



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝVOJ IMPAKTORU PRO TAYLORŮV TEST

DEVELOPMENT OF AN IMPACTOR FOR THE TAYLOR ANVIL TEST

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Samuel Müller

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Jopek, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Samuel Müller
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Miroslav Jopek, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

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

Vývoj impaktoru pro Taylorův test

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o návrh impaktoru tj. nosiče vzorků pro dynamické zkoušky materiálů.

Cíle diplomové práce:

Práce bude obsahovat rozbor současného stavu a zhodnocení problémů spojených se zkouškami materiálů za vysokých rychlostí deformace. Cílem bude navrhnout nový impaktor tj. nosič zkušební vzorku. Na základě numerické simulace aerodynamiky, balistických a kontaktních podmínek v hlavní zkušební zařízení bude navržena geometrie impaktoru tak, aby byl zabezpečen centrický dopad zkušební vzorku v dopadové komoře. Nově navržený impaktor bude prakticky otestován a bude následovat vyhodnocení experimentu.

Seznam doporučené literatury:

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

GILIS, P. P., GROSS, T. S.: Effect of Strain Rate on Flow Properties. Metals handbook, Ninth Edition, Volume 8 – Mechanical Testing. American Society for Metals, Ohio, 1985.

NOWACKI, W. K., KLEPACZKO J.R. New Experimental Methods in Material Dynamics and Impact. In Trends in Mechanics of Materials. Volume 3, 2003.

JOPEK, M. Modelování mechanického chování ocelí za vyšších rychlostí deformace, Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno 2003.

KUNČICKÁ, L.; JOPEK, M.; KOCICH, R.; DVOŘÁK, K. Determining Johnson-Cook Constitutive Equation for Low-Carbon Steel via Taylor Anvil Test. Materials, 2021, vol. 14, no. 17, p. 1-15. ISSN: 1996-1944.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce popisuje rozdíly mezi kvazistatickými a dynamickými materiálovými zkouškami a rozbor vlivu rychlosti deformace v tvárnacích procesech. Obsahuje podrobný popis Hopkinsonovy tlakové zkoušky, Hopkinsonovy ťahové zkoušky a Taylorova testu a rozbor jejich klíčových komponentů. V práci se nachází základní teorie balistiky, která nachází uplatnění při dynamických testech. Je zhrnutá historie vývoje nosiče materiálové vzorky pro Taylorov test a rozbor jeho současného stavu. Byl vyvinut nový nosič vzorky, pro upravený průměr hlavně testovacího zařízení. Tvar nosiče byl navrhnut na základě simulací v software ANSYS a praktického zkoušení. Nosič byl vyroben technologií 3D tisku, metodou FDM. Pomocí nového nosiče byla otestována hliníková zliatina 2024-T3, byla stanovena její dynamická mez kluzu a byla navržena optimalizace parametru citlivosti na rychlost deformace pro konkrétní dopadové rychlosti.

Klíčové slova

rychlost deformace, dynamické materiálové testy, Taylorov test, nosič materiálové vzorky, hliníková zliatina 2024-T3

ABSTRACT

The Master's Thesis describes the differences between quasi-static and dynamic material tests and discusses the effect of strain rate in forming processes. It contains a detailed description of Split Hopkinson pressure bar test, Split Hopkinson tensile bar test and Taylor anvil test. The thesis contains a basic theory of ballistics and the history of the development of the material sample carrier for the Taylor test and the analysis of its current state. A new sample carrier was developed for the adjusted diameter of the Taylor test equipment. The shape of the carrier was designed, based on simulations in ANSYS software and practical testing. The carrier was made by 3D printing technology, FDM method. Samples of aluminum alloy 2024-T3 were tested using the new samples carriers. Dynamic flow stress was determined, and the strain rate constant was optimized for specific impact velocities.

Keywords

strain rate, dynamic materials testing, Taylor Anvil test, material sample carrier, aluminum alloy 2024 T3

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

MÜLLER, Samuel. Vývoj impaktoru pro Taylorův test [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139865>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Jopek.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem že som diplomovú prácu na tému Vývoj impaktoru pro Taylorův test vypracoval samostatne s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho práce.

V Brne, 20.5.2022

miesto, dátum

meno, priezvisko

POĎAKOVANIE

Ďakujem pánovi Ing. Miroslavovi Jopkovi, PhD. za cenné pripomienky, rady a pomoc ktoré mi poskytol počas vypracovania diplomovej práce. Zároveň ďakujem pánovi Ing. Jánovi Řiháčkovi, PhD. a pánovi Ing. Martinovi Harantovi za pomoc so simulačným programom ANSYS. Veľká vďaka patrí mojim rodičom za neustávajúcu podporu počas celého môjho štúdia.

OBSAH

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADANIA	10
1.1 Možné technológie výroby	11
2 DEFORMÁCIA ZA VYSOKÝCH RÝCHLOSTÍ	13
2.1 Mechanizmus deformácie a Lüdersová deformácia	13
2.2 Rýchlosť deformácie a jej vplyv na vlastnosti materiálov	15
2.3 Zotrvačné sily a napät'ové vlny	17
2.4 Popis deformácie materiálovými modelmi	18
3 DYNAMICKÉ MATERIÁLOVÉ SKÚŠKY	20
3.1 Hopkinsonov kompresný test	20
3.2 Hopkinsonov ťahový test (SPTB)	23
3.3 Taylorov test	24
3.3.1 Vyhodnotenie Taylorovho testu	27
4 BALISTIKA TESTI	28
4.1 Balistika	28
4.2 Stabilizácia projektilu	29
4.3 Statická a gyroskopická stabilita	29
4.3.1 Možnosti stabilizácie	30
5 PRAKTICKÁ ČASŤ	32
5.1 Nosič vzorky	32
5.1.1 Vývoj tvaru nosiča po súčasný stav	33
5.1.2 Súčasný nosič a jeho výroba	34
5.2 Meranie dopadových rýchlostí	35
5.3 Metodika optimalizácie nosiča	36
5.3.1 Porovnávacia simulácia	37
5.3.2 Simulácia stability letu	38
5.4 Vývoj tvaru nosiča	38
5.4.1 Návrhy stabilizácie	40
5.4.2 Návrh tvaru tela nosiča	44
5.4.3 Labyrintové tesnenie	49
5.5 Výroba nosičov	52
5.6 Centricita dopadu	54
5.7 Testovanie s materiálovou vzorkou	55
5.7.1 Stanovenie dynamickej medze klzu	56
5.8 Overenie koeficientu citlivosti na rýchlosť deformácie	59
ZÁVER	61
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	62
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK	66
ZOZNAM PRÍLOH	68

ÚVOD

Pri konštrukcii rôznych strojných súčastí sa často využívajú materiálové vlastnosti získané z ťahových skúšok, ktoré sa uskutočňujú za kvazistatických podmienok namáhania, pri veľmi malých rýchlostiach deformácie. V skutočnosti však existuje len veľmi málo situácií, kedy sa jedná čisto o kvazistaticky namáhanú sústavu, bez dynamického zaťaženia. Preto je potreba materiály a súčasti testovať za reálnych podmienok zaťažovania. Poznatky o vlastnostiach kovových a nekovových materiálov pri vyšších a vysokých rýchlostiach deformácie začali vznikať pre využitie vo vojenskom a zbrojnom priemysle. Neskôr sa tieto poznatky začali využívať naopak na ochranu ľudských životov. Ide o rôzne bezpečnostné prvky v doprave, ako sú zábradlia, zvodidlá, karosérie automobilov a iných dopravných prostriedkov, vid' obr. 1 a). Dôvodom je predikcia správania súčastí a zabezpečenie ich dostatočnej bezpečnosti pri situáciách, pri ktorých evidentne dochádza k dynamickému zaťažovaniu. [1; 2]

V súčasnosti slúžia k predikcii správania sa materiálov za rôznych podmienok zaťažovania numerické simulácie. Najrozšírenejšie simulácie sú založené na metóde konečných prvkov. Zásadnou časťou tejto metódy je materiálový model, ktorý popisuje správanie sa materiálu za daných podmienok zaťažovania. Pre dosiahnutie čo najpresnejších výsledkov simulácií je vhodné mať čo najpresnejší materiálový model, ktorý sa do simulácie zadáva pomocou tzv. konštitučných vzťahov. Parametre pre konštitučné vzťahy sú zisťované pomocou dynamických materiálových skúšok. Jednou takou skúškou je aj Taylorov test. Práve veľmi dôležitou súčasťou Taylorovho testu je impaktor, inými slovami nosič materiálovej vzorky, ktorého funkciou je zrýchlenie a dopravenie vzorky do miesta dopadu, ktorá sa následne deformuje do špecifického tvaru, viz obr. 1. b), na základe ktorého sú zisťované vlastnosti daného materiálu, ktoré sú aplikované pri tvorbe materiálových modelov. Vývoj impaktoru je časť procesu, ktorý celkovo prispieva ku širším poznatkom o správaní materiálov za vysokých rýchlostiach deformácie, ktoré sú dôležité zo spomenutých dôvodov. [1; 2; 14]



Obr. 1 a) Crash test osobného automobilu [26], b) materiálové vzorky po Taylorovom teste

1 ROZBOR ZADANIA

Vyvíjanou súčasťou je nosič materiálovej vzorky pre Taylorov test (TAT). Ide o optimalizáciu súčasného nosiča a jeho prispôsobenie pre upravené zariadenie používané pre testovanie materiálov za dynamických podmienok zaťažovania. Nosič je podstatnou súčasťou testu. Konkrétne sa jedná o zariadenie pre Taylorov test, ktoré je umiestnené na Ústave strojírenské technologie, na fakulte strojního inženýrství VUT v Brně. Došlo k úprave hlavne kanóna. Pôvodná hlaveň mala vnútorný priemer $\varnothing 50$ mm. Na obr. 2. je tvar nosiča materiálov vzorky, ktorý sa doposiaľ používal pre TAT. Súčasná hlaveň má vnútorný priemer $\varnothing 17$ mm. Súčasná hlaveň bola vložená do pôvodnej a do medzipriestoru bol vložený induktor na indukčný ohrev materiálových vzoriek. Indukčný ohrev umožňuje testovanie materiálových vzoriek za tepla. Tým rozširuje možnosti testovacieho zariadenia. Pri týchto dynamických skúškach materiálov, ktoré sa odohrávajú za vysokých rýchlostí nie je jednoduché dosiahnuť, aby testovanie prebehlo bezproblémovo. Pri vývoji nového nosiča je vhodné zahrnúť možné situácie, za ktorých nedôjde k úspešnému výsledku testu. Rovnako je vhodný rozbor vývoja nosiča až po súčasný stav a aplikovanie poznatkov z doterajšieho vývoja do nového vývoja. [2; 7; 9]



Obr. 2 Tvar nosiča používaného pre Taylorov test

Funkciou nosiča je zrýchliť materiálovú vzorku a dopraviť ju do dopadiska. Nosiče sú spolu so vzorkami vystreľované pomocou pneumatického kanónu. Ide teda o premenu tlakovej energie vzduchu na kinetickú energiu nosiča a vzorky. Úlohou nosiča je premeniť túto energiu čo najefektívnejšie. Nosič materiálov vzorky by mal disponovať týmito vlastnosťami [2; 7; 9]:

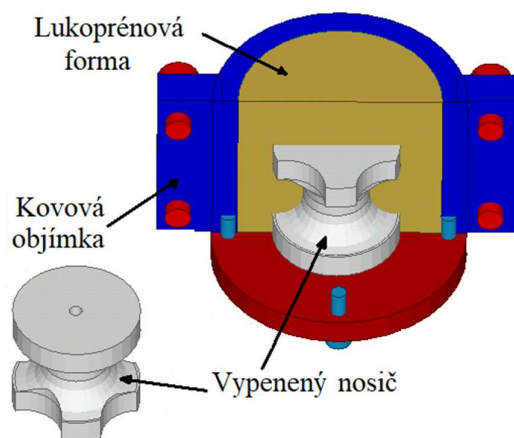
- Nízka hmotnosť pre dosiahnutie čo najvyšších rýchlostí.
- Dostatočná pevnosť. Pri zrýchlení nosiča, nesmie dôjsť vplyvom akcelerácie k preboreniu vzorky cez nosič. Rovnako nesmie dôjsť k porušeniu ani ku inému poškodeniu nosiča počas transportu vzorky v hlavni kanóna až do dopadiska.
- Centrický dopad. Nosič musí zabezpečiť kolmý náraz vzorky na mernú tyč. V prípade necentrického dopadu je materiálová vzorka deformovaná nerovnomerne, a tým nie je možné správne vyhodnotenie testu.
- Vhodný aerodynamický tvar, kvôli zamedzeniu nežiadúcich turbulencií a vibrácií nosiča počas letu v hlavni kanóna. Takisto pre minimalizovanie odporu, a tým spomaleniu nosiča v ústovej časti hlavne.
- Valcové funkčné plochy musia byť len minimálne menšie, ako je vnútorný priemer kanónu.

- Vhodná technológia výroby. Keďže pri návrhu tvaru je nevyhnutné testovanie jednotlivých prototypov nosičov, musí byť zvolená jednoduchá, nekomplikovaná a rýchla technológia výroby.
- Nízka cena výroby. Z charakteru dynamického testu nie je možné dané nosiče používať opakovane. Preto musí byť výroba jedného kusu nosiča čo najlacnejšia.

1.1 Možné technológie výroby

Pri výrobe nosiča nie je pevne definovaný materiál nosiča. Preto prichádzajú do úvahy rôzne kombinácie technológie výroby a voľby materiálu. Hlavnou podmienkou pri voľbe materiálu je jeho nízka hustota, aby nosič dosahoval čo najnižšie hmotnosti a zároveň dostatočnú pevnosť, ktorá má zaručiť spoľahlivosť pri transporte nosiča. Možné materiály, ktoré majú pre nosič vhodné vlastnosti sú rôzne vypeňovacie materiály – polystyrény, alebo plasty. Nosič je možné vyrobiť rôznymi technológiami a do úvahy boli brané aj možnosti z doterajšieho vývoja nosiča. Medzi možné technológie výroby patrí [7; 9; 27; 28; 29; 30]:

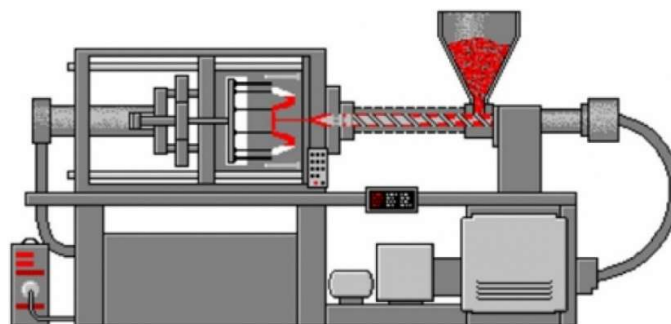
- Obrábanie polystyrénového polotovaru. Keďže je nosič valcovitého tvaru, javí sa ako vhodná technológia sústruženia. Výhodou tejto technológie je možnosť rýchleho zhotovenie prototypov návrhov a nízka hmotnosť nosičov. Táto technológia bola už v minulosti aplikovaná pre výrobu nosičov a neosvedčila sa. Výroba bola komplikovaná, nosiče bolo nutné ešte po výrobe upravovať. Pri sústružení polystyrénu vzniká veľké množstvo odpadu a sústružený povrch bol príliš drsný, čo zvyšovalo trenie počas letu nosiča v hlavni. Nosiče vyrobené touto technológiou neboli dostatočne spoľahlivé, neboli dostatočne tuhé na povrchu, ani v dutine, v ktorej bol umiestnený nosič. Z dôvodu nedostatočnej funkčnosti pri transporte vzorky bola táto technológia zavrhnutá.



Obr. 3 Technológia vypeňovania nosičov [2]

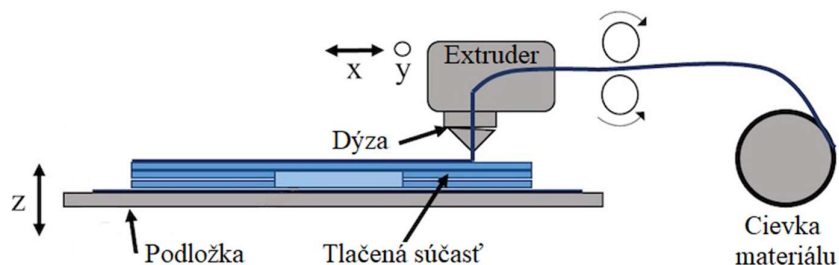
- Vypeňovanie vo forme. Táto technológia je využívaná pre výrobu penových výrobkov, ako sú napríklad operadlá a sedadlá. Samotný materiál formy je buď epoxidová živica, alebo silikónový tmel - lukoprén. Forma je umiestnená v kovovej objímke, ako je zobrazené na obr. 3. Pre materiál nosiča môžu byť použité rôzne vypeňovacie materiály, ako sú niektoré peny používané v stavebníctve (montážna pena Soudal), alebo rôzne polystyrénové granuláty. Aj táto technológia bola už v minulosti používaná pre výrobu nosičov. Technológia sa osvedčila, mala však nedostatky, ako veľmi náročný časový postup, ktorý bolo nutné presne dodržať. Postup výroby nosičov touto technológiou bude podrobne opísaný v kapitole 5.1.

- Vstrekovanie plastu. Je to najefektívnejšia metóda pre výrobu plastových súčastí na vstrekovacom stroji, viz obr. 4. Technológia spočíva v roztavení plastového granulátu, ktorý je následne vstreknutý do kovovej formy, kde chladne a tuhne. Po vytuhnutí je súčasť oddelená z formy vyhadzovačmi. Následne je ešte nutné odstrániť technologické prvky, ako sú vtokové sústavy a kanály. Táto technológia je vhodná pre veľkosériovú výrobu a jej najväčšou nevýhodou je vysoká cena zariadenia a nákladná výroba vstrekovacích foriem. Nie je teda vhodná pre malo kusovú výrobu a výrobu prototypov.



Obr. 4 Vstrekovací stroj [27]

- 3D tlač. Je to aditívna technológia, pri ktorej je výsledná súčasť modelovaná z materiálu, ktorý je postupne pridávaný, dochádza k vrstveniu materiálu na seba. Vyrábané súčasti pre 3D tlač sú konštruované v 3D modelovacích programoch, alebo fyzické modely sú naskenované 3D skenerom. Technológia 3D tlače vznikla v 80. tých rokoch 20. storočia a od tej doby vznikli mnohé rôzne metódy 3D tlače, ktoré umožňujú tlač nielen plastových materiálov, ale aj kovov. V súčasnosti je jednou z najrozšírenejších metódou je technológia FDM – Fused Deposition Modeling. Ide o vrstvenie roztaveného plastového materiálu pomocou extruderu, ktorý je pred vstupom do extruderu vo forme plastového drôtu, ktorý je odvíjaný z cievky. Extruder sa pohybuje v dvoch osiach a podložka sa pohybuje v tretej osi, viz. obr. 5. Medzi výhody tejto metódy patrí veľká rozmanitosť použitých materiálov a ich ľahká výmena, jednoduchá obsluha zariadenia, relatívne nízka pracovná teplota, vďaka ktorej sú úbytok objemu po vychladnutí a vnútorné napätie zanedbateľné. Nevýhodou je možnosť vzniku trhliniek medzi jednotlivými vrstvami a drsnosť povrchu spôsobené značnou schodovitosťou jednotlivých vrstiev.



Obr. 5 Princíp metódy FDM [29]

Pre výrobu nosičov bola vybraná technológia 3D tlače metódou FDM. Hlavný dôvod pre výber tejto technológie bol dostupnosť 3D tlačiarne na Ústave strojírenskej technológie FSI a zároveň táto technológia umožňuje výrobu nosiča so všetkými požadovanými vlastnosťami, hlavne s ohľadom na hustotu tlačenej plastových materiálov, teda finálnej hmotnosti nosičov. K výberu tejto technológie prispelo, že v prípade praktického používania nosičov ide o malo kusovú výrobu.

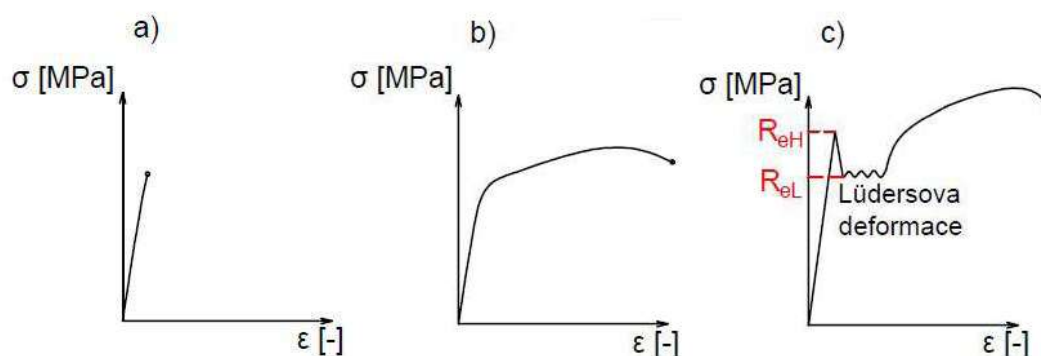
2 DEFORMÁCIA ZA VYSOKÝCH RÝCHLOSTÍ

Podstatou skúmania dejov pomocou TAT je získanie materiálových znalostí za vysokých rýchlostí deformácie, hlavne o dynamickú medzu pevnosti. Stanovenie dynamickej medze pevnosti materiálu je omnoho komplikovanejšie, ako stanovenie medze pevnosti za kvazistatických podmienok. Materiál však takisto prekonáva elastickú a plastickú oblasť deformácií. Preto je pochopenie princípu deformácií kľúčové pre správne chápanie vlastností materiálov za vysokých rýchlostí deformácie, ktoré je nutnosťou k správnej interpretácii výsledkov Taylorového testu. [2; 6]

2.1 Mechanizmus deformácie a Lüdersova deformácia

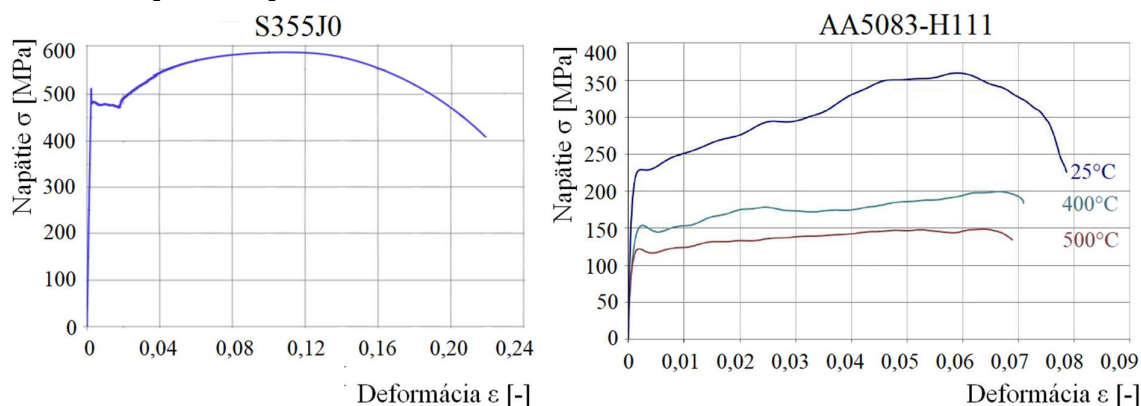
Pojem deformácia sa používa na označenie veľmi malých rozmerových zmien v pružnej a pružne-plastickej oblasti, pri skúmaní medzných stavov kovov [5]. Pružnú deformáciu možno jednoznačne popísať lineárnou závislosťou medzi pôsobiacim napätím a deformáciami pomocou Hookovho zákona. Pružná deformácia po odstránení zaťaženia telesa zaniká a teleso sa vracia do počiatočného stavu. Na rozdiel toho, plastická deformácia je nevratná. Každá plastickej deformácii musí predchádzať pružná deformácia. Mechanizmus deformácie sa odvíja od poruchách v polykryštáloch. V kovových polykryštáloch sa vyskytujú bodové poruchy, čiarové poruchy, plošné poruchy a priestorové poruchy. Z hľadiska teórie plastických deformácií sú najdôležitejšie čiarové poruchy (dislokácie), pretože významne ovplyvňujú mechanické vlastnosti kovov, hlavne ťažnosť a pevnosť. Vznik plastických deformácií polykryštálov začína s pohybom dislokácií, ku ktorému dôjde najskôr v zrnách, ktoré sú najvhodnejšie orientované k maximálnemu šmykovému napätiu $\tau_{\max}$. Nasleduje rotácia a otáčanie ďalších susedných zŕn, v dôsledku zachovania spojitosti kontinua. V prípade vhodnej orientácie polykryštalických zŕn dochádza k mechanickému dvojčateniu. [5; 6; 20]

Keďže plastická deformácia je termomechanický dej, môžeme ho kategorizovať napríklad na základe teploty alebo rýchlosti deformácie materiálu. Podľa rýchlosti deformácie môže byť materiál zaťažovaný od kvazistatických až po vysoko dynamické podmienky. Namáhanie materiálov za kvazistatických podmienok je možné dobre popísať a znázorniť pomocou ťahových diagramov (TD), podľa ktorých môžeme kovové materiály rozdeliť do niekoľkých skupín, ako na obr. 6, kde je porovnanie TD pre a) krehké materiály, b) materiály s nevýraznou medzou pružnosti alebo c) materiály s výraznou medzou pružnosti. [5; 6; 20]



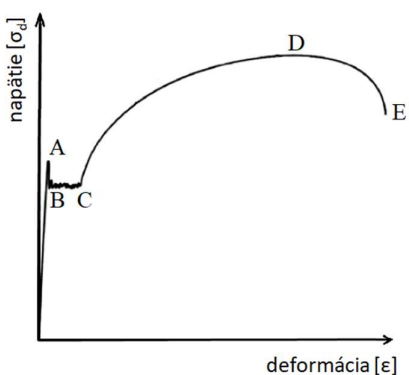
Obr. 6 Ťahové diagramy rôznych druhov materiálov [6].

Práve pri porovnaní TD zhotovených za rozličnej rýchlosti deformácie je možné pozorovať u určitých druhov materiálov podobné charakteristiky kriviek ako u niektorých materiálov za kvazistatických podmienok. Napríklad TD skupiny nízkouhlíkových ocelí sú charakteristické hornou a dolnou medzou pružnosti a takzvanou Lüdersovou deformáciou. Ak sa zvýši rýchlosť ťahovej skúšky, je možné pozorovať, že tvar kriviek je podobný tvaru kriviek TD nízkouhlíkových ocelí. Na obr. 7 je porovnanie TD nízkouhlíkovej ocele S355J0 a závislosti napätia σ a pomernej deformácie ε pre hliníkovú zliatinu AA5083-H111. Podstata pri porovnaní týchto dvoch rozličných materiálov spočíva vo fakte, že je možno jasne určiť hornú a dolnú medzu klzu. Z tejto podobnosti je možné vyvodit' súvislosti v mechanizme vzniku elasticko-plastických deformácií medzi týmto druhom zaťaženia a touto kategóriou materiálov. [6; 20; 31]



Obr. 7 Materiály s hornou a dolnou medzou klzu. Vľavo: nízkouhlíková oceľ. Vpravo hliníková zliatina [6; 31]

Obr. 8 ilustruje TD nízkouhlíkovej žihanej ocele. Zaťažovanie vzorky je od počiatku do bodu A elastické. Bod A predstavuje hornú medzu klzu. Následne napätie klesne na dolnú medzu klzu – bod B. Príčinou existencie dolnej medze klzu je tendencia intersticiálnych atómov uhlíka a dusíka difundovať k okrajom dislokácií, čím sa čiastočne znižuje vnútorné napätie v okolí dislokácií. Pre uvoľnenie dislokácií od intersticiálnych atómov je potrebné ďalšie prídavné napätie. Po počiatočnom pohybe dislokácií pokračuje predlžovanie vzorky na úrovni dolnej medze klzu, až kým nedosiahne dolnú medzu klzu – bod C. Táto časť deformácie medzi hornou a dolnou medzou klzu sa nazýva oblasť Lüdersovej deformácie. U nízkouhlíkových ocelí dochádza v oblasti Lüdersovej deformácie zvyčajne k predĺženiu 1 až 5 %. Na záver sa v bode D začína vytvárať krčok a v bode E dochádza k vyčerpaniu plasticity a porušeniu vzorky. Rovnako ku vzniku Lüdersovej deformácie dochádza pri zaťažení vysokými deformačnými rýchlosťami. [20]



Obr. 8 Popis Lüdersovej deformácie [20].

