



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## STUDIUM VLIVU RYCHLOSTNÍCH PARAMETRŮ NA TVAŘITELNOST HLINÍKOVÝCH SLITIN

STUDY OF THE EFFECTS OF STRAIN RATE ON FORMABILITY OF Al ALLOYS

### DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Martin Harant

### ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Forejt, CSc.

BRNO 2024



## ABSTRAKT

Dizertačná práca sa venuje vplyvu rýchlosti deformácie na mechanické vlastnosti a tvárnosť hliníkovej zliatiny EN AW-2024 – T3. Vzorky pre skúmanie vytvrdeného stavu sú odobrané z plechu s hrúbkou 0,8 mm pod siedmimi uhlami vzhľadom na smer valcovania. Ťahové skúšky sú vykonané v režime kvazistatických, stredných a vysokých rýchlostí deformácie. Výsledky ukazujú, že zliatina vykazuje negatívnu citlivosť na rýchlosť deformácie, pričom nie je zrejma spojitosť medzi týmto správaním a dynamickým deformačným starnutím, prípadne adiabatickým ohrevom. EBSD analýza potvrdzuje, že na zistenú anizotropiu materiálu má vplyv predĺženie zŕn v pozdĺžnej rovine plechu. Skúmaním lomových plôch je určený mechanizmus porušenia vzoriek – nízkoenergetický tvárny lom. Na základe meraní sú vyhodnotené parametre materiálového modelu Johnson-Cook. V ďalšej časti sa skúmajú vlastnosti zliatiny v stave bezprostredne po rozpúšťacom žíhaní a rýchlom ochladení. Vstupným materiálom je zliatina EN AW-2024 – T3 vo forme plechu s hrúbkou 1 mm. Vzorky pred tepelným spracovaním a bezprostredne po ňom sú zaťažované v ťahu v režime kvazistatických a stredných rýchlostí deformácie. Pri materiáli po tepelnom spracovaní možno pozorovať negatívnu citlivosť na rýchlosť deformácie. Toto správanie je zapríčinené dynamickým deformačným starnutím, čo potvrdzuje prítomnosť Portevin-Le Chatelierovho efektu a deformačných pásov na deformačných mapách získaných 2D DIC analýzou. Práca tiež predstavuje návrhy zariadení pre Hopkinsonov ťahový test pre vzorky kruhového prierezu a ploché vzorky. Funkčnosť oboch návrhov je overená numerickou simuláciou a experimentom.

### Kľúčové slová

hliníková zliatina, EN AW-2024 – T3, mechanické vlastnosti, tvárnosť, rýchlosť deformácie, Hopkinsonov test

## ABSTRACT

The thesis deals with the effect of strain rate on the mechanical properties and formability of the aluminium alloy EN AW-2024 – T3. Specimens used to investigate the hardened state are taken from a sheet with a thickness of 0.8 mm, at seven different orientations relative to the rolling direction. Tensile tests are conducted at quasi-static, medium, and high strain rates. The results indicate that the alloy exhibits a negative strain rate sensitivity, with no apparent connection between this behaviour and dynamic strain aging or adiabatic heating. EBSD analysis confirms that the observed material anisotropy is influenced by the elongation of grains in the longitudinal plane of the sheet. Examination of the fracture surfaces identifies the failure mechanism of the specimens as a ductile fracture. Based on the experimental data, the parameters of the Johnson-Cook material model are investigated. The next part of the study focuses on the properties of the alloy in the state immediately after solution annealing and quenching. The initial material is the EN AW-2024 – T3 alloy in the form of a sheet with a thickness of 1 mm. Specimens are subjected to tensile loading at quasi-static and medium strain rates, both before and immediately after heat treatment. The material after heat treatment shows negative strain rate sensitivity. This behaviour is caused by dynamic strain aging, as confirmed by the presence of the Portevin-Le Chatelier effect and deformation bands on the strain maps obtained from 2D DIC analysis. The work also presents designs for split Hopkinson tensile bar test devices for round and flat specimens. The functionality of both designs is verified by numerical simulations and experiments.

### Keywords

aluminium alloy, EN AW-2024 – T3, mechanical properties, formability, strain rate, split Hopkinson bar test

---

## BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

HARANT, Martin. *Studium vlivu rychlostních parametrů na tvařitelnost hliníkových slitin*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/163138>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Milan Forejt.

---

## VYHLÁSENIE

Čestne vyhlasujem, že som dizertačnú prácu na tému Studium vlivu rychlostních parametrů na tvařitelnost hliníkových slitin vypracoval samostatne, s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho práce.

V Brne 31. 08. 2024

miesto, dátum

Ing. Martin Harant

---

## POĎAKOVANIE

Ďakujem pánovi prof. Ing. Milanovi Forejtovi, CSc., za cenné rady pri vypracovávaní dizertačnej práce. Rád by som tiež poďakoval Ing. Leopoldovi Kruszkovi, Ph.D., z Fakulty stavebného inžinierstva a geodézie Vojenskej technickej univerzity (Varšava, Poľsko) a prof. Ing. Patricii Verleysen, Ph.D., z Katedry elektromechaniky, systémov a kovov Fakulty architektúry a inžinierstva Univerzity Ghent (Ghent, Belgicko) za možnosť zúčastniť sa stáží na ich pracoviskách, poskytnutie vybavenia a mentoring.

Poďakovanie tiež patrí Ing. Lenke Klakurkovej, Ph.D., zo Stredoevropského technologického inštitutu (CEITEC) a Ing. Alici Chlupovej, Ph.D., z Ústavu fyziky materiálov Akadémie vied Českej republiky za pomoc so spracovaním a vyhodnotením štruktúrnych analýz. Taktiež som vďačný za pomoc s ďalšími analýzami a ich vyhodnotením, ktorú mi poskytli kolegovia z Ústavu strojírenské technologie, Ústavu materiálových vied a inžinierstva a Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky Fakulty strojního inžinierství Vysokého učení technického v Brně.

V neposlednom rade ďakujem mojej rodine, priateľom, ale aj kolegom za podporu počas celého štúdia.

---

---

## OBSAH

Abstrakt	
Bibliografická citácia	
Čestné vyhlásenie	
Poďakovanie	
Obsah	
Úvod	8
1 Ciele dizertačnej práce	9
2 Hliník a jeho zliatiny	10
2.1 Rozdelenie a označovanie	11
2.1.1 Označovanie hliníkových zliatin pre odlievanie	11
2.1.2 Označovanie hliníkových zliatin pre tvárnenie	12
2.2 Tepelné spracovanie	13
2.2.1 Žíhanie	13
2.2.2 Precipitačné vytvrdzovanie	15
2.3 Zliatina EN AW-2024 – T3	16
3 Analýza materiálových vlastností	20
3.1 Ťahová skúška	21
3.2 Tlaková skúška	23
3.3 Hopkinsonov test	23
3.3.1 Vyhodnotenie testu	27
3.3.2 Modifikácie experimentálneho zariadenia pre testovanie v ťahu	29
3.4 Taylorov test	30
3.5 Digital Image Correlation	31
4 Materiálové modely	34
4.1 Podmienky plasticity	34
4.1.1 Izotropné podmienky plasticity	34
4.1.2 Anizotropné podmienky plasticity	36
4.2 Konštitutívne vzťahy	37
5 Vlastnosti zliatiny EN AW-2024 – T3 vo vytvrdenom stave	39
5.1 Experimentálny program a metódy	39
5.1.1 Ťahové skúšky	40
5.1.2 Štruktúrna analýza a fraktografia	43
5.2 Výsledky a diskusia	43
5.2.1 Vyhodnotenie ťahových skúšok	43
5.2.2 Štruktúrna analýza a fraktografia	47
5.2.3 Materiálový model Johnson-Cook	52
6 Vlastnosti zliatiny EN AW-2024 – T3 v mäkkom stave	55
6.1 Materiál a metódy	55
6.2 Výsledky a diskusia	56
7 Hopkinsonov ťahový test	59
7.1 Riešenie pre testovanie vzoriek kruhového prierezu	59

---

---

7.1.1	Numerická simulácia .....	60
7.1.2	Realizácia návrhu .....	63
7.1.3	Overenie funkcie.....	64
7.2	Riešenie pre testovanie plochých vzoriek .....	66
7.2.1	Numerická simulácia .....	67
7.2.2	Realizácia návrhu .....	68
7.2.3	Overenie funkcie.....	68
Závery.....		71

Publikačná činnosť autora

Zoznam použitej literatúry

Zoznam použitých symbolov a skratiek

## ÚVOD

Hliník je najpoužívanejším neželezným kovom. K jeho prednostiam patrí korózna odolnosť, dobrá elektrická a tepelná vodivosť a tiež výborné technologické vlastnosti. Samotné využitie hliníka je však obmedzené najmä z dôvodu jeho nízkej pevnosti. Pridaním legujúcich prvkov dochádza k podstatnému zlepšeniu vlastností a rozšíreniu uplatnenia. V posledných desaťročiach sa výrazne zvýšil dopyt po hliníkových zliatinách predovšetkým v oblasti automobilového, leteckého a kozmického priemyslu. Hlavným dôvodom, ktorý k tomuto prispel, je veľmi dobrý pomer hmotnosti a pevnostných vlastností týchto materiálov. Navyše prinášajú aj ďalšie výhody vo forme relatívne nízkej ceny, recyklácie, či možnosti využiť širokú škálu technológií pre ich spracovanie a povrchovú úpravu. [2]

Pre analýzu výroby, bezpečnosti procesov, ale aj testovanie výrobkov je dôležitým nástrojom numerická simulácia. Tento prístup prináša výhody, ako sú úspora času a nákladov, jednoduchá možnosť optimalizácie, ale aj zistenie komplexnejších informácií o riešenom probléme. Jedným zo vstupov numerickej simulácie je materiálový model, ktorý má zásadný vplyv na presnosť riešenia úlohy. V prípade základných úloh, kde dochádza k veľmi malým deformáciám, môže byť použitý jednoduchý elastický model. Ak je prítomná aj plastická deformácia, porušenie materiálu alebo vplyv teploty, stáva sa podstatne zložitejším. Vzhľadom na aplikácie a spracovanie hliníkových zliatin treba, aby materiálový model zohľadňoval odozvu na statické a dynamické zaťaženie a často aj účinok vysokých, resp. nízkych teplôt.

Najpoužívanejším nástrojom pre zistenie mechanických vlastností, posúdenie tvárniteľnosti a vytvorenie materiálových modelov sú experimentálne metódy. Odozva materiálu pri statickom zaťažení sa najčastejšie získava skúškou jednoosovým zaťažením v ťahu. Zistenie reakcie na dynamické zaťaženie býva zvyčajne skúmané pomocou Hopkinsonovho testu. V súčasnosti existuje veľké množstvo modifikácií tohto experimentu a napreduje aj vývoj nových zariadení, takže je možné testovanie v širokom rozsahu teplôt, ale aj za rôznych napät'ových stavov. Vďaka tomu sa dajú vytvoriť komplexné materiálové modely, ktoré s vysokou presnosťou popisujú správanie materiálu pri zaťažení.

## 1 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Dizertačná práca sa zameriava na rozšírenie a overenie poznatkov o zmenách vlastností hliníkových zliatin vystavených rôznym režimom rýchlosti deformácie. Zo širokej škály dostupných možností bola pre tento účel vybraná zliatina s označením EN AW-2024 – T3 (AlCu4Mg1), ktorá nachádza uplatnenie predovšetkým v automobilovom a leteckom priemysle. Hlavná časť práce je venovaná skúmaniu materiálu vo vytvrdenom stave. Čiastkové ciele sú nasledujúce:

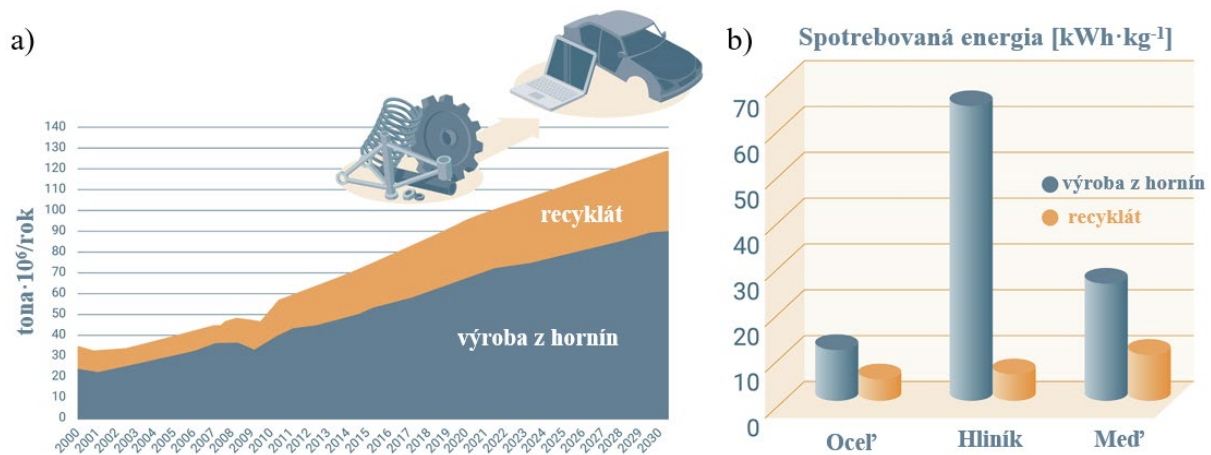
- zistenie mechanických vlastností pri pôsobení rôznych rýchlostí deformácie,
- stanovenie súvislosti medzi mechanickými vlastnosťami a štruktúrou materiálu,
- stanovenie mechanizmu porušenia,
- vytvorenie materiálového modelu, ktorý zohľadňuje skúmané procesné parametre.

Ďalším cieľom je zistenie mechanických vlastností a posúdenie tvárniteľnosti predmetnej hliníkovej zliatiny v stave bezprostredne po rozpúšťacom žíhaní a ochladení, keď je materiál tvorený presýteným tuhým roztokom. Analyzovanie tohto stavu je dôležité, pretože polotovár takto vstupuje do procesu tvárnenia.

Posledným cieľom je vytvorenie návrhu a realizácia zariadenia pre dynamické ťahové skúšky podľa Hopkinsona pre testovanie vzoriek kruhového prierezu a plochých vzoriek. Pre overenie funkcie bude využitá numerická simulácia.

## 2 HLINÍK A JEHO ZLIATINY

Hliník je na treťom mieste medzi prvkami najviac zastúpenými v zemskej kôre. V prírode sa nevyskytuje ako samostatný element vzhľadom na vysokú afinitu ku kyslíku a dobrú stabilitu jeho zlúčenín. Na začiatku procesu produkcie hliníka je ťažba hornín. Najvýznamnejšou je bauxit, tvorený minerálmi ako gibbsit, boehmit či diaspor s rôznym obsahom oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Táto hornina ďalej obsahuje minerály s oxidmi železa, kremíka a titánu a tiež ďalšie prvky. Produkcia je historicky založená na využití bauxitu, okrem neho sa ale v menšej miere využíva aj nefelín. Následným spracovaním sa z hornín získava  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , z ktorého je najčastejšie elektrolyticky vyrábaný hliník. Vzhľadom na výraznú energetickú náročnosť produkcie je čoraz väčší podiel získavaný recykláciou, ktorá vyžaduje približne 5 % energie spotrebovanej pri výrobe z hornín, pozri obr. 1. [2; 3; 4]



Obr. 1 a) Vývoj trendu výroby hliníka z hornín a recykláciou a b) porovnanie energie potrebnej pre jeho výrobu [3].

Hliník má jedinečnú kombináciu fyzikálnych, chemických, mechanických a technologických vlastností, pričom ho charakterizujú predovšetkým tieto: nízka hustota ( $2\,700\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), vysoká elektrická a tepelná vodivosť, odolnosť voči atmosférickej korózii, získaná oxidovou vrstvou na povrchu. Vyznačuje sa kubickou plošne centrovanou mriežkou (FCC), ktorá je stabilná v celom teplotnom rozsahu až do okamžiku tavenia ( $660\text{ °C}$ ), čo prispieva k dobrej tvárniteľnosti. Ďalšie technologické vlastnosti, obrobiteľnosť a zlievateľnosť, sú pomerne zlé. Podobne ako väčšina čistých kovov má hliník nízku pevnosť, čo znemožňuje jeho použitie pre aplikácie, kde je vyžadovaná odolnosť voči namáhaniu. [2; 4; 5]

Uplatnenie čistého hliníka je predovšetkým vďaka jeho fyzikálnym a chemickým vlastnostiam, napr. v potravinárstve a elektrotechnike. Dôležitou aplikáciou je tiež plátovanie, pri ktorom je povrch dielcov chránený tenkou vrstvou hliníka pred pôsobením korózie. [4]

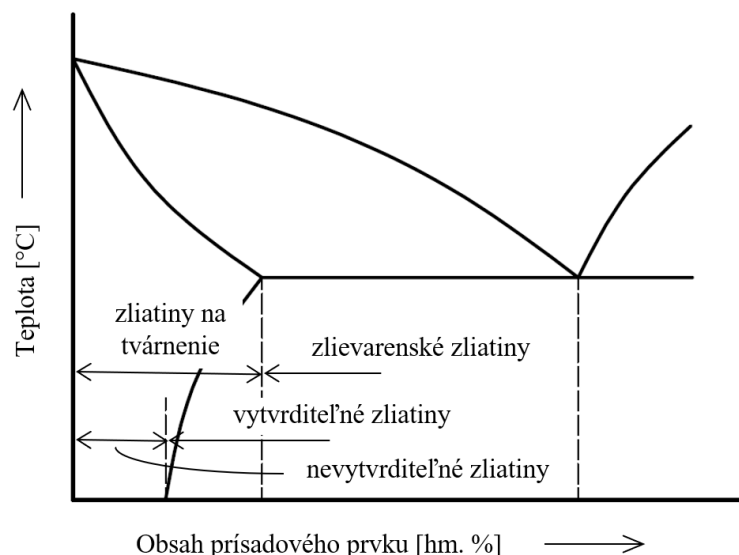
Zlepšenie vlastností a rozšírenie možností použitia hliníka je možné legovaním, čím dochádza k vytvoreniu zliatiny. Takéto materiály potom vykazujú veľmi dobrú kombináciu nízkej hustoty v spojení s vysokou pevnosťou. Dosiahnuté vlastnosti sú výsledkom komplexnej interakcie medzi chemickým zložením, mikroštruktúrou a tepelným spracovaním. Najčastejšie legujúce prvky a ich účinky na vlastnosti hliníkových zliatin sú nasledujúce [2; 4; 5]:

- Cu – pre zlepšenie pevnostných vlastností a zvýšenie tvrdosti, negatívne ovplyvňuje odolnosť voči korózii,
- Mg – pre zvýšenie pevnosti, najčastejšie v zliatinách typu Al-Cu a Al-Si,
- Mn – pre spevnenie materiálu a zjemnenie zrna,
- Si – zlepšuje najmä zlievateľnosť,
- Zn – zvyšuje pevnosť, ale zhoršuje tvárniteľnosť.

Zliatiny hliníka nachádzajú široké uplatnenie a zo skupiny kovov sú druhým najpoužívanejším materiálom po oceliach [6]. Hlavnou oblasťou ich použitia je doprava, kde nízka hmotnosť komponentov umožňuje znížiť spotrebu paliva a tiež emisie. Ďalšou je stavebníctvo, ktoré využíva koróziu odolnosť a jednoduchú údržbu dielcov. V potravinárstve našli uplatnenie najmä vo forme obalového materiálu, pretože sú hygienicky nezávadné a odolávajú teplotám. Okrem spomínaných oblastí je ale možnosť stretnúť sa s hliníkovými zliatinami v strojárstve, energetike, chemickom priemysle, ako aj v ďalších výrobkoch používaných v každodennom živote. [2]

## 2.1 Rozdelenie a označovanie

Zliatiny hliníka sa podľa technológie spracovania rozdeľujú na zlievarenské a na tvárnenie. Produkt zlievarenských je získaný odlievaním. Vzhľadom na dobré vlastnosti sa takto získavajú aj výrobky komplexných tvarov. Zliatiny pre tvárnenie sú spracovávané za studena, poloohrevu alebo tepla technológiami ako valcovanie, ťahanie, kovanie alebo pretlačanie. Z hľadiska chemického zloženia spočíva rozdiel medzi skupinami vo vyššom obsahu legujúcich prvkov u zlievarenských zliatin (obr. 2), čo má vplyv na pokles tvárniteľnosti. Zaradenie zliatiny do jednej alebo druhej skupiny však neznamená, že nie je možné jej spracovanie inou technológiou, čo platí najmä pre materiály s chemickým zložením blízky hranici rozdelenia. [4; 5]



Obr. 2 Rozdelenie zliatin hliníka podľa všeobecného rovnovážneho diagramu Al-legujúci prvok [5].

Druhé rozdelenie je z hľadiska možnosti zvýšenia pevnostných vlastností tepelným spracovaním, podľa čoho sa zliatiny delia na vytvrditeľné a nevytvrditeľné. Vhodným tepelným spracovaním vytvrditeľných zliatin je možné ich pevnosť zvýšiť. [6]

V súčasnosti väčšina trhu používa značenie hliníkových zliatin založené na systéme navrhnutom v roku 1970 organizáciou Aluminum Association. Označovanie vychádza zo základného rozdelenia zliatin podľa spracovania.

### 2.1.1 Označovanie hliníkových zliatin pre odlievanie

Spôsob označovania hliníkových zliatin pre odlievanie upravuje česká verzia európskej normy ČSN EN 1780-1: Hliník a slitiny hliníku – Označování slitinových hliníkových ingotů pro přetavení, předslitiny a odlitků – Část 1: Číselné označování. Číselné označenie je tvorené niekoľkými časťami v tomto poradí [2; 7]:

- predpona EN (európska norma) nasledovaná medzerou,
- písmeno A označujúce hliník,

- písmeno C (z angl. cast alloys) značiace odliatky,
- spojovník,
- päťica čísel udávajúca chemické zloženie.

Prvá z päťice čísel označuje hlavný legujúci prvok/prvky, pričom platí nasledujúce:

- 1xxxx (séria 10000) – Al s min. obsahom 99,00 %,
- 2xxxx (séria 20000) – zliatiny AlCu,
- 3xxxx (séria 30000) – zliatiny AlMn,
- 4xxxx (séria 40000) – zliatiny AlSi,
- 5xxxx (séria 50000) – zliatiny AlMg,
- 6xxxx (séria 60000) – zliatiny AlMgSi,
- 7xxxx (séria 70000) – zliatiny AlZn,
- 8xxxx (séria 80000) – zliatiny Al s inými prvkami.

Ďalší spôsob označovania týchto zliatin je pomocou chemických značiek a definuje ho norma ČSN EN 1780-2: Hliník a slitiny hliníku – Označování slitinových hliníkových ingotů pro přetavení, předslitin a odlitků – Část 2: Označování chemickými značkami. V tomto prípade je možné chemické označenie uvádzať v hranatých zátvorkách za číselným označením, napr. EN AC-21000 [AlCu4MgTi] alebo samostatne. Ak sa použije samotné označenie chemickými značkami, je toto tvorené predponou EN nasledované medzerou, za ktorou je písmeno A označujúce hliník a písmeno C, ktoré značí odliatky, ďalej nasleduje spojovník a značka Al, ktorá je od zvyšnej časti oddelená medzerou, napr.: EN AC-Al Si12CuMgNi. [2; 8]

### 2.1.2 Označovanie hliníkových zliatin pre tvárnenie

Úprave číselného a chemického označovania hliníkových zliatin pre tvárnenie sa venujú normy ČSN EN 573-1: Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvárených výrobků – Část 1: Číselné označování a ČSN EN 573-2: Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvárených výrobků – Část 2: Označování chemickými značkami. Značenie je založené na podobnom princípe ako u zliatin pre odlievanie s nasledujúcimi odlišnosťami [9; 10]:

- za písmenom A označujúcim hliník je písmeno W (z angl. wrought alloys) značiace tvárnenie,
- päťica čísel je nahradená štyrmi číslami, pričom význam prvej označujúcej hlavný legujúci prvok/prvky je rovnaký, napr. séria 2xxx zahŕňa zliatiny AlCu.

Za označením zliatiny sa ďalej udáva stav spracovania (tepelné, príp. deformačné), ktorý je oddelený pomlčkou a tento zápis definuje norma ČSN EN 515: Hliník a slitiny hliníku – Výrobky tvárené – Označování stavů. Označenie zvyčajne tvorí písmeno nasledované číslicou/číslami, čím sa špecifikuje použité spracovanie. Základné stavy materiálu sú nasledujúce [11; 12]:

- F – stav z výroby.
- O – žiháný. Označenie sa používa pre tvárnené výrobky žihané za účelom dosiahnutia najnižšej pevnosti alebo u zliatin pre odlievanie na zlepšenie tvárniteľnosti.
- H – deformačne spevnený. Označenie výrobkov, ktoré majú pevnosť zvýšenú deformačným spevnením, s dodatočným tepelným spracovaním za účelom získania určitých mechanických vlastností alebo bez neho.
- W – po rozpúšťacom žíhaní. Označenie vyjadruje nestabilný stav. Používa sa pre zliatiny po rozpúšťacom žíhaní, u ktorých dochádza k samovoľnému starnutiu pri izbovej teplote.
- T – tepelne spracovaný pre dosiahnutie stabilných stavov iných ako F, O alebo H. Používané pri tepelne spracovaných výrobkoch s dodatočným deformačným spevnením alebo bez neho k získaniu stabilného stavu.

Z uvedeného vyplýva, že niektoré označenia stavov sú používané aj u zliatin pre odlievanie. Viac informácií je uvedených v príslušných normách. Vzhľadom na komplexnosť a dôležitosť problematiky tepelného spracovania hliníkových zliatin je tomuto venovaná nasledujúca kapitola.

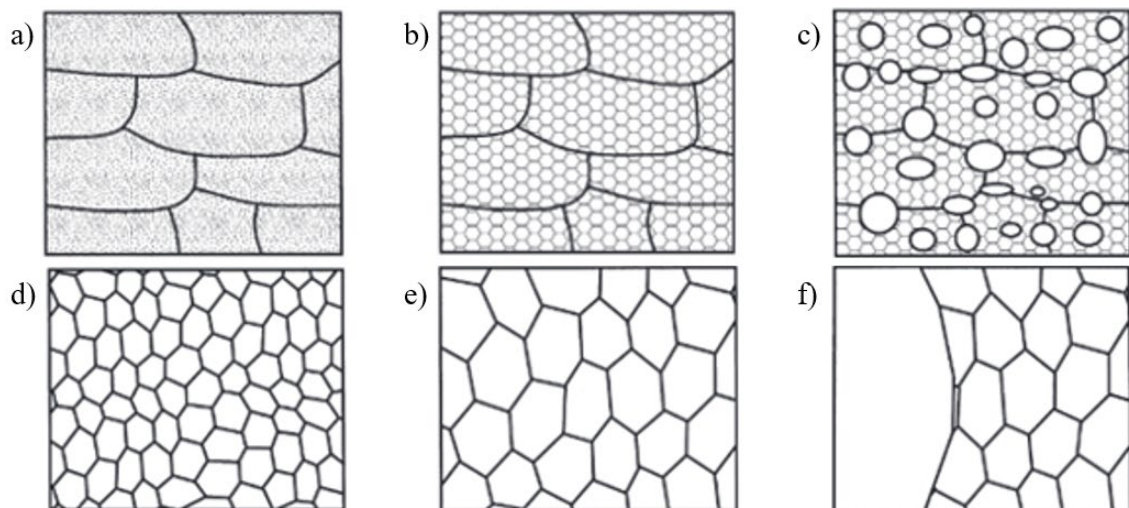
## 2.2 Tepelné spracovanie

Zliatiny hliníka sú tepelne spracovávané za účelom získania lepších pevnostných vlastností, tváriteľnosti či zníženia pnutia. Z podstaty vecí možno rozdeliť procesy tepelného spracovania týchto materiálov do dvoch skupín, na žihanie a precipitačné vytvrdzovanie. [2]

### 2.2.1 Žihanie

Žihanie spočíva v ohreve materiálu, výdrži na teplote a následnom ochladzovaní. Jednotlivé typy sa potom líšia v kombinácii procesných parametrov ako teplota, doba výdrže alebo rýchlosť ochladzovania, ktoré majú vplyv na výsledné materiálové vlastnosti. Pre žihanie hliníkových zliatin sa používajú nasledujúce postupy:

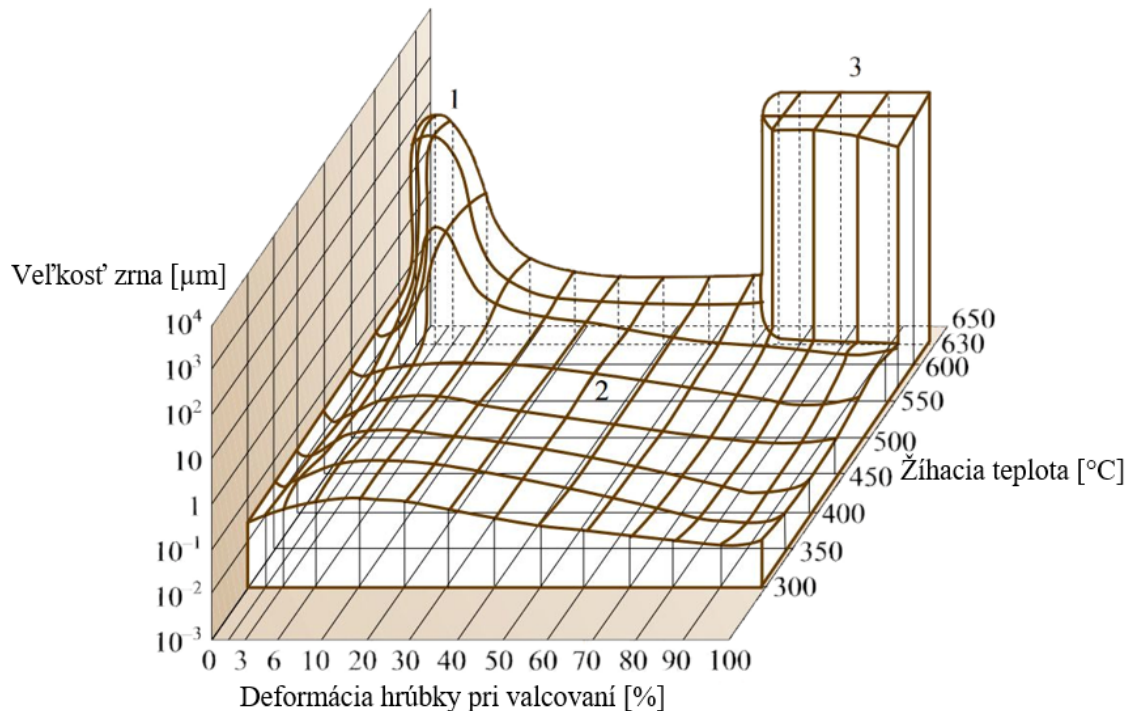
- Rekryštalizačné žihanie – tvárnením dochádza k spevneniu materiálu a vzniku deformovanej štruktúry, čo vedie k nárastu sily potrebnej pre ďalšie pretvorenie. Rekryštalizačným žiham sa znižuje pevnosť a súčasne sa zlepšujú plastické vlastnosti. To je umožnené štruktúrnymi zmenami, pri ktorých dochádza k zotaveniu, primárnej rekryštalizácii (ďalej len rekryštalizácia) a prípadne aj rastu zŕn. Zotavenie zahŕňa procesy pred rekryštalizáciou a vedie k poklesu deformačnej energie, zníženiu zvyškového pnutia a čiastočne aj pevnosti. Najdôležitejším zo zotavovacích procesov je polygonizácia, pri ktorej sa mení usporiadanie dislokácií a znižuje ich hustota (anihiláciou). Usporiadáním dislokácií vznikajú hranice subzŕn mnohouholníkových tvarov, ktoré sú takmer bez vnútorných dislokácií (obr. 3b). Následná rekryštalizácia spočíva v spájaní subzŕn s podobnou orientáciou (obr. 3c), až kým nedôjde k vzniku nového zrna, ktoré je od okolia oddelené hranicou s výrazne odlišnou orientáciou (obr. 3d). K vytvoreniu novej štruktúry teda dochádza na úkor tej pôvodnej, deformovanej. [2; 13; 14]



Obr. 3 Fázy rekryštalizačného žihania [15].

Rekryštalizácia závisí predovšetkým na stupni pretvorenia materiálu (vyšší stupeň pretvorenia = nižšia teplota potrebná pre rekryštalizáciu) a teplote (vyššia teplota = vyššia rýchlosť rekryštalizácie). V prípade, že výdrž na teplote pokračuje aj po rekryštalizácii, zrná ďalej rastú (obr. 3e). To môže viesť k výraznému zväčšeniu niektorých zŕn (obr. 3f), čo sa označuje ako sekundárna rekryštalizácia. Tento proces je tiež zrejмый z diagramu

zobrazeného na obr. 4, oblasť 3. Enormné zhrubnutie zrna môže nastať aj v dôsledku určitej kombinácie stupňa pretvorenia materiálu a teploty žihania, pozri obr. 4, oblasť 1. [6; 13]



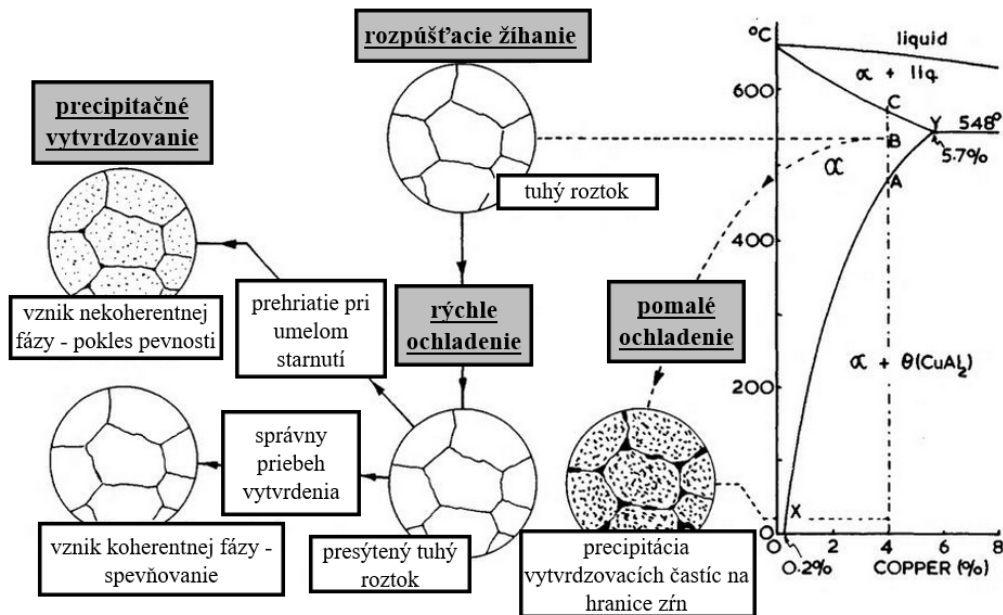
Obr. 4 Rekryštalizačný diagram zliatiny hliníka EN AW-1060 zobrazujúci veľkosť zrna v závislosti na deformácii pri tvárnení za studena a žihacej teplote (výdrž 2 hodiny) [6].

- Stabilizačné žihanie – používa sa u zliatin pracujúcich v prostredí so zvýšenou teplotou alebo v aplikáciách, kde dochádza k nárastu teploty, napr. v dôsledku trenia. Výsledkom tohto procesu je stabilizácia mechanických vlastností a tiež rozmerov výrobkov. Teplota ohrevu sa volí vyššia, ako je predpokladaná prevádzková teplota produktu. [2]
- Žihanie pre zníženie pnutia – zvyškové napätia sú spojené so spracovaním materiálu technológiami, ako je kovanie, zvarovanie, odlievanie, ale tiež v dôsledku tepelného spracovania, napr. pri kalení. Aj keď je ich účinok v niektorých prípadoch žiaduci (využitie zvyškových tlakových napätí technológiou brokovania pre predĺženie životného cyklu výrobku), prevláda snaha o ich odstránenie. Žihacia teplota má vplyv na stupeň uvoľnenia zvyškových napätí. U hliníkových zliatin je potrebné dbať na to, že pri vyšších teplotách môže nastať pokles pevnostných charakteristík. [4; 6]
- Homogenizačné žihanie – predstavuje neoddeliteľnú súčasť procesu spracovania mnohých hliníkových zliatin a býva zaradené ako ďalšia operácia po odlievaní. Prináša výhody pre ďalšie spracovanie a zlepšuje mechanické vlastnosti. K zníženiu alebo odstráneniu chemickej heterogenity dochádza difúznymi procesmi. Z tohto dôvodu je nutná vysoká teplota, ktorá býva blízka teplote solidusu. Potrebný je tiež dlhý čas výdrže na teplote, čo vedie k značnej energetickej náročnosti. Táto doba je závislá na parametroch ako chemické zloženie, štruktúra alebo veľkosť dielca. Príkladom využitia tejto tepelnej úpravy môže byť spracovanie predvalkov hliníkových zliatin, ktoré sú po odliatí, homogenizačne žihané, pretláčané za tepla a proces ukončuje umelé starnutie. Výskumy ukázali, že aj keď je materiál pri pretláčaní ohriaty na vyššiu teplotu, lepšie vlastnosti po starnutí vykazujú dielce z predvalkov podrobené homogenizačnému žihaniu v porovnaní s tými, u ktorých bol tento krok vynechaný. [16]

Okrem uvedených typov sa tiež využíva rozpúšťacie žihanie. Vzhľadom na to, že je súčasťou procesu precipitačného vytvrdzovania, bude toto rozobrané v nasledujúcej podkapitole.

