



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 AI ALLOYS

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

SHORTENED VERSION OF DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Martin Harant

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Forejt, CSc.

BRNO 2024

Kľúčové slová

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

Keywords

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

OBSAH

Úvod.....	5
1 Ciele dizertačnej práce.....	5
2 Hliníková zliatina EN AW-2024 – T3.....	6
3 Hopkinsonov test.....	7
4 Vlastnosti zliatiny EN AW-2024 – T3 vo vytvrdenom stave.....	9
4.1 Experimentálny program a metódy.....	9
4.1.1 Ťahové skúšky.....	9
4.1.2 Štruktúrna analýza a fraktografia.....	11
4.2 Výsledky a diskusia.....	12
4.2.1 Vyhodnotenie ťahových skúšok.....	12
4.2.2 Štruktúrna analýza a fraktografia.....	14
4.2.3 Materiálový model Johnson-Cook.....	17
5 Vlastnosti zliatiny EN AW-2024 – T3 v mäkkom stave.....	18
5.1 Materiál a metódy.....	18
5.2 Výsledky a diskusia.....	19
6 Hopkinsonov ťahový test.....	21
6.1 Riešenie pre testovanie vzoriek kruhového prierezu.....	21
6.1.1 Realizácia návrhu.....	22
6.1.2 Overenie funkcie.....	22
6.2 Riešenie pre testovanie plochých vzoriek.....	23
6.2.1 Realizácia návrhu.....	24
6.2.2 Overenie funkcie.....	24
Závery.....	25

Zoznam použitej literatúry

Curriculum vitae

Abstrakt

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 napätových 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 polotovar 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 HLINÍKOVÁ ZLIATINA EN AW-2024 – T3

Hliníková 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 tvárniteľnosť, obrobitelnosť a odolnosť voči únavovému porušeniu. Hlavnými legujúcimi prvkami sú Cu a Mg, ktoré vytvárajú štruktúrne zložky Al_2Cu a Al_2CuMg 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 zloženie a druhy tvárených výrobkov – Časť 3: Chemické zloženie a druhy výrobkov; uvádza tab. 1. [2; 3; 4]

Tab. 1 Chemické zloženie zliatiny EN AW-2024 – T3 podľa normy ČSN EN 573-3+A2 (v hm. %) [4].

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

Výhodná kombinácia vlastností predurčuje zliatinu EN AW-2024 – T3 na použitie v leteckom priemysle a 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 napätový stav, teplotu alebo rýchlosť deformácie. Vlastnosti sú ovplyvnené aj typom polotovaru a technológiou použitou pre jeho výrobu. Prikladom 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 [5], ktorý vykonal tlakové skúšky na vzorkách odobraných z dosky pri rýchlostiach deformácie 0,001; 10 a 3 500 s^{-1} 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 [6] sa zameril na zisťovanie citlivosti na rýchlosť deformácie v rozsahu 0,006 až 10 857 s^{-1} 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 [7] 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^{-1} 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^{-1}). Shamchi [8] predstavil prácu venovanú skúšaniam vzoriek z plechu plátovaného čistým hliníkom. Ťahové testy prebiehali pri rýchlostiach deformácie 0,001 až 1 150 s^{-1} 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.

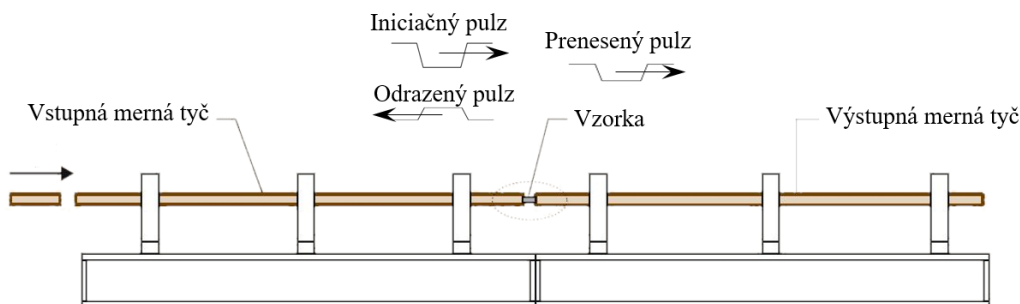
NSRS je charakteristická pre viaceré hliníkové zliatiny. Toto správanie býva zvyčajne prejavom dynamického deformačného starnutia (angl. Dynamic Strain Aging – DSA) a/alebo tepelného odpevnenia. DSA sa okrem NSRS prejavuje aj Portevin-Le Chatelierovým (PLC) efektom, ktorý je možné pozorovať pri ťahovej skúške na závislosti napätie-deformácia, kde sú viditeľné opakované poklesy a nárasty napätia (angl. serrated flow), a tiež ako pohybujúce sa deformačné pásy na skúšobnom telese. Na zachytenie deformačných pásov sa využíva metóda Digital Image Correlation (DIC), ktorá umožňuje bezkontaktné meranie deformácií a posuvov. 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 [8] využil vysokorýchlostnú termokameru, pomocou ktorej pozoroval nárast adiabatického tepla pri ťahovej skúške za izbovej teploty a rýchlosti deformácie 500 s^{-1} . Z výsledkov tejto analýzy vyvodzuje záver, že adiabatické teplo má za následok pokles pevnosti. [9; 10]

Skúmaniu vplyvu anizotropie bolo taktiež venovaných niekoľko publikácií. Barlat [11] 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 [12] skúmal vzorky odobrané z dosky s hrúbkou 4 mm pri tlakovom zaťažení a rýchlosti deformácie $4\,000 \text{ s}^{-1}$ (orientácia vzoriek: 0° , 90° a smer kolmý na rovinu valcovania) a tiež pri ťahovom zaťažení a rýchlosti deformácie $8\,000 \text{ s}^{-1}$ (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 [8].

Závery vyššie 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 HOPKINSONOV TEST

Hopkinsonov test je skúšobná metóda pre skúmanie vlastností materiálov pri dynamickom zaťažení. Základným variantom je tlakový test (angl. Split Hopkinson Pressure Bar – SHPB) zobrazený na obr. 1. Impaktor, merné tyče a vzorka sú uložené súsovo, čo je zabezpečené vodiacimi prvkami. Urýchlením impaktora a jeho dopadom na čelo vstupnej mernej tyče vzniká napäťový tlakový pulz (iniciačný pulz). Hneď ako dosiahne tento 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). Napäťové pulzy spôsobujú elasticnú deformáciu merných tyčí zaznamenávanú meracím príslušenstvom. Získané hodnoty sú použité pre vyhodnotenie odozvy skúmaného materiálu na dynamické zaťaženie.



Obr. 1 Schéma zariadenia SHPB [13].

Vzťahy vedúce k stanoveniu zmluvnej deformácie, zmluvného napätia a rýchlosti deformácie vzorky sú založené na teórii jednodimenzionálneho šírenia napät'ových vln. Zmluvné napätie σ_{eng} je počítané nasledujúco [14]:

$$\sigma_{eng} = \frac{1}{2} \cdot \frac{S_B}{S_0} \cdot E_B \cdot (\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t), \quad (3.1)$$

kde: S_B – prierez mernej tyče [mm²],
 S_0 – počiatocný prierez vzorky v mernej časti [mm²].
 E_B – modul pružnosti v ťahu materiálu merných tyčí [MPa],
 ε_i – zmluvná deformácia spôsobená iniciačným pulzom [-],
 ε_r – zmluvná deformácia spôsobená odrazeným pulzom [-],
 ε_t – zmluvná deformácia spôsobená preneseným pulzom [-].

Rýchlosť deformácie vzorky $\dot{\varepsilon}$ sa počíta na základe [14]:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{c_B \cdot (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t)}{L_0}, \quad (3.2)$$

kde: c_B – rýchlosť šírenia elastickej vlny v materiáli merných tyčí [m·s⁻¹],
 L_0 – počiatocná merná dĺžka [m].

