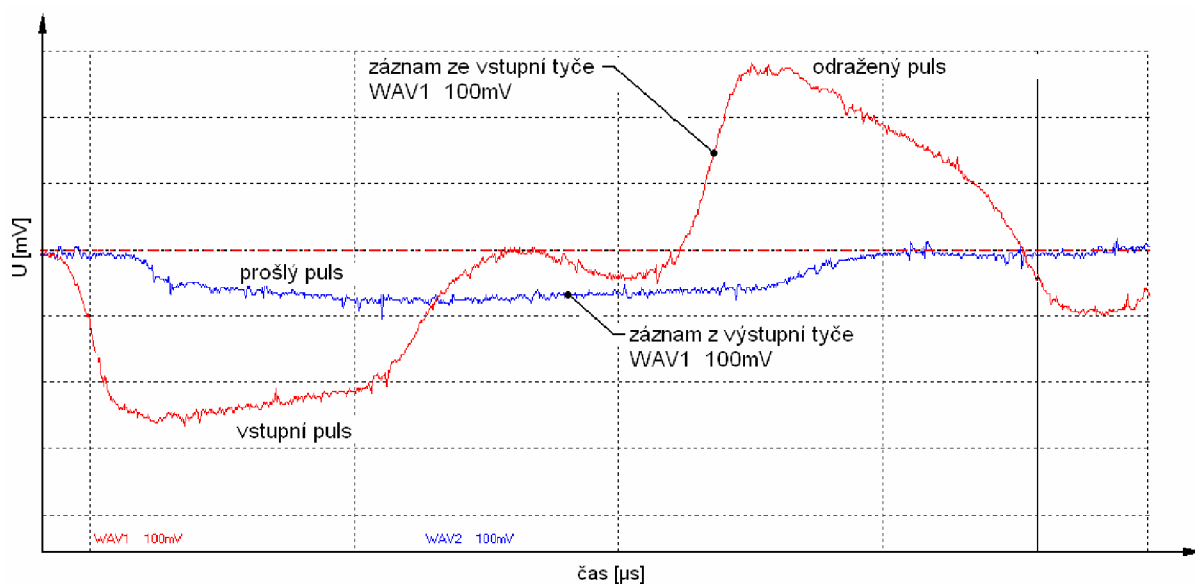
Označení vzorku	průměr [mm]	délka [mm]	Deformace		plnění	rychlost		Délka Impaktoru [mm]
	d_0	b_0	ϵ_b	ϕ		t_p [s]	t_v [μ s]	
	d_1	b_1	ϵ_i					
Al-5-34	9,01	9,04	-0,1525	-0,1654	25	746	20,11	150B
	9,79	7,66	0,1798					
Al-5-35	9,01	9,06	-0,167	-0,183	30	712	21,07	150B
	9,87	7,55	0,2					
Al-5-36	9,01	9,06	-0,1686	-0,1847	30	696	21,55	150B
	9,89	7,53	0,2028					
Al-5-37	9,00	9,05	-0,1722	-0,1890	30	695	21,58	150B
	9,89	7,49	0,2080					



Obr.4.7 Deformovaný vzorek.

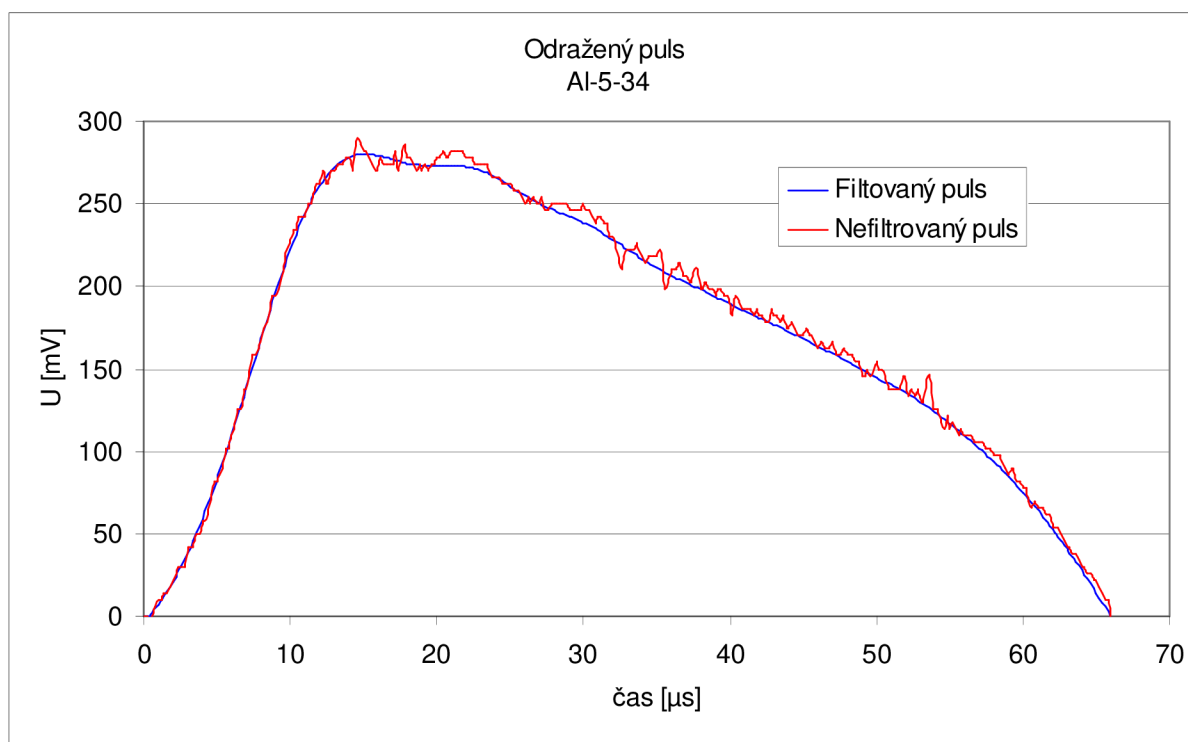
Průběh grafu na obrázku 4.6 je pouze do hodnoty plnění 30s, jelikož nad touto hodnotou se velikost rychlosti mění jen mírně a tlakové úniky systému znemožňují její, alespoň přibližný, odhad. U vzorku s označením Al-5-35 bylo měření rušeno okolními vlivy (vnější elektromagnetickým polem) a spuštěno brzy.

Ukázka průběhu jednotlivých pulzů (vstupní, odražený a výstupní) je zobrazena v grafu na obr.4.8. Jde o graf z programu Scope 5.5 z hodnot zaznamenaných osciloskopem pro vzorek s označením Al-5-34.



Obr.4.8 Časový průběh pulzů vzorku Al-5-34.

Jak je vidět z grafu (obr. 4.8) na záznamu je množství chyb způsobených mnoha vlivy jako je např. šumem napájecího napětí, rozkmitání soustavy, aj. Tyto odchylky byly odfiltrovány pomocí vhodně zvoleného digitálního filtru programu Scope 5.5 tak, aby průběh pulzu co nejlépe kopíroval původní neupravený záznam. Srovnání filtrovaného a nefiltrovaného pulzu je na obrázku 4.9

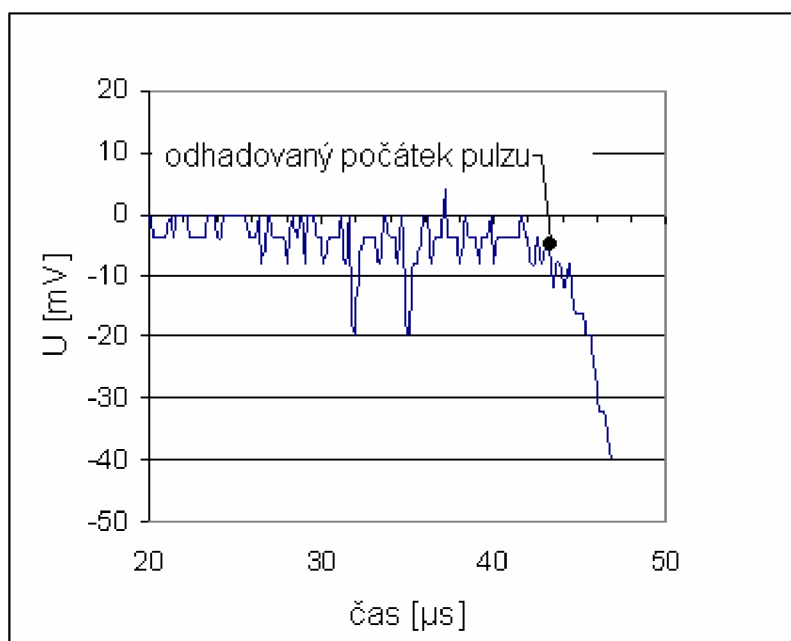


Obr.4.9 Srovnání filtrovaného a nefiltrovaného signálu (odražený puls-vzorek AL-5-34).

Jelikož záznam měření obsahuje pro každou z tyčí cca 1700 hodnot, je před vlastním vyhodnocením nutné separovat pouze hodnoty vlastních pulzů. Nejdůležitější je přesný odhad počátků jednotlivých pulzů. Zvýrazněná hodnota v tabulce 4.3 je pravděpodobný počátek pulzu (vstupní nefiltrovaný pulz – Al-5-34). Jde o výřez z tabulky naměřených hodnot. Na vedlejším obrázku (Obr.4.10) je tato hodnota zobrazena na výřezu grafu průběhu tohoto pulzu.

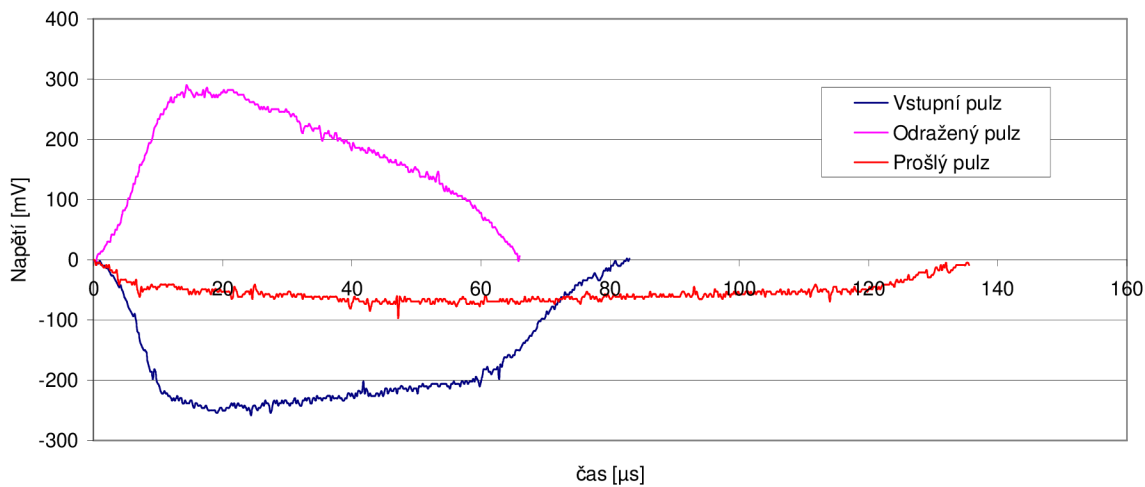
Tabulka 4.3 Výřez z tabulky naměřených hodnot
(vstupní pulz – Al-5-34- nefiltrovaný)

t [μ s]	U [mV]
42	-4
42,2	-8
42,4	-8
42,6	-4
42,8	-8
43	-4
43,2	-4
43,4	-12
43,6	-8
43,8	-8
44	-12
44,2	-12
44,4	-8
44,6	-12
44,8	-16
45	-16
45,2	-16
5,4	-20
45,6	-20
45,8	-24



Obr.4.10 Počátek vstupního pulzu.
(vstupní pulz – Al-5-34- nefiltrovaný)

Takto separované pulzy se posunou do společného počátku, jak je vidět na obr.4.11 a teprve takto upravené průběhy se vyhodnocují.



Obr. 4.11 Ukázka posunu pulzů do společného počátku-vzorek Al-5-34 - nefiltrovaný.

4.5 Vyhodnocení

Velkou výhodou Hopkinsonova testu je přímé vyhodnocení závislosti *napětí-deformace* a *rychlost deformace –deformace*. Obě tyto závislosti byly vyhodnoceny pro všechny vzorky vždy pro filtrované i nefiltrované průběhy pulzů a bylo použito tzv. plné a zjednodušené vyhodnocení. Při plném vyhodnocení se průběhy počítají ze všech tří pulzů (vstupní, odražený, prošlý) podle následujících vztahů odvozených v kapitole 3.4.1:

osové napětí dle (13)

$$\sigma = E \cdot \frac{1}{2} \frac{D_{tyč}}{D_s} \cdot [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \quad [MPa]$$

rychlost deformace dle (19)

$$\dot{\varepsilon} = \frac{C_0 \cdot [\varepsilon_t(t) - \varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t)]}{L} \quad [s^{-1}]$$

poměrná deformace dle (20)

$$\varepsilon = \int_0^t \dot{\varepsilon}(t) \cdot dt \quad [-]$$

Ve zjednodušeném vyhodnocení se uvažuje jednoosý stav napjatosti vzorku, tzn. že se vzorek deformuje rovnoměrně z válce na válec. Vztahy se tedy zjednoduší a požadované závislosti *napětí-deformace* se počítá pouze z prošlého pulzu a závislost *rychlost deformace-deformace* se vypočítá z pulzu odraženého, jak je vidět z vztahů pro:

osové napětí dle (13),

$$\sigma = E \cdot \frac{D_{tyč}^2}{D_s^2} \cdot \varepsilon_t(t) \quad [MPa]$$

rychlost deformace dle (19)

