



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Peter Hojnoš

**Studium deformačních mechanismů
v extrudovaných hořčíkových slitinách
s obsahem neodymu a yttria**

Katedra fyziky materiálů

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Peter Minárik, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecní fyzika

Praha 2017

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V dne

Podpis autora

Název práce: Studium deformačných mechanizmov v extrudovaných horčíkových slitinách s obsahom neodymu a yttria

Autor: Peter Hojnoš

Katedra: Katedra fyziky materiálov

Vedoucí bakalárskej práce: RNDr. Peter Minárik, Ph.D., Katedra fyziky materiálov

Abstrakt: Predložená práca sa zaoberá štúdiom ternárnej (WN43) a dvoch binárnych horčíkových zliatin s prímiesami neodymu (2Nd) a yttria (4Y) extrudovaných pri rôznych rýchlostiach (2 a 5 mm/s). Mikroštruktúra všetkých skúmaných vzoriek bola analyzovaná pomocou optickej mikroskopie. Celkový obraz mikroštruktúry materiálov bol doplnený určením textúry pomocou röntgenovej difrakcie. Mechanické vlastnosti boli skúmané pomocou deformačných skúšok v tlaku v dvoch orientáciách vzorky voči smeru extrúzie. Pre koreláciu deformačných testov s mikroštruktúrou skúmaných vzoriek bol zaznamenaný signál akustickej emisie. Takýto záznam akustickej pomáha identifikovať deformačné mikromechanizmy prebiehajúce v materiáli počas mechanického namáhania. Súčasťou deformačných skúšok bola analýza vplyvu veľkosti vzorky a rýchlosti deformácie na deformačné mechanizmy.

Kľúčové slová: horčíkové zliatiny, neodym, yttrium, HCP, dvojčatenie, akustická emisia

Title: Study of deformation mechanisms in extruded magnesium alloys containing neodymium and yttrium

Author: Peter Hojnoš

Department: Department of Physics of Materials

Supervisor: RNDr. Peter Minárik, Ph.D., Department of Physics of Materials

Abstract: Submitted work shows results of the investigation of ternary (WN43) and two binary magnesium alloys containing neodymium (2Nd) and yttrium (4Y) extruded at two different extrusion rates (2 and 5 mm/s). Microstructure of the investigated samples was analysed by light microscope. Additionally, texture of all samples was measured by X-ray diffraction. Mechanical properties were studied by compression deformation tests with two different deformation directions with respect to the processing direction. Acoustic emission was recorded during the deformation tests in order to correlate deformation behaviour with the microstructure. Analysis of the acoustic emission helps to identify deformation micro-mechanisms acting during the mechanical straining. Additionally, effect of sample size and deformation rate on the deformation mechanisms was investigated.

Keywords: magnesium alloys, neodymium, HCP, twinning, acoustics emission

V prvom rade by som sa chcel poďakovať môjmu vedúcemu bakalárskej práce RNDr. Petrovi Minárikovi, Ph.D. za asistovanie pri meraniach, takisto za pomoc pri akomkoľvek probléme, od technických problémov až po fyzikálne. V neposlednom rade som vďačný Mgr. Darii Drozdenko, Ph.D. za cenné rady ohľadom akustickej emisie a za trpezlivosť pri meraní a Patrikovi Dobroňovi, Ph.D. za spoluúčasť na meraniach a diskusii o výsledkoch akustickej emisie. Ďakujem Mgr. Marte Čepovej za pomoc pri optickej mikroskopii.

Obsah

Úvod	2
1 Horčík	3
1.1 Deformácia hexagonálnych kovov	3
1.2 Extrúzia	5
1.3 Deformačné skúšky	5
1.4 Akustická emisia	6
1.5 Zloženie použitého materiálu	7
2 Motivácia	8
3 Experimentálne metódy	9
3.1 Deformačné skúšky	9
3.1.1 Akustická emisia	9
3.2 Mikroštruktúra	9
3.2.1 Optická mikroskopia	9
3.2.2 Röntgenova difrakcia	9
3.3 Príprava materiálu	10
3.3.1 Tlakové skúšky	10
3.3.2 Optická mikroskopia a XRD	10
4 Výsledky merania a diskusia	11
4.1 Mikroštruktúra materiálu	11
4.1.1 Textúra	12
4.2 Deformačné skúšky	13
4.3 Vplyv rozmerov vzorky	17
4.4 Deformačné krivky spolu so záznamom akustickej emisie	18
4.5 Vplyv rýchlosti deformácie	21
Záver	22
Zoznam použitej literatúry	23
Zoznam obrázkov	26
Zoznam tabuliek	27
Zoznam použitých skratiek	28