2.2 Rýchlosť deformácie a jej vplyv na vlastnosti materiálov

Pri každom tvárniacom procese sa nástroj pohybuje určitou rýchlosťou. Pohyb nástroja počas kontaktu s materiálom je podmienený deformáciou materiálu, ktorá prirodzene prebieha za nejakú časovú dobu. Ide teda o rýchlosti deformácie, ktorá je daná zmenou logaritmickú deformácie za jednotku času. Pre rýchlosť deformácie $\dot{\varphi}$ platí nasledujúci vzťah [5]:

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{dh}{h} \frac{1}{dh} = \frac{v_0}{h} [\text{s}^{-1}], \quad (2.1)$$

kde: t – jednotka času [s],
 h – vzťažná výška [m],
 v_0 – okamžitá rýchlosť pohybu nástroja [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

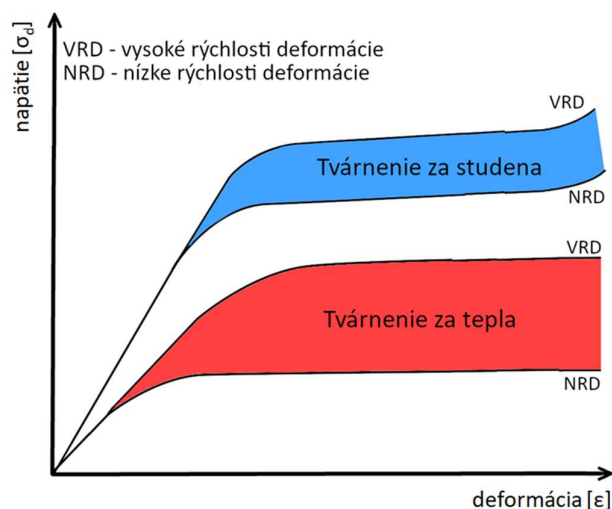
Pri tvárnení je táto rýchlosť veľmi dôležitá, pretože od nej závisí správanie sa materiálu počas procesu a tým pádom má dosah na konečný výsledok tvárniaceho procesu. Napríklad pri technológií hlbokého ťahania sa používajú brzdné rebrá a pridržovače aby sa spomalením toku materiálu predišlo nežiaducemu zvlneniu výťažkov. Ďalší príklad vplyvu rýchlosti deformácie z praxe je vznik krčkov a poškodenia materiálu pri tvárnení plechov v miestach zaoblení a tvarových prechodov. Jeden zo spôsobov kategorizácie technológií tvárnenia je rozdelenie v závislosti od rýchlosti deformácie. V tab. 1. je rozdelenie tvárniacich strojov podľa rýchlostí nástroja a rýchlosti deformácie pri konkrétnom tvárniacom procese. [1; 5; 6]

Tab. 1 Tvárniace stroje s rôznymi pracovnými rýchlosťami [5].

Tvárniaci stroj	v [ms^{-1}]	$\dot{\varphi}$ [s^{-1}]
Hydraulické lisy	0,02 až 0,25	0,01 až 10
Kŕukové a vretenové lisy	0,3 až 0,6	4 až 25
Buchary	5 až 8	40 až 160
Vysokorýchlostné buchary	20 až 40	200 až 1000

Na základe tej istej závislosti je možné rozdeliť aj materiálové skúšky na kvazistatické a dynamické. Je prirodzené pre jednotlivé tvárniace technológie používať materiálové vlastnosti a modely získané metódami, ktoré sa rýchlosťami deformácie zhodujú s danými technológiami. Nie vždy sa však toto pravidlo dodržiava a často sa pre procesy s vysokou rýchlosťou deformácie nesprávne používajú kvazistatické materiálové modely. Príčinou takýchto nepresností je nedostupnosť správnych materiálových modelov a skutočnosť, že materiály sa za kvazistatických podmienok testujú oveľa častejšie a jednoduchšie, ako za dynamických podmienok. Rozdiel rýchlostí deformácie za kvazistatických a dynamických podmienok však vykazuje značné odlišnosti v správaní materiálu. To sa hlavne týka hodnôt medze klzu R_e a medze pevnosti R_m . [3; 5; 6]

Vplyv rýchlosti deformácie na správanie materiálu sa začína prejavovať od rýchlosti v rozmedzí od $\dot{\varphi} = 1 \text{ s}^{-1}$ až 10 s^{-1} . Samozrejme každý materiál má vlastnú tzv. kritickú rýchlosť deformácie. Táto kritická rýchlosť je hranicou, od ktorej sa začína prejavovať vplyv rýchlosti deformácie na veľkosť deformačného odporu. Ak sa pri deformácii materiálu táto kritická hodnota nedosiahne, deformačný odpor sa s rýchlosťou deformácie nemení. Až pri vyšších hodnotách, ako sú kritické hodnoty sa prejaví vplyv rýchlosti deformácie zvyšovaním deformačného odporu. Počas plastickej deformácie však súbežne prebiehajú aj ďalšie deje ako napr. zmena teploty, zmena mechanických vlastností alebo difúzne deje. Konečný vplyv rýchlosti deformácie na materiál je tak výsledkom kombinácie všetkých týchto dejov. [1; 3; 6; 11]



Obr. 9 Vplyv rýchlosti deformácie na deformačný odpor [10]

Na samotnú deformáciu má značný vplyv aj teplota, za ktorej proces prebieha. Hodnota kritickej rýchlosti deformácie sa mení v závislosti na teplote. Hodnota výsledného deformačného odporu σ_d , či deformácia prebieha alebo neprebieha v pásme teplôt, v ktorom dochádza k úplnému alebo čiastočnému spevneniu. Rýchlosť deformácie má na veľkosť deformačného odporu najväčší vplyv pri teplotách, pri ktorých nastáva úplná rekryštalizácia materiálu tzn. v oblasti teplôt, v ktorej sa spevnenie vôbec neprejaví. Na obr. 9 je vplyv rýchlosti deformácie na deformačný odpor pri tvárnení za tepla a za studena. Tak ako pri tvárnení za tepla, tak aj pri tvárnení za studena, deformačný odpor významne narastie, ak sa zvýšia rýchlosti deformácie. Napríklad u bežných uhlíkových ocelí spôsobí tvárniaca rýchlosť 10^3 m.s^{-1} nárast deformačného odporu zhruba o 350 MPa. Je to spôsobené tým, že trenie za týchto podmienok prebieha inak, ako za kvazistatických podmienok a materiál sa môže správať dokonca podľa hydrodynamických modelov trenia. [1; 3; 10]

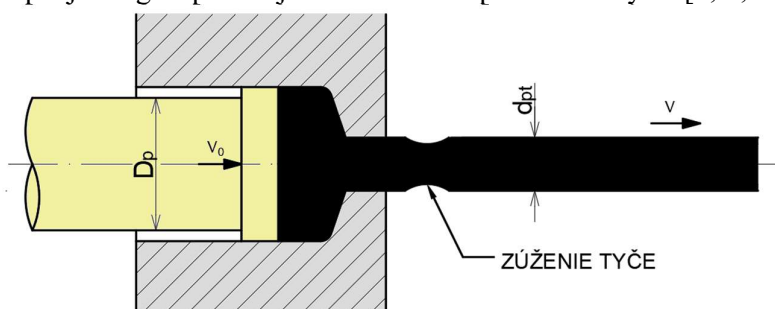
Tab. 2 Charakteristiky rôznych rýchlostí deformácie [3].

Rozdelenie rýchlostí	Rýchlosť deformácie	Testovacie metódy	Dynamické charakteristiky	Vplyv zotrvačných síl a šírenie napätových vln
Nízka rýchlosť (low rate)	$0,1 \text{ s}^{-1} < \dot{\varphi} < 1 \text{ s}^{-1}$	Kvazistatické testy, štandardné skúšobné zariadenia	Konštantné napätie a rýchlosť deformácie	Nepodstatný vplyv
Stredná rýchlosť (medium rate)	$1 \text{ s}^{-1} < \dot{\varphi} < 200 \text{ s}^{-1}$	Rýchle zaťažovanie	Mechanická odozva vzorky a rámu stroja	Malý vplyv
Vysoká rýchlosť (high rate)	$200 \text{ s}^{-1} < \dot{\varphi} < 10^5 \text{ s}^{-1}$	Dynamické zaťažovanie Hopkinsonov test, TAT	Šírenie napätových vln	Ovplyvňuje výpočet napätia
Veľmi vysoká rýchlosť (very high rate)	$\dot{\varphi} > 10^5 \text{ s}^{-1}$	Impulzivné zaťažovanie	Šírenie rázových vln	Má rozhodujúci vplyv na výsledok

V tab. 2 je kategorizácia rýchlostí deformácie do štyroch skupín a charakteristika týchto skupín ohľadom testovacích metód, dynamických vlastností a vplyvu zotrvačných síl a napät'ových vln. Z rozdelenia vyplýva, že zhruba od rýchlosti tvárnenia 10^2 m.s^{-1} má rýchlosť deformácie za dôsledok zotrvačné sily a šírenie napät'ových vln, ktoré už nie je možné zanedbávať. [3]

2.3 Zotrvačné sily a napät'ové vlny

Dynamický účinok vysokých rýchlostí deformácií sa prejavuje aj vplyvom zotrvačných síl, ktorý sa môže prejavíť na geometrii alebo vlastnostiach tvárneného materiálu. Napr. pri technológií dynamického pretlačovania, viz. obr. 10. Materiál sa v pretlačnici správa podľa rovnice kontinuity a po náraze pretlačníka na materiál dochádza k spomaleniu pretlačníka. Materiál sa však zmenou priemeru pretlačnice OD_p na priemer pretlačovanej tyče OD_{pt} zrýchli z pôvodnej rýchlosti nástroja. Po spomalení pretlačníka má pretlačovaný materiál ešte určitú kinetickú energiu, ktorá spôsobuje ťahové napätie v pretlačovanej tyči a v závislosti od veľkosti vstupnej energie spôsobuje zúženie alebo pretrhnutie tyče. [1; 2; 11]



Obr. 10 Dynamické dopredné pretlačovanie [2].

Odozvu materiálu na napät'ové pulzy nie je možné popísať jedno teóriou. Vo všeobecnosti sa dajú rozlíšiť tri základné typy odozvy: elastická, hydrodynamická a pružne-plastická. V oblasti tvárniacich technológií je bežné sa zaoberať pružne-plastickou odozvou. Napät'ové vlny, ktoré vznikajú pri vysokých deformačných rýchlostiach, je možné vo všeobecnosti rozdeliť na elastické a plastické vlny, pričom plastické vlny vznikajú až keď napät'ový pulz prekročí medzu klzu. Elastická vlna sa šíri rýchlosťou zvuku. Táto rýchlosť je funkciou modulu pružnosti a hustoty látky, vzťah (3.1). Hodnoty napätia sú nižšie ako medza klzu, preto nedochádza k vzniku nevratných zmien v materiáli. Ak dorazí behom šírenia na miesto, kde sa menia vlastnosti materiálu, vlna sa odráža. Najbežnejším príkladom je hranica telesa, od ktorej sa odráža a vracia sa k povrchu dopadu ako ťahová vlna. Od povrchu sa môže odraziť viackrát. Rýchlosť plastickej vlny C_{el} je vyjadrená vzťahom [1;2;3]:

$$c_{el} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} [\text{m.s}^{-1}], \quad (2.2)$$

kde: E – Youngov modul pružnosti [Gpa]
 ρ – hustota látky [kg.m^{-3}]

V tuhých látkach sa môžu šíriť rôzne druhy elastických vln v závislosti na smere šírenia vln a pohybe samotnej látky a na hranici látky. Najčastejšími druhmi vln sú [2; 3]:

- Pozdĺžne alebo longitudinálne vlny, ktoré zodpovedajú smeru pohybu častíc. Ak je vlna tlaková, tak je smer jej pohybu zodpovedá smeru, v ktorom častice kmitajú. V prípade ťahovej vlny je zmysel pohybu častíc opačný.

- Priečne alebo transversálne vlny. Ak kmity častíc sú kolmé na smer šírenia samotnej vlny, ide o priečne vlny.
- Ďalšími druhmi elastických vln môžu byť povrchové vlny (Rayleigh waves), vlny na rozhraní (Stoneley waves) alebo ohybové vlny.

Ak napätový pulz prenesený do materiálu má vyššiu amplitúdu ako medza klzu, pulz sa rozloží na elastickú a plastickú vlnu. Plastická vlna pretvára a deformuje geometriu telesa, v ktorom sa šíri. Rýchlosť plastickej vlny C_{pl} udáva vzťah [1]:

$$c_{pl} = \sqrt{\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \cdot \frac{1}{\rho}} \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, \quad (2.3)$$

kde: $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ – smernica krivky závislosti napätia na deformácii v plastickej oblasti

Rýchlosť vlny je konštantná len pri nemennej deformácii ε . To nastáva práve v elastickej oblasti, kde smernica krivky závislosti napätia na deformácii je strmšia. Z toho jasne vyplýva, že sa plastická vlna sa pohybuje rýchlosťou ako elastická vlna. Pri stretnutí oboch vln dochádza k interakciám.[1; 2]

2.4 Popis deformácie materiálovými modelmi

Správanie materiálov pri zaťažení je možné popísať pomocou rôznych materiálových modelov. Niektoré materiálové modely sú určené len pre kvazistatické podmienky zaťažovania. Minimálny počet parametrov u kvazistatických vzťahov je dva. Takéto jednoduché modely postačujú pre teoretický odhad správania sa materiálov pomocou aproximačných kriviek. Pre plastickú deformáciu materiálov pri dynamickom zaťažovaní je takýto popis nedostatočný a je nutné zahrnúť väčší počet parametrov, ako sú: rýchlosť deformácie, stupeň pretvorenia, teplotu, mikroštruktúru materiálu, anizotropický parameter a rôzne ďalšie súčinitele, ktoré vyjadrujú účinok ďalších faktorov (zmena veľkosti deformovaného zrna, vrstevné chyby, hustotu dislokácií atď.). Z počtu zahrnutých parametrov je zrejmé, že tvorba vzťahu, ktorý by komplexne popisoval danú závislosť je veľmi náročná. Preto existuje aj viacero konštitučných rovníc, ktoré rôznymi spôsobmi vyjadrujú vplyv daných faktorov. Pri modelovaní správania sa materiálov za rôznych podmienok je zásadné, aký je použitý konštitutívny model. Materiály sa správajú odlišne pri rôznych teplotách a rýchlostiach deformácie. Ideálny materiálový model by mal zahrňovať vplyv všetkých faktorov na správanie materiálu. Avšak komplikovanosť takého vzťahu, ktorý by opisoval správanie materiálu za všetkých možných podmienok (teplotných, statických, dynamických) by bola veľmi vysoká. Jeden zo základných vzťahov, ktoré vyjadrujú závislosť napätia na deformácii a zároveň zahrňujú vplyv rýchlosti deformácie je Hollomon-Ludvikov vzťah [5; 6; 11; 14; 21]:

$$\sigma = K \cdot \varphi^n \cdot \dot{\varphi}^m \text{ [MPa]}, \quad (2.4)$$

kde: K – materiálová konštanta [MPa],

φ – deformácia materiálu [-],

n – exponent deformačného spevnenia [-],

m – exponent citlivosti na rýchlosť deformácie [-].

Exponent n je závislý na homologickej teplote, ktorá bude popísaná neskôr. Stanovenie exponentu m je možné buď porovnaním pretvárneho odporu pri dvoch rôznych konštantných rýchlostiach deformácie, alebo zmenou rýchlosti deformácie behom materiálovej skúšky.

Ďalším vzťahom pre výpočet deformačného odporu je Johnson-Cooková rovnica. Johnson-Cook úspešne popisali výsledky Taylorovho testu nárazu valcovej vzorky na pevný objekt. Tento vzťah patrí k najpoužívanejším konštitutívnym vzťahom, pretože je komplexný, zahrňuje vplyv deformácie, rýchlosti deformácie a teploty a zároveň je relatívne jednoduchý. Používa sa hlavne pre materiály s BCC kryštalickou mriežkou. Vzťah závisí na piatich experimentálne stanovených parametroch (σ_0 , B, C, n, m) [4; 6; 14]:

$$\sigma = (\sigma_0 + B \cdot \varphi^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_0}\right) \cdot [1 - (T^*)^m] \text{ [MPa]}, \quad (2.5)$$

kde: σ_0 – statická medza klzu [MPa],
 B – modul spevnenia [MPa],
 C – koeficient citlivosti na rýchlosť deformácie [-],
 n – exponent spevnenia [-],
 m – teplotný koeficient [-],
 $\dot{\varphi}_0$ – referenčná rýchlosť pretvorenia [s^{-1}],
 T^* – homologická teplota [-].

Homologická teplota sa vypočíta:

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}, \quad (2.6)$$

kde: T – teplota vzorky materiálu [K],
 T_0 – referenčná teplota pri statickej medzi klzu [K],
 T_m – teplota tavenia [K].

Konštitutívny vzťah podľa Zerilli a Armstronga berie do úvahy mikroštruktúru daného materiálu. Vzťah je vyjadrený na základe dislokačnej mechaniky tepelne aktivovaných pohybov dislokácií cez bariéry, ktorými môže byť samotná kryštalická mriežka alebo iné dislokácie alebo defekty. Kvôli odlišným dislokačným interakciám je rovnica prispôbena pre rôzne kryštalické štruktúry. zahrňuje. Tento vzťah dobre opisuje správanie sa materiálu za vysokých rýchlostí deformácie pre kovy s BCC a FCC kryštalickou mriežkou a dbá na vplyv rôznej veľkosti zrna a deformačné spevnenie vplyvom rýchlosti deformácie. Účinok zmeny teploty a rýchlosti deformácie je vo všeobecnosti väčší pre kovy s BCC mriežkou, ako pre kovy s FCC mriežkou. Zostavenie vzťahu pre kovy HCP kryštalickou mriežkou je náročnejšie. Vlastnosti týchto materiálov za takýchto podmienok sa pohybuje medzi vlastnosťami materiálov s BCC a FCC mriežkou. [21; 22; 23]

Zerilli-Armstrongov vzťah pre kovy s BCC kryštalickou mriežkou:

$$\sigma = \sigma_0 + C_1 \cdot \exp \cdot [-C_3 \cdot T + C_4 \cdot T \cdot \ln \dot{\varphi}] + C_5 \cdot \varphi^n + k \cdot d_z^{-\frac{1}{2}}, \quad (2.7)$$

Zerilli-Armstrongov vzťah pre kovy s FCC kryštalickou mriežkou:

$$\sigma = \sigma_0 + C_2 \cdot \varphi^{\frac{1}{2}} \exp \cdot [-C_3 \cdot T + C_4 \cdot T \cdot \ln \dot{\varphi}] + k \cdot d_z^{-\frac{1}{2}}, \quad (2.8)$$

kde: C_1 – konštanta pomeru tepelného a rýchlostného deformačného účinku [MPa],
 C_2 – konštanta zahrňujúca vplyv veľkosti zrna [K^{-1}],
 C_3, C_4 – konštanty tepelnej aktivácie a rýchlosti deformácie [MPa],
 C_5 – preexponenciálny faktor [$MPa \cdot mm^{\frac{1}{2}}$],
 d_z – priemerná veľkosť zrna [mm]

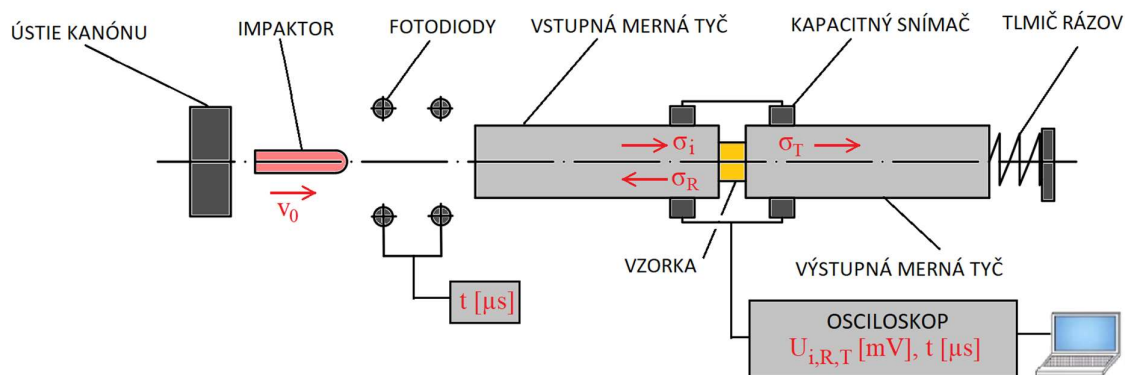
3 DYNAMICKÉ MATERIÁLOVÉ SKÚŠKY

Pri dynamických materiálových skúškach sa ráta s vplyvom zotrvačných síl, mechanickej rezonancie a šírenia napäťových vln. Do tohto typu skúšok spadá Hopkinsonov kompresný test a Taylorov test. Výstupy z týchto skúšok je možné využiť vo všetkých oblastiach priemyslu, kde dochádza k dynamickým tvárniacim procesom. Tieto skúšky majú ďalší význam pri testovaní bezpečnosti rôznych dopravných prvkov, alebo vo vojenskom priemysle. Pri dynamických testoch je meranie napätia a deformácie komplikovanejšie ako pri kvazistatických testoch. Štandardné metódy pre meranie týchto veličín sú za vysokých rýchlostí nevhodné. Do úvahy musí byť braná frekvenčná odozva meracích snímačov ako sú extenzometre alebo tenzometre. Dochádza ku komplikáciám pri použití týchto krehkých snímačov, keďže pri týchto dynamických testoch dochádza k veľkým a veľmi rýchlym deformáciám. Bolo nutné vyvinúť špecifické postupy, aby bolo možné obísť tieto komplikácie, ktoré vznikajú priamym meraním napätia a deformácie vzoriek, ktoré sú pretvárané vysokými rýchlosťami deformácie. [2; 3; 11]

3.1 Hopkinsonov kompresný test

Hopkinsonová skúška, inak Split Hopkinson pressure bar (SHPB), má všestranné využitie, môže sa použiť pri zisťovaní vlastností krehkých materiálov, keramiky, titánových ocelí alebo dreva. Teploty, pri ktorých sa materiály testujú sa pohybujú od teplôt tvárnenia za studena, poloochrevu až po teploty tvárnenia za tepla. Výsledky tejto skúšky sa využívajú na tvorbu materiálových modelov, ktoré sa následne používajú na tvorbu simulácií reálnych dejov v banskom, vojenskom alebo vo všeobecnosti strojárskom priemysle. Hopkinsonová skúška môže mať niekoľko rôznych variácií. Pre zisťovania mechanických vlastností materiálov za zvýšených teplôt a rýchlostí deformácie boli vyvinuté varianty Hopkinsonovho testu, ktoré testovanie za uvedených podmienok umožňujú. Výsledky tohto testu je možné prakticky uplatniť napríklad pri chápaní dynamicko-mechanického správania hliníkových zliatin pri frikčnom zváraní. Zariadenie je doplnené vysokofrekvenčným transformátorom s induktorom a termoregulátorom. Takisto sa môžu zisťovať dynamické vlastnosti v ťahu (Split Hopkinson tension bar) alebo v krute (Torsional Split Hopkinson bar). [6; 11]

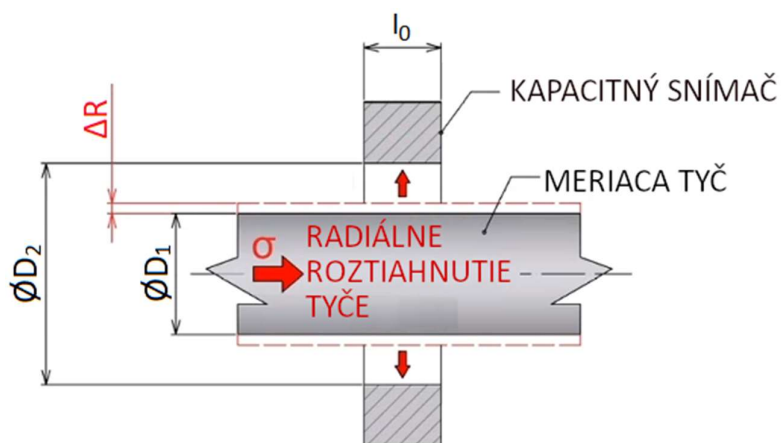
Tlaková Hopkinsonová skúška je založená na teórii jednorozmerného šírenia napäťových vln v merných tyčiach a na interakcii medzi napäťovým pulzom a vzorkou valcového tvaru. Merné tyče majú dĺžku 800 mm a priemer 15 mm. Impaktor má priemer 19 mm a dĺžku od 50 do 300 mm a je z rovnakého materiálu ako merné tyče. Na obrázku 11 je schéma zariadenia pre Hopkinsonov test, ktorý sa skladá z pneumatického kanónu, vstupnej a výstupnej tyče, medzi ktorými je materiálová vzorka, tlmiča rázov a meracích zariadení – fotodiód a kapacitných snímačov. [2; 6; 11; 17]



Obr. 11 Schéma Hopkinsonovho testu [17].

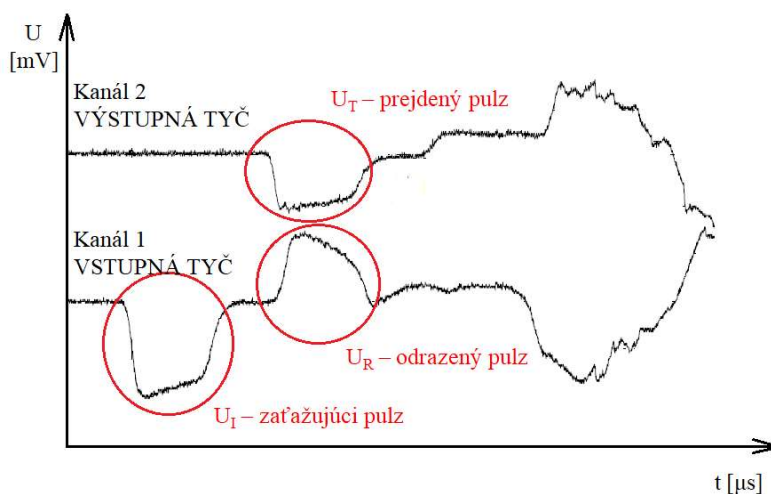
Zariadenie obsahuje dva kapacitné snímače, po jednom na vstupnej a výstupnej mernej tyči. Priebeh skúšky začína vložení materiálovej vzorky medzi vstupnú a výstupnú merňú tyč. Impaktor je vystrelený z kanónu a jeho rýchlosť je meraná pomocou fotodiód. Konkrétne rýchlosť je určená pomerom fixnej a známej vzdialenosti fotodiód ku času, za ktorý impaktor túto vzdialenosť preletí. Fotodiódy sú od seba vzdialené 15 mm. Po dopade impaktoru na čelo vstupnej mernej tyče dochádza k vytvoreniu elastickej napäťovej vlny σ_i , ktorá sa šíri cez vstupnú merňú tyč. Potom, čo vlna dorazí až ku vzorke dochádza k jej rozdeleniu. Časť sa odrazí naspäť σ_R a časť vlny σ_T prechádza cez vzorku do výstupnej mernej tyče. V merňých tyčiach sa elasticke vlny šíria rýchlosťou 5000 m.s^{-1} , čo zodpovedá rýchlosti šírenia zvuku v danom materiáli. [6; 12]

Deformácia vyvolaná napäťovou vlnou, ktorú spôsobí dopad impaktoru, je meraná pomocou kapacitných snímačov. Používajú sa prstencové alebo valcové kapacitné snímače viz. obr 12, ktoré reagujú na zmenu prierezu tyče, ktorá má za následok zmenu napätia na výstupe snímača, čo sa sleduje pomocou osciloskopu. a napäťový signál je prenesený do osciloskopu. Osciloskop zaznamenáva signál z dvoch kanálov, tj. signál z dvoch kapacitných snímačov. Správnu funkciu snímačov je možné overiť umiestnením oboch snímačov na vstupnú merňú tyč. Impaktor je vystrelený na vstupnú tyč bez toho, že by bola medzi merňými tyčami umiestnená vzorka. Snímače sú nekalibrované správne, ak priebehy zaťažujúcich a odrazených pulzov majú totožný tvar a extrémy z výstupu oboch kapacitných snímačov. [6; 11; 12]



Obr. 12 Popis kapacitného snímača [6].