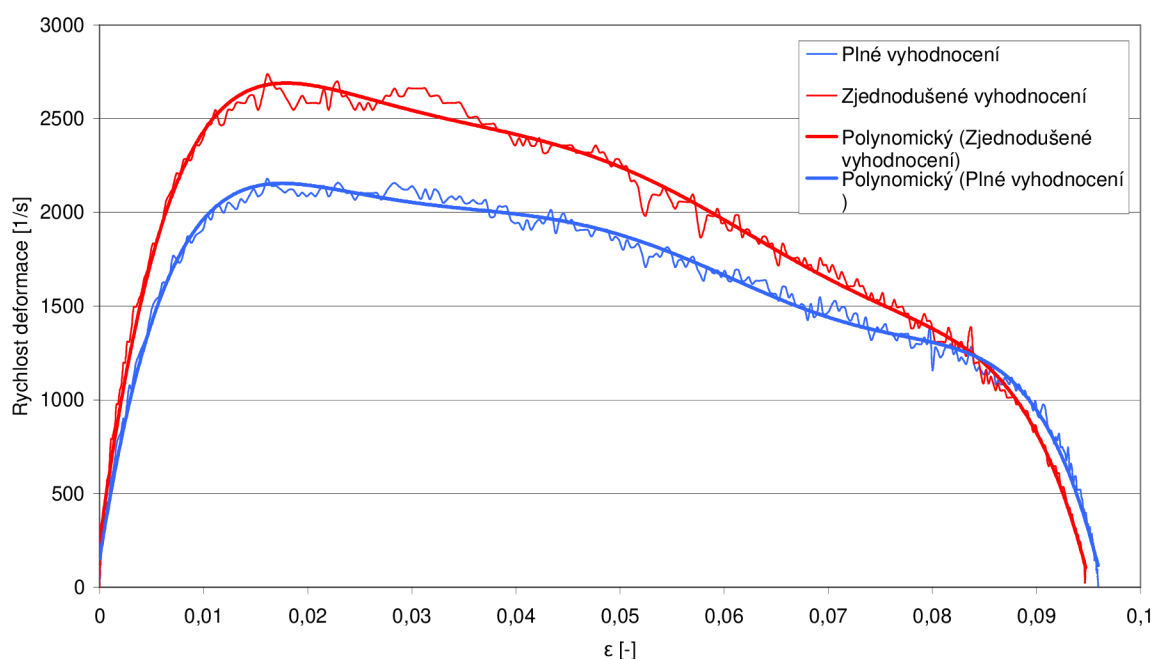
$$\dot{\varepsilon} = -\frac{2C_0 \cdot \varepsilon_r}{L} \quad [s^{-1}]$$

poměrná deformace dle (20)

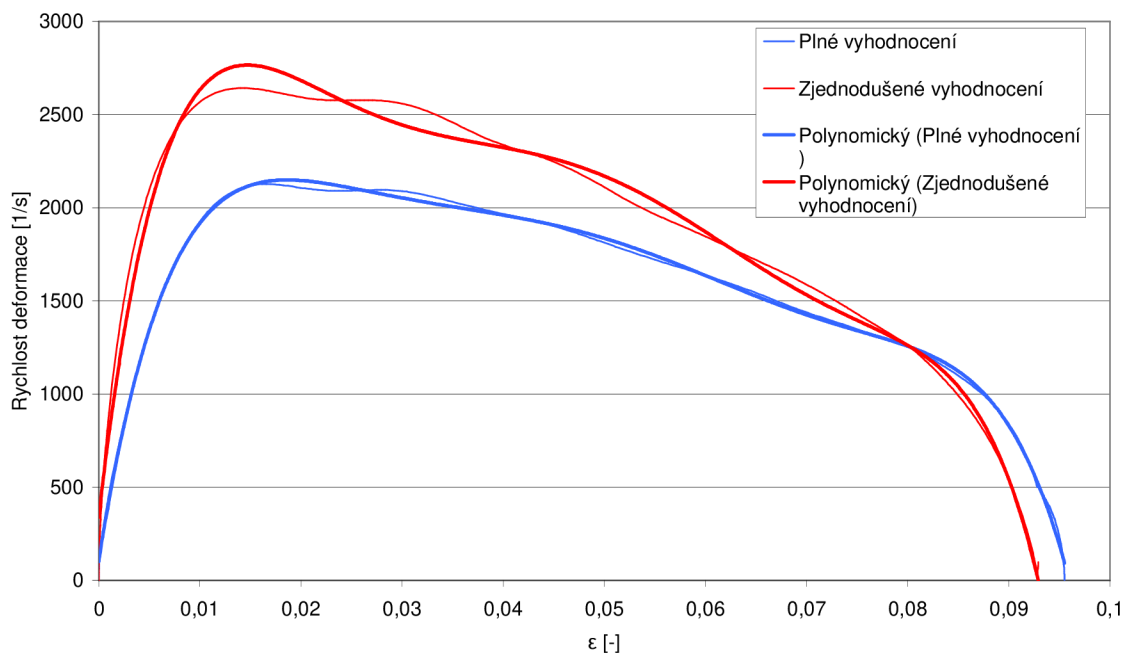
$$\varepsilon = -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \varepsilon_r(t) dt \quad [-]$$

kde je E-modul pružnosti zkušebních tyčí v tahu, C_0 - rychlost šíření elastické vlny, $D_{tyč}$ - průměr zkušební tyče, D_s - průměr vzorku, L- počáteční délka (šířka) vzorku, $\varepsilon_{t,i,r}$ – délkové deformace zkušebních tyčí způsobené jednotlivými pulzy (t-vstupní, i-odražený, r-prošlý).

Na obrázku 4.12 je zobrazeno srovnání průběhů závislosti *rychlost deformace-deformace* při plném a zjednodušeném vyhodnocení nefiltrovaných hodnot vzorku Al-5-34 a na obr.4.13 stejný průběh pro filtrované hodnoty.



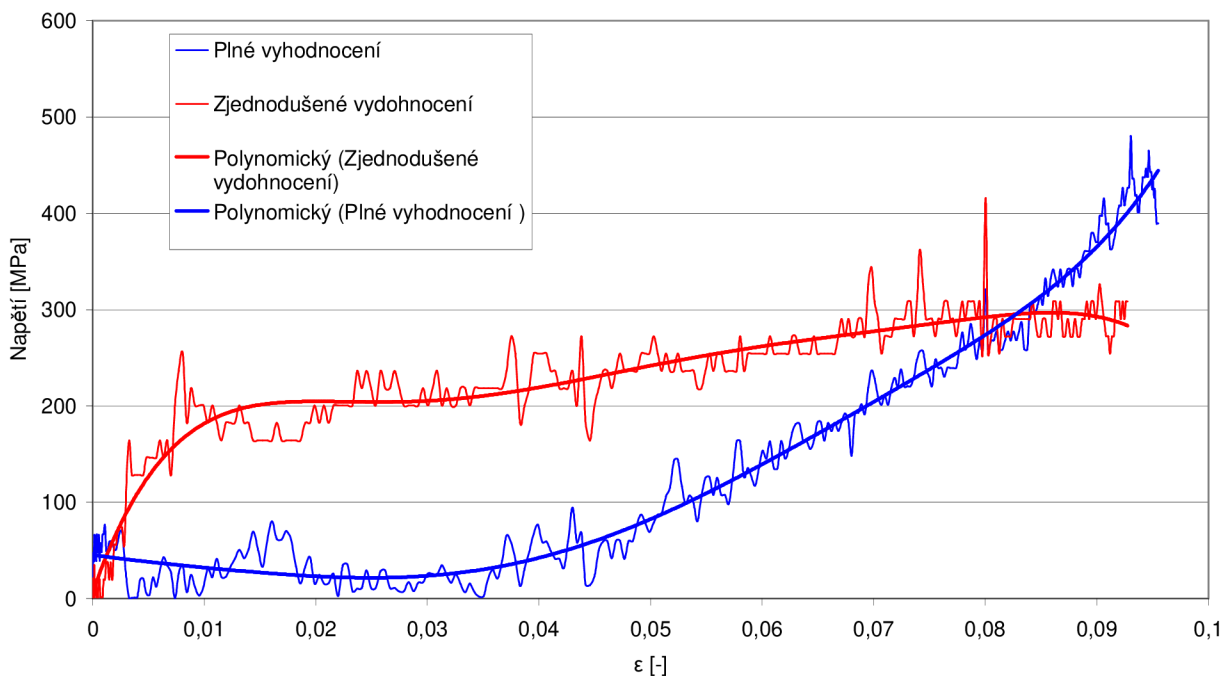
Obr.4.12 Srovnání plného a zjednodušeného vyhodnocení závislosti *rychlost deformace-deformace* nefiltrovaných hodnot pro vzorek Al-5-34.



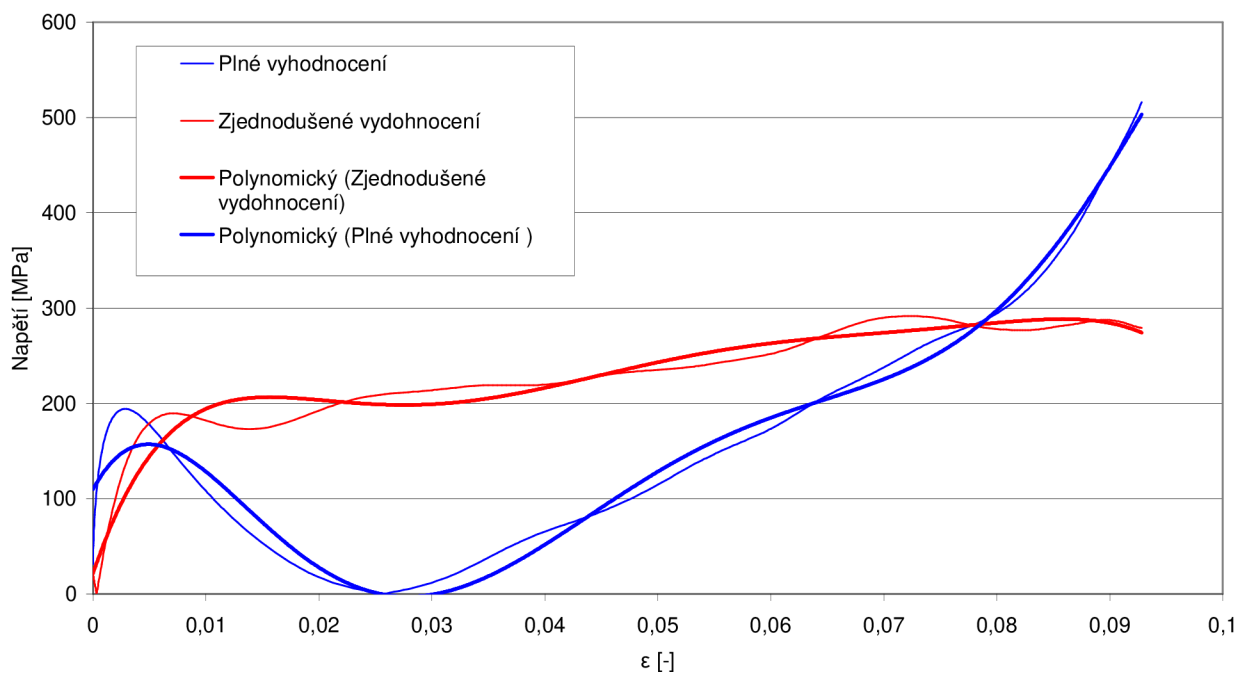
Obr.4.13 Srovnání plného a zjednodušeného vyhodnocení závislosti rychlost deformace-deformace filtrovaných hodnot pro vzorek Al-5-34.

V obou případech je vidět, že maximum plnohodnotného vyhodnocení je přibližně o 500 s^{-1} menší, než maximum zjednodušeného vyhodnocení. Pro přesnější výsledek je, dle mého názoru, vhodnější plné vyhodnocení, jelikož více odpovídá skutečnému zatěžování. Zjednodušená verze vyhodnocení je podmíněna rovnoměrnou deformací vzorku, ale jak je vidět na obr. 4.7 je na deformovaném vzorku vidět mírné „soudečkovatění“. Taky lze v tomto případě proložit závislost polynomem, který poměrně věrně kopíruje její průběh.

Na dalších dvou grafech na obr.4.14 a 4.15 jsou znázorněny závislosti *napětí-deformace* pro stejný vzorek. U této závislosti však průběhy vycházejí poněkud rozporupně. Průběh dané závislosti je v obou případech pro plné vyhodnocení zcela neodpovídající možnému zatížení. V tomto případě je vhodnější použít zjednodušené vyhodnocení a toto ani neprokládat polynomem, jelikož ten, jak je vidět na obrázku 4.13 nevhodně posune mez kluzu k vyšším hodnotám a i vzhledem k deformaci vzorku.



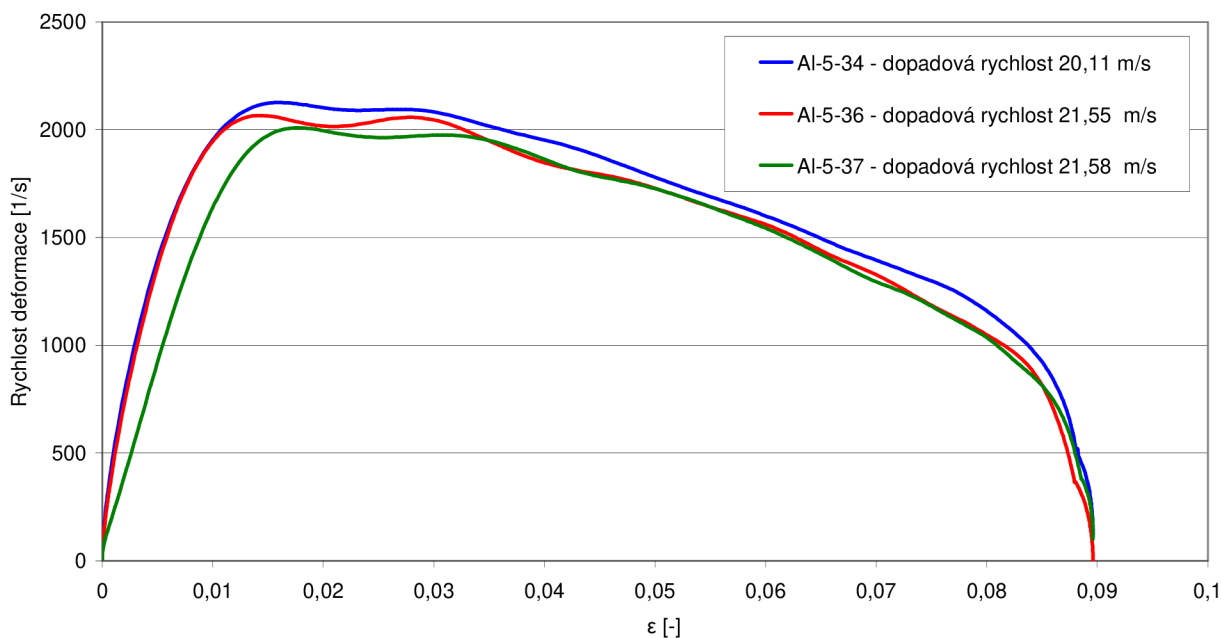
Obr.4.14 Srovnání plného a zjednodušeného vyhodnocení závislosti *napětí-deformace* nefiltrovaných hodnot pro vzorek Al-5-34.