Zmluvnú deformáciu ε je možné získať integráciou vzťahu (3.2) podľa času t [14]:

$$\varepsilon = \int_0^t \frac{c_B \cdot (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t)}{L_0} dt. \quad (3.3)$$

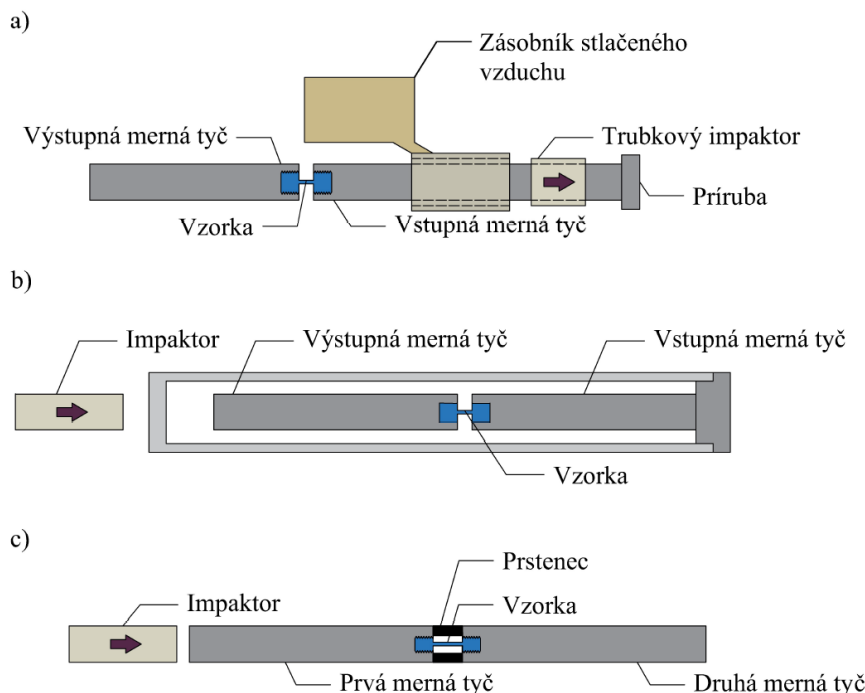
Pre komplexnú analýzu dynamického správania materiálu je dôležité poznať vplyv rôznych napät'ových stavov. Za týmto účelom boli vyvinuté modifikácie Hopkinsonovho testu, ktoré umožňujú skúmanie pri zaťažení v ťahu (angl. Split Hopkinson Tensile Bar – SHTB), strihu, krute, dvojsose ťahu, či ďalších kombináciách 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. 2a), patrí k najpoužívanejším. Iniciačný ťahový pulz je vyvolaný priamo, dopadom na prírubu spojenú s vstupnou mernou tyčou. [14]

Ďalšou alternatívou je zariadenie, ktoré bolo predstavené Hardingom [15] a použité pre testovanie jednosmerne vystuženého uhlíkovo-epoxidového kompozitu. Merné tyče a vzorka sú umiestnené v trubke, pozri obr. 2b. 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.

Konštrukčne najjednoduchším je zariadenie prezentované Nicholasom v [16], ktoré pre nepriame vytvorenie ťahového pulzu využíva prstenec umiestnený medzi mernými tyčami (obr. 2c). 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. Vnútorý 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.



Obr. 2 Schémy zariadení pre SHTB a) s trubkovým impaktorom, b) s mernými tyčami umiestnenými v trubke a c) s prstencom [14; 15; 16].

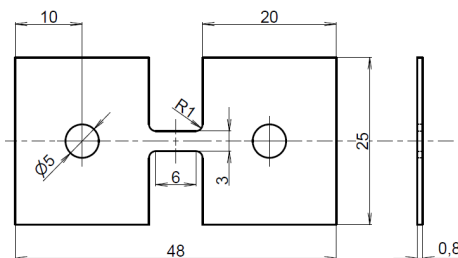
4 VLASTNOSTI ZLIATINY EN AW-2024 – T3 VO VYTVRDENOM STAVE

4.1 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⁻¹. 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°. 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].

4.1.1 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. 3. Upínanie bolo riešené pomocou kolíkov.



Obr. 3 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. Maximálne skúšobné zaťaženie stroja je 50 kN. Rýchlosť pohybu priečnika bola 0,36 a 360 mm·min⁻¹, čím sa dosiahla rýchlosť deformácie 0,001 a 1 s⁻¹. Všetky testy trvali do porušenia vzorky.

Testy pri ťahovom zaťažení v režime vysokých rýchlostí deformácie boli vykonané s využitím Hopkinsonovho zariadenia, ktoré využíva trubkový impaktor (obr. 2a). Vstupná aj výstupná merná tyč boli vyrobené z hliníkovej zliatiny s označením EN AW-7075 – T6 ($E_B = 73\,100$ 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 m·s⁻¹. Deformácie merných tyčí boli merané tenzometrami zapojenými do plného Wheatstoneovho mosta, ktorého výstup bol zaznamenaný systémom pre zber údajov.

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. Snímky pri testoch s rýchlosťou deformácie 0,001 s⁻¹ boli získané pomocou kamery 5Mpxl F-504B Allied Vision Stingray. Pre meranie pri rýchlostiach deformácie 1 a 800 s⁻¹ bolo potrebné použiť vysokorýchlostnú kameru Photron Mini AX200. Vhodné osvetlenie na snímanie pri skúškach na zariadení Instron 5569 zabezpečila dvojica LED reflektorov. Vzorky testované pri vysokých rýchlostiach deformácie boli osvetlené reflektormi Dedocool. 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. 2.

Tab. 2 Parametre 2D DIC analýzy [1].

	Rýchlosť deformácie 0,001 s ⁻¹	Rýchlosť deformácie 1 s ⁻¹	Rýchlosť deformácie 800 s ⁻¹
Rozlíšenie snímok	2 452 × 2 056 pixelov	256 × 272 pixelov	256 × 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 × 45 pixelov	9 × 9 pixelov	7 × 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 × 221 pixelov	23 × 23 pixelov	31 × 31 pixelov

Zložky deformácie v smere zaťažovania φ a v smere šírky vzorky φ_w boli vyhodnotené na základe DIC analýzy ako priemer hodnôt tvoriacich deformačnú mapu v mernej časti vzorky. Deformácia v smere hrúbky vychádza z predpokladu, že platí zákon zachovania objemu.

Výstupom ťahových skúšok sú závislosti skutočné napätie-deformácia. Hodnoty skutočného napätia σ_{true} boli vypočítané podľa vzťahu [17]:

$$\sigma_{true} = \frac{P}{S_i}, \quad (4.1)$$

kde: P – okamžité aplikované zaťaženie [N],

S_i – okamžitý prierez vzorky [mm²].

Okamžitý prierez vzorky sa spočítal nasledujúco [1]:

$$S_i = S_0 \cdot e^{-\varphi}. \quad (4.2)$$

Ďalej bol vyhodnotený Lankfordov koeficient r [17]:

$$r = \frac{\varphi_{wpl}}{\varphi_{tpl}}, \quad (4.3)$$

kde: φ_{wpl} – skutočná plastická deformácia v smere šírky vzorky [-],
 φ_{tpl} – skutočná plastická deformácia v smere hrúbky vzorky [-].

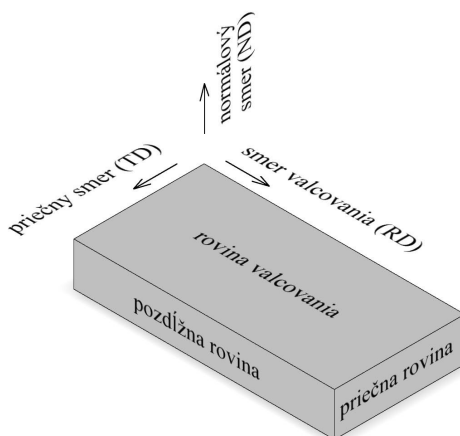
Skutočné plastické deformácie v smere šírky a hrúbky vzorky φ_{wpl} a φ_{tpl} , ktoré vstupujú do vzťahu (4.3), sa určili odčítaním elastickej zložky od φ_w a φ_t . Vďaka 2D DIC analýze bol Lankfordov koeficient získaný pre celú oblasť od medze klzu po okamžik vzniku krčka, z čoho sa následne stanovila 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.

4.1.2 Štruktúrna analýza a fraktografia

Mikroštruktúra východiskového 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. 4 definuje smery a roviny, v ktorých sú pozorované a vyhodnocované štruktúrne analýzy.



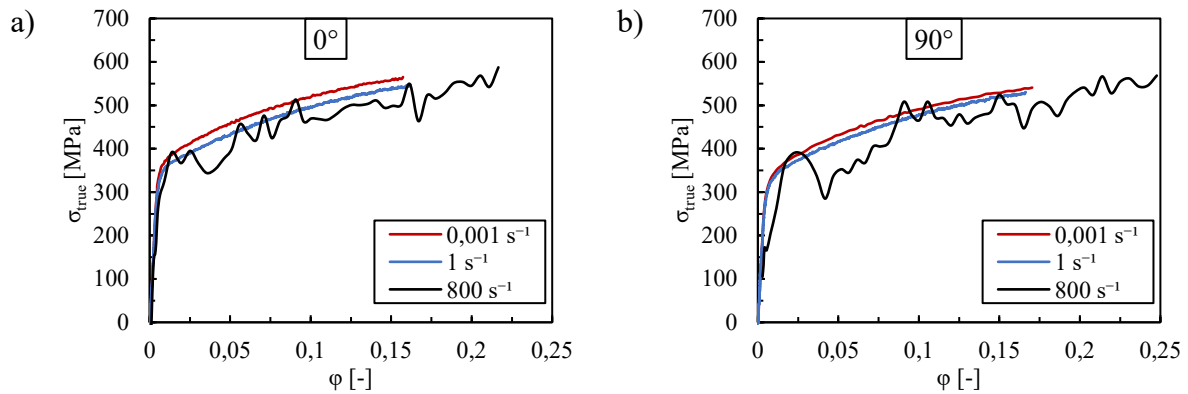
Obr. 4 Schéma rovín pozorovania.

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 spočívala vo vyčistení acetónom v ultrazvukovej čističke a osušení.