Napätie sa meria v mV a tak, aby bolo možné rozoznať medzi napätím vstupnej vlny U_I , odrazenej vlny U_R a prejdenej vlny U_T . Na obrázku 13 je typický priebeh napätových pulzov. Podstatné sú vyznačené pulzy U_I , U_R , U_T . Za týmito pulzami sa objavujú len ďalšie odrazy spolu s rezonanciami, ktoré už nie sú podstatné pre vyhodnotenie skúšky. Namerané dáta sú vyhodnocované pomocou softwaru. Výstupom je časový priebeh napätia $U = U(t)$, z ktorého sa vystavujú krivky $\varepsilon = \varepsilon(\varepsilon)$ a $\sigma = \sigma(\varepsilon)$, z ktorých je vyhodnocované správanie materiálu počas dynamického zaťaženia. Záznam napätových pulzov musí byť najprv upravený a disperzia signálu zaťažujúcej, odrazenej a prejdenej vlny musí byť odstránená. K tomu sa používa vhodná matematická filtrácia. Vďaka tejto úprave je možné presnejšie určiť začiatok a koniec pulzu, jednoduchšie stanoviť medzu klzu a krivka môže byť lepšie popísateľná matematickou funkciou. Na druhej strane, nevhodne aplikovanou filtráciou sa môže stať, že celkový priebeh závislosti a veľkosť dynamickej medze klzu bude nepresne stanovený. [6; 12]



Obr. 13 Hopkinsonov test – priebeh napätových pulzov [11]

Počas skúšky dochádza k pechovaniu a mal by sa zachovať valčekový tvar vzorky. Ak by vzorka po skúške mala iný tvar, napr. súdkovitý, znamenalo by to, že nebola dodržaná podmienka jednorozmerného šírenia napätových vln a tým by nebolo možné považovať dáta zo skúšky za relevantné. Vzorka sa do súdkovitého tvaru deformuje pri príliš veľkom trení. Dĺžka prevísleho voľného konca vstupnej mernej tyče musí byť väčšia ako dĺžka impaktoru. Táto podmienka pre správne vyhodnotenie skúšky, ktorá musí byť dodržaná. Na výsledku sa teda podieľa kombinácia polohy kapacitného snímača na vstupnej tyči a dĺžka impaktoru. Pri nevhodne zvolenej kombinácii dochádza k interferenciám napätových pulzov, čo vedie ku skresleniu výsledkov. Na obrázku 14 je príklad vhodného a nevhodného napätového pulzu, kde nie je možné kvôli superpozícii zaťažujúceho U_I a odrazeného U_R pulzu nie je možné ich správna separácia a rozlíšenie. To je dôsledkom nedodržania podmienky nerovnosti dĺžky impaktoru a prevísleho konca mernej tyče. Na týchto faktoroch závisí doba odozvy pulzu, ktorá je zhora ohraničená vyššie spomínanou podmienkou. Doba trvania napätového rázu t_{nr} je teda určená vzťahom [3; 6;]:

$$t_{nr} = \frac{2 \cdot L_0}{C_0} < \frac{2 \cdot (L_1 - a)}{C_0} \text{ [s]}, \quad (3.1)$$

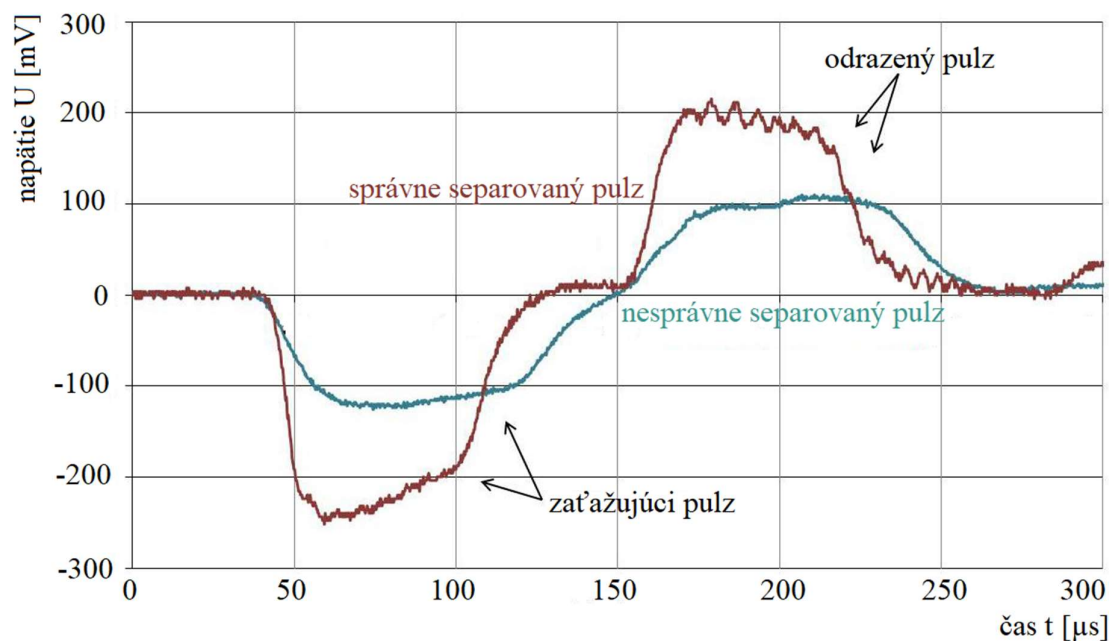
kde C_0 – rýchlosť zvuku v kovoch [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

L_{0I} – počiatočná dĺžka impaktoru [mm],

L_{MT} – dĺžka vstupnej mernej tyče [mm],

a – poloha snímača od čela mernej tyče [mm].

Teoretická doba trvania napäťového pulzu sa však líši od reálnej zároveň kratšia. Je to spôsobené disperziou signálu. Teoretický vzťah predpokladá ideálny ráz, ktorý vyvolá obdĺžnikový priebeh. Dolnú hranicu určuje schopnosť hardwaru zaznamenať a presne vyhodnotiť dobu pulzu, ktorá je veľmi malá. Dĺžka impaktoru sa volí na základe týchto faktov a pohybuje sa od 100 do 300 mm. Týmto dĺžkam odpovedá doba napäťového pulzu 40 až 120 μm . Zásadný vplyv na priebeh napäťových pulzov má presnosť výroby merných tyčí a ich precízne zostavenie v jednej osi. Tyče musia dosahovať vysokú presnosť v rovnobežnosti a ku kolmosti čela ku osi tyče. Pre lepší prenos napäťového pulzu medzi tyčami a vzorkou sa čelá vzorky zvyknú namazať pastou, ktorá zlepšuje ich vzájomný kontakt.



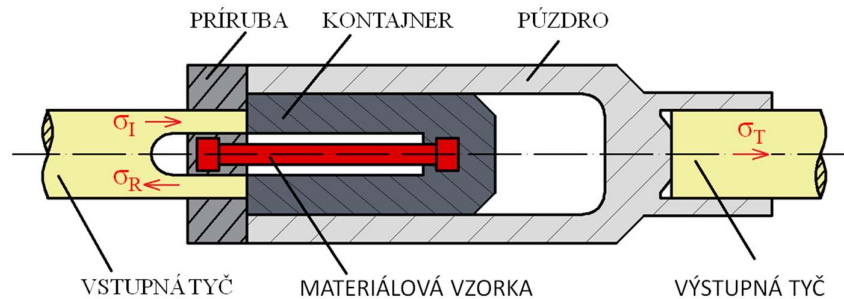
Obr. 14 Príklad vhodného a nevhodného záznamu napäťových pulzov [11]

3.2 Hopkinsonov ťahový test (SPTB)

Ako už s názvu vyplýva, ide o ťahový test a v tom spočíva základ pre všetky odlišnosti od Hopkinsonovho kompresného testu. Materiálová vzorka je pri Hopkinsonovom ťahovom teste, inak Split Hopkinson tension bar), namáhaná ťahovým napätím. Takisto ako pri kompresnom teste sa teoreticky vychádza z riešenia jednorozmerného šírenia napätosti. Pomocou tohto zariadenia je možné skúmať dynamické vlastnosti materiálov počas ťahového zaťaženia. Okrem valcových vzoriek je možné testovať aj ploché vzorky. To prispieva k ďalším poznatkom o plošnej tvariteľnosti a reálne môže mať využitie pri akýchkoľvek ťažných procesoch. [3; 6]

Zariadenie pre tento test sa vo vysokej miere podobá zariadeniu pre kompresný test. Takisto pomocou pneumatického kanónu je na vstupnú tyč vystrelený impaktor, ktorého náraz spôsobí tlakovú vlnu na vstupnej tyči. Rýchlosť impaktoru je meraná pomocou fotodiód. Rozdiel spočíva v prípravku, ktorý tlakovú vlnu prevedie na ťahovú, ktorá pôsobí na vzorku.. Na merných tyčiach sú umiestnené kapacitné snímače, ktoré zaznamenávajú napäťové pulzy v tyčiach, obdobne ako pri kompresnom teste ide o zaťažujúci pulz U_1 , odrazený pulz U_r a prejdený pulz U_T . [3; 6]

Pre dynamické testovanie vzoriek ťahovým namáhaním slúži prípravok zobrazený na obr. 15. Vzorka je uchytaná v odnímateľnej prírubе, ktorá je upravená pre priechod konca vstupnej tyče. Koniec vstupnej tyče je upravený do vidlicového tvaru, ktorý prechádza cez otvor v prírubе a zaťaženie cez tento koniec prechádza na kontajner. V kontajneri je uchytaný druhý koniec materiálovej vzorky. Vzorka je na koncoch opatrená závitmi a je upnutá v prírubе a v kontajneri, ktoré sú obe opatrené vnútorným závitom. Kontajner sa nachádza v púzdre, ktorého koniec uzatvára prírubа a druhým koncom je spojený s výstupnou tyčou. [3; 6]

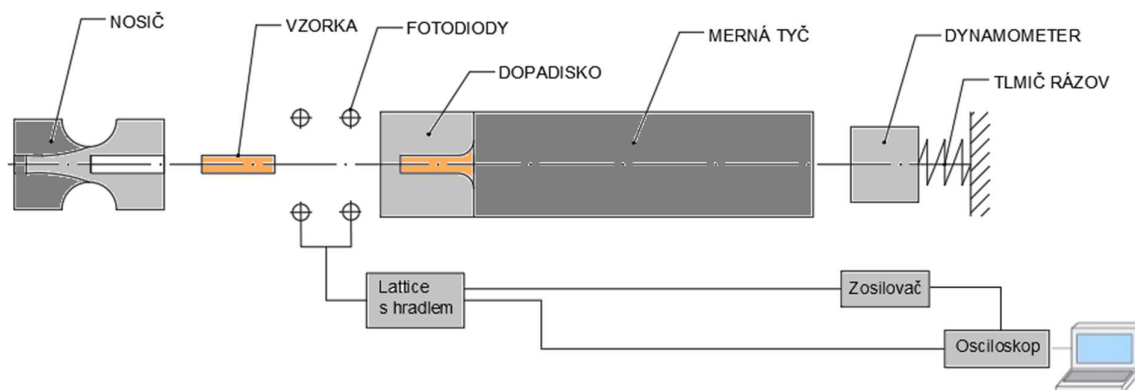


Obr. 15 Prípravok pre ťahový Hopkinsonov test [6].

Tento prípravok slúži pre testovanie valcových vzoriek. Záznam z merania nie je dokonalý, pretože geometrické úpravy komponentov napr. vidlicový koniec tyče sú nežiadúcimi plochami pre odrazy napätiových vln. Pre testovanie plochých vzoriek pre vyhodnotenie plošnej tvariteľnosti za dynamických podmienok slúži obdobný prípravok, ako pre valcové vzorky. V prírubе a v kontajneri sú namiesto vnútorných závitov obdĺžnikové otvory, do ktorých sa vzorka zasunie a zafixuje. [3; 6]

3.3 Taylorov test

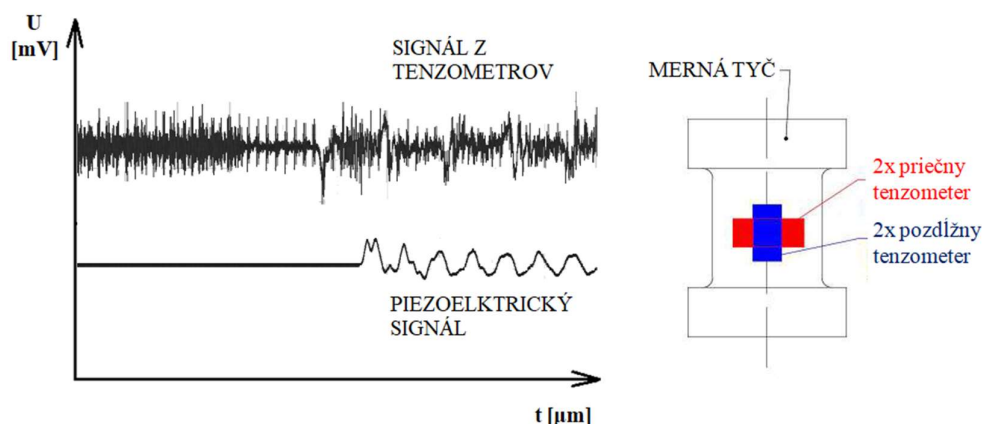
Taylorov test je po Hopkinsonovom teste ďalšia materiálová skúška, pomocou ktorej je možné popísať dynamické vlastnosti materiálu. Geoffrey Ingram Taylor analyzoval vzorky deformované za vysokých rýchlostí. TAT sa stal štandardným. Využitím tohto testu je možné získať hodnoty deformácie, rýchlosti deformácie alebo maximálne dynamické napätie pôsobiace na vzorku. Hlavný rozdiel oproti Hopkinsonovému testu je, že materiálová vzorka nie je umiestnená medzi mernými tyčami, ale je priamo vystreľovaná z pneumatického dela. Schéma testu je zobrazená na obr. 16 a dôležitými prvkami sú nosič vzorky, merná tyč a dopadisko, ktoré môžu byť vybavené rôznymi meracími senzormi a fotodiódami umiestnené pred dopadiskom. [2; 13; 14]



Obr. 16 Schéma Taylorovho testu [2; 14].

Princíp testu spočíva vo vystrelení materiálovej vzorky z pneumatického dela. Zariadenie pozostáva z pneumatického kanónu, pomocou ktorého je materiálová vzorka, umiestnená v nosiči, vystrelená smerom na mernú tyč. Zo vzdušníku, ktorý je súčasťou pneumatického kanónu, sa vypustí natlakovaný vzduch. Vyrovnanie rozdielu medzi tlakom vo vzdušníku a atmosférickým tlakom okolia spôsobí zrýchlenie materiálovej vzorky, ktorá je umiestnená v nosiči. Nosič napomáha správne vystreleniu vzorky z kanóna. Nosič sa tesne pred dopadom na mernú tyč mechanicky separuje od materiálovej vzorky a vzorka samostatne naráža do mernej tyče. Tesne pred samotným dopadom je pomocou fotodiód zmeraná rýchlosť vzorky. Miestom dopadu môže byť tuhá kovová doska, alebo merná tyč. V skoršej fáze tohto testu sa používala kovová doska, ktorá umožňovala vyhodnocovať test len na základe deformácie geometrie materiálovej vzorky. Merná tyč je vybavená ďalšími meracími zariadeniami, ktoré umožňujú vyhodnocovať test ďalšími spôsobmi, ktoré poskytujú ďalšie prínosné poznatky. Po samotnom dopade vzorky na mernú tyč dochádza k okamžitému nárastu tlaku na jeho povrchu a vytvorí sa elastická a plastická tlaková vlna, ktorá sa šíri objemom vzorky. Kým plastická tlaková vlna má za dôsledok deformáciu skúšobnej vzorky, časť elastickej vlny sa odráža späť do vzorky a ďalšia časť elastickej vlny prestupuje do mernej tyče. Výstupnými parametrami testu sú rázová sila, meraná pomocou dynamometra a priebeh napätových vln, zaznamenaný nalepenými tenzometrami v mernej tyči. Keďže diplomová práca úzko súvisí s rýchlosťami nosičov, popis zariadenie pre meranie dopadových rýchlostí sa nachádza v praktickej časti. [2; 7; 13; 14]

Meranie dynamických síl sa prevádza pomocou štyroch kovových tenzometrov, ktoré sú nalepené na obode mernej tyče a sú zapojené do Wheatonovho mosta. Dva tenzometre sú umiestnené pozdĺžne k osi mernej tyče a dva sú v priečnom smere, obr. 17. Vhodnejšie je však použiť na meranie napätových pulzov piezoelektrický snímač. Tenzometre sú náchylné na vysokofrekvenčný šum v tyči, ktorý zneprehľadňuje záznam z merania. Piezoelektrický snímač, ktorý je napojený na vlastný zosilňovač s osciloskopom zaznamenáva čistejší signál, neovplyvnený nežiadúcim šumom. Na obr. 17 je porovnanie získaného signálu z tenzometrov a piezoelektrického snímača. [6; 12]



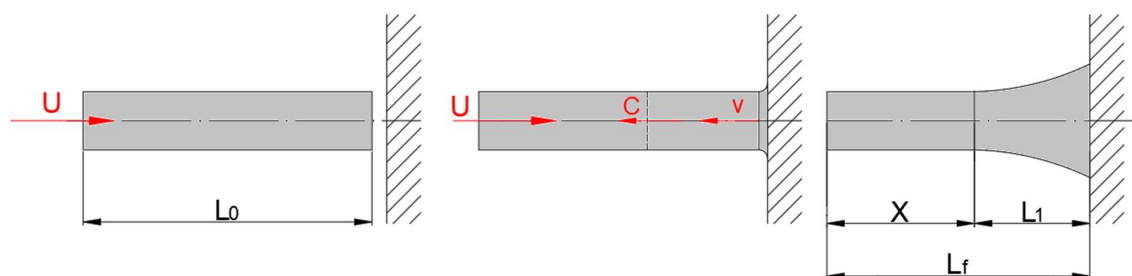
Obr. 17 Porovnanie rôznych signálov a schéma nalepenia tenzometrov [6]

Jednou zo základných úloh Taylorovho testu je určenie medze klzu. Medzu klzu stanovuje viacero vzťahov. Všetky tieto vzťahy sú však založené na zmene geometrie skúšobnej vzorky. Taylor opísal proces tejto deformácie ako sled elastických vln vo valci. Obrázok 18. znázorňuje postup deformácie podľa zjednodušeného Taylorovho modelu. Cylindrická vzorka naráža jedným čelom do pevného objektu rýchlosťou v_0 . Elastická vlna sa šíri od čela rýchlosťou C_{el} , ktorá je vyššia ako rýchlosť plastickej vlny. Elastická vlna sa odráži

od druhého čela a vracia sa opačným smerom, až kým sa nestretne s plastickou vlnou. Tieto dve vlny spolu interagujú, čím klesne napätie a to znamená koniec plastickej deformácie. Napätie v deformovanej časti sa považuje za konštantné a ekvivalentné medze klzu za danej rýchlosti deformácie. Značí sa ako dynamická medze klzu σ_{dy} .

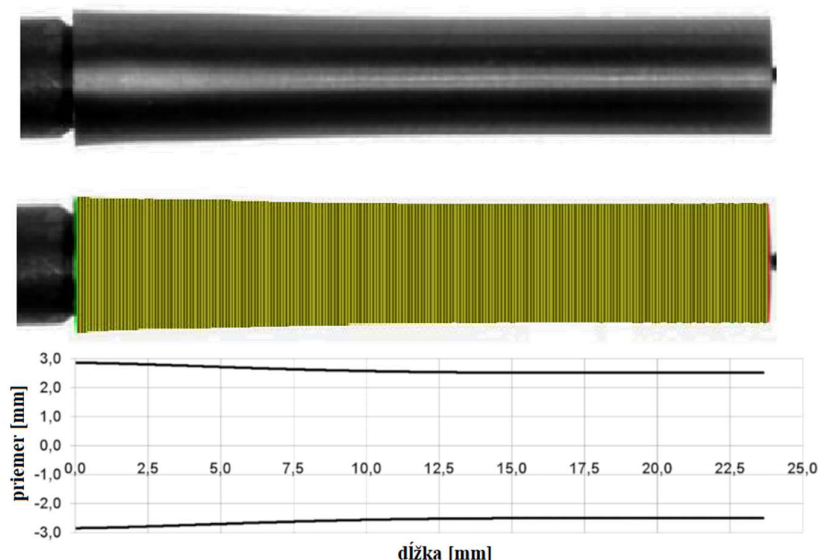
Počiatočná dĺžka vzorky L_0 sa zmení na konečnú dĺžku vzorky L_f , ktorá sa skladá z deformovanej dĺžky vzorky L_1 a nedoformovanej dĺžky vzorky X . Za predpokladu splnenia podmienky vysokej rýchlosti deformácie sa tvar vzorky po dopade na mernú tyč zmení z pôvodného valcovitého tvaru na lievikovitý, kruhový prierez vzorky zväčšuje svoj priemer.

Pri nižších dopadových rýchlostiach sa tvar vzorky mení na súdkovitý, pretože trenie medzi vzorkou a pevným dopadovým objektom zabráni tvorbe lievikovitého tvaru vzorky. Pri vyšších dopadových rýchlostiach je koeficient trenia rádovo nižší, preto dochádza k tvorbe uvedeného tvaru. Test nie je možné správne vyhodnotiť, ak má vzorka po dopade súdkovitý tvar. [2; 6; 11]



Obr. 18 Deformácia vzorky pri Taylorovom teste [1].

Geometria deformovanej vzorky nie je zisťovaná klasickými meradlami, ale používa sa obrazová analýza. Vyhотовí sa kamerový snímok vzorky a tvar sa vyhodnotí pomocou softwaru LUCIE. Software vyhotoví kontúru snímky, z ktorej sa závislosť zmeny priemeru na dĺžku môže spracovať vo vhodnom dátovom programe. Obrazová analýza je zobrazená na obr. 19 Software je schopný rozlišovať rozmery s presnosťou 0,055 mm.



Obr. 19 Postup obrazovej analýzy [6]

3.3.1 Vyhodnotenie Taylorovho testu

Pre vyhodnotenie Taylorovho testu slúži viacero rôznych postupov. Všetky sa ale zakladajú na rozbere geometrie deformovanej vzorky.

Stanovenie dynamickej medze klzu podľa Taylora σ_{DYT} [6]:

$$\sigma_{DYT} = (v_0^2 + v_0 \cdot c_{pl}) \cdot \frac{\rho \cdot 10^{-6}}{2 \cdot \ln \frac{L_0}{X}} \quad [\text{MPa}], \quad (3.2)$$

kde: v_0 – dopadová rýchlosť vzorky [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
 c_{pl} – rýchlosť šírenia plastickej vlny [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
 ρ – hustota materiálu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
 L_0 – počiatočná dĺžka vzorky [mm]
 X – nedeformovaná dĺžka vzorky [mm].

Vzťah (3.2) ráta s hodnotou rýchlosti šírenia plastickej vlny, ktorú však v skutočnosti nie je jednoduché určiť. Preto Hutchings upravil vzťah a použil aproximovaný odhad dynamickej medze klzu.

Stanovenie dynamickej medze klzu podľa Hutchingsa σ_{DYH} [6; 18]:

$$\sigma_{DYH} = \rho \cdot v_0^2 \cdot \frac{(L_0 - X) \cdot 10^{-6}}{2 \cdot (L_0 - L_f) \cdot \ln \frac{L_0}{X}} \quad [\text{MPa}], \quad (3.3)$$

kde: L_f – konečná dĺžka vzorky [mm].

Pre nižšie rýchlosti rázu, kedy výsledný tvar vzorky má len veľmi slabý lievikovitý charakter a pomer $\frac{L_0}{L_f}$ sa blíži k 1, je vzťah (3.3) ďalej upravený a dynamická medza klzu σ_{DY} sa stanoví:

$$\sigma_{DY} = 2 \cdot \sigma_{DYT} \cdot \left[\frac{1}{1 - \frac{X}{L_0}} - \frac{1}{\ln \left(\frac{L_0}{X} \right)} \right] \quad [\text{MPa}]. \quad (3.4)$$

Ďalší vzťah pre vyjadrenie dynamickej medze klzu vychádza z Bernulliho rovnice za predpokladu dokonale tuhej mernej tyče. Vzťah podľa Wilkinsa a Guinia ráta s prípadom, že nie je možné jednoznačne rozlíšiť deformovanú a nedeformovanú časť. Stanovenie dynamickej medze klzu podľa Wilkinsa a Guinia σ_{DYGW} [36]:

$$\sigma_{DYGW} = \rho \cdot v_0^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot \ln \frac{L_0}{L_f}} \cdot 10^{-6} \quad [\text{MPa}] \quad (3.5)$$

4 BALISTIKA TESTU

Snaha dosiahnuť vhodné podmienky pre dynamické testovanie materiálov viedla ku konštrukcií zariadení, ktoré zdieľajú spoločný základný princíp funkcie so strelnými zbraňami. Pre Hopkinsonov aj Taylorov test sa na uvedenie materiálov vzorky do pohybu používa pneumatický kanón. Balistika opisuje procesy, ktoré sa dejú počas vystrelenia vzorky pri dynamických testoch, či už ide o pôsobenie tlaku na projektil, alebo prelet projektilu v hlavni zariadenia až po dosiahnutie ústovej rýchlosti – rýchlosť projektilu v momente opustenia hlavne. Projektilom je možné nazývať sústavu nosiča materiálov vzorky spolu s materiálou vzorkou. [8; 24]

4.1 Balistika

Balistika ako vedná disciplína má zaujímavú vlastnosť a tou je silná nevyhnutnosť experimentálnych testov a ich analýz popri teoretickom podklade. Pri teoretickom navrhnutí balistického komponentu je potrebné testovať daný komponent, či funguje tak ako je navrhnutý. Obvykle nasleduje ladenie dizajnu a následne ďalšie testovanie. Je to dôsledkom troch faktorov: stochastickej povahy balistických procesov, nekonečným množstvom podmienok, ktoré vznikajú kombináciou správania sa projektilu, hlavne a hnacieho média, a zatiaľ nie úplne dostatočným pochopením týchto javov. Stochastické správanie, teda náhodné, ale do istej miery predpovedateľné, vyplýva z obrovského počtu parametrov, ktoré ovplyvňujú ústovú rýchlosť a následne aj ďalší pohyb projektilu. Druh týchto parametrov sa môže značne líšiť, ako napr. nepresnosť v tisícine milimetra vo výrobe projektilu a spôsob alebo doba od výroby použitej hnacej látky – streliva. Väčšinu parametrov, ktoré majú vplyv na výsledok je možné predpovedať, alebo je aspoň známe, ako by sa mala prejaviť ich zmena. Niektoré parametre však nie je možné testovať a overiť ich vplyv, pretože je zároveň prítomná nejaká ďalšia zásadnejšia premenná, ktorá ovplyvňuje výsledok v oveľa väčšej miere. [8;24]

Balistiku ako takú možno rozdeliť do štyroch skupín: interná balistika, stredná balistika, externá balistika a termálna balistika. Balistika teda skúma kompletný súbor procesov a javov od vzniku podmienok, ktoré umožňujú dostať projektil do pohybu, cez jeho let až po jeho konečný dopad. Nasleduje stručný popis každej skupiny [24]:

- Interná balistika skúma interakciu hlavne, projektilu a streliva až do momentu, kedy projektil neopustí ústie hlavne. Táto kategória zahŕňa proces vznietenia streliva, jeho horenia, skúma tlakové a teplotné podmienky v komore hlavne, jej natlakovanie, prvotný pohyb a zrýchlenie projektilu, proces drážkovania projektilu v hlavni, utesnenie komory, dynamiku strely v hlavni a jej dôsledky na samotnú hlavneň.
- Stredná balistika sa niekedy spája s internou balistikou, neskôr ale bola zaradená do samostatnej kategórie. Stredná balistika opisuje pohyb projektilu spolu so sprievodnými javmi v hlavni zbrane až kým projektil neopustí hlavneň. Zaoberá sa takisto ústovou rýchlosťou.
- Externá balistika sa nazýva časť balistiky medzi opustením hlavne projektilom, až po jeho dopad do cieľa. Pre externú balistiku je zásadná ústová rýchlosť, rýchlosť rotácie projektilu, geometria a dizajn projektilu (rozloženie hmoty). Tu je istý presah so strednou balistikou. Na základe týchto parametrov sa skúma dynamika stability letu projektilu, predpovedá sa dráha letu, doba letu, uhol letu a rýchlosť a miesto, kam projektil dopadne.