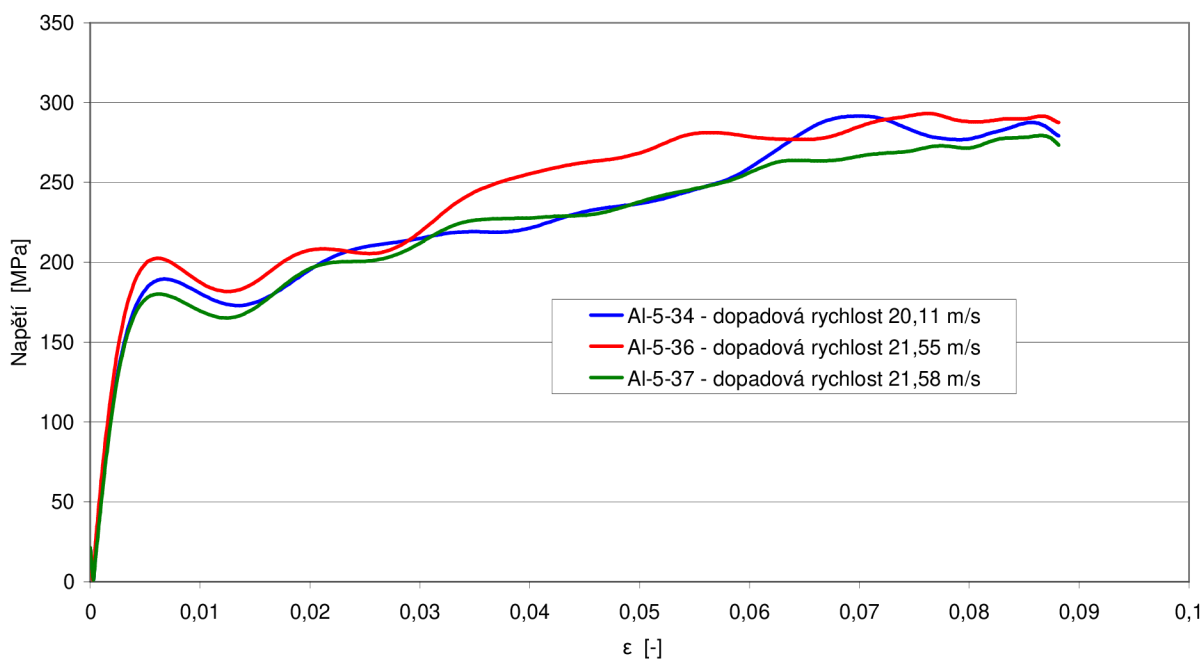
Obr.4.15 Srovnání plného a zjednodušeného vyhodnocení závislosti *napětí-deformace* nefiltrovaných hodnot pro vzorek Al-5-34.

Stejným způsobem byly vyhodnoceny i vzorky Al-5-36 a Al-5-37. Vyhodnocení vzorku Al-5-35 bylo znemožněno vnějšími rušivými vlivy, které spustily osciloskop dříve a průběhy jednotlivých pulzů nebyly zaznamenány. Pro vzájemné porovnání testovaných vzorků jsem zvolil pro závislost *napětí-deformace* zjednodušené vyhodnocení z filtrovaných hodnot a pro

závislost *rychlost deformace-deformace* plně vyhodnocení filtrovaných hodnot. Obrázky 4.16 a 4.17 zobrazují průběhy závislostí pro jednotlivé vzorky.



Obr.4.16 Srovnání závislostí *rychlost deformace-deformace* vzorků Al-5-34, Al-5-36 a Al-5-37.



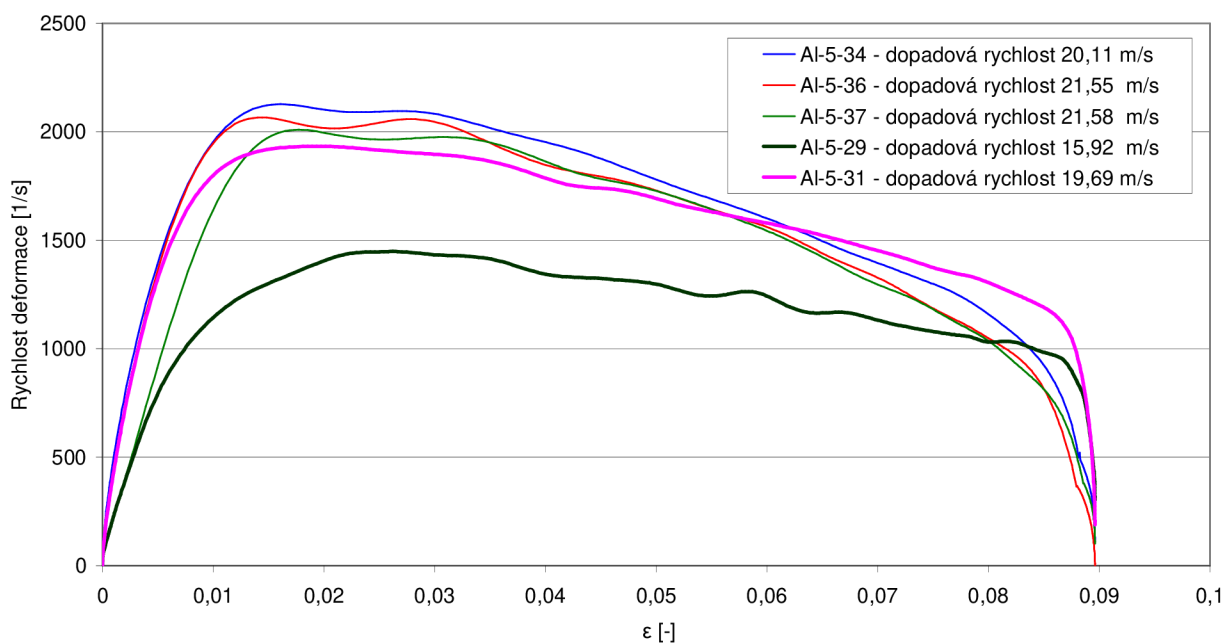
Obr.4.17 Srovnání závislostí *napětí-deformace* vzorků Al-5-34, Al-5-36, Al-5-37.

Pro kontrolu správnosti měření byla využita možnost srovnání současného měření s měřeními provedenými již dříve a stejným způsobem byly vyhodnoceny vzorky, které byly podrobeny experimentu nezávisle jeden na druhém. Vzorek s označením Al-5-31, který měl podobnou dopadovou rychlost jako námi zkoušené vzorky a vzorek s označením Al-5-29 s dopadovou rychlostí nižší. Rozměry a podmínky zatěžování těchto přídatných vzorků jsou v tabulce 4.4.

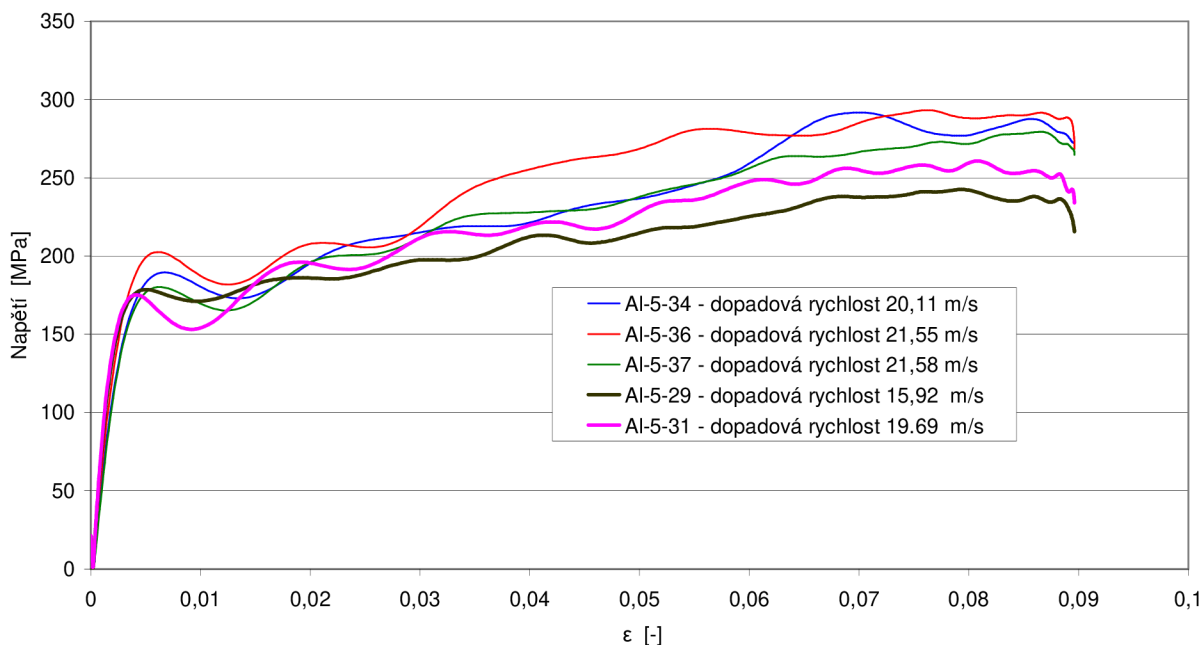
Tabulka 4.4 Rozměry přídatných vzorků a podmínky jejich zatěžování.

Označení vzorku	průměr [mm]		délka [mm]		Deformace		rychlost			Délka Impaktoru [mm]
	d_0	d_1	b_0	b_1	ϵ_b	ϵ_f	plnění	rychlost		
							t_p [s]	t_v [μ s]	v [m/s]	
Al-5-29	8,990	9,398	8,950	8,190	-0,0849	0,0928	10	942	15,92	150B
Al-5-31	8,990	9,580	9,050	7,970	-0,1193	0,1355	18	762	19,69	150B

Na následujících dvou grafech (obr.4.18 a obr.4.19) je znázorněno srovnání závislostí *napětí-deformace* a *rychlost deformace-deformace* pro vzorky testované v rámci diplomové práce se vzorky testovanými v rámci výuky.



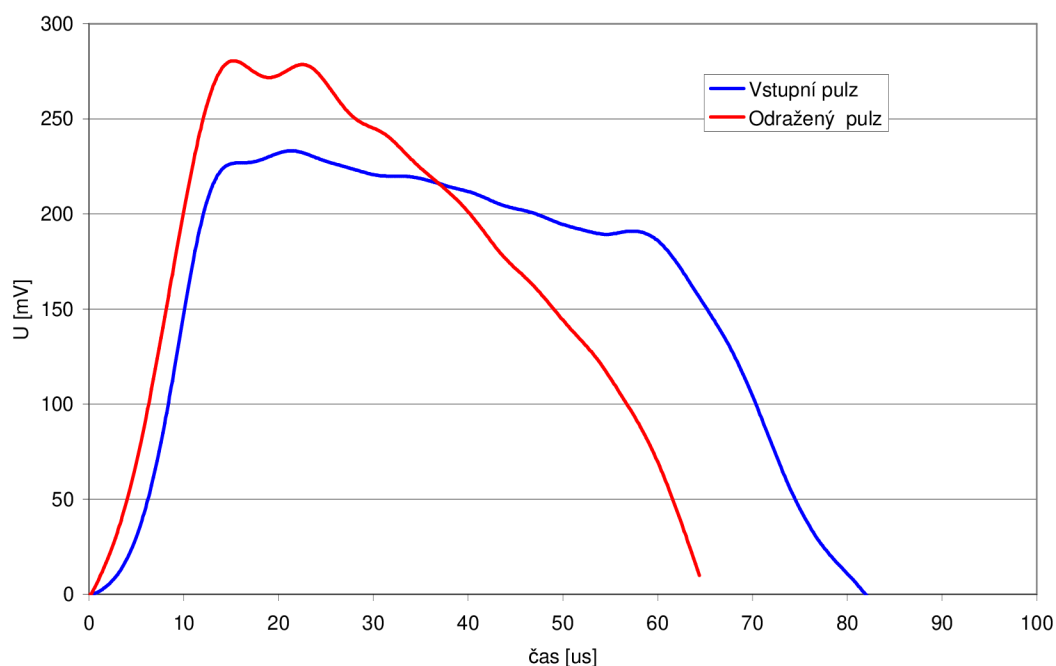
Obr.4.18 Závislost rychlost deformace-deformace, srovnání s přídatnými vzorky.



Obr.4.19 Závislost *napětí-deformace*, srovnání s přidavnými vzorky.

4.6 Zhodnocení výsledků

Jak je vidět z posledního grafu (obr 4.19), který srovnává provedený experiment s předchozím testováním daného materiálu, průběh i dosažené hodnoty jsou téměř srovnatelné. Mez kluzu je relativně výrazná a při vyšších rychlostech deformace se pohybuje v hodnotách cca od 170 do 200 MPa. Změna průměrné rychlosti deformace ji nijak výrazně neovlivňuje. Po překročení meze kluzu materiál pozvolna zpevňuje. K podobným výsledku dospěli i autoři v [18]. V našem případě jde však o vyhodnocení zjednodušené, kterým se daná závislost získá pouze z prošlého pulzu. Plné vyhodnocení bylo, u všech námi testovaných vzorků v rámci této práce, znemožněno zřejmě chybou měření odraženého pulzu. Odražený pulz totiž jak dokládá obr.4.20, dosahuje vyšších hodnot než pulz zatěžující, což je z energetického hlediska nemožné.



Obr.4.20 srovnání zatěžujícího a odraženého pulzu.
(hodnoty zatěžujícího pulzu jsou pro lepší ilustraci v absolutní hodnotě !)