## 2.2.2 Precipitačné vytvrdzovanie

Pevnostné vlastnosti hliníkových zliatin môžu byť zlepšené viacerými spôsobmi, napr. deformačným spevnením, keď je pevnosť zvýšená vplyvom porúch kryštalografickej mriežky alebo tepelným spracovaním, ktoré zahŕňa precipitačné vytvrdzovanie. Predpokladom pre materiál schopný precipitačného vytvrdzovania je, že z hľadiska rovnovážneho diagramu má výraznú zmenu rozpustnosti legujúceho prvku v závislosti na teplote (zníženie rozpustnosti s poklesom teploty). Aj keď tento predpoklad spĺňajú viaceré zliatiny hliníka, nedochádza u všetkých k významnému spevneniu. Hlavnými legujúcimi prvkami vytvrditeľných zliatin sú Cu, Li, Mg a Zn. Precipitačné vytvrdzovanie sa uskutočňuje v troch krokoch: rozpúšťacie žihanie, rýchle ochladzovanie a starnutie. Pribeh je zobrazený na obr. 5. [4]



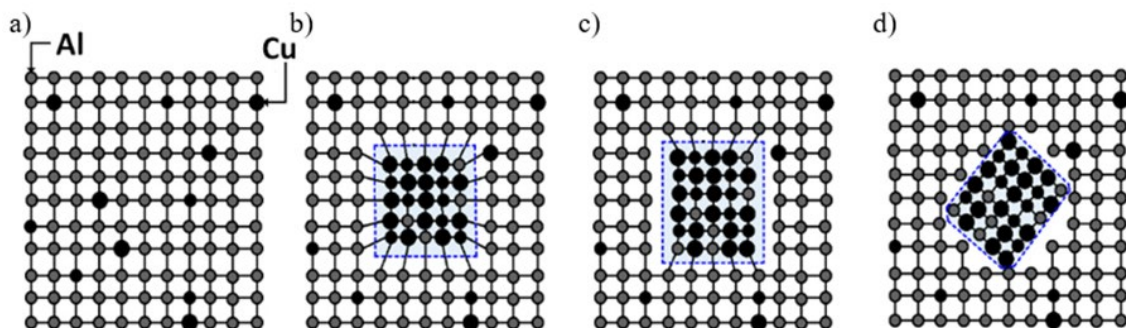
Obr. 5 Pribeh precipitačného vytvrdzovania pre zliatinu typu Al-Cu [17].

- Rozpúšťacie žihanie – spočíva v ohreve zliatiny na potrebnú teplotu a výdrži na tejto teplote tak dlho, aby došlo k prevodu vytvrdzovacích častíc (napr.  $\text{Al}_2\text{Cu}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ) do tuhého roztoku  $\alpha$  [2]. Rozpúšťacia teplota by pritom mala byť nižšia ako teplota solidusu tuhého roztoku  $\alpha$  a eutektická teplota. Prekročenie môže spôsobiť natavenie zŕn a zhrubnutie štruktúry, prípadne rozpustenie eutektických fáz, čo má za následok zhoršenie mechanických vlastností. Nižšia teplota môže rovnako spôsobiť, že sa nedosiahne predpokladaný účinok v dôsledku nedostatočného počtu vytvrdzovacích častíc, pozri tab. 1. [4]

Tab. 1 Vplyv teploty rozpúšťacieho žihania na mechanické vlastnosti po starnutí [4].

Materiál	Teplota rozpúšťacieho žihania [°C]	Medza pevnosti $R_m$ [MPa]	Medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]
EN AW-6061 – T6	493	301	272
	504	316	288
	516	333	305
	527	348	315
EN AW-2024 – T4	488	419	255
	491	422	259
	493	433	269
	496	441	271

- Rýchle ochladzovanie – v zahraničnej literatúre označované ako kalenie (angl. quenching), je kritickým krokom celého procesu. Cieľom je, aby stav, v ktorom je materiál pri vysokých teplotách (presýtený tuhý roztok), ostal zachovaný aj po ochladnutí a nedošlo k jeho rozpadu. K tomu musí byť dostatočne vysoká rýchlosť ochladzovania, ktorá sa označuje ako kritická alebo nadkritická. Vo všeobecnosti platí, že čím je vyššia, tým výhodnejšia kombinácia pevnosti a tuhosti je dosiahnutá [4]. Príliš pomalé ochladzovanie vedie k precipitácii vytvrdzovacích častíc na hraniciach zŕn, čím klesajú pevnostné vlastnosti. Vysoká rýchlosť ochladzovania so sebou však prináša aj negatíva vo forme zvyškového napätia. Toto sa v praxi rieši rôznymi spôsobmi, napr. plechy sa valcujú s malým odberom, profily sú napínané. Riadenie rýchlosti ochladzovania sa rieši vhodným výberom chladiaceho média a jeho teploty. [2]
- Starnutie – nastáva po rozpúšťacom žíhaní a dochádza pri ňom k rozpadu presýteného tuhého roztoku. V počiatku procesu prísadový prvok prostredníctvom difúzie prechádza do oblastí s vyšším obsahom tohto prvku, a tým vznikajú nové metastabilné fázy. Ich následný rast vytvára koherentné precipitáty (sú súčasťou mriežky), nazývané Guinier-Prestonove (GP) zóny, pozri obr. 6b. Rozdiel vo veľkosti atómov hliníka a prísady spôsobuje pnutie, ktoré má za následok zlepšenie pevnosti materiálu. Veľkosť, tvar a rozloženie GP zón sú do veľkej miery závislé na zložení zliatiny, napr. GP zóny guľovitého tvaru vznikajú, ak je rozdiel medzi atómami hliníka a prísady malý (zliatiny typu AlZn), GP zóny doskovitého tvaru vznikajú, ak je rozdiel veľký (zliatiny typu AlCu). GP zóny rastú a koherencia postupne zaniká, takže vznikajú metastabilné semikoherentné fázy, ktoré sú s tuhým roztokom spojené len čiastočne (obr. 6c). Efekt vytvrdzenia je však stále prítomný. Posledným štádiom starnutia je vytvorenie nekoherentných rovnovážnych fáz bez väzby na tuhý roztok (obr. 6d). K tomu dochádza, ak je zliatina vytvrdzovaná príliš dlhú dobu alebo pri príliš vysokej teplote. Tento stav vedie k poklesu pevnostných vlastností a je označovaný za prestarnutie. [6]



Obr. 6 Schematické zobrazenie procesu starnutia [18].

Starnutie môže prebiehať za izbovej teploty, keď je označované ako prirodzené, alebo zvýšenej teploty tzv. umelé. Prirodzené starnutie je možné len u niektorých typov zliatin. Napriek tomu sa aj u týchto niekedy používa umelé starnutie za účelom dosiahnutia vyššej pevnosti a tvrdosti. Všeobecne u vytvrditeľných hliníkových zliatin platí, že kinetika procesu starnutia môže byť urýchlená s rastúcou teplotou a tiež, že maximálne pevnostné vlastnosti sa dosahujú pri nižších teplotách umelého starnutia. [2; 4]

### 2.3 Zliatina EN AW-2024 – T3

Zliatina EN AW-2024 – T3 patrí medzi najznámejšie zliatiny série 2000. Stav T3 značí, že je spracovaná rozpúšťacím žíhaním, tvárnením za studena a následne prebehlo prirodzené starnutie. Materiál vykazuje dobrú tvárnosť, obrobitelnosť a odolnosť voči únavovému porušeniu. Hlavnými legujúcimi prvkami sú Cu a Mg, ktoré vytvárajú štruktúrne zložky  $\text{Al}_2\text{Cu}$  a  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  spôsobujúce spevnenie. Znížená korózna odolnosť v dôsledku prítomnosti Cu je

pre niektoré aplikácie riešená použitím plátovania. Chemické zloženie definované normou ČSN EN 573-3+A2: Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvárených výrobků – Část 3: Chemické složení a druhy výrobků; uvádza tab. 2. [2; 19; 20]

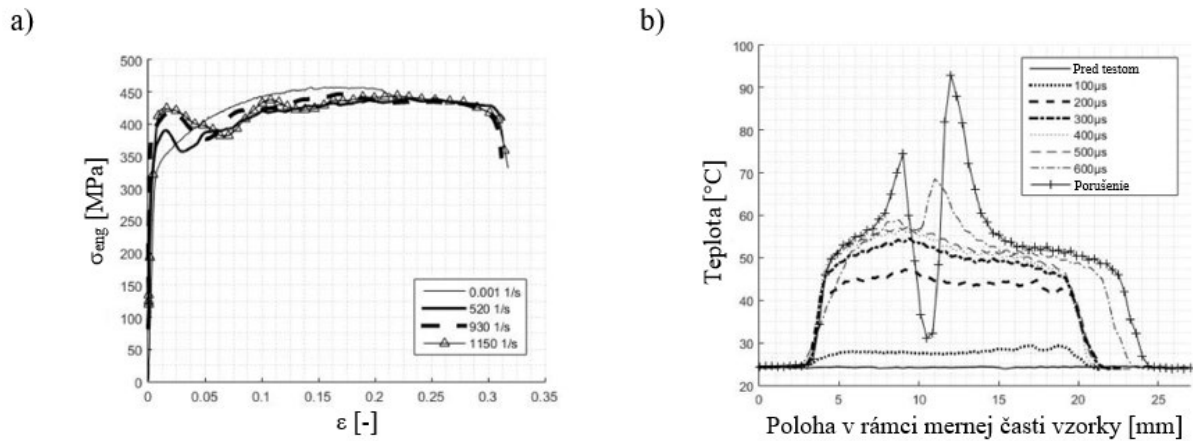
Tab. 2 Chemické zloženie zliatiny EN AW-2024 – T3 podľa normy ČSN EN 573-3+A2 (v hm. %) [20].

Prvok	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ti+Zr	Ostatné		Al
											Jednotlivo	Celkom	
min.	-	-	3,8	0,3	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-
max.	0,5	0,5	4,9	0,9	1,8	0,1	-	0,25	0,15	0,2	0,05	0,15	Zvyšok

Výhodná kombinácia vlastností predurčuje zliatinu EN AW-2024 – T3 na použitie v leteckom priemysle, napr. pre časti trupu (plášť, rámy), krídel alebo chvosta. Veľkou oblasťou použitia je tiež automobilový priemysel.

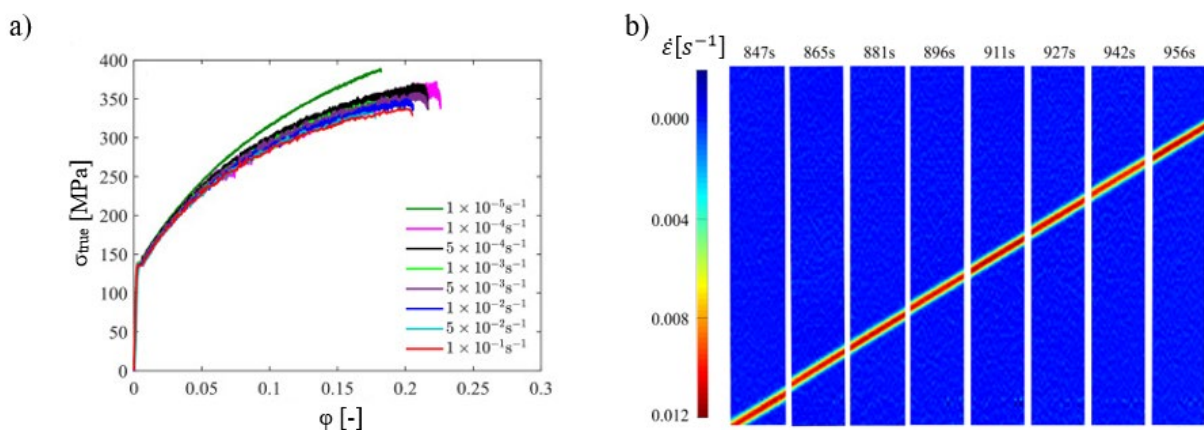
Z pohľadu spracovania a následného používania je dôležité poznať správanie materiálu pri zaťažení za rôznych podmienok, či ide o napät'ový stav, teplotu alebo rýchlosť deformácie. Vlastnosti sú ovplyvnené aj typom polotovaru a technológiou použitou pre jeho výrobu. Príkladom je valcovaný plech, ktorý v dôsledku spracovania môže vykazovať anizotropiu – odlišné vlastnosti v závislosti na smere zaťaženia. Objektom záujmu pri zisťovaní tvárniteľnosti sú často závislosti napätie-deformácia, z ktorých je možné určiť ukazovatele vplyvu jednotlivých činiteľov na správanie materiálu.

Zisťovaniu vplyvu rýchlosti deformácie a teploty na vlastnosti hliníkovej zliatiny EN AW-2024 – T3 vo vytvrdenom stave sa venovalo niekoľko autorov. Li [21], ktorý vykonal tlakové skúšky na vzorkách odobraných z dosky pri rýchlostiach deformácie 0,001; 10 a 3 500 s<sup>-1</sup> uvádza, že zliatina má malú pozitívnu citlivosť na rýchlosť deformácie (angl. positive strain rate sensitivity) – zvyšovanie rýchlosti deformácie sa prejavuje nárastom pevnosti materiálu. Porovnanie zmluvných závislostí napätie-deformácia, získaných pri najnižšej a najvyššej rýchlosti, ukázalo prírastok 8 % pri zmluvnej deformácii 0,05 a 3 % pri zmluvnej deformácii 0,2. Abotula [22] sa zameril na zisťovanie citlivosti na rýchlosť deformácie v rozsahu 0,006 až 10 857 s<sup>-1</sup> pri pôsobení tlakového napätia u vzoriek získaných z tyčového polotovaru. Pri vysokých rýchlostiach deformácie sa neprejavil vplyv skúmaného činiteľa. Napriek tomu sa u dynamických testov v porovnaní s kvazistatickými zvýšila medza klzu o 80 až 140 MPa a rovnako bol zistený posun k vyšším hodnotám v plastickej časti skutočnej závislosti napätie-deformácia o 50 až 70 MPa. Rodríguez-Martínez [23] podrobil vzorky odobrané z plechu ťahovému zaťaženiu a pôsobeniu rôznych teplôt a rýchlostí deformácie. Výsledky skúšok pri izbovej teplote pre rýchlosti deformácie v rozmedzí od 0,001 až 200 s<sup>-1</sup> vykazujú miernu pozitívnu citlivosť na rýchlosť deformácie. Okrem toho sa tiež zistilo, že v rámci teplotného rozsahu -50 až 100 °C mierne narastá spevnenie s poklesom teploty (vplyv teploty bol pozorovaný pri rýchlostiach deformácie 0,001 a 0,01 s<sup>-1</sup>). Shamchi [24] predstavil prácu venovanú skúšaniam vzoriek z plechu plátovaného čistým hliníkom. Ťahové testy prebiehali pri rýchlosti deformácie 0,001 až 1 150 s<sup>-1</sup> a teplotách v rozsahu od 24 do 350 °C pre kvazistatické podmienky a od 24 do 250 °C pre dynamické. Výsledky ukazujú výrazný vplyv teploty na mechanické vlastnosti vedúci až k potlačeniu mechanizmu spevnenia pri teplotách nad 300 °C. Okrem toho bola pozorovaná negatívna citlivosť na rýchlosť deformácie (angl. negative strain rate sensitivity – NSRS), tzn. zvyšovanie rýchlosti deformácie vedie k poklesu pevnosti materiálu, pozri obr. 7a.



Obr. 7 a) Zmluvné závislosti napätie-deformácia materiálu EN AW-2024 – T3 získané ťahovou skúškou pri teplote 24 °C a b) vývoj teploty v závislosti na polohe v rámci mernej časti vzorky počas experimentu pri rýchlosti deformácie 500 s<sup>-1</sup> [24].

NSRS je charakteristická pre viaceré hliníkové zliatiny. Toto správanie býva zvyčajne prejavom dynamického deformačného starnutia (angl. Dynamic Strain Aging – DSA) a/alebo tepelného odpevnenia. DSA sa okrem NSRS prejavuje aj Portevin-Le Chatelierovým (PLC) efektom, ktorý je možné pozorovať pri ťahovej skúške na závislosti napätie-deformácia, kde sú viditeľné opakované poklesy a nárasty napätia (angl. serrated flow), pozri obr. 8a, a tiež ako pohybujúce sa deformačné pásy na skúšobnom telese, pozri obr. 8b. Na zachytenie deformačných pásov sa využíva metóda Digital Image Correlation (DIC), ktorá umožňuje bezkontaktné meranie deformácií a posuvov. Metóda DIC bude bližšie popísaná v ďalšej kapitole. K tepelnému odpevneniu môže dôjsť kvôli adiabatickému nárastu teploty pri vysokých rýchlostiach deformácie. Veľká časť energie sa totiž pri deformácii materiálu mení na teplo a keďže proces je veľmi rýchly, toto teplo nemá čas sa rozptýliť do okolia, čo vedie k nárastu teploty. Shamchi [24] využil vysokorýchlostnú termokameru, pomocou ktorej pozoroval nárast adiabatického tepla pri ťahovej skúške za izbovej teploty a rýchlosti deformácie 500 s<sup>-1</sup>, pozri obr. 7b. Z výsledkov tejto analýzy vyvodzuje záver, že adiabatické teplo má za následok pokles pevnosti. [25; 26]



Obr. 8 a) Skutočné závislosti napätie-deformácia materiálu EN AW-5182 – O získané ťahovou skúškou pri teplote 24 °C a b) deformačné pásy pozorované na skúšobnom telese pomocou metódy DIC pri rýchlosti deformácie 10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup> [26].

Skúmaniu vplyvu anizotropie bolo taktiež venovaných niekoľko publikácií. Barlat [27] testoval vzorky z plechu s hrúbkou 0,3 mm, ktoré boli odobrané v smere 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° a 90° vzhľadom na smer valcovania. Ťahové skúšky pri izbovej teplote za kvazistatických podmienok zaťaženia ukázali, že mechanické vlastnosti materiálu sú anizotropné. Lesuer [28] skúmal vzorky odobrané z dosky s hrúbkou 4 mm pri tlakovom zaťažení a rýchlosti deformácie

4 000 s<sup>-1</sup> (orientácia vzoriek: 0°, 90° a smer kolmý na rovinu valcovania) a tiež pri ťahovom zaťažení a rýchlosti deformácie 8 000 s<sup>-1</sup> (orientácia vzoriek: 0°, 90°). Na základe výsledkov bolo konštatované, že materiál je izotropný pri oboch typoch zaťaženia. Mierna anizotropia bola naopak pozorovaná pri kvazistatických testoch u vzoriek odobraných v smere 0° a 90° v článku Shamchi [24].

Vzhľadom na to, že zliatina EN AW-2024 – T351 vykazuje podobné vlastnosti ako EN AW-2024 – T3, sú prínosné aj informácie o tomto stave [28]. Stav T351 označuje zliatinu, ktorá bola spracovaná rozpúšťacím žíhaním, následne bolo znížené pnutie vypínaním (plastická deformácia: 0,5 až 3 % pre plech, 1,5 až 3 % pre dosku, 1 až 3 % pre valcovanú alebo za studena dokončenú tyč, 1 až 5 % pre voľne kovaný alebo kruhový výkovok a valcovaný kruh) a prebehlo prirodzené starnutie [11]. Seidt [29] vytvoril komplexnú štúdiu vlastností zliatiny na vzorkách odobraných z dosky pri rýchlosti deformácie 0,00009 až 1 860 s<sup>-1</sup> pre ťah, 0,000098 až 10 900 s<sup>-1</sup> pre tlak a 0,00018 až 5 070 s<sup>-1</sup> pre zaťaženie krutom. Výsledky testov pri izbovej teplote ukazujú necitlivosť na rýchlosť deformácie pre všetky napäťové stavy do 5 000 s<sup>-1</sup>. Nad túto hodnotu dochádza k výraznejšiemu spevneniu. Ďalej bol skúmaný aj vplyv teploty v rozsahu -50 až 450 °C u všetkých napäťových stavov pri rýchlosti deformácie 1 s<sup>-1</sup>. Testy ukázali výrazný pokles pevnosti s rastúcou teplotou, pričom pri teplotách nad 300 °C bol potlačený mechanizmus spevnenia. Vyhodnotením ťahových a tlakových experimentov za izbovej teploty a rýchlosti deformácie 1 s<sup>-1</sup> bolo u vzoriek odobraných v smere 0°, 45°, 90° a -45° zistené, že materiál je anizotropný.

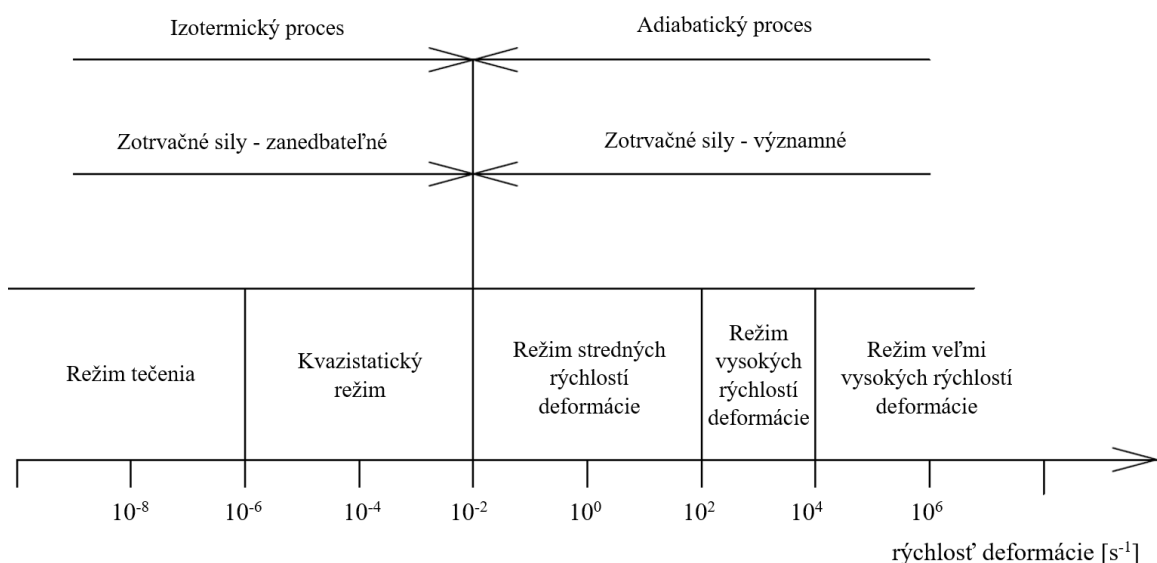
Záver vyšie prezentovaných publikácií nie sú jednoznačné, čo sa týka vplyvu rýchlosti deformácie na vlastnosti zliatiny EN AW-2024 – T3. Navyše sa zameriavajú najmä na skúmanie vytvrdeného stavu materiálu. Mechanické vlastnosti a tvárnosť, v stave bezprostredne po rozpúšťacom žíhaní a rýchlom ochladení, skôr než sa materiál výraznejšie spevní, nie sú dostatočne preskúmané.

### 3 ANALÝZA MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ

Skúšky materiálov sa z hľadiska rýchlosti deformácie, ktorú je možné dosiahnuť danou metódou, delia do piatich skupín (obr. 9) [30; 31; 32]:

- Režim tečenia (angl. creep) – skúšky zvyčajne prebiehajú za tepla na špecializovaných zariadeniach pri konštantnom zaťažení alebo napätí. V praxi k tomuto typu zaťaženia dochádza napr. u lopatiek rotoru prúdového motora, ktoré sa počas funkcie predlžujú.
- Kvazistatický režim – skúšky sú vykonávané na servohydraulických alebo elektrických zariadeniach. Tie sú zvyčajne univerzálne a je tak možné analyzovať vplyv rôznych napät'ových stavov. Výhoda týchto skúšobných metód spočíva predovšetkým v jednoduchom vyhodnotení materiálových charakteristík.
- Režim stredných rýchlostí deformácie – pri testovaní v tomto režime je možné použiť niektoré servohydraulické a elektrické zariadenia. Ďalej do tejto oblasti patria Charpyho test a Izod, ktoré sa využívajú na zistenie energie potrebnej k lomu skúšobnej vzorky, a tiež skúšky na padostroji (angl. drop tower test).
- Režim vysokých rýchlostí deformácie – pre dosiahnutie vysokých rýchlostí deformácie sa využíva Hopkinsonov a Taylorov test, ktoré čiastočne pokrývajú aj interval veľmi vysokých rýchlostí deformácie.
- Režim veľmi vysokých rýchlostí deformácie – takéto rýchlosti sa dosahujú napr. pri detonácii výbušniny, pričom dochádza k vytvoreniu rázových vln. Rázová vlna je charakteristická tým, že jej amplitúda je podstatne vyššia ako pevnosť materiálu. Pre skúmanie materiálových vlastností v tomto režime sa využíva ráz dosiek (angl. plate impact test).

Testovanie pri rýchlosti deformácie nad približne  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  sa stáva zložitejším kvôli výraznejším prejavom zotrvačných síl a šíreniu napät'ových vln. Pri meraní na univerzálnych skúšobných zariadeniach to vedie k vibráciám (angl. ringing effect), čo má vplyv na presnosť výsledkov. Z hľadiska testovaného materiálu je navyše potrebné zohľadniť adiabatický ohrev. Pre tvárnenie majú najväčší význam testovacie metódy dosahujúce rýchlosť deformácie v intervale od  $10^{-5}$  (superplastické tvárnenie) do  $10^4 \text{ s}^{-1}$  (elektromagnetické tvárnenie, hydroforming). Nasledujúce podkapitoly sa preto venujú skúškam pri zaťažení ťahom a tlakom v kvazistatickom režime a v režime stredných rýchlostí deformácie a dynamickým testom podľa Hopkinsona a Taylora, ktoré pokrývajú takmer celý tento rozsah a poskytujú informácie pre vyhodnotenie mechanických vlastností a tvárniteľnosti materiálu. [30]



Obr. 9 Rozdelenie skúšobných metód materiálov z hľadiska rýchlosti deformácie [30; 32].

### 3.1 Ťahová skúška

Ťahová skúška sa riadi normami ČSN EN ISO 6892-1 Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty, ČSN EN ISO 6892-2 Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 2: Zkušební metoda za zvýšené teploty a ČSN EN ISO 6892-3 Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 3: Zkušební metoda za nízké teploty. Princíp spočíva v pôsobení jednoosového ťahového zaťaženia na skúšobné teleso, pričom sa meria jeho deformácia a aplikovaná sila. Skúšobné teleso je tvorené mernou časťou a upínacími koncami a najčastejšie má kruhový, obdĺžnikový, štvorcový alebo prstencový prierez. Odporúčané rozmery definujú príslušné normy. Skúška zvyčajne prebieha do lomu a po jej ukončení sú vyhodnotené zmluvné a skutočné závislosti napätie-deformácia a ďalšie charakteristiky, ktoré je možné využiť pre vyhodnotenie správania materiálu pri zaťažovaní [33; 34; 35].

Hodnoty napätia a deformácie pre zmluvný ťahový diagram sa počítajú vzťahmi [31]:

$$\sigma_{eng} = \frac{P}{S_0}, \quad (3.1)$$

kde:  $\sigma_{eng}$  – zmluvné napätie (angl. engineering stress) [MPa],  
 $P$  – okamžité aplikované zaťaženie [N],  
 $S_0$  – počiatočný prierez vzorky v mernej časti [mm<sup>2</sup>].

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}, \quad (3.2)$$

kde:  $\varepsilon$  – zmluvná deformácia (angl. engineering strain) [-],  
 $L$  – okamžitá dĺžka mernej časti vzorky [mm],  
 $L_0$  – počiatočná merná dĺžka [mm].

Na základe zmluvného diagramu sa vyhodnocujú napät'ové charakteristiky – medza klzu, resp. zmluvná medza klzu  $R_{p0,2}$  a medza pevnosti  $R_m$ , a deformačné charakteristiky – ťažnosť a zúženie.

Rýchlosť deformácie sa počíta podľa vzťahu [31]:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{L_0}, \quad (3.3)$$

kde:  $\dot{\varepsilon}$  – rýchlosť deformácie [s<sup>-1</sup>],  
 $v$  – rýchlosť pohybu priečnika [mm·s<sup>-1</sup>].

Keďže rýchlosť deformácie spoločne s teplotou významne ovplyvňujú materiál'ové vlastnosti, je vhodné ich uvádzať v popise diagramu. V literatúre sa rýchlosť deformácie vypočítaná podľa vzťahu (3.3) označuje aj ako zmluvná (angl. engineering strain rate).

Zmluvné napätie  $\sigma_{eng}$  počíta s okamžitým zaťažením pôsobiacim na počiatočný prierez vzorky v mernej časti  $S_0$ . Pri skúške sa ale prierez pri zaťažovaní znižuje a reálnemu stavu lepšie odpovedá skutočné napätie [31]:

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng} \cdot (1 + \varepsilon), \quad (3.4)$$

kde:  $\sigma_{true}$  – skutočné napätie (angl. true stress) [MPa].

Skutočná deformácia sa na základe zmluvnej deformácie prepočítava nasledovne [31]:

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon), \quad (3.5)$$

kde:  $\varphi$  – skutočná deformácia (angl. true strain) [-].

Odklon skutočnej závislosti od zmluvnej nastáva za medzou klzu, pričom skutočné napätie dosahuje vyššie hodnoty vzhľadom na zužujúci sa prierez. Deformácia mernej časti vzorky je homogénna do vzniku krčku, čo odpovedá okamžiku, keď je dosiahnuté maximálne zaťaženie. Pri ďalšom zaťažovaní je deformácia takmer výlučne sústredená do miesta krčku a súčasne sa jednoosový napätový stav mení na trojosový. Vzťahy (3.4) a (3.5) sú preto relevantné len v oblasti homogénnej deformácie. Za touto oblasťou treba teda počítať skutočné napätie a deformáciu na základe okamžitých rozmerov [31; 36]:

$$\sigma_{true} = \frac{P}{S_i}, \quad (3.6)$$

kde:  $S_i$  – okamžitý prierez [mm<sup>2</sup>].

$$\varphi = \ln\left(\frac{S_0}{S_i}\right). \quad (3.7)$$

Skutočná rýchlosť deformácie sa počíta nasledovne [31]:

$$\dot{\varphi} = \frac{\dot{\varepsilon}}{1 + \varepsilon}, \quad (3.8)$$

kde:  $\dot{\varphi}$  – skutočná rýchlosť deformácie (angl. true strain rate) [s<sup>-1</sup>].

Zo vzťahu (3.8) vyplýva, že ak je rýchlosť deformácie počas experimentu konštantná, skutočná rýchlosť deformácie sa mení s deformáciou, čo platí aj naopak. Vo väčšine prípadov sa závislosti napätie-deformácia získavajú za podmienok konštantnej rýchlosti deformácie a aj skutočné diagramy sú prezentované v kontexte s hodnotou podľa (3.3). Z hľadiska presnosti výsledkov bolo v článku [37] zistené, že to, či bola skúška vykonaná pri konštantnej hodnote rýchlosti deformácie alebo skutočnej rýchlosti deformácie, nemá významný vplyv.

Dôležitým ukazovateľom tvárnosti materiálu je exponent deformačného spevnenia  $n$ , ktorý teoreticky odpovedá skutočnej deformácii pri vzniku krčka, resp. maximálnom zaťažení [36]. Vyššie hodnoty  $n$  značia lepšiu tvárnosť. Jednou z možností jeho zistenia je určenie smernice závislosti  $\ln(\sigma_{true})-\ln(\varphi)$  vykreslenej od medze klzu po maximálne zaťaženie.

Lankfordov koeficient je ďalším ukazovateľom tvárnosti, ktorý sa získava vyhodnotením ťahovej skúšky [36]:

$$r = \frac{\varphi_{wpl}}{\varphi_{tpl}}, \quad (3.9)$$

kde:  $r$  – Lankfordov koeficient [-],

$\varphi_{wpl}$  – skutočná plastická deformácia v smere šírky vzorky [-],

$\varphi_{tpl}$  – skutočná plastická deformácia v smere hrúbky vzorky [-].

Keďže presné meranie hrúbky vzorky je náročné, často sa počíta  $\varphi_{tpl}$  na základe zákona zachovania objemu. Pre posúdenie anizotropie sú vzorky odoberané vo viacerých smeroch vzhľadom na smer valcovania (najčastejšie 0°, 45° a 90°).

Ak  $r < 1$ , prevláda pri zaťažení deformácia v smere hrúbky. Z pohľadu tvárnenia je však žiaduce, aby hodnota  $r$  bola vyššia, čo značí zvýšenú odolnosť voči stenčovaniu. U komerčne vyrábaných titánových plechov býva Lankfordov koeficient 3 až 7 [36]. Pre hliníkové zliatiny sa zvyčajne pohybuje okolo hodnoty 1 [38].

### 3.2 Tlaková skúška

Odozva materiálu na tlakové zaťaženie sa získava zo zmluvnej a skutočnej závislosti napätie-deformácia vyhodnotených z merania deformácie vzorky a aplikovanej sily v priebehu experimentu. Výsledky nachádzajú využitie pri analýze procesov, pri ktorých dochádza k deformácii v dôsledku tlakového zaťaženia, napr. kovanie alebo valcovanie. Vo väčšine prípadov sa používa skúšobné teleso tvaru valca. Aj keď pri teste nie sú problémy spojené so vznikom krčka ako pri ťahovej skúške, treba predpokladať možnú stratu vzpernej stability vzorky a vplyv trenia na stykových plochách. Tieto sprievodné javy spôsobujú nerovnomerné rozloženie napätia a deformácie a majú za následok zníženie presnosti výsledkov. Najjednoduchšie riešenie predstavuje vhodná voľba rozmerov vzorky a použitie maziva. Podľa zdroja [31] by mal byť pomer počiatkovej dĺžky k priemeru menší ako 2, ale veľmi často sa využíva pomer rovný hodnote 1. [31; 39]

Zmluvné hodnoty napätia, deformácie a rýchlosti deformácie sa vyhodnocujú nasledovne [31]:

$$\sigma_{eng} = \frac{P}{S_0}. \quad (3.10)$$

$$\varepsilon = \frac{L_0 - L}{L_0}. \quad (3.11)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{L_0}. \quad (3.12)$$

Vzťahy pre výpočet skutočného napätia, deformácie a rýchlosti deformácie je možné prepočítať podľa zmluvných veličín [37]:

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng} \cdot (1 - \varepsilon). \quad (3.13)$$

$$\varphi = -\ln(1 - \varepsilon). \quad (3.14)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{\dot{\varepsilon}}{1 - \varepsilon}. \quad (3.15)$$

Výsledky tlakovej skúšky taktiež umožňujú vyhodnotenie ukazovateľov tvárnosti  $n$  a  $r$ , kde sa využíva rovnaký princíp, aký je uvedený v predošlej podkapitole 3.1. V článku [40] boli Lankfordove koeficienty vypočítané na základe tlakovej skúšky vzoriek štvorcového prierezu odobraných v smere  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $90^\circ$  voči smeru valcovania. Výsledky boli použité pre vytvorenie materiálového modelu numerickej simulácie procesu objemového tvárnenia ozubeného kola, pričom polotovarom bol plech.

### 3.3 Hopkinsonov test

Základy Hopkinsonovho testu boli položené v roku 1872 J. Hopkinsonom, ktorý skúmal vplyv napätových vln na železný drôt. Ďalšími priekopníkmi v tomto smere boli jeho syn B. Hopkinson, R. M. Davis a H. Kolsky. Práve H. Kolsky v roku 1949 predstavil skúšobnú metódu pre skúmanie vlastností materiálov pri dynamickom tlakovom zaťažení (angl. Split Hopkinson Pressure Bar – SHPB), ktorej výstupom je závislosť napätie-deformácia. Zariadenie pre SHPB sa s menšími úpravami používa aj dnes a vďaka rapídneho vývoju sa navrhnutá metodika aplikuje aj pre skúmanie materiálov pri pôsobení ďalších napätových stavov v širokom rozsahu rýchlostí deformácie (zvyčajne  $10^2$  až  $10^4$  s<sup>-1</sup>) a tiež teplôt [41].

Základným a konštrukčne najjednoduchším variantom je SHPB zobrazený na obr. 10. Impaktor, merné tyče a vzorka sú uložené súsovo, čo je zabezpečené vodiacimi prvkami. Urýchlením impaktora a jeho dopadom na čelo vstupnej mernej tyče vzniká napätový tlakový pulz (iniciačný pulz), ktorý sa šíri zostavou rýchlosťou danou vzťahom [41]:

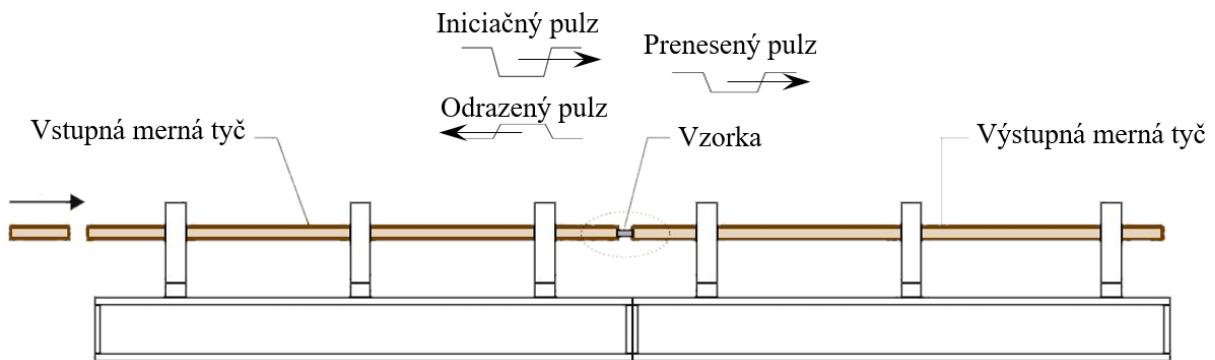
$$c_B = \sqrt{\frac{E_B}{\rho_B}}, \quad (3.16)$$

kde:  $c_B$  – rýchlosť šírenia elastickej vlny v materiáli merných tyčí [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],

$E_B$  – modul pružnosti v ťahu materiálu merných tyčí [Pa],

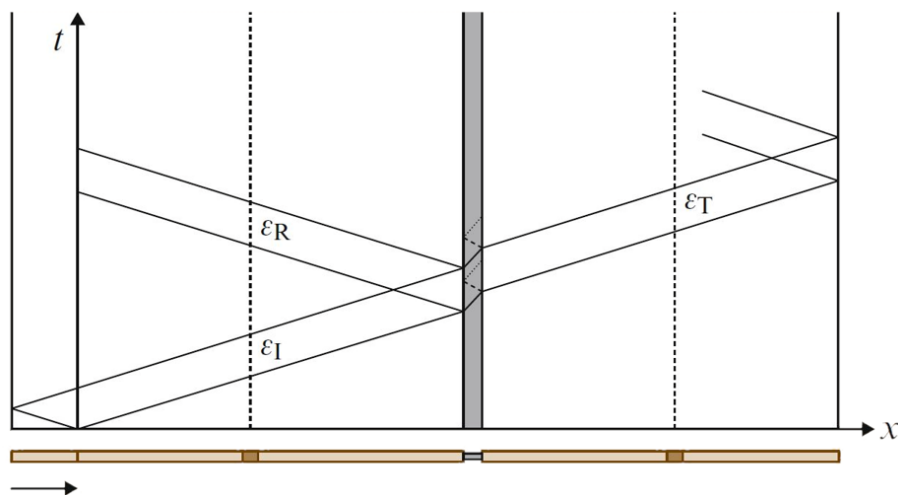
$\rho_B$  – hustota materiálu merných tyčí [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ].