- Terminálna alebo koncová balistika sa zaoberá aspektmi počas dopadu projektilu do cieľa. Konkrétne ide o mechaniku prieniku projektilu do telesa, rozpad a štiepenie projektilu na fragmenty, pretlak z rany, ktorá vzniká dopadom a účinky dopadu projektilu na živé tkanivo. Tejto poslednej téme sa venuje v poslednej dobe značná pozornosť a vyvíja sa ďalšia samostatná oblasť balistiky.

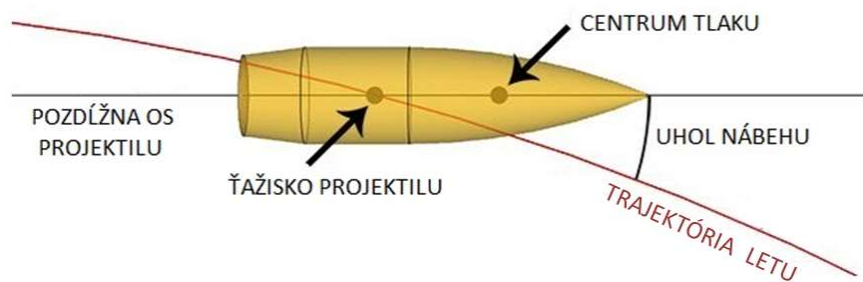
4.2 Stabilizácia projektilu

Počas celej dĺžky letu projektilu je žiadané, aby sa predpokladaná dráha letu čo najviac zhodovala so skutočnou. Úlohou projektilu je presne trafiť cieľ, ktorý môže byť rôzne vzdialený a rôzne veľký. Počas letu v hlavni aj mimo nej je extrémne nežiadúce aby sa projektil náhodne vychýľoval, rotoval v náhodných osách alebo inak menil požadovaný smer letu. Je nutné zabezpečiť stabilitu letu. Pri nedostatočnej stabilizácii, projektil môže začať klesať ihneď, ako opustí hlavň, rýchlosť klesania sa môže zvyšovať, až nakoniec bude miesto vertikálneho letu padať horizontálne smerom k zemi. Týmto sa skracuje dolet projektilu. Jeden z najhorších prípadov je, keď projektil stratí stabilitu letu ešte v hlavni, kedy môže dôjsť k jeho vzpričeniu a aj k poškodeniu hlavne. [24; 34; 35; 42]

Vo všeobecnosti stabilita projektilov má tri rôzne zložky a to statickú, dynamickú a gyroskopickú stabilitu, ktoré sa kvantifikujú koeficientami stability s_s , s_d a s_g . Ak je teleso staticky stabilné, tak vyrovná účinok malej rušivej sily, a teleso bude pokračovať v pohybe vo svojom pôvodnom smere. Dynamicky stabilné teleso vyrovná vychýľujúce pôsobenie síl oscilačným pohybom, ktorý ustane až, teleso dosiahne svoju pôvodnú pozíciu. Gyroskopická stabilita je odpor rotujúceho telesa k zmene osi jeho rotácie. Pri dizajnovaní tvarov projektilov je vďaka týmto koeficientom možné v relatívne dobrej miere odhadnúť stabilitu strely bez rozsiahlych numerických analýz. [24; 34; 35; 42]

4.3 Statická a gyroskopická stabilita

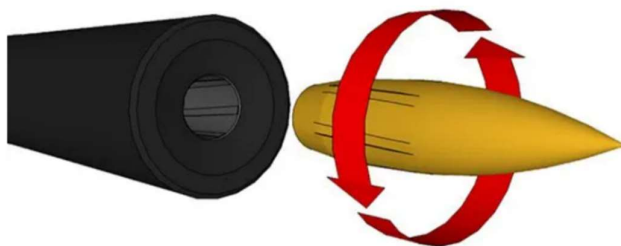
Statická stabilita súvisí s pozíciou centra tlaku (cp – center of pressure) a ťažiska projektilu. Centrum tlaku (CT) je pôsobisko všetkých aerodynamických síl v jednom bode, nazývané taktiež aerodynamické ťažisko. Aerodynamické sily sú výsledkom pôsobenia zmeny tlakov v okolí povrchu projektilu. Do CT je možné umiestniť silu, ktorá je ekvivalentom pôsobenia všetkých síl a momentov v dôsledku tlakových polí okolo telesa. Ak je CT v smere letu za ťažiskom, projektil je staticky stabilný, ako je znázornené na obr. 20. Ťažisko a CT sa nachádzajú na pozdĺžnej osi náboja, ťažisko kopíruje trajektóriu strely, ale to už neplatí pre CT. Inými slovami, os náboja nie je orientovaná rovnako ako trajektória strely, ale zvierajú spolu uhol, ktorý sa nazýva uhol nábehu. Náboj letí pod týmto uhlom, dôsledkom čoho je, že tlak vzduchu nepôsobí priamo na stred projektilu. Rotácia okolo osi vychýlenia (yawaxis) produkuje moment, ktorý pôsobí na ťažisko a má tendenciu vrátiť os telesa späť do neutrálnej polohy – bez vychýlenia. [24; 32; 33; 42; 43]



Obr. 20 Ťažisko a centrum tlaku projektilu [33]

Ak je CT v smere letu pred ťažiskom, normálové sily vyvolávajú moment, ktorý rotuje os telesa mimo neutrálnu polohu a zväčšuje vychýlenie. Projektil je v tomto prípade staticky nestabilný. Napriek tomu je možné týmto neželaným pohybom zabrániť a to vďaka gyroskopickému efektu pri rotácii projektilu okolo vlastnej osi. Takto môže byť projektil gyroskopicky stabilný aj napriek jeho statickej nestabilite. Na obr. 21 je ilustrácia gyroskopicky stabilizovanej strely. Keďže CT valcového rotačného telesa, ktorým projektil typicky je, sa nachádza pred ťažiskom docieľť jeho stabilitu je možné troma spôsobmi [24; 32; 33]:

- Koncentrácia hmoty telesa do jeho prednej časti a posunutie ťažiska pred CT. V praxi je to málo využívaná možnosť.
- Pridanie plochých častí ku projektilu – krídelká. Krídelká v zadnej časti ovplyvnia pôsobenie tlakových častí na teleso a tým posunú CT smerom dozadu, za ťažisko.
- Uvedením projektilu do rotácie okolo vlastnej osi. Pri dostatočnej rotácii gyroskopická stabilita vyrovná statickú nestabilitu.



Obr. 21 Ilustrácia gyroskopicky stabilizovanej strely [32]

4.3.1 Možnosti stabilizácie.

Najjednoduchší spôsob stabilizácie letiaceho objektu je pomocou krídel. Krídlová alebo inak šípová stabilizácia je tvorená rovnými, horizontálnymi alebo vertikálnymi plochami. Výhody použitia tohto typu stabilizácie sú [24; 35; 42; 43]:

- Stabilizácia pomocou krídel predĺži projektil pri zachovaní priemeru.
- Zvýšenie tohto pomeru dĺžky ku priemeru môže zlepšiť letové vlastnosti.
- Vo všeobecnosti hlavne supersonické lietadlá majú tento pomer (finenessratio) vyšší.
- Jednoduchosť konštrukcie.

Ďalšou možnosťou je rotačná stabilizácia. Gyroskopická stabilita rotačne stabilizovaného projektilu sa dá odhadnúť stanovením gyroskopického koeficientu stability s_g [35]:

$$s_g = \frac{I_x \cdot p^2}{4I_y \cdot \mu} [-], \quad (4.1)$$

kde: I_x – osový moment zotrvačnosti [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$],
 I_y – priečny moment zotrvačnosti [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$],
 p – osová uhlová rýchlosť [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$],
 μ – vplyv statického momentu [$\text{Nm} \cdot \text{rad}^{-1}$].

Za predpokladu, že statický moment sa mení lineárne s vychýlením, vyjadrenie vzťahu pre vplyv statického momentu μ je [35]:

$$\mu = \frac{\pi}{8} \cdot \rho \cdot d^3 \cdot v^2 \cdot C_{M\alpha} \text{ [Nm} \cdot \text{rad}^{-1}\text{]}, \quad (4.2)$$

kde: ρ – hustota okolia [kg/m^3],

$d_{\max}$ – maximálny priemer telesa [m],

v – rýchlosť [m/s],

$C_{M\alpha}$ – koeficient statického momentu, [rad^{-1}].

Ak koeficient gyroskopickej stability dosahuje hodnoty $0 \leq s_g \leq 1$, projektil sa správa nestabilne a jeho dráha môže mať výrazne odchýlky už v blízkom okolí hlavne. Pri hodnotách vyšších ako 1 je projektil gyroskopicky stabilný. Keďže tento parameter s_g je nepriamo úmerný hustote okolia, projektily, ktoré sú stabilné v štandardných atmosférických podmienkach, sa pri nie bežných podmienkach (tlakoch alebo teplotách) môžu správať nestabilne. Skutočnosť, že pri rôznych podmienkach sa projektil môže správať inak je potrebné zahrnúť do výpočtu rovnako, ako ďalšie neistoty a nepresnosti uvedených vzťahov. Preto sa pri navrhovaní projektílov vychádza z minimálnej hodnoty $s_g = 1,3$, ktorá by mala zaručiť dostatočnú zálohu, ktorá zabráni nečakanej strate dynamickej stability, ktorá bude rozobratá neskôr. Gyroskopická stabilita má aj svoju hornú hranicu, po ktorej prekročení nastáva prestabilizovanie strely. Prestabilizovaná strela, pohybujúca sa po balistickej krivke, nekopíruje svojou osou túto krivku. Miesto toho jej os zostáva v osi hlavne, čím vznikajú okolo strely tlakové polia, ktoré znižujú vertikálny prepad strely. Miesto zásahu potom bude vpravo hore, oproti pôvodnému cieľu, ktorý by bol dosiahnutý, ak by strela mala nižšiu rotáciu a bola by správne stabilizovaná. Prakticky sa tento vplyv môže prejavovať pri strieľaní na veľké vzdialenosti. Koeficient s_g v mieste ústia hlavne je možné zapísať aj ako [24; 35]:

$$s_g = K_1 \cdot \left(\frac{p}{v}\right)^2 = K_1 \cdot \left(\frac{2\pi}{n_v \cdot d}\right)^2, \quad (4.3)$$

Kde: K_1 – konštanta zahrňujúca parametre z rovníc 4.1 a 4.2,

n_v – stúpanie vývrtu v hlavni [mm/ot].

Z toho vzťahu vyplýva, že rotačná stabilita projektílu závisí na vývrte hlavne a len nepriamo závisí (koeficient C_1) na ústovej rýchlosti. Nepriamy vplyv ústovej rýchlosti sa zvyšuje v závislosti na koeficiente statického momentu $C_{M\alpha}$ od Machového čísla. Toto môže mať za následok nestabilitu za pri nižších ústových rýchlostiach. Konvenčné projektily strácajú rýchlosť vo vzduchu oveľa skôr, ako strácajú rotáciu. [35]

5 PRAKTICKÁ ČASŤ

Cieľom diplomovej práce je vývoj nosiča materiálovej vzorky, pre Taylorov test. TAT patrí do kategórie dynamických materiálových skúšok, pri ktorých je materiál pretváraný za vysokých rýchlostí deformácie. Výsledky týchto skúšok sa používajú pre tvorbu materiálových modelov, ktoré sa ďalej využívajú v simulačných programoch. Oproti súčasnému stavu dochádza k úprave hlavne pneumatického kanónu, ktorý je súčasťou testovacieho zariadenia. Úprava hlavne umožňuje indukčný ohrev materiálových vzoriek, a tak testovanie materiálov za vyšších teplôt. Táto zmena si vyžaduje aj úpravu tvaru nosiča materiálovej vzorky, čo je dobrá príležitosť na otestovanie vplyvu tvaru nosiča na dopadovú rýchlosť vzorky. Hlavným cieľom je vyvinutie funkčného nosiča pre upravenú hlavňu zariadenia, ktorý by zabezpečil podobné dopadové rýchlosti ako pred úpravou. Nárast dopadových rýchlostí je vítaný. [2; 11]

5.1 Nosič vzorky

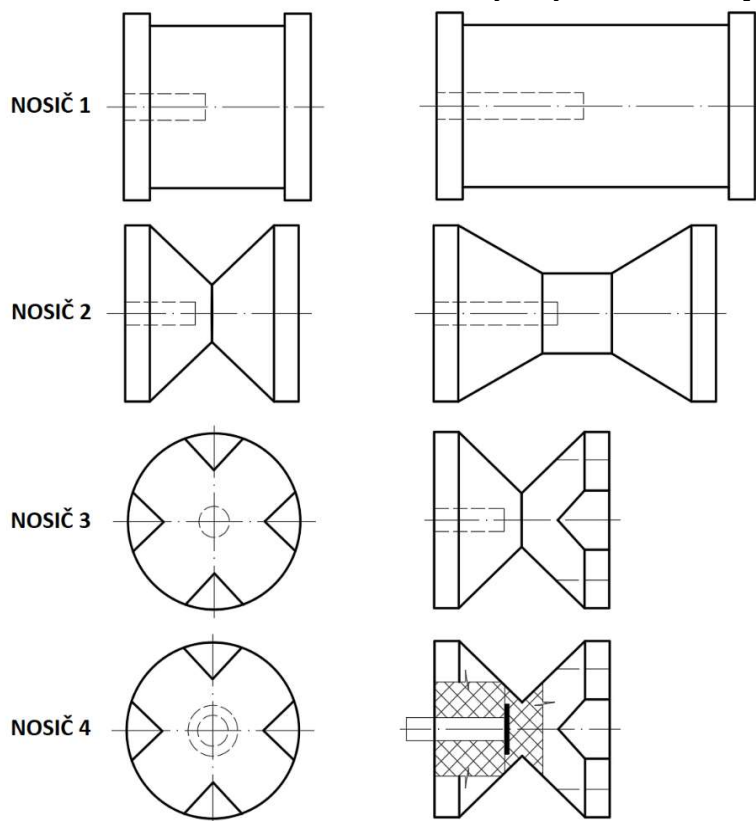
Hlavnou úlohou nosiča je dopraviť materiálovú vzorku do miesta dopadiska, kde sa vzorka separuje od nosiča a následne dopadne na mernú tyč. Je požadované, aby vzorka narazila na mernú tyč kolmo a centricky. Každá výchylka od osi môže znehodnocovať dosiahnuté výsledky. Takisto je žiadané, aby vzorka dopadla čo v najvyššej rýchlosti. Z vyšších dopadových rýchlostí vyplýva väčšie rozmedzie rýchlostí deformácií, čo umožňuje podrobnejšie skúmanie materiálových vlastností so širšou škálou funkcie materiálových modelov. Z druhého Newtonovho zákona vyplýva, že s nižšou hmotnosťou rastie zrýchlenie telesa, takže je vítaná najnižšia možná hmotnosť nosiča. Hmotnosť materiálových vzoriek sa rádovo pohybuje v jednotkách gramov. Hmotnosť ocelevej vzorky o priemere Ø5 mm a dĺžke 25 mm váži cca 3,8 g. Nosič vzorky by teda nemal presahovať túto hmotnosť. [2]

Ďalej je vhodné, aby bol nosič aerodynamického tvaru. Počas letu môže dochádzať k rôznym turbulenciám a vibráciám, ktoré môžu spôsobiť nesprávny dopad vzorky na mernú tyč, alebo dokonca zaseknutie zostavy nosiča so vzorkou v hlavni pneumatického kanónu. Z hľadiska dosiahnutia čo najvyšších rýchlostí, teda dosiahnutia čo najmenšieho odporu samotného telesa, hrá aerodynamický tvar telesa dôležitú úlohu, keďže odpor telesa rastie kvadraticky s druhou mocninou rýchlosti.

Nosič by mal disponovať aj základnými pevnostnými vlastnosťami, tzn. aby behom transportu vzorky nedošlo k poškodeniu samotného nosiča. Kvôli relatívne vysokej hustote skúšaných materiálov, ako je napr. oceľ alebo titan, pôsobí vplyvom zotrvačných síl na nosič značné zaťaženie. Pre úspešný výsledok materiálovej skúšky je podstatné, aby materiál nosiča tomu zaťaženiu odolal a nedošlo k preboreniu nosiča alebo k jeho predčasnej deformácii pred dopadom na separačnú plochu. Pri návrhu nosiča nie je možné zanedbať ani ekonomické hľadisko. Nosiče sú jednorazové, keďže pri takých vysokých rýchlostiach nie je možné, aby po náraze nosiča nedošlo k jeho deštrukcii. Z toho vyplýva, že výroba nosiča musí byť čo najjednoduchšia a najlacnejšia.

5.1.1 Vývoj tvaru nosiča po súčasný stav

Na Ústave strojírenskej technológie FSI prebiehal vývoj nosiča, až do jeho súčasného stavu. Z priebehu tohto minulého vývoja je možné implementovať niektoré poznatky aj do súčasného vývoja. Preto táto podkapitola obsahuje zmapovanie vývinu tvaru nosiča a použitých materiálov až po súčasný stav. Nosiče boli vyvíjané pre pneumatický kanón s vnútorným priemerom $\varnothing 50$ mm. Na obrázku 22 je vývoj nosičov od počiatočných návrhov. V prílohách 1 až 5 sa nachádza fotodokumentácia všetkých týchto návrhov. [7; 9]



Obr. 22 Vývoj tvaru nosiča [7; 9]

Nosič 1 bol prvý návrh jednoduchého valcového tvaru. Nosič sa neosvedčil, kvôli zlému vedeniu nosiča v hlavni a dochádzalo ku vzpričeniu nosiča v hlavni. Nosič 2 mal jednoduchú úpravu pre zníženie hmotnosti. Rovnako ako nosič 1, tak aj tento nosič sa v hlavni zasekával a nebol schopný dopraviť materiálovú vzorku podľa požiadaviek. Nosiče 1 a 2 boli vyrábané v dvoch verziách, a to rozmeroch $\varnothing 5 \times 25$ mm a $\varnothing 50 \times 25$ mm. Nakoniec bola zvolená prvá verzia vzorky o dĺžke 25 mm.

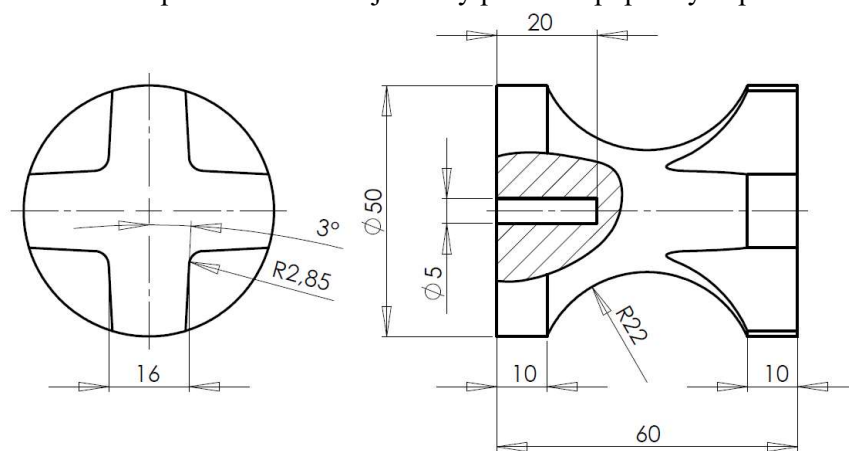
Došlo k záveru, že ťažná hrana nosiča, tj. rovina, ktorou je nosič v hlavni tlačенý vzduchovou vlnou, musí byť čo najviac vpredu nosiča. To sa malo doceliť jednoduchou úpravou pomocou vyrezania štyroch drážok v zadnej časti nosiča. Takto upravený tvar predstavuje nosič 3. Tento typ nosiča už bol použiteľný asi do rýchlosti $200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Tieto nosiče boli vyrábané z blokov polystyrénu a boli sústružené. Kvôli nízkym pevnostným vlastnostiam polystyrénu nosiče nedolávali zotrvačným silám pri urýchľovaní skúšobných vzoriek na vyššie rýchlosti (nad $200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Dôsledkom toho sa nosič nesúsovo zabáral do polystyrénu a nedochádzalo k centrickému dopadu. Prípadne vzorka prešla axiálne naskrz nosičom a nedošlo tak vôbec k dopadu na dopadovú dosku.

Z toho dôvodu boli nosiče doplnené o plastovú podložku, ktorá mala zabráňovať takýmto preboreniam. Ide o nosič 4 na obrázku 22. Táto úprava sa javila ako účinná, avšak zvyšovala pracnosť výroby tým, že nosiče bolo treba po sústružení rozrezať, vložiť podložku a následne ich zlepiť späť dokopy. V prílohe 6 je finálny nosič [7;9]

5.1.2 Súčasný nosič a jeho výroba

Po počiatočnom vývoji tvaru bol zvolená geometria nosiča zobrazená na obr. 23. Priemer nosiča prispôbený hlavni dela a má hodnotu 50 mm. Geometria bola volená hlavne s ohľadom na skúsenosti s nosičmi, ktoré sú popísané v predchádzajúcej kapitole. Tvar nosiča musel byť vyrobiteľný navrhovanou technológiou vypeňovania, tzn. musel spĺňať všetky konštrukčné a technologické požiadavky súvisiace s touto technológiou. Rovnako musí byť zaistená funkčnosť transportu materiálovej vzorky podľa už popísaných podmienok. [2; 7]



Obr. 23 Geometria súčasného nosiča [2]

Ako spôsob výroby nosiča bola zvolená technológia vypeňovania do formy. Samotná technológia vypeňovania je procesne náročná a závisí od použitého materiálu. Materiál použitý pre výrobu nosičov touto technológiou musí disponovať vlastnosťami ako: nízka hustota, dobrá zabiehavosť materiálu, rozmerová stálosť a nízka hustota. Pre výrobu nosiča boli spočiatku skúšané materiály, ktoré sa používajú v stavebníctve, napr. montážna pena Soundal. Vytrdovanie tejto hmoty trvá približne 3 hodiny. Materiál pri vypeňovaní zväčšuje svoj objem zhruba 45 násobne. Nevýhodou tejto peny je, že presné dávkovanie je veľmi náročné, a tým sa komplikuje objem nosiča po vypení. Často dochádzalo k tomu, že nosiče mali nedostatočný objem a pena nezabiehala do celého objemu formy, alebo nosiče boli vypenené až príliš a bolo nutné ich dodatočne orezávať. V prílohe 7 sa nachádza fotografia nosiča z materiálu Soundal. [2; 7; 9]

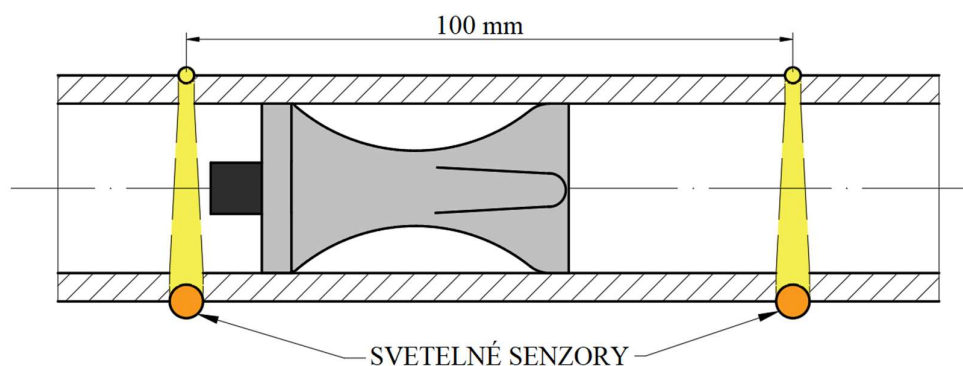
Forma sa skladá z masívnej rozoberateľnej kovovej objímky a samotného materiálu formy, ktorým je silikónový tmel LUKOPREN 1522. Tento tmel disponuje niektorými vhodnými vlastnosťami pre materiál formy, ako sú: dobrá zabiehavosť formy aj pri jemných geometrických detailoch, vysoká schopnosť použiť formu opakovane, dobré separačné vlastnosti a výborná tepelná odolnosť (-50°C až 180°C). Vo forme sa nachádzajú kanáliky pre odvdzušnenie formy. Neskôr boli skúšané rôzne polystyrénové granuláty, až ako finálny materiál bol zvolený polystyrénový granulát KOPLIN 1640. Tento granulát má oproti montážnej pene tú výhodu, že je ním možné naplniť jednoducho formu lukoprenovou formou v požadovanom množstve a po vypení má zhruba konštantný objem. Polystyrénový granulát je oproti pene Soundal cenovo výhodnejší. Pre tieto fakty bol ako materiál nosiča pre vypeňovanie vo forme zvolený polystyrénový granulát KOPLIN 1640.

Polystyrénový granulat je nutné skladovať vo vhodnom (suchom, klimatizovanom) prostredí. Pred samotným vypeňovaním polystyrénu vo forme je nutné polystyrénový granulat ešte predpeniť. Oba tieto procesy sú náchylné na dodržanie presných časových a iných parametrov. Nedodržanie procesných parametrov vedie k výrobe zmätkového nosiča. Zmätkový nosič môže mať geometrické nepresnosti, nesprávnu drsnosť povrchu, môže byť príliš tuhý alebo naopak málo tuhý. Tieto všetky vady znemožňujú správne vykonanie TAT, preto je veľmi dôležité pre výrobu funkčných nosičov striktne dodržať výrobný postup. [2]

5.2 Meranie dopadových rýchlostí

Elementárnym prvkom Taylorovho testu je určenie dopadovej rýchlosti materiálovej vzorky. Bez znalosti tejto rýchlosti by nebolo možné stanoviť rýchlosť deformácie a k nim pripísať dané vlastnosti. Zariadenie TAT má dva snímače rýchlosti. Obidva snímače sú zostavené z optických senzorov, ktoré merajú dobu preletu medzi jednotlivými snímačmi. Ide teda o nepriame meranie rýchlosti. Na obrázku 24 je snímač rýchlosti 1, ktorý je umiestnený 400 mm od dopadiska a má dva fotodiodické snímače svetla, ktoré sú od seba vzdialené 100 mm. Oproti fotodiódam sú umiestnené zdroje svetla, ktoré ich osvetľujú. Pri prelete nosiča so vzorkou sú postupne prerušené svetelné lúče, ktoré dopadajú na fotodiódy. Pri pretnutí prvého lúča sa začne meranie času, pri pretnutí druhého lúča sa meranie času zastaví. Tým je zmeraná doba preletu nosiča presne známej dráhy. Z týchto parametrov sa určí rýchlosť nosiča so vzorkou. [2; 3]

Nedostatkom tohto snímača je, že počas preletu dráhy 100 mm môže dôjsť ku zrýchleniu alebo spomaleniu nosiča. V takom prípade nie je stanová rýchlosť letu absolútne presná. Doba preletu je meraná pred separovaním vzorky od nosiča. Počas separovania môže takisto dôjsť ku spomaleniu vzorky. Ďalšia nevýhoda plynie z rozptylu svetelných lúčov a ich sklonu. Týmto sa môže vnášať určitá nepresnosť do okamihu spustenia a zastavenia merania času. Snímač meria čas s presnosťou 1 μ s. [2]

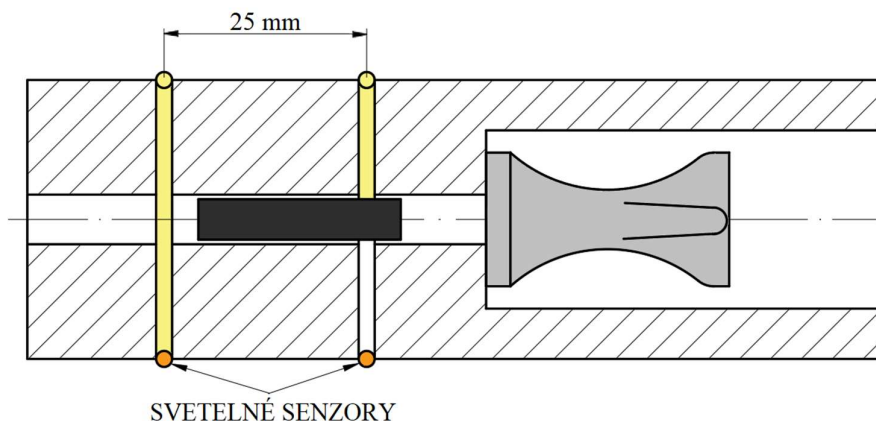


Obr. 24 Snímač rýchlosti 1 [2]

Na obrázku 25 je schéma snímača rýchlosti 2, na ktorej materiállová vzorka práve pretína prvý lúč svetla. Snímač je umiestnený v samotnom dopadisku a funguje na rovnakom princípe ako snímač č.1. Toto umiestnenie je výhodnejšie, pretože je snímaná doba preletu separovanej vzorky. Ďalší rozdiel medzi snímačmi je v tom, že vzájomná vzdialenosť svetelných senzorov je 25 mm a svetelné lúče pretína separovaná vzorka bez nosiča. Snímač 1 bol pôvodný snímač, ktorý sa použil pri stavbe zariadenia pre TAT, snímač 2 bol do zariadenia inštalovaný až neskôr, skladá sa z modernejších a menších komponentov. Tým sa zredukovala aj veľkosť otvorov pre prechod svetla, čo minimalizovalo rozptyl a sklon svetelných lúčov. Snímač 2 meria s presnosťou 0,1 μ s. [2]

Snímač 2 má oproti snímači 1 niekoľko výhod:

- meranie doby preletu separovanej vzorky,
- rýchlosť vzorky tesne pred dopadom,
- vyššia presnosť merania,
- minimálny rozptyl svetelných lúčov.