4.7 Doporučení

Pro vyjasnění těchto nesrovnalostí by bylo vhodné experiment zopakovat se stejnými podmínkami zatěžování a následně je porovnat s výsledky dosaženými v této práci. Ke zpřesnění, nebo spíše k lepší srovnatelnosti získaných výsledků, by pomohlo, pokud by bylo možné zvolit přesnou velikost dopadové rychlosti projektilu a tím pádem opakovat měření za totožných podmínek, což momentálně není zcela možné. Je to způsobeno tím, že odpalovací zařízení je ovládáno manuálně a i malé prodlení (nebo naopak předstih) odpalu, při drobných netěsnostech zařízení, způsobí rozdílné dopadové rychlosti při stejné době plnění vzdušníku. Řešením by bylo provádět odpal na základě aktuálního tlaku vzduchu. Vzdušník by se tedy mírně přetlakoval a odpal by byl proveden elektronicky, např. pomocí tlakového čidla umístěného do vzdušníku, při poklesu tlaku na hodnotu odpovídající požadované dopadové rychlosti.

5. ZÁVĚR

V dnešní době se používají k měření termomechanických veličin všechny uvedené způsoby měření. Pro měření síly jsou nejpoužívanější tenzometrické, kapacitní a piezoelektrické snímače. Každá z těchto metod má své pro i proti. Tenzometrické snímače jsou sice nejlevnější, ale záznam jimi pořízený je silně ovlivněn šumy napájecího napětí. Ty jsou zesíleny spolu se signálem a měření je jimi do značné míry ovlivněno. U kapacitních snímačů jsou tyto šumy částečně odfiltrovány přímo snímačem, ale i přesto je záznam mírně ovlivněn. Co se přesnosti týče jsou na tom nejlépe snímače piezoelektrické, které napájecí napětí nepotřebují, jejich cena je však mnohonásobně vyšší než cena snímačů tenzometrických a kapacitních.

K měření rychlosti a dráhy se pro svou univerzálnost využívají zařízení, kterými je možné měřit obě tyto veličiny současně. Jedná se převážně o optické snímače, snímače s magnetickým páskem nebo magnetostrikční snímače. Přesnost a rychlost záznamu se neustále zvyšuje. Například nejmodernější optické snímače polohy pracují v rychlostech posuvu až 10 m/s s rozlišením 5 nm pro lineární i rotační aplikace.

Měření teploty je většinou realizováno bezdotykovými způsoby měření pyrometry, infračervenými čidly nebo termovizními kamerami. Výhody těchto zařízení jsou kromě jejich přesnosti hlavně v mobilitě a možnosti měření teplot pohybujících se předmětů přímo při provozu. Dotykovými zařízeními to není vždy realizovatelné. U vysokorychlostních procesů, při dynamických testech mechanických vlastností (SHPBD, TAT), se používají k měření rychlosti fotodiodové hradla a k měření deformačních sil tenzometrické a kapacitní snímače, které by však bylo vhodnější nahradit piezoelektrickými snímači. Teploty se podle možností měří dotykovými termočlánky nebo infračerveným čidlem. U TAT je naopak využívána bezdotyková sonda snímající teplotu povrchu vzorku při dopadu na kovadlinu.

Vyhodnocení Hopkinsonova testu, v druhé části diplomové práce, bylo provedeno v programu, který jsem vytvořil v aplikaci Microsoft Office Excel 2003. Program, po vložení výstupních hodnot ze software SCOPE 5.5 a jejich korekci, provede výpočet a vykreslení grafů požadovaných závislostí (rychlost deformace-deformace, napětí-deformace) a jejich srovnání. V programu je možné flexibilně měnit podmínky vstupů a aplikovat jej tak pro různé druhy testovaných materiálů.

Z vlastního vyhodnocení vyplývá, že hliníková slitina AlMg4,5Mn0,7-EN AW 5083, při dynamickém zatěžování, je na změnu tvářecí rychlosti méně citlivá. Výrazná mez kluzu se s vlivem rychlosti deformace mírně zvyšuje a pohybuje se v hodnotách od 170 do 200 MPa. Po jejím překročení materiál pozvolna zpevňuje a v rozmezí rychlosti dopadu impaktoru asi 16 až 22 m/s se navýší asi o 50 MPa. Hodnoty získané při experimentu jsou srovnatelné s výsledky získanými při testování daného materiálu již v minulosti, což dokazuje jejich věrohodnost.

I když by bylo testovací zařízení možné v některých ohledech zdokonalit, můžeme při jeho stávajícím stavu konstatovat, že je dostatečně přesné a spolehlivé pro získání věrohodných a prokazatelných výsledků.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ČERNORSKÝ, Jiří. Kovové tenzometry. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007, 3, [cit. 2010-05-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/merici-technika-mechanickych-velicin-s-kovovymi-tenzometry>>.
2. DRASTÍK, F.; ELFMARK, J. *Plastomery a tvařitelnost kovů*. Vyd. 1. Praha 1 : Nakladatelství technické literatury, 1977. 392s. Typové číslo-L13-B3-IV-1/22490.
3. KADLEC, Karel. Snímače tlaku : principy, vlastnosti a použití (část 3) . *Automa : časopis pro automatizační techniku*, [online]. 2007, 10, [cit. 2010-05-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/download/automa/2007/au100723.pdf>>.
4. ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličin*. Vyd. 1. Praha 1 : N, 1977. 400 s. Typové číslo-L26- B3-IV/41/52210.
5. Střední průmyslová škola Zlín. *Studijní materiály : Automatizační prostředky II* [online], [cit. 2010-05-13]. Dostupný z WWW: <www.spszl.cz/modules/wfdownloads/visit.php?cid=8&lid=42>.
6. KABEŠ, Karel . Magnetostrikční snímače vzdálenosti. *Automa : časopis pro automatizační techniku* [online]. 2007, 04, [cit. 2010-05-13]. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34229>.
7. PROFESS, spol. s r.o.. *Katalogové listy : Lineární snímač polohy Temposonics EP* [online], [cit. 2010-05-13]. Dostupný z WWW: <http://www.profess.cz/pdf_pci_cz/TemposonicEP.pdf>.
8. REM-Technik s.r.o. *Firemní katalog : Polohové sensory* [online], [cit. 2010-05-13]. Dostupný z WWW: <http://www.rem-technik.cz/pdf/ASM_senzory_cz.pdf>.
9. VLČEK, Jan. Lineární optické snímače polohy. *Automa : časopis pro automatizační techniku* [online]. 2006, 5, [cit. 2010-05-13]. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=31121>.
10. TME Czech Republic s.r.o. *Firemní katalog: Fóliové tenzometry* [online].[cit. 2010-05-17]. Dostupné z WWW: <http://www.tme.eu/html/CZ/foliove-tenzometry/ramka_2261_CZ_pelny.html#>
11. KAISER, A.M. *Advancement in the Split Hopkinson Bar Test*. Master of Science Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. May 1, 1998
12. FOREJT, Milan ; ŠLAIS, Miroslav . Optimalizace parametrů Hopkinsonova kompresního testu : In . *Akta Mechanica Slovaca*. 2006. s. 514. ISSN 1335-2393.

13. FOREJT, Milan. *Experimentální metody : Syllabus* [online]. Brno : Není, 2003 [cit. 2010-05-13]. Zjišťování dynamických mechanických vlastností materiálů metodou Hopkinsonova testu, s. . Dostupné z WWW:
<http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/cviceni_soubory/experimentalni_metody__cviceni__forejt_piska_humar_janicek.pdf>.
14. *Allvac® VascoMax® C-350 Specialty Steel, Heat Treatment: 927°C (1700°F)*. [online]. 1996 [cit. 2010-05-13]. Dostupný z WWW:
<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9308dabcceed414f91727c4c748e764f>
15. *ALIMEX 5083 O/H111Aluminum Alloy Rolled* [online]. 1996 [cit. 2010-05-13]. Dostupný z WWW:
<<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d7f7fef2bf32408ba7d80f7c93a890ac&ckck=1>>.
16. MILAN, Forejt, et al *Mechanické vlastnosti vybraných ocelí za vyšších rychlostí deformace* : (Databáze materiálových modelů k predikci chování materiálů v tvářecím procesu) [online], 2004 [cit. 2010-05-15]. Dostupné z WWW:
<http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/databaze_modelu_soubory/uvod.pdf>.
17. ŠLAIS, Miroslav, FOREJT, Milan, BĚLSKÝ, Petr. Dynamical Behaviour of Aluminium Alloys under Repeated Loading: In . *Acta Mechanica Slovaca*. 2008, roč.12, s.473-478. ISSN 1335-2393
18. ŠLAIS, Miroslav, FOREJT, Milan, BĚLSKÝ, Petr Chování hliníkových slitin za podmínek dynamického zatěžování. *Kovárenství*. 2008 (33). p.107-110. ISSN 1213-9289.
19. PRIMAPOL-METAL-SPOT s.r.o. *Produkty - Hliníkové desky : AlMg4,5Mn0,7 - EN AW 5083* [online]. [cit. 2010-05-13]. Dostupné z WWW:
<<http://www.primapol.cz/almg4-5mn0-7-en-aw-5083.html>>.
20. KREIDL, Marcel. *Měření teploty : Senzory a měřící obvody*. Vyd. 1. Praha : BEN-technická literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.
21. VDOLEČEK, František. *TECHNICKÁ MĚŘENÍ : (Text pro podporu výuky v kombinovaném studiu)* [online]. Brno 2002 [cit. 2010-05-22]. Dostupné z WWW:
<<http://autnt.fme.vutbr.cz/lab/a1-731a/ETC.pdf>>.
22. JAKAR ELECTRONICS, spol. s r.o. *Katalogové listy : OS530 "E" Série* [online], [cit. 2010-05-15]. Dostupný z WWW:
<http://www.omegaeng.cz/ppt/pptsc.asp?ref=OS532E_OS533E_OS534E&Nav=temj04>.

23. JAKAR ELECTRONICS, spol. s r.o. Katalogové listy : OS137 Série [online], [cit. 2010-05-15]. Dostupný z WWW:
<http://www.omegaeng.cz/ppt/pptsc.asp?ref=OS137&Nav=temj09>
24. AHLBORN měřicí a regulační technika spol. s r.o. *Prospekt : Termokamery* [online]. [cit. 2010-05-20]. Dostupný z WWW:
<<http://www.termokamery.cz/download/File/TI%2025%20TI%2010.pdf>>.
25. KISTLER, s.r.o. Quartz Force Link, ± 20 kN : Type 9301B . *Produkty* [online]. [cit. 2010-05-20]. Dostupný z WWW:
<http://www.kistler.com/br_en-ex/13_Productfinder/App.9301B/Quartz-Force-Link-20-kN.html>.
26. SPOLEČNOST A.P.O. - ELMOS v.o.s. *Katalogový list : Optris CT* [online]. [cit. 2010-5-23]. Dostupné z WWW:
<http://www.apoelmos.cz/cz/kat-pdf/1_ct.pdf>.
27. SEO, Sangwon; MIN, Oakkey; YANG, Hyunmo. Constitutive equation for Ti-6Al-4V at high temperatures measured using the SHPB technique. *International Journal of Impact Engineering* . 2005, 31, s. 20.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Označení	Legenda	Jednotka
A	tažnost	[%]
a	vzdálenost	[mm]
B	indukčnost pole	[H]
b_1	délka vzorku - konečná	[mm]
b_0	délka vzorku - počáteční	[mm]
C_{k0}	Kapacita v klidovém stavu	[F]
C_0	rychlost šíření elastické vlny	[m/s]
$D_{tyč}$	průměr zkušební tyče	[mm]
D_s	okamžitý průměr	[mm]
d_0	průměr vzorku-počáteční	[mm]
d_1	průměr vzorku-konečný	[mm]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
F	síla	[N]
$F_{stř}$	síla střední	[N]
F_1	síla (vstupní tyče)	[N]
F_2	síla (výstupní tyče)	[N]
HB	tvrdost Brinella	[-]
HRC	tvrdost Rockwella	[-]
HV	tvrdost Vickerse	[-]
I	proud	[A]
l	délka	[mm]
L	délka vzorku	[mm]
L_0	délka impaktoru	[mm]
L_1	délka vstupní tyče	[mm]
R_e	napětí na mezi kluzu	[MPa]
R_m	napětí na mezi pevnosti	[MPa]
R_x	odpor potenciometru	[Ω]
R_z	zatěžující odpor	[Ω]
R_1	poloměr vstupní tyče	[mm]
R_2	vnitřní poloměr kapacitního snímače	[mm]
S	plocha	[mm ²]
t	čas	[s], [μ s]
T	doba trvání pulzu	[μ s]
T_m	měřená teplota	[°C]
T_0	teplota okolí	[°C]
t_p	doba plnění vzdušníku	[μ s]
T_s	srovnávací teplota	[°C]
u	napětí na vodiči	[V]
U	napětí	[V], [mV]
U_0	napětí na kondenzátoru (snímač)	[V]
U_1	napájecí napětí	[V]
U_2	měřené napětí	[V]
v	rychlost	[m/s]
v_{roz1}	rychlost pohybu rozhraní vstupní tyč-vzorek	[m/s]
v_{roz2}	rychlost pohybu rozhraní výstupní tyč-vzorek	[m/s]