Hneď ako dosiahne iniciačný pulz rozhranie vstupnej mernej tyče a vzorky, je v dôsledku rozdielnych mechanických impedancií materiálov jeho časť odrazená naspäť s ťahovým charakterom (odrazený pulz) a zvyšok prechádza ďalej vzorkou do výstupnej mernej tyče (prenesený pulz). Napät'ové pulzy spôsobujú elasticnú deformáciu merných tyčí zaznamenávanú meracím príslušenstvom. Získané hodnoty sú následne použité pre vyhodnotenie odozvy skúmaného materiálu na dynamické zaťaženie.



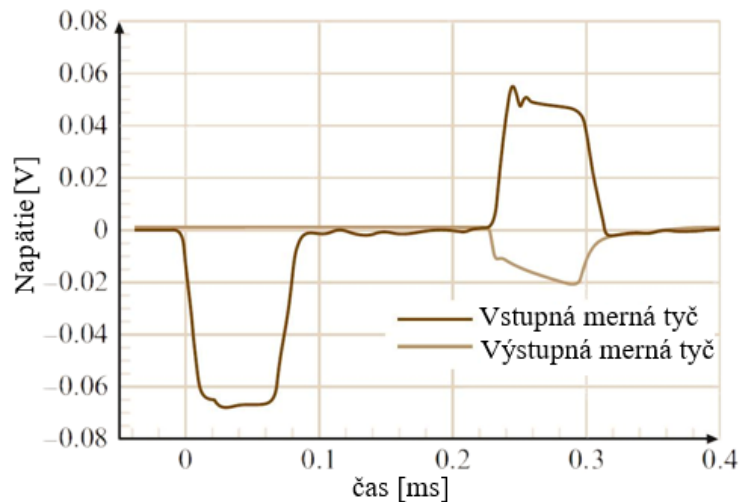
Obr. 10 Schéma zariadenia SHPB [30].

Šírenie napät'ových pulzov mernými tyčami sa zobrazuje pomocou tzv. Lagrangeovho diagramu (obr. 11). Čas  $t = 0$  odpovedá okamžiku dopadu impaktora.



Obr. 11 Diagram čas-poloha zobrazujúci šírenie napät'ových pulzov v merných tyčoch [30].

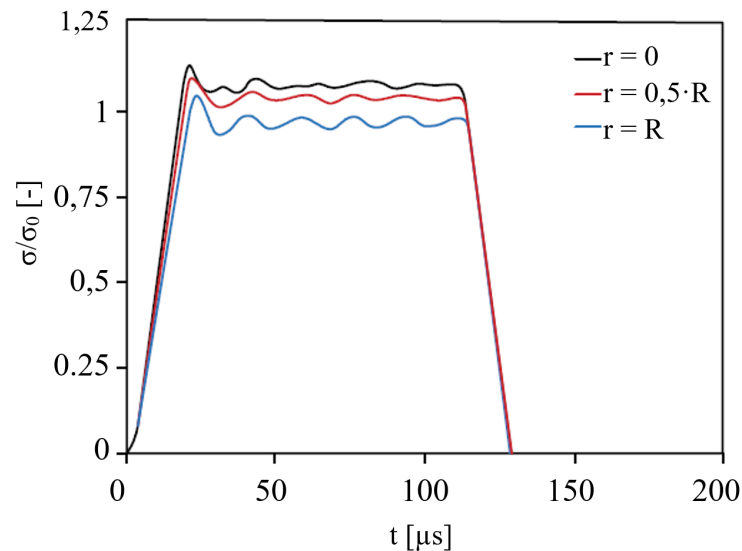
Príklad záznamu napät'ových pulzov počas SHPB je zobrazený na obr. 12. Pokiaľ sú splnené základné predpoklady Hopkinsonovho testu, ktoré budú popísané neskôr v rámci tejto kapitoly, tak prenesený pulz tvarovo odpovedá zmluvnej závislosti napätie-deformácia, zatiaľ čo odrazený pulz má tvar závislosti rýchlosť deformácie-zmluvná deformácia.



Obr. 12 Záznam napät'ových pulzov nameraných počas testu SHPB [30].

Napriek tomu, že neexistuje jednotný koncept pre SHPB, prevládajú zariadenia tvorené urýchľovacou jednotkou, impaktorom, vstupnou a výstupnou mernou tyčou, tlmiacim systémom, vodiacimi prvkami a meracím príslušenstvom:

- Urýchľovacia jednotka – vo väčšina prípadov býva použitý pneumatický kanón (angl. gas gun), ktorý vytvára a akumuluje stlačený vzduch. Ten je následne uvoľnený vo veľmi krátkom čase, čím sa získa energia potrebná pre urýchlenie impaktora. Okrem tohto sú však známe aj ďalšie varianty využívajúce pružiny alebo hydraulické systémy, keď je impaktor nahradený hydraulickým piestom, čo sa využíva napr. v literatúre [42].
- Impaktor – zvyčajne býva vyrobený z rovnakého materiálu ako merné tyče a má s nimi zhodný priemer. Medzi dĺžkou impaktora  $L_{St}$  a veľkosťou deformácie vzorky, ktorá závisí na dĺžke napät'ového pulzu, je priama úmera. Rovnaká závislosť platí aj pre dopadovú rýchlosť a jej vplyv na amplitúdu iniciačného pulzu. Okrem toho je dopadová rýchlosť jeden z parametrov, ktorými je možné meniť rýchlosť deformácie vzorky. [41]
- Merné tyče – dôležitým parametrom pri voľbe materiálu merných tyčí je medza klzu, ktorá nesmie byť prekročená v dôsledku nárazu impaktora a šírenia napät'ových pulzov. Výber ovplyvňuje aj typ materiálu vzorky. Mäkké materiály totiž vykazujú nižšiu amplitúdu preneseného pulzu (výrazne nižšia hodnota mechanickej impedancie vzorky oproti materiálu merných tyčí vedie k tomu, že iniciačný pulz sa na konci tyče takmer úplne odrazí), čo zhoršuje presnosť merania. Pre takéto prípady je vhodné použiť merné tyče s nižšou tuhosťou, napríklad z hliníkových, titánových alebo horčíkových zliatin, zmenšiť ich prierez alebo skombinovať oba varianty [43]. Priemer merných tyčí  $D_B$  býva zvyčajne 10 až 25 mm. V niektorých prípadoch je nutné použiť väčší, napr. pre testovanie betónu alebo kompozitných materiálov, keď musí byť objem vzorky dost' veľký na to, aby bol reprezentatívny. Opačným extrém predstavujú zmenšené zariadenia, ktoré sú používané napr. pre testovanie vlákien. Z hľadiska dĺžky merných tyčí  $L_B$  sa v [41] uvádza, že minimálna veľkosť  $L_{Bmin} \cong 20 \cdot D_B$ . To súvisí s amplitúdou osového napätia pulzu, ktorá sa v priereze mení – maximum v strede tyče, minimum na povrchu, pozri obr. 13. Šírením pulzu ale dochádza k vyrovnaniu amplitúd. Deformácia by preto mala byť meraná od koncov mernej tyče vo vzdialenosti väčšej ako  $10 \cdot D_B$ , z čoho je stanovená spomínaná hodnota  $L_{Bmin}$ . Zároveň musí byť splnená podmienka  $L_B > 2 \cdot L_{St}$ , aby nedochádzalo k prekryvaniu (superpozícii) pulzov. [41]

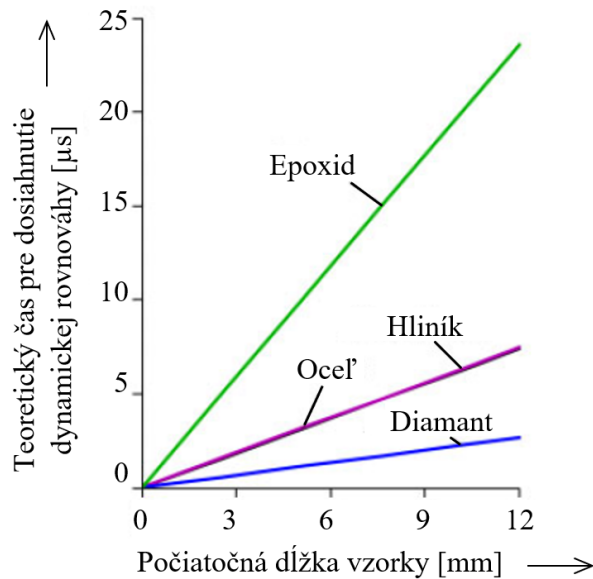


Obr. 13 Nerovnomerné rozloženie osového napätia v priereze mernej tyče s priemerom 37 mm merané vo vzdialenosti rovnej polovici priemeru tyče od jej konca [41].

- Vodiace prvky – musia umožňovať voľný pohyb merných tyčí a súčasne zabezpečiť súosovosť zostavy. Vodiace prípravky obsahujú vložky s dobrými klznými vlastnosťami alebo lineárne ložiská. Pridaním maziva je možné účinok trenia ešte viac znížiť.
- Meracie príslušenstvo – využíva sa pre získanie rýchlosti dopadu impaktora, zmeranie elastickej deformácie merných tyčí alebo aj deformácie vzorky. Rýchlosť dopadu sa meria pomocou laserového meracieho systému alebo s využitím optických závor. Pre meranie deformácií merných tyčí sa vo väčšine prípadov používajú tenzometre zapojené do Wheatstoneovho mosta. Alternatívou sú tiež prstencové kapacitné snímače. Deformáciu vzorky je možné vypočítať na základe zmeraných napät'ových pulzov, ktoré spôsobili elasticú deformáciu merných tyčí. Presnejšie výsledky sa získavajú s použitím vysokorýchlostnej kamery a následným spracovaním snímok metódou DIC.

Pri SHPB treba čo najskôr dosiahnuť dynamickú rovnováhu síl (rovnaká veľkosť síl pôsobiacich na vzorku od vstupnej a výstupnej mernej tyče), čo je možné ovplyvniť vhodnými rozmermi vzorky. Okrem toho je dôležité pri návrhu rozmerov zohľadniť aj ďalšie špecifiká experimentu. Priemer vzorky  $D_0$  sa volí s ohľadom na priemer merných tyčí  $D_B$  a ich materiál. Z hľadiska materiálu je potrebné stanoviť maximálny priemer vzorky  $D_{Smax}$  tak, aby nedošlo k prekročeniu medze klzu tyčí. Dĺžka vzorky  $L_0$  má vplyv na rýchlosť deformácie a tiež čas potrebný pre dosiahnutie dynamickej rovnováhy síl. Všeobecne je možné uviesť, že pre vzorky s nižšou hodnotou pomeru  $L_0/D_0$  platí nasledujúce [41; 44]:

- Pri rovnakých podmienkach experimentu umožňujú dosiahnuť vyššiu rýchlosť deformácie.
- Vplyv zotrvačnosti je potlačený.
- Účinok trenia môže byť výraznejší, čím sa materiál dostáva do stavu viacosovej napätosti a vykazuje vyššiu pevnosť. Na plochy vzorky, ktoré sú v kontakte s mernými tyčami sa zvyčajne nanáša mazivo pre zníženie trenia.
- Dynamická rovnováha síl, ktorá má vplyv na rovnomernú deformáciu, je dosiahnutá v kratšom čase. Súčasne platí, že materiály s nižšou tuhosťou dosahujú rovnovážny stav neskôr, pozri obr. 14, preto je u nich vhodné voliť menší pomer  $L_0/D_0$ .



Obr. 14 Teoretický čas potrebný pre dosiahnutie dynamickej silovej rovnováhy v závislosti na dĺžke valcovej vzorky pre SHPB [44].

Z vyššie uvedeného vyplýva, že pokiaľ má byť potlačený efekt trenia zmenou rozmerov vzorky, zvýši sa tým vplyv zotrvačnosti. Gama [43] preto navrhuje pomer  $L_0/D_0$ , ktorý predstavuje kompromis medzi týmito vplyvmi a mal by byť v rozsahu 0,5 až 1. Súčasne uvádza, že na potlačenie oboch vplyvov by mal byť dodržaný pomer  $D_0/D_B \cong 0,8$ .

Hopkinsonov test je komplexný proces, čo vyplýva aj z popisu základných komponentov zariadenia a vzorky. Okrem spomínaných problémov s vplyvmi trenia a zotrvačnosti pri návrhu experimentu treba myslieť aj na oscilácie, pozri obr. 13, ktoré sú výsledkom vlnovej disperzie. Tlakový pulz spôsobený nárazom impaktora má za následok deformáciu v osovom a súčasne radiálnom smere. Zotrvačné radiálne napätie potom podľa rovnakej zákonitosti dodatočne ovplyvňuje napätie v axiálnom smere, čo vedie k disperzii vln. Tento efekt sa šírením pulzu stupňuje a stáva sa výraznejším pre merné tyče s väčším priemerom. Skúmanie vlnových disperzií sa nezávisle na sebe venovali Pochhammer [45] a Chree [46], ktorí zistili, že rýchlosť šírenia napät'ovej vlny klesá pre nižšie hodnoty vlnovej dĺžky. To zároveň znamená, že vysokofrekvenčné napät'ové vlny sa pohybujú pomalšie, než tie s nižšou frekvenciou. Keďže napät'ové pulzy pri Hopkinsonovom teste sú zložené z vln s rôznymi frekvenciami, vedie to k nepresnosti merania. Problémy s osciláciami sa často riešia použitím malého kusa materiálu (zvyčajne meď, mosadz, hliník, ...) vo forme valca s malou výškou (angl. pulse shaper), ktorý je prichytený na čelo vstupnej mernej tyče. Jeho funkcia spočíva v odfiltrovaní vysokofrekvenčných komponentov iniciačného pulzu plasticou deformáciou. Použitie taktiež predlžuje trvanie počiatočnej rastúcej fáze pulzu, ktorá je dôležitá pre dosiahnutie dynamickej rovnováhy síl vzorky. Vhodne zvolený pulse shaper navyše prispieva k dosiahnutiu konštantnej rýchlosti deformácie, čo je ďalší z predpokladov testu. [41]

### 3.3.1 Vyhodnotenie testu

Vzťahy vedúce k stanoveniu zmluvnej deformácie, zmluvného napätia a rýchlosti deformácie vzorky sú založené na teórii jednodimenzionálneho šírenia napät'ových vln. Predpokladá sa pritom, že zaznamenané napät'ové pulzy sú bez disperzií, takže hodnoty v mieste merania sú zhodné s tými, ktoré sú na rozhraniach vzorka-vstupná merná tyč a vzorka-výstupná merná tyč. V praxi to znamená, že merné tyče musia byť rovné, homogénne a izotropné. Z hľadiska vzorky treba splniť predpoklad stavu dynamickej silovej rovnováhy počas zaťažovania. Výsledky navyše významne ovplyvňuje správne stanovenie počiatku jednotlivých pulzov.

Vzhľadom na to, že merné tyče sú namáhané len elasticky, je možné využiť Hookov zákon pre výpočet síl  $F_1$  a  $F_2$  pôsobiacich na vzorku [41]:

$$F_1 = E_B \cdot S_B \cdot (\varepsilon_i + \varepsilon_r), \quad (3.17)$$

kde:  $F_1$  – sila pôsobiaca na vzorku od vstupnej mernej tyče [N],  
 $S_B$  – prierez mernej tyče [mm<sup>2</sup>],  
 $\varepsilon_i$  – zmluvná deformácia spôsobená iniciačným pulzom [-],  
 $\varepsilon_r$  – zmluvná deformácia spôsobená odrazeným pulzom [-].

$$F_2 = E_B \cdot S_B \cdot \varepsilon_t, \quad (3.18)$$

kde:  $F_2$  – sila pôsobiaca na vzorku od výstupnej mernej tyče [N],  
 $\varepsilon_t$  – zmluvná deformácia spôsobená preneseným pulzom [-].

Zmluvné napätie je kvôli novej možnej nedokonalnej dynamickej silovej rovnováhe počítané ako priemer hodnôt [41]:

$$\sigma_{eng} = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_1 + F_2}{S_0} = \frac{1}{2} \cdot \frac{S_B}{S_0} \cdot E_B \cdot (\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t), \quad (3.19)$$

Rýchlosť deformácie vzorky sa spočíta na základe [41]:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{c_B \cdot (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t)}{L_0}. \quad (3.20)$$

Zmluvnú deformáciu je možné získať integráciou vzťahu (3.20) podľa času  $t$  [41]:

$$\varepsilon = \int_0^t \frac{c_B \cdot (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t)}{L_0} dt. \quad (3.21)$$

Ak je dosiahnutá dynamická silová rovnováha,  $F_1 = F_2$ , platí, že [41]:

$$\varepsilon_i + \varepsilon_r = \varepsilon_t. \quad (3.22)$$

Za tohto predpokladu sú vzťahy (3.19), (3.20) a (3.21) upravené nasledujúcim spôsobom [41]:

$$\sigma_{eng} = \frac{S_B}{S_0} \cdot E_B \cdot \varepsilon_t, \quad (3.23)$$

$$\dot{\varepsilon} = -2 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{c_B}{L_0}, \quad (3.24)$$

$$\varepsilon = -2 \cdot \frac{c_B}{L_0} \int_0^t \varepsilon_r dt. \quad (3.25)$$

Prepočet zmluvných hodnôt napätia a deformácie na skutočné je rovnaký ako u konvenčných skúšok, pozri podkapitoly 3.1 a 3.2. Obdobný postup vyhodnotenia SHPB sa potom využíva aj pri ostatných modifikáciách Hopkinsonovho testu pre ďalšie napät'ové stavy, ktorým sa venuje nasledujúca podkapitola.

### 3.3.2 Modifikácie experimentálneho zariadenia pre testovanie v ťahu

Pre komplexnú analýzu dynamického správania materiálu je dôležité poznať vplyv rôznych napätových stavov. Za týmto účelom boli vyvinuté modifikácie Hopkinsonovho testu, ktoré umožňujú skúmanie pri zaťažení v ťahu (angl. Split Hopkinson Tensile Bar – SHTB), strihu, krute, dvojsose ťahu, či ďalších kombináciách namáhania. Vytvorenie ťahového zaťaženia u vzorky si vyžaduje zložitejšiu konštrukciu v porovnaní so SHPB. Existuje však množstvo variantov, ktoré priamo alebo nepriamo vyvolajú iniciačný ťahový pulz.

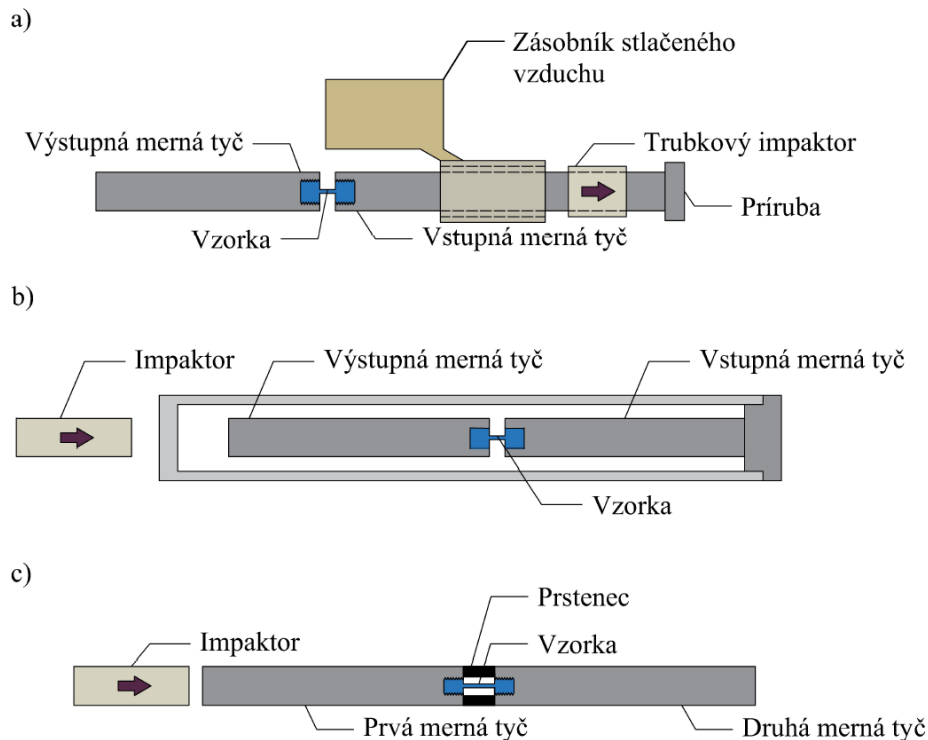
Zariadenie využívajúce trubkový impaktor, ktorý sa voľne pohybuje po vstupnej mernej tyči (obr. 15a), patrí k najpoužívanejším. Iniciačný ťahový pulz je vyvolaný priamo, dopadom na prírubu spojenú s vstupnou mernou tyčou. Pre zníženie oscilácií je možné aplikovať pulse shaper na plochu príruby alebo sa používa impaktor vyrobený z plastu. [41]

Ďalšou alternatívou je zariadenie, ktoré bolo predstavené Hardingom [47] a použité pre testovanie jednosmerne vystuženého uhlíkovo-epoxidového kompozitu. Merné tyče a vzorka sú umiestnené v trubke, pozri obr. 15b. Dopadom impaktora na zaslepené čelo trubky dochádza k nepriamemu vyvolaniu ťahového iniciačného pulzu. Výhodou je možnosť použitia základne pre SHPB. Problematickým sa však stáva prístup k tenzometrom a tiež možnosť použitia systému pre testovanie za vyšších teplôt alebo vysokorýchlostnej kamery. Podobný koncept bol použitý v [48] pre skúmanie grafitovo-epoxidového laminátu.

Konštrukčne najjednoduchším je zariadenie prezentované Nicholasom v [49], ktoré pre nepriame vytvorenie ťahového pulzu využíva prstenec umiestnený medzi mernými tyčami (obr. 15c). Nárazom impaktora je vytvorený tlakový pulz, ktorý sa šíri prvou mernou tyčou cez prstenec do druhej mernej tyče. Na konci zostavy sa odrazí a s ťahovým charakterom sa šíri smerom k vzorke. Prstenec je z rovnakého materiálu ako merné tyče a má rovnaký vonkajší priemer. Vnútorňý priemer aj dĺžka sa volia podľa rozmerov vzorky. Rozdiel mechanických impedancií (spôsobený rozdielnymi plochami merných tyčí a prstenca) na rozhraní prvá merná tyč-prstenec spôsobí čiastočný odraz vlny. Aby tento odrazený pulz neovplyvnil meranie v dôsledku interakcie s pulzami potrebnými pre vyhodnotenie, musí mať prvá merná tyč dvojnásobnú dĺžku ako druhá merná tyč. Z tohto dôvodu je tiež dôležité vhodne zvoliť miesto merania. Výhodou zariadenia je možnosť použitia základne pre SHPB. Nevýhodou je zložitejšie meranie pri vyšších teplotách. Zariadenie použil Sarva [50] pre dynamické ťahové skúšky polykarbonátu, pričom prstenec upravil tak, aby bolo možné meranie deformácií pomocou vysokorýchlostnej kamery. V [51] sa využíva koncept pre analýzu dynamických vlastností hliníkovej zliatiny EN AW-5052 – H32.

Zariadenia pre SHTB spravidla umožňujú s menšími úpravami testovanie vzoriek s kruhovým prierezom upínaných pomocou závitů a tiež plochých vzoriek. Pri druhom type je upnutie možné riešiť lepením, príp. kolíkmi, ktoré prechádzajú otvormi v merných tyčiach a upínacích koncoch vzorky. V prípade lepenia sú namerané dáta kvalitnejšie s výrazne menšími osciláciami, zároveň sa ale výrazným spôsobom predlžuje doba prípravy experimentu.

Ďalšie koncepty zariadenia pre SHTB uvádzajú [41; 52; 53]. Vyvolaniu ťahového napätia úpravou geometrie vzorky sa venovali [54; 55].



Obr. 15 Schémy zariadení pre SHTB a) s trubkovým impaktorom, b) s mernými tyčami umiestnenými v trubke a c) s prstencom [41; 47; 49].

### 3.4 Taylorov test

Taylorov test (angl. Taylor Anvil Test) predstavil v roku 1948 Taylor [56] a Whiffin [57] ako jednoduchý nástroj pre vyhodnotenie dynamickej medze klzu. Princíp experimentu spočíva v urýchlení vzorky valcového tvaru, ktorá dopadá na tuhú dosku, pozri obr. 16. Rýchlosť deformácie tak dosahuje hodnôt až  $10^6 \text{ s}^{-1}$ . Vyhodnotenie podľa Taylora [56] je postavené na teórii šírenia napätových vln v materiáli. Po skúške sa zmerajú rozmery deformovanej vzorky a dynamická medza klzu je vypočítaná podľa vzťahu [56]:

$$\sigma_Y = \frac{\rho \cdot V^2 \cdot (L_0 - X)}{2 \cdot (L_0 - L_f) \cdot \ln \frac{L_0}{X}} \quad (3.26)$$

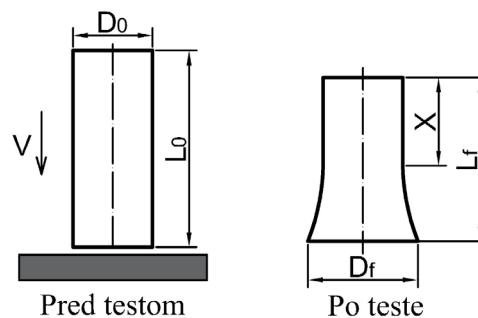
kde:  $\sigma_Y$  – dynamická medza klzu podľa Taylora [MPa],

$\rho$  – hustota materiálu vzorky [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],

$V$  – rýchlosť dopadu vzorky [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],

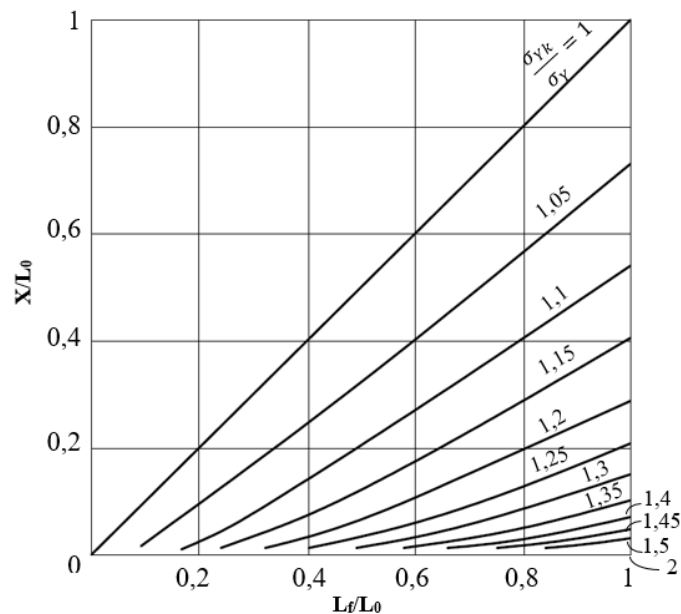
$X$  – dĺžka nezdeformovanej časti vzorky [m],

$L_f$  – celková dĺžka vzorky po teste [m].



Obr. 16 Taylorov test [56].

Uvedený vzťah predpokladá, že nedeformovaná časť vzorky konštantne spomaľuje, čo sa nezodpovedá realite. Z tohto dôvodu bola navrhnutá úprava pomocou korekčného faktora, ktorým sa násobí hodnota vypočítaná podľa (3.26). Hodnotu je možné získať z grafu na obr. 17, pričom skorigovaná hodnota je označená ako  $\sigma_{yk}$ .



Obr. 17 Stanovenie korekčného faktora dynamickej medze klzu podľa Taylora [56].

Okrem Taylorovho prístupu boli navrhnuté aj ďalšie vzťahy pre výpočet dynamickej medze klzu, ktoré sú prezentované v [58] a [59]. Vzhľadom na zjednodušené predpoklady však majú takto získané hodnoty skôr informatívny charakter. V súčasnosti sa Taylorov test používa predovšetkým na stanovenie a optimalizáciu parametrov materiálových modelov. V takom prípade sa zmerajú rozmery zdeformovanej vzorky a následne sa vytvorí numerická simulácia experimentu, pričom sa menia parametre materiálového modelu tak, aby sa dosiahla čo najlepšia zhoda rozmerov získaných experimentálnou a numerickou cestou. [32]

V priebehu rokov prešiel Taylorov test vývojom vedúcim k vytvoreniu nových variantov experimentálneho zariadenia aj testovacích možností, napr. sledovanie deformácie vzorky pomocou vysokorýchlostnej kamery alebo testovanie za tepla. Jednou z modifikácií zariadenia je tzv. symetrický Taylorov test [60], ktorý spočíva v nahradení tuhej dosky ďalšou vzorkou s rovnakými rozmermi a materiálom ako skúmaná vzorka, pričom dochádza k ich čelnému nárazu. Vzhľadom na symetrickú deformáciu sú potlačené neznáme okrajové podmienky – trenie medzi čelom vzorky a tuhou doskou a deformácia tuhej dosky. Ďalším variantom je tzv. asymetrický Taylorov test [61], pri ktorom je urýchľovaná tuhá doska dopadajúca na stacionárnu vzorku. Výhoda je najmä z hľadiska jednoduchšieho vykonania testov za tepla.

### 3.5 Digital Image Correlation

DIC bola predstavená v 80. rokoch 20. storočia a stala sa dôležitým nástrojom pre meranie posuvov a výpočet deformácií v rôznych inžinierskych aplikáciách či medicíne. K rozšíreniu prispel najmä vývoj v oblasti výpočtovej techniky a fotografií. V súčasnosti sa preto využíva nie len na skúmanie malých objektov s rozmermi v rádoch jednotiek milimetrov, ale aj rozmerných objektov, ako sú lopatky veterných turbín, z čoho vyplýva aj možnosť použitia v exteriéri [62]. V porovnaní s konvenčnými technikami, napr. meranie pomocou tenzometrov alebo extenzometrov, umožňuje vytvorenie tzv. deformačnej mapy a získanie komplexnejších informácií o smere a veľkosti hlavných zložiek deformácií a napätia.

Princíp merania posuvov a deformácií s využitím metódy DIC pozostáva z nasledujúcich krokov:

- príprava povrchu skúmaného objektu,
- kalibrácia meracieho prístroja a snímanie objektu pred a počas deformačného procesu,
- analýza snímok s využitím špecializovaného softvéru.

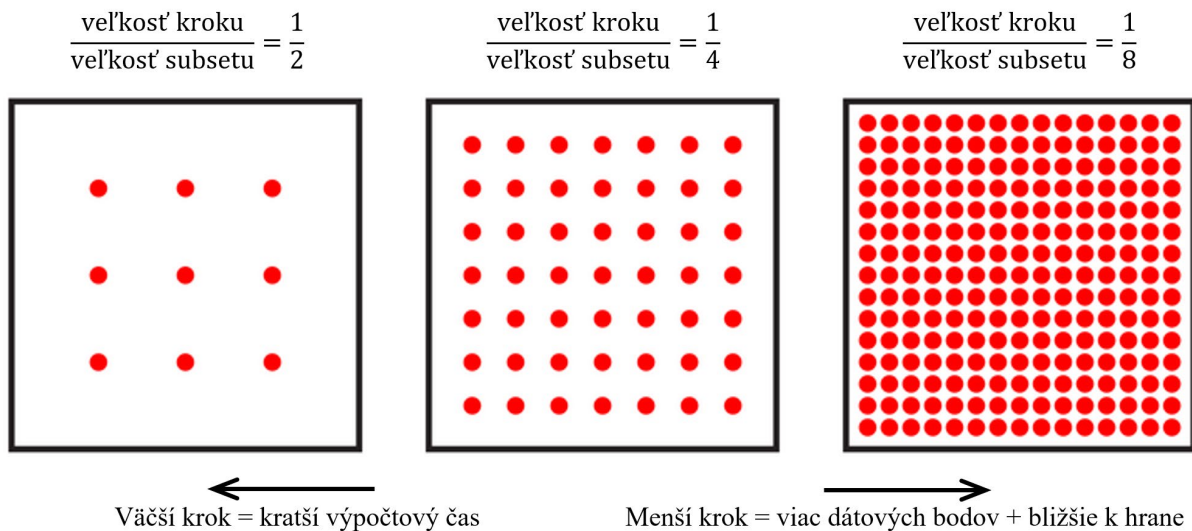
Na povrchu skúmaného objektu musí byť vzor s náhodným rozložením intenzity sivej, ktorý sa deformuje spoločne s objektom a je tak nositeľom informácií o deformáciách. Tento vzor môže predstavovať štruktúra povrchu alebo býva vytvorený umelo. Umelé vytvorenie býva častejšie a existuje viacero metód, ktorými ho pripraviť. Jednou z nich je nanosenie bielej farby na povrch a následný nástrek čiernej, ktorá vytvorí vzor. Dôležitá je dobrá adhézia nanosenej farby a tiež kvalita vzoru. Kontrast farieb, veľkosť a tvar častíc tvoriacich vzor a ich hustota majú veľký vplyv na presnosť merania a volia sa s ohľadom na parametre a nastavenie kamery. [62]

Pred snímaním je vyžadované vhodné napolohovanie kamery/kamier voči objektu, nastavenie osvetlenia a tiež kalibrácia, napr. kalibračnými doskami. Následne je potrebné urobiť snímku nedeformovaného objektu a potom je možné prejsť k snímaniu deformácie/pohybu. [63]

V súčasnosti sa používajú 3 varianty DIC a to 2D, 3D a metóda Digital Volume Correlation (DVC). 2D metóda využíva jednu kameru a je obmedzená pre meranie posuvov v rovine, napr. pri ťahovej skúške plochých vzoriek. Pre skúmanie tvarovo zložitejších objektov, príp. tam, kde dochádza k posuvom v troch osách sa uplatňuje 3D DIC, ktorá vyžaduje najmenej dve kamery. Použitím kamier s vysokou rýchlosťou snímania (často desiatky až stovky tisíc snímok za sekundu, angl. frames per second) je potom možnosť analýzy dynamických dejov alebo vibrácií. Metóda DVC umožňuje sledovanie posuvov vo vnútri objektu, vďaka snímkam získaným röntgenovou tomografiou či magnetickou rezonanciou. [63; 64; 65]

V ďalšom kroku sa snímky spracovávajú pomocou špecializovaného softvéru, napr. MatchID, GOM Correlate, Istra 4D. Vyhodnotenie je pritom založené na porovnávaní snímky nedeformovaného objektu tzv. referenčnej snímky so snímkami v priebehu deformácie, príp. sa porovnávajú snímky v jednotlivých krokoch. Na referenčnej snímke sa najskôr vyberie oblasť záujmu, kde budú zisťované posuvy. Tie sú potom spočítané s využitím korelačných kritérií na základe sledovania podoblastí (angl. subset), ktoré obsahujú unikátny vzor a je ich možné jednoznačne identifikovať (u jednotlivých pixelov by to možné nebolo). Zistená hodnota posuvu sa vzťahuje k stredu podoblasti. DIC softvéry ponúkajú rôzne korelačné kritériá, napr. Zero-mean normalized sum of squared differences (ZNSSD) alebo Zero-mean normalized cross-correlation, využívajúce rôzne algoritmy a podmienky určenia posuvov. Keďže podoblasť s pôvodne štvorcovým tvarom zvyčajne mení nielen polohu, ale aj tvar (predĺženie, stlačenie...), využíva sa tvarová funkcia, ktorá toto zohľadňuje. [63; 64]

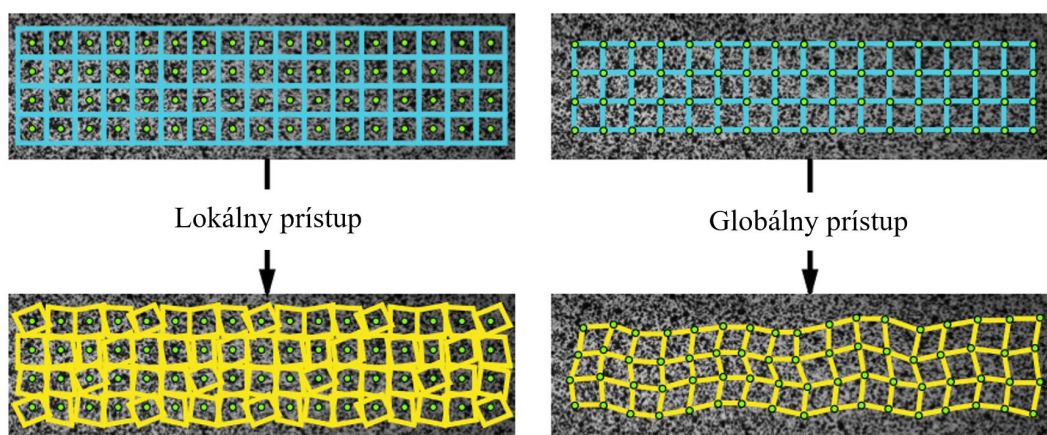
Výsledky získané DIC analýzou sú do veľkej miery závislé na užívateľskom nastavení a skúsenostiach. Dôležitými parametrami sú veľkosť podoblasti a kroku, ktoré sa uvádzajú v pixeloch. Veľkosť podoblasti sa volí u referenčnej snímky s ohľadom na jej rozlíšenie a veľkosť častíc tvoriacich vzor. Krok je vzdialenosť stredov podoblastí a ovplyvňuje množstvo vyhodnotených dátových bodov. Vplyv veľkosti kroku je zrejmy z obr. 18. [65]



Obr. 18 Vplyv veľkosti kroku na výpočtový čas a rozlišovaciu schopnosť pri zachovaní veľkosti zorného poľa a veľkosti podoblasti [65].