4.2 Výsledky a diskusia

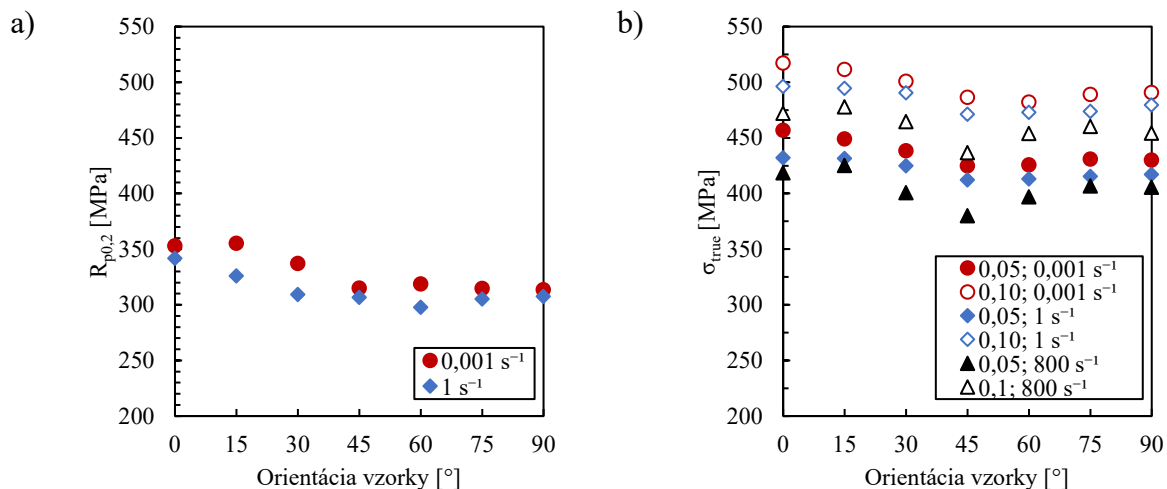
4.2.1 Vyhodnotenie ťahových skúšok

Na obr. 5 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° a 90° . Výsledky ukazujú, že zliatina vykazuje NSRS v testovanom rozsahu rýchlosti deformácie.



Obr. 5 Skutočné závislosti napätie-deformácia získané pri kvazistatických, stredných a vysokých rýchlostiach deformácie pre orientácie vzoriek s ohľadom na smer valcovania a) 0° a b) 90° [1].

Vplyv rýchlosti deformácie a orientácie vzorky s ohľadom na smer valcovania na zmluvnú medzu klzu $R_{p0,2}$ je na obr. 6a. 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 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. 6b. Závislosti napätie-deformácia z Hopkinsonovho testu boli za týmto účelom aproximované s využitím Hollomonovho vzťahu. Hodnoty vykreslené v grafoch na obr. 6 potvrdzujú NSRS.



Obr. 6 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 [18]:

$$S = \frac{d\sigma}{d(\ln(\dot{\epsilon}))}, \quad (4.4)$$

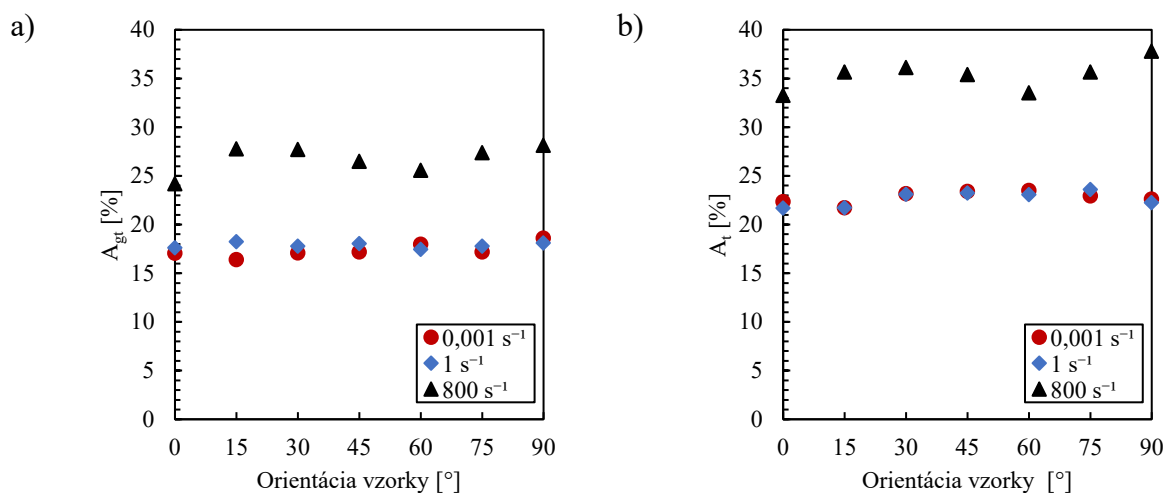
kde: S – parameter citlivosti na rýchlosť deformácie [$\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$],
 σ – napätie pri určitej deformácii [MPa].

Veľkosť parametra S je možné určiť vynesением bodov do grafu σ - $\ln(\dot{\epsilon})$ a ich následným preložením lineárnou funkciou, pričom S je rovný smernici tejto lineárnej funkcie. Na základe uvedeného postupu bol vypočítaný parameter S pre rôzne orientácie vzoriek. Výsledky sú uvedené v tab. 3. Pre všetky orientácie je hodnota S záporná, čo odpovedá NSRS. Toto správanie môže byť pripisované DSA. Skúmaním deformačných máp získaných 2D DIC analýzou ale nebolo zistené, že by sa počas ťahových skúšok objavili deformačné pásy. Rovnako u závislosti napätie-deformácia nebol pozorovaný 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 s^{-1} [18]. 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 medzi klzu $R_{p0,2}$, nie je možné pripisovať NSRS adiabatickému ohrevu. Toto tvrdenie podporuje aj fakt, že hodnota S nerastie s pribúdajúcou deformáciou, prípadne len veľmi málo.

Tab. 3 Hodnoty parametra citlivosti na rýchlosť deformácie S pre rôzne orientácie vzoriek [1].

Orientácia vzorky	S pre $R_{p0,2}$ [MPa·s ⁻¹]	S pre σ_{true} pri $\varphi = 0,05$ [MPa·s ⁻¹]	S pre σ_{true} pri $\varphi = 0,1$ [MPa·s ⁻¹]
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

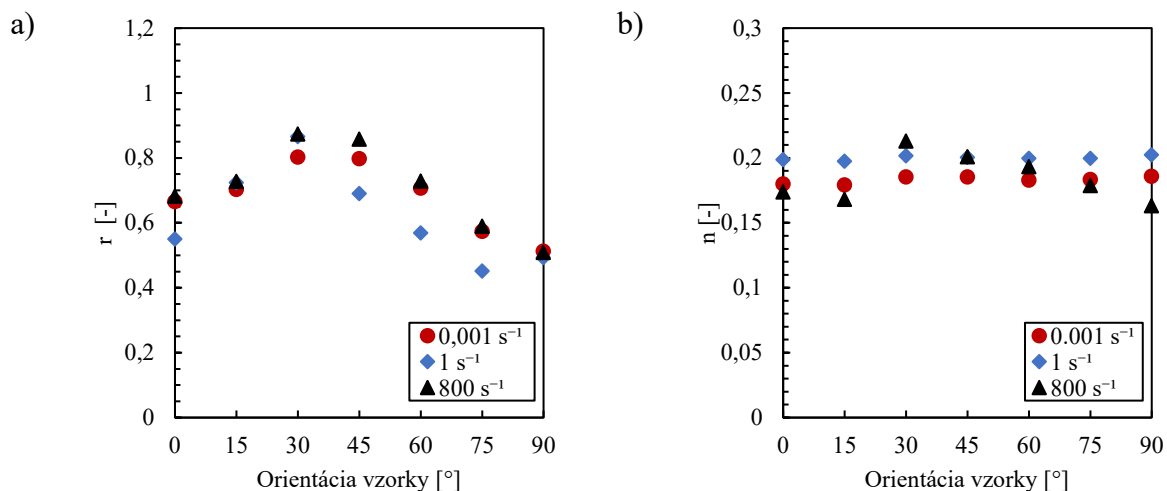
Ďalej boli vyhodnotené celkové predĺženie pri maximálnom zaťažení A_{gt} a celková ťažnosť A_t , pozri obr. 7. Pri vysokých rýchlostiach deformácie boli pozorované vyššie hodnoty oboch sledovaných veličín, ako boli pri nižších rýchlostiach. Tieto výsledky sa zhodujú so závermi, ktoré sú prezentované v [8].



Obr. 7 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. 8a. 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.