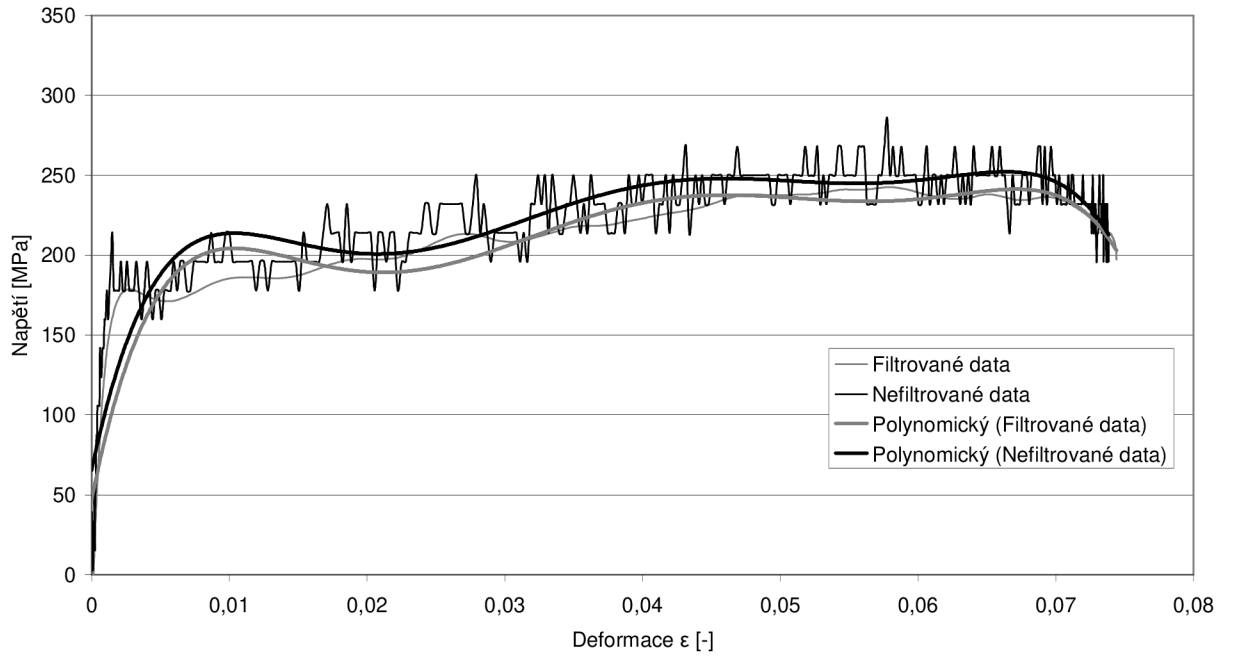
x	vzdálenost	[mm]
y	vzdálenost	[mm]
Z	zúžení- kontrakce	[%]
δR	Rozdíl poloměrů	[mm]
δU	rozdíl napětí	[V]
ε	poměrné deformace	[-]
$\dot{\varepsilon}$	rychlost deformace	[s ⁻¹]
ε_i	deformace způsobená zatěžujícím (vstupním) pulsem	[-]
ε_r	deformace způsobená odraženým pulsem	[-]
$\varepsilon_{stř}$	střední deformace	[-]
$\dot{\varepsilon}_{stř}$	střední deformace	[s ⁻¹]
ε_t	deformace způsobená prošlým pulsem	[-]
μ	poissonova konstanta	[-]
ξ	permitivita vakua	[F.m ⁻¹]
σ_i	napětí způsobené zatěžujícím (vstupním) pulsem	[MPa]
σ_r	napětí způsobené odraženým pulsem	[MPa]
$\sigma_{stř}$	střední napětí	[MPa]
σ_t	napětí způsobené prošlým pulsem	[MPa]
φ	logaritmická deformace	[-]

SEZNAM PŘÍLOH

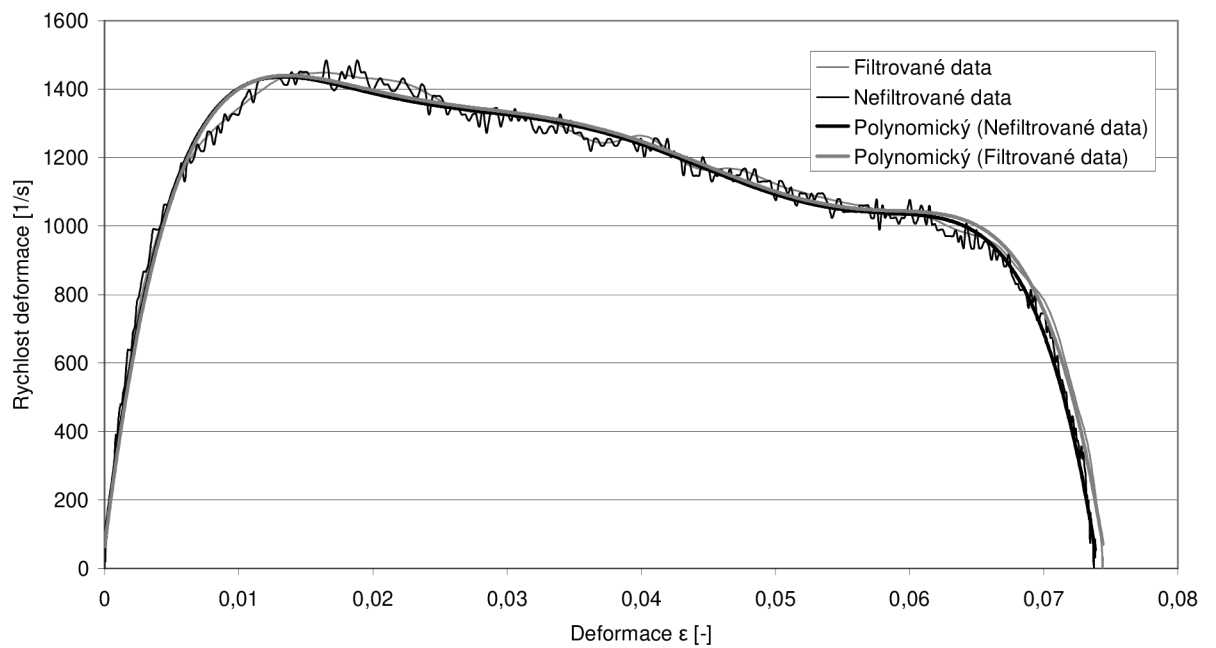
- Příloha 1:** a) Grafy srovnání průběhů *rychlost deformace-deformace a napětí deformace* pro vzorek Al-5-29
b) Grafy srovnání průběhů *rychlost deformace-deformace a napětí deformace* pro vzorek Al-5-31
c) Grafy srovnání průběhů *rychlost deformace-deformace a napětí deformace* pro vzorek Al-5-34
d) Grafy srovnání průběhů *rychlost deformace-deformace a napětí deformace* pro vzorek Al-5-36
e) Grafy srovnání průběhů *rychlost deformace-deformace a napětí deformace* pro vzorek Al-5-37
- Příloha 2:** a) protokol měření pro vzorek Al-5-29
b) protokol měření pro vzorek Al-5-31
c) protokol měření pro vzorek Al-5-34
d) protokol měření pro vzorek Al-5-36
e) protokol měření pro vzorek Al-5-37
- Příloha 3:** Materiálový list pro AlMg4,5Mn0,7- EN AW 5083 (www.primapol.cz)
Příloha 4: Materiálový list pro AlMg4,5Mn0,7- EN AW 5083 (www.matweb.com)
Příloha 5: Materiálový list pro Vascomax C350
Příloha 6: Materiálový list pro Vascomax T300

PŘÍLOHA 1a

AI-5-29
Napětí-deformace
"zjednodušené vyhodnocení deformace"

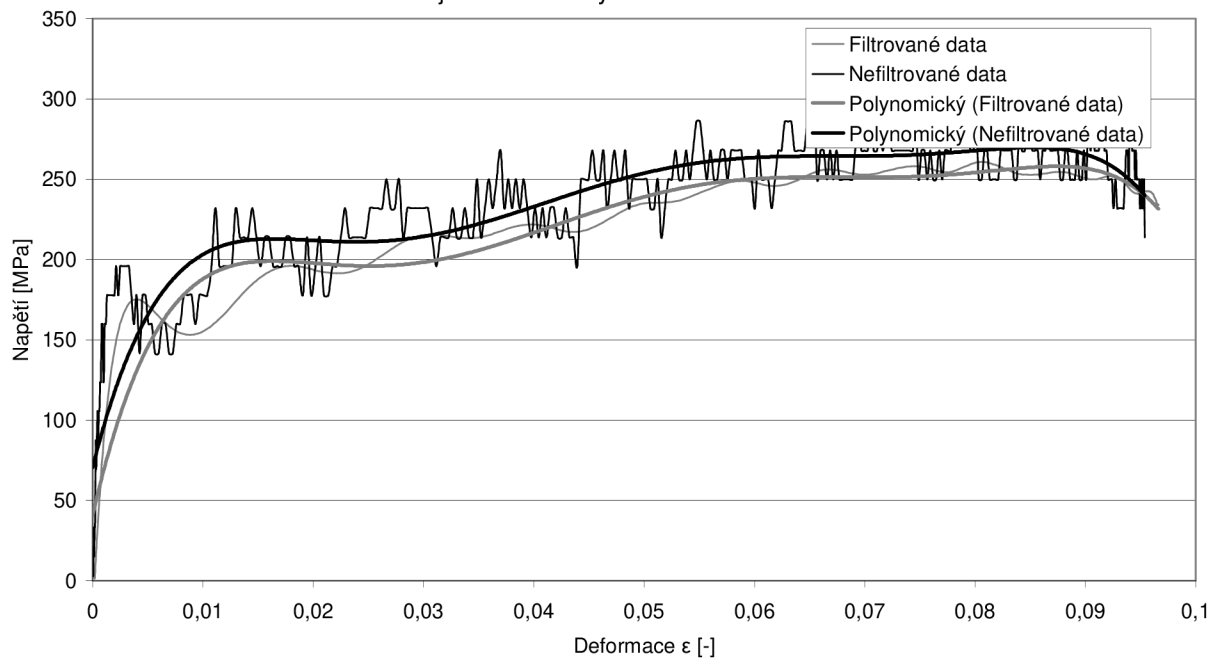


AI-5-29
Rychlost deformace - deformace
"plné vyhodnocení"

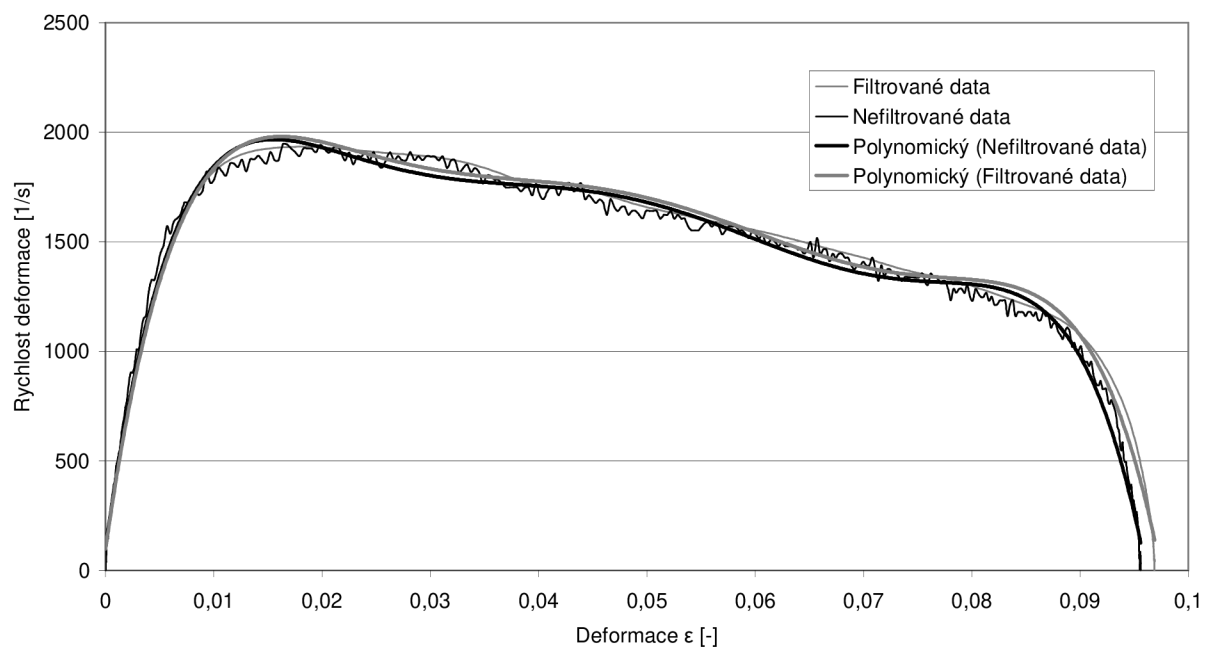


PŘÍLOHA 1b

Al-5-31
Napětí-deformace
"zjednodušené vyhodnocení deformace"

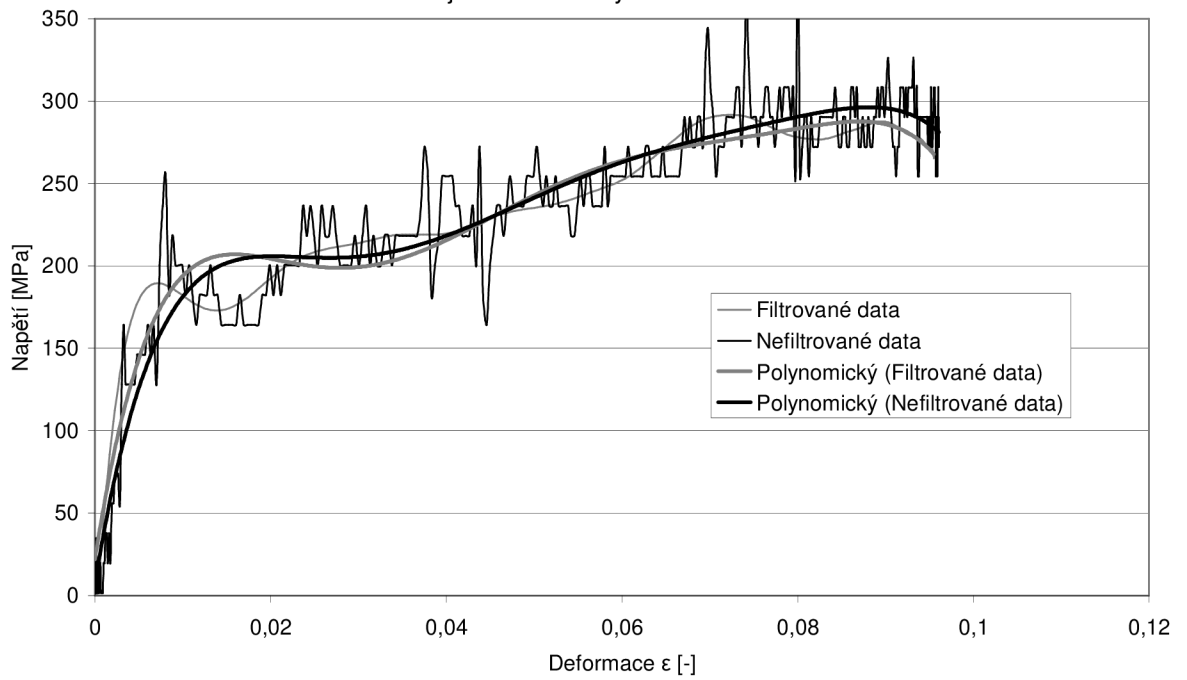


Al-5-31
Rychlost deformace - deformace
"plné vyhodnocení"