Výpočet deformácií je častým krokom následného spracovania výsledkov DIC. Využíva sa k tomu nástroj, ktorý sa v niektorých softvéroch označuje ako virtuálny tenzometer (angl. virtual strain gage). Zmysel použitia spočíva vo filtrovaní extrémnych hodnôt a šumu, čím sa získa kontinuálny a vyhladený priebeh deformácie. Nevhodná veľkosť virtuálneho tenzometra však môže viesť k zakrytiu niektorých javov, ako sú napr. sklzové pásma. [65]

Uvedené informácie týkajúce sa spracovania snímok sú spojené s lokálnym prístupom vyhodnotenia, ktorý je najčastejšie využívaný. Okrem toho však boli vyvinuté aj ďalšie algoritmy, z ktorých sa najviac zaužíval globálny. Ten je založený na rozdelení oblasti záujmu na prvky spojené uzlami a následnom sledovaní všetkých prvkov súčasne. Porovnanie lokálneho a globálneho prístupu je prezentované na obr. 19. Lokálny prístup nerieši vzťahy medzi susednými podoblastmi, výpočet je tak rýchly a prebieha paralelne pre viaceré podoblasti. Z princípu globálneho prístupu vyplýva, že vypočítané pole posuvov je kontinuálnejšie. Presnosť výsledkov však môže byť zhoršená pri výraznej heterogenite posuvov. [66]



Obr. 19 Porovnanie lokálneho a globálneho prístupu DIC [66].

## 4 MATERIÁLOVÉ MODELY

Jedným zo vstupov pri analýze tvárniacich procesov s využitím numerických simulácií, ale aj analytických metód, je materiálový model. Vo väčšine prípadov je potrebné, aby zahŕňal elastické a plastické vlastnosti materiálu a rovnako podmienku plasticity. V elastickej oblasti je možné považovať závislosť napätia na deformácii za lineárnu. V simulačných softvéroch sa pre popis takéhoto chovania najčastejšie využíva modul pružnosti v ťahu a Poissonov pomer. Podmienka plasticity je potom hranicou medzi elasticou a plastickou oblasťou. Plastické správanie materiálu sa popisuje konštitutívnymi modelmi. Je pritom snahou nájsť vhodnú matematickú funkciu zohľadňujúcu závislosť napätia na procesných parametroch ako plastická deformácia, rýchlosť deformácie a teplota. [32]

### 4.1 Podmienky plasticity

Pri jednoosovom zaťažení je napätie potrebné na prechod do oblasti plastickej deformácie rovné hodnote medze klzu. U reálnych procesov pri pôsobení viacosovej napätosti popísanej pomocou hlavných napätí  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  je táto hodnota presnejšie vyjadrená pomocou podmienky plasticity. V priebehu rokov bolo predstavených niekoľko týchto podmienok, ktoré je možné rozdeliť z hľadiska zahrnutia vplyvu anizotropie na izotropné a anizotropné.

#### 4.1.1 Izotropné podmienky plasticity

Najstaršia podmienka plasticity bola navrhnutá Trescom v roku 1864 a je tiež známa ako podmienka maximálnych šmykových napätí alebo  $\tau_{max}$ . Na základe tejto teórie sa predpokladá, že k plastickej deformácii dôjde vtedy, keď maximálne šmykové napätie dosiahne kritickú hodnotu  $\tau_0$ . Pre priestorový stav napätosti a za predpokladu, že  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ , má podmienka tvar [13]:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_0, \quad (4.1)$$

kde:  $\tau_{max}$  – maximálne šmykové napätie [MPa],

$\sigma_i$  – hlavné napätie [MPa],

$\tau_0$  – kritická hodnota šmykového napätia (medza klzu v šmyku) [MPa].

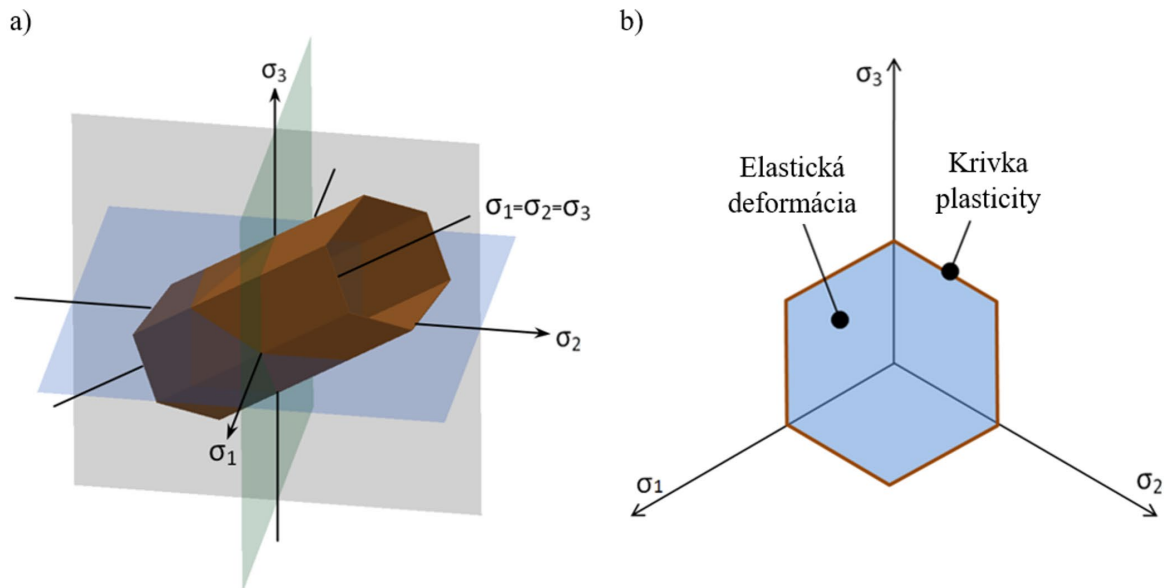
Všeobecne (pokiaľ neplatí  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ) je možné nahradiť napätia  $\sigma_1$  a  $\sigma_3$  rozdielom najväčšieho a najmenšieho hlavného napätia.

Kritická hodnota šmykového napätia sa stanovuje pomocou jednoosovej ťahovej skúšky, keď je hlavné napätie  $\sigma_1$  rovné hodnote medze klzu a platí [13]:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{\sigma_y}{2} = \tau_0, \quad (4.2)$$

kde:  $\sigma_y$  – medza klzu materiálu [MPa].

V súradnicovom systéme hlavných napätí je podmienka maximálnych šmykových napätí zobrazovaná ako šesťboký hranol (obr. 20a). Body vo vnútri hranola predstavujú elastický stav, zatiaľ čo jeho povrch je tvorený bodmi, ktoré spĺňajú podmienku. Pri rovinnej napätosti je podmienka zobrazená ako šesťuholník (obr. 20b). [13]



Obr. 20 Grafické zobrazenie podmienky maximálnych šmykových napätí [13].

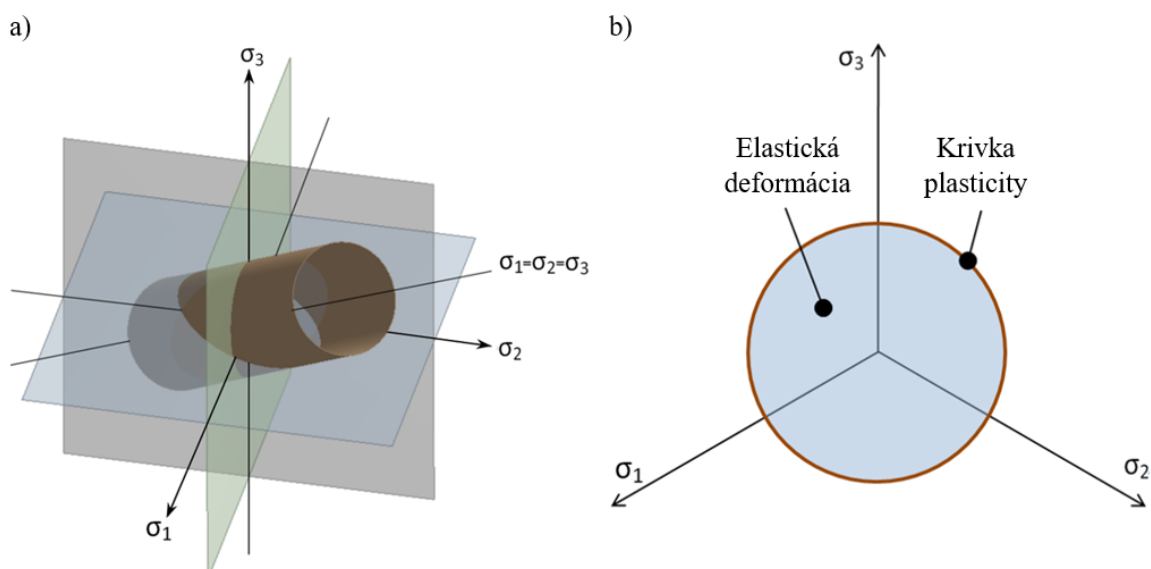
Ďalšia podmienka plasticity bola nezávisle na sebe definovaná Huberom, von Misesom a Henckym a je často označovaná ako HMH. V tomto prípade sa vychádza z toho, že prechod do plastickej oblasti nastáva vtedy, keď efektívne napätie dosiahne hodnoty medze klzu. Efektívne napätie sa využíva pre vyjadrenie súčtového účinku napätosti v určitom bode deformovaného telesa. Podmienka plasticity má pre obecnú napätosť tvar [13]:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2 \cdot \sigma_y^2. \quad (4.3)$$

V prípade rovinatej napätosti, keď  $\sigma_3 = 0$ , sa vzťah (4.3) transformuje na [13]:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1^2 = 2 \cdot \sigma_y^2. \quad (4.4)$$

Plocha plasticity zobrazená v súradnicovom systéme hlavných napätí má pri priestorovej napätosti tvar valca (obr. 21a). Pri rovinatej napätosti je reprezentovaná elipsou (obr. 21b), ktorej matematická formulácia môže byť získaná úpravou vzťahu (4.4). Táto elipsa má navyše spoločné body so šesťuholníkom plasticity v jeho rohoch. [13]



Obr. 21 Grafické zobrazenie podmienky HMH [13].

#### 4.1.2 Anizotropné podmienky plasticity

Pre popis anizotropie vlastností materiálov je možné použiť viaceré podmienky plasticity, ako sú Hill48, Hill90, Corus-Vegter alebo Yoshida, ktoré obsahujú rôzny počet parametrov matematickej formulácie. Komplexné modely vyžadujú väčší počet experimentov, takže praktické uplatnenie vo výpočtových softvéroch nachádzajú len niektoré.

K najpoužívanejším anizotropným podmienkam plasticity patrí Hill48, ktorá zovšeobecňuje použitie izotropného kritéria HMH a je vyjadrená nasledujúco [67]:

$$\sigma_{Hill}^2 = F \cdot (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + G \cdot (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + H \cdot (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 2 \cdot L \cdot \tau_{23}^2 + 2 \cdot M \cdot \tau_{13}^2 + 2 \cdot N \cdot \tau_{12}^2, \quad (4.5)$$

kde:  $F, G, H, L, M, N$  – experimentálne zistené parametre anizotropie [-],  
 $\tau_{ij}$  – hlavné šmykové napätia [MPa].

Pri plošnom tvárnení je zaužívané, že os 1 odpovedá smeru valcovania, os 2 je orientovaná priečne, vzhľadom na smer valcovania a os 3 v smere hrúbky plechu. Ak je uvažovaná plošná napätosť, ktorá je často predpokladaná pri plošnom tvárnení, majú najväčší význam parametre anizotropie  $F, G, H$  a  $N$ . Zvyšné parametre  $L$  a  $M$  v tomto prípade netreba zisťovať, pretože  $\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{13} = 0$ . [67]

Pre určenie parametrov sa využívajú dáta z jednoosovej, príp. aj dvojosovej ťahovej skúšky a existuje viacero možností výpočtu, napr.:

- na základe Lankfordovho koeficientu [68]:

$$F = \frac{r_0}{r_{90} \cdot (r_0 + 1)}, \quad (4.6)$$

$$G = \frac{1}{r_0 + 1}, \quad (4.7)$$

$$H = \frac{r_0}{r_0 + 1}, \quad (4.8)$$

$$N = \frac{(r_0 + r_{90}) \cdot (2 \cdot r_{45} + 1)}{2 \cdot r_{90} \cdot (r_0 + 1)}, \quad (4.9)$$

kde:  $r_\alpha$  – Lankfordov koeficient pre rôzne orientácie vzhľadom na smer valcovania [-].

- na základe medzí klzu [67]:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\sigma_{y0}^2}{\sigma_{y90}^2} - 1 + \frac{\sigma_{y0}^2}{\sigma_{yb}^2} \right), \quad (4.10)$$

$$G = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_{y0}^2}{\sigma_{y90}^2} + \frac{\sigma_{y0}^2}{\sigma_{yb}^2} \right), \quad (4.11)$$

$$H = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \frac{\sigma_{y0}^2}{\sigma_{y90}^2} - \frac{\sigma_{y0}^2}{\sigma_{yb}^2} \right), \quad (4.12)$$

$$N = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{4 \cdot \sigma_{y0}^2}{\sigma_{y45}^2} - \frac{\sigma_{y0}^2}{\sigma_{yb}^2} \right), \quad (4.13)$$

kde:  $\sigma_{ya}$  – medza klzu pre rôzne orientácie vzorky vzhľadom na smer valcovania [MPa],  
 $\sigma_{yb}$  – medza klzu pri dvojosovom ťahu [MPa].

Ak platí, že parametre  $F = G = H = 1$  a  $L = M = N = 3$ , prechádza podmienka Hill48 na izotropnú podmienku HHM.

## 4.2 Konštitutívne vzťahy

Experimentálne získané závislosti napätie-deformácia bývajú pre zjednodušenie výpočtov numerických simulácií a analytických modelov aproximované pomocou konštitutívnych vzťahov. Ich komplexnosť potom závisí predovšetkým na zohľadnení rôznych procesných parametrov.

Základné konštitutívne vzťahy sú obmedzené na aproximáciu skutočného napätia v závislosti na skutočnej plastickej deformácii, pričom sa predpokladá, že ostatné vplyvy sú konštantné. Najjednoduchším takýmto modelom je Hollomonov v tvare [32]:

$$\sigma_{true} = K \cdot \varphi_{pl}^n, \quad (4.14)$$

kde:  $K$  – materiálový parameter [MPa],  
 $\varphi_{pl}$  – skutočná plastickej deformácia [-].

Modifikáciou (4.14) je Ludwиков vzťah zahŕňajúci medzu klzu [32]:

$$\sigma_{true} = \sigma_y + K \cdot \varphi_{pl}^n, \quad (4.15)$$

Ďalšie rozšírenie Hollomonovho modelu predstavuje Swiftov model, ktorý pridáva parameter označovaný ako počiatočná deformácia [32]:

$$\sigma_{true} = K \cdot (\varphi_0 + \varphi_{pl})^n, \quad (4.16)$$

kde:  $\varphi_0$  – počiatočná deformácia [-].

Na rozdiel od predošlých, Voce využíva pre aproximáciu exponenciálnu funkciu [32]:

$$\sigma_{true} = \sigma_y + Q \cdot (1 - e^{-\beta \cdot \varphi_{pl}}), \quad (4.17)$$

kde:  $Q$  [MPa],  $\beta$  [-] – parametre modelu Voce.

Model Cowper-Symonds potom zohľadňuje okrem vplyvu samotnej deformácie aj rýchlosť deformácie [32]:

$$\sigma_{true} = \sigma_f \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{p}} \right], \quad (4.18)$$

kde:  $\sigma_f$  – skutočné napätie [MPa],  
 $D$  [ $s^{-1}$ ],  $p$  [-] – parametre modelu Cowper-Symonds.

Vo vzťahu (4.18) býva za skutočné napätie  $\sigma_f$  dosadený matematický výraz popisujúci závislosť skutočné napätie-deformácia za kvazistatických podmienok zaťaženia.

Komplexnejším a jedným z najpoužívanejších konštitutívnych vzťahov je Johnson-Cook, ktorý zahŕňa vplyv deformácie (1. zátvorka), rýchlosti deformácie (2. zátvorka) aj teploty (3. zátvorka) [32]:

$$\sigma_{true} = (A + B \cdot \varphi_{pl}^n) \cdot \left( 1 + C \cdot \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \cdot (1 - T^{*m}), \quad (4.19)$$

kde:  $A$  – referenčná medza klzu [MPa],  
 $B$  – pevnostný parameter [MPa],

$C$  – parameter citlivosti na rýchlosť deformácie [-],

$\dot{\epsilon}_0$  – referenčná rýchlosť deformácie [ $s^{-1}$ ],

$m$  – parameter zohľadňujúci vplyv teploty [-],

$T^*$  – homologická teplota [-].

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0},$$

kde:  $T$  – teplota materiálu [K],

$T_0$  – referenčná teplota [K],

$T_m$  – teplota tavenia [K].

Pre stanovenie všetkých parametrov treba vykonať testy pri rôznych rýchlostiach deformácie a teplotách.

## 5 VLASTNOSTI ZLIATINY EN AW-2024 – T3 VO VYTVRDENOM STAVE

### 5.1 Experimentálny program a metódy

Materiál EN AW-2024 – T3 je testovaný vo forme plechu s hrúbkou 0,8 mm pri pôsobení jednoosového ťahového zaťaženia. Vplyv rýchlosti deformácie je sledovaný v kvazistatickom režime a v režime stredných a vysokých rýchlostí deformácie, čomu odpovedajú hodnoty 0,001; 1 a 800 s<sup>-1</sup>. Anizotropia materiálu je skúmaná na vzorkách odobraných pod siedmimi uhlami vzhľadom na smer valcovania, tzn. 0° (smer valcovania) 15°, 30°, 45°, 60°, 75° a 90°. Experimentálny program je prezentovaný v tab. 3. Pre každé nastavenie okrajových podmienok boli testované minimálne dve vzorky, takže celkový počet meraní bol 42. Časť výsledkov prezentovaných v tejto kapitole bola publikovaná v odbornom článku [1].

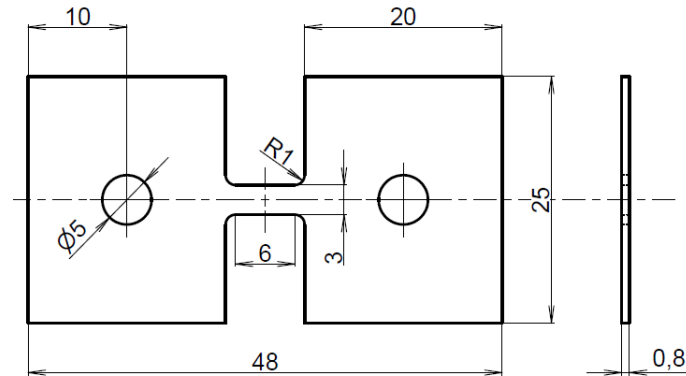
Tab. 3 Experimentálny program pre materiál EN AW-2024 – T3 vo forme plechu s hrúbkou 0,8 mm.

Testovacie zariadenie	Rýchlosť deformácie [s <sup>-1</sup> ]	Orientácia vzorky
Instron 5569	0,001	0°
		15°
		30°
		45°
		60°
		75°
		90°
	1	0°
		15°
		30°
		45°
		60°
		75°
		90°
SHTB	800	0°
		15°
		30°
		45°
		60°
		75°
		90°

V nasledujúcich podkapitolách sú popísané zariadenia využité pre mechanické testovanie materiálu, štruktúrne analýzy a fraktografiu, taktiež ich nastavenie, ako aj geometria a rozmery vzoriek a postup ich prípravy.

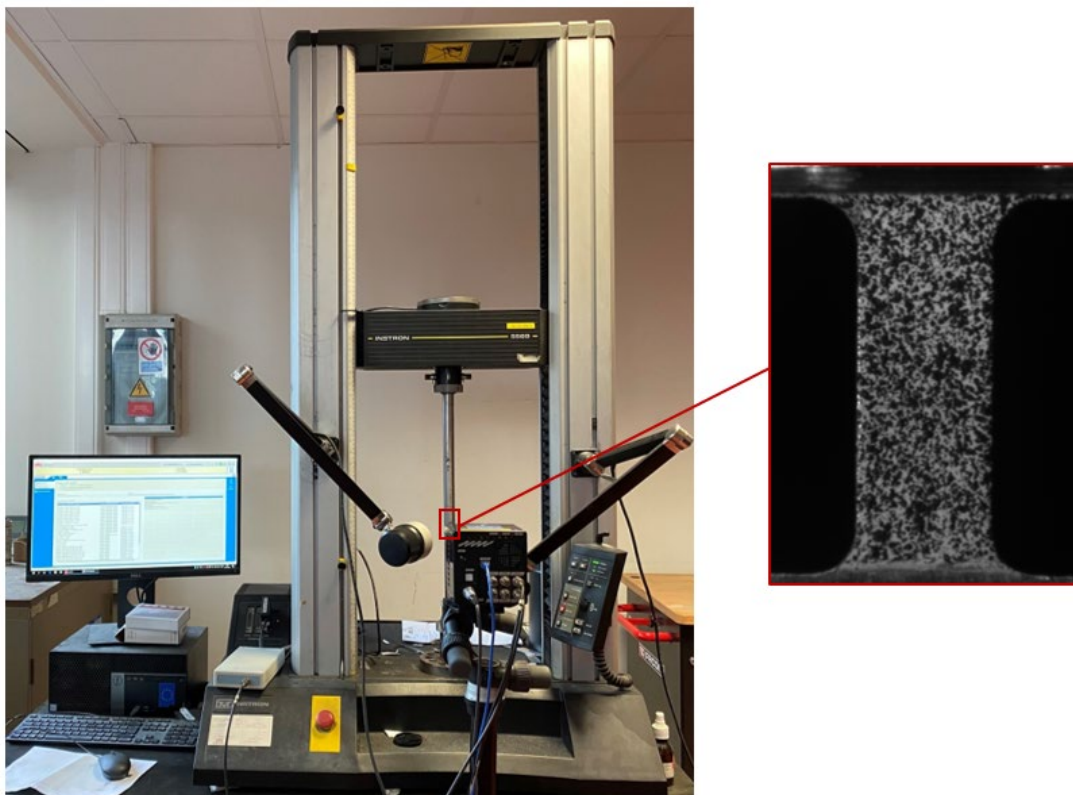
### 5.1.1 Ťahové skúšky

Vzorky pre ťahové skúšky boli vyrobené elektroerozívnym drôtovým rezaním (angl. Electrical Discharge Machining), pričom vzniknuté hrany neboli ďalej upravované. Ich tvar a rozmery sú na obr. 22. Upínanie bolo riešené pomocou kolíkov.



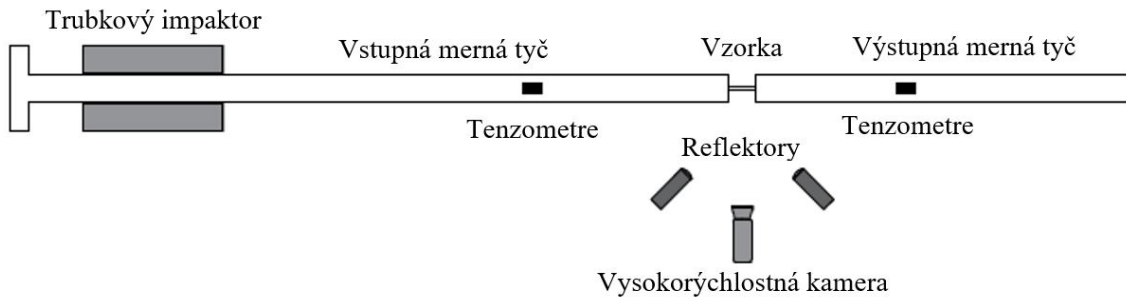
Obr. 22 Geometria a rozmery vzorky pre ťahové skúšky [1].

Skúšanie za kvazistatických podmienok a v režime stredných rýchlostí deformácie pri ťahovom zaťažení bolo realizované na zariadení Instron 5569, pozri obr. 23. Maximálne skúšobné zaťaženie stroja je 50 kN. Rýchlosť pohybu prierečnika bola 0,36 a 360 mm·min<sup>-1</sup>, čím sa dosiahla rýchlosť deformácie 0,001 a 1 s<sup>-1</sup>. Všetky testy trvali do porušenia vzorky.



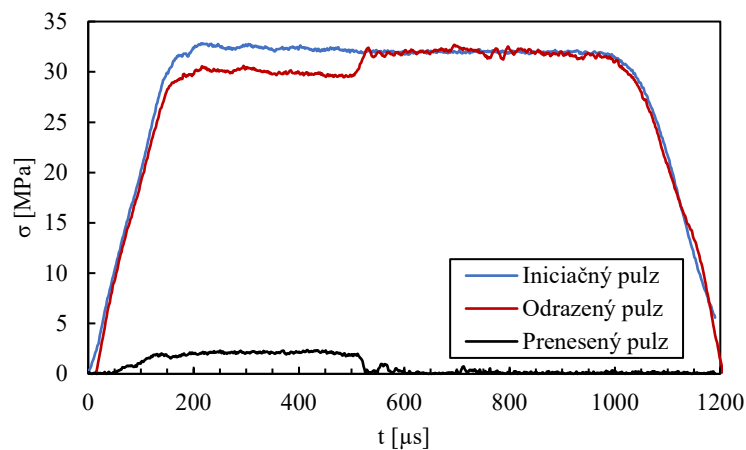
Obr. 23 Skúšobné zariadenie Instron 5569 s aparátúrou pre 2D DIC analýzu (vľavo) a vzorka s naneseným vzorom (vpravo).

Testy pri ťahovom zaťažení v režime vysokých rýchlostí deformácie boli vykonané s využitím Hopkinsonovho zariadenia (obr. 24), ktoré využíva trubkový impaktor. Princíp jeho funkcie je popísaný v podkapitole 3.3.2. Vstupná aj výstupná merná tyč boli vyrobené z hliníkovej zliatiny s označením EN AW-7075 – T6 ( $E_B = 73\,100\text{ MPa}$ ) a mali priemer 25 mm a dĺžku 6 000 a 3 000 mm. Trubkový impaktor z polyamidu 6 (obchodný názov: Ertalon) dopadal na prírubu vstupnej mernej tyče rýchlosťou  $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Deformácie merných tyčí boli merané tenzometrami zapojenými do plného Wheatstoneovho mosta, ktorého výstup bol zaznamenaný systémom pre zber údajov.



Obr. 24 Schematické zobrazenie zariadenia pre SHTB [1].

Všetky vzorky boli počas testu deformované do porušenia, čo naznačujú aj napät'ové pulzy na obr. 25, kde prenesený pulz je kratší v porovnaní s iniciačným a odrazeným. Hodnoty, ktoré vykresľujú odrazený pulz, sú absolútne.

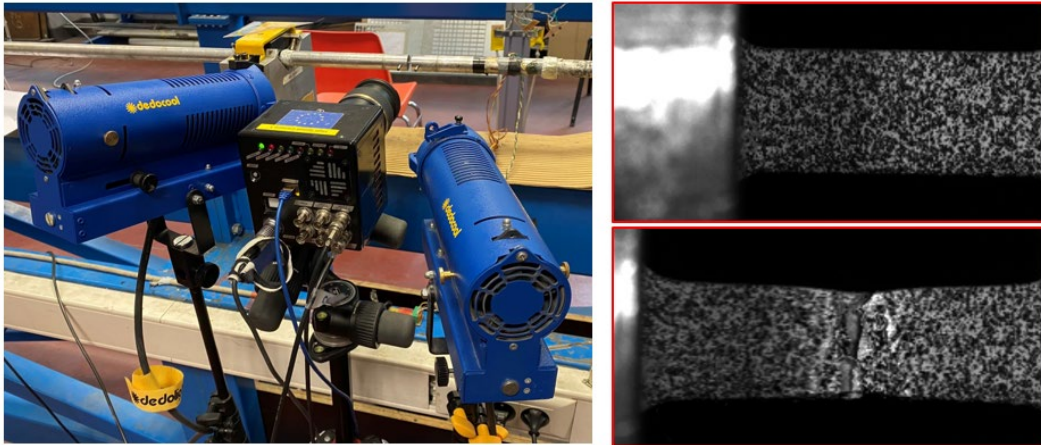


Obr. 25 Napät'ové pulzy zaznamenané počas testu vzorky odobranej v smere  $0^\circ$  [1].

Deformácia vzoriek bola meraná s využitím 2D DIC analýzy. Pred samotnou skúškou bol povrch vzoriek očistený a odmastený. Následne sa striekacou pištoľou naniesla biela farba, na ktorú bola sprejom nastriekaná čierna, čím sa vytvoril jedinečný vzor, pozri obr. 23 a 26.

Snímky pri testoch s rýchlosťou deformácie  $0,001\text{ s}^{-1}$  boli získané pomocou kamery 5Mpxl F-504B Allied Vision Stingray. Pre meranie pri rýchlostiach deformácie 1 a  $800\text{ s}^{-1}$  bolo potrebné použiť vysokorýchlostnú kameru Photron Mini AX200. Vhodné osvetlenie na snímanie pri skúškach na zariadení Instron 5569 zabezpečila dvojica LED reflektorov (obr. 23). Vzorky testované pri vysokých rýchlostiach deformácie boli osvetlené reflektormi Dedocool (obr. 26).

Pre vyhodnotenie meraní deformácie bol použitý softvér MatchID 2D, verzia 2021.2.1. Nastavenie softvéru a ďalšie údaje 2D DIC analýzy sú uvedené v tab. 4.



Obr. 26 Aparatúra pre 2D DIC analýzu použitá pri testoch za vysokých rýchlostí deformácie (vľavo) a vzorka s naneseným vzorom (vpravo) [1].

Tab. 4 Parametre 2D DIC analýzy pre skúšky v režime kvazistatických, stredných a vysokých rýchlostí deformácie [1].

	Rýchlosť deformácie $0,001 \text{ s}^{-1}$	Rýchlosť deformácie $1 \text{ s}^{-1}$	Rýchlosť deformácie $800 \text{ s}^{-1}$
Rozlíšenie snímok	$2\,452 \times 2\,056$ pixelov	$256 \times 272$ pixelov	$256 \times 128$ pixelov
Mierka	1 pixel = 0,0053 mm	1 pixel = 0,0564 mm	1 pixel = 0,0407 mm
Frekvencia snímania	1/3 Hz	10 000 Hz	120 000 Hz
Filtrovanie obrazu	Gauss	Gauss	Gauss
Veľkosť podoblasti	$45 \times 45$ pixelov	$9 \times 9$ pixelov	$7 \times 7$ pixelov
Veľkosť kroku	11 pixelov	1 pixel	2 pixely
Tvarová funkcia	Kvadratická	Kvadratická	Kvadratická
Korelačné kritérium	ZNSSD	ZNSSD	ZNSSD
Veľkosť deformačného okna	17 dátových bodov	15 dátových bodov	13 dátových bodov
Veľkosť virtuálneho tenzometra	$221 \times 221$ pixelov	$23 \times 23$ pixelov	$31 \times 31$ pixelov

Zložky deformácie v smere zaťažovania  $\varphi$  a v smere šírky vzorky  $\varphi_w$  boli vyhodnotené na základe 2D DIC analýzy ako priemer hodnôt tvoriacich deformačnú mapu v mernej časti vzorky. Deformácia v smere hrúbky vychádza z predpokladu, že platí zákon zachovania objemu:

$$\varphi + \varphi_w + \varphi_t = 0, \quad (5.1)$$

kde:  $\varphi_w$  – skutočná deformácia v smere šírky vzorky (z 2D DIC analýzy) [-].

$\varphi_t$  – skutočná deformácia v smere hrúbky vzorky [-].

Výstupom ťahových skúšok sú závislosti skutočné napätie-deformácia. Hodnoty skutočného napätia boli vypočítané podľa vzťahu (3.6), pričom okamžitý prierez vzorky je odvodený zo vzťahu (3.7).

Ďalej bol vyhodnotený Lankfordov koeficient  $r$ . Skutočné plastické deformácie v smere šírky a hrúbky vzorky  $\varphi_{wpl}$  a  $\varphi_{tpl}$ , ktoré vstupujú do vzťahu (3.9) pre jeho výpočet, sa určili odčítaním

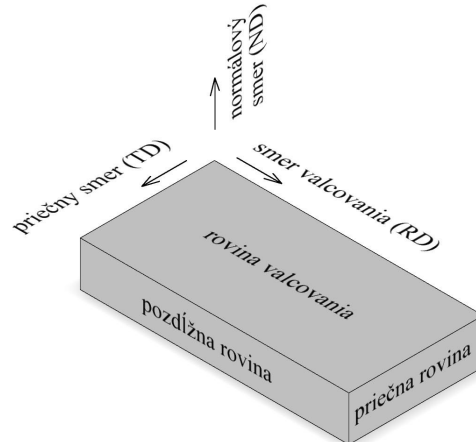
elastickéj zložky od  $\varphi_w$  a  $\varphi_t$ . Vďaka 2D DIC analýze bol Lankfordov koeficient získaný pre celú oblasť od medze klzu po okamžik vzniku krčka, z čoho sa následne stanovila priemerná hodnota. Exponent deformačného spevnenia  $n$  bol určený ako smernica závislosti  $\ln(\sigma_{true})-\ln(\varphi)$  vykreslenej pre hodnoty od medze klzu po okamžik vzniku krčka.

### 5.1.2 Štruktúrna analýza a fraktografia

Mikroštruktúra východiskového (nedeformovaného) materiálu bola sledovaná pomocou rastrovacieho elektrónového mikroskopu (angl. Scanning Electron Microscope – SEM) Tescan LYRA 3. Chemické zloženie vybraných fáz bolo analyzované detektorom pre energodisperznú röntgenovú spektroskopiu (angl. Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy – EDS). Snímky boli vytvorené v režime spätne odrazených elektrónov (angl. Backscattered Electrons – BSE).

Pre vyhodnotenie orientácie zŕn a ich veľkosti vo východiskovom stave a po ťahovom zaťažení pri rôznych rýchlostiach deformácie bol použitý SEM Tescan LYRA 3 XMU FEG/SEMxFIB a metóda elektrónovej spätne odrazenej difrakcie (angl. Electron Backscatter Diffraction – EBSD) s využitím detektoru NordlysNano EBSD a softvéru AZtec. Urýchľovacie napätie pri EBSD bolo 20 kV a vzorka bola upnutá do držiaka s náklonom 70°. Veľkosť kroku bola volená s ohľadom na zväčšenie snímky.

Vzorky pre štruktúrne analýzy boli pripravené štandardným spôsobom zahŕňajúcim zalisovanie za tepla do vodivej hmoty, mokré brúsenie SiC brúsnyimi papiermi a leštenie pomocou diamantovej pasty. Finálnou úpravou na vzorkách pre EBSD bolo mechanicko-chemické leštenie pomocou suspenzie EPOSIL M. Obr. 27 definuje smery a roviny, v ktorých sú pozorované a vyhodnocované štruktúrne analýzy.



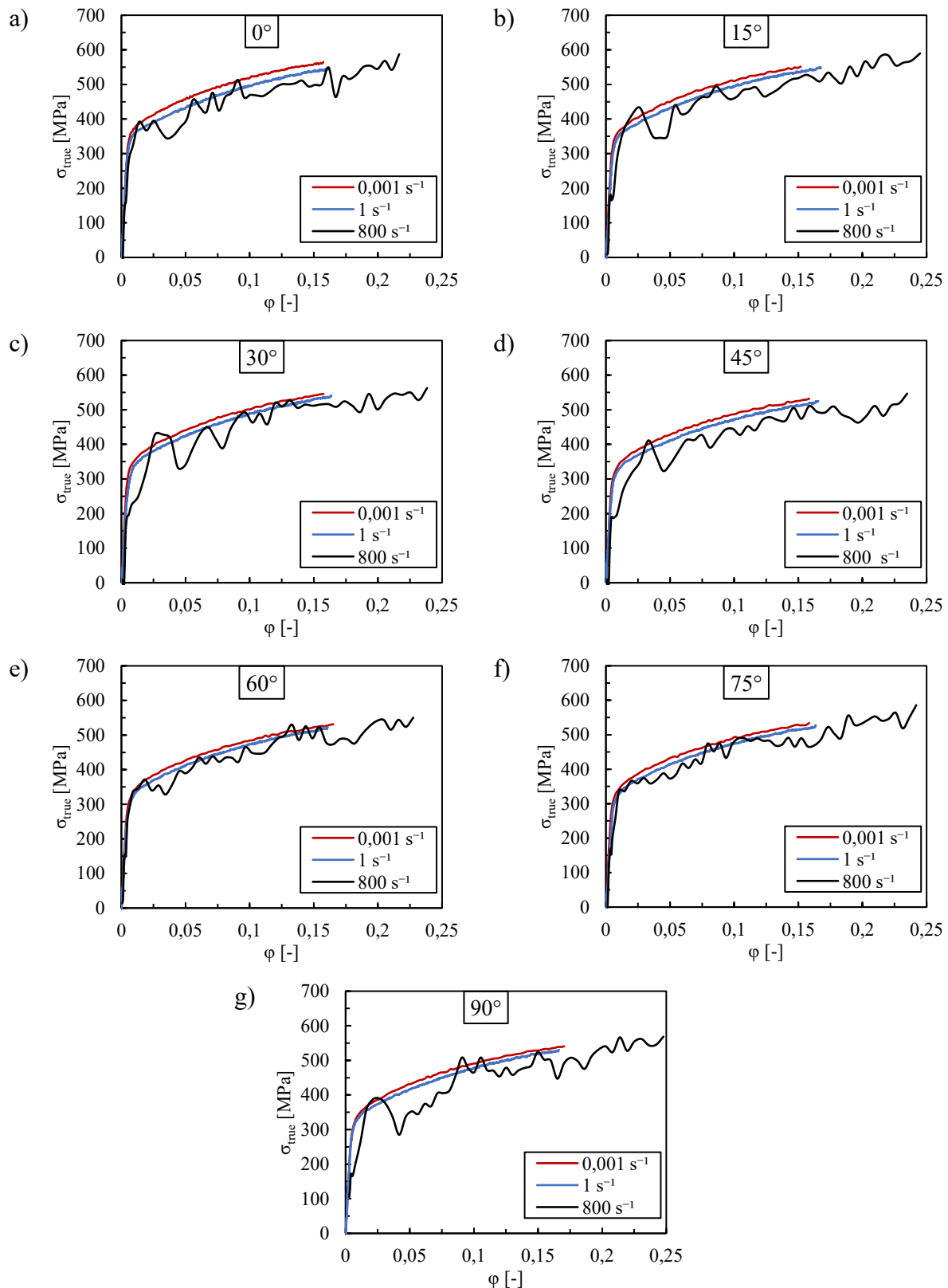
Obr. 27 Schéma rovin pozorovania.

Snímky lomových plôch pre fraktografickú analýzu boli vytvorené v režime sekundárnych elektrónov (angl. Secondary Electrons – SE) na SEM Zeiss Ultra Plus FEG-SEM. Príprava vybraných vzoriek po ťahových skúškach spočívala vo vyčistení acetónom v ultrazvukovej čističke a následnom osušení.