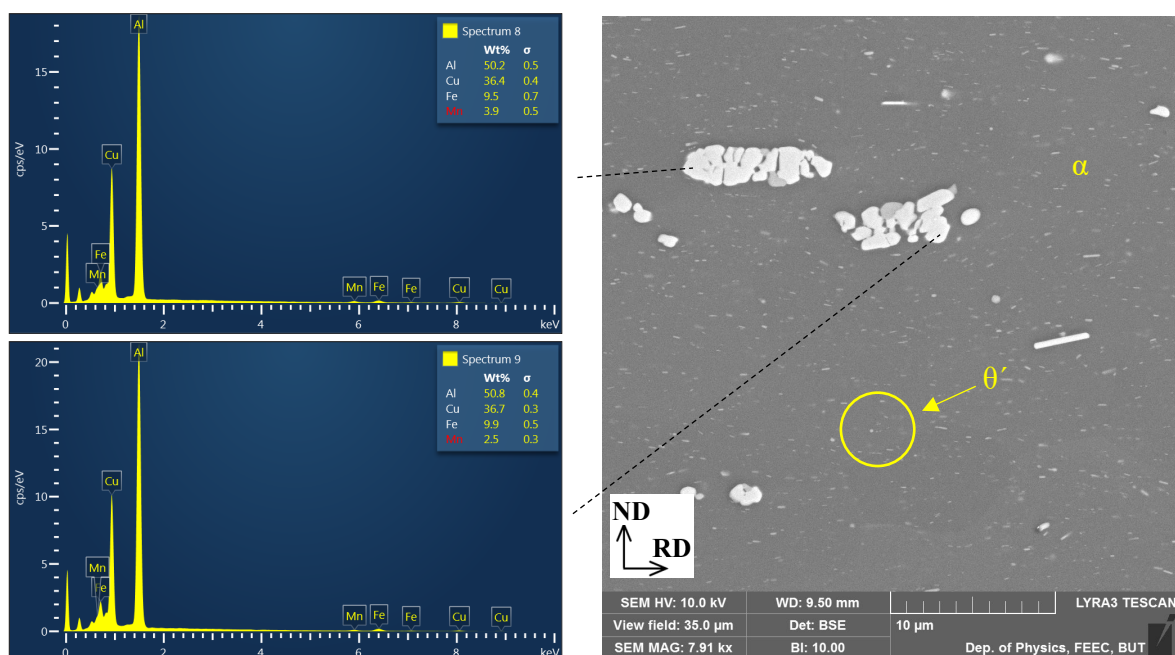
Exponent deformačného spevnenia nie je výrazne ovplyvnený rýchlosťou deformácie ani anizotropiou materiálu (obr. 8b). Odchýlky u vysokých rýchlostiach deformácie môžu byť spôsobené osciláciami závislosti napätie-deformácia, z ktorých je hodnota určená.



Obr. 8 a) Lankfordov koeficient a b) exponent deformačného spevnenia v závislosti na orientácii vzoriek [1].

4.2.2 Štruktúrna analýza a fraktografia

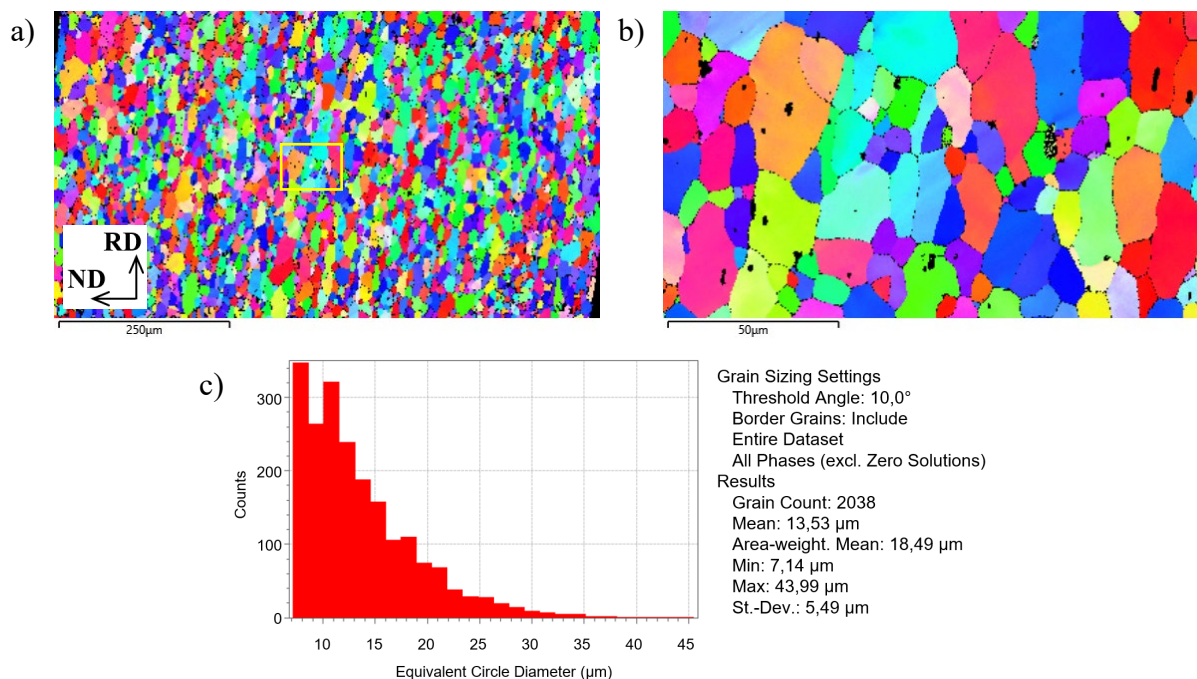
Snímka v pozdĺžnej rovine východiskového materiálu získaná pomocou SEM je na obr. 9. Mikroštruktúra je tvorená tuhým roztokom α s FCC mriežkou (na báze Al), intermetalickými fázami na báze Al-Cu-Fe-Mn a drobnou disperziou intermetalickej fázy Al_2Cu (θ'). Tyčinková morfológia častíc θ' odpovedá stavu tepelného spracovania T3. [19]



Obr. 9 Mikroštruktúra materiálu vo východiskovom stave v pozdĺžnej rovine plechu.

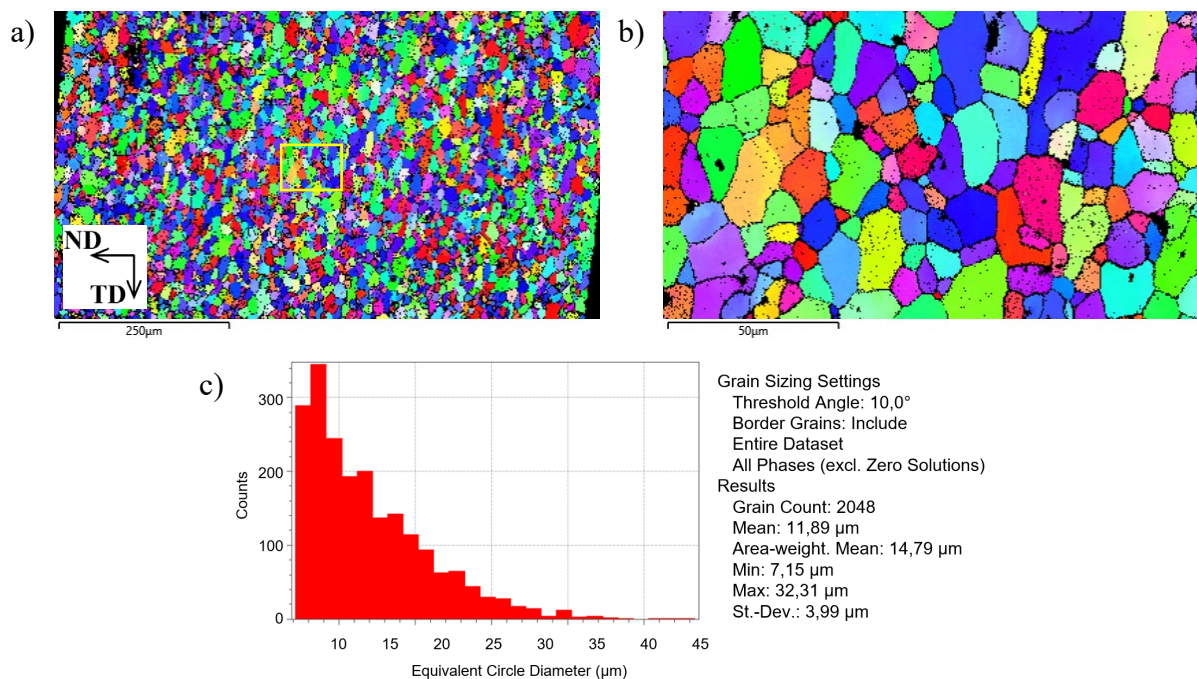
Na obr. 10 sú výsledky EBSD analýzy východiskového stavu v pozdĺžnej rovine plechu. Veľkosť zrna bola stanovená pomocou obrazovej analýzy a metódy ekvivalentného priemeru,

ktorý je definovaný ako priemer kruhu s rovnakou plochou, akú má zrnó nepravidelného tvaru. Dáta ukazujú, že priemerná veľkosť zrna je približne $14 \pm 5 \mu\text{m}$. Zrná sú mierne predĺžené v smere valcovania.