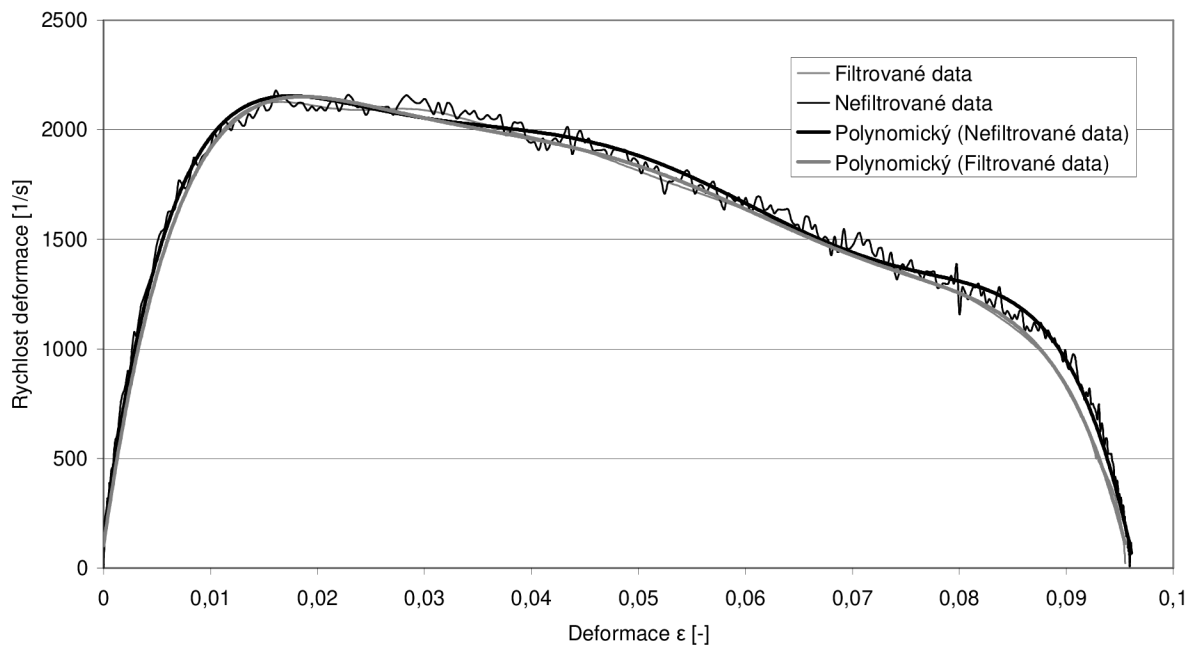


PŘÍLOHA 1c

Al-5-34
Napětí-deformace
"zjednodušené vyhodnocení deformace"

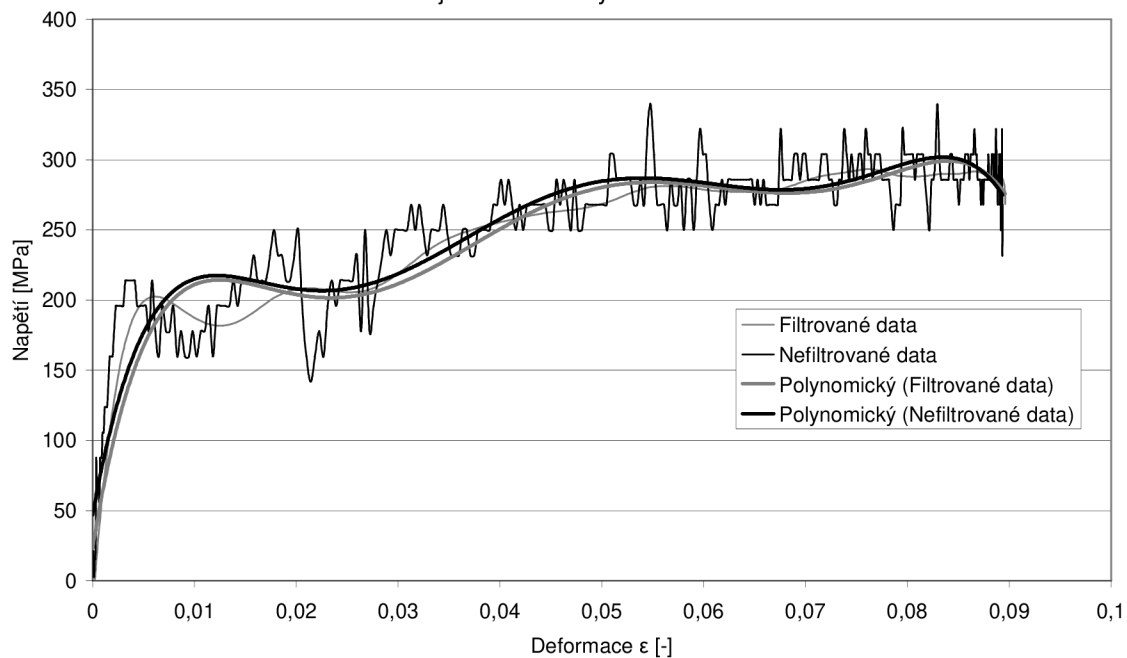


Al-5-34
Rychlost deformace - deformace
"plné vyhodnocení"

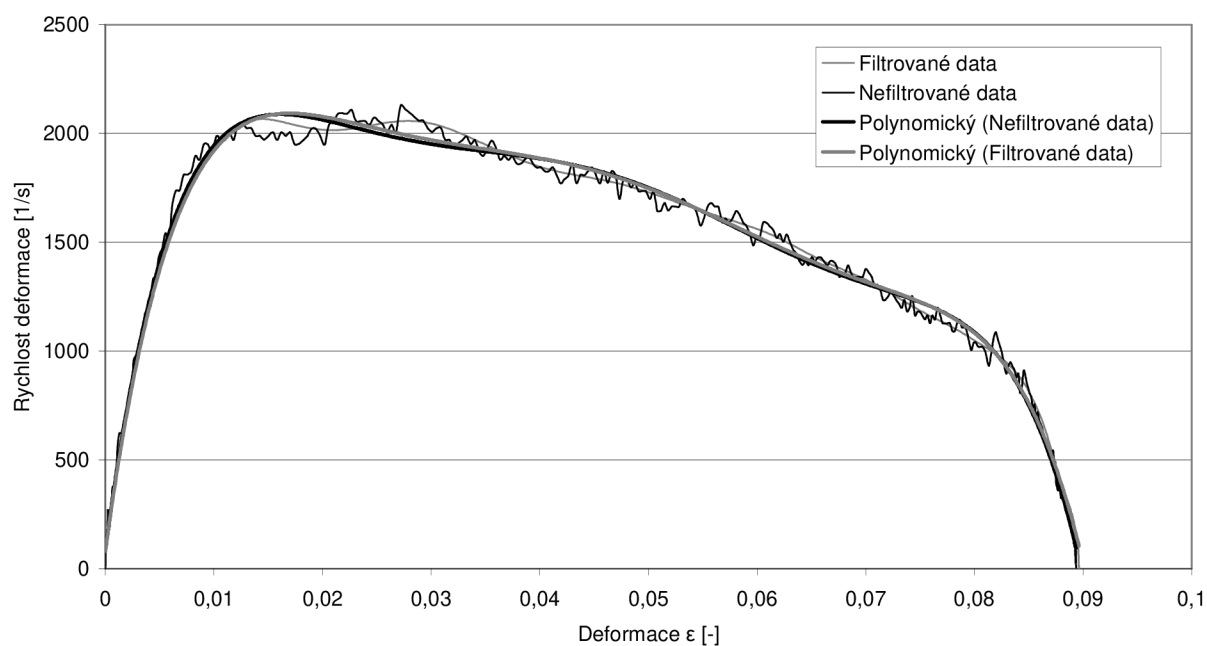


PŘÍLOHA 1d

Al-5-36
Napětí-deformace
"zjednodušené vyhodnocení deformace"

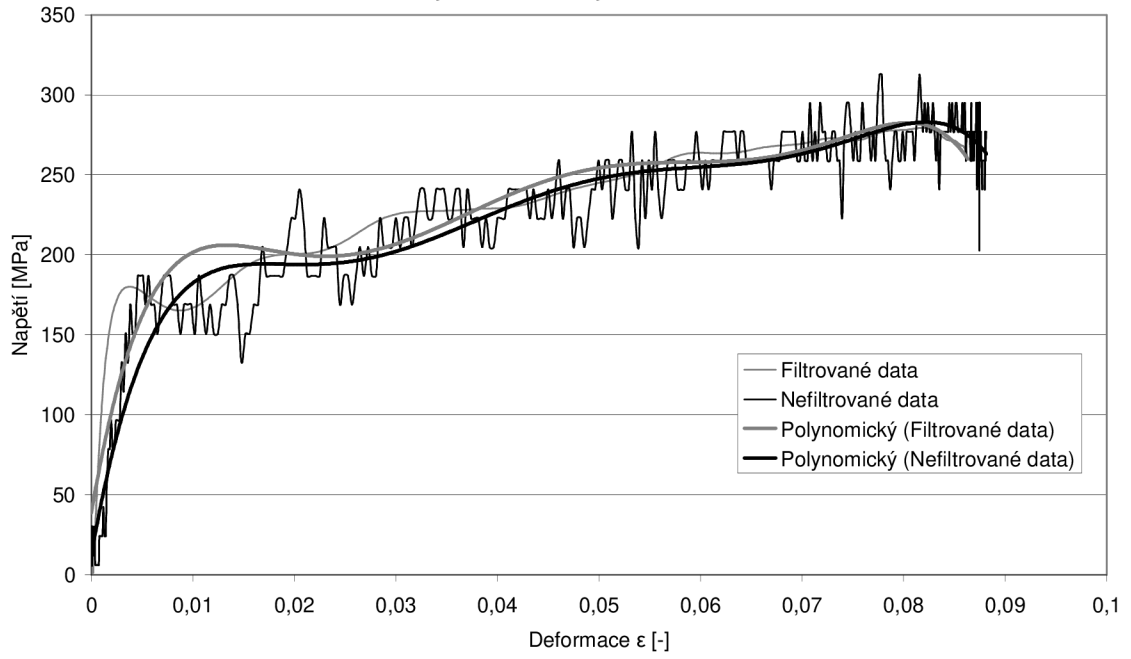


Al-5-36
Rychlost deformace - deformace
"plné vyhodnocení"

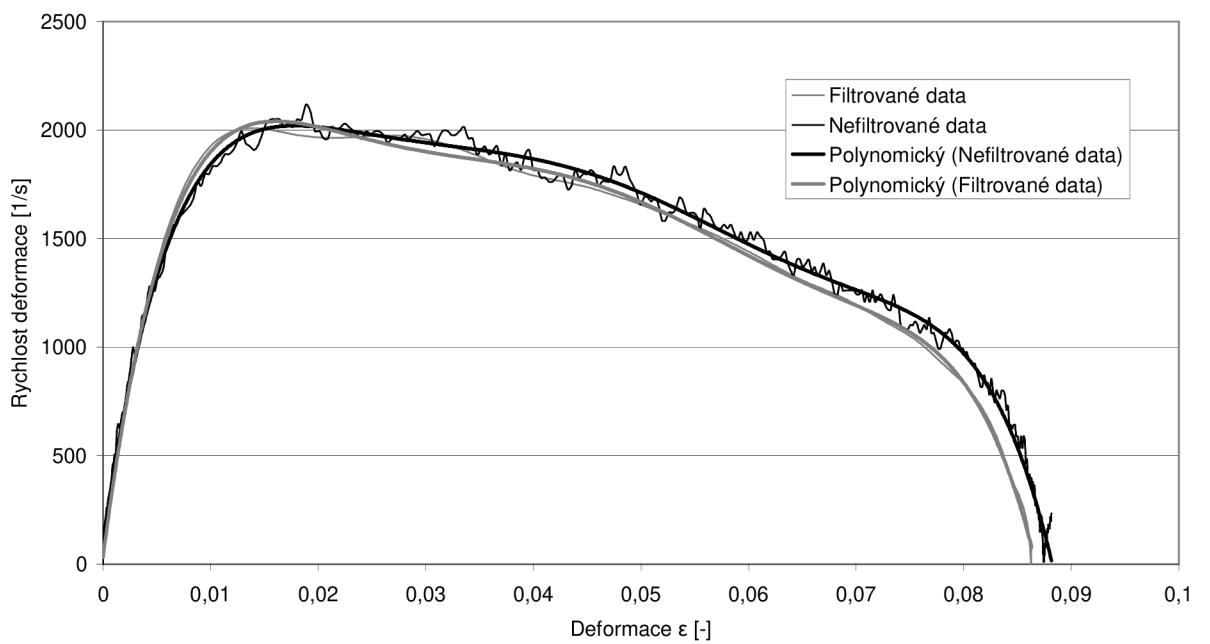


PŘÍLOHA 1e

Al-5-37
Napětí-deformace
"zjednodušené vyhodnocení deformace"