## 5.2 Výsledky a diskusia

### 5.2.1 Vyhodnotenie ťahových skúšok

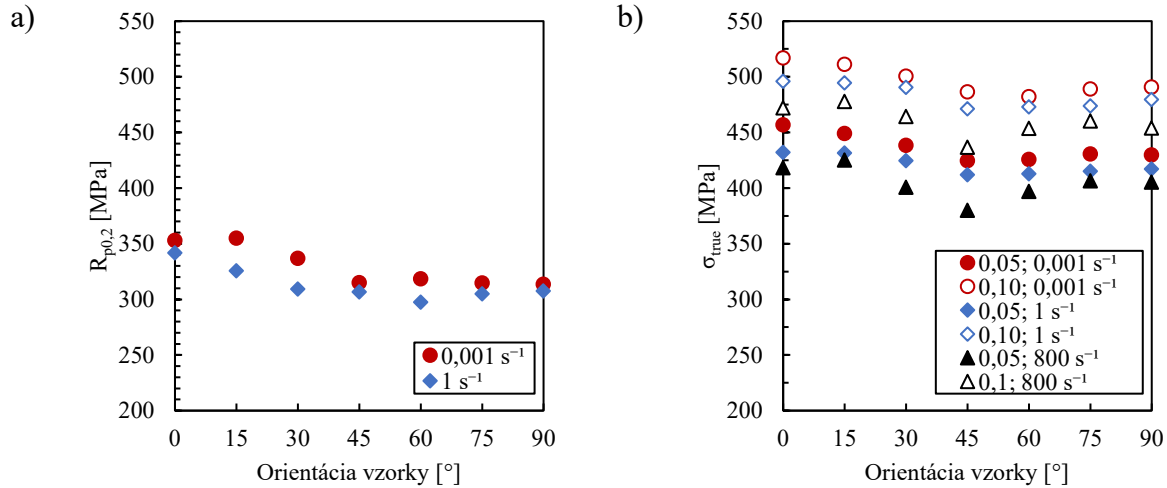
Na obr. 28 sú skutočné závislosti napätie-deformácia vykreslené do okamžiku vzniku krčka, z ťahových skúšok v režime kvazistatických, stredných a vysokých rýchlostí deformácie pre orientácie vzoriek s ohľadom na smer valcovania 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° a 90°. Výsledky ukazujú, že zliatina vykazuje negatívnu citlivosť na rýchlosť deformácie (NSRS) v testovanom rozsahu rýchlosti deformácie.



Obr. 28 Skutočné závislosti napätie-deformácia získané ťahovou skúškou pri kvazistatických, stredných a vysokých rýchlostiach deformácie pre orientácie vzoriek s ohľadom na smer valcovania a)  $0^\circ$ , b)  $15^\circ$ , c)  $30^\circ$ , d)  $45^\circ$ , e)  $60^\circ$ , f)  $75^\circ$  a g)  $90^\circ$  [1].

Vplyv rýchlosti deformácie a orientácie vzorky s ohľadom na smer valcovania na zmluvnú medzu klzu  $R_{p0,2}$  je na obr. 29a. Výsledky zo skúšok na Hopkinsonovom zariadení nie sú zahrnuté kvôli výrazným osciláciám závislosti napätie-deformácia. Hodnoty zmluvnej medze

klzu pri rýchlosti deformácie  $0,001 \text{ s}^{-1}$  sa pohybovali od 314 do 355 MPa a pri rýchlosti deformácie  $1 \text{ s}^{-1}$  boli v rozsahu 294 až 342 MPa. Skutočné napätie pri deformácii 0,05 a 0,1 v závislosti na orientácii vzoriek pre rôzne rýchlosti deformácie je na obr. 29b. Závislosti napätie-deformácia z Hopkinsonovho testu boli za týmto účelom aproximované s využitím Hollomonovho vzťahu (4.14). Hodnoty vykreslené v grafoch na obr. 29 potvrdzujú NSRS.



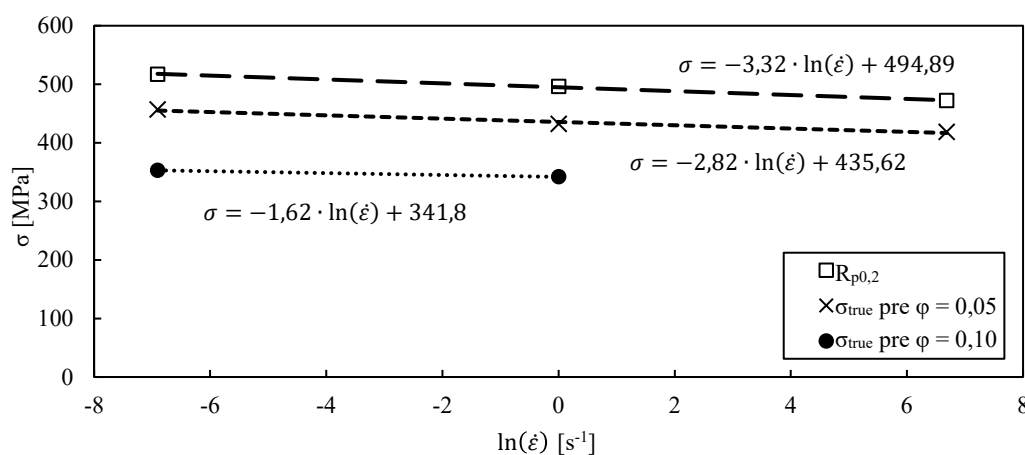
Obr. 29 a) Zmluvná medza klzu a b) skutočné napätie pri skutočnej deformácii 0,05 a 0,1 v závislosti na orientácii vzoriek [1].

Citlivosť na rýchlosť deformácie môže byť vyjadrená parametrom  $S$  [69]:

$$S = \frac{d\sigma}{d(\ln(\dot{\epsilon}))}, \quad (5.2)$$

kde:  $S$  – parameter citlivosti na rýchlosť deformácie [ $\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  
 $\sigma$  – napätie pri určitej deformácii (môže byť napr. medza klzu alebo medza pevnosti) [MPa].

Veľkosť parametra  $S$  je možné určiť vynesением bodov do grafu  $\sigma$ - $\ln(\dot{\epsilon})$  a ich následným preložením lineárnou funkciou, pričom  $S$  je rovný smernici tejto lineárnej funkcie, pozri obr. 30.



Obr. 30 Určenie parametra citlivosti na rýchlosť deformácie  $S$  pre orientáciu vzorky  $0^\circ$ .

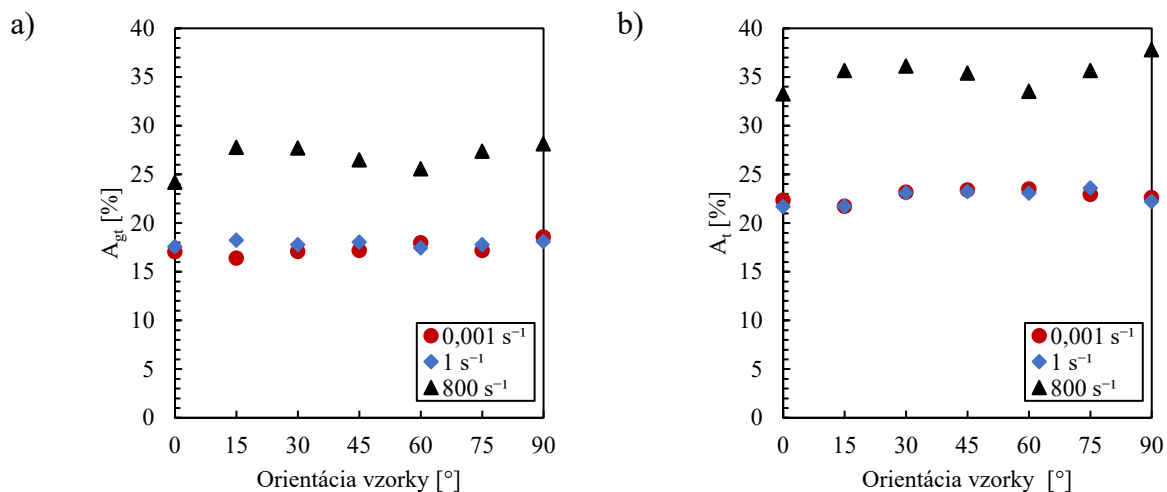
S využitím hodnôt, ktoré sú vykreslené na obr. 29, bol na základe uvedeného postupu vypočítaný parameter  $S$  pre rôzne orientácie vzoriek. Výsledky sú uvedené v tab. 5. Pre všetky orientácie je hodnota  $S$  záporná, čo odpovedá NSRS. Ako je uvedené v podkapitole 2.3, toto správanie môže byť pripisované dynamickému deformačnému starnutiu (DSA). Skúmaním deformačných máp získaných 2D DIC analýzou ale nebolo zistené, že by sa počas ťahových

skúšok objavili deformačné pásy. Rovnako u závislostí napätie-deformácia nebol pozorovaný Portevin-Le Chatelierov (PLC) efekt. Do úvahy ďalej pripadá možnosť, že k poklesu napätia s nárastom rýchlosti deformácie dochádza v dôsledku adiabatického ohrevu. Výskumy ukázali, že rýchlosť deformácie, pri ktorej sa prejavuje tento činiteľ, je relatívne nízka, u kovov približne  $1 \text{ s}^{-1}$  [69]. Z toho je zrejmé, že dynamické testy zahŕňajú nielen vplyv rýchlosti deformácie, ale aj teploty. Adiabatický ohrev však nenastáva na začiatku plastickej deformácie, preto zmeny napätia spojené so zmenou rýchlosti deformácie pri nízkych hodnotách deformácie do medze klzu a v jej okolí, sú pripisované len účinku rýchlosti deformácie. S ohľadom na to, že parameter citlivosti na rýchlosť deformácie  $S$  je vo všetkých prípadoch záporný, teda aj pri deformácii odpovedajúcej zmluvnému napätiu na medzi klzu  $R_{p0,2}$ , nie je možné pripisovať NSRS adiabatickému ohrevu. Toto tvrdenie navyše podporuje fakt, že hodnota  $S$  nerastie s pribúdajúcou deformáciou, prípadne len veľmi málo.

Tab. 5 Hodnoty parametra citlivosti na rýchlosť deformácie  $S$  pre rôzne orientácie vzoriek [1].

Orientácia vzorky	$S$ pre $R_{p0,2}$ [MPa·s <sup>-1</sup> ]	$S$ pre $\sigma_{true}$ pri $\varphi = 0,05$ [MPa·s <sup>-1</sup> ]	$S$ pre $\sigma_{true}$ pri $\varphi = 0,1$ [MPa·s <sup>-1</sup> ]
0°	-1,62	-2,82	-3,32
15°	-4,26	-1,76	-2,46
30°	-4,02	-2,77	-2,66
45°	-1,22	-3,29	-3,65
60°	-3,04	-2,12	-2,07
75°	-1,40	-1,78	-2,12
90°	-0,88	-1,80	-2,69

Ďalej boli vyhodnotené a analyzované celkové predĺženie pri maximálnom zaťažení  $A_{gt}$  (počítané z predĺženia zisteného 2D DIC analýzou pri maximálnom zaťažení) a celková ťažnosť  $A_t$  (počítané z predĺženia zisteného 2D DIC analýzou v okamžiku lomu), pozri obr. 31. Obe tieto charakteristiky zahŕňajú aj elasticitu materiálu. Pri vysokých rýchlostiach deformácie boli pozorované vyššie hodnoty oboch sledovaných veličín, ako boli pri nižších rýchlostiach. Tieto výsledky sa zhodujú so závermi, ktoré sú prezentované v [24].

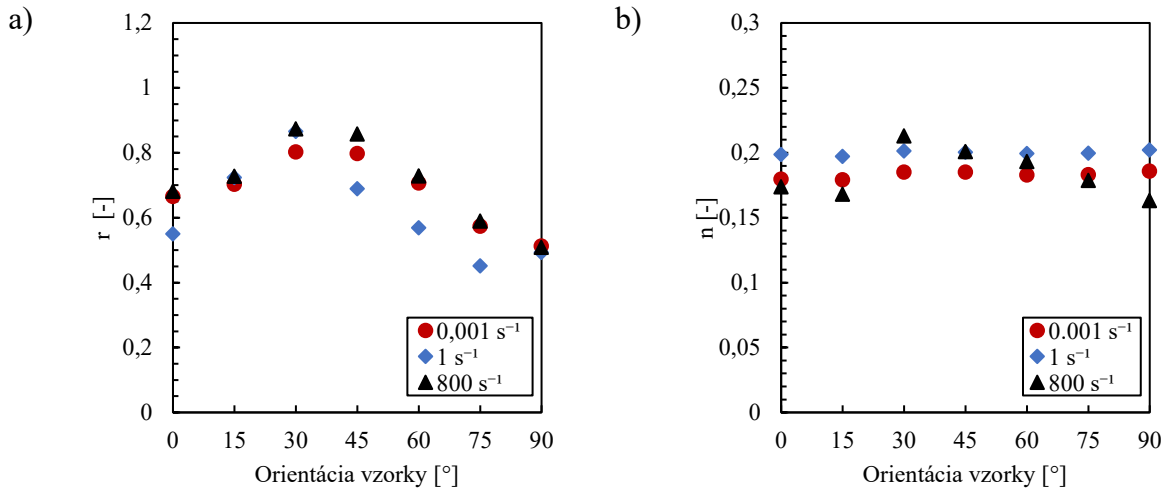


Obr. 31 a) Celkové predĺženie pri maximálnom zaťažení a b) celková ťažnosť v závislosti na orientácii vzoriek [1].

Lankfordov koeficient bol pri všetkých meraniach nižší ako 1, čo je možné vidieť aj na obr. 32a. Na základe hodnôt je možné konštatovať, že pri ťahovom zaťažovaní sa materiál výraznejšie

deformuje v smere hrúbky vzorky než v smere šírky. Takýto stav nie je vhodný z pohľadu tvárnenia, pretože materiál je náchylnejší na vznik trhlín. Podobný priebeh závislosti Lankfordovho koeficientu na orientácii vzorky bol zistený aj v [27].

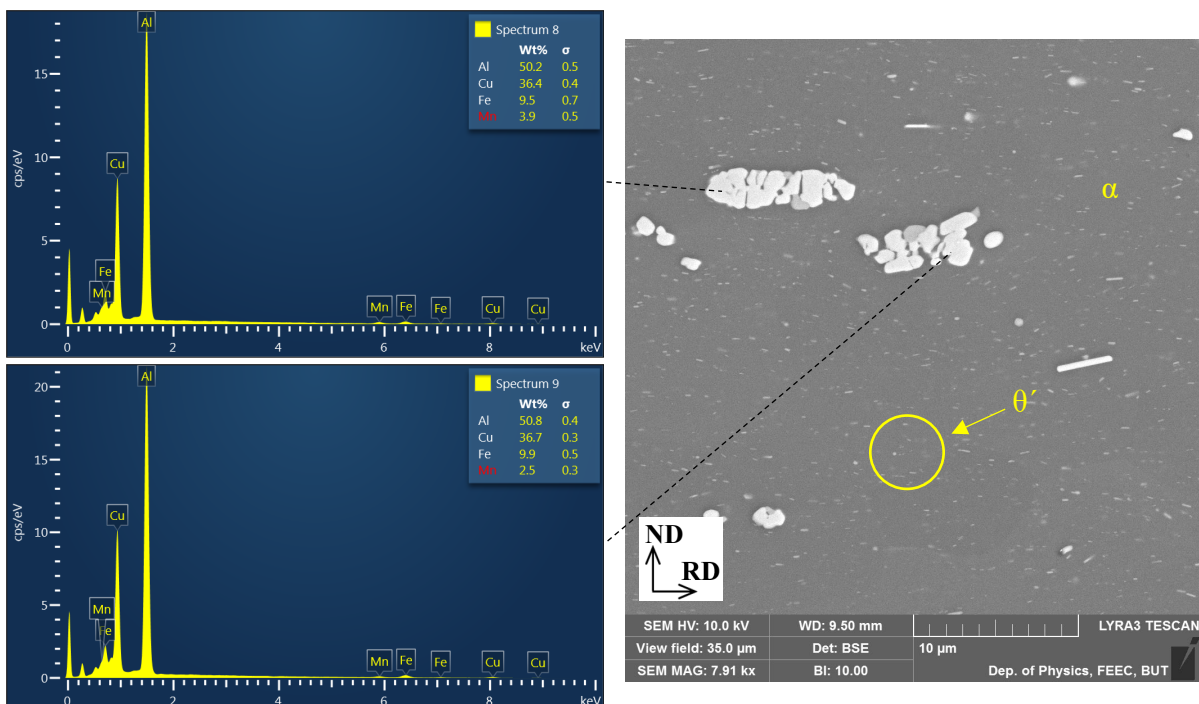
Exponent deformačného spevnenia nie je výrazne ovplyvnený rýchlosťou deformácie ani anizotropiou materiálu (obr. 32b). Odchýlky u vysokých rýchlostiach deformácie môžu byť spôsobené osciláciami závislosti napätie-deformácia, z ktorých je hodnota určená.



Obr. 32 a) Lankfordov koeficient a b) exponent deformačného spevnenia v závislosti na orientácii vzoriek [1].

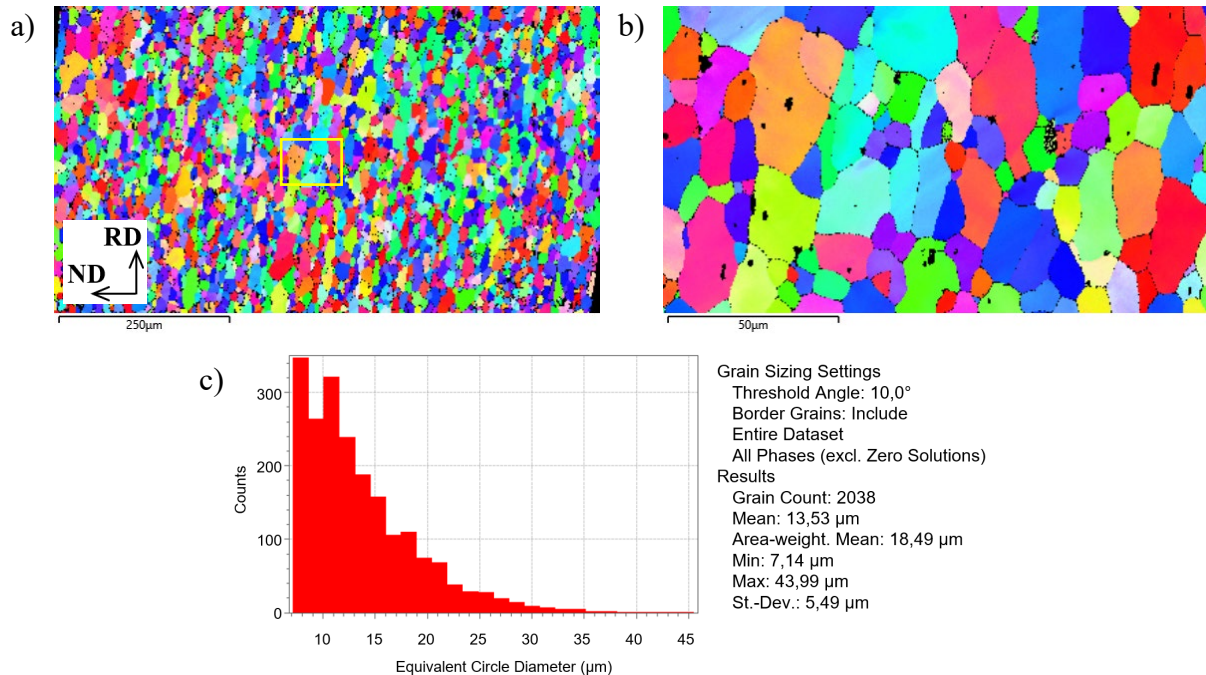
## 5.2.2 Štruktúrna analýza a fraktografia

Snímka v pozdĺžnej rovine východiskového materiálu získaná pomocou SEM je na obr. 33. Mikroštruktúra je tvorená tuhým roztokom  $\alpha$  s FCC mriežkou (na báze Al), intermetalickými fázami na báze Al-Cu-Fe-Mn a drobnou disperziou intermetalickej fázy Al<sub>2</sub>Cu ( $\theta'$ ). Tyčinková morfológia častíc  $\theta'$  odpovedá stavu tepelného spracovania T3 (stav po rozpúšťacom žíhaní, tvárnení za studena s následným prirodzeným starnutím). [70]



Obr. 33 Mikroštruktúra materiálu vo východiskovom stave v pozdĺžnej rovine plechu.

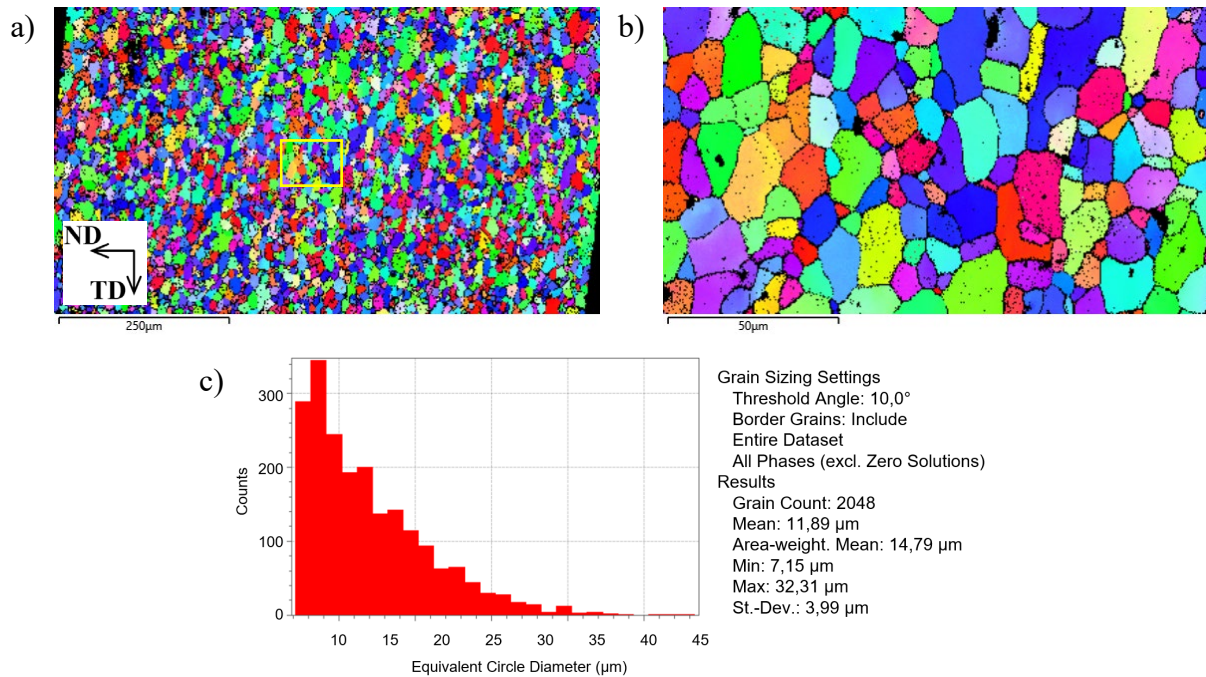
Na obr. 34 sú výsledky EBSD analýzy východiskového stavu v pozdĺžnej rovine plechu. Veľkosť zrna bola stanovená pomocou obrazovej analýzy a metódy ekvivalentného priemeru, ktorý je definovaný ako priemer kruhu s rovnakou plochou, akú má zrno nepravidelného tvaru. Dáta ukazujú, že priemerná veľkosť zrna je približne  $14 \pm 5 \mu\text{m}$ . Mapy inverzného pólového obrazca (angl. inverse pole figure – IPF) boli vyhotovené v dvoch zväčšeniach. Pri malých zväčšeniach mala sledovaná oblasť veľkosť približne  $800 \times 450 \mu\text{m}$  a veľkosť kroku bola  $2 \mu\text{m}$ . V prípade väčších zväčšení bola sledovaná oblasť približne  $160 \times 90 \mu\text{m}$ , pričom bol použitý krok  $0,4 \mu\text{m}$ . Výsledky ukazujú, že zrná sú mierne predĺžené v smere valcovania.



Obr. 34 EBSD analýza východiskového stavu materiálu v pozdĺžnej rovine plechu a) IPF mapa b) detailný pohľad a c) analýza veľkosti zrna.

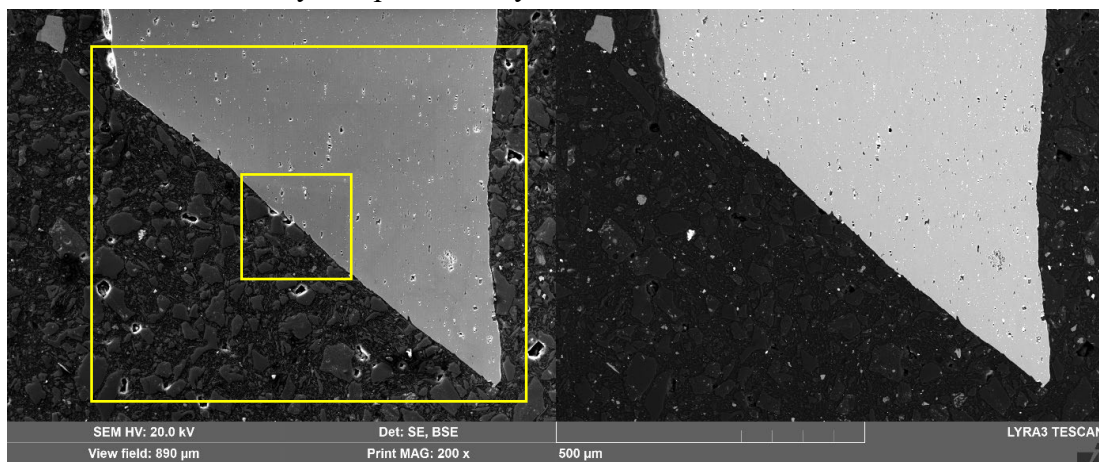
Výstupy EBSD analýzy východiskového stavu materiálu v priečnej rovine plechu prezentuje obr. 35. Metódou ekvivalentného priemeru bola zistená priemerná veľkosť zrna približne  $12 \pm 4 \mu\text{m}$ . Táto o niečo menšia veľkosť odpovedá priečnemu smeru, v ktorom nie je viditeľné predĺženie spôsobené valcovaním.

Predĺžené zrná v pozdĺžnej rovine prispievajú k vyššej pevnosti materiálu v smere valcovania, čo dokazujú aj výsledky ťahových skúšok pre orientáciu vzoriek  $0^\circ$ , pozri obr. 29. Táto smerovosť štruktúry má tiež vplyv na pozorovanú anizotropiu vlastností.



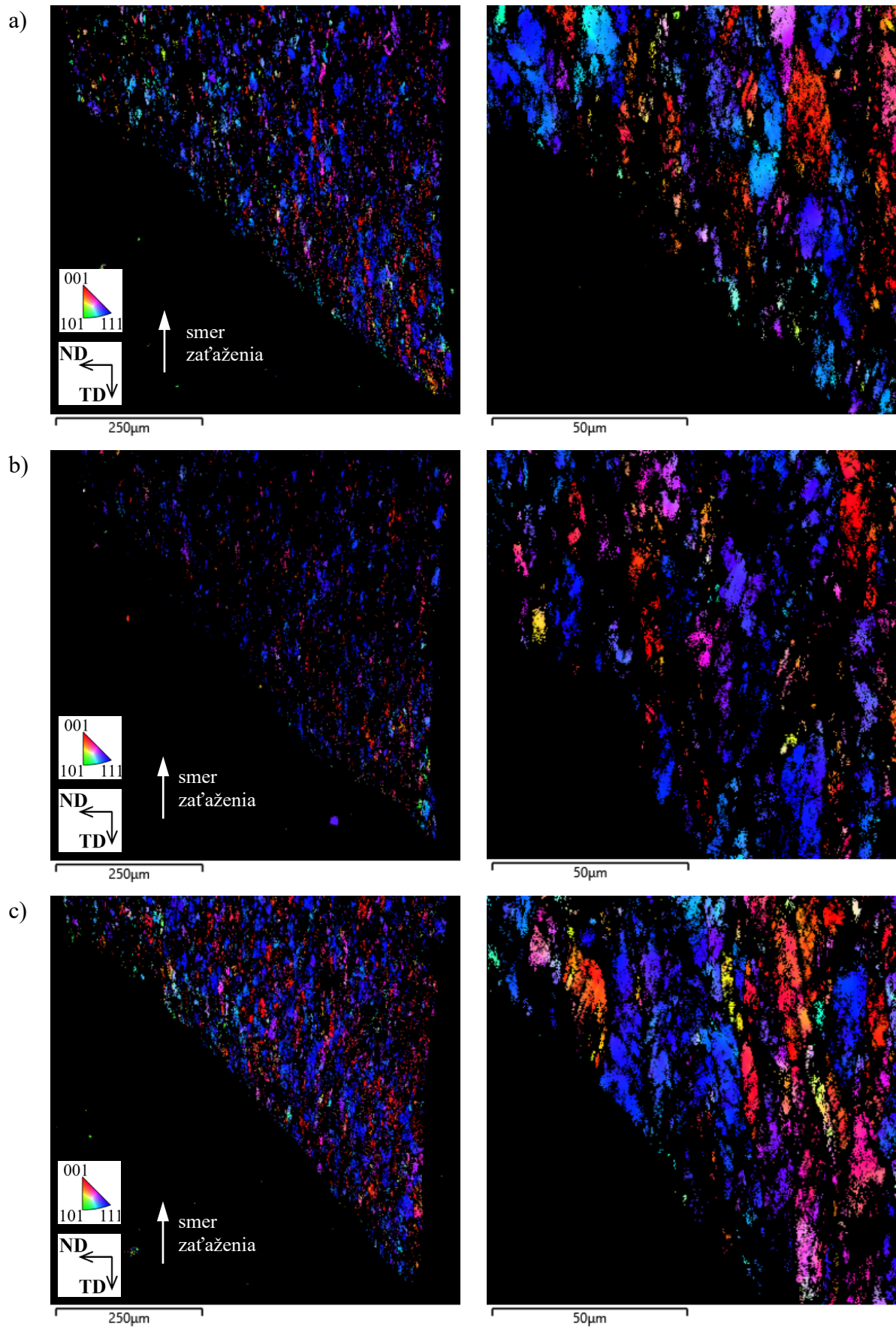
Obr. 35 EBSD analýza východiskového stavu materiálu v priechnej rovine plechu a) IPF mapa b) detailný pohľad a c) analýza veľkosti zrna.

Analýze EBSD boli ďalej podrobené vzorky s orientáciou  $90^\circ$ , ktoré boli vystavené ťahovému zaťaženiu pri rôznych rýchlostiach deformácie. Sledovaná bola bočná strana miesta porušenia, čo u danej orientácie odpovedá priechnej rovine plechu. Obr. 36 ukazuje príklad prehľadovej SEM snímky vzorky testovanej pri rýchlosti deformácie  $0,001 \text{ s}^{-1}$ , vytvorenej v režime SE a BSE. Ostatné vzorky po ťahovej skúške pri rýchlosti deformácie  $1$  a  $800 \text{ s}^{-1}$  vyzerali na prehľadovej snímke podobne. Oblasti analyzované pomocou EBSD, ktoré sú vyznačené žltými obdĺžnikmi, boli vybrané tak, aby pri malom zväčšení bolo snímané celé miesto porušenia a pri väčšom zväčšení bola zachytená predovšetkým deformácia zrn v oblasti krčka.



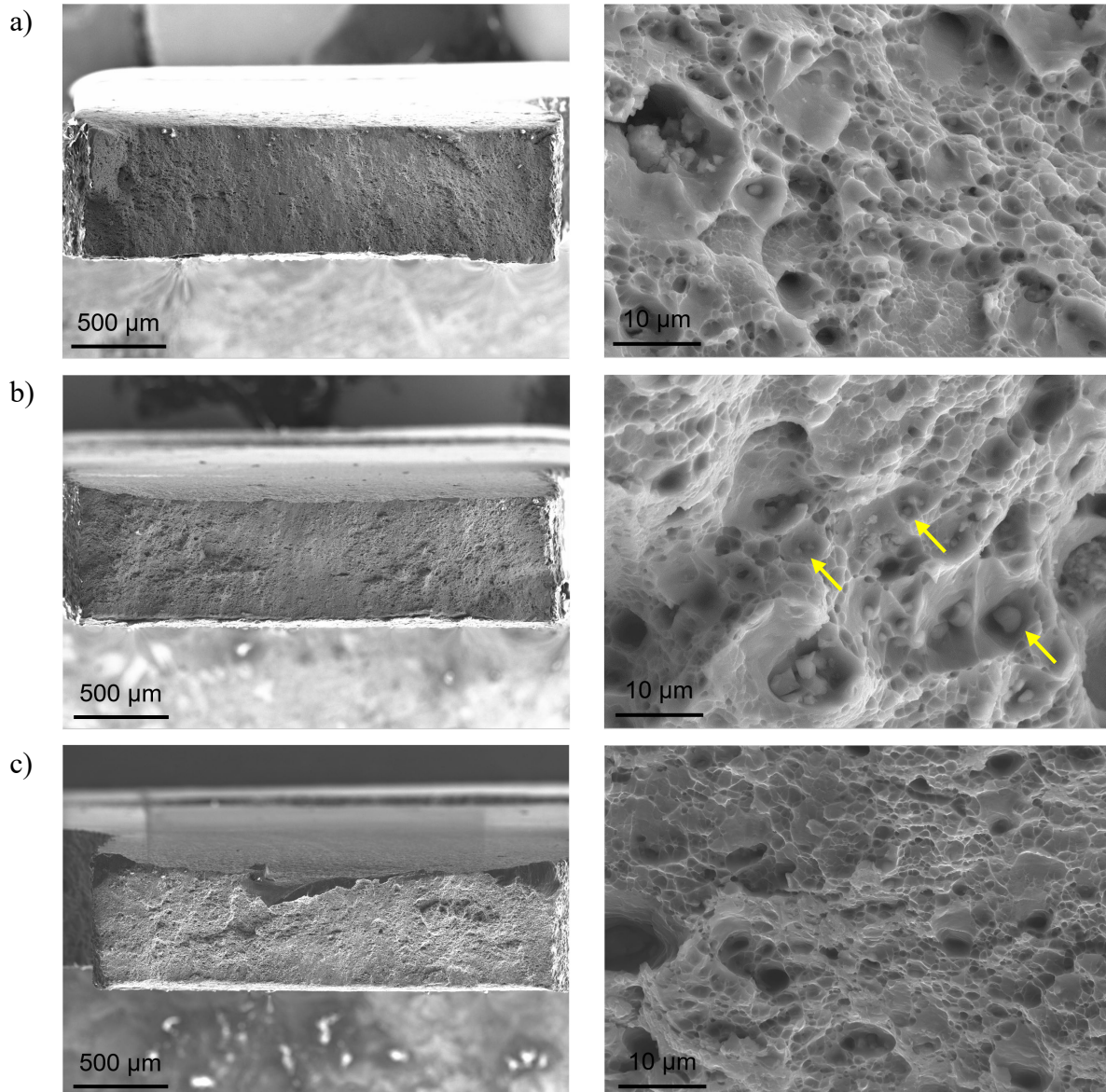
Obr. 36 SEM snímka vzorky s orientáciou  $90^\circ$  po ťahovej skúške pri rýchlosti deformácie  $0,001 \text{ s}^{-1}$  v zobrazení s použitím SE (vľavo) a BSE (vpravo). Žlté obdĺžniky vyznačujú oblasti pre EBSD.

Výsledky EBSD analýzy na vzorkách po ťahových skúškach sú na obr. 37. V porovnaní s východiskovým materiálom, je podiel neindexovaných oblastí, t. j. množstvo čiernych bodov, kde nebolo možné priradiť správnu orientáciu kryštálu, výrazne väčší. Neindexované dátové body sú umiestnené prevažne na hraniciach zrn, pretože v týchto miestach sa difrakčné obrazce susedných zrn prekrývajú. Ďalším dôvodom veľkého výskytu je prítomnosť dutiniek (obr. 36) a oblastí s veľmi výraznou plastickou deformáciou. Snímky (obr. 37) ukazujú, že pri zaťažení došlo k predĺženiu zrn v smere pôsobiacej sily.

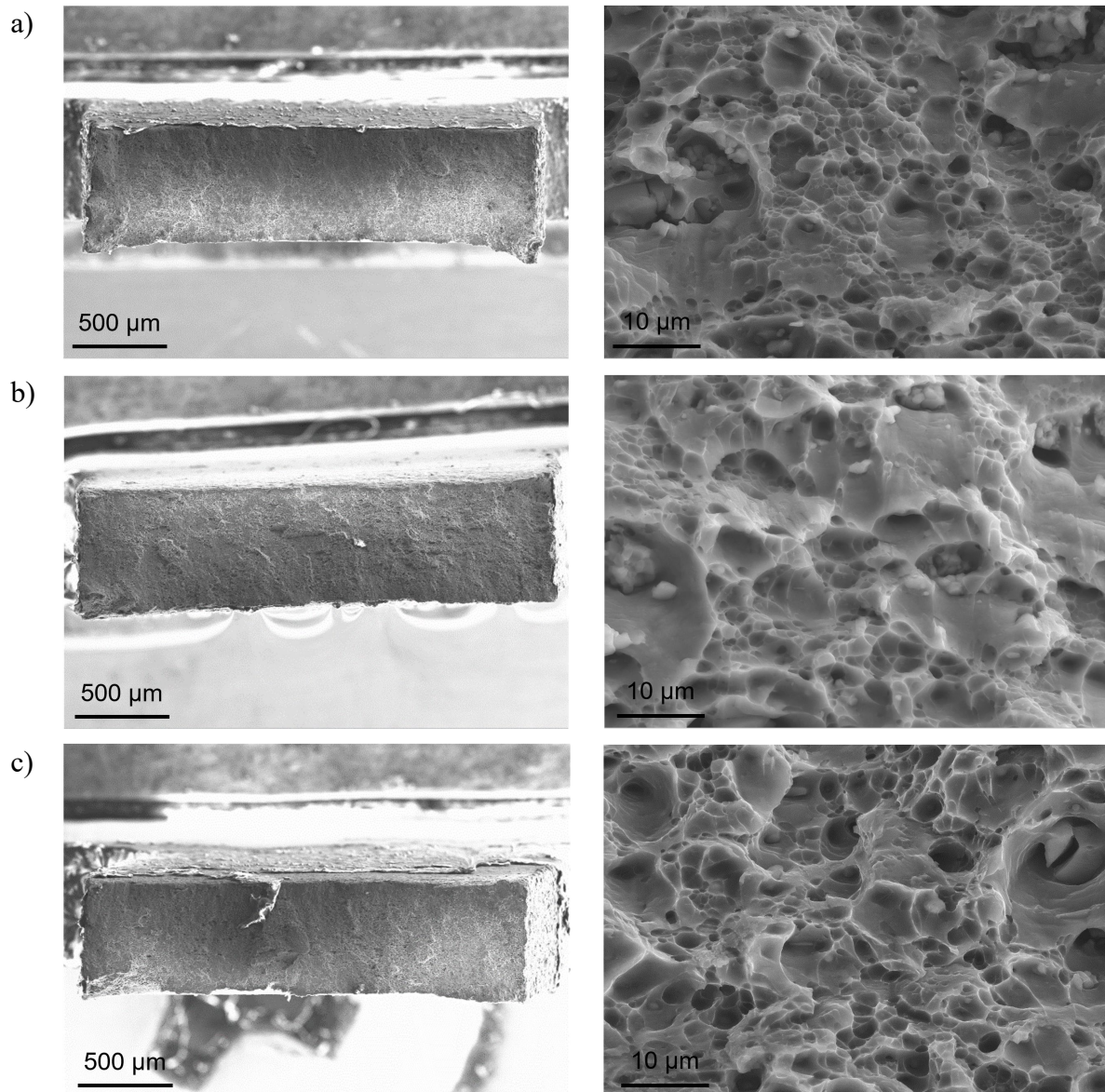


Obr. 37 IPF mapy v malom zväčšení (vľavo) a detail strednej časti (vpravo) pre vzorky s orientáciou  $90^\circ$  testované pri rýchlostiach deformácie a)  $0,001 \text{ s}^{-1}$ , b)  $1 \text{ s}^{-1}$  a c)  $800 \text{ s}^{-1}$ .