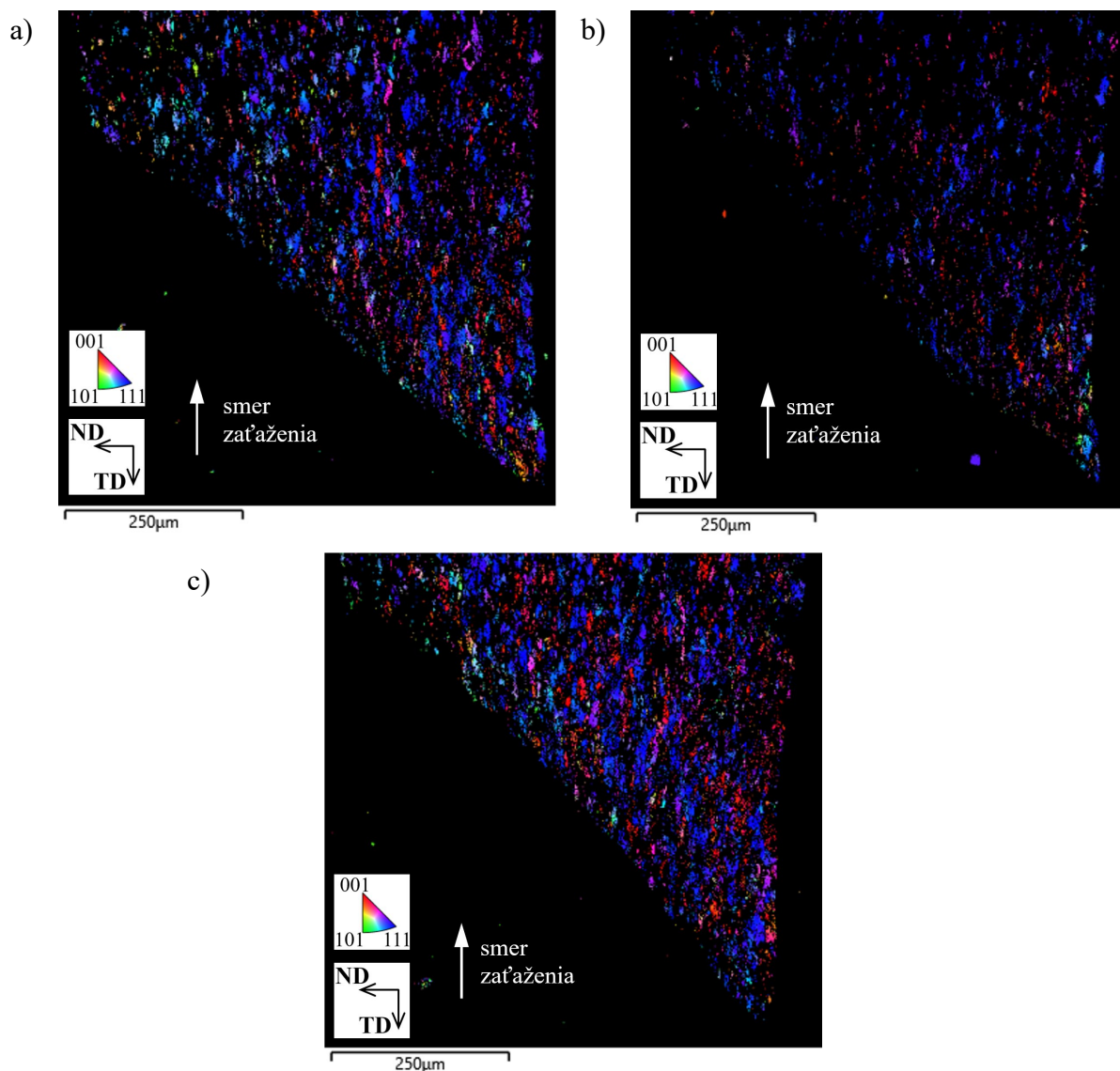
Obr. 10 EBSD analýza východiskového stavu materiálu v pozdĺžnej rovine plechu a) IPF mapa b) detailný pohľad a c) analýza veľkosti zrna.

Výstupy EBSD analýzy východiskového stavu materiálu v priečnej rovine plechu prezentuje obr. 11. 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, pozri obr. 6. Táto smerovosť štruktúry má tiež vplyv na pozorovanú anizotropiu vlastností.



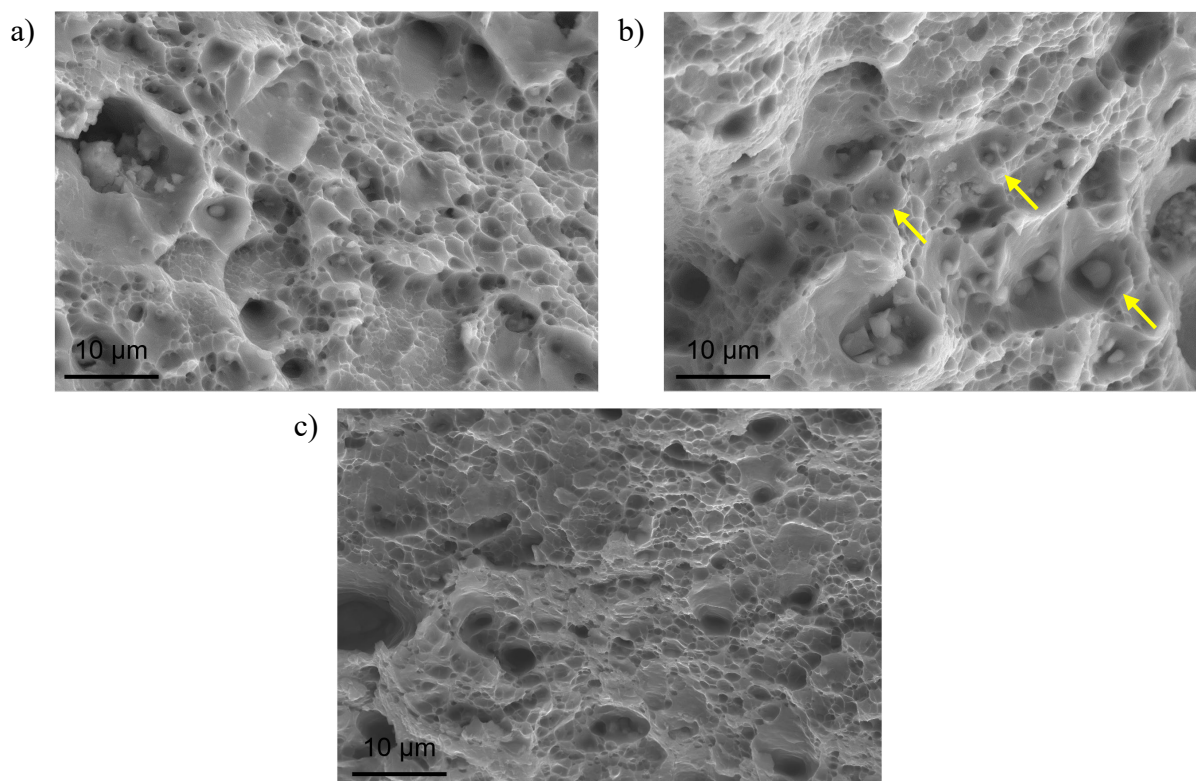
Obr. 11 EBSD analýza východiskového stavu materiálu v priečnej rovine plechu a) IPF mapa b) detailný pohľad a c) analýza veľkosti zrna.

Analýze EBSD boli ďalej podrobené vzorky s orientáciou 90° , ktoré boli vystavené ťahovému zaťaženiu pri rôznych rýchlostiach deformácie, pozri. obr. 12. Sledovaná bola bočná strana miesta porušenia, čo u danej orientácie odpovedá priečnej rovine plechu. V porovnaní s východiskovým materiálom, je podiel neindexovaných oblastí, kde nebolo možné priradiť správnu orientáciu kryštálu, výrazne väčší. Neindexované dátové body sú umiestnené prevažne na hraniciach zŕn, pretože v týchto miestach sa difrakčné obrazce susedných zŕn prekrývajú. Ďalším dôvodom veľkého výskytu je prítomnosť dutiniek a oblastí s veľmi výraznou plastickou deformáciou. Snímky (obr. 12) ukazujú, že pri zaťažení došlo k predĺženiu zŕn v smere pôsobiacej sily.



Obr. 12 IPF mapy pre vzorky s orientáciou 90° testované pri rýchlostiach deformácie a) $0,001 \text{ s}^{-1}$, b) 1 s^{-1} a c) 800 s^{-1} .

Lomové plochy boli skúmané na vzorkách odobraných v smere 45° , ktoré boli vystavené ťahovému zaťaženiu pri rýchlostiach deformácie $0,001$; 1 a 800 s^{-1} , pozri obr. 13. Detailný pohľad zachytáva krajnú oblasť vzorky. Na snímkach sú viditeľné ploché jamky, tie naznačujú, že mechanizmom porušenia bol nízkoenergetický tvárny lom. V niektorých jamkách je možné pozorovať zvyšky intermetalických fáz, ktoré predstavujú koncentrátoory napätia (obr. 13b). 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. 13 Snímky lomových plôch vzoriek odobraných v smere 45°, ktoré boli vystavené ťahovému zaťaženiu pri rýchlosti deformácie a) 0,001 s⁻¹, b) 1 s⁻¹ a c) 800 s⁻¹ [1].

4.2.3 Materiálový model Johnson-Cook

Materiálový model Johnson-Cook popisuje plastické správanie materiálu pri zaťažení, pričom pomocou piatich parametrov zohľadňuje vplyv deformácie, rýchlosti deformácie a teploty [20]:

$$\sigma_{true} = (A + B \cdot \varphi_{pl}^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right) \cdot (1 - T^{*m}), \quad (4.5)$$

kde: A – referenčná medza klzu [MPa],
 B – pevnostný parameter [MPa],
 C – parameter citlivosti na rýchlosť deformácie [-],
 φ_{pl} – skutočná plastická deformácia [-],
 $\dot{\varepsilon}_0$ – 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].