Obr. 25 Snímač rýchlosti 2 umiestnený v dopadisku [2]

Výpočet rýchlosti preletu vychádza z rovnomerného pohybu, pri ktorom sa zanedbáva zrýchlenie alebo spomalenie. Výpočet rýchlosti preletu pomocou snímača č.1. v_{s1} :

$$v_{s1} = \frac{s_1}{t_1} = \frac{100 \cdot 10^3}{t_1} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}, \quad (5.1)$$

kde: s_1 – vzdialenosť fotodiód snímaču č.1 [mm],
 t_1 – zmeraná doba preletu snímačom č.1 [μs].

Výpočet rýchlosti preletu pomocou snímača č.2. v_{s2} :

$$v_{s2} = \frac{s_2}{t_2} = \frac{25 \cdot 10^3}{t_2} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}, \quad (5.2)$$

kde: s_2 – vzdialenosť fotodiód snímaču č.2 [mm],
 t_2 – zmeraná doba preletu snímačom č.2 [μs].

5.3 Metodika optimalizácie nosiča

V prvom kroku bude vytvorený ekvivalent nosiča súčasného tvaru, ktorý bude prispôbavený úpravám hlavne pneumatického kanónu. Z pôvodnej kovanej hlavne kanónu sa prešlo na trúbku PVC plastu. Pôvodná hlavňa má vnútorný priemer $\varnothing 50$ mm. Do tejto hlavne bola vložená PVC trúbka o vnútornom priemere $\varnothing 17$ mm. Do priestoru medzi hlavňami bol vložený komponent pre indukčný ohrev vzoriek počas letu. S ohľadom na túto zmenu priemeru bude nadizajnovaný ekvivalent súčasného tvaru nosiča. Tento ekvivalent sa podrobí simuláciám v programe ANSYS pre zistenie jeho aerodynamických vlastností.

Následne bude na základe teoretických poznatkov danej problematiky prebiehať návrh nového tvaru nosiča, ktorý by mohol mať vhodnejšie vlastnosti pre TAT ako ekvivalent súčasného nosiča. Návrh tvaru bude pozostávať z niekoľkých krokov:

- návrh stabilizačných prvkov nosiča,
- optimalizácia tvaru tela nosiča,
- redukcia hmotnosti nosiča.

V každom z týchto krokov bude navrhnutých niekoľko variant a pri každom kroku sa vyberie najvhodnejší variant. Voľba variant bude prebiehať na základe vzájomného porovnávania výsledkov simulácií. V pokročilejšej fáze môžu byť výsledky simulácií podporené a overené praktickými testami. Overovanie vlastností pomocou testov bude prebiehať bez vloženej materiálnej vzorky v nosiči. Týmto procesom bude navrhnutý finálny variant nosiča. Na záver bude porovnaný finálny návrh nosiča s ekvivalentom súčasného nosiča. Bude sa porovnávať funkčnosť nosičov a ich dosiahnuté dopadové rýchlosti. Tento záverečný test bude prebiehať so vzorkou vybraného materiálu a vyhodnotia sa vlastnosti tohto materiálu za dynamických podmienok namáhania.

Návrh tvaru nosiča je v prvom rade podmienený splnením všetkých uvedených vlastností v kap. 5.1, ktorými musí nosič disponovať tak, aby dopravil materiállovú vzorku do miesta dopadiska. Tvar sa bude navrhovať s prihliadnutím na ideálny aerodynamický tvar, ktorý teoreticky dosahuje najnižšie hodnoty odporu. Stanovenie ideálneho tvaru nosiča výpočtovo, by bolo príliš náročné kvôli veľkému množstvu faktorov a premenných parametrov, ktoré výpočet prúdenia okolo telesa zahŕňa. Preto bol metodicky zvolený prístup porovnávania jednotlivých tvarov. Tvary sa budú porovnávať v simulačnom software ANSYS. Celkovo bude každý návrh tvaru podrobený dvom typom simulácií.

Ak sa na základe simulácie stanoví niektorý tvar ako vhodný kandidát na nosič materiálnej vzorky, bude tento návrh vytlačený na 3D tlačiarňu a následne sa otestuje pomocou reálneho TAT. Tým bude možné jednotlivé návrhy porovnať aj experimentálne a bude možné overenie správnosti výstupov zo simulácií. Finálny návrh tvaru nosiča bude určený na základe dvoch podmienok:

1. Nosič musí dopraviť materiállovú vzorku do miesta dopadiska bezpečne. Nesmie dôjsť k zaseknutiu nosiča v hlavni kanónu. Vzorka sa nesmie oddeliť od nosiča predbežne. Počas transportu nesmie dôjsť ku preboreniu, ani iným poškodeniam nosiča. Vzorka by mala na dopadisko naraziť centricky a kolmo.
2. Finálna varianta tvaru nosiča bude tá, ktorá bude dosahovať najvyššie dopadové rýchlosti pri testovaní pomocou TAT z pomedzi všetkých ostatných návrhov.

5.3.1 Porovnávací simulácia

Pre posúdenie aerodynamických vlastností nosiča je dôležitý jeho koeficient odporu, na ktorom závisí spomalenie pri pohybe v hlavni kanónu. Určenie samotného koeficientu odporu by bolo pre množstvo navrhnutých tvarov nosičov veľmi zdĺhavé a náročné. Preto bol zvolený prístup porovnávania tlakových polí pôsobiacich na čelo nosičov. Simulácie tlakových polí boli vytvárané pomocou programu ANSYS v module Fluid Flow (CFX).

Prvý typ simulácie bude porovnávací simulácia, ktorá slúži na porovnanie správania sa rôznych návrhov tvarov, za rovnakých okrajových podmienok. Simulovať sa bude tvorba tlakových polí na čelnej strane nosiča. K tvorbe tlakových polí dochádza v dôsledku hromadenia vzduchu pred nosičom, ktorý nosič musí pri vlastnom lete pred sebou vytláčať. Simuláciou prúdenia vzduchu okolo nosiča sa odhadnú hodnoty tlakov pre rôzne návrhy nosičov, ktoré sa následne porovnajú.

Simulované bude tlakové pole, pôsobiace na nosič vo veternom tuneli. Veterný tunel, ktorý predstavuje oblasť simulácie, rozmermi zodpovedá rozmerom hlavne pneumického kanónu. To znamená, že veterný tunel má rovnaký vnútorný priemer, ako hlaveň, teda Ø17 mm. Všetky simulácie tohto typu musia mať zhodné vstupné parametre.

Na vstupe do veterného tunela pôsobí prúd vzduchu o rýchlosti $130 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Táto rýchlosť je odhad rýchlosti, ktoré môžu nosiče pri testoch dosahovať (testy nosičov sa nebudú vykonávať pri maximálnych možných tlakoch). Simulovaný smer prúdu vzduchu bol opačný ako smer letu nosiča. Počiatočný tlak vo veternom tuneli a na výstupe z veterného tunela

bol nastavený na hodnotu 1 atm. Pôsobiaci prúd vzduchu vytvára na čele nosiča oblasti s vyšším tlakom a za nosičom oblasti s nižším tlakom, ktoré spoločne vytvárajú odpor voči vzájomnému relatívnemu pohybu nosiča a prúdu vzduchu.

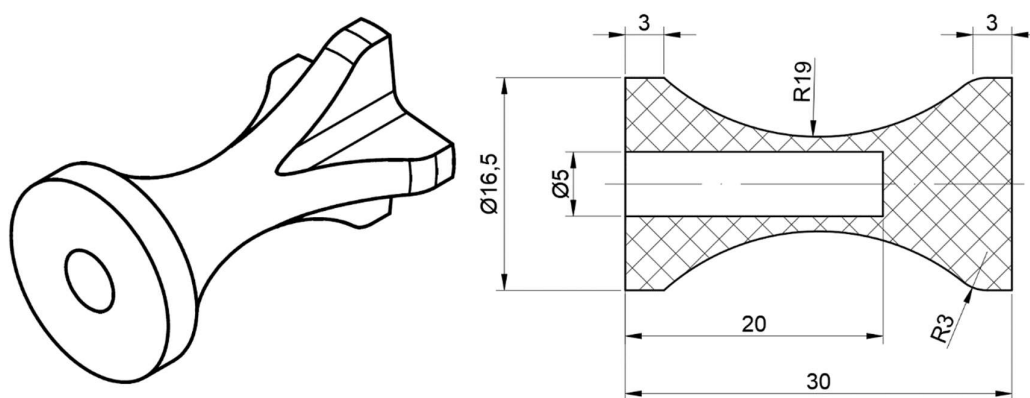
5.3.2 Simulácia stability letu

Podľa teórie internej balistiky je dôležité z pohľadu stability letiaceho projektilu, aby sa centrum tlaku nachádzalo pred ťažiskom samotného projektilu. Určiť polohu centra tlaku výpočtovo je náročné, preto sa táto poloha bude odhadovať pomocou simulácie v software ANSYS, takisto v module Fluid Flow (CFX). Centrum tlaku by sa malo nachádzať v oblasti kde je najväčšia zmena veľkosti tlakového poľa ku polohe. Preto bude sledovaná oblasť, kam pôsobí tlaková sila zrýchľujúca nosič. V tejto oblasti by sa malo nachádzať aj ťažisko samotnej zostavy nosiča a vzorky tak, ako je to popísané v kapitole 4.3. Týmto by sa malo predísť nežiaducim vibráciám a pohybom nosiča počas letu. Vhodnosť a následné praktické testovanie daného nosiča bude overené a podmienené touto simuláciou. Ak daný nosič nesplní podmienku stabilného letu, bude vyhodnotený ako nevhodný a bude vylúčený.

Pri tejto analýze nie je podstatné, aby simulácie všetkých návrhov mali rovnaké hodnoty počiatočných parametrov. Ide o zobrazenie oblasti, v ktorej sa nachádza centrum tlaku a následné porovnanie polohy centra tlaku s ťažiskom nosiča. Napriek tomu budú zachované rovnaké počiatočné podmienky. Konkrétne tlak na vstupe bude nastavený na hodnotu 6 atm, čo približne zodpovedá maximálnemu tlaku, ktorým je možné plniť vzdušník kanónu. Hodnota tlaku na výstupe bude 1 atm. Opäť oblasť simulácie bude veterný tunel s priemerom zodpovedajúcim priemeru hlavne Ø17 mm.

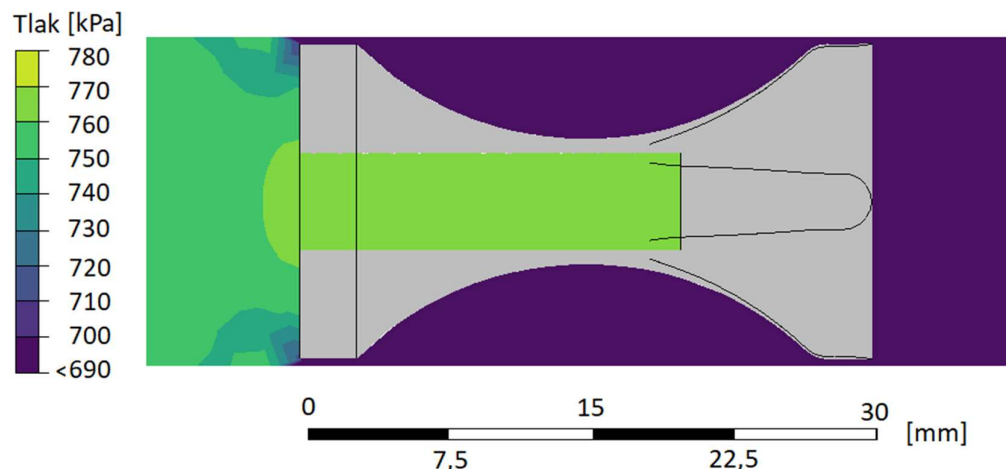
5.4 Vývoj tvaru nosiča

Pri vývoji nosiča sa vychádzalo z tvarového ekvivalentu súčasného polystyrénového nosiča. Pracovný názov nosiča je E1. Tvar pôvodného nosiča bol približne zachovaný, boli prispôbolené len rozmery a to s ohľadom na vnútorný priemer hlavne kanóna Ø17 mm. Na obr. 26 je vyobrazenie tohto nosiča a jeho geometria.



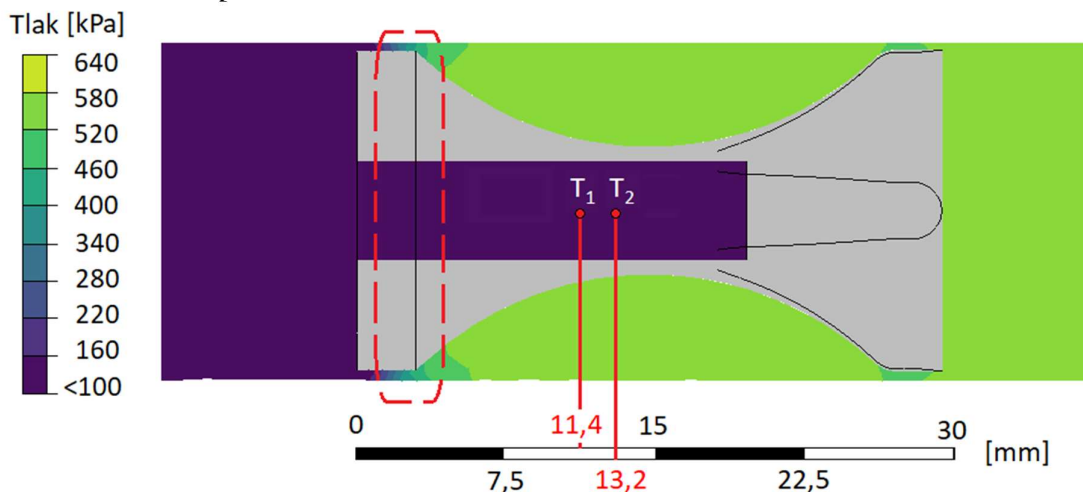
Obr. 26 Nosič E1 a jeho geometria

Na obr. 27 je vykreslenie výsledku simulácie, ktorá zobrazuje maximálny tlak na čelo nosiča, ktorý dosahuje hodnoty až 780 KPa. Vo fialovo vykreslenej oblasti je tlak nižší ako 690 KPa. Táto simulácia bola vyhotovená kvôli porovnaniu maximálnych tlakov pôsobiach na čelné plochy rôznych nosičov.



Obr. 27 Vykreslenie tlaku na čelo nosiča

Zo simulácie stability letu je možné jasne určiť oblasť, kde dochádza k najväčšej zmene tlaku a teda kde by sa malo nachádzať centrum tlaku. Táto oblasť je vyznačená na obr. 28. Ďalej sú na obrázku vyznačené dve polohy ťažísk T_1 a T_2 . T_1 vyznačuje polohu ťažiska nosiča bez materiálovej vzorky 11,4 mm od čela nosiča a T_2 polohu ťažiska nosiča s hliníkovou materiálovou vzorkou, 13,4 mm od čela nosiča. Poloha ťažísk bola zistená pomocou modelovacieho programu AutodeskInventor. Ako je možné vidieť na obrázku, v oboch prípadoch je ťažisko za oblasťou, v ktorej sa nachádza centrum tlaku. Z toho je možné predpokladať, že nosič sa počas letu správa stabilne, čím sa docieli vyžadovaný centrický náraz do miesta dopadiska.



Obr. 28 Oblasť centra tlaku a polohy ťažiska

Nosič E1 bol podrobený praktickým testom. Celkom bolo otestovaných 5 kusov tohto nosiča. Pred testom boli všetky nosiče zvážené a zmerané ich rozmery, ktoré sú uvedené v tab. 3. Dĺžka nosičov vytlačených zodpovedala návrhu a jej hodnota bola pri všetkých kusoch 30 mm. Centrický dopad vzoriek bol kontrolovaný vizuálne po náreze nosiča do dopadiska a z fragmentov zničených nosičov. Podľa vzorca (5.1) bola vypočítaná dopadová rýchlosť nosičov. Priemerná dopadová rýchlosť nosiča E1 bola $172,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Vzorový výpočet rýchlosti $v_{E1.1}$ prvého skúšaného nosiča E1 podľa vzorca (5.1):

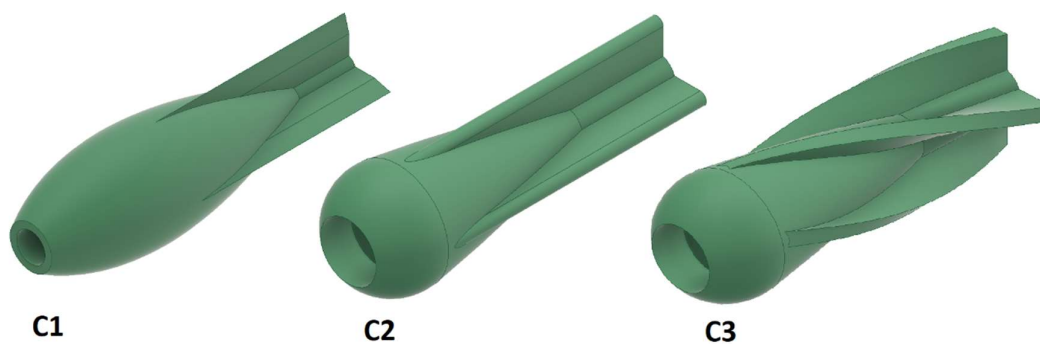
$$v_{E1.1} = \frac{s_1}{t_{E1.1}} = \frac{100 \cdot 10^3}{581} = 172,1 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.3)$$

Tab. 3 Parametre nosičov E1 a ich zmeraná dopadová rýchlosť

NOSIČ E1				
	m_N [g]	d_N [mm]	t_1 [μ s]	v_0 [m.s ⁻¹]
1	1,8	16,417	581	172,1
2	1,8	16,447	573	174,5
3	1,8	16,394	584	171,2
4	1,8	16,423	577	173,3
5	1,8	16,421	579	172,7
Priemer	1,8	16,420	578,8	172,8

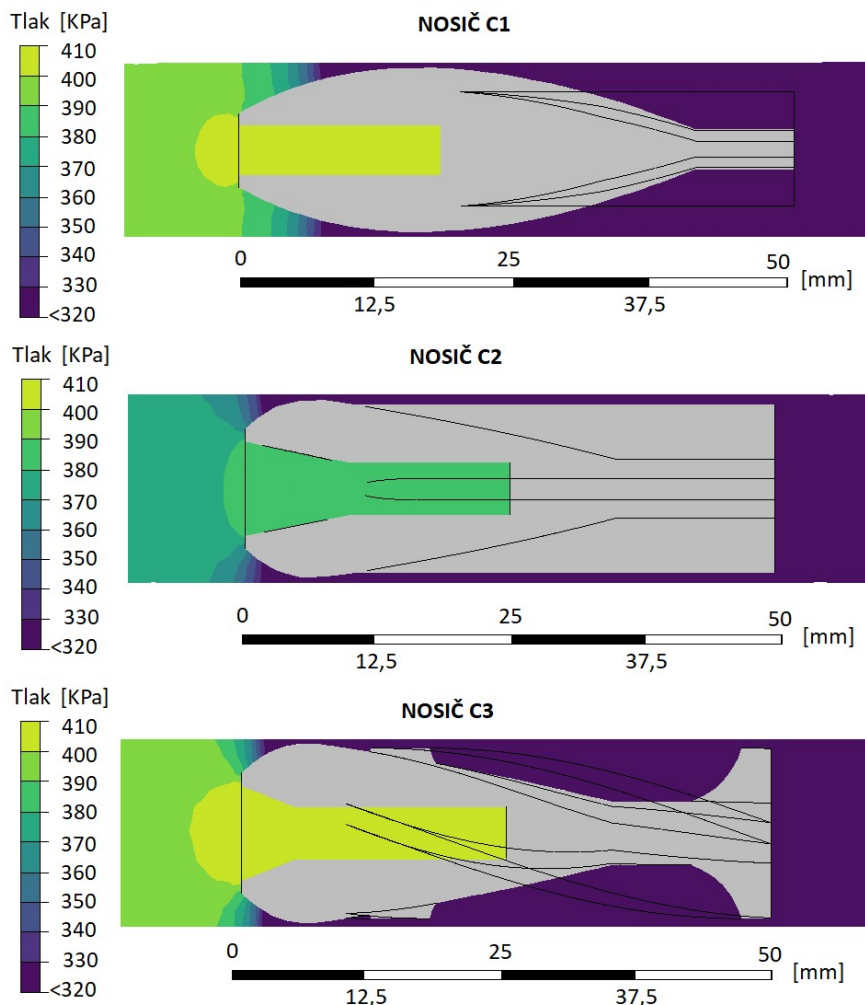
5.4.1 Návrhy stabilizácie

Na počiatku vývoja nového nosiča boli navrhnuté 3 rôzne tvary nosiča. Pri navrhovaní tvarov sa zohľadňovala snaha dosiahnuť vhodný aerodynamický tvar, ktorý by kládol čo najmenší odpor voči prúdeniu okoloidúceho vzduchu a zároveň poskytoval dostatočnú stabilizáciu. Cieľom týchto návrhov bolo overiť prvky stabilizácie nosičov. Návrhy C1, C2, C3 sú zobrazené na obrázku 29. Nosiče C1 a C2 majú krídelkovú stabilizáciu, ktorá sa líši tvarom a dĺžkou. Tieto nosiče sa takisto líšia tvarom tela. Nosič C3 má krídelká zatočené do skrutkovice. Tento prvok má nosič uviesť do rotácie a tak dodať nosiču dodatočnú gyroskopickú stabilizáciu. Nosiče boli analyzované porovnávacou simuláciou a simuláciou stability letu.



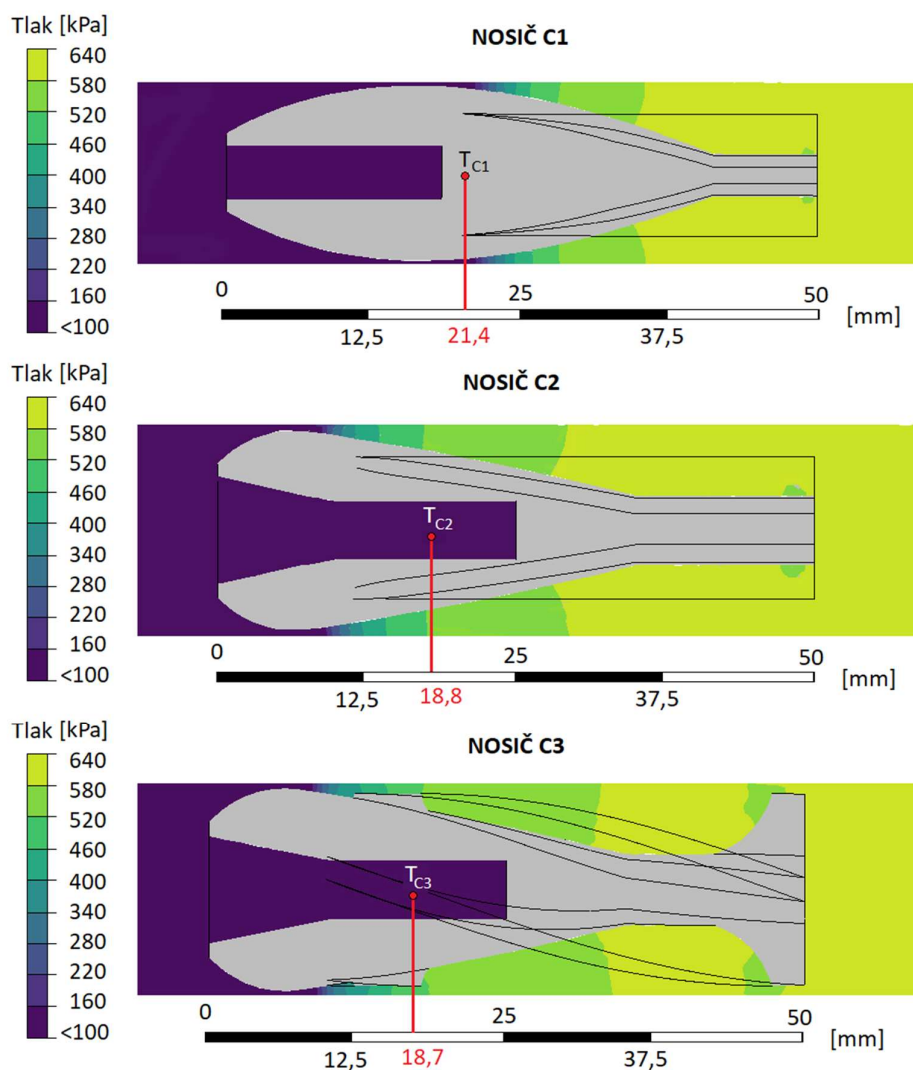
Obr. 29 Návrhy tvarov C1, C2 a C3

Na obrázku 30 je porovnanie čelných tlakov vzduchu na nosiče C1, C2 a C3, získaných pomocou porovnávacej simulácie. Rýchlosť vzduchu pôsobiacej na nosič v simulovanom veternom tuneli bola 130 m.s⁻¹. Maximálny tlak na čele dosahoval u nosičov C1 a C3 približne rovnaké hodnoty a to okolo 4,1 KPa. Maximálny čelný tlak u nosiča C2 bol nižší a to približne 3,8 až 3,9 KPa. Z toho vyplýva, že pri lete veterným tunelom by mal nosič C2 dosahovať najnižšie hodnoty odporov z pomedzi porovnávaných tvarov.



Obr. 30 Čelný tlak pôsobiaci na návrhy C1, C2 a C3

Pomocou simulácií pôsobenia tlaku na zadnú časť nosiča, bola stanovená oblasť najvyšších zmien tlaku. V tejto oblasti by sa malo nachádzať centrum tlaku, ktoré je dôležité pre stabilitu letu nosičov. Na obrázku 31 je porovnanie oblasti centra tlaku s ťažiskom nosičov C1, C2 a C3. Ťažisko bolo určené ako ťažisko sústavy nosiča s materiálou vzorkou, konkrétne bolo počítané s hliníkovou vzorkou. Na týchto porovnaníach je možné pozorovať, že pri nosiči C1 sa nachádza centrum tlaku za ťažiskom v smere letu. To značí, že nosič sa môže počas letu dostať do nestabilného stavu. Z toho dôvodu nebol návrh tvaru C1 vyrobený a bol vylúčený z ďalšieho praktického testovania. U nosičov C2 a C3 sa centrum tlaku nachádza pred ťažiskom, teda spĺňajú podmienku stabilného letu a prototypy týchto tvarov boli vyrobené a prakticky testované.



Obr. 31 Nosiče C1, C2, C3 – centrum tlaku a poloha ťažisiek

Po vytlačení nosičov na 3D tlačiarňi sa ukázalo, že nosič C3 bol chybným nastavením tlače vytlačený v zjednodušenom tvare. Napriek tomu bol otestovaný. Následne bol dodatočne vytlačený v správnom tvare. Na obrázku 32 sú vytlačené nosiče C2 a C3 v chybnom a správnom tvare (označenie: C3.1 – chybný tvar, C3.2 – správny tvar).