Lomové plochy boli skúmané pri rôznych zväčšeniach na vzorkách odobraných v smere  $45^\circ$  a  $90^\circ$ , ktoré boli vystavené ťahovému zaťaženiu pri rýchlostiach deformácie  $0,001$ ;  $1$  a  $800 \text{ s}^{-1}$ , pozri obr. 38 a 39. Detailný pohľad zachytáva krajnú oblasť vzorky. Na snímkach sú viditeľné ploché jamky, tie naznačujú, že mechanizmom porušenia bol nízkoenergetický tvárny lom. Jeho vznik je sprevádzaný tromi etapami: nukleáciou, rastom a koalescenciou porúch. V niektorých jamkách je možné pozorovať zvyšky intermetalických fáz, ktoré predstavujú koncentrátoři napätia (obr. 38b). Tvar a orientácia jamiek môžu odhaliť typ zaťažovania a smer šírenia trhliny. Rovnoosé jamky indikujú pôsobenie ťahového zaťaženia. Vplyv zmeny rýchlosti deformácie na charakter lomovej plochy nebol pozorovaný.



Obr. 38 Snímky lomových plôch vzoriek odobraných v smere  $45^\circ$ , ktoré boli vystavené ťahovému zaťaženiu pri rýchlosti deformácie a)  $0,001 \text{ s}^{-1}$ , b)  $1 \text{ s}^{-1}$  a c)  $800 \text{ s}^{-1}$  [1].



Obr. 39 Snímky lomových plôch vzoriek odobraných v smere  $90^\circ$ , ktoré boli vystavené ťahovému zaťaženiu pri rýchlosti deformácie a)  $0,001 \text{ s}^{-1}$ , b)  $1 \text{ s}^{-1}$  a c)  $800 \text{ s}^{-1}$  [1].

### 5.2.3 Materiálový model Johnson-Cook

Materiálový model Johnson-Cook, podľa vzťahu (4.19), popisuje plastické správanie materiálu pri zaťažení, pričom pomocou piatich parametrov zohľadňuje vplyv deformácie, rýchlosti deformácie a teploty. Keďže ťahové skúšky boli vykonané len pri izbovej teplote, nie je možné zahrnúť vplyv posledného spomenutého procesného činiteľa. Skutočné závislosti napätie-deformácia, použité pre definovanie tohto materiálového modelu, sú získané z meraní na vzorkách orientovaných v smere  $0^\circ$ . Navyše ich počiatok je posunutý do medze klzu, takže ide o závislosti na skutočnej plastickej deformácii.

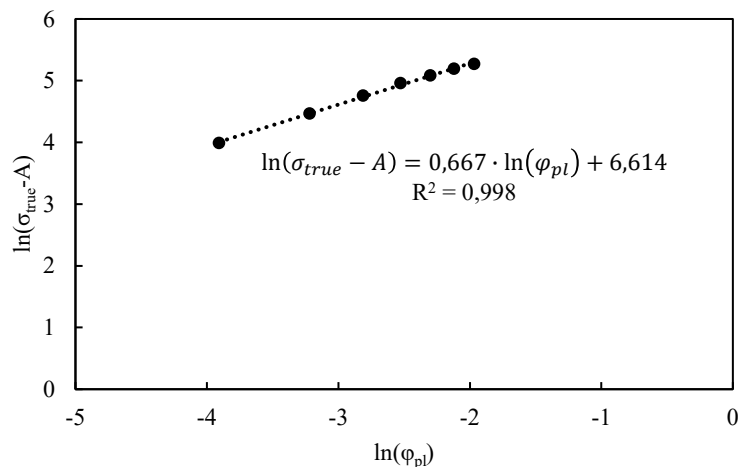
Určenie parametrov spočíva v izolovaní jednotlivých častí konštitutívneho vzťahu. Pre stanovenie hodnôt  $A$ ,  $B$  a  $n$  je zanedbaný vplyv rýchlosti deformácie aj teploty a vzťah je transformovaný do tejto podoby [71]:

$$\sigma_{true} = (A + B \cdot \varphi_{pl}^n). \quad (5.3)$$

V modeli Johnson-Cook predstavuje  $A$  hodnotu zmluvnej medze klzu pri referenčnej skúške, ktorou je zvolená ťahová skúška pri rýchlosti deformácie  $1 \text{ s}^{-1}$ . Parametre  $B$  a  $n$  potom vyjadrujú, akým spôsobom sa mení hodnota skutočného napätia s nárastom deformácie a sú získané pomocou vzťahu (5.4), ktorý vznikol úpravou a zlogaritmovaním vzťahu (5.3) [71]:

$$\ln(\sigma_{true} - A) = n \cdot \ln(\varphi_{pl}^n) + \ln(B). \quad (5.4)$$

Vynesením niekoľkých bodov závislosti  $\ln(\sigma_{true} - A) - \ln(\varphi_{pl})$ , získaných z referenčnej skúšky a ich preložením lineárnou funkciou (obr. 40), je možné určiť  $n$  ako sklon lineárnej funkcie a  $\ln(B)$  ako hodnotu, ktorá odpovedá jej priesečníku s vertikálnou osou. Na základe tohto postupu bolo zistené, že  $A = 341 \text{ MPa}$ ,  $B = 746 \text{ MPa}$  a  $n = 0,667$ .



Obr. 40 Závislosť  $\ln(\sigma_{true} - A) - \ln(\varphi_{pl})$ .

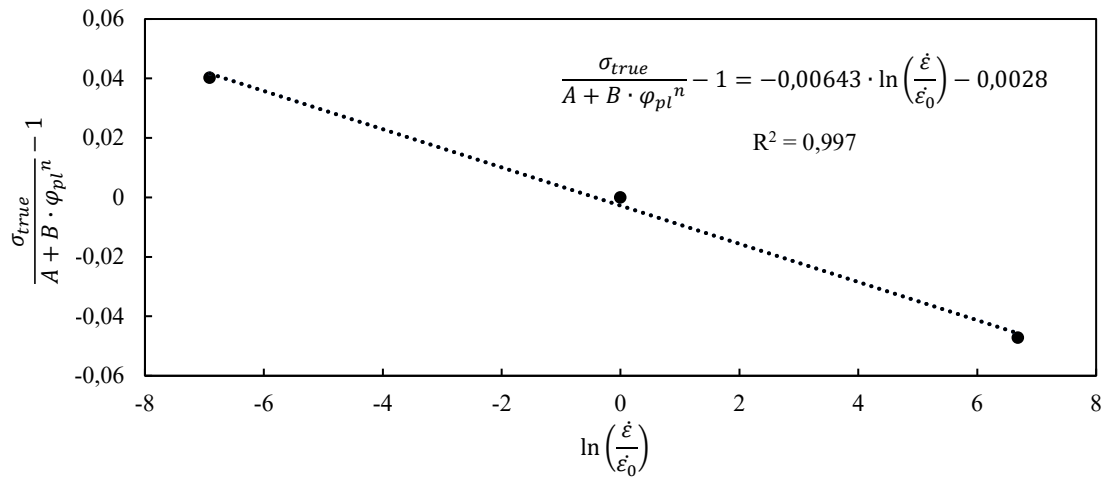
Pre určenie vplyvu rýchlosti deformácie sa zanedbáva vplyv teploty a rovnica je v nasledujúcom tvare [71]:

$$\sigma_{true} = (A + B \cdot \varphi_{pl}^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right). \quad (5.5)$$

Parametre  $A$ ,  $B$  a  $n$  sú známe z predchádzajúceho kroku. Hodnota  $C$  sa zistí podľa [71]:

$$\frac{\sigma_{true}}{A + B \cdot \varphi_{pl}^n} - 1 = C \cdot \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right). \quad (5.6)$$

Opäť sa pritom využíva predchádzajúci postup a vynáša sa niekoľko bodov závislosti, ktoré sú aproximované lineárnou funkciou, pozri obr. 41. Za napätie  $\sigma_{true}$  je dosadená zmluvná medza klzu získaná pri rýchlosti deformácie  $0,001; 1$  a  $800 \text{ s}^{-1}$ . Zmluvnú medzu klzu ( $R_{p0,2} = 325 \text{ MPa}$ ) zo skúšky vykonanej na zariadení SHTB bolo možné určiť vďaka tomu, že oscilácie v tejto časti konkrétnej závislosti napätie-deformácia nie sú príliš výrazné. Parameter  $C$  odpovedá smernici lineárnej závislosti (obr. 41), takže jeho hodnota je  $-0,00643$ .


 Obr. 41 Závislosť  $\left(\frac{\sigma_{true}}{A+B \cdot \varphi_{pl}^n} - 1\right) - \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)$ .

Vypočítané parametre materiálového modelu Johnson-Cook sú zhrnuté v tab. 6.

Tab. 6 Parametre materiálového modelu Johnson-Cook pre hliníkovú zliatinu EN AW-2024 – T3.

Parameter materiálového modelu Johnson-Cook	$A$ [MPa]	$B$ [MPa]	$n$ [-]	$C$ [-]	$\dot{\epsilon}_0$ [s <sup>-1</sup> ]
Hodnota parametra	341	746	0,667	-0,00643	1

## 6 VLASTNOSTI ZLIATINY EN AW-2024 – T3 V MÄKKOM STAVE

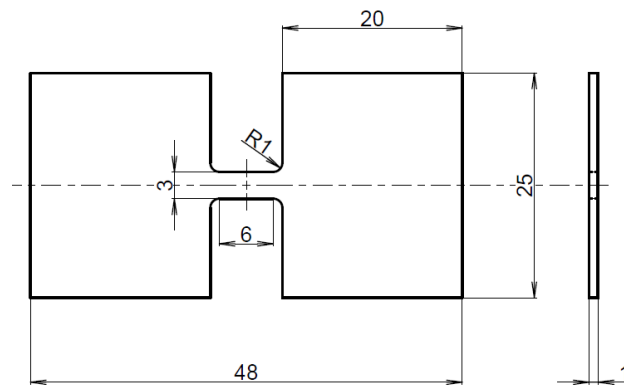
Rozpúšťacie žihanie a následné dostatočne rýchle ochladenie vedie u vytvrditeľných hliníkových zliatin k vzniku presýteného tuhého roztoku. V tomto, mäkkom stave, materiál vykazuje nižšiu pevnosť, má lepšie plastické vlastnosti a je vhodný na tvárnenie. Doba, počas ktorej je odporúčané jeho spracovanie, je však obmedzená, pretože aj pri izbovej teplote dochádza bezprostredne po ochladení k prirodzenému starnutiu, čo vedie k zvyšovaniu pevnosti. [2]

### 6.1 Materiál a metódy

Východiskovým materiálom pre skúmanie mechanických vlastností a tváriteľnosti v mäkkom stave bola zliatina EN AW-2024 – T3 vo forme plechu s hrúbkou 1 mm. Tepelné spracovanie vzoriek zahŕňalo rozpúšťacie žihanie v peci bez ochrannej atmosféry pri teplote 510 °C a dobe výdrže 70 minút, nasledované rýchlym ochladením vo vode s teplotou 20 °C.

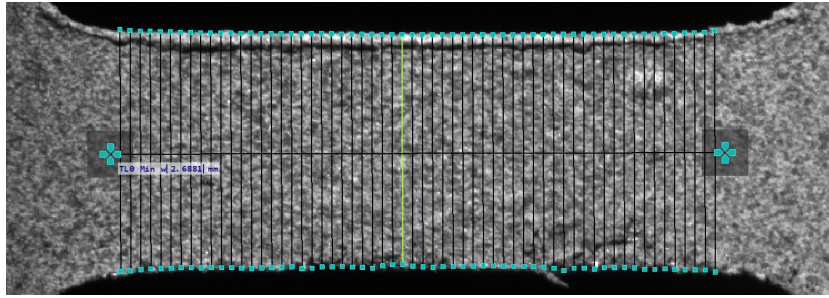
Ťahové skúšky boli vykonané na univerzálnom skúšobnom stroji Zwick Z020-TND, ktorý umožňuje vyvolať maximálne zaťaženie 20 kN. Okrem vplyvu tepelného spracovania bol pozorovaný aj vplyv rýchlosti deformácie na správanie materiálu. Testovanie preto prebiehalo na vzorkách pred tepelným spracovaním a bezprostredne po ňom (do 15 minút), pri dvoch nastaveniach rýchlosti pohybu priečnika, ktorými sa dosiahla rýchlosť deformácie približne 0,0007 a 0,18 s<sup>-1</sup>. Tieto rýchlosti deformácie odpovedajú zaťažovaniu v režime kvazistatických a stredných rýchlostí deformácie. Pre každé nastavenie okrajových podmienok sa uskutočnili minimálne dve opakovania.

Vzorky pre ťahové skúšky, ktorých tvar a rozmery ukazuje obr. 42, boli vyrobené technológiou rezania vodným lúčom. Vzorky boli zbavené ostrín, iné úpravy vzniknutých povrchov neboli realizované. Keďže anizotropia materiálu nebola skúmaná, ich orientácia odpovedá smeru valcovania (0°). Upínanie vzoriek bolo riešené pomocou plochých čel'ustí.



Obr. 42 Geometria a rozmery vzorky pre ťahové skúšky.

Deformácia vzoriek sa získala 2D DIC analýzou s využitím monochromatickej kamery FLIR Blackfly S USB3 s objektívom TEC-M55MPW. Na osvetlenie sa použil zdroj monochromatického zeleného svetla. Frekvencia snímania bola pre nižšiu rýchlosť deformácie 1 Hz a pre vyššiu 200 Hz. Snímky spracoval softvér Alpha, verzia 2023.1.44 od spoločnosti X-Sight s.r.o. Veľkosť štvorcových podoblastí pre koreláciu bola stanovená na 37 × 37 pixelov. Pre vyhodnotenie deformácie v smere zaťažovania a v smere šírky vzorky sa využila funkcia Trans Line (obr. 43), ktorá pracuje na princípe virtuálneho extenzometra. Vzorky boli pred meraním očistené a odmastené a na ich povrch sa naniesol vzor pomocou striekacej pištole tvorený čiernymi bodkami na bielom pozadí.



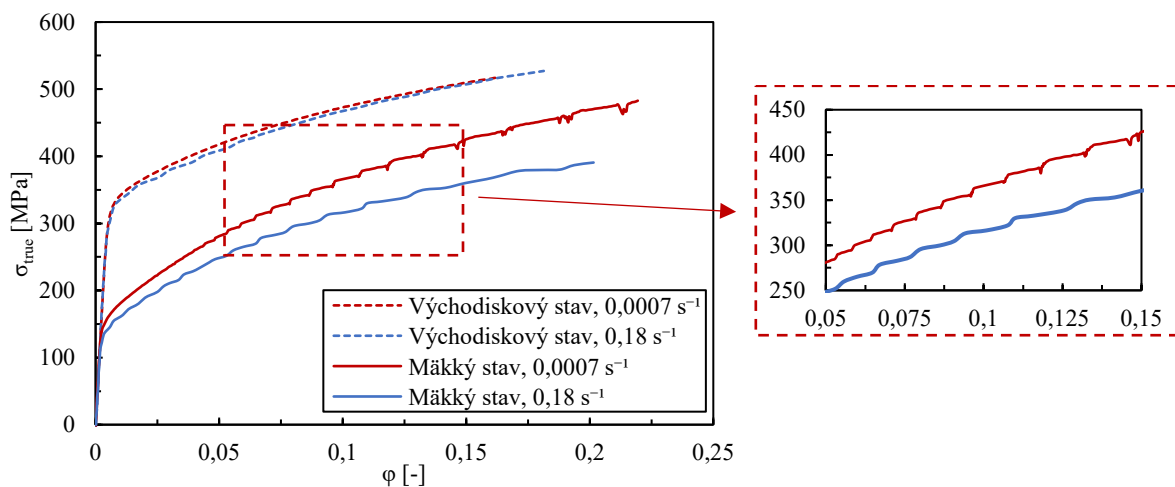
Obr. 43 Vyhodnotenie deformácií v smere šírky vzorky pomocou funkcie Trans Line.

Skutočné závislosti napätie-deformácia a hodnoty Lankfordovho koeficientu a exponentu deformačného spevnenia boli vyhodnotené podľa rovnakého postupu, aký sa použil pri skúmaní materiálu vo vytvrdenom stave, ktorý je prezentovaný v podkapitole 5.1.1.

## 6.2 Výsledky a diskusia

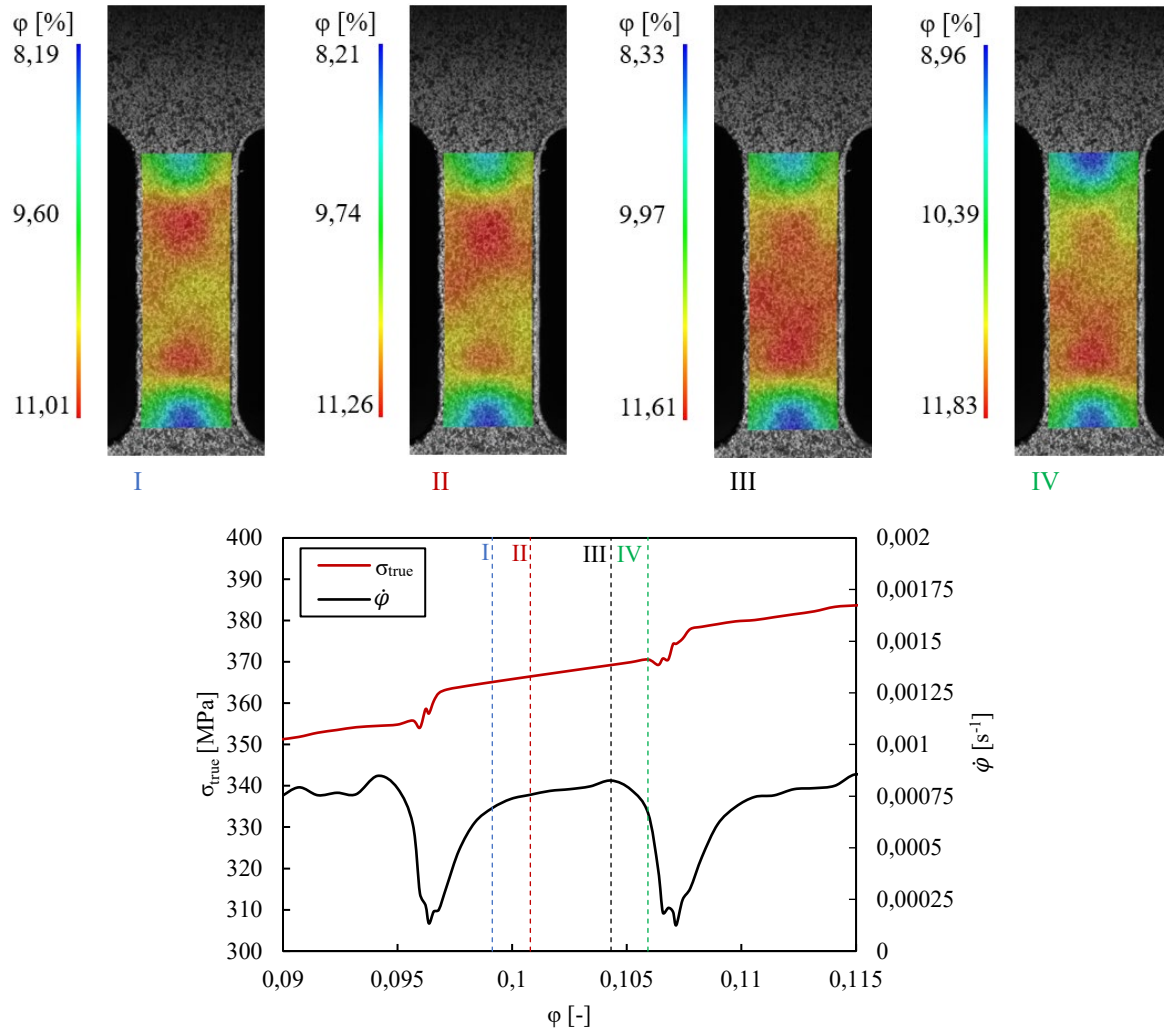
Obr. 44 zobrazuje skutočné závislosti napätie-deformácia pre dva stavy materiálu skúšané ťahovým zaťažением pri rýchlosti deformácie  $0,0007$  a  $0,18 \text{ s}^{-1}$ , ktoré sú vykreslené do okamžiku vzniku krčka. Rozpúšťacie žihanie a následné rýchle ochladenie spôsobili výrazný pokles pevnosti materiálu, vďaka rozpusteniu vytvrdzujúcich precipitátov v tuhom roztoku  $\alpha$ .

Zliatina sa vo východiskovom stave javí ako necitlivá na rýchlosť deformácie a s nárastom rýchlosti deformácie dochádza len k minimálnemu poklesu pevnosti. Naopak, mäkký stav vykazuje výraznú negatívnu citlivosť na rýchlosť deformácie (NSRS). Ako sa prezentovalo v predošlých kapitolách, tento jav je možné pripisovať dynamickému deformačnému starnutiu (DSA), čo potvrdzuje aj prítomnosť Portevin-Le Chatelierovho (PLC) efektu. K opakovanému nárastu a poklesu napätia pritom dochádza od určitej – kritickej hodnoty deformácie. Dôvodom vzniku tohto javu je zachytávanie a uvoľňovanie dislokácií cudzími atómami. To je však možné práve vtedy, keď rýchlosť pohybu dislokácii je približne rovnaká ako rýchlosť difúzie cudzích atómov. Rýchlosť difúzie rastie so zvyšovaním koncentrácie vakancií (chýbajúce atómy v mriežke), ktorá stúpa s plastickou deformáciou. Z uvedeného potom vyplýva, že hodnota kritickej deformácie, pri ktorej je PLC efekt pozorovaný, klesá so znižovaním rýchlosti deformácie. Túto skutočnosť dokazujú aj údaje získané analýzou výsledkov ťahových skúšok, keď pri kvazistatických podmienkach bola zistená hodnota kritickej deformácie  $0,02495$  a v režime stredných rýchlostí deformácie  $0,03351$ . [72; 73]



Obr. 44 Skutočné závislosti napätie-deformácia východiskového materiálu a materiálu v mäkkom stave získané z ťahových skúšok pri rýchlostiach deformácie  $0,0007$  a  $0,18 \text{ s}^{-1}$ . Detail (vpravo) ukazuje PLC efekt pozorovaný pri testoch materiálu v mäkkom stave.

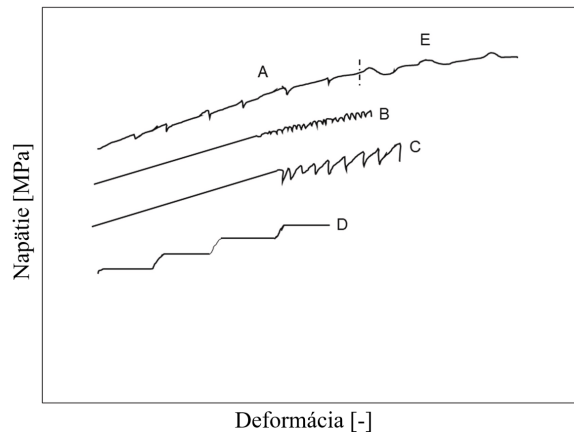
Na obr. 45 je zobrazený detail skutočnej závislosti rýchlost' deformácie-deformácia pre ťahovú skúšku materiálu v mäkkom stave pri rýchlosti deformácie  $0,0007 \text{ s}^{-1}$ . Skutočná rýchlosť deformácie bola vypočítaná podľa vzťahu (3.8). Závislosť je prezentovaná v kontexte so skutočným napätím, pričom je možné sledovať, že pokles a nárast napätia je vždy sprevádzaný rovnakým trendom aj u rýchlosti deformácie.



Obr. 45 Šírenie deformačného pásu a detail skutočných závislostí rýchlosť deformácie-deformácia a napätie-deformácia pre materiál v mäkkom stave testovaný pri rýchlosti deformácie  $0,0007 \text{ s}^{-1}$ .

Okrem výkyvov na závislostiach napätie-deformácia je možné PLC efekt sledovať aj na deformačných mapách získaných DIC analýzou. Šírenie deformačného pásu v mernej časti vzorky pri testovaní materiálu v mäkkom stave pri rýchlosti deformácie  $0,0007 \text{ s}^{-1}$  je na obr. 45. Deformačné pásy vznikali vždy na tom istom konci vzorky a plynule sa šírili k druhému koncu. Každý výkyv na závislosti napätie-deformácia odpovedá vzniku nového deformačného pásu.

V závislosti na okrajových podmienkach, rýchlosti deformácie a teplote môže dochádzať k šíreniu deformačných pásov rôznymi spôsobmi, čo ovplyvňuje aj tvar výkyvov na závislostiach napätie-deformácia. Na základe toho sa rozlišuje päť typov, označených písmenami A, B, C, D a E, pozri obr. 46. S ohľadom na tvar závislostí napätie-deformácia a charakteristický spôsob šírenia deformačných pásov popísaný vyššie je zrejmé, že v tomto prípade ide o typ A. [74]



Obr. 46 Typy výkyvov pri PLC efekte [74].

Základné charakteristiky materiálu vo východiskovom a mäkkom stave sú v tab. 7. Po tepelnom spracovaní je pozorovaný pokles zmluvnej medze klzu viac ako 50 %. Hodnoty Lankfordovho koeficientu pre oba stavy napovedajú, že pri tvárnení prevláda deformácia v smere hrúbky nad deformáciou v smere šírky polotovaru. Takéto správanie môže pri procesoch, ako je napr. hlboké ťahanie, viesť k predčasnému vzniku trhliny. Na druhej strane, exponent deformačného spevnenia vykazuje po tepelnom spracovaní výrazný nárast, čo je pre materiál určený na tvárnenie žiaduce. Vyššie hodnoty exponentu deformačného spevnenia všeobecne znamenajú, že materiál rýchlejšie spevňuje, deformuje sa rovnomernejšie a je schopný väčšej deformácie, než dôjde k vzniku krčka. Rýchlosť deformácie má z uvedených charakteristík výraznejší vplyv len na zmluvnú medzu klzu, a to najmä u materiálu v mäkkom stave.

Ďalšie charakteristiky, používané pre posúdenie mechanických vlastností a tváriteľnosti, napr. ťažnosť a medza pevnosti neboli vyhodnocované, pretože u všetkých vzoriek v mäkkom stave došlo k porušeniu v blízkosti miesta prechodu mernej časti do zaoblenia. Jednou z príčin, ktoré to mohli spôsobiť, je nárast vrubovej citlivosti materiálu po tepelnom spracovaní. Prispieť k tomu ale mohla aj prítomnosť PLC efektu. Táto materiálová nestabilita často vedie k predčasnému porušeniu materiálu.

Tab. 7 Základné charakteristiky východiskového materiálu a materiálu v mäkkom stave.

Stav materiálu	Rýchlosť deformácie $\dot{\epsilon}$ [s <sup>-1</sup> ]	Zmluvná medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Lankfordov koeficient $r$ [-]	Exponent deformačného spevnenia $n$ [-]
východiskový	0,0007	325	0,64	0,170
	0,18	310	0,69	0,178
mäkký	0,0007	155	0,54	0,333
	0,18	140	0,55	0,331

## 7 HOPKINSONOV ŤAHOVÝ TEST

Návrh zariadenia SHTB určeného na testovanie vzoriek s kruhovým prierezom a pre ploché vzorky využíva vybavenie dostupné na Ústave strojírenské technologie Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, které sa v súčasnosti používa na tlakové skúšky pri vysokých rýchlostiach deformácie. Základňu tohto zariadenia tvoria nosníky a pneumatický kanón, pozri obr. 47.

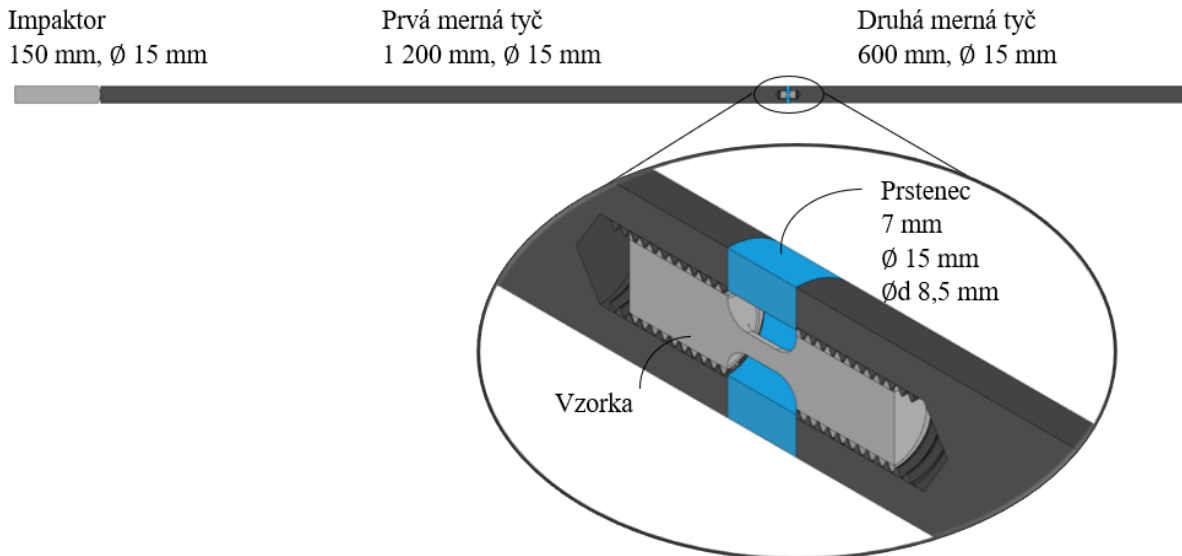


Obr. 47 Základňa pre Hopkinsonov test na Ústave strojírenské technologie Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně.

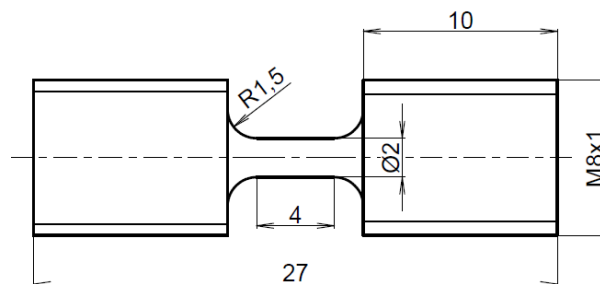
Z overených modifikácií zariadenia pre SHTB bolo vybrané riešenie využívajúce prstenc, ktoré prezentoval Nicholas [49]. Princíp funkcie je popísaný v podkapitole 3.3.2. K hlavným dôvodom, prečo bolo zvolené toto riešenie, patrí predovšetkým jednoduchá konštrukcia, ktorá neobsahuje veľa rozhraní vedúcich k čiastočnému odrazu pulzov, čo môže spôsobiť chyby merania. Výhodu tiež predstavuje možnosť využitia základne pre SHPB bez nutnosti výraznejších úprav. Podľa dostupnej literatúry je toto riešenie využívané len pre testovanie vzoriek s kruhovým prierezom upínaných pomocou závitov. Navrhnutím vhodnej úpravy by sa použitie mohlo rozšíriť aj na ploché vzorky.

### 7.1 Riešenie pre testovanie vzoriek kruhového prierezu

Zostava je tvorená mernými tyčami, impaktorom a prstencom, pozri obr. 48. Merné tyče majú priemer 15 mm a dĺžky 1 200 a 600 mm. Rozmery boli volené s ohľadom na veľkosť základne a podmienku, že prvá merná tyč má mať dvojnásobnú dĺžku ako druhá merná tyč. Priemer by mal byť dostatočne malý na to, aby zabezpečil, že prejav disperzií na zaznamenaných pulzoch nebude príliš výrazný. Impaktor valcového tvaru je vyrobený z rovnakého polotovaru ako merné tyče a má priemer 15 mm. Jeho dĺžka, ktorá ovplyvňuje veľkosť deformácie vzorky, je 150 mm. Nedokonalá poloha impaktora voči prvej mernej tyči pri náraze môže viesť k ovplyvneniu tvaru zaznamenávaných pulzov, a teda aj zníženiu presnosti merania. Aby bol účinok minimalizovaný, čelo je opatrené zaoblením s veľkosťou 25 mm [75]. Prstenc má vonkajší priemer 15 mm, vnútorný priemer 8,5 mm a dĺžku 7 mm, pričom tieto miery sa volia podľa rozmerov vzorky.



Obr. 48 Schematické zobrazenie návrhu riešenia SHTB pre testovanie vzoriek kruhového prierezu. Geometria a rozmery vzorky pre navrhnuté riešenie sú zobrazené na obr. 49. Aby pri skúške došlo k porušeniu vzorky, bolo treba zvoliť čo najmenší prierez mernej časti, súčasne sa však bral ohľad aj na možnosť výroby. Vzorka je upnutá pomocou závitov M8×1, čomu sú prispôsobené aj konce merných tyčí.



Obr. 49 Geometria a rozmery vzorky kruhového prierezu.

Merné tyče, impaktor a prstenec budú vyrobené z materiálu EN AW-7075 – T6. Táto hliníková zliatina bola vybraná preto, lebo navrhované zariadenie by malo byť využívané na testovanie materiálov, ako sú hliníkové zliatiny, ktoré vykazujú nižšie hodnoty mechanickej impedancie. Ak by boli merné tyče z vysokopevnostnej ocele, ktorá má vysokú tuhosť, a teda aj mechanickú impedanciu, prenesený pulz by bol nízky a výraznejšie by sa na ňom prejavoval šum. Základné charakteristiky vybraného materiálu sú uvedené v tab. 8.

Tab. 8 Základné vlastnosti materiálu EN AW 7075 – T6 [76].

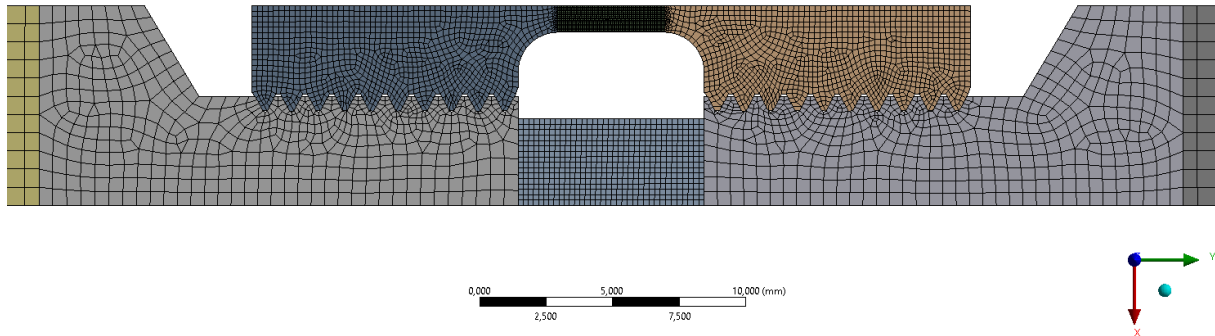
Hustota $\rho_B$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	Zmluvná medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Modul pružnosti $E_B$ [MPa]	Poissonov pomer $\mu$ [-]	Rýchlosť šírenia elastickej vlny $c_B$ [m·s <sup>-1</sup> ]
2 810	503	71 700	0,33	5 051

### 7.1.1 Numerická simulácia

V prípade experimentálnych zariadení, akým je aj to pre SHTB, je vhodné funkciu navrhnutého riešenia overiť numerickou simuláciou. Za týmto účelom bol využitý softvér ANSYS Workbench 2022 R1, modul LS-DYNA.

Geometrický model sa skladá z merných tyčí, impaktora, prstenca a vzorky. Na zjednodušenie bola úloha prevedená na 2D osovový problém, pozri obr. 50.

Veľkosť konečných prvkov sa pohybovala od 0,05 mm až po 1 mm. Najjemnejšia sieť bola vytvorená v oblasti mernej časti vzorky. V miestach, kde dochádza ku kontaktu závitov, je dĺžka hrany 0,2 mm. Sieť je tvorená prevažne štvoruholníkovými lineárnymi konečnými prvkami.