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°. 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. Vypočítané parametre materiálového modelu Johnson-Cook sú zhrnuté v tab. 4.

Tab. 4 Parametre materiálového modelu Johnson-Cook pre hliníkovú zliatinu EN AW-2024 – T3.

Parameter materiálového modelu Johnson-Cook	A [MPa]	B [MPa]	n [-]	C [-]	ϵ_0 [s ⁻¹]
Hodnota parametra	341	746	0,667	-0,00643	1

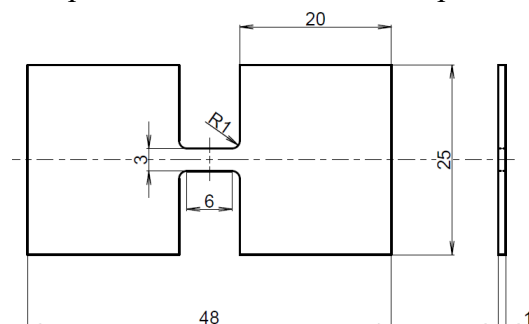
5 VLASTNOSTI ZLIATINY EN AW-2024 – T3 V MÄKKOM STAVE

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]

5.1 Materiál a metódy

Východiskovým materiálom pre skúmanie mechanických vlastností a tvárniteľnosti 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 do 15 minút po ňom, pri dvoch nastaveniach rýchlosti pohybu priečnika, ktorými sa dosiahla rýchlosť deformácie približne 0,0007 a 0,18 s⁻¹. Pre každé nastavenie okrajových podmienok sa uskutočnili minimálne dve opakovania. Vzorky pre ťahové skúšky, ktorých tvar a rozmery ukazuje obr. 14, 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. Upínanie vzoriek bolo riešené pomocou plochých čeľustí.



Obr. 14 Geometria a rozmery vzorky pre ťahové skúšky.

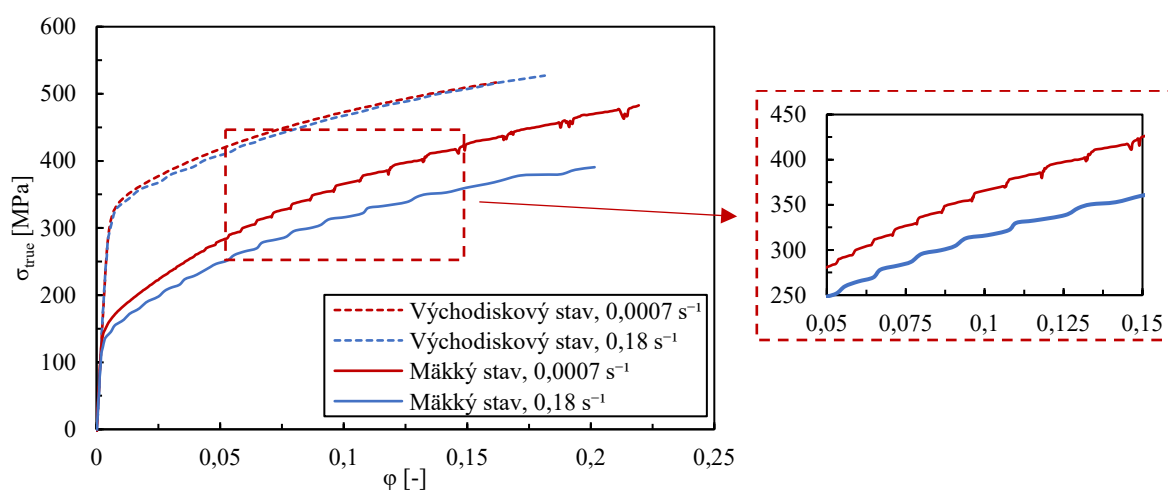
Deformácia vzoriek sa získala 2D DIC analýzou s využitím monochromatickej kamery FLIR Blackfly S USB3 s objektívom TEC-M55MPW. Na osvetlenie sa použil zdroj monochromatického zeleného svetla. Frekvencia snímania bola pre nižšiu rýchlosť deformácie 1 Hz a pre vyššiu 200 Hz. Snímky spracoval softvér Alpha, 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, 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.

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 4.1.1.

5.2 Výsledky a diskusia

Obr. 15 zobrazuje skutočné závislosti napätie-deformácia pre dva stavy materiálu skúšané ťahovým zaťažením 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 α .

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 NSRS. Ako sa prezentovalo v predošlých kapitolách, tento jav je možné pripisovať DSA, čo potvrdzuje aj prítomnosť 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 $0,03351$. [21; 22]



Obr. 15 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.

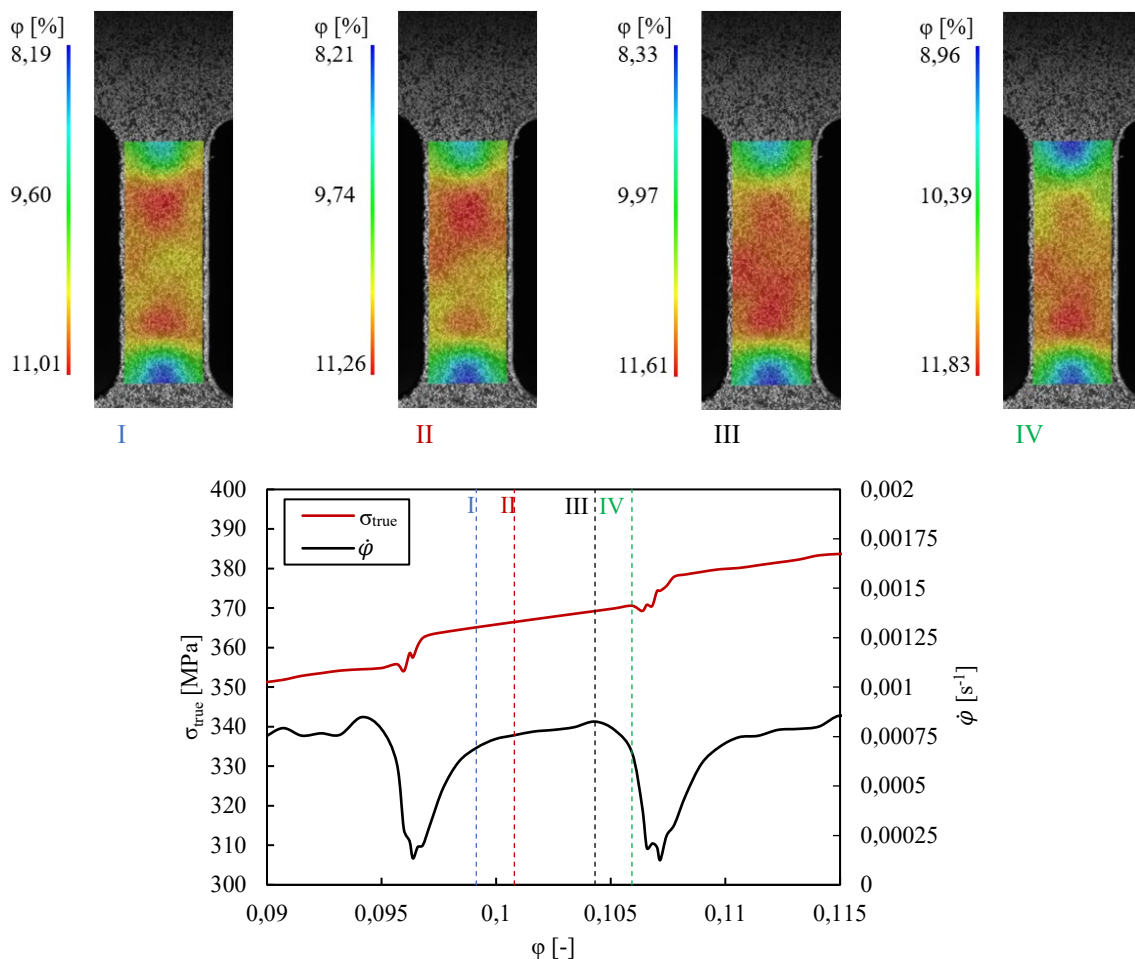
Na obr. 16 je zobrazený detail skutočnej závislosti rýchlosť deformácie-deformácia pre ťahovú skúšku materiálu v mäkkom stave pri rýchlosti deformácie $0,0007 \text{ s}^{-1}$. Skutočná rýchlosť deformácie $\dot{\varphi}$ bola vypočítaná podľa vzťahu:

$$\dot{\varphi} = \frac{\dot{\varepsilon}}{1 + \varepsilon}. \quad (5.1)$$

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.

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. 16.

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. Základné charakteristiky materiálu vo východiskovom a mäkkom stave sú v tab. 5. 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.



Obr. 16 Šírenie deformačného pásu a detail skutočných závislostí rýchlosť deformácie-deformácia a napätie-deformácia pre materiál v mäkkom stave testovaný pri rýchlosti deformácie $0,0007 \text{ s}^{-1}$.