Nosič C3.1 mal priemer v najširšom mieste 15,7 mm, nosič C3.2 mal najširší priemer Ø16,4 mm. Všetky ostatné parametre, predovšetkým hmotnosť, boli rovnaké. Chybné vytlačenie nosiča sa ukázalo ako prínosné. Umožnilo totiž porovnať vplyv priemeru na dosahované rýchlosti. Hmotnosti všetkých nosičov C2, C3.1 a C3.2 boli približne rovnaké. Priemerná hmotnosť týchto nosičov bola 5,65 g so smerodajnou odchýlkou 0,05g. Preto pri porovnávaní výsledných rýchlostí týchto nosičov môže byť hmotnosť zanedbaná a tým to je to relevantná metóda na overenie tvaru nosičov. Rozdiel týchto priemerov sa prejavil v dosiahnutej rýchlosti. Rýchlosti nosičov boli vypočítané postupom uvedeným v kapitole 5.2. Priemerné rýchlosti nosičov, za rovnakých testovacích podmienok boli:

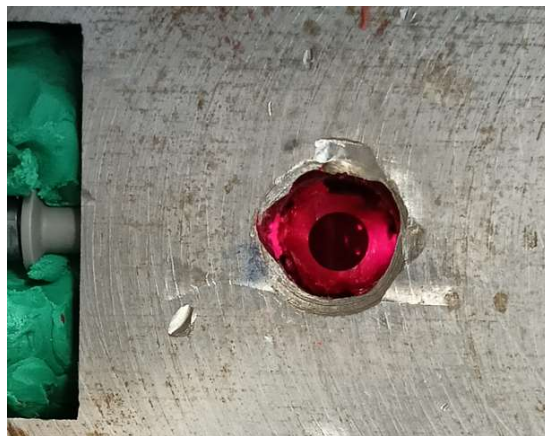
- $v_{C2} = 136,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- $v_{C3.1} = 128,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- $v_{C3.2} = 136,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Rozdiel medzi priemernými dopadovými rýchlosťami nosičov C3.1 a C3.2 bol $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Týmto praktickým porovnaním rovnakých nosičov s rozdielnymi priermi bola dokázaná dôležitosť tohto parametru pri navrhovaní tvaru nosiča. Väčší priemer znamená väčšie utesnenie medzi nosičom a hlavňou. Tým dochádza k menšiemu úniku tlaku okolo nosiča. Úbytok tlaku pri menšom priemere sa prejaví nižším zrýchlením nosiča. Preto je z hľadiska dizajnovania nosiča vhodné dosiahnuť čo najmenšiu vôľu medzi nosičom a vnútornou stenou kanónu. Nesmie však dochádzať k nadmernému treniu a nosič sa v hlavni nesmie zaseknúť.



Obr. 32 Nosiče C2, C3.1, C3.2

V tabuľke 4 sú všetky parametre nosiča C2 a oboch verzií nosiča C3 a výsledky testovania. Pri nosiči č.5 typu C2 došlo počas testu k chybe meracieho zariadenia, preto tento výsledok nie je možné brať do úvahy a nebol ani zahrnutý do stanovenia priemernej rýchlosti nosiča. Centricita dopadu sa overovala z fragmentov nosiča zaseknutých v dopadisku. Ako vidno na obr. 32, fragmenty nosičov boli v dopadisku zaseknuté súmerne a rovnomerne. Všetkých návrhy C2, C3.1 a C3.2 boli zaseknuté obdobne, súmerne a centricky, Z toho je možné predpokladať kolmý náraz vzorky na mernú tyč vo všetkých prípadoch. Tzn. že je dostatočná stabilizácia pomocou krídel a gyroskopická stabilizácia je zbytočná..



Obr. 33 Fragmenty nosiča v dopadisku

Tab. 4 Parametre nosičov C2, C3.1, C3.2

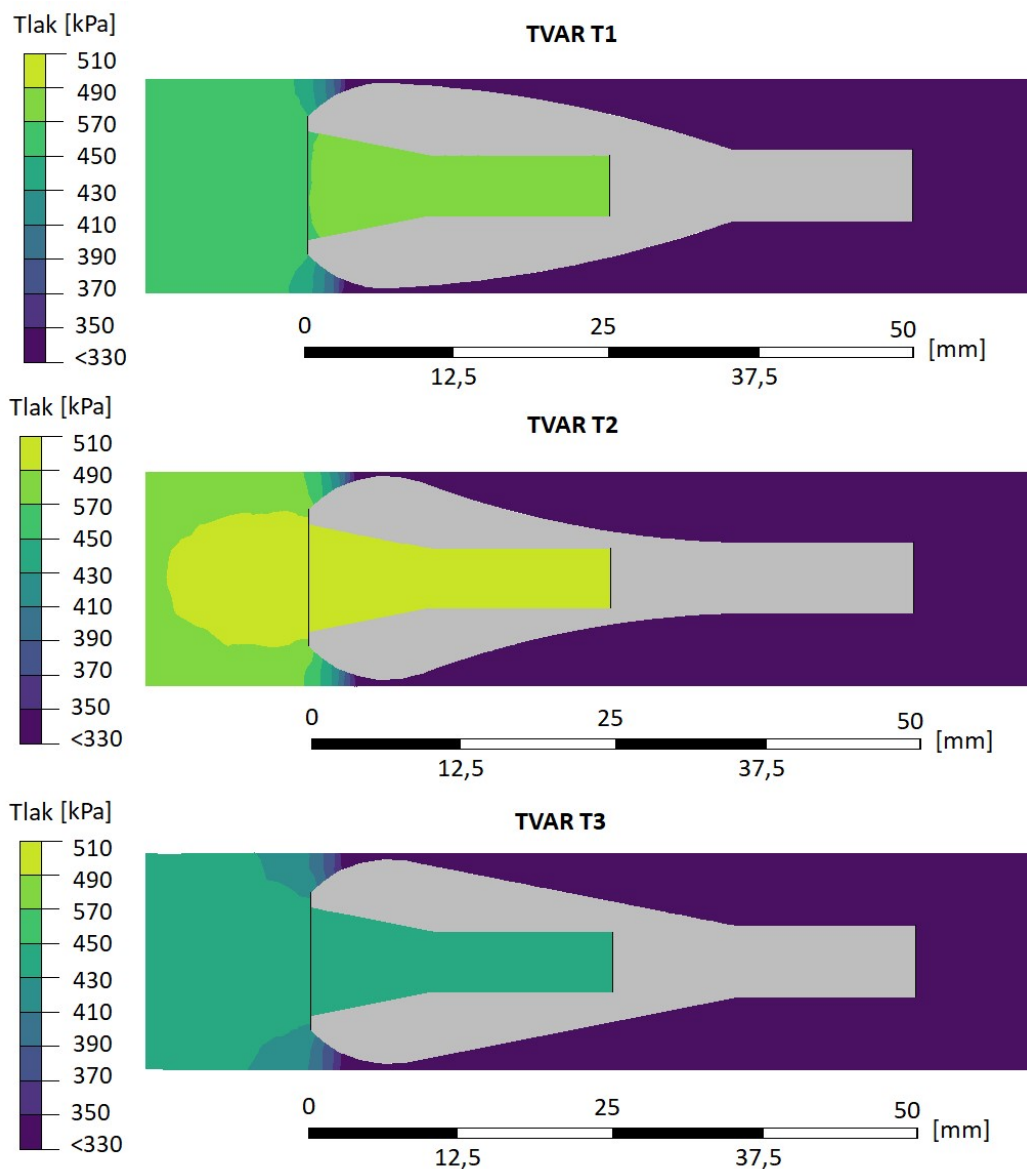
NOSIČ C2				
	m_N [g]	d_N [mm]	t_1 [μ s]	v_0 [$m.s^{-1}$]
1	5,6	16,373	733	136,4
2	5,6	16,385	728	137,4
3	5,7	16,338	729	137,2
4	5,7	16,405	732	136,6
Priemer	5,65	16,375	730,5	136,9
NOSIČ C3.1				
	m_N [g]	d_N [mm]	t_1 [μ s]	v_0 [$m.s^{-1}$]
1	5,7	15,708	780	128,2
2	5,7	15,750	778	128,5
3	5,7	15,726	771	129,7
4	5,7	15,780	772	129,5
5	5,6	15,704	779	128,4
Priemer	5,68	15,734	776	128,9
NOSIČ C3.2				
	m_N [g]	d_N [mm]	t_1 [μ s]	v_0 [$m.s^{-1}$]
1	5,6	16,434	729	137,2
2	5,6	16,386	731	136,8
3	5,6	16,358	731	136,8
Priemer	5,6	16,393	730,3	136,9

5.4.2 Návrh tvaru tela nosiča

Ďalším krokom bol optimalizácia tvaru tela nosiča, z pohľadu aerodynamických vlastností. Boli vymodelované tri rôzne tvary a pomocou simulácií vo veternom tuneli bola posudzovaná ich vhodnosť. Najvhodnejší tvar je ten, na ktorého čele vznikali tlakové polia o najnižších hodnotách. Návrhy tvarov T1, T2 a T3 sú spolu s výsledkami simulácií zobrazené na obrázku 34. Návrhy sa líšili v ich strednej časti. Tvar T1 mal konkávnu strednú časť s rádiusom 100 mm, tvar T2 konvexnú strednú časť s rádiusom 80 mm a tvar T3 mal strednú časť rovnú. Zadná a čelná časť nosičov ako aj dutina pre materiálovú vzorku boli rovnaké, tým nijak neovplyvňovali výsledky simulácií jednotlivých nosičov. Dosiahnuté maximálne tlaky na čele nosičov boli:

- tvar T1: 475 kPa
- tvar T2: 505 kPa
- tvar T3: 440 kPa

Z výsledkov simulácií jasne vyplýva, že nosič T3 dosahuje najnižšie tlaky, preto je predpoklad že bude dosahovať najnižšie hodnoty koeficientu odporu. Pri ďalšom vývoji tvaru sa bude pracovať s rovnou strednou časťou nosičov tak, ako pri tvaru T3.

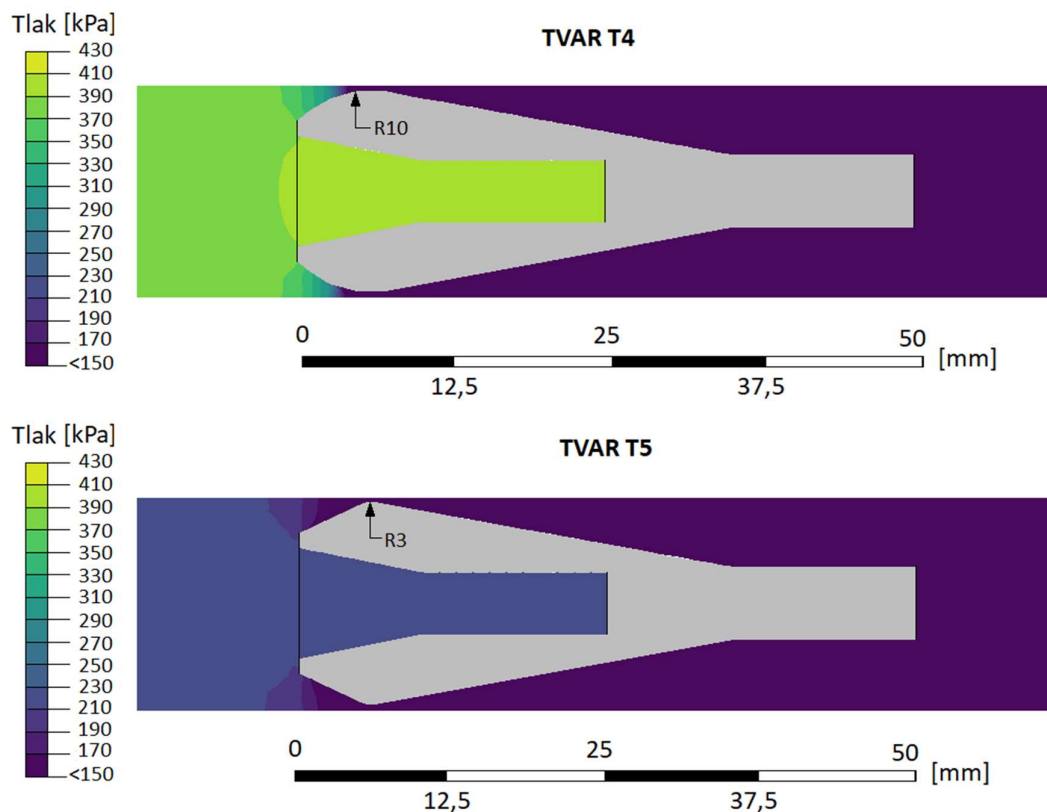


Obr. 34 Tvary T1, T2, T3 – čelné tlaky

Nasledovala optimalizácia rádiusu nosičov. Boli navrhnuté dva tvary s rôznymi rádiusmi. Tvar T4 mal rádius R10 a tvar T5 mal rádius R3. Na obrázku 35 sú návrhy tvarov T4 a T5 spolu s výsledkami simulácií. Stredná časť bola podľa výsledku predošlej simulácie ponechaná rovná. Opäť bol porovnávaný pomocou simulácie vo veternom tuneli tlak na čelo. Dosiahnuté maximálne tlaky na čele nosičov boli:

- tvar T4: 420 kPa,
- tvar T5: 225 kPa.

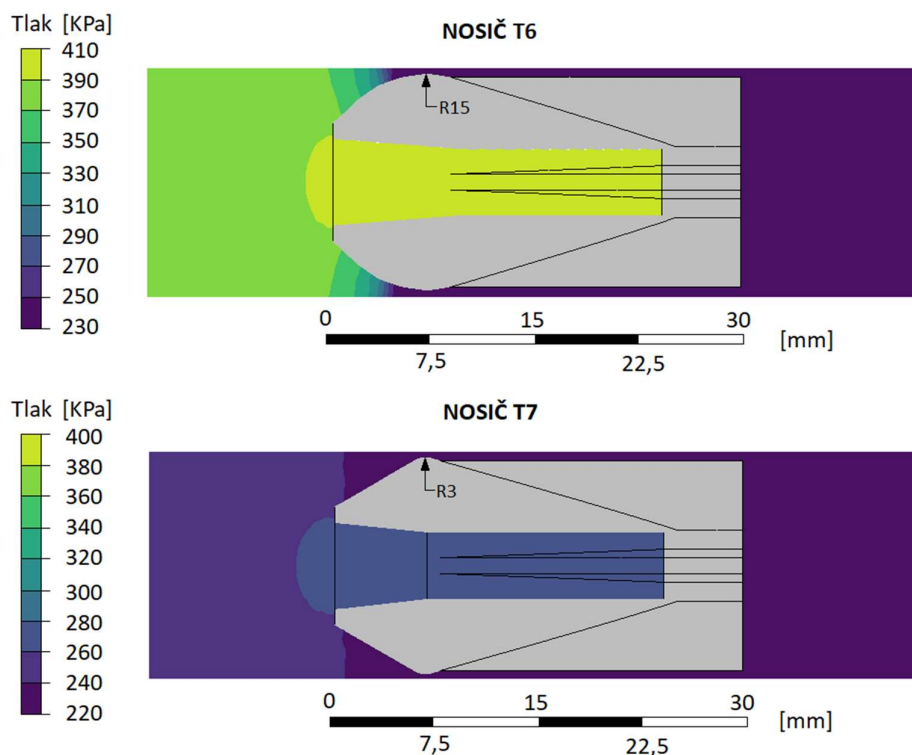
Z výsledkov simulácií je možné usudzovať, že veľkosť rádiusu má podstatný význam na hodnoty tlakových polí na čele nosičov. Ako vhodnejší tvar sa ukázal byť tvar T5. Medzi tvarmi T3 a T4 bol takisto rozdiel iba vo veľkosti rádiusu. Tvar T3 mal rádius R15. Podľa výsledkov simulácií vyplýva, že čím nižšia veľkosť rádiusu, tým majú tlakové polia na čele nižšie hodnoty. Vyššie hodnoty rádiusov výrazne zvyšujú plochu, na ktorú pôsobí prúd vzduchu, preto aj hodnoty čelných tlakov sú vyššie. Táto hypotéza môže byť v praxi chybná, pretože problematika obtekania vzduchu je veľmi komplexná, preto to musí byť overené praktickými testami. Treba podotknúť, že uhol sklonu čela bol v každom prípade rovnaký.



Obr. 35 Tvary T4 a T5 – čelné tlaky

Na základe poznatkov z predchádzajúcich simulácií boli vytvorené modely tvarov T6 a T7. Oba modely mali rovnú strednú časť s rovnakým uhlom sklonu. Líšili sa iba veľkosťou rádiusu v strednej časti. Tvar T6 mal rádius R15 a tvar T7 mal rádius R3. Aby bolo možné nosiče prakticky testovať, tak boli doplnené o rovnaký stabilizačný prvok vo forme štyroch rovných krídel na konci nosiča. Dĺžka nosičov bola skrátaná, v snahe dosiahnuť menšie hmotnosti nosičov. Na obrázku 36 sú tak ako v predošlých prípadoch zobrazené simulácie čelných tlakov vo veternom tuneli. Dosiahnuté maximálne tlaky na čele nosičov boli:

- tvar T6: 395 kPa,
- tvar T7: 265 kPa.



Obr. 36 Nosiče T6, T6 – čelné tlaky

Z výsledkov simulácií je zrejmé, že nosič T7 by mal reálne dosahovať vyššie rýchlosti ako nosič T6. Pre overenie správnosti simulácií boli prototypy tvarov T6 a T7 vytlačené na 3D tlačiarňi a reálne testované. Z každého typu bolo vytlačených 6 kusov. Po vytlačení boli hmotnosti nosičov rozličné. Nosič T6 mal priemernú hmotnosť 2,67 g zatiaľ čo nosič T7 mal hmotnosť 2,27 g. Aby sa zamedzilo vplyvu hmotnosti na dosahované rýchlosti a bol overený skutočne len vplyv tvaru, hlavne rádiusu v najširšej časti, bolo rozhodnuté, že hmotnosť troch nosičov T7 bude upravená pomocou modelovacej hmoty. Hmota bola zastrčená do dutiny pre materiál ovú vzorku a hmotnosť nosičov bola upravená tak, aby dosahovala hmotnosti T6. Hmotnostne upravené nosiče T7 dostali pracovný názov T7_v2. Po týchto úpravách bolo možné reálne porovnávať vplyv rádiusu na výsledné rýchlosti.



Obr. 37 Nosiče T6 a T7

Tab. 5 Parametre nosičov T5, T7, T7_v2

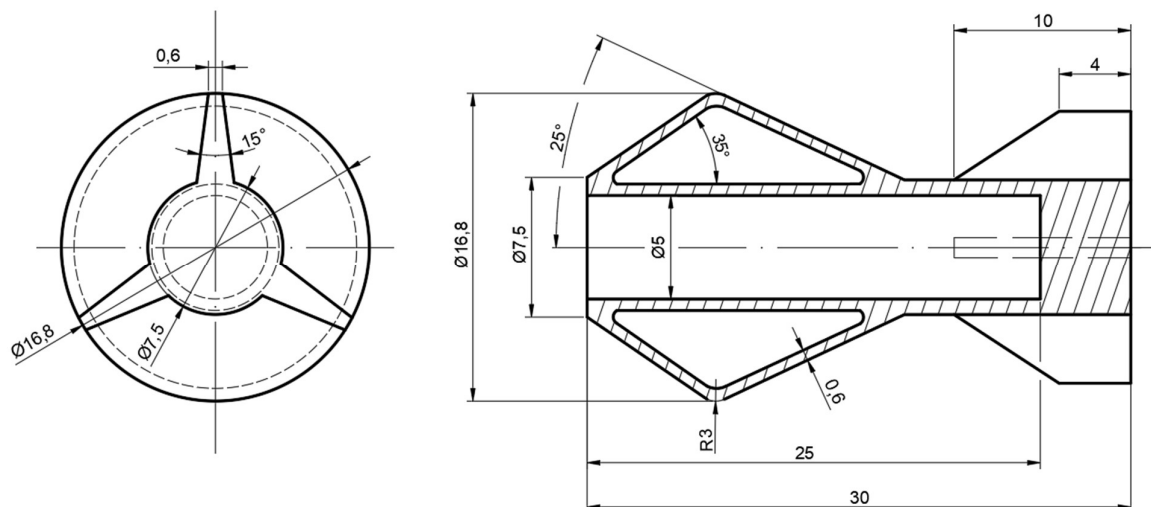
NOSIČ T5				
	m_N [g]	d_N [mm]	t_1 [μ s]	v_0 [$m \cdot s^{-1}$]
1	2,7	16,409	635	157,5
2	2,7	16,441	645	155,0
3	2,7	16,416	631	158,5
4	2,6	16,478	633	158,0
5	2,6	16,421	629	159,0
6	2,7	16,476	636	157,2
Priemer	2,67	16,440	634,8	157,5
NOSIČ T7				
	m_N [g]	d_N [mm]	t_1 [μ s]	v_0 [$m \cdot s^{-1}$]
1	2,2	16,647	617	162,1
2	2,3	16,427	619	161,6
3	2,3	16,383	619	161,6
Priemer	2,27	16,486	618,3	161,7
NOSIČ T7_v2				
	m_N [g]	d_N [mm]	t_1 [μ s]	v_0 [$m \cdot s^{-1}$]
1	2,6	16,338	628	159,2
2	2,6	16,336	624	160,3
3	2,6	16,344	629	159,0
Priemer	2,6	16,339	627,0	159,5

V tabuľke 5 sú všetky dôležité parametre z testovania nosičov T6, T7 a T7_v2. Nosiče dosahovali priemerné rýchlosti:

- nosič T6: $157,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- nosič T7: $161,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- nosič T7_v2: $159,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Tieto experimentálne výsledky dokazujú správnosť predpokladu vytvoreného na základe simulácií a to, že nosič s väčším rádiusom T6 by mal dosahovať nižšie rýchlosti, ako nosič s menším rádiusom T7_v2, za predpokladu rovnakých hmotností nosičov. Z týchto nosičov najvyššie rýchlosti dosahoval nosič T7, z dôvodu najnižšej hmotnosti. Všetky tieto nosiče boli značne rýchlejšie ako nosiče C2 a C3, čo takisto dokazuje ako výrazne ovplyvňuje faktor hmotnosti dosahované rýchlosti. Na základe týchto pozorovaní a meraní bol stanovený nosič T7 za najvhodnejší z pomedzi všetkých doterajších návrhov. Preto ďalším krokom optimalizácie bude minimalizácia hmotnosti nosiča T7.

Pre minimalizovanie objemu a tým aj hmotnosti bola navrhnutá dutina v tele nosiča a redukcia stabilizačných krídel. Plocha krídel bola zmenšená a zároveň bol redukovaný ich počet z 4 na 3. Krídla okrem stabilizačnej funkcie slúžia aj ako prvok, ktorý zaručuje, že nosič je možné vložiť do hlavne priamo vodorovne, bez nežiadúceho náklonu. Preto je ich minimálny počet 3.

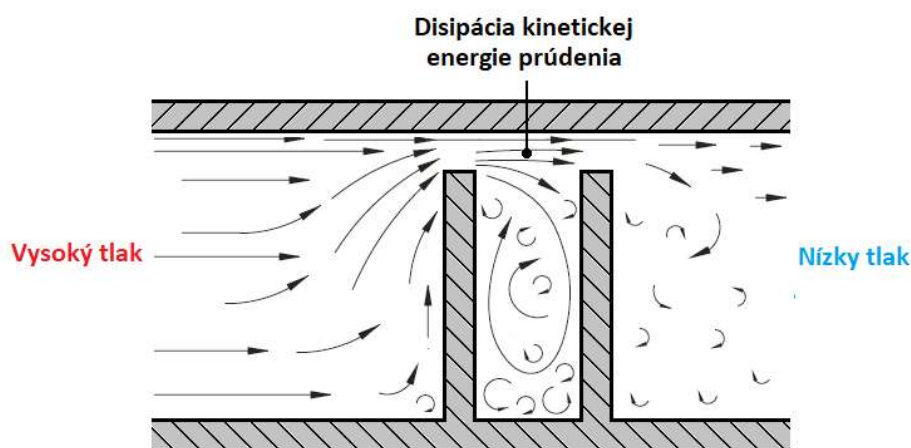


Obr. 38 Geometria nosiča F4

Na obr. 38 je geometria odľahčeného nosiča, ktorý má názov F4. Hrúbka steny nosiča je 0,6 mm. Táto hrúbka bola stanovená podľa výrobitel'nosti na 3D tlačiarňi. Hmotnosť nosiča po vytlačení bola 1,3 g.

5.4.3 Labyrintové tesnenie

Ďalším návrhom ako efektívnejšie využiť energiu tlaku vzdušníka a premeniť ju na kinetickú energiu nosiča je pridanie do tvaru tela nosiča prvok na princípe labyrintového tesnenia. Labyrintové tesnenie je bezdotykové tesnenie, ktorého funkciou je utesniť rozdiel tlakov, alebo oddelenie jedného alebo dvoch rozličných tekutín alebo plynov. Princíp fungovania labyrintového tesnenia je na obr. 39. V ľavej časti je plyn o vysokom tlaku, ktorý prechodom cez štrbinu labyrintového tesnenia najprv zvýši svoju rýchlosť a následne rozšírením otvoru sa rýchlosť prúdenia zníži rovnako ako tlak. V komorách dochádza k víreniu plynu a veľkým tlakovým stratám. Sústava komôr kladie prietoku plynu značný odpor, takže aj pri vysokom rozdieli tlakov pred a za tesnením je prietok plynu pomerne malý. [37; 38; 39]

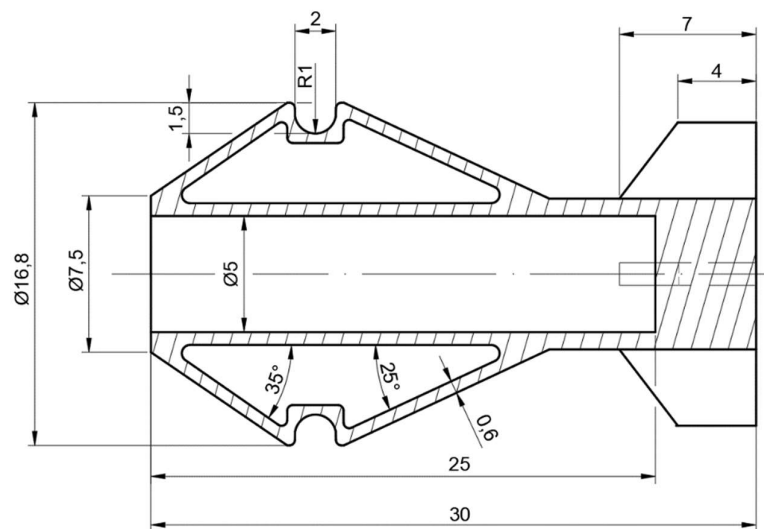


Obr. 39 Princíp labyrintového tesnenia [37; 39]

Prakticky sa používa séria takýchto štrbín a komôr o rôznych tvaroch. Labyrintové tesnenia sa používajú v zariadeniach ako rýchlobežné plynové turbíny, parné turbíny, lietadlové motory atď. Dôvod použitia takého typu tesnenia je, že klasické tesnenia, ako napr. gufero,

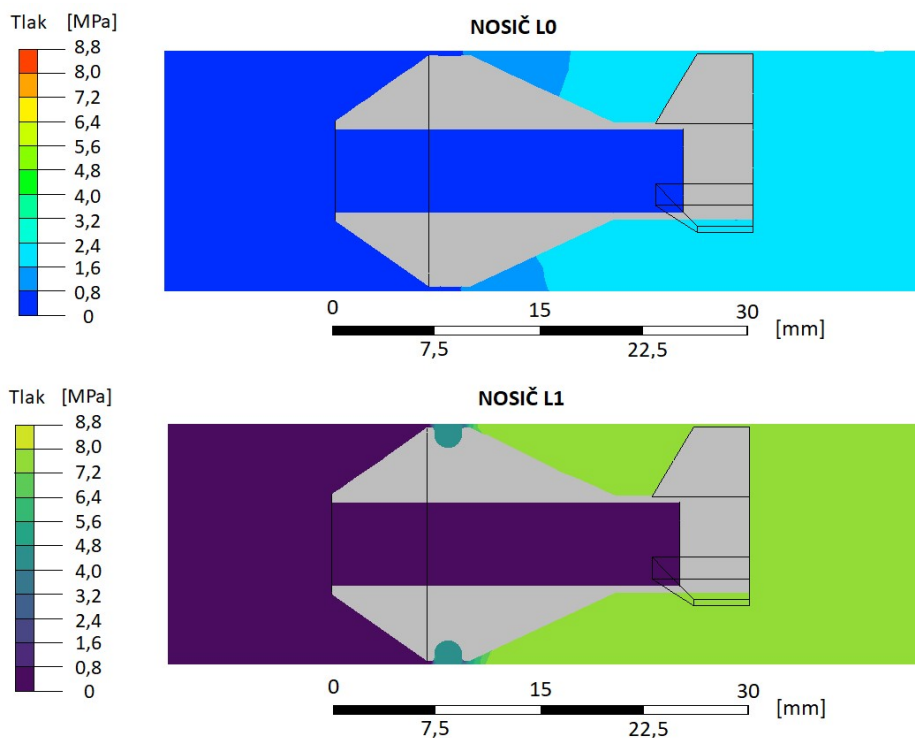
strácajú pri takých vysokých otáčkach funkčnosť. V týchto zariadeniach je tento prvok používaný k zabráneniu prenikania oleja do priestorov, v ktorých by nemal byť, alebo k zabráneniu unikania pary a vnikaniu vzduchu do stroja. Ide teda o použitie pri rotujúcich súčiastiach ako sú hriadele a rotory. Dôležitým faktorom je šírka štrbiny, radiálna medzera, ktorá výrazne ovplyvňuje efektívnosť labyrintového tesnenia. Čím menšia je radiálna medzera, tým je menšie aj množstvo pretečeného plynu. [37; 38; 39]

Princíp fungovania labyrintového tesnenia sa javil ako vhodný pre použitie pri vývoji nosiča. Labyrintová drážka môže pri zrýchľovaní nosiča zabrániť k prefukovaniu vzduchu okolo nosiča, môže prispieť k nahromadeniu tlaku za nosičom, a tak zefektívniť využitie tlakovej energie. V najširšom mieste nosiča, kde dochádza k prefukovaniu vzduchu bola navrhnutá labyrintová drážka o šírke 2 mm a hĺbke 1,5 mm. Geometria nosiča L1 s labyrintovou drážkou je na obrázku 40.