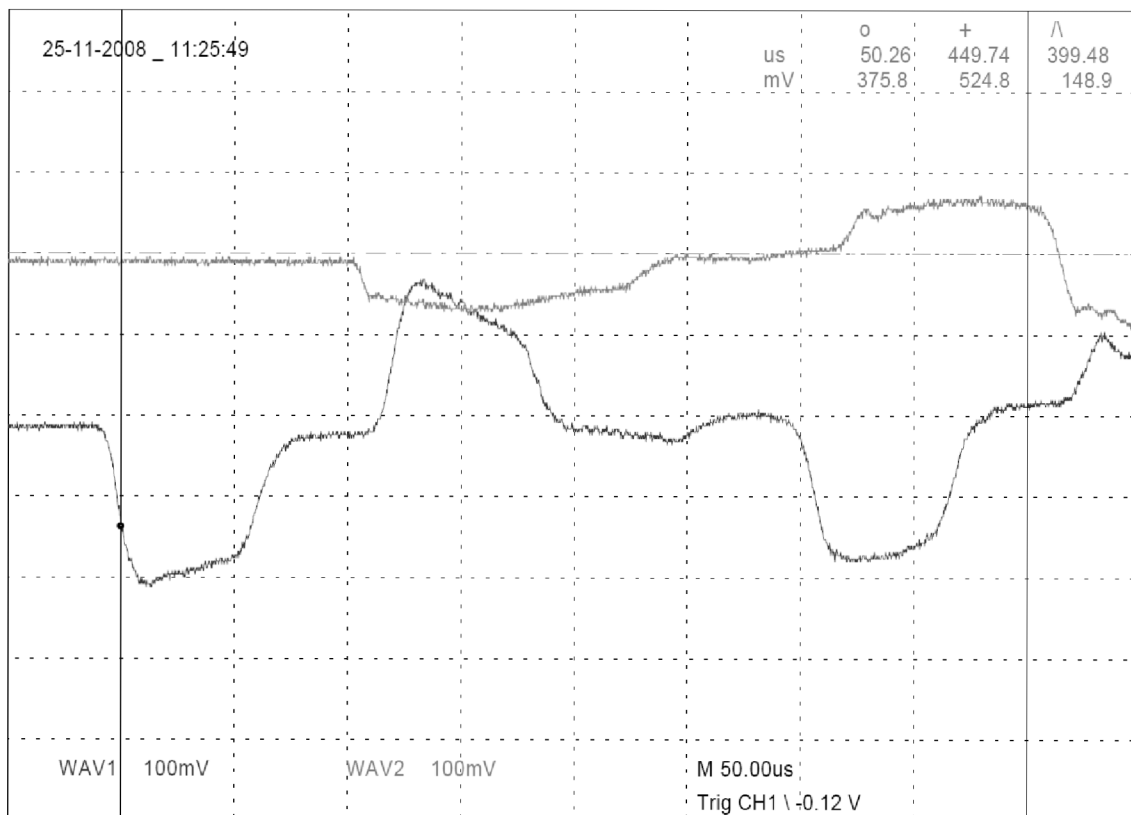
Al-5-37
Rychlost deformace - deformace
"plné vyhodnocení"



PŘÍLOHA 2a

Scope 5.5 digitální osciloskop
Tektronix TDS 210 - 3

Cvičení ExM č.v. AI5-29 (AA-5083 H111)

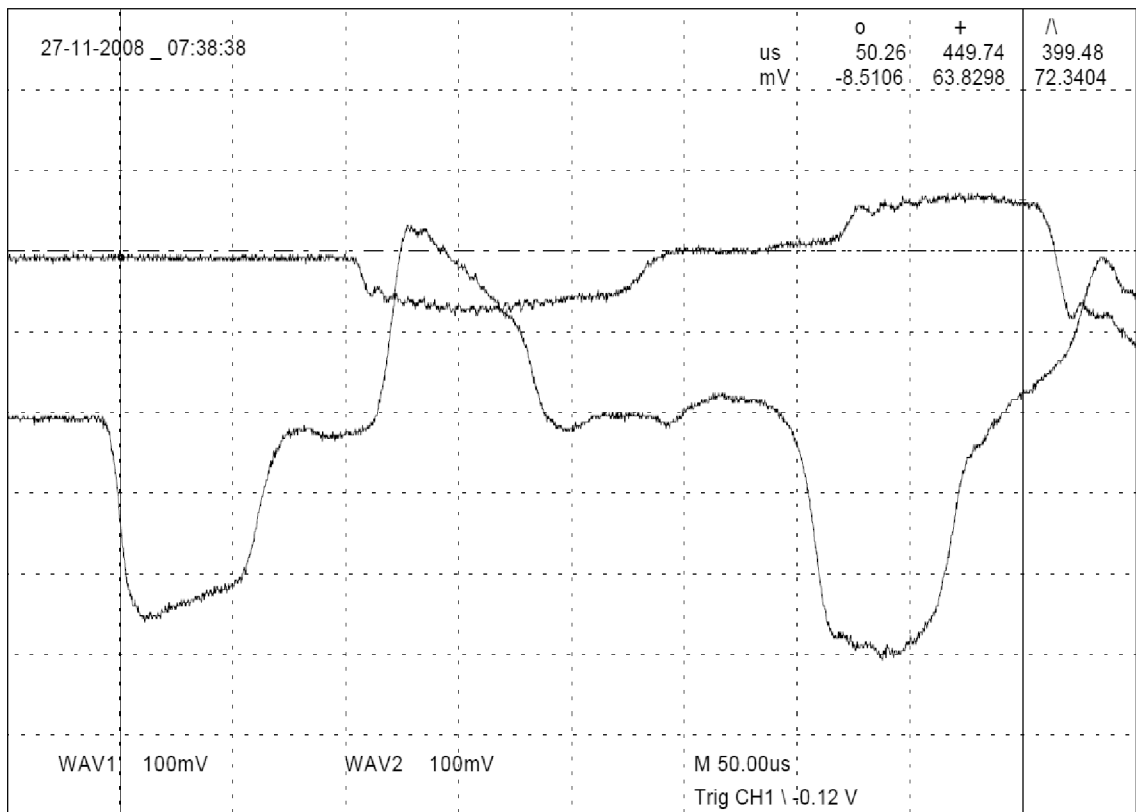


do=8,99mm, d1max=9,62 d1=
 bo=8,95mm, b1=8,19mm
 tp=10s, tv=942us, v= 15,92 m/s
 To=23 oC, ImpB=150mm

PŘÍLOHA 2b

Scope 5.5 digitální osciloskop
Tektronix TDS 210 - A15-31 b

Cvičení ExM č.v. A15-31 (AA-5083 H111)



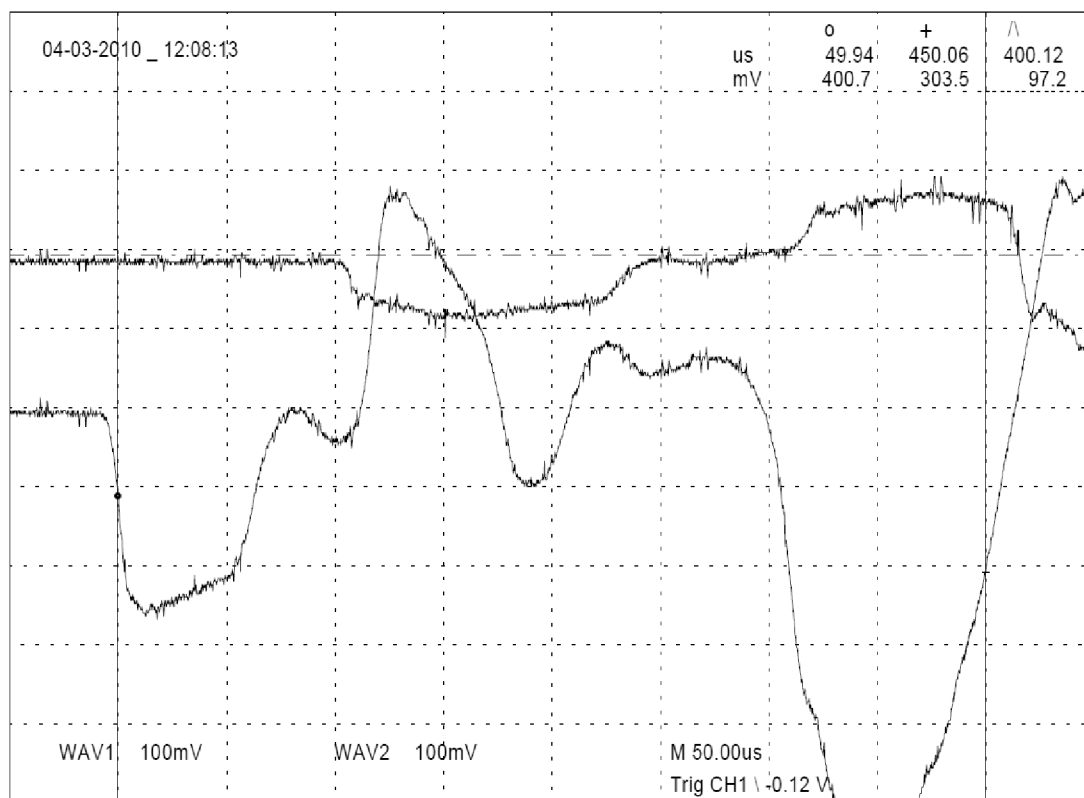
do=8,99mm, d1max=10,11mm
 bo=9,05mm, b1=7,77mm
 tp=18s, tv=762us, v= 19,69 m/s
 To=22 oC, ImpB=150mm

PŘÍLOHA 2c

Scope 5.5 digitální osciloskop
Tektronix TDS 210 - xxx

AI 5-34 (AA-5083 H111) Knebl-Forejť

FORMING
Institute of Manufacturing
Technology FME BUT
Prof. Milan Forejť
VUT FSÍ



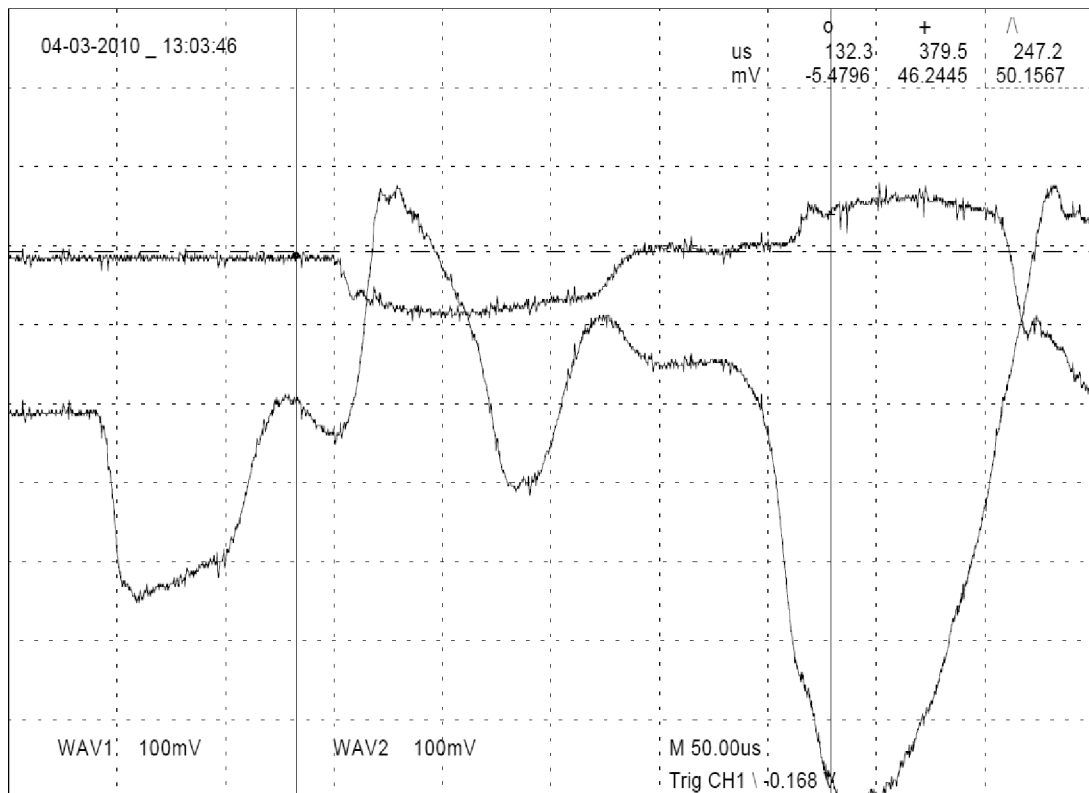
do=9,013 mm, d1= 9, 79 mm
bo=9,044 mm, b1= 7,665 mm
tp= 25s, tv=746 um, v=20,107m/s
To=21°C, ImpB=150mm

PŘÍLOHA 2d

Scope 5.5 digitální osciloskop
Tektronix TDS 210 - A15-36-4-3-2010-filtrovana-b

FORMING
Institute of Manufacturing
Technology FME BUT
Prof. Milan Forejt
VUT FSJ

A1 5-36 (AA-5083 H111) Knebl-Forejť



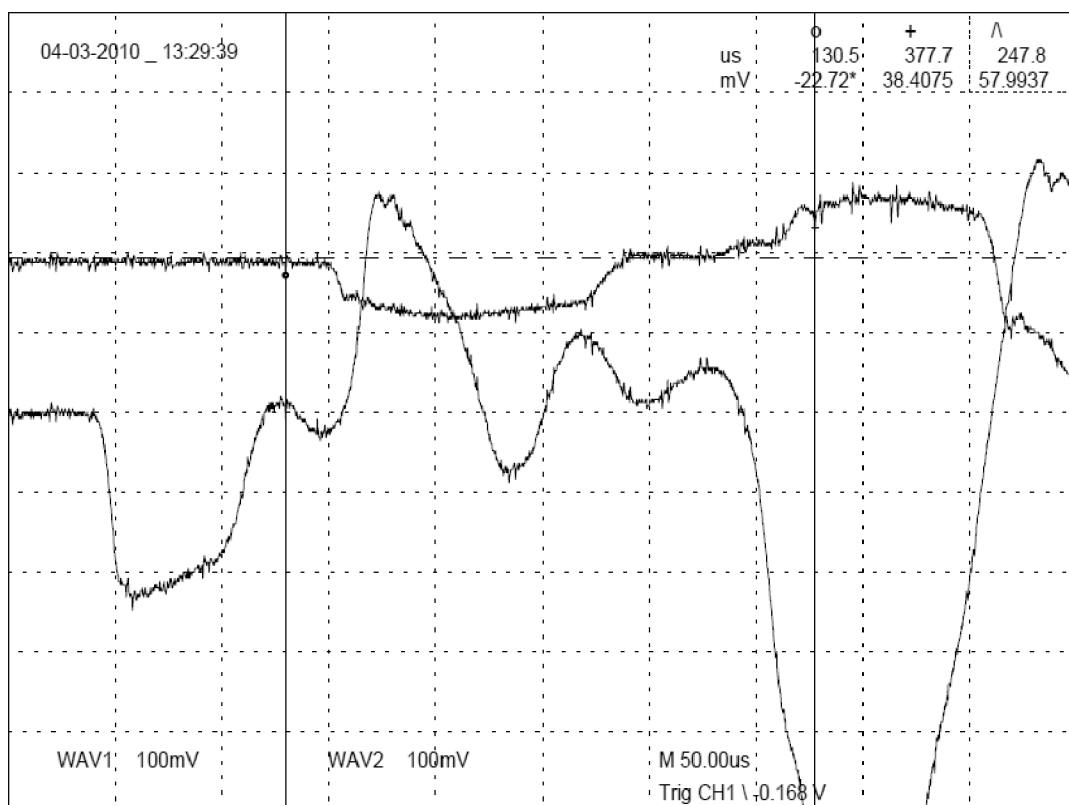
do=9,014 mm, d1= 9, 886 mm
bo=9,055 mm, b1= 7,528 mm
tp= 30s, tv=696 um, v=21,55m/s
To=21°C, ImpB=150mm