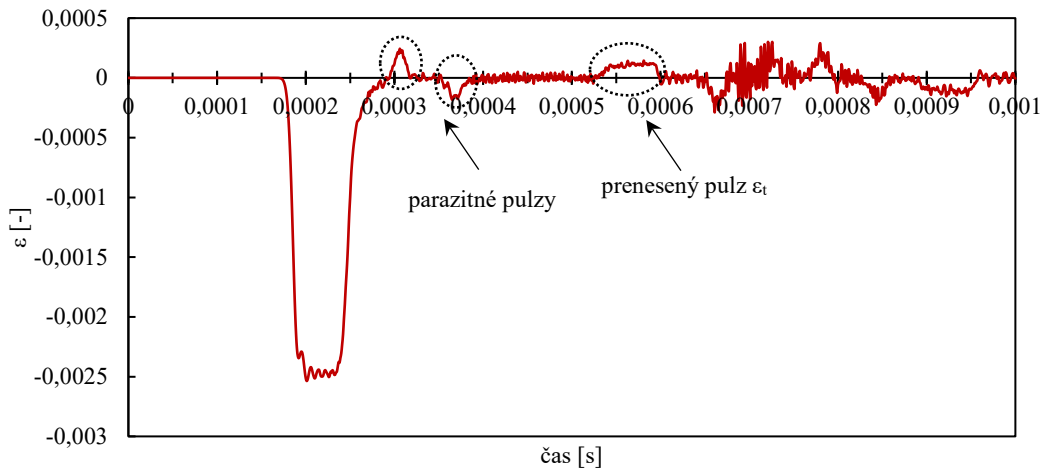


Obr. 50 Detail geometrického modelu.

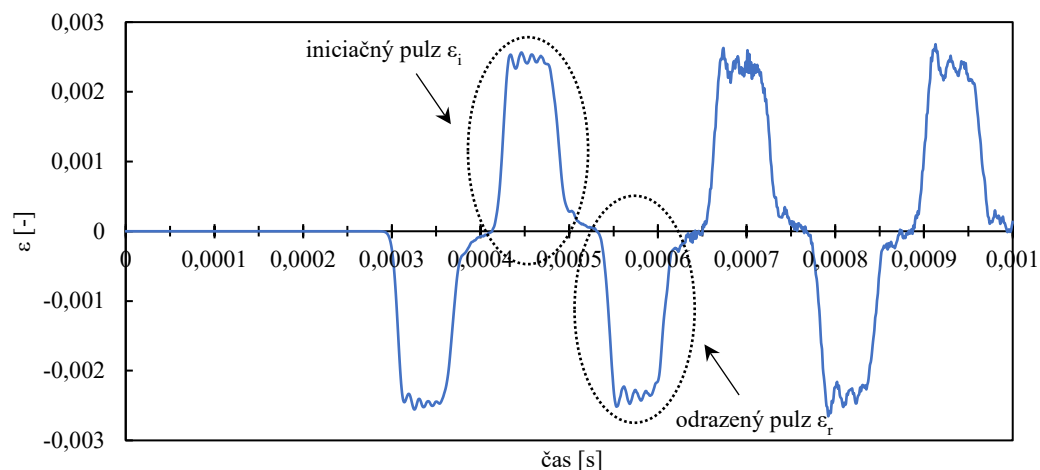
Materiál merných tyčí, impaktora a prstenca bol definovaný len hustotou, modulom pružnosti a Poissonovým pomerom, pretože sa predpokladá, že pri experimente nedochádza k plastickej deformácii týchto komponentov. Použité hodnoty uvádza tab. 8. Vzorka je z hliníkovej zliatiny EN AW-2024 – T3 s hustotou  $2\,780\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , modulom pružnosti  $73\,100\text{ MPa}$  a Poissonovým pomerom 0,33. Tieto hodnoty sú prevzaté zo zdroja [77]. Plasticke správanie bolo popísané materiálovým modelom Johnson-Cook, pozri tab. 6. Porušenie vzorky nastáva vtedy, keď efektívne plasticke pretvorenie dosiahne hodnotu 0,3, ktorá vychádza z meraní prezentovaných v [78]. Hodnota tohto parametra je len orientačná, pretože sa môže líšiť v závislosti od konkrétnych podmienok experimentu. S ohľadom na účel numerickej simulácie je tento prístup vyhovujúci.

Z hľadiska okrajových podmienok bola nastavená dopadová rýchlosť impaktora  $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Trenie na kontaktných plochách sa zanedbáva. Pohyb zostavy je obmedzený zadanou symetriou v osi y (obr. 50).

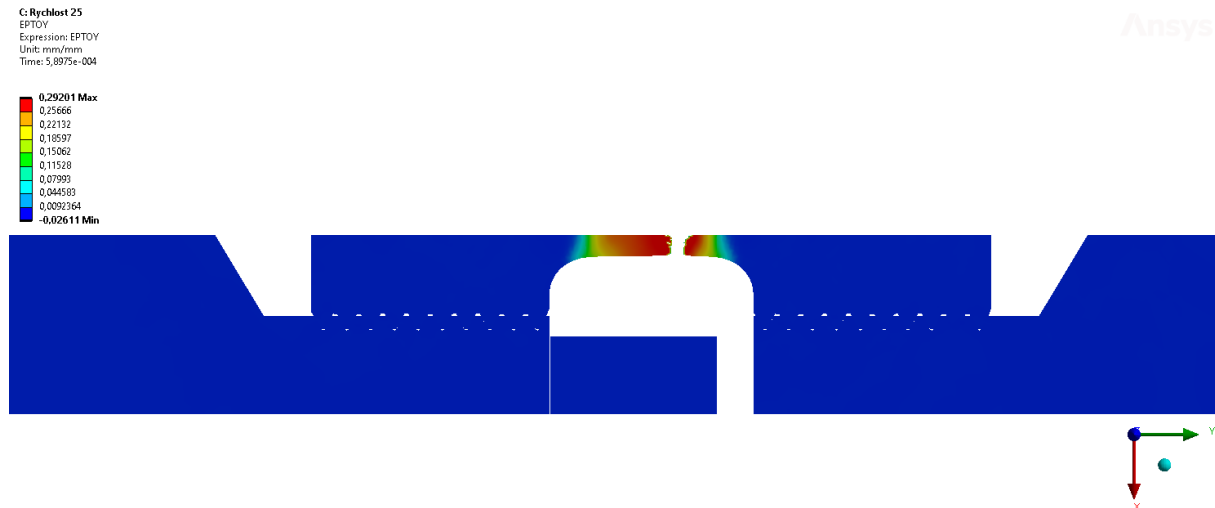
Numerickej simulácii poskytuje detailný pohľad na proces iniciácie a šírenia napätových vln. Obr. 51 ukazuje elasticke deformácie spôsobené prechodom vln prvou mernou tyčou. Bod merania je vo vzdialenosti 300 mm od rozhrania medzi mernou tyčou a prstencom. Predpokladá sa, že v tomto mieste by mohli byť merané deformácie aj u reálneho zariadenia. Na začiatku záznamu je tlakový pulz, ktorý vznikol pri náraze impaktora a šíri sa smerom k vzorke. Rozdiel mechanických impedancií v mieste prstenca spôsobuje jeho čiastočný odraz, ktorý sa prejavuje vznikom dvoch menších parazitných pulzov. Prechodom tlakového pulzu vzorkou dochádza k jej zaťaženiu. Tento problém nie je možné úplne eliminovať, dôležité však je, aby vzniknutá deformácia bola len v elastickej oblasti.



Obr. 51 Záznam elastickej deformácie spôsobenej šírením napät'ových pulzov na prvej mernej tyči. Bod merania na druhej mernej tyči je taktiež vo vzdialenosti 300 mm od rozhrania medzi mernou tyčou a prstencom. Pri prechode pôvodného pulzu do druhej mernej tyče ostáva jeho tlakový charakter zachovaný, pozri obr. 52. Na konci zostavy dochádza k jeho odrazu a následne sa šíri k vzorke ako ťahový. Z hľadiska vyhodnotenia testu ide o iniciačný pulz. Na obr. 52 je ďalej vyznačený odrazený pulz. Prenesený pulz je vyznačený na obr. 51.



Obr. 52 Záznam elastickej deformácie spôsobenej šírením napät'ových pulzov na druhej mernej tyči. Výsledky numerickej simulácie ukázali, že vzorka bola počas testu porušená (obr. 53), pričom sa overilo, že k tomu došlo v dôsledku pôsobenia iniciačného pulzu. Ďalej sa potvrdilo, že miesta pre meranie deformácii merných tyčí sú vhodne zvolené, pretože nedochádza k superpozícii signálov, ktoré by mohli ovplyvniť meranie a znížiť presnosť výsledkov. Okrem toho je tiež splnená podmienka, že vzdialenosť od konca tyče by mala byť najmenej  $10 \cdot D_B$ , čiže v tomto prípade má byť väčšia ako 150 mm. Na základe vykonanej analýzy možno konštatovať, že návrh je správny a mal by umožniť získanie relevantných výsledkov.



Obr. 53 Celková deformácia v smere zaťažovania vzorky v okamžiku po porušení.

### 7.1.2 Realizácia návrhu

Merné tyče, impaktor a prstenec boli vyrobené z materiálu EN AW-7075 – T6 vo forme ťahanej tyče s priemerom 15 mm. Vonkajší priemer jednotlivých komponentov nebol upravovaný.

Na urýchlenie impaktora sa využíva pneumatický kanón. Jeho princíp funkcie spočíva v natlakovaní vzdušníku počas nastavenej doby plnenia a následnom uvoľnení stlačeného vzduchu do hlavne s priemerom 19 mm. Keďže priemer impaktora je 15 mm, sú naň prilepené krúžky z materiálu PLA, ktoré zabezpečujú súosovosť zostavy. Dopadová rýchlosť je vyhodnotená na základe doby preletu impaktora medzi dvojicou optických závor vzdialených od seba 15 mm.

Merné tyče sú vedené pomocou prípravkov, ktoré zároveň umožňujú nastavenie súosovosti. Za druhou mernou tyčou je umiestnený tlmiaci systém tvorený pružinovým piestom osadeným v oceľovom bloku, ktorý je pripevnený k základni.

Pre meranie deformácií merných tyčí boli zvolené tenzometre s označením 1-XY31-0.6/120 od firmy HBM, ktoré sú tvorené dvomi meracími mriežkami vychýlenými voči sebe o 90°. Zapojené boli do plného Wheatstoneovho mosta, vďaka čomu je kompenzovaný vplyv ohybových napätí. Tie môžu vzniknúť v dôsledku, že merné tyče nie sú ideálne rovné, príp. vystredené. Napájacie napätia Wheatstoneovho mosta je 3 V a zdrojom sú alkalické batérie typu AA. Zmeraná deformácia predstavuje priemer hodnôt po celej dĺžke meracej mriežky. Menšie tenzometre sú preto vhodnejšie pre meranie vysokofrekvenčných pulzov. Vybraný typ, s dĺžkou 0,6 mm tomuto kritériu vyhovuje. Umiestnenie tenzometrov je vo vzdialenosti 300 mm od rozhrania medzi mernými tyčami a prstencom. To, že je táto pozícia vhodná, potvrdila aj numerická simulácia.

Napät'ový výstup z Wheatstoneovho mosta je malý, a preto je vyvedený do zosilňovača s 10-násobným zosilnením a šírkou pásma 500 kHz. Signál je následne zaznamenávaný osciloskopom. Prepočet elektrického napätia na deformáciu merných tyčí je podľa vzťahu [79]:

$$\varepsilon = \frac{1}{2 \cdot (1 + \mu)} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_o}{U_{in}} \cdot \frac{1}{z'} \quad (7.1)$$

kde:  $k$  – k-faktor, udávaný výrobcom tenzometrov [-],

$U_o$  – napätie z Wheatstoneovho mosta na výstupe zosilňovača [V],

$U_{in}$  – napájacie napätie Wheatstoneovho mosta [V],

$z$  – zosilnenie.

### 7.1.3 Overenie funkcie

Funkcia zariadenia je overená na príklade experimentu, pri ktorom bola použitá vzorka vyrobená z materiálu EN AW-2024 – T3 vo forme tyče s priemerom 20 mm. Dopadová rýchlosť impaktora pri tomto teste dosiahla hodnotu  $23,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Záznam elastickej deformácie zmeranej Wheatstoneovým mostom na prvej mernej tyči ukazuje obr. 54. Prvý parameter, ktorý možno posudzovať, je amplitúda tlakového pulzu vzniknutého pri náraze impaktora. Ak platí, že impaktor a prvá merná tyč sú vyrobené z toho istého materiálu a majú rovnaký priemer, je možné vypočítať jej veľkosť nasledovne [41]:

$$\varepsilon_A = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{st}}{c_B}, \quad (7.2)$$

kde:  $\varepsilon_A$  – amplitúda tlakového pulzu [-],  
 $v_{st}$  – dopadová rýchlosť impaktora [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ].

Teoretická amplitúda tlakového pulzu, ktorá je vynesená aj do záznamu (obr. 54) vyšla 0,00232. Dosadená rýchlosť šírenia elastickej vlny vychádza z tab. 8. Amplitúda získaná ako priemer nameraných hodnôt je 0,00223. To predstavuje percentuálny rozdiel približne 3,88 %, z čoho možno usudzovať, že merací reťazec funguje správne.

Na porovnanie bola ďalej spracovaná numerická simulácia. Oproti nastaveniu prezentovanému v podkapitole 7.1.1. sa zmenila veľkosť dopadovej rýchlosti impaktora. Rozdielna je tiež hodnota efektívneho plastického pretvorenia definujúceho porušenie materiálu. V tomto prípade sa vychádza z prierezu mernej časti vzorky pred skúškou a po nej:

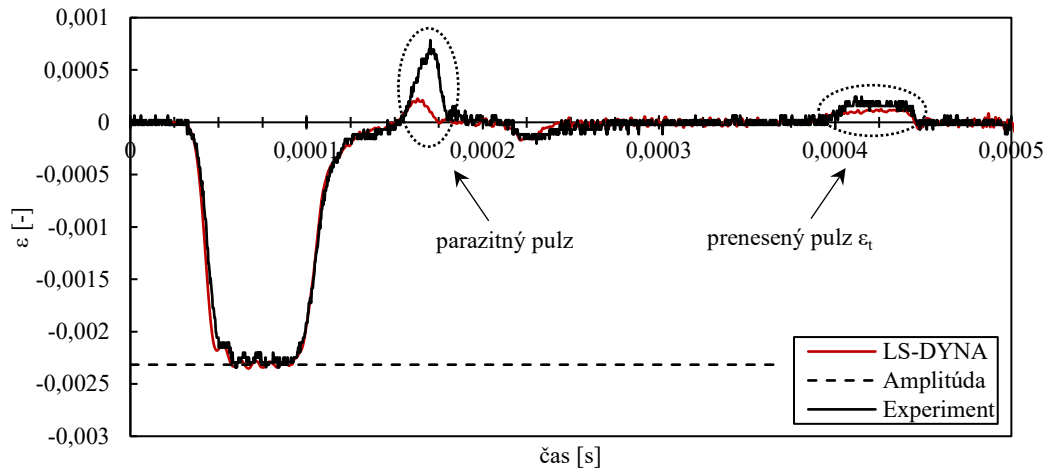
$$\varphi_f = \ln\left(\frac{S_0}{S_f}\right), \quad (7.3)$$

kde:  $\varphi_f$  – efektívne plastické pretvorenie pri porušení materiálu [-],  
 $S_f$  – prierez mernej časti vzorky po skúške [ $\text{mm}^2$ ].

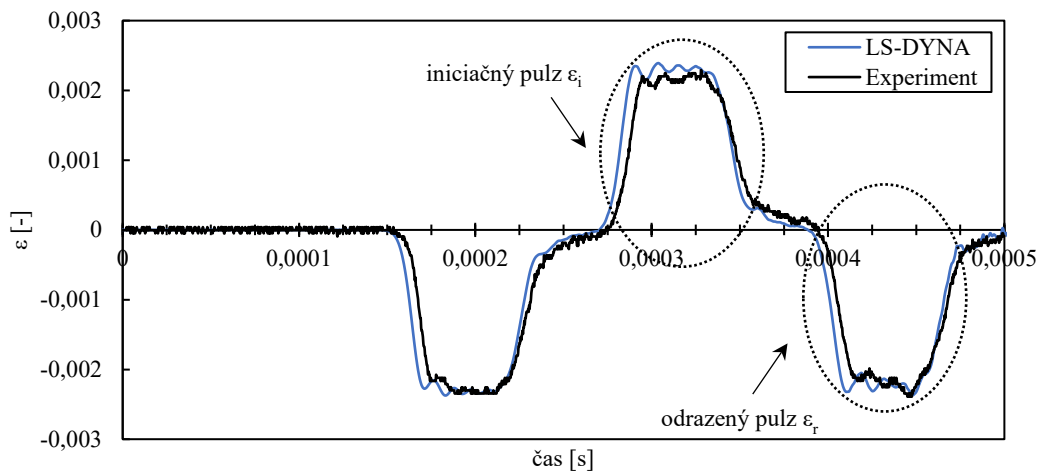
Tento prístup pre vyhodnotenie efektívneho plastického pretvorenia pri porušení sa bežne využíva v numerických simuláciách. Prierez mernej časti vzorky pred skúškou bol  $3,11 \text{ mm}^2$  a po pretrhnutí  $2,46 \text{ mm}^2$ . Hodnota efektívneho plastického pretvorenia dosadená do materiálového modelu je potom 0,235.

Najväčší rozdiel medzi experimentom a numerickou simuláciou je pozorovaný na veľkosti parazitného pulzu ťahového charakteru vyznačeného na obr. 54. Tento pulz vzniká v dôsledku nesúhlasných impedancií a výrazný nárast pri experimente je zapríčinený najmä nedokonalým kontaktom medzi mernými tyčami a prstencom. Jedno z riešení, ako ho znížiť, spočíva vo zväčšení prierezu prstenca, čím klesne rozdiel impedancií.

Menší nesúlad zaznamenaných pulzov na prvej mernej tyči (obr. 54) a druhej mernej tyči (obr. 55) je spôsobený viacerými činiteľmi, napr. rozdielom vlastností reálneho materiálu oproti materiálóvemu modelu, či nedokonalou polohou jednotlivých komponentov zariadenia voči sebe.

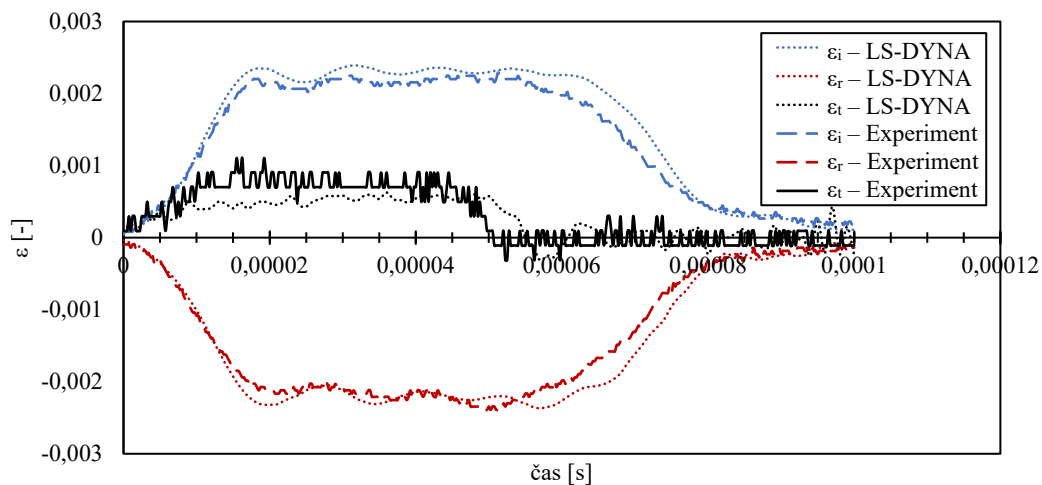


Obr. 54 Záznam elastickej deformácie spôsobenej šírením napät'ových pulzov na prvej mernej tyči.



Obr. 55 Záznam elastickej deformácie spôsobenej šírením napät'ových pulzov na druhej mernej tyči.

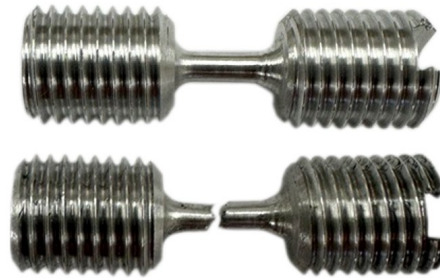
Porovnanie častí záznamov, ktoré sa používajú pre vyhodnotenie experimentu je na obr. 56. Jednotlivé pulzy sú časovo posunuté do spoločného počiatku a hodnoty, ktoré vykresľujú prenesený pulz sú 5-násobne zosilnené.



Obr. 56 Porovnanie deformačných pulzov zaznamenaných na mernej tyčiach.

Obr. 57 ukazuje vzorku kruhového prierezu z materiálu EN AW-2024 – T3 použitú pre overenie funkčnosti návrhu. Počas experimentu došlo k jej porušeniu v mernej časti.

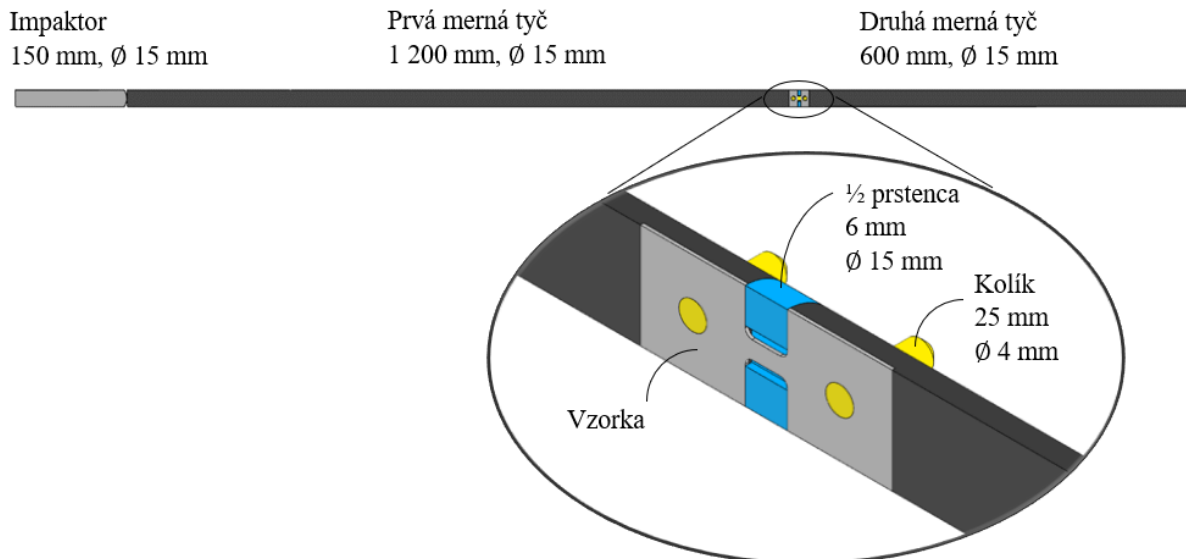
Na základe prezentovaných výsledkov je možné predpokladať, že navrhnuté riešenie je funkčné a získané dáta sú relevantné.



Obr. 57 Vzorka kruhového prierezu z materiálu EN AW-2024 – T3.

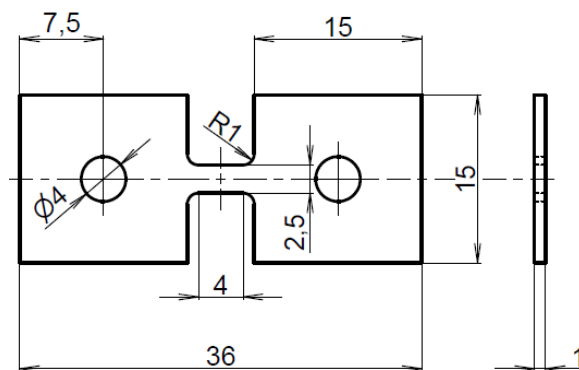
## 7.2 Riešenie pre testovanie plochých vzoriek

Testovanie plochých vzoriek si vyžaduje konštrukčnú úpravu zaužívaného riešenia, princíp funkcie ale ostáva zachovaný. Merné tyče a impaktor majú rovnaké rozmery ako v predošlom prípade, pozri obr. 58. Prstenec dĺžky 6 mm je v smere osi rozdelený na dve polovice, aby bolo možné upnutie vzorky. Každá polovica obsahuje drážku hlbokú 1 mm, jej šírka je 5 mm.



Obr. 58 Schematické zobrazenie návrhu riešenia SHTB pre testovanie plochých vzoriek.

Navrhnutá geometria a rozmery plochých vzoriek sú na obr. 59. Upínanie je riešené pomocou kolíkov s priemerom 4 mm a dĺžkou 25 mm. Tomuto sú prispôbené aj konce merných tyčí, ktoré majú vytvorený otvor pre kolík a tiež drážku, do ktorej je vsunutá vzorka.



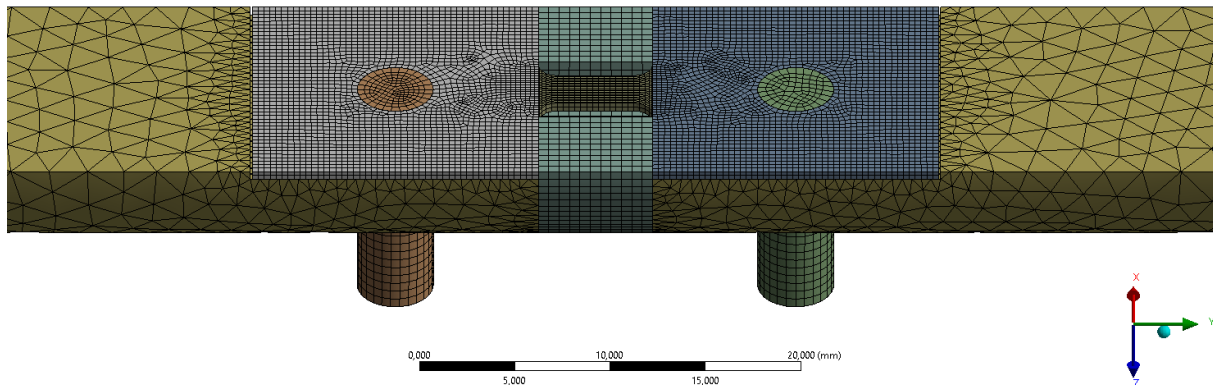
Obr. 59 Geometria a rozmery plochej vzorky.

Rovnako ako v predošlom návrhu sa predpokladá, že budú používané pre testovanie materiálov s nízkou impedanciou, a preto je zvolená rovnaká hliníková zliatina EN AW-7075 – T6.

### 7.2.1 Numerická simulácia

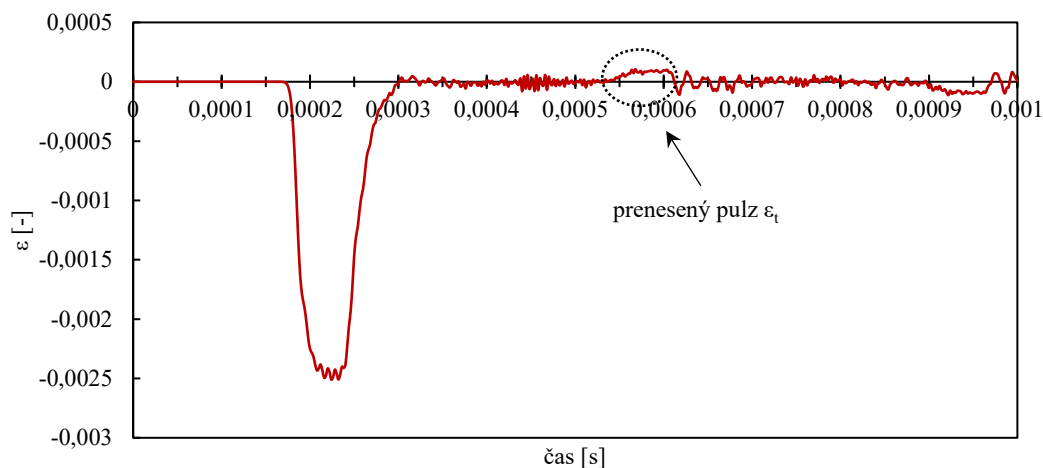
Funkcia návrhu bola overená numerickou simuláciou v softvéri ANSYS Workbench 2022 R1, modul LS-DYNA. Geometrický model tvoria merné tyče, impaktor, upínacie kolíky, polovica prstenca a vzorka. Pre zjednodušenie úlohy sa využíva polovičná symetria, pozri obr. 60.

Veľkosť prvkov tvoriacich konečnoprvkovú sieť sa pohybovala od 0,3 do 2 mm. Použité 3D prvky boli lineárne, typu štvorsten a šesťsten. Materiálový model a okrajové podmienky odpovedajú nastaveniu použitému v podkapitole 7.1.1.



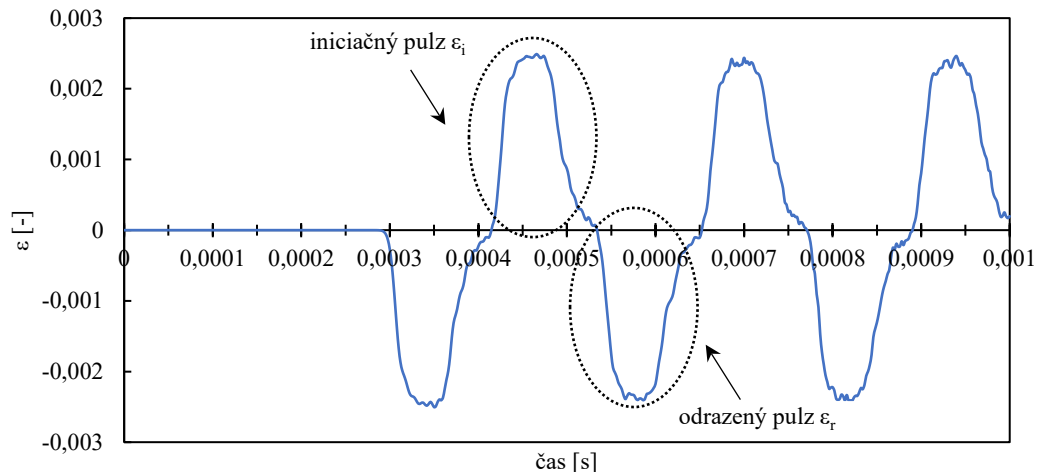
Obr. 60 Detail geometrického modelu.

Elastická deformácia spôsobená prechodom napät'ových pulzov na prvej mernej tyči je na obr. 61. Miesto, v ktorom bola zisťovaná, je vo vzdialenosti 300 mm od rozhrania medzi mernou tyčou a prstencom. V porovnaní s návrhom pre kruhové vzorky nie je zaznamenaný vznik parazitného pulzu, k čomu prispieva skutočnosť, že zmena prierezu v mieste prstenca je výrazne menšia.



Obr. 61 Záznam elastickej deformácie spôsobenej šírením napät'ových pulzov na prvej mernej tyči.

Elastická deformácia druhej mernej tyče (obr. 62) bola meraná vo vzdialenosti 300 mm od rozhrania medzi mernou tyčou a prstencom. Na zázname je vyznačený iniciačný ťahový pulz, ktorý vznikol odrazom pôvodne tlakového pulzu na konci zostavy a tiež odrazený pulz. Analýza výsledkov potvrdila, že k pretrhnutiu vzorky došlo pôsobením iniciačného ťahového pulzu. Podľa numerickej simulácie by mal byť návrh funkčný a umožňovať získanie pulzov potrebných pre vyhodnotenie skúšky.

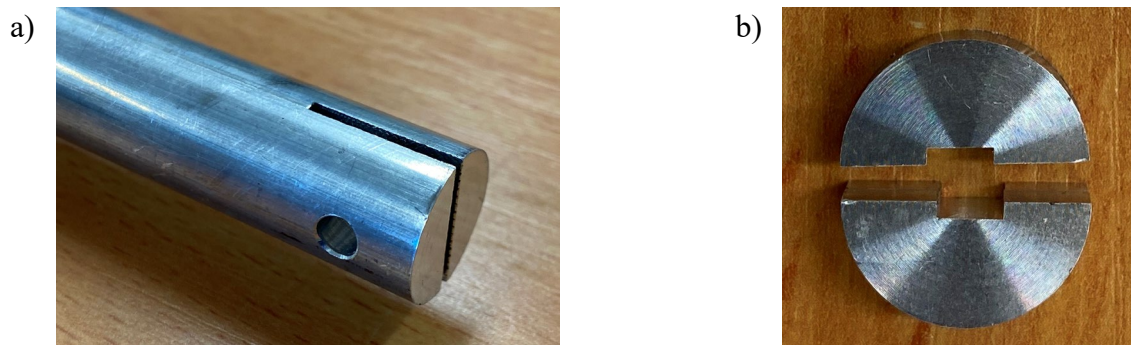


Obr. 62 Záznam elastickej deformácie spôsobenej šírením napät'ových pulzov na druhej mernej tyči.

### 7.2.2 Realizácia návrhu

Základné komponenty (merné tyče, impaktor, polovice prstenca a upínacie kolíky) sú vyrobené z hliníkovej zliatiny EN AW-7075 – T6 vo forme ťahanej tyče s priemerom 15 mm. Úprava konca mernej tyče pre upínanie plochých vzoriek je na obr. 63a. Časti tvoriace prstencov ukazujú obr. 63b. S ohľadom na tolerancie rozmerov vzoriek bola vyrobená séria prstencov, ktorých dĺžka bola odstupňovaná. Voľba prstenca s vhodnými rozmermi je dôležitá pre zabezpečenie prenosu napät'ových pulzov medzi mernými tyčami.

Navrhnuté riešenie využíva vybrané prvky popísané v podkapitole 7.1.2. Konkrétne ide o urýchľovaciu jednotku, vodiace prvky, tlmiači systém a meracie príslušenstvo. Zhoduje sa tiež umiestnenie a typ tenzometrov na merných tyčiach.



Obr. 63 Komponenty zariadenia SHTB pre testovanie plochých vzoriek: a) úprava upínacieho konca mernej tyče a b) polovice prstenca.

### 7.2.3 Overenie funkcie

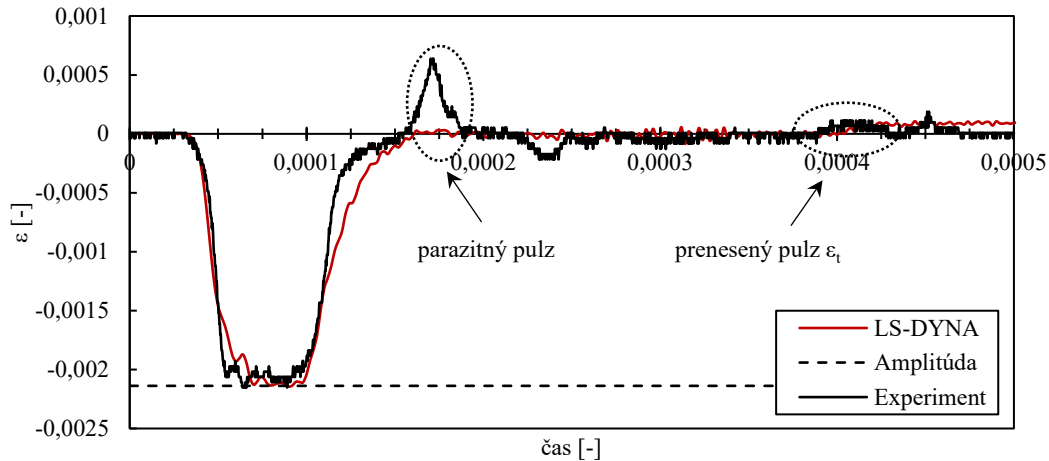
Funkcia zariadenia je overená na príklade experimentu, pri ktorom sa použila vzorka z materiálu EN AW-2024 – T3 vo forme plechu s hrúbkou 1 mm. Pri tomto meraní dosiahla dopadová rýchlosť impaktora hodnotu  $21,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Obr. 64 zobrazuje záznam deformačných pulzov meraných na prvej mernej tyči. Teoretická amplitúda tlakového pulzu, ktorý vznikol pri náraze impaktora vypočítaná podľa vzťahu (7.2), vyšla 0,00214. Zmeraná amplitúda získaná ako priemer hodnôt je 0,00205. Percentuálny rozdiel je teda 4,21 %, čo naznačuje, že merací reťazec funguje správne.

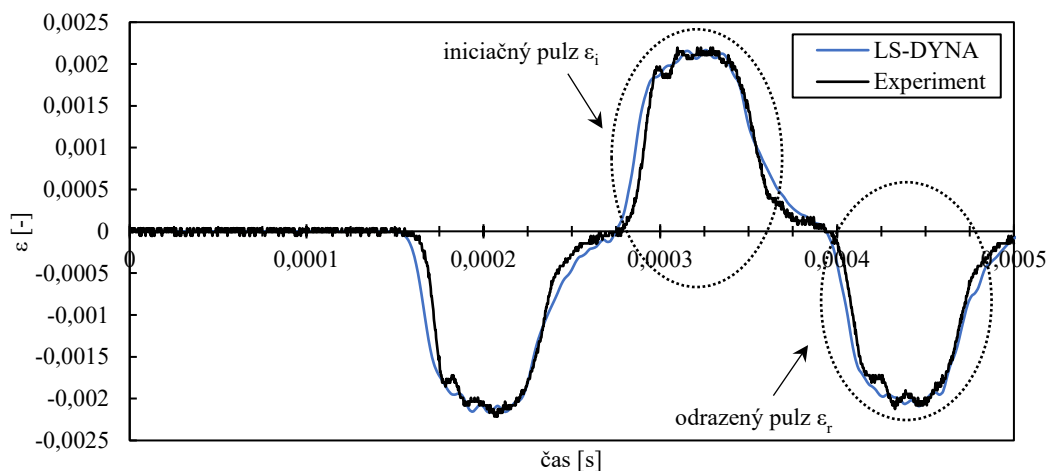
Pre porovnanie nameraných dát bola ďalej vytvorená numerická simulácia, nastavená podľa popisu uvedeného v podkapitole 7.2.1. Rozdiel spočíval v zmene dopadovej rýchlosti impaktora, ktorá odpovedá experimentu a v úprave hodnoty efektívneho plastického

pretvorenia pri porušení vzorky. Počiatkový prierez vzorky bol  $2,4 \text{ mm}^2$  a po skúške  $1,6 \text{ mm}^2$ . Podľa vzťahu (7.3) bolo efektívne plastické pretvorenie pri porušení dosadené do materiálového modelu približne 0,4.