Obr. 40 Geometria nosiča L1 s labyrintovou drážkou

Pre porovnanie funkcie labyrintovej drážky bola zhotovená simulácia nárastu tlakov. Bol navrhnutý nosič L0, ktorý má rovnakú geometriu ako nosič L1 až na labyrintovú drážku. Na obr. 41 sú výsledky simulácie, kde sa porovnávali hodnoty tlakových polí za nosičom. Za nosičom s labyrintovou drážkou boli hodnoty tlakových polí štvornásobne vyššie, ako hodnoty tlakov za nosičom bez labyrintovej drážky.



Obr. 41 Porovnávací simulácia nosiča L0 bez drážky a L1 s drážkou

Pre overenie týchto teoretických simulácií bol nosič L1 vytlačený a prakticky testovaný. Prototypy nosičov F4 a L1, vytlačené na 3D tlačiarňi, sú na obr. 42. Výsledky boli porovnané s nosičom F4, ktorý sa doposiaľ javil ako najvhodnejší. Z týchto dvoch nosičov bol podľa výsledkov praktických testov vybraný finálny nosič vzorky, použitý pre testovanie a zisťovanie dynamických vlastností vybraného materiálu.



Obr. 42 Nosiče F4 a L1

V tab. 6 sú výsledky testovania dosiahnutých rýchlostí nosičov F4 a L1. Nosič F1 dosahoval pri dobe plnenia vzdušníka 60 s priemerné rýchlosti $181,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, nosič L1 dosahoval pri rovnakom plnení priemerné rýchlosti $179,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Je možné konštatovať, že efekt labyrintovej drážky sa prejavil, ale nie dostatočne na to, aby vykompenzoval pridanú hmotnosť nosiča, ktorá vznikla geometriou samotnej labyrintovej drážky. Nosič L1 vážil priemerne o 0,3 g viac ako nosič F4. Ďalším faktorom, ktorý mohol mať vplyv na rýchlosť

labyrintového nosiča, je menší priemer oproti nosiču L1 o 0,15 mm. Táto nepresnosť vznikla zmrštením plastu po tlači. V neposlednom rade, je možné ešte optimalizovať tvar a priemer labyrintových drážok. Napriek tomu nebol nosič s labyrintovou drážkou z časovej náročnosti zhotovenia a testovania nosičov už ďalej optimalizovaný. Ako finálny nosič materiálov vzorky bol vybraný variant F4, pretože dosahoval najvyššie rýchlosti spomedzi všetkých prototypov nosičov, ktoré boli vytlačené a testované. Tento nosič sa bude porovnávať testovaním s materiálovou vzorkou s nosičom E1

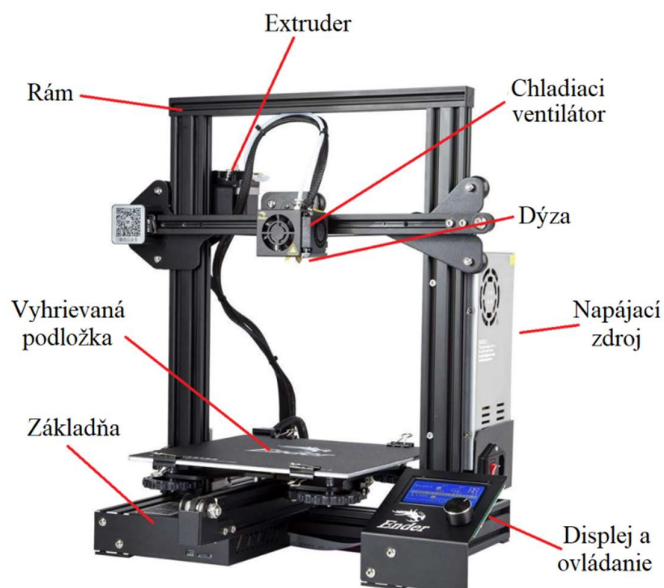
Tab. 6 Parametre nosičov F4 a L1

NOSIČ F4				
	m _N [g]	d _N [mm]	t ₁ [μs]	v ₀ [m.s ⁻¹]
1	1,2	16,809	554	180,5
2	1,3	16,793	553	180,8
3	1,3	16,802	552	181,2
4	1,3	16,81	549	182,1
5	1,3	16,824	548	182,5
Priemer	1,28	16,808	551,2	181,4
NOSIČ L1				
	m _N [g]	d _N [mm]	t ₁ [μs]	v ₀ [m.s ⁻¹]
1	1,6	16,649	564	177,3
2	1,6	16,689	555	180,2
3	1,5	16,62	561	178,3
4	1,6	16,674	554	180,5
Priemer	1,58	16,658	558,5	179,1

5.5 Výroba nosičov

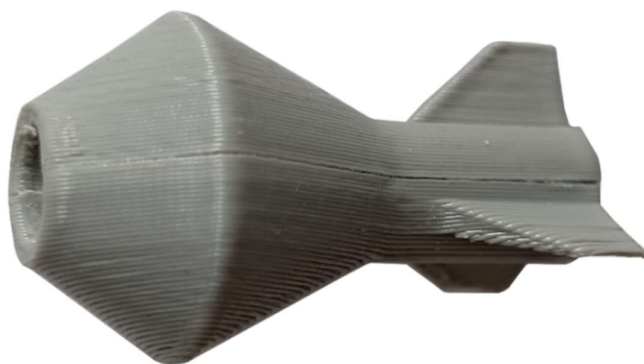
Pre rýchlosť výroby a dostupnosť bola pre výrobu prototypov vybraná technológia 3D tlače, konkrétne technológiou FDM – Fused Deposition Modeling. V súčasnosti ide o najrozšírenejšiu technológiu 3D tlače, ktorá je založená na princípe tavenia plastového vlákna vo vnútri extruderu, pomocou ktorého je tavenina pretlačovaná a nanášaná na podložku. Plastový drôt je do extruderu s dýzou podávaný kladkami, pričom drôt funguje pred vyhrievanou časťou dýzy ako piest, ktorý umožňuje vytlačenie nataveného materiálu z dýzy von. Natavený drôt je po opustení dýzy kladený na podložku, alebo predchádzajúcu vrstvu, ochladzuje sa a tuhne. V okamihu polozenia na predchádzajúcu vrstvu dochádza k spojeniu vrstiev. Extruder sa pohybuje v dvoch osách a nanáša vrstvu materiálu, po nanesení celej vrstvy sa podložka posunie v zmysle tretej osi o výšku jednej vrstvy a začne sa nanášať ďalšia vrstva. Hlava tlačiarny s dýzou je umiestnená vo vyhrievanej komore, v ktorej sa udržiava stála teplota cca 70°C. Táto teplota je optimálna pre spojenie vlákien. Teplota tavenia závisí od druhu materiálu a pohybuje sa zhruba od 200°C do 280°C. [40]

Výhodou tejto technológie je hlavne cenová dostupnosť pre širšiu verejnosť a jednoduchosť obsluhy. Presnosť metódy FDM nie je taká vysoká ako pri iných metódach 3D tlače. Prototypy nosičov boli tlačené na tlačiarni Creality Ender 5, zobrazenej na obr. 43, na ktorom sú vyznačené jednotlivé časti tlačiarny, ktorá sa skladá so základne, vyhrievanej podložky, rámu, extruderu, dýzy, zdroja a ovládacieho displeja. Nakoniec je ku tlačiarni ešte pripojená cievka, na ktorej je navinutý materiál. Medzi najpoužívanejšie materiály pre tlač touto metódou patrí ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), PLA (Polylactide) a PETG (Polyethylene Terephthalate). Materiál použitý pre tlač PLA, s priemerom filamentu 1,75 mm.



Obr. 43 3D tlačiareň Creality Ender [40]

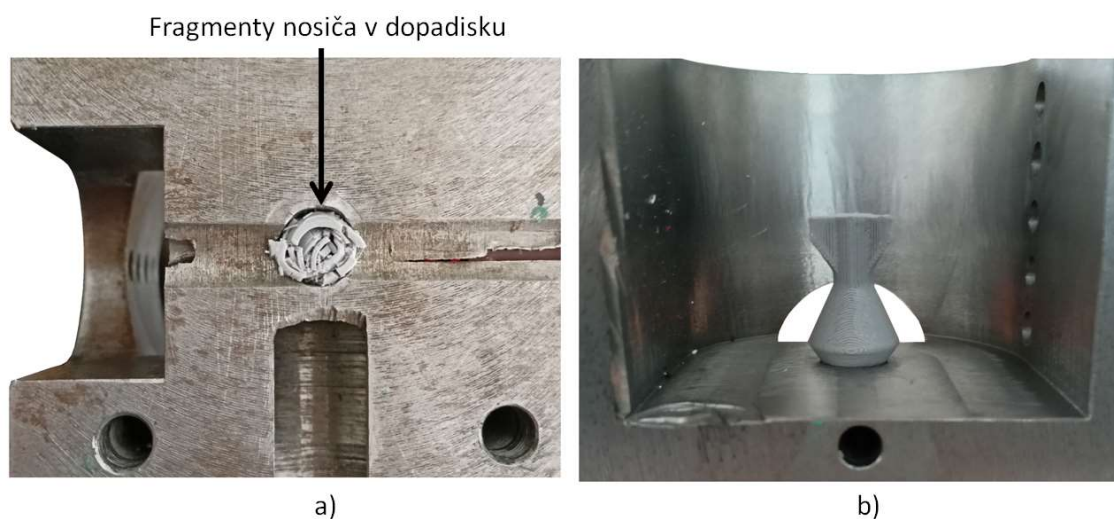
Nosiče boli tlačené v smere vlastnej pozdĺžnej osi, tak ako je to napr. na obrázku 42. Tieto nosiče odolávali testovacím podmienkam a tlakom pri testoch bez materiálových vzoriek. Pri testovaní s materiálovou vzorkou sa však ukázalo, že pevnosť nosiča nie je dostatočná. Nosiče sa v najužšej časti, medzi telom nosiča a krídlami, roztrhli a materiálová vzorka nebola dopravená do miesta dopadiska vôbec, alebo až po fragmente prednej časti nosiča. K týmto poškodeniam dochádzalo vplyvom pôsobenia zotrvačnej sily materiálov vzorky pri zrýchľovaní nosiča. Dochádzalo ku odlepeniu jednotlivých vrstiev. Z predpokladu, že tlačný materiál má vyššiu pevnosť v osi tlačných vrstiev ako kolmo na túto os, bolo rozhodnuté, že nosiče sa budú tlačiť v polohe, kedy ich vlastná os bude vo vodorovnej polohe. Daný tvar však nie je možné takým spôsobom tlačiť bez pridania podpôr. Podporný materiál nebol pri tlačení k dispozícii a tak bola zvolená alternatíva, pri ktorej sa model nosiča rozdelil na dve polovice. Tieto polovice boli vytlačené samostatne a po vytlačení sa k sebe zlepili pomocou sekundového lepidla a aktivátora. Takto zhotovené nosiče už odolávali zotrvačným silám pri zrýchlení. Na obr. 44 je takto zlepený nosič F4.



Obr. 44 Zlepený nosič F4

5.6 Centricita dopadu

Centricita dopadu je veľmi dôležitá pre úspešné vyhodnotenie materiálovej skúšky. Pri necentrickom dopade sa materiálová vzorka deformuje nerovnomerne, nie je možné rozlíšiť deformovanú a nedeformovanú časť a správne previesť obrazovú analýzu vzorky. Centrický dopad vzorky je teoreticky možné snímať a pozorovať vysokorýchlostnou kamerou. V súčasnosti však zariadenia TAT takouto kamerou nedisponuje. Preto jediný spôsob ako overiť centricitu dopadu je skúmanie samotnej vzorky. Pri hľadaní najvhodnejšieho návrhu nosiča sa však nosiče testovali bez materiálových vzoriek. Preto kontrola dopadu prebiehala len skúmaním fragmentov nosiča v dopadisku. Pri dopade nedochádzalo k separácii vzoriek tak, ako pri polystyrénových nosičoch, ale nosič bol natlačený a deformovaný v diere dopadiska, ako je možné vidieť na obr. 45 a), alebo už na obr. 33. Fragменты všetkých nosičov sa javili rovnomerne deformované a porušené, preto bol predpoklad, že aj separácia a následný dopad pri testoch s materiálovými vzorkami bude centrický. Pri testoch s materiálovými vzorkami však bolo pozorované, že vzorky nedopadajú centricky a sú nerovnomerne deformované. Mohlo to byť spôsobené faktom, že pri dopade kužeľovej prednej časti nosiča na kruhovú diery, môže dôjsť veľmi ľahko k vychýleniu nosiča do strany. Na obrázku 45 b) je zobrazený dopad kužeľového nosiča do dopadiska. Necentrické dopady však nastávali aj s nosičmi E1, ktoré majú čelnú plochu kolmú. Preto ako ďalšia možná príčina nevhodných dopadov sa javí vtlačenie nosiča do dopadiska. Vplyvom trenia medzi nosičom a stenou dopadiska môže nosič nabráť náhodný vektor rýchlosti, vplyvom ktorého nedopadne na mernú tyč kolmo.



Obr. 45 a) Fragmenty nosiča v dopadisku, b) Dopad nosiča do dopadiska

Ako riešenie necentrických dopadov bola navrhnutá úprava testu tým, že bolo odstránené dopadisko na oddelenie vzoriek, pretože aj tak nedochádzalo k separácii. Merná tyč bola posunutá bližšie k ústiu kanónu a sústava nosiča a vzorky tak dopadala priamo na mernú tyč. Toto riešenie sa javí ako vhodné, pretože týmto spôsobom testované vzorky mali všetky centrický dopad. Zároveň je možné vylúčiť, že pri súčasnom náraze nosiča so vzorkou dochádza ku ovplyvneniu deformácie vzorky nosičom. Pevnosť nosiča oproti pevnosti vzoriek je rádovo menšia a nosič sa rozpadá na fragmenty okamžite po dopade. To potvrdzujú aj veľmi malé fragmenty nosičov po testoch. Nevýhoda tohto riešenia je, že v dopadisku boli umiestnené snímače merača rýchlosti 2. Z tohto dôvodu bola rýchlosť počas testov meraná len pomocou snímača rýchlosti 1. Tento nedostatok je ale možné vyriešiť malým adaptérom,

ktorý sa pridá na ústie kanóna a do ktorého sa vložia senzory snímača rýchlosti. Tento adaptér je možné takisto jednoducho vytlačiť na 3D tlačiarňu.

5.7 Testovanie s materiálovou vzorkou

Pre overenie využiteľnosti novo navrhnutého nosiča bola uskutočnená séria dynamických testov pre vybraný materiál. Vybraný materiál je hliníkové zliatina 2024-T3. Táto zliatina sa často používa v automobilovom a leteckom, alebo kozmickom priemysle. Tento materiál má vysokú ťažnosť a veľkú odolnosť voči únavovým trhlinám. Často sa používa na diely krídel lietadiel alebo častí karosérií automobilov. Preto je dôležité poznať jeho dynamické vlastnosti, ako sa tento materiál môže správať pri možných zrážkach a podobne. Chemické zloženie materiálu 2024-T3 je uvedené v tab.8. Materiálové vzorky boli vyhotovené v štandardných rozmeroch pre Taylorov test Ø5x25 mm, s finálnou operáciou brúsenia pre dosiahnutie vysokých presností.

Na základe dynamických testov boli stanovené parametre materiálového modelu tejto zliatiny pomocou modelu Johnson-Cook. Získané parametre boli overené simuláciou v programe ANSYS, v module Explicit Dynamics.

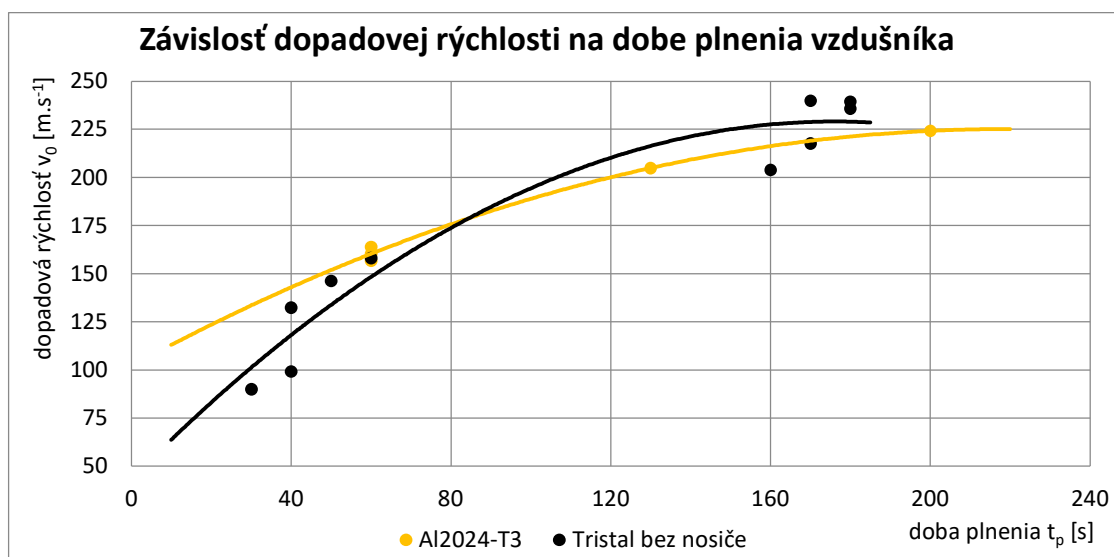
Tab. 7 Chemické zloženie hliníkovej zliatiny 2024-T3

Prvok	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Obsah [%]	0.06	0.11	4.40	0.48	1.50	0.02	0.05	0.04	Zvyšok

Bolo testovaných 6 kusov materiálových vzoriek hliníkovej zliatiny 2024-T3, pri rôznej dobe plnenia, s nosičmi E1 a F4. Pri vzorke č. 2 nastal necentrický dopad, preto nebola zahrnutá do výpočtov. Doba plnenia pri vzorkách 1 až 4 bola 60 sekúnd. V tabuľke 9, sú zaznamenané parametre z testovania: doby plnenia, dosiahnuté tlaky a dopadové rýchlosti. Potvrdil sa predpoklad z testovania nosičov bez vzoriek, a to že pomocou nosiča F4 je možné dosiahnuť vyššie dopadové rýchlosti ako s nosičom E1. Pri dobe plnenia 60 sekúnd bola pomocou nosiča F4 dosiahnutá dopadová rýchlosť 163,9 m.s⁻¹. Pomocou nosiča E1 dopadová rýchlosť bola len 160,3 m.s⁻¹ respektíve 156,7 m.s⁻¹. V prílohe 8 sa nachádzajú fotografie testovaných materiálových vzoriek.

Tab. 8 Parametre z testovania materiálu 2024-T3

VZORKA	Nosič	Doba plnenia	Tlak vo vzdušníku	Doba preletu	Dopadová rýchlosť
		t_p [s]	p [MPa]	t_i [μs]	v [m.s ⁻¹]
1	E1	60	1,8	624	160,3
3	F4	60	1,8	610	163,9
4	E1	60	1,8	638	156,7
5	F4	130	3,8	488	204,9
6	F4	200	5	446	224,2



Obr. 46 Porovnanie dopadových rýchlostí

Na obr. 46 je graf závislosti doby plnenia na výslednú dopadovú rýchlosť pre hliník 2024-T3 a pre skorej testovanú oceľ s názvom Tristal. Z grafu vyplýva, že s dlhšou dobou plnenia nie je možné dosahovať neustále vyššie dopadové rýchlosti. Maximálne možné rýchlosti sú zhodne okolo 225 m.s^{-1} pre oba materiály. Oceľ Tristal bola zrýchľovaná pomocou polystyrénového nosiča, hliníková zliatina pomocou novo vyvinutého nosiča F4. Z porovnania vyplýva, že nosič F4 splňuje funkciu obdobne ako, predchádzajúci nosič a zároveň je prispôsobený upravenému kanónu Taylorovho testu, pričom technológia výroby nosiča F4 prináša značné výhody oproti technológii vypeňovania vo forme.

5.7.1 Stanovenie dynamickej medze klzu

Hustota hliníkovej zliatiny 2024-T3 je $\rho_{Al} = 2840 \text{ kg.m}^{-3}$. Vzorový výpočet dynamickej medze klzu pre vzorku 1:

- Dynamická medza klzu podľa Hutchingsa podľa vzťahu (3.3):

$$\sigma_{DYH} = \frac{\rho \cdot v_0^2 \cdot 10^{-6} \cdot (L_0 - X)}{2 \cdot (L_0 - L_f) \cdot \ln \frac{L_0}{X}} = \frac{2840 \cdot 160,3^2 \cdot 10^{-6} \cdot (25,004 - 7,2)}{2 \cdot (25,004 - 23,654) \cdot \ln \frac{25,004}{7,2}} = 386 \text{ [MPa]} \quad (5.3)$$

- Dynamická medza klzu pre malé deformácie podľa vzťahu (3.4):

$$\sigma_{DYT} = 2 \cdot \sigma_{DYH} \cdot \left[\frac{1}{1 - \frac{X}{L_0}} - \frac{1}{\ln \left(\frac{L_0}{X} \right)} \right] = 2 \cdot 386 \cdot \left[\frac{1}{1 - \frac{7,2}{25,004}} - \frac{1}{\ln \left(\frac{25,004}{7,2} \right)} \right] = 464 \text{ [MPa]} \quad (5.4)$$

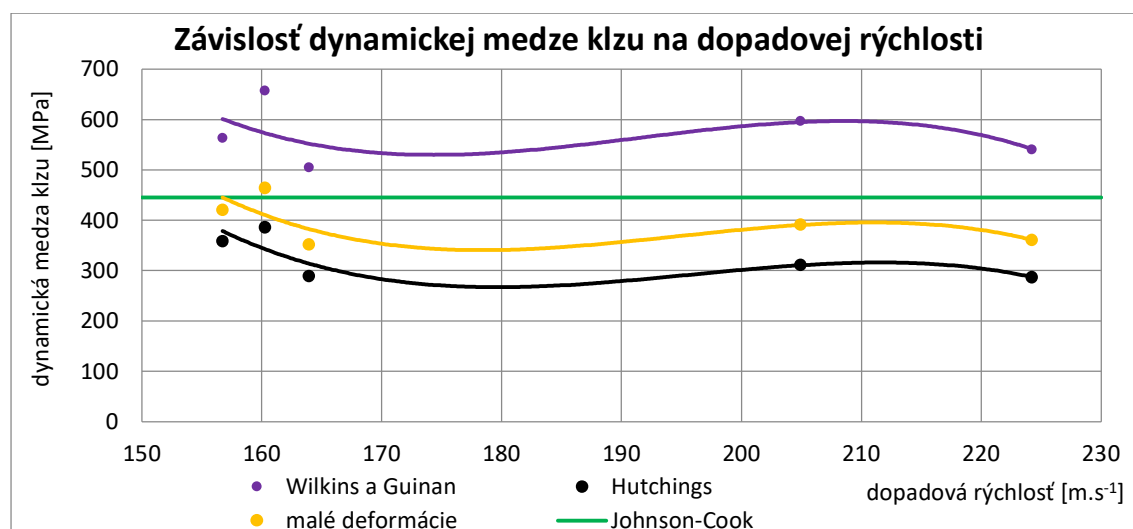
- Dynamická medza klzu σ_{DYWG} je podľa Wilkinsa a Guinana podľa vzťahu (3.5):

$$\sigma_{DYWG} = \rho \cdot v_0^2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{2 \cdot \ln \frac{L_0}{L_f}} = 2840 \cdot 160,3^2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{2 \cdot \ln \frac{25,004}{23,654}} = 657 \text{ [MPa]} \quad (5.5)$$

Týmto postupom boli vypočítané dynamické medze klzu pre všetky testované vzorky. Geometrie deformovaných vzoriek potrebné pre výpočty a výsledky výpočtov pre jednotlivé vzorky sú v tab. 9. Na základe výsledkov týchto výpočtov je na obr. 47 graficky znázornená dynamická medza klzu pre hliníkovú zliatinu 2024-T3. Graf zachytáva aj dynamickú medzu klzu vypočítanu zo vzťahu (5.10). Najvyššie hodnoty dynamickej medze klzu boli stanové podľa vzťahu Wilkinsa a Guinana.

Tab. 9 Geometrie vzoriek a dynamické medze klzu

VZORKA	dopadová rýchlosť	Počiatočná dĺžka	Finálna dĺžka	Dĺžka nedeformovanej časti	Dynamická medza klzu podľa:		
	v_0 [m.s ⁻¹]	L_0 [mm]	L_f [mm]	X [mm]	Hutchingsa	malé deformácie	Wilkinsa a Guinana
					σ_{DYH} [MPa]	σ_{DYT} [MPa]	σ_{DYGW} [MPa]
1	160,3	25,004	23,654	7,2	386	464	657
3	163,9	25,006	23,185	6,6	290	352	505
4	156,7	25,001	23,500	8,7	359	421	563
5	204,9	25,004	22,626	5	312	392	597
6	224,2	25,003	21,912	5	361	361	541



Obr. 47 Závislosť dynamickej medze klzu na dopadovej rýchlosti

Materiálový model podľa Johnson-Cooka popisuje správanie kovov v oblasti plastických deformácií. Vzťah pre určenie dynamickej medze klzu podľa tohto modelu (2.5) bol popísaný v kapitole 2.5. Pre zistenie jednotlivých členov tohto vzťahu bolo nutné vykonať kvazistatickú skúšku daného materiálu. Konkrétne ide o určenie medze klzu σ_0 , modulu spevnenia B a exponentu spevnenia n . Ťahová skúška materiálu bola vykonaná za deformačnej rýchlosti $0,02 \text{ m.s}^{-1}$, pri teplote $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a pri referenčnej rýchlosti $\dot{\varphi}_0 = 0,02 \text{ s}^{-1}$. Na obr. 48 je záznam ťahovej skúšky. Za týchto podmienky mohol byť vplyv rýchlosti deformácie a vplyv teploty zanedbaný. Tým môže byť rovnica (2.5) zjednodušená na vzťah [15]:

$$\sigma = (\sigma_0 + B \cdot \varphi^n) \quad (5.6)$$

Úpravou tejto rovnice pomocou prirodzeného logaritmu je získaný vzťah:

$$\ln(\sigma - \sigma_0) = n \cdot \ln(\varphi) + \ln(B) \quad (5.7)$$

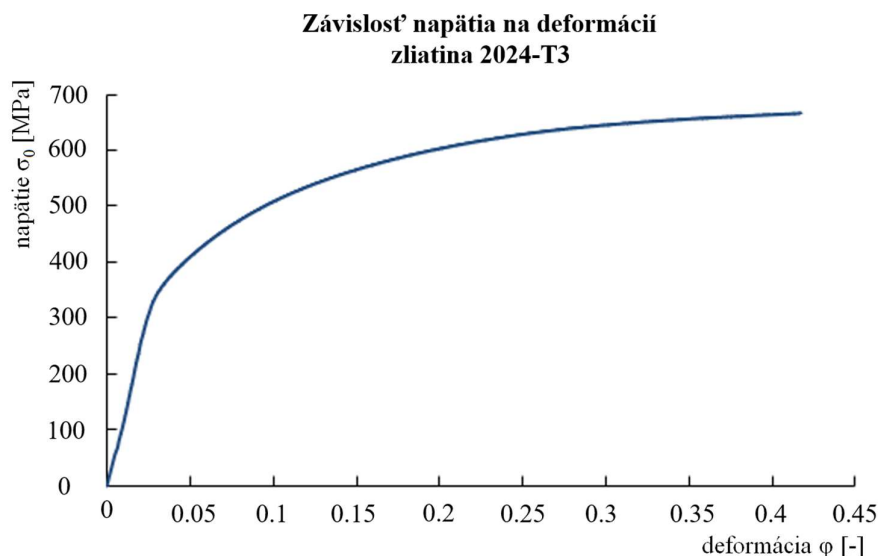
Zapísaním tohto vzťahu vo forme $x = k \cdot y + q$ a vykreslením členov x a y do grafu je získaná lineárna závislosť, ktorej členy k a q je možné jednoducho určiť. Z nameraných dát bola takto určená závislosť [15]:

$$\ln(\sigma - \sigma_0) = 0,3625 \cdot \ln(\varphi) + \ln(6,035) \quad (5.8)$$

Z tejto závislosti boli určené hodnoty členov:

- exponent spevnenia $n = 0,3625$ [-]
- modul spevnenia $B = 430,57$ MPa

Následne bola určená medza klzu tohto materiálu $\sigma_0 = 369,86$ MPa a parameter citlivosti na rýchlosť deformácie $C = 0,0223$ [15].