PŘÍLOHA 2e

Scope 5.5 digitální osciloskop
Tektronix TDS 210 - AI5-37-4-3-2010-filtr-b

AI 5-37 (AA-5083 H111) Knebl-Forejť

FORMING
Institute of Manufacturing
Technology FME BUT
Prof. Milan Forejť
VUT FSI



do=9,001 mm, d1= 9,893 mm
bo=9,053 mm, b1= 7,494 mm
tp= 30s, tv=695 um, v=21,58m/s
To=21°C, ImpB=150mm

PŘÍLOHA 3

AlMg4,5Mn0,7 – EN AW 5083

Jedná se o nevytvrditelnou slitinu střední pevnosti velmi dobře svařitelnou

Použití:

Strojírenství
Stavba jednoúčelových strojů
Stavba lodí
Svařované konstrukce
Formy na pěnové a gumové materiály
Prototypové formy
Základové desky střížných nástrojů
Stavba automobilů
Prototypy automobilů

Zpracovatelnost:

Svařitelnost TIG/MIG: vynikající
Přídavný materiál EN AW 5554, EN AW 5083 a EN AW 5356
Eloxovatelnost technická: vynikající
Eloxovatelnost dekorativní: podmíněná
Obrobitelnost: dobrá
Korozní odolnost v normální atmosféře: vynikající
Korozní odolnost v mořské atmosféře: vynikající

Fyzikální vlastnosti:

Hustota: 2,66 Kg/dm³
Tepelná vodivost: 105–120 W/mK
Elektrická vodivost: 15 – 17 MS/m
Koeficient tepelné roztažnosti (20–100 °C): 23,8.10⁻⁶ K⁻¹
Modul pružnosti: 71 000 MPa

Orientační mechanické vlastnosti dodávaných desek (stav H111):

Pevnost R_m: 270 MPa
Smluvní mez kluzu R_{p0,2}: 115 MPa
Tažnost A 50: 14%
Tvrdość: 65 HB

Chemické složení v %:

Si: max. 0,4
Fe: max. 0,4
Cu: max. 0,1
Mn: 0,4 – 1,0
Mg: 4,0 – 4,9
Cr: 0,05 – 0,25

Zn: max. 0,25

Ti + Zn: max. 0,15

Standardní vstupní rozměry desek pro dělení:

Tloušťky: 5,0 – 180 mm

(válcované desky až do tloušťky 300 mm, lité až do tloušťky 900 mm)

Šířky: 1020 mm 1270 mm 1520 mm

Délky: 2020 mm 2520 mm 3020 mm

Tolerance rozměrů: Pro celé desky dle EN 485–3. Pro řezané desky do tloušťky 180 mm +/- 0,2 mm na šířku i délku, tolerance tloušťky dle EN 485–3. Pro řezané desky nad 180 mm tolerance dle dohody.

Rovinnost desek: Dle EN 485 – 3.

Povrch desek: Válcovaný. Opatření oboustranně ochrannou folií je možné na objednávku.

PŘÍLOHA 4

ALIMEX 5083 O/H111Aluminum Alloy Rolled

Categories: [Metal](#); [Nonferrous Metal](#); [Aluminum Alloy](#); [5000 Series Aluminum Alloy](#)

Material Notes: Rolled aluminium material according to DIN EN standard.

Information provided by ALIMEX GmbH

Annealed and slightly strain-hardened

Key Words: EN AW-5083 (AlMg4,5MnO,7)

Vendors: No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	2.66 g/cc	0.0960 lb/in ³	

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	>= 70.0	>= 70.0	
Tensile Strength, Ultimate	>= 255 MPa	>= 37000 psi	Rm
Tensile Strength, Yield	>= 105 MPa	>= 15200 psi	Rp. 0.2%
Elongation at Break	<= 16.0 %	<= 16.0 %	
Modulus of Elasticity	70.0 GPa	10200 ksi	

Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.00000526 - 0.00000625 ohm-cm	0.00000526 - 0.00000625 ohm-cm	

Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	24.2 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ @Temperature 20.0 $^\circ\text{C}$	13.4 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^\circ\text{F}$ @Temperature 68.0 $^\circ\text{F}$	
Thermal Conductivity	110.0 - 140.0 W/m-K	763.4 - 971.6 BTU-in/hr-ft ² · $^\circ\text{F}$	

Descriptive Properties			
Corrosion Resistance			Very good
Machinability			Good
Protective Anodising		Good, not decorative	
Welding Properties (WIG, MIG)			Good

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's disclaimer and terms of use regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

PŘÍLOHA 5

Allvac® VascoMax® C-350 Specialty Steel, Heat Treatment: 927°C (1700°F) + Age

Categories: [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Maraging Steel](#)

Material Notes: Data provided by Allvac.

Applications: Missile components. Tooling. Spring wire for valve springs in high-performance internal combustion engines.

Key Words: Allvac, an Allegheny Teledyne Company; Maraging Steel, PWA 1091. PDS 10705Z2.

Vendors: [Click here to view all available suppliers for this material.](#)

Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	8.08 g/cc	0.292 lb/in ³	
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	529	529	Estimated from Rockwell C value for Brinell test with 3000 kg load/10 mm diameter ball
Hardness, Knoop	585	585	Estimated from Rockwell C value.
Hardness, Rockwell C	53	53	
Hardness, Vickers	559	559	Estimated from Rockwell C value.
Tensile Strength, Ultimate	2310 MPa	335000 psi	
Tensile Strength, Yield	2242 MPa	325200 psi	0.2% Offset
Elongation at Break	6.00 %	6.00 %	
Reduction of Area	25.0 %	25.0 %	
Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Aluminum, Al	0.10 %	0.10 %	
Carbon, C	0.020 %	0.020 %	
Cobalt, Co	12.0 %	12.0 %	
Iron, Fe	63.0 %	63.0 %	as balance
Manganese, Mn	0.050 %	0.050 %	
Molybdenum, Mo	4.80 %	4.80 %	
Nickel, Ni	18.5 %	18.5 %	
Phosphorous, P	0.0050 %	0.0050 %	
Silicon, Si	0.050 %	0.050 %	
Sulfur, S	0.0050 %	0.0050 %	
Titanium, Ti	1.40 %	1.40 %	

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's disclaimer and terms of use regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

PŘÍLOHA 6



TECHNICAL DATA SHEET

VASCOMAX® T-300

Physical Properties

Average Coefficient of Thermal Expansion (70-900° F)	7.4×10^{-6} in/in/°F
Modulus of Elasticity	27.8×10^5 psi
Density	.288 lbs/cu. in. (7.98 g/cc)
Critical Transformation Temperatures	
A_S	1238° F
A_F	1329° F
M_S	347° F

Nominal Analysis

Nickel	18.50
Molybdenum	4.00
Titanium	1.85
Aluminum	.10
Silicon	.10 max
Manganese	.10 max
Carbon	.03 max
Sulfur	.010 max
Phosphorus	.010 max

Nominal Annealed Properties

Hardness	30/32 Rc
Yield Strength	110 ksi
Ultimate Strength	150 ksi
Elongation	16%
Reduction of Area	69%

Nominal Room Temperature Properties after Aging

Size	Direction	Hardness Rockwell "C"	Tensile Strength ksi	0.2% Yield Strength ksi	Elongation in $4.5\sqrt{A}$ %	Reduction of Area %
9/16" Round	Longitudinal	53.6	299.5	291.3	11.0	56.1
3" Round	Longitudinal	54.0	292.3	283.7	10.6	49.0
6" Square	Longitudinal	55.3	297.2	287.8	8.8	45.3
6" Square	Transverse	55.1	296.8	289.6	7.5	38.2
.155" Sheet	Transverse	54.2	298.9	289.8	6.0	45.0
.300" Sheet	Transverse	55.0	300.5	295.7	6.6	50.7

Effect of Stress Concentration Factor, K_t , on Tensile Properties

K_t	Notch Tensile Strength		Notch-To-Smooth Tensile Strength Ratio*
	Average ksi	Range ksi	
2.0	436.8	436.2 - 437.5	1.46
3.0	427.7	420.8 - 434.6	1.43
5.0	391.4	383.7 - 396.1	1.31
7.0	376.8	376.5 - 377.1	1.28
9.0	375.1	367.9 - 384.8	1.26

* Based on smooth bar tensile strength of 299.0 ksi
All samples solution annealed for one hour at 1500° F, air cooled and aged at 900° F for three hours.

Effect of Test Temperature on Tensile Properties

Test Temp °F	Ultimate Tensile Strength ksi	0.2% Yield Strength ksi	Elongation in $4.5\sqrt{A}$ %	Reduction of Area %
400 °F	270.4	265.3	11.0	58.0
600 °F	254.6	247.4	10.0	58.0
800 °F	236.1	229.5	13.0	62.0
900 °F	220.4	216.8	13.0	65.0
950 °F	203.8	200.2	16.0	70.0
1000 °F	185.7	181.1	18.0	75.0

All samples solution annealed for one hour at 1500° F, air cooled and aged at 900° F for three hours.

Data are typical and should not be construed as maximum or minimum values for specification or for final design.
Data on any particular piece of material may vary from those shown herein. Allvac® and VascoMax® T-200, VascoMax® T-250, and VascoMax® T-300 are registered trademarks of ATI Properties, Inc. © Copyright, Allvac 2000

VASCOMAX® T-300

Effect of Aging Temperature on Tensile Properties

Aging Temperature	Ultimate Tensile Strength ksi	0.2% Yield Strength ksi	Elongation in 4.5 \sqrt{A} %	Reduction of Area %	Hardness Rockwell "C"
600° F	169.9	158.7	18.0	74.0	36.8
700° F	194.9	181.1	12.0	48.0	41.6
800° F	265.8	255.1	10.0	33.0	50.7
850° F	291.3	283.2	11.0	52.0	53.5
900° F	300.0	292.9	10.0	54.0	53.6
950° F	288.3	281.6	11.0	57.0	52.5
1000° F	272.4	265.3	11.0	53.0	52.0

All samples solution annealed for one hour at 1500° F, air cooled and aged for six hours at the temperatures indicated.

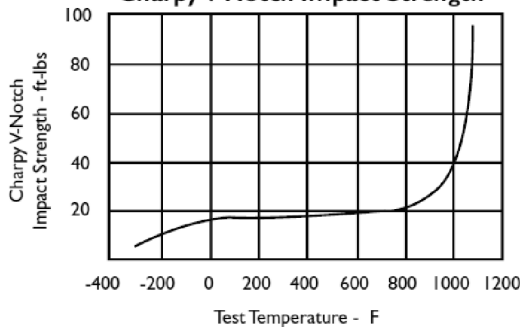
Fracture Toughness

Bend-Type Specimens	
Product	K _{max} * $\sqrt{\text{in}}$
6" Square	63.4 ksi $\sqrt{\text{in}}$
6" Square	63.7 ksi $\sqrt{\text{in}}$
6" Square	65.2 ksi $\sqrt{\text{in}}$
6" Square	67.3 ksi $\sqrt{\text{in}}$

*Because of the relatively high strength level of this material, plane strain conditions exist and K_{max}=K_{IC}. As such, K_{max} is comparable to the the K_{IC} values that would be obtained per ASTM E-399-83.

NOTE: Product was taken from two different production heats of material

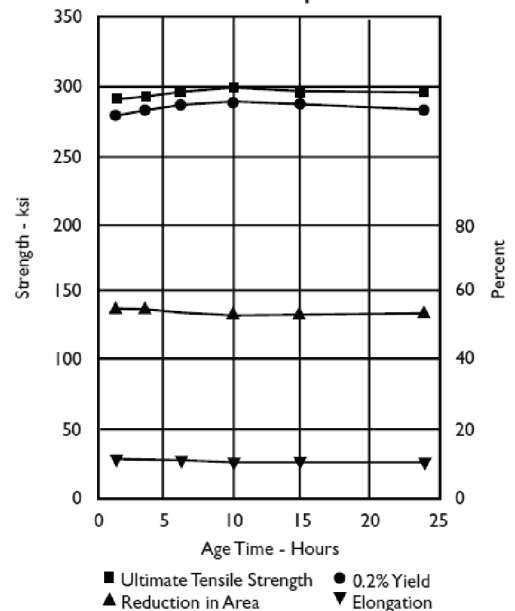
Effect of Test Temperature on Charpy V-Notch Impact Strength



All samples solution annealed for one hour at 1500° F, air cooled and aged at 900° F for three hours.

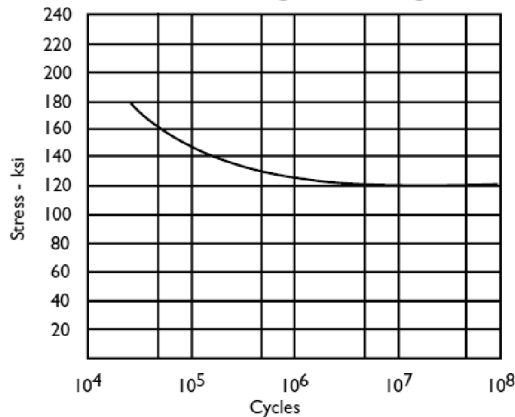
All samples solution annealed for one hour at 1500° F, air cooled and aged at 900° F for three hours.

Effect of Aging Time on Tensile Properties



All specimens solution annealed for one hour at 1500° F, air cooled and aged at 900° F for the times indicated.

R.R. Moore Rotating Beam Fatigue Tests



All samples solution annealed for one hour at 1500° F, air cooled and aged at 900° F for three hours.

Data are typical and should not be construed as maximum or minimum values for specification or for final design. Data on any particular piece of material may vary from those shown herein. Allvac® and VascoMax® T-200, VascoMax® T-250, and VascoMax® T-300 are registered trademarks of ATI Properties, Inc. © Copyright, Allvac 2000