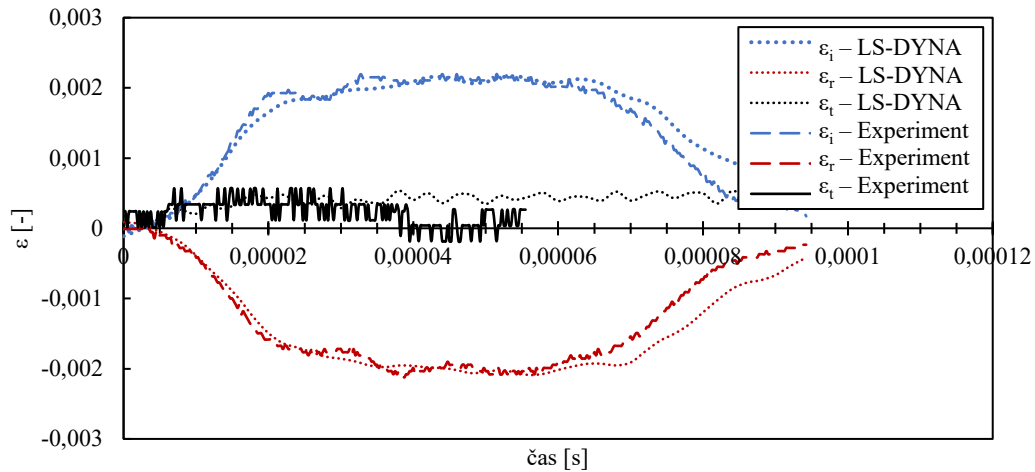
Oproti numerickej simulácii sa na zmeranom zázname objavuje parazitný pulz, pozri obr. 64. Ten je spôsobený rozdielom mechanickej impedancie v mieste prstenca a nedokonalou vzájomnou polohou jednotlivých komponentov.



Obr. 64 Záznam elastickej deformácie spôsobenej šírením napät'ových pulzov na prvej mernej tyči. Porovnanie zmeraných deformácií a výsledkov numerickej simulácie na druhej mernej tyči zobrazuje obr. 65. Zo záznamu je zrejmé, že je dosiahnutá dobrá zhoda medzi dátami získanými oboma prístupmi. Menšie rozdiely sú pripisované najmä odlišným vlastnostiam reálneho materiálu a materiálového modelu.



Obr. 65 Záznam elastickej deformácie spôsobenej šírením napät'ových pulzov na druhej mernej tyči. Časti záznamov určené na vyhodnotenie experimentu časovo posunuté do spoločného počiatku sú na obr. 66. Hodnoty, ktoré vykresľujú prenesené pulzy, sú 5-násobne zosilnené, pričom medzi výsledkami získanými oboma prístupmi je viditeľný rozdiel. Dlhšie trvanie pulzu pri numerickej simulácii je spôsobené tým, že pri nastavených podmienkach nedošlo k porušeniu vzorky. Z hľadiska amplitúdy je prenesený pulz nízky a do značnej miery ovplyvnený šumom, čo znižuje presnosť merania.



Obr. 66 Porovnanie deformačných pulzov zaznamenaných na merných tyčiach.

Na základe prezentovaných výsledkov je možné predpokladať, že navrhnuté zariadenie funguje správne a malo by umožňovať získanie odozvy materiálu na ťahové zaťaženie v režime vysokých rýchlostí deformácie.

## ZÁVERY

Dizertačná práca sa venuje vplyvu rýchlosti deformácie na mechanické vlastnosti a tvárnosť hliníkovej zliatiny EN AW-2024 – T3 vo forme plechu. Materiál bol primárne skúmaný vo vytvrdenom stave a navyše bol analyzovaný aj vplyv tepelného spracovania.

Východiskovým polotovarom pre skúmanie materiálu vo vytvrdenom stave bol plech s hrúbkou 0,8 mm. Vzorky odobrané pod siedmimi uhlami vzhľadom na smer valcovania boli vystavené ťahovému zaťaženiu v režime kvazistatických, stredných a vysokých rýchlostí deformácie. Skutočné závislosti napätie-deformácia ukázali, že zliatina vykazuje negatívnu citlivosť na rýchlosť deformácie (NSRS), ktorá je jedným z prejavov dynamického deformačného starnutia (DSA). Analýza výsledkov však nepreukázala prítomnosť ďalších javov spojených s DSA, ako sú výkyvy na závislostiach napätie-deformácia alebo deformačné pásy. Rovnako sa nepotvrdila súvislosť medzi NSRS a adiabatickým teplom, čo bolo sledované na základe vývoja parametra citlivosti na rýchlosť deformácie. Celkové predĺženie pri maximálnom zaťažení a celková ťažnosť, ktoré sú ukazovateľmi deformačnej kapacity materiálu, výrazne narástli pri skúškach v režime vysokých rýchlostí deformácie. Hodnoty Lankfordovho koeficientu pre rôzne orientácie vzoriek potvrdili, že materiál vykazuje značnú anizotropiu. Podľa snímok z EBSD analýzy východiskového materiálu možno usudzovať, že anizotropia je spôsobená predĺžením zŕn v pozdĺžnej rovine plechu. Táto smerovosť navyše prispieva k zvýšeniu pevnosti materiálu v smere valcovania, čo dokazuje aj porovnanie hodnôt skutočného napätia pre rôzne orientácie vzoriek. Vzhľadom na to, že hodnoty Lankfordovho koeficientu sa pohybovali v rozsahu od 0,45 do 0,87 je zrejmé, že pri zaťažovaní prevláda deformácia v smere hrúbky materiálu nad deformáciou v smere šírky, čo môže limitovať jeho tvárnosť. Vplyv rýchlosti deformácie na Lankfordov koeficient bol nevýrazný. Exponent deformačného spevnenia nevykazoval závislosť na rýchlosti deformácie ani na orientácii vzoriek. Jeho priemerná veľkosť získaná z ťahových skúšok za kvazistatických podmienok bola 0,183. Skúmaním lomových plôch sa zistilo, že mechanizmom porušenia vzoriek bol nízkoenergetický tvárny lom. Zmena rýchlosti deformácie sa neprejavila na charaktere lomovej plochy. Na základe výsledkov ťahových skúšok boli ďalej vyhodnotené parametre materiálového modelu Johnson-Cook. Keďže vplyv teploty nebol skúmaný, zohľadňuje materiálový model len vplyv deformácie a rýchlosti deformácie na skutočné napätie.

Pre skúmanie vlastností zliatiny v mäkkom stave, tzn. po rozpúšťacom žíhaní a rýchlom ochladení, skôr než sa výraznejšie prejaví jeho spevnenie, bola použitá zliatina vo forme plechu s hrúbkou 1 mm. Vzorky pred tepelným spracovaním a bezprostredne po ňom boli zaťažované ťahom pri dvoch rýchlostiach deformácie, ktoré odpovedali kvazistatickému a strednému režimu rýchlosti deformácie. Keďže nebol sledovaný vplyv anizotropie, boli vzorky odobrané v smere valcovania. Materiál v mäkkom stave vykazuje v porovnaní s východiskovým stavom výrazný pokles pevnosti. Navyše je na skutočných závislostiach napätie-deformácia možné pozorovať NSRS. V tomto prípade je zrejmé, že ide o následok DSA, pretože je prítomný Portevin-Le Chatelierov (PLC) efekt a rovnako je na deformačných mapách získaných 2D DIC analýzou pozorované šírenie deformačných pásov. Hodnoty Lankfordovho koeficientu sa u oboch sledovaných stavov pohybovali pod hodnotou 1, čo môže obmedzovať použitie materiálu pre náročnejšie operácie tvárnenia, ako je napr. hlboké ťahanie. Ďalší ukazovateľ tvárnosti, exponent deformačného spevnenia, však po tepelnom spracovaní zaznamenal výrazný nárast, čo všeobecne svedčí o schopnosti materiálu viac sa deformovať do okamžiku vzniku krčka. Všetky vzorky v mäkkom stave boli porušené v mieste prechodu mernej časti do zaoblenia, takže ďalšie charakteristiky, ktoré súvisia s nehomogénnou deformáciou, neboli vyhodnocované. Toto správanie mohlo byť spôsobené zvýšením vrubovej citlivosti materiálu po tepelnom spracovaní, ale podiel na tom môže mať aj PLC efekt.

Prezentované výsledky odhalili zaujímavé témy, ktorým sa z časových dôvodov nebolo možné venovať v rámci tejto práce. Budúci výskum zliatiny EN AW-2024 – T3 by sa mohol zamerať na ďalšie analýzy materiálu v mäkkom stave, napr. na rozšírenie rozsahu rýchlostí deformácie, pri ktorých je materiál testovaný, aby sa zistilo, za akých okrajových podmienok dochádza k vzniku PLC efektu. Ďalej by bolo vhodné určiť príčinu, ktorá viedla k porušeniu vzoriek v mieste prechodu mernej časti do zaoblenia.

V poslednej časti sa práca venuje návrhu zariadení pre Hopkinsonov ťahový test vzoriek kruhového prierezu a plochých vzoriek. V oboch prípadoch sa využilo riešenie s nepriamym vznikom ťahového pulzu pomocou prstenca umiestneného medzi mernými tyčami. Návrhy boli najskôr overené numerickou simuláciou v softvéri ANSYS Workbench 2022 R1, modul LS-DYNA, ktorá potvrdila ich funkčnosť. Ako materiál základných komponentov zariadení bola vybraná hliníková zliatina EN AW-7075 – T6. Deformačné pulzy získané meraním na reálnych zariadeniach boli porovnané s numerickou simuláciou, ktorej okrajové podmienky boli nastavené tak, aby čo najlepšie zodpovedali konkrétnemu experimentu. Porovnanie ukázalo dobrú zhodu medzi výsledkami získanými oboma prístupmi. Menšie rozdiely vo výsledkoch boli spôsobené najmä odlišnými vlastnosťami reálnych materiálov v porovnaní s materiálovými modelmi a nedokonalým kontaktom komponentov reálneho zariadenia. Navrhnuté zariadenia poskytujú relevantné dáta, ktoré sa dajú použiť na vyhodnotenie správania materiálu pri ťahovom zaťažení za vysokých rýchlostí deformácie. Ich nevýhodou však je, že prenesený pulz je malý a výrazne ovplyvnený šumom a disperziami, čo má vplyv na presnosť merania. Navyše tieto riešenia neumožňujú použitie vysokorýchlostnej kamery pre meranie deformácií.

Nevýhody navrhnutých zariadení otvárajú možnosti pre ďalší výskum. Jednou z nich je použitie a výber vhodného pulsu shapera, ktorý by mohol znížiť oscilácie pulzu. Ďalej by bolo vhodné upraviť zariadenia pre možnosť merania deformácií pomocou vysokorýchlostnej kamery.

## PUBLIKAČNÁ ČINNOSŤ AUTORA

HARANT, Martin; JOPEK, Miroslav; PODANÝ, Kamil a ŘIHÁČEK, Jan. Investigation of Johnson-Cook parameters of aluminium alloy 2024-T3. Online. In: *Engineering Mechanics 2022*. 2022. s. 137-140. Dostupné z: <https://www.engmech.cz/improc/2022/137.pdf>.

HARANT, Martin; ŘIHÁČEK, Jan a MRŇA, Libor. Manufacturing of sandwich panels and its verification by numerical simulation. Online. *MM Science Journal*. 2021, vol. 2021, no. 4, s. 4797-4802. Dostupné z: [https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021\\_10\\_2021087](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021_10_2021087).

HARANT, Martin; VERLEYSSEN, Patricia; FOREJT, Milan a KOLOMÝ, Štěpán. The Effects of Strain Rate and Anisotropy on the Formability and Mechanical Behaviour of Aluminium Alloy 2024-T3. Online. *Metals*. 2024, vol. 14, no. 1, article 98. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met14010098>.

JOPEK, Miroslav; FOREJT, Milan a HARANT, Martin. Mechanical properties of aluminium alloys at high strain rate. Online. *MM Science Journal*. 2021, vol. 2021, no. 2, s. 4505-4511. Dostupné z: [https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021\\_6\\_2021050](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021_6_2021050).

KOLOMÝ, Štěpán; BENČ, Marek; HARANT, Martin; SEDLÁK, Josef a JOPEK, Miroslav. Effect of different strain rates on mechanical behaviour and structure of Inconel 718 produced by powder bed fusion. Online. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*. 2024. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10999-024-09724-6>.

SVOBODA, Petr; JOPEK, Miroslav; SVOBODA, Ondřej a HARANT, Martin. Determination of dynamic properties of 3D printer G3Si1 steel. Online. *MM Science Journal*. 2024, vol. 17, no. 2, s. 7230-7233. Dostupné z: [https://doi.org/10.17973/MMSJ.2024\\_03\\_2021183](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2024_03_2021183).

## ZOZNAM POUŽITEJ LITERATURY

1. HARANT, Martin; VERLEYSSEN, Patricia; FOREJT, Milan a KOLOMY, Stepan. The Effects of Strain Rate and Anisotropy on the Formability and Mechanical Behaviour of Aluminium Alloy 2024-T3. Online. *Metals*. 2024, vol. 14, no. 1, article 98. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met14010098>. [cit. 2024-07-08].
2. MICHNA, Štefan; LUKÁČ, Ivan; OČENÁŠEK, Vladivoj; KOŘENÝ, Rudolf; DRÁPALA, Jaromír et al. *Encyklopedie hliníku*. Adin, 2005. ISBN 80-890-4188-4.
3. RAABE, Dierk; PONGE, Dirk; UGGOWITZER, Peter J.; ROSCHER, Moritz; PAOLANTONIO, Mario et al. Making sustainable aluminum by recycling scrap: The science of “dirty” alloys. Online. *Progress in Materials Science*. 2022, vol. 128, article 100947. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.100947>. [cit. 2024-07-08].
4. TOTTEN, George E. a MACKENZIE, D. Scott (ed.). *Handbook of Aluminum. Volume 1, Physical Metallurgy and Processes*. CRC Press, 2003. ISBN 0-8247-0494-0.
5. SOLFRONK, Pavel; NOVÁ, Iva a NOVÁKOVÁ, Iva. *Tvařitelnost slitin hliníku*. Technická univerzita v Liberci, 2012. ISBN 978-80-7372-825-0.
6. WARLIMONT, Hans a MARTIENSSEN, Werner (ed.). *Springer Handbook of Materials Data*. Online. 2nd ed. Springer, 2018. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-69743-7>. [cit. 2024-07-08].
7. ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUEBNICTVÍ [ÚNMZ]. ČSN EN 1780-1:2003, *Hliník a slitiny hliníku – Označování slitinových hliníkových ingotů pro přetavení, předslitin a odlitků – Část 1: Číselné označování*.
8. ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUEBNICTVÍ [ÚNMZ]. ČSN EN 1780-2:2003, *Hliník a slitiny hliníku – Označování slitinových hliníkových ingotů pro přetavení, předslitin a odlitků – Část 2: Označování chemickými značkami*.
9. ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUEBNICTVÍ [ÚNMZ]. ČSN EN 573-1:2005, *Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků – Část 1: Číselné označování*.
10. ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUEBNICTVÍ [ÚNMZ]. ČSN EN 573-2:1996, *Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků – Část 2: Označování chemickými značkami*.
11. ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUEBNICTVÍ [ÚNMZ]. ČSN EN 515:2017, *Hliník a slitiny hliníku – Výrobky tvářené – Označování stavů*.
12. WESSEL, James K (ed.). *Handbook of Advanced Materials: Enabling New Designs*. Online. Wiley, 2004. ISBN 9780471465188. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/0471465186>. [cit. 2024-07-08].
13. FOREJT, Milan a PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
14. SAKAI, Taku; BELYAKOV, Andrey; KAIBYSHEV, Rustam; MIURA, Hiromi a JONAS, John J. Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions. Online. *Progress in Materials Science*. 2013, vol. 60, s. 130-207. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.09.002>. [cit. 2024-07-08].
15. HUMPHREYS, F. J. a HATHERLY, M. *Recrystallization and related annealing phenomena*. Online. 2nd ed. Elsevier, 2004. ISBN 978-0-08-044164-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044164-1.X5000-2>. [cit. 2024-07-08].

16. RINDERER, Barbara. *The Metallurgy of Homogenisation*. Online. Materials Science Forum. 2011, vol. 693, s. 264-275.  
Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.693.264>. [cit. 2024-07-08].
17. HIGGINS, Raymond Aurelius. *Engineering Metallurgy - Applied Physical Metallurgy: Applied Physical Metallurgy*. Online. 6th ed. J. W. Arrowsmith, 1993. ISBN 0340568305.  
Dostupné z: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpEMAPME05/toc?cid=kpEMAPME05>. [cit. 2024-07-08].
18. BOLIBRUCHOVÁ, Dana; MATEJKA, Marek; MICHALCOVÁ, Alena a KASIŇSKA, Justyna. Study of Natural and Artificial Aging on AlSi9Cu3 Alloy at Different Ratios of Returnable Material in the Batch. Online. *Materials*. 2020, vol. 13, no. 20, article 4538.  
Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma13204538>. [cit. 2024-07-08].
19. DURSUN, Tolga a SOUTIS, Costas. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. Online. *Materials & Design*. 2013, vol. 56, s. 862-871. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.002>. [cit. 2024-07-08].
20. ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUEBNICTVÍ [ÚNMZ]. ČSN EN 573-3+A2:2024, *Hliník a slitiny hliníku - Chemické složení a druhy tvářených výrobků - Část 3: Chemické složení a druhy výrobků*.
21. LI, P.; SIVIOUR, C. R. a PETRINIC, N. The Effect of Strain Rate, Specimen Geometry and Lubrication on Responses of Aluminium AA2024 in Uniaxial Compression Experiments. Online. *Experimental Mechanics*. 2008, vol. 49, s. 587-593. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11340-008-9129-1>. [cit. 2024-07-08].
22. ABOTULA, S. a CHALIVENDRA, V. B. An experimental and numerical investigation of the static and dynamic constitutive behaviour of aluminium alloys. Online. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2010, vol. 45, no. 8, s. 555-565. Dostupné z: <https://doi.org/10.1243/03093247JSA655>. [cit. 2024-07-08].
23. RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ, J. A.; RUSINEK, A. a ARIAS, A. Thermo-viscoplastic behaviour of 2024-T3 aluminium sheets subjected to low velocity perforation at different temperatures. Online. *Thin-Walled Structures*. 2011, vol. 49, no. 7, s. 819-832. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.02.007>. [cit. 2024-07-08].
24. SHAMCHI, Sahand Pourhassan; QUEIRÓS DE MELO, Francisco J. M.; TAVARES, Paulo J. a MOREIRA, Pedro M. G. P. Thermomechanical characterization of Alclad AA2024-T3 aluminum alloy using split Hopkinson tension bar. Online. *Mechanics of Materials*. 2019, vol. 139, article 103198.  
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.103198>. [cit. 2024-07-08].
25. LEE, Seung-Yong; TAKUSHIMA, Chikako; HAMADA, Jun-ichi a NAKADA, Nobuo. Macroscopic and microscopic characterizations of Portevin-LeChatelier effect in austenitic stainless steel using high-temperature digital image correlation analysis. Online. *Acta Materialia*. 2020, vol. 205, article 116560.  
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.116560>. [cit. 2024-07-08].
26. XU, Jianbin; HOLMEDAL, Bjørn; HOPPERSTAD, Odd Sture; MÁNIK, Tomáš a MARTHINSEN, Knut. Dynamic strain ageing in an AlMg alloy at different strain rates and temperatures: Experiments and constitutive modelling. Online. *International Journal of Plasticity*. 2022, vol. 151, article 103215.  
Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2022.103215>. [cit. 2024-07-08].
27. BARLAT, Frédéric; LEGE, Daniel J. a BREM, John C. A six-component yield function for anisotropic materials. Online. *International Journal of Plasticity*. 1991, vol. 7, no. 7, s. 693-712. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0749-6419\(91\)90052-Z](https://doi.org/10.1016/0749-6419(91)90052-Z). [cit. 2024-07-08].

28. LESUER, Donald R. *Experimental Investigations of Material Model for Ti-6Al-4V Titanium and 2024-T3 Aluminium*. Online. U.S. Department of Transportation, 2000. Dostupné z: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA384431>. [cit. 2024-07-08].
29. SEIDT, J.D. a GILAT, A. Plastic deformation of 2024-T351 aluminum plate over a wide range of loading conditions. Online. *International Journal of Solids and Structures*. 2013, vol. 50, no. 10, s. 1781-1790. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.02.006>. [cit. 2024-07-08].
30. SHARPE, William N (ed.). *Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics*. Online. Springer, 2008. ISBN 978-0-387-30877-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-30877-7>. [cit. 2024-07-08].
31. KUHN, H. a MEDLIN, D (ed.). *ASM Handbook Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation*. Online. ASM International, 2000. ISBN 978-1-62708-176-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v08.9781627081764>. [cit. 2024-07-08].
32. ROLC, Stanislav; BUCAR, Jaroslav; KŘEŠŤAN, Jan; KRÁTKÝ, Josef a ŘÍDKÝ, Radek. *Pancéřová ochrana*. Academia, 2022. ISBN 978-802-0031-006.
33. ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUEBNICTVÍ [ÚNMZ]. ČSN EN ISO 6892-1:2021, *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*.
34. ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUEBNICTVÍ [ÚNMZ]. ČSN EN ISO 6892-2:2018, *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 2: Zkušební metoda za zvýšené teploty*.
35. ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUEBNICTVÍ [ÚNMZ]. ČSN EN ISO 6892-3:2015, *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 3: Zkušební metoda za nízké teploty*.
36. HOSFORD, William F. a CADDELL, Robert M. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. Online. 4th ed. Cambridge University Press, 2011. ISBN 978-1-107-00452-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511976940>. [cit. 2024-07-08].
37. SONG, Bo a SANBORN, Brett. Relationship of compressive stress-strain response of engineering materials obtained at constant engineering and true strain rates. Online. *International Journal of Impact Engineering*. 2018, vol. 119, s. 40-44. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.05.001>. [cit. 2024-07-08].
38. BUSCHOW, K.H. Jürgen; CAHN, Robert W.; FLEMINGS, Merton C.; ILSCHNER, Bernhard; KRAMER, Edward J. et al (ed.). *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Online. Elsevier, 2001. ISBN 978-0-08-043152-9. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/referencework/9780080431529/encyclopedia-of-materials-science-and-technology>. [cit. 2024-07-08].
39. ASTM INTERNATIONAL. ASTM E9:2019, Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature. United States.
40. SUN, Xiaolong; ZHUANG, Xincun a ZHAO, Zhen. Investigation of anisotropy effects on sheet-bulk forming of duplex gear parts. Online. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018, vol. 140, s. 51-59. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.02.050>. [cit. 2024-07-08].
41. CHEN, Weinong a SONG, Bo. *Split Hopkinson (Kolsky) bar: design, testing and applications*. Online. Mechanical engineering series. Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-7982-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7982-7>. [cit. 2024-07-08].

42. SHIM, Jongmin a MOHR, Dirk. Using split Hopkinson pressure bars to perform large strain compression tests on polyurea at low, intermediate and high strain rates. Online. *International Journal of Impact Engineering*. 2008, vol. 36, no. 9, s. 1116-1127. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.12.010>. [cit. 2024-07-08].
43. GAMA, Bazle A.; LOPATNIKOV, Sergey L. a GILLESPIE, John W. Hopkinson bar experimental technique: A critical review. Online. *Applied Mechanics Reviews*. 2004, vol. 57, no. 4, s. 223-250. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/1.1704626>. [cit. 2024-07-08].
44. PANKOW, M.; ATTARD, C. a WAAS, A. M. Specimen size and shape effect in split Hopkinson pressure bar testing. Online. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2009, vol. 44, no. 8, s. 689-698. Dostupné z: <https://doi.org/10.1243/03093247JSA538>. [cit. 2024-07-08].
45. POCHHAMMER, L. Über fortpflanzungsgeschwindigkeiten kleiner schwingungen in einem unbergrenzten isotropen kreiszylinder. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*. 1876, s. 324-336.
46. CHREE, C. Longitudinal vibrations of a circular bar. *Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics*. 1886, s. 287-298.
47. HARDING, J. a WELSH, L. M. A tensile testing technique for fibre-reinforced composites at impact rates of strain. Online. *Journal of Materials Science*. 1983, vol. 18, s. 1810-1826. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF00542078>. [cit. 2024-07-08].
48. ESKANDARI, H. a NEMES, J. A. Dynamic Testing of Composite Laminates with a Tensile Split Hopkinson Bar. Online. *Journal of Composite Materials*. 2000, vol. 34, no. 4, s. 260-273. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/002199830003400401>. [cit. 2024-07-08].
49. NICHOLAS, Theodore. Tensile testing of materials at high rates of strain. Online. *Experimental Mechanics*. 1981, vol. 21, s. 177-185. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF02326644>. [cit. 2024-07-08].
50. SARVA, Sai S. a BOYCE, Mary C. Mechanics of polycarbonate during high-rate tension. Online. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. 2007, vol. 2, no. 10, s. 1853-1880. Dostupné z: <https://doi.org/10.2140/jomms.2007.2.1853>. [cit. 2024-07-08].
51. PRAKASH, G.; SINGH, N. K.; SHARMA, P. a GUPTA, N. K. Tensile, Compressive, and Flexural Behaviors of Al5052-H32 in a Wide Range of Strain Rates and Temperatures. Online. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020, vol. 32, no. 5. Dostupné z: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003154](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003154). [cit. 2024-07-08].
52. GERLACH, Robert; KETTENBEIL, Christian a PETRINIC, Nik. A new split Hopkinson tensile bar design. Online. *International Journal of Impact Engineering*. 2012, vol. 50, s. 63-67. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.08.004>. [cit. 2024-07-08].
53. DOHNAL, Ivo. *Ověření možnosti využití tahové deformace při Hopkinsonově testu*. Online, Dizertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2014. Dostupné z: [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=93146](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=93146). [cit. 2024-07-08].
54. LINDHOLM, U. S. a YEAKLEY, L. M. High strain-rate testing: Tension and compression. Online. *Experimental Mechanics*. 1968, vol. 8, s. 1-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF02326244>. [cit. 2024-07-08].
55. MOHR, D. a GARY, G. M-shaped Specimen for the High-strain Rate Tensile Testing Using a Split Hopkinson Pressure Bar Apparatus. Online. *Experimental Mechanics*. 2007, vol. 47, s. 681-692. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11340-007-9035-y>. [cit. 2024-07-08].

56. TAYLOR, Geoffrey Ingram. The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress I. Theoretical considerations. Online. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. 1948, vol. 194, s. 289-299. Dostupné z: <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0081>. [cit. 2024-07-08].
57. WHIFFIN, A. C. The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress - II. Tests on various metallic materials. Online. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. 1948, vol. 194, s. 300-322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0082>. [cit. 2024-07-08].
58. HAWKYARD, J. B. A theory for the mushrooming of flat-ended projectiles impinging on a flat rigid anvil, using energy considerations. Online. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1969, vol. 11, no. 3, s. 313-333. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(69\)90049-6](https://doi.org/10.1016/0020-7403(69)90049-6). [cit. 2024-07-08].
59. HUTCHINGS, I. M. a O'BRIEN, T. J. Normal impact of metal projectiles against a rigid target at low velocities. Online. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1981, vol. 23, no. 5, s. 255-261. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(81\)90029-1](https://doi.org/10.1016/0020-7403(81)90029-1). [cit. 2024-07-08].
60. ERLICH, D. C.; SHOCKEY, D. A. a SEAMAN, L. Symmetric rod impact technique for dynamic yield determination. Online. *AIP Conference Proceeding Volume 78*. 1982, vol. 78, no. 1, s. 402-406. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.33348>. [cit. 2024-07-08].
61. GUST, W. H. High impact deformation of metal cylinders at elevated temperatures. Online. *Journal of Applied Physics*. 1982, vol. 53, no. 5, s. 3566-3575. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.331136>. [cit. 2024-07-08].
62. JANELIUKSTIS, Rims a CHEN, Xiao. Review of digital image correlation application to large-scale composite structure testing. Online. *Composite Structures*. 2021, vol. 271, article 114143. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114143>. [cit. 2024-07-08].
63. GÓRSZCZYK, Jarosław; MALICKI, Konrad a ZYCH, Teresa. Application of Digital Image Correlation (DIC) Method for Road Material Testing. Online. *Materials*. 2019, vol. 12, no. 15. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma12152349>. [cit. 2024-07-08].
64. PAN, Bing; QIAN, Kemao; XIE, Huimin a ASUNDI, Anand. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. Online. *Measurement Science and Technology*. 2009, vol. 20, no. 6, article 062001. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/6/062001>. [cit. 2024-07-08].
65. DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING, THE UNIVERSITY OF TULSA. *A practical guide to DIC*. Online. Dostupné z: <https://digitalimagecorrelation.org/>. [cit. 2024-07-08].
66. YANG, J. a BHATTACHARYA, K. Fast Adaptive Mesh Augmented Lagrangian Digital Image Correlation. Online. *Experimental Mechanics*. 2021, vol. 61, s. 719-735. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11340-021-00695-9>. [cit. 2024-07-08].
67. BANABIC, Dorel. *Sheet Metal Forming Processes: Constitutive Modelling and Numerical Simulation*. Online. Springer, 2010. ISBN 978-3-540-88113-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88113-1>. [cit. 2024-07-08].
68. KAWKA, M. a MAKINOCHI, A. Plastic anisotropy in FEM analysis using degenerated solid element. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 1996, vol. 60, no. 1-4, s. 239-242. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02336-9](https://doi.org/10.1016/0924-0136(96)02336-9). [cit. 2024-07-08].

69. HOKKA, Mikko. *Dynamic Behavior of Materials Fundamentals: Material Models, and Microstructure Effects*. Online. Elsevier, 2024. ISBN 978-0-323-99153-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/C2021-0-00230-3>. [cit. 2024-07-08].
70. HUDA, Zainul; TAIB, Nur Iskandar a ZAHARINIE, Tuan. Characterization of 2024-T3: An aerospace aluminum alloy. Online. *Materials Chemistry and Physics*. 2009, vol. 113, no. 2-3, s. 515-517. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.09.050>. [cit. 2024-07-08].
71. KORKMAZ, Mehmet Erdi; GÜNAY, Mustafa a VERLEYSEN, Patricia. Investigation of tensile Johnson-Cook model parameters for Nimonic 80A superalloy. Online. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. vol. 801, s. 542-549. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.153>. [cit. 2024-07-08].
72. POKLUDA, Jaroslav; KROUPA, František a OBDRŽÁLEK, Ladislav. *Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek: kovy, keramika, plasty*. PC-DIR, 1994. ISBN 80-214-0575-9.
73. CHANDRAN, Sarath; LIU, Wenqi; LIAN, Junhe; MÜNSTERMANN, Sebastian a VERLEYSEN Patricia. Dynamic strain aging in DP1000: Effect of temperature and strain rate. Online. *Materials Science and Engineering: A*. 2022, vol. 832, article 142509. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142509>. [cit. 2024-07-08].
74. AHMED, Shahroz; PENTTILÄ, Jani; RÄMÖ, Jari; HONKANEN, Mari; KUOKKALA, Veli-Tapani; OJA, Olli a PEURA, Pasi. Occurrence of dynamic strain aging in intercritically annealed low carbon high aluminium medium manganese steels. Online. *Materials Science and Engineering: A*. 2022, vol. 856, article 144011. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144011>. [cit. 2024-07-08].
75. PANOWICZ, Robert a KONARZEWSKI, Marcin. Influence of Imperfect Position of a Striker and Input Bar on Wave Propagation in a Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) Setup with a Pulse-Shape Technique. Online. *Applied Sciences*. 2020, vol. 10, no. 7, article 2423. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app10072423>. [cit. 2024-07-08].
76. AEROSPACE SPECIFICATION METALS. *Aluminum 7075-T6; 7075-T651*. Online. Dostupné z: <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7075t6>. [cit. 2024-07-08].
77. AEROSPACE SPECIFICATION METALS. *Aluminum 2024-T3*. Online. Dostupné z: <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma2024t3>. [cit. 2024-07-08].
78. SANCHO, Rafael; CENDÓN, David a GÁLVEZ, Francisco. Mechanical behaviour of Al2024-T3 sheet metal at different strain-rates and temperatures. Online. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 197, s. 158-167. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.092>. [cit. 2024-07-08].
79. HOTTINGER BRÜEL & KJÆR. *The Wheatstone Bridge Circuit Explained*. Online. Dostupné z: <https://www.hbm.com/fr/7163/wheatstone-bridge-circuit/>. [cit. 2024-07-08].

## ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

### Symbody

Označenie	Legenda	Jednotka
$A$	referenčná medza klzu v modely Johnson-Cook	[MPa]
$B$	pevnostný parameter v modeli Johnson-Cook	[MPa]
$C$	parameter citlivosti na rýchlosť deformácie	[-]
$c_B$	rýchlosť šírenia elastickej vlny v materiáli merných tyčí	[m·s <sup>-1</sup> ]
$D$	parameter modelu Cowper-Symonds	[s <sup>-1</sup> ]
$D_0$	priemer vzorky v mernej časti	[mm]
$D_B$	priemer mernej tyče	[mm]
$E_B$	modul pružnosti v ťahu materiálu merných tyčí	[Pa]
$F, G, H, L, M, N$	experimentálne zistené parametre anizotropie modelu Hill48	[-]
$F_1$	sila pôsobiaca na vzorku od vstupnej mernej tyče	[N]
$F_2$	sila pôsobiaca na vzorku od výstupnej mernej tyče	[N]
$K$	materiálový parameter	[MPa]
$k$	k-faktor tenzometra	[-]
$L$	okamžitá dĺžka mernej časti vzorky	[mm]
$L_0$	počiatočná merná dĺžka	[mm]
$L_B$	dĺžka mernej tyče	[mm]
$L_{Bmin}$	minimálna dĺžka mernej tyče	[mm]
$L_f$	dĺžka vzorky po teste	[m]
$L_{st}$	dĺžka impaktora	[mm]
$m$	parameter zohľadňujúci vplyv teploty	[-]
$n$	exponent deformačného spevnenia	[-]
$P$	okamžité aplikované zaťaženie	[N]
$p$	parameter modelu Cowper-Symonds	[-]
$Q$	parameter modelu Voce	[MPa]
$R_m$	medza pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	zmluvná medza klzu	[MPa]
$r$	Lankfordov koeficient	[-]
$r_\alpha$	Lankfordov koeficient pre rôzne orientácie vzhľadom na smer valcovania	[-]
$S$	parameter citlivosti na rýchlosť deformácie	[MPa·s <sup>-1</sup> ]
$S_0$	počiatočný prierez vzorky v mernej časti	[mm <sup>2</sup> ]
$S_B$	prierez mernej tyče	[mm <sup>2</sup> ]
$S_f$	prierez mernej časti vzorky po skúške	[mm <sup>2</sup> ]
$S_i$	okamžitý prierez	[mm <sup>2</sup> ]
$T$	teplota materiálu	[K]
$T^*$	homologická teplota	[-]
$T_0$	referenčná teplota	[K]
$T_m$	teplota tavenia	[K]
$t$	čas	[s]
$U_{in}$	napájacie napätie Wheatstoneovho mosta	[V]
$U_o$	napätie z Wheatstoneovho mosta na výstupe zosilňovača	[V]
$V$	rýchlosť dopadu vzorky	[m·s <sup>-1</sup> ]
$v$	rýchlosť pohybu priečnika	[mm·s <sup>-1</sup> ]
$v_{st}$	dopadová rýchlosť impaktora	[m·s <sup>-1</sup> ]
$X$	dĺžka nezdeformovanej časti vzorky	[m]
$z$	zosilnenie	[-]

Označenie	Legenda	Jednotka
$\beta$	parameter modelu Voce	[-]
$\varepsilon$	zmluvná deformácia	[-]
$\dot{\varepsilon}$	rýchlosť deformácie	[s <sup>-1</sup> ]
$\dot{\varepsilon}_0$	referenčná rýchlosť deformácie v modeli Johnson-Cook	[s <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon_A$	amplitúda tlakového pulzu	[-]
$\varepsilon_i$	zmluvná deformácia spôsobená iniciačným pulzom	[-]
$\varepsilon_r$	zmluvná deformácia spôsobená odrazeným pulzom	[-]
$\varepsilon_t$	zmluvná deformácia spôsobená preneseným pulzom	[-]
$\mu$	Poissonov pomer	[-]
$\rho$	hustota materiálu vzorky	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$\rho_B$	hustota materiálu merných tyčí	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$\sigma$	napätie	[MPa]
$\sigma_{eng}$	zmluvné napätie	[MPa]
$\sigma_f$	skutočné napätie v modeli Cowper-Symonds	[MPa]
$\sigma_i$	hlavné napätia	[MPa]
$\sigma_{true}$	skutočné napätie	[MPa]
$\sigma_y$	medza klzu	[MPa]
$\sigma_{yb}$	medza klzu pri dvojosovom ťahu	[MPa]
$\sigma_{ya}$	medza klzu pre rôzne orientácie vzorky vzhľadom na smer valcovania	[MPa]
$\sigma_Y$	dynamická medza klzu podľa Taylora	[MPa]
$\sigma_{Yk}$	skorigovaná dynamická medza klzu podľa Taylora	[MPa]
$\tau_0$	kritická hodnota šmykového napätia	[MPa]
$\tau_{ij}$	hlavné šmykové napätia	[MPa]
$\tau_{max}$	maximálne šmykové napätie	[MPa]
$\varphi$	skutočná deformácia	[-]
$\dot{\varphi}$	skutočná rýchlosť deformácie	[s <sup>-1</sup> ]
$\varphi_0$	počiatočná deformácia – Swiftov model	[-]
$\varphi_f$	efektívne plastické pretvorenie pri porušení materiálu	[-]
$\varphi_t$	skutočná deformácia v smere hrúbky vzorky	[-]
$\varphi_{tpl}$	skutočná plastická deformácia v smere hrúbky vzorky	[-]
$\varphi_w$	skutočná deformácia v smere šírky vzorky	[-]
$\varphi_{wpl}$	skutočná plastická deformácia v smere šírky vzorky	[-]

## Skratky

Označenie	Legenda
BSE	spätne odrazené elektróny
DIC	Digital Image Correlation
DSA	dynamické deformačné starnutie
DVC	Digital Volume Correlation
EBS	elektrónová spätne odrazená difrakcia
EDS	energodisperzná röntgenová spektroskopia
FCC	kubicky plošne centrovaná mriežka
GP	Guinier-Prestonove zóny
NSRS	negatívna citlivosť na rýchlosť deformácie
PLA	polyaktid
PLC	Portevin-Le Chatelierov efekt
SE	sekundárne elektróny
SEM	rastrovací elektrónový mikroskop
SHPB	Hopkinsonov tlakový test
SHTB	Hopkinsonov ťahový test
ZNSSD	Zero-mean normalized sum of squared differences