Obr. 48 Ťahový diagram hliníkovej zliatiny 2024-T3 [15]

Pre výpočet dynamickej medze klzu podľa Johnson-Cooka bola vypočítaná na základe dopadovej rýchlosti vzorky 1 rýchlosť jej deformácie $\dot{\varphi}_{V1}$.

$$\dot{\varphi}_{V1} = \frac{v}{h} = \frac{160300}{25,004} = 6411 \quad (5.9)$$

Podľa vzťahu (2.5) bola vypočítaná dynamická medza klzu pre vzorku 1. Časť rovnice (2.5), ktorá zahŕňa vplyv teploty bolo možné zanedbať.

$$\begin{aligned} \sigma_{dV1} &= (\sigma_0 + B \cdot \varphi_{V1}^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\varphi}_{V1}}{\dot{\varphi}_0}\right) \\ &= (369,86 + 430,57 \cdot 0^{0,3625}) \cdot \left(1 + 0,0233 \cdot \ln \frac{6411}{0,02}\right) \\ &= 479 \text{ [MPa]} \end{aligned} \quad (5.10)$$

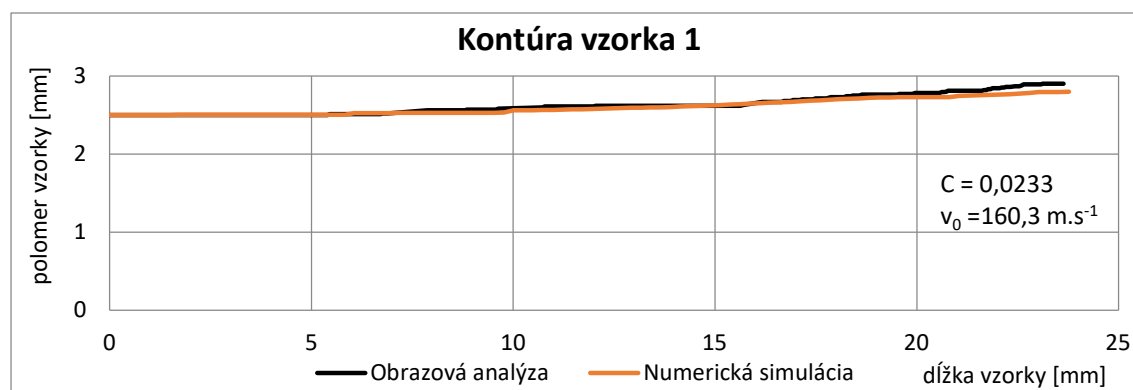
5.8 Overenie koeficientu citlivosti na rýchlosť deformácie

Pomocou simulácie v software Ansys v module Explicit Dynamics bolo zhotovená simulácia Taylorovho testu, kde pomocou materiálového modelu na základe Johnson-Cookovej konštitučnej rovnice bola simulovaná geometria materiálovej vzorky po dopade. Reálne geometrie vzoriek so simulovanými boli porovnávané pre rôzne dopadové rýchlosti. Výsledky tohto porovnania sú v tab. 10. Porovnávané geometrie sa zhodujú s presnosťou 0,1 mm pre dopadovú rýchlosť 160,3 m.s⁻¹. S rozdielnou dopadu zhoda geometrií klesá. Pri rýchlosti 224,2 m.s⁻¹ je presnosť už len do 1 mm.

Tab. 10 Porovnanie geometrie reálnych vzoriek so simulovanými geometriami

Dopadová rýchlosť	Finálny priemer - reálny	Finálna dĺžka - reálna	Finálny priemer - ANSYS	Finálna dĺžka- ANSYS	Rozdiel priemerov	Rozdiel dĺžok	Citlivosť na rýchlosť deformácie
v_0 [m.s ⁻¹]	D_f [mm]	L_f [mm]	$D_{f\text{sim}}$ [mm]	$L_{f\text{sim}}$ [mm]	D_{fr} [mm]	L_{fr} [mm]	C [mm]
156,7	5,561	23,5	5,453	23,804	0,108	-0,304	0,0223
160,3	5,562	23,654	5,456	23,757	0,106	-0,103	0,0223
163,9	5,549	23,185	5,459	23,708	0,09	-0,523	0,0223
204,9	5,929	22,626	5,511	23,133	0,418	-0,507	0,0223
224,2	6,102	21,912	5,846	22,85	0,256	-0,938	0,0223

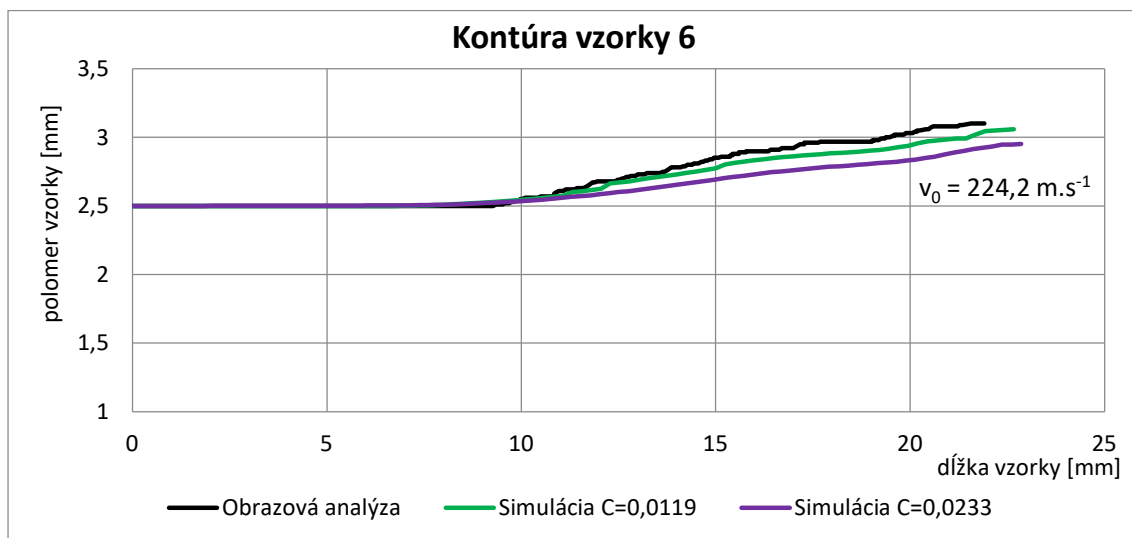
Dáta z numerickej simulácie boli spracované a bola zhotovená kontúra vzorky 1. Dopadová rýchlosť vzorky 1 bola 160,3 m.s⁻¹. Kontúra reálna vzorka bola zosnímaná obrazovou analýzou. Porovnanie týchto dvoch kontúr je na obr. 49. Z porovnanie je zrejmé že kontúry sa zhodujú. Zhoduje sa finálna dĺžka a aj finálny polomer vzorky už so spomínanou presnosťou cca 0,1 mm. Rovnako zhoda nastáva aj v dĺžke nedeformovanej časti vzorky. Z toho vyplýva, že hodnota parametru citlivosti na rýchlosť deformácie 0,0223 bola pre dopadovú rýchlosť 160,3 m.s⁻¹ stanovená správne. Takisto možno potvrdiť, že pre tvárniace rýchlosti okolo 160 m.s⁻¹ sú parametre sa parametre tohto materiálového modelu zhodujú so správaním materiálu 2024-T3. Na obr. 50 je pre porovnanie fotografia deformovanej vzorky 1.



Obr. 49 Kontúra vzorky 1



Obr. 50 Fotografia vzorky 1



Obr. 51 Kontúra vzorky 6

So zvyšujúcou sa dopadovou rýchlosťou presnosť zhody kontúr klesala, ako je možné vidieť na porovnaní kontúr na obr. 51. Tvar kontúry je zhodný, líši sa však finálna dĺžka vzorky a polomer. Príčinou môže byť, že materiál 2024-T3 vykazuje len miernu citlivosť na rýchlosť deformácie. To však platí len pre do určitých rýchlostí. Pri vyšších rýchlostiach, ako je rýchlosť $224,2 \text{ m.s}^{-1}$ je už vplyv výraznejší. Preto bol optimalizovaný parameter citlivosti na rýchlosť deformácie a obdobným postupom, ako v predchádzajúcich prípadoch bola získaná kontúra simulovanej vzorky. Parameter citlivosti na rýchlosť deformácie bol optimalizovaný na hodnotu 0,0119. Pre tieto rýchlosti a pri zanedbaní vplyvu teploty možno materiálový model podľa Johnson-Cooka vyjadriť vzťahom Ako je možné vidieť na obr. 52, polomer kontúr sa už zhodoval, rozdiel deformovaných dĺžok sa však zachoval. [16]

$$\sigma_d = (369.86 + 430.57\varphi^{0.363}) \left(1 + 0.0119 \ln \frac{\dot{\varphi}}{0.02} \right) \quad (5.11)$$

ZÁVER

Bol vykonaný vývoj nosiča materiálovej vzorky pre Taylorové testovacie zariadenie nachádzajúce sa v laboratóriu pre vysoké rýchlosti deformácie na ÚST FSI. Nosič bol vyvinutý pre vnútorný priemer hlavne $\varnothing 17$ mm. Pomocou numerických simulácií a praktických testov boli skúmane rôzne tvary nosičov a parametre, ktoré majú vplyv na dopadovú rýchlosť:

- hmotnosť nosiča – najzásadnejší vplyv,
- priemer nosiča – výrazný vplyv, optimálny stav je dosiahnuť čo najmenší rozdiel medzi priemerom nosiča a vnútorným priemerom hlavne – priestor pre ďalšiu optimalizáciu,
- labyrintová drážka – stredný vplyv, priestor pre optimalizáciu tvaru a počtu labyrintových drážok,
- aerodynamický tvar – malý vplyv,
- trenie medzi nosičom a hlavňou – zanedbateľný vplyv.

Na základe praktických skúšok bol ako finálny nosič vybraný variant F4, ktorý dosahoval najvyššie dopadové rýchlosti. Hmotnosť nosiča F4 je 1,3 g. Nosič bol vyrobený technológiou 3D tlače, metódou FDM. Finálny nosič bol lepený z dvoch častí. Výrobu nosiča je možné optimalizovať metódou 3D tlače s použitím podpôr.

Zo zariadenia bolo odstránené dopadisko a nosiče so vzorkami dopadali priamo na mernú tyč. Takto bol zaručený centrický dopad vzoriek. Nosič neovplyvňuje deformáciu vzorky, pretože jeho pevnosť je rádovo nižšia ako pevnosť materiálovej vzorky.

Funkčnosť nosiča F4 bola overená praktickými testami, kde testovaný materiál bola hliníková zliatina 2024-T3 a boli overené parametre modelu Johnson-Cook pre tento materiál. Porovnaním výsledkov testov s numerickými simuláciami bol overený koeficient citlivosti a rýchlosť deformácie. Pre rýchlosti okolo 160 m.s^{-1} a hodnotu koeficientu $C = 0,0223$ sa zhoduje materiálový model so skutočným správaním materiálu veľmi presne. Pre rýchlosti nad 220 m.s^{-1} bol optimalizovaný koeficient C na hodnotu 0,119. Presnosť materiálového modelu však nebola taká vysoká ako pri rýchlostiach 160 m.s^{-1} .

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. MEYERS, Marc A. *Dynamic Behavior of Materials*. 1. New York: John Wiley, 1994, 668 s. ISBN 0-471-58262-X.
2. JOPEK, Miroslav. *Modelování mechanického chování ocelí za vyšších rychlostí deformace*. Brno: VUT, 2003, 32 s. ISBN 8021424370.
3. GILIS, P. P. a T.S. GROSS. *Effect of Strain Rate on Flow Properties*. Metals handbook.: Volume 8 – Mechanical Testing. Ninth Edition. Ohio: American Society for Metals, 1985.
4. KUNČICKÁ, Lenka, Miroslav JOPEK, Radim KOCICH a Karel DVOŘÁK. *Determining Johnson-Cook Constitutive Equation for Low-Carbon Steel via Taylor Anvil Test*. Materials [online]. Basel: MDPI, 2021, 14(17), 4821 [cit. 2022-05-17]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14174821
5. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. : il. ISBN 80-214-2374-9.
6. KUDLÁČOVÁ, Barbora. *Dynamické materiálové modely ve tváření kovů a slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2017.
7. SWACZYNA, Roman. *Mechanické vlastnosti a chování tvářených ocelí za reálných rychlostí deformace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1996.
8. JEELANI, Shaik, John K WHITFIELD a Robert A DOUGLAS. *Design and Performance of Powder Accelerator Systems for Impact Studies*. North Carolina State University, 1971.
9. FOREJT, Milan. *FORM '98: Proceedings of the 4th International Conference. Forming Technology, Tools and Machines*. Brno, September 15-16 Volume 1. Brno: VUT Brno, 1998, 216 s. ISBN 80-214-1182-1.
10. FOREJT, Milan. *FORM '95. Proceedings of the 2th International Conference 13-14 th September 1995 Brno*. Brno: FS VUT; UST, 1995, 142 s. ISBN 80-214-0664-X.
11. ŠLAIS, Miroslav. *Studium vlivu rychlostních a teplotních parametrů na tvařitelnost Ti slitin*. Brno, 2012. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Forejt, CSc.
12. KNEBL, Martin. *Metody měření parametrů ve tváření kovů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2010.
13. DOHNAL, Ivo. *Ověření možnosti využití tahové deformace při Hopkinsonově testu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014.
14. HARANT, Martin. *Overenie a optimalitácia parametrov konštitutívnej rovnice Johnson-Cook pomocou Taylorovho testu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2020.
15. HARANT, Martin, Miroslav JOPEK, Kamil PODANÝ a Ján ŘIHÁČEK. *Investigation of Johnson-Cook parameters of aluminum alloy 2024-T3*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2020.
16. SEIDT, J.D a A GILAT. *Plastic deformation of 2024-T351 aluminum plate over a wide range of loading conditions*. International journal of solids and structures [online]. OXFORD: Elsevier, 2013, 50(10), 1781-1790 [cit. 2022-05-17]. ISSN 0020-7683. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijsolstr.2013.02.006

-
17. FOREJT, Milan, Anton HUMÁR, Miroslav PÍŠKA a Libor JANÍČEK. *Experimentální metody: HE1, HE1-K, (HE2) - Sylabus*. 2. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2019. Dostupné také z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/he1_experimentalni_metody_cviceni_2019_forejt_piska_humar_janicek.pdf
 18. HUTCHINGS, I.M a T.J O'BRIEN. *Normal impact of metal projectiles against a rigid target at low velocities*. International journal of mechanical sciences [online]. Elsevier, 1981, 23(5), 255-261 [cit. 2022-05-17]. ISSN 0020-7403. Dostupné z: doi:10.1016/0020-7403(81)90029-1
 19. LI, Jun-cheng, Gang CHEN, Feng-lei HUANG a Yong-gang LU. *Load characteristics in Taylor impact test on projectiles with various nose shapes*. Metals (Basel) [online]. Basel: MDPI, 2021, 11(5), 21 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: doi:10.3390/met11050713
 20. HOSFORD, William F. *Strain Aging. Iron and Steel*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012, s. 104-112. ISBN 9781107017986. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9781139086233.012
 21. ZERILLI, Frank J. a Ronald W. ARMSTRONG. *Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations*. Journal of applied physics [online]. Woodbury, NY: American Institute of Physics, 1987, 61(5), 1816-1825 [cit. 2022-05-17]. ISSN 0021-8979. Dostupné z: doi:10.1063/1.338024
 22. MIRZAIE, Tina, Hamed MIRZADEH a Jose-maria CABRERA. *A simple Zerilli–Armstrong constitutive equation for modeling and prediction of hot deformation flow stress of steels*. Mechanics of materials [online]. AMSTERDAM: Elsevier, 2016, 94, 38-45 [cit. 2022-05-17]. ISSN 0167-6636. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechmat.2015.11.013
 23. ZERILLI, Frank J. *Dislocation mechanics-based constitutive equations. Metallurgical and materials transactions. A, Physical metallurgy and materials science* [online]. New York, NY: Springer, 2004, 35(9), 2547-2555 [cit. 2022-05-17]. ISSN 1073-5623. Dostupné z: doi:10.1007/s11661-004-0201-x
 24. CARLUCCI, Donald E a Sidney S JACOBSON. *Ballistics*. 3. Milton: CRC Press, 2018. ISBN 9781138055315. Dostupné z: doi:10.1201/b22201
 25. BENSON, Tom. *Determining Center of Pressure*. National Aeronautics and Space Administration Glenn Research Center [online]. Glen Research Center [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/rktcp.html>
 26. DITTRICH, Lukáš. *Nové Subaru WRX má za sebou test IIHS. Jaký je výsledek?*. In: <https://www.autorevue.cz> [online]. 6.5.2014 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.autorevue.cz/nove-subaru-wrx-ma-za-sebou-test-iihs-jaky-je-vysledek>
 27. SVOBODA, Ján. *Metóda vstrekovania na technickú viskóznú krivku - Scientific Molding Method*. In: [Plasticportal.sk](http://plasticportal.sk) [online]. 25.04.2017 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.plasticportal.sk/sk/metoda-vstrekovania-na-technicku-viskoznu-krivku-scientific-molding-method/c/4256/>
 28. ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009, 246 s. : il., plány, příklady. ISBN 978-80-7300-250-3.
-

29. BAICH, Liseli a Guha P. MANOGHARAN. *Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts* [online]. In: . International Journal of Rapid Manufacturing, 2015 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Material-extrusion-process_fig1_295396135
30. KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. Brno: Computer Press, 2017, 211 stran : ilustrace. ISBN 978-80-251-4876-1.
31. PANTĚLEJEV, Libor. *Nízkouhlikové oceli*. In: Ime.fme.vutbr.cz [online]. [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/cviceni/06-Nizkouhlikove%20oceli%20-%20Priloha02.pdf
32. Long Range Shooting: *External Ballistics – Static Stability*. In: Sofrep - Military Grade Content [online]. 03.12.2016 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://sofrep.com/news/long-range-shooting-external-ballistics-static-stability/>
33. Long Range Shooting: *External Ballistics – Bullet Shape*. In: The Arms Guide [online]. [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://thearmsguide.com/5341/long-range-shooting-external-ballistics-bullet-shape/>
34. *Engineering Design Handbook - Design for Control of Projectile Flight Characteristics (AMCP 706-242)*. Minnesota: U.S. Army Materiel Command, 1966.
35. *Choice of Method of Stabilization. Engineering Design Handbook - Design for Control of Projectile Flight Characteristics (AMCP 706-242)*. Minnesota: U.S. Army Materiel Command, 1966.
36. WILKINS, Mark L. a Michael W. GUINAN. *Impact of cylinders on a rigid boundary*. Journal of applied physics [online]. 1973, 44(3), 1200-1206 [cit. 2022-05-19]. ISSN 0021-8979. Dostupné z: doi:10.1063/1.1662328
37. KRYSTEK, Kamil, Irena DUL a Maciej MOTYKA. *Influence of vacuum brazing temperature on the microstructure of an Inconel 783 superalloy joint with a honeycomb sealing made of Hastelloy X superalloy*. Rzeszów University of Technology, 2019. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/337001190_Influence_of_vacuum_brazing_temperature_on_the_microstructure_of_an_Inconel_783_superalloy_joint_with_a_honeycomb_sealing_made_of_Hastelloy_X_superalloy. DOI:10.26628/wtr.v9i9.1061.
38. JELÍNEK, Tomáš. *Oprava turbínové skříně*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2017.
39. RYVOLA, Zbyšek. *The Steam Leakage in the Labyrinth Seal*. Praha: Czech technical university in Prague, 2017.
40. EVGHENII, I. *Oh, we have a 3D printer in the office” or FDM printing basics* [online]. In: . 23.12.2020 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://isd-soft.com/tech-blog/enoh-we-have-a-3d-printer-in-the-office-or-fdm-printing-basics/>
41. KORKMAZ, Mehmet Erdi, Mustafa GÜNAY a Patricia VERLEYSSEN. *Investigation of tensile Johnson-Cook model parameters for Nimonic 80A superalloy*. Journal of alloys and compounds [online]. LAUSANNE: Elsevier B.V, 2019, 542-549 [cit. 2022-05-20]. ISSN 0925-8388. Dostupné z: doi:10.1016/j.jallcom.2019.06.153

42. MANESH, Sobhan Safavi. *Analysis and prediction of internal ballistic parameters of recoilless weapons*. Turkish Journal of Computer and Mathematics Education, 2021. Dostupné také z: <https://turcomat.org/index.php/turkbilmat/article/view/9628>
43. XIN, Tong, Guolai YANG, Fengjie XU, Quanzhao SUN a Alexandi MINAK. *Modeling, Simulation and Uncertain Optimization of the Gun Engraving System*. Mathematics (Basel) [online]. MDPI, 2021, 9(4), 398 [cit. 2022-05-20]. ISSN 2227-7390. Dostupné z: doi:10.3390/math9040398
44. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. c2012-2016 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz>

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATEK

Symboly		
Označení	Legenda	Jednotka
a	poloha snímača od čela mernej tyče	[mm]
B	modul spevnenia	[MPa]
C	koeficient citlivosti na rýchlosť deformácie	[-]
C ₀	rýchlosť zvuku v kovoch	[m.s ⁻¹]
C ₁	konštanta pomeru tepelného a rýchlostného deformačného účinku	[MPa]
C ₂	konštanta zahrňujúca vplyv veľkosti zrna	[K ⁻¹]
C ₃ , C ₄	konštanty tepelnej aktivácie a rýchlosti deformácie	[MPa]
C ₅	preexponenciálny faktor	[MPa.mm ⁻¹]
C _{el}	rýchlosť elastickej vlny	[m.s ⁻¹]
C _{Ma}	koeficient statického momentu	[rad ⁻¹]
C _{pl}	rýchlosť plastickej vlny	[m.s ⁻¹]
d _{max}	maximálny priemer telesa	[m]
d _N	priemer nosiča	[mm]
D _p	priemer pretlačnice	[mm]
D _{fR}	rozdiel priemerov	[mm]
D _{fsim}	finálny priemer – ANSYS	[mm]
d _{pt}	priemer pretlačovanej tyče	[mm]
d _z	priemerná veľkosť zrna	[mm]
E	Youngov modul pružnosti	[GPa]
h	vzťažná výška	[m]
I _x	osový moment zotrvačnosti	[kg.m ²]
I _y	priečny moment zotrvačnosti	[kg.m ²]
K	materiálová konštanta	[MPa]
L _{MT}	dĺžka vstupnej mernej tyče	[mm]
L ₀	počiatočná dĺžka vzorky	[mm]
L _{0I}	počiatočná dĺžka impaktoru	[mm]
L ₁	deformovaná dĺžka vzorky	[mm]
L _f	konečná dĺžka vzorky	[mm]
L _{fR}	rozdiel priemerov	[mm]
L _{fsim}	finálna dĺžka – ANSYS	[mm]
m	teplotný koeficient	[-]
m _e	exponent citlivosti na rýchlosť deformácie	[-]
m _N	hmotnosť nosiča	[g]
n	exponent deformačného spevnenia	[-]
n _v	stúpanie vývrtu v hlavni	[mm.ot ⁻¹]
p	osová uhlová rýchlosť	[rad.s ⁻¹]
s _g	koeficient gyroskopickkej stability	[-]
s ₁	vzdialenosť fotodiód snímaču 1	[mm]
s ₂	vzdialenosť fotodiód snímaču 2	[mm]
t	jednotka času	[s]
T	teplota vzorky materiálu	[K]
T ₀	referenčná teplota pri statickej medzi klzu	[K]
T*	homologická teplota	[K]
t ₁	doba preletu snímačom 1	[μs]
t ₂	doba preletu snímačom 2	[μs]
T _m	teplota tavenia	[K]

U_I	napätie vstupnej vlny	[mV]
U_R	napätie odrazenej vlny	[mV]
U_T	napätie prejdenej vlny	[mV]
v	rýchlosť	[m.s ⁻¹]
v_0	dopadová rýchlosť	[m.s ⁻¹]
$v_{E1.1}$	dopadová rýchlosť nosiča E1.1	[m.s ⁻¹]
X	dĺžka nedeformovanej časti	[mm]
ρ	hustota látky	[kg.m ⁻³]
ρ_{Al}	hustota hliníka 2024-T3	[kg.m ⁻³]
σ_0	statická medza klzu	[MPa]
σ_{DYH}	dynamická medza klzu podľa Hutchingsa	[MPa]
σ_{DYT}	dynamická medza klzu podľa Taylora	[MPa]
σ_{DYWG}	dynamická medza klzu podľa Wilkinsa a Guiana	[MPa]
σ_{DV1}	dynamická medza klzu vzorky 1	[MPa]
μ	vplyv statockého momentu	[Nm.rad ⁻¹]
φ	logaritmická deformácia	[-]
φ_0	referenčná rýchlosť pretvorenia	[s ⁻¹]
$\dot{\varphi}$	rýchlosť deformácie	[s ⁻¹]
$\dot{\varphi}_{V1}$	rýchlosť deformácie vzorky 1	[s ⁻¹]
τ_{max}	maximálne šmykové napätie	[MPa]

Skratky

Označenie	Legenda
CT	Centrum tlaku
TAT	Taylor Anvil Test
TD	Ťahový diagram

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1	Nosič 1 - krátky
Príloha 2	Nosič 1 - dlhý
Príloha 3	Nosič 2 - dlhý
Príloha 4	Nosič 3
Príloha 5	Nosič 4 s vložkou
Príloha 6	Príklad zle vypeneného nosiča
Príloha 7	Nosič z materiálu Soudal
Príloha 8	Testované vzorky – materiál 2024-T3



Príloha 3
Nosič 2 - dlhý

3/8



Príloha 4
Nosič 3

4/8







Vzorek: 1 Datum: 29.4.2022 $D_0 = 4,993$ $D_1 = 5,562$ $L_0 = 25,004$ $L_1 = 23,654$ Poznámky: nosič E1 $A_1 = 624 \mu s$ $N_1 = 160,27 \text{ m/s}$ $A_2 = 158,1 \mu s$ $N_2 = 158,17 \text{ m/s}$	Vzorek: 3 Datum: 2.5.2022 $D_0 = 4,998$ $D_1 = 5,549$ $L_0 = 25,006$ $L_1 = 23,185$ Poznámky: NOSIČ F $A = 610 \mu s$
Vzorek: 4 Datum: 2.5.2022 $D_0 = 4,996$ $D_1 = 5,561$ $L_0 = 25,001$ $L_1 = 23,500$ Poznámky: NOSIČ E $A = 638$	Vzorek: 5 Datum: 2.5.2022 $D_0 = 4,996$ $D_1 = 5,929$ $L_0 = 25,004$ $L_1 = 22,626$ Poznámky: NOSIČ F $A = 488 \mu s$ plnenie 130 b