Tab. 5 Základné charakteristiky východiskového materiálu a materiálu v mäkkom stave.

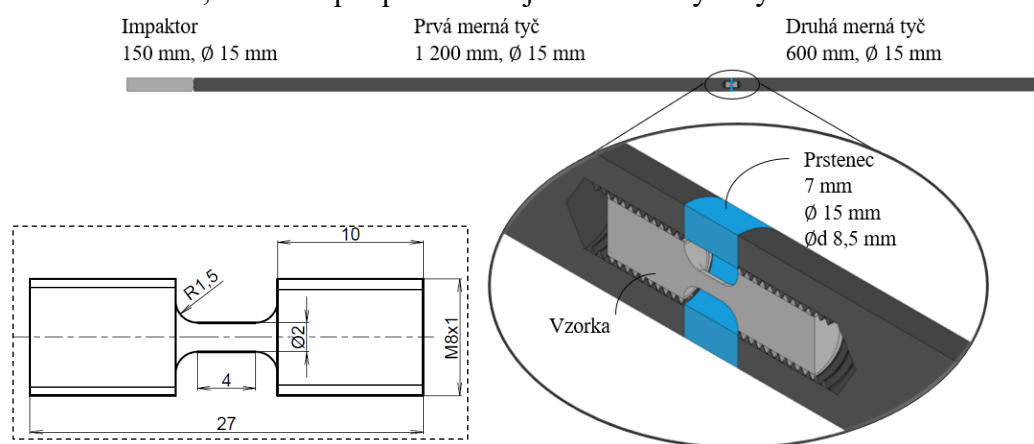
Stav materiálu	Rýchlosť deformácie $\dot{\epsilon}$ [s^{-1}]	Zmluvná medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Lankfordov koeficient r [-]	Exponent deformačného spevnenia n [-]
východiskový	0,0007	325	0,64	0,170
	0,18	310	0,69	0,178
mäkký	0,0007	155	0,54	0,333
	0,18	140	0,55	0,331

6 HOPKINSONOV ŤAHOVÝ TEST

Z overených modifikácií zariadenia pre SHTB bolo vybrané riešenie využívajúce prstenec [16]. Princíp funkcie je popísaný v kapitole 3. K hlavným dôvodom, prečo bolo zvolené toto riešenie, patrí jednoduchá konštrukcia. 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.

6.1 Riešenie pre testovanie vzoriek kruhového prierezu

Zostava je tvorená mernými tyčami, impaktorom a prstencom, pozri obr. 17. Merné tyče majú priemer 15 mm a dĺžky 1 200 a 600 mm. 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 je 150 mm. Čelo je opatrené zaoblením s veľkosťou 25 mm. Prstenec má vonkajší priemer 15 mm, vnútorný priemer 8,5 mm a dĺžku 7 mm. Geometria a rozmery vzorky sú zobrazené na obr. 17. 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, čomu sú prispôbené aj konce merných tyčí.



Obr. 17 Schematické zobrazenie návrhu riešenia SHTB pre testovanie vzoriek 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. 6.

Funkcia navrhnutého riešenia bola pred realizáciou overená numerickou simuláciou. Za týmto účelom bol využitý softvér ANSYS Workbench 2022 R1, modul LS-DYNA. Na základe výsledkov tejto analýzy možno konštatovať, že návrh je správny a mal by umožniť získanie relevantných výsledkov.

Tab. 6 Základné vlastnosti materiálu EN AW 7075 – T6 [23].

Hustota ρ_B [kg·m ⁻³]	Zmluvná medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Modul pružnosti E_B [MPa]	Poissonov pomer μ [-]	Rýchlosť šírenia elastickej vlny c_B [m·s ⁻¹]
2 810	503	71 700	0,33	5 051

6.1.1 Realizácia návrhu

Merné tyče, impaktor a prsteneč 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. 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 numerická simulácia. Napätový 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.

6.1.2 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 m·s⁻¹.

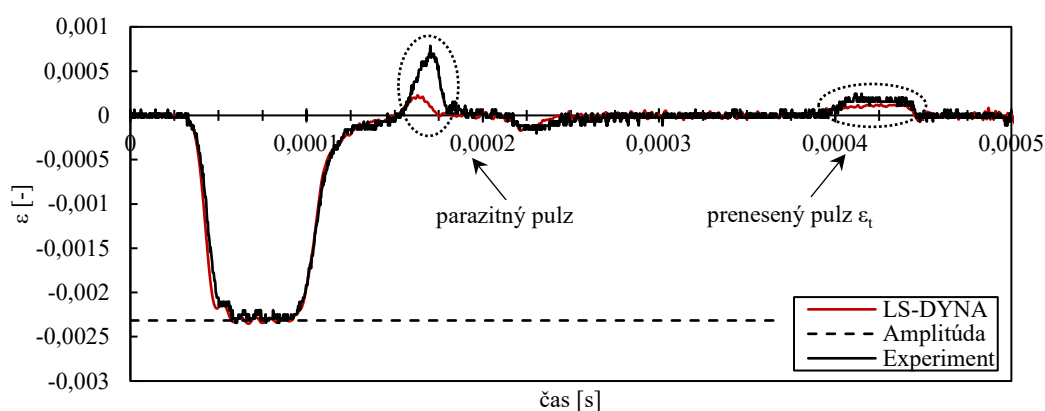
Záznam elastickej deformácie zmeranej Wheatstoneovým mostom na prvej mernej tyči ukazuje obr. 18. Prvý parameter, ktorý možno posudzovať, je amplitúda tlakového pulzu vzniknutého pri náraze impaktora. Ak platí, že impaktor a prvá merná tyč sú vyrobené z toho istého materiálu a majú rovnaký priemer, je možné vypočítať jej veľkosť nasledovne [14]:

$$\varepsilon_A = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{st}}{c_B}, \quad (6.1)$$

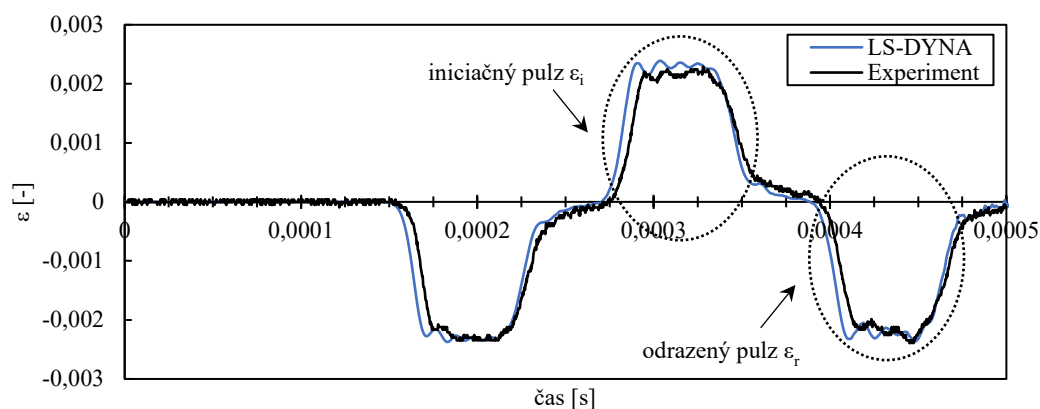
kde: ε_A – amplitúda tlakového pulzu [-],
 v_{st} – dopadová rýchlosť impaktora [m·s⁻¹].

Teoretická amplitúda tlakového pulzu, ktorá je vynesená aj do záznamu (obr. 18) vyšla 0,00232. Dosadená rýchlosť šírenia elastickej vlny vychádza z tab. 6. 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, ktorej podmienky boli nastavené tak, aby čo najlepšie popisovali analyzovaný experiment.

Najväčší rozdiel medzi experimentom a numerickou simuláciou je pozorovaný na veľkosti parazitného pulzu ťahového charakteru vyznačeného na obr. 18. Tento pulz vzniká v dôsledku nesúhlasných impedancií a výrazný nárast pri experimente je zapríčinený najmä nedokonalým kontaktom medzi mernými tyčami a prstencom. Menší nesúlad zaznamenaných pulzov na prvej mernej tyči (obr. 18) a druhej mernej tyči (obr. 19) je spôsobený viacerými činiteľmi, napr. rozdielom vlastností reálneho materiálu oproti materiálovému modelu, či nedokonalou polohou jednotlivých komponentov zariadenia voči sebe. Na základe prezentovaných výsledkov je možné predpokladať, že navrhnuté riešenie je funkčné a získané dáta sú relevantné.



Obr. 18 Záznam elastickej deformácie spôsobenej šírením napät'ových pulzov na prvej mernej tyči.



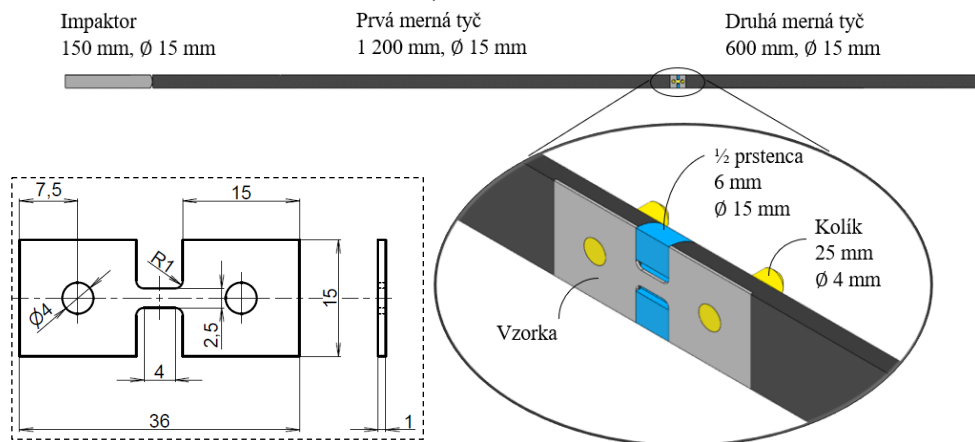
Obr. 19 Záznam elastickej deformácie spôsobenej šírením napät'ových pulzov na druhej mernej tyči.

6.2 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. 20. 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.

Navrhnutá geometria a rozmery plochých vzoriek sú na obr. 20. 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.

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. Aj v tomto prípade bola funkcia návrhu pred realizáciou overená numerickou simuláciou v softvéri ANSYS Workbench 2022 R1, modul LS-DYNA.



Obr. 20 Schematické zobrazenie návrhu riešenia SHTB pre testovanie plochých vzoriek.

6.2.1 Realizácia návrhu

Základné komponenty sú vyrobené z hliníkovej zliatiny EN AW-7075 – T6 vo forme ťahanej tyče s priemerom 15 mm. S ohľadom na tolerancie rozmerov vzoriek bola vyrobená séria prstencov, ktorých dĺžka bola odstupňovaná. Voľba prstenca s vhodnými rozmermi je dôležitá pre zabezpečenie prenosu napätových pulzov medzi mernými tyčami. Navrhnuté riešenie využíva vybrané prvky popísané v podkapitole 6.1.1. Konkrétne ide o urýchľovaciu jednotku, vodiace prvky, tlmiaci systém a meracie príslušenstvo. Zhoduje sa tiež umiestnenie a typ tenzometrov na merných tyčiach.

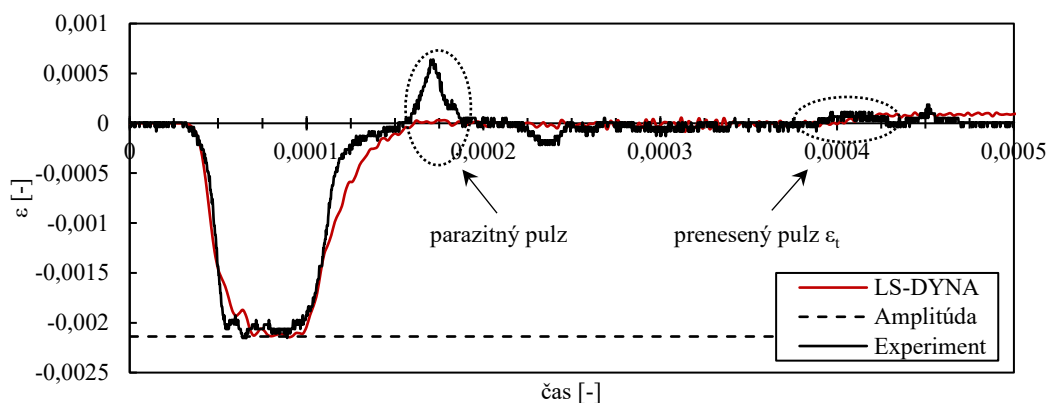
6.2.2 Overenie funkcie

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 $21,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

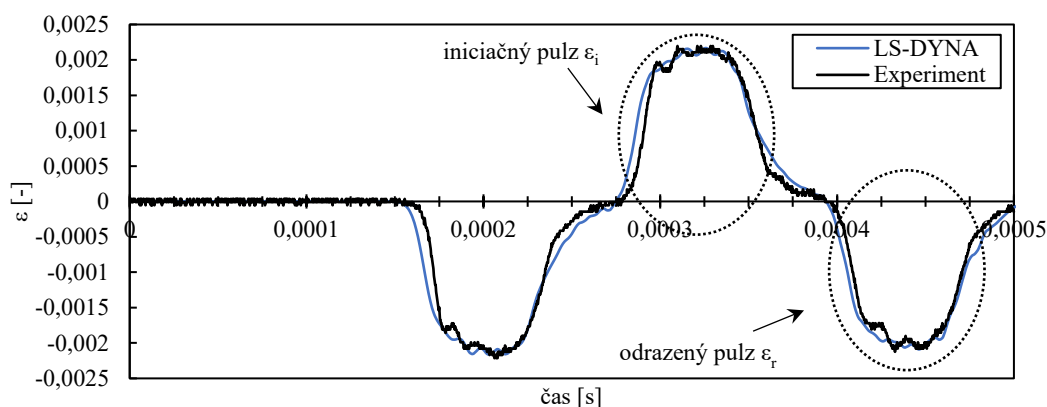
Obr. 21 zobrazuje záznam deformačných pulzov meraných na prvej mernej tyči. Teoretická amplitúda tlakového pulzu, ktorý vznikol pri náraze impaktora vypočítaná podľa vzťahu (6.1), vyšla 0,00214. Zmeraná amplitúda získaná ako priemer hodnôt je 0,00205. Percentuálny rozdiel je teda 4,21 %, čo naznačuje, že merací reťazec funguje správne. Na porovnanie nameraných dát bola ďalej vytvorená numerická simulácia.

Oproti numerickej simulácii sa na zmeranom zázname objavuje parazitný pulz, pozri obr. 21. Ten je spôsobený rozdielom mechanickej impedancie v mieste prstenca a nedokonalou vzájomnou polohou jednotlivých komponentov. Porovnanie zmeraných deformácií a výsledkov numerickej simulácie na druhej mernej tyči zobrazuje obr. 22. 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. Dlhšie trvanie preneseného pulzu pri numerickej simulácii (obr. 21) 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.

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.



Obr. 21 Záznam elastickej deformácie spôsobenej šírením napät'ových pulzov na prvej mernej tyči.



Obr. 22 Záznam elastickej deformácie spôsobenej šírením napät'ových pulzov na druhej mernej tyči.

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 zrejme, 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 tváriteľnosti, 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.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

1. HARANT, Martin; VERLEYSEN, 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. 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].
4. 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*.
5. 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].
6. 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].
7. 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].
8. 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].
9. 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].
10. 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].
11. 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].
12. 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].

13. 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].
14. 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].
15. 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].
16. 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].
17. 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].
18. 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].
19. 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].
20. KORKMAZ, Mehmet Erdi; GÜNAY, Mustafa a VERLEYSSEN, 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].
21. POKLUDA, Jaroslav; KROUPA, František a OBDRŽÁLEK, Ladislav. *Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek: kovy, keramika, plasty*. PC-DIR, 1994. ISBN 80-214-0575-9.
22. CHANDRAN, Sarath; LIU, Wenqi; LIAN, Junhe; MÜNSTERMANN, Sebastian a VERLEYSSEN 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].
23. AEROSPACE SPECIFICATION METALS. *Aluminum 7075-T6; 7075-T651*. Online. Dostupné z: <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7075t6>. [cit. 2024-07-08].

CURRICULUM VITAE

Ing. Martin Harant

Národnosť: slovenská

Rok a miesto narodenia: 1995, Považská Bystrica, Slovensko

E-mail: 170977@vutbr.cz

Vzdelanie:

- **2019–súčasnosť** – doktorské štúdium na Ústave strojírenskej technológie Fakulty strojnínho inžinýrství Vysokého učení technického v Brně
odbor: Strojírnská technológie
téma dizertačnej práce: Studium vlivu rychlostních parametrů na tvařitelnost hliníkových slitin
- **2017–2019** – magisterské štúdium na Ústave strojírenskej technológie Fakulty strojnínho inžinýrství Vysokého učení technického v Brně
odbor: Strojírnská technológie
téma diplomovej práce: Výroba dílce hydroformováním a její optimalizace
- **2014–2017** – bakalárske štúdium na Ústave strojírenskej technológie Fakulty strojnínho inžinýrství Vysokého učení technického v Brně
odbor: Základy strojnínho inžinýrství
téma bakalárskej práce: Význam tahové zkoušky pro numerickou simulaci
- **2010–2014** – Stredná priemyselná škola v Dubnici nad Váhom (Dubnica nad Váhom, Slovensko)
odbor: Mechatronika

Pracovné skúsenosti:

- **07/2022–súčasnosť** – asistent na Ústave strojírenskej technológie Fakulty strojnínho inžinýrství Vysokého učení technického v Brně

Výskumné stáže:

- **03/2022–06/2022** – Katedra elektromechaniky, systémov a kovov Fakulty architektúry a inžinierstva Univerzity Ghent (Ghent, Belgicko)
zameranie stáže: Skúmanie dynamických vlastností materiálov
- **09/2021–10/2021** – Fakulta stavebného inžinierstva a geodézie Vojenskej technickej univerzity (Varšava, Poľsko)
zameranie stáže: Skúmanie dynamických vlastností materiálov

Ocenenia:

- Cena průmyslového podniku 2019 za diplomovú prácu

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.

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.