Úvod

Horčík je najľahší inžiniersky kov a má veľký potenciál kvôli obrovským zásobám prírodného horčíka, dobrým mechanickým vlastnostiam a jednoduchej priemyselnej výrobe. Najväčším zdrojom prírodného horčíka sú oceány, keď z 1 m³ morskej vody je možné získať až 1,3 kg horčíka [1]. Jeho ďalšou nespornou výhodou je jeho finančne nenáročná recyklovateľnosť, na recykláciu je potrebných iba 5 % z nákladov na výrobu.

V dnešnej dobe sa v priemysle kladie veľký dôraz na odľahčenie materiálov. To platí hlavne pre automobilový a letecký priemysel, kde je výskum zameraný najmä na redukovanie spotreby paliva a emisií CO₂. V tomto ohľade je veľmi perspektívny horčík a jeho zliatiny, ktorého hlavná výhoda spočíva v dobrom pomere pevnosti k hmotnosti. Ďalšou jeho pozitívnou vlastnosťou je biokompatibilita, čím je zaujímavý pre ďalšie využitie v medicíne.

Prvý väčší rozmach použitia horčíka nastal v medzivojnovom období, kde ho prvýkrát použil Volkswagen. Po druhej svetovej vojne jeho výroba prudko klesla, pretože sa začala používať voda na chladenie motorov, čím sa stal horčík so svojou nízkou koroziodolnosťou nepoužiteľný [2]. Príchodom nových technologických postupov, napr. vysokotlakového liatia, v 90. rokoch nastala renesancia použitia horčíkových zliatin. Výrobný postup bol výhodný v tom, že už bolo možné priamo odlievať diely bez nutnosti ďalšieho obrábania.

Okrem spomínaných výhod má horčík aj nevýhody. Niektoré z nich sú zapríčinené tým, že horčík kryštalizuje v hexagonálnej mriežke a vykazuje tak iné deformačné vlastnosti v porovnaní s materiálmi, ktoré kryštalizujú v kubickej mriežke. Horšie sa deformuje, a tým má nižšiu tvarovateľnosť. Ďalšou nevýhodou horčíkových zliatin je ich malá odolnosť voči korózii a degradácia mechanických vlastností pri teplotách nad 150 °C [2]. Horčík tiež rýchlo oxiduje [3].

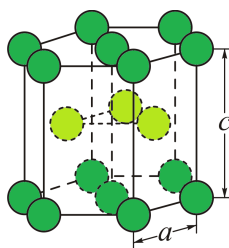
Zmienené nevýhody bránia jeho širšiemu použitiu, avšak sú výzvou vylepšiť tieto materiály rôznymi metódami tak, aby sa tieto nedostatky redukovali čo najviac. Preto je potrebné porozumieť mechanizmom prebiehajúcich v týchto materiáloch pri záťaži a vytvoriť tak materiál, ktorý bude dobre vzdorovať vplyvom vonkajšieho prostredia.

Vlastnosti materiálov môžu byť silno ovplyvnené legujúcimi prísadami alebo spôsobom výroby a spracovania.

1. Horčík

Horčík je chemický prvok s protónovým číslom 12. Tento kov má lesklo šedú farbu. Najčastejšie sa vyskytuje v zlučeninách s oxidačným číslom +2. Je to ôsmy najrozšírenejší prvok v zemskej kôre (až 2,1%) [4]. Čistý horčík má pri izbovej teplote hustotu $1,74 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ a jeho teplota topenia je $650 \text{ }^\circ\text{C}$ [5]. Dobře vedie teplo a takisto dobre tlmí vibrácie.

Je všeobecne známe, že horčík je anizotropný materiál kvôli hexagonálne tesne usporiadanej kryštálovej mriežke (HCP) vid' obr. 1.1, čo má významný vplyv na jeho vlastnosti. Jeho mriežkové parametre pri izbovej teplote sú $a = 0,3209 \text{ nm}$ a $c = 0,5210 \text{ nm}$ [6]. Jeho pomer c/a je 1,624, ktorý je blízky ideálnej hodnote pre najtesnejšie usporiadanie, čo je $\sqrt{8/3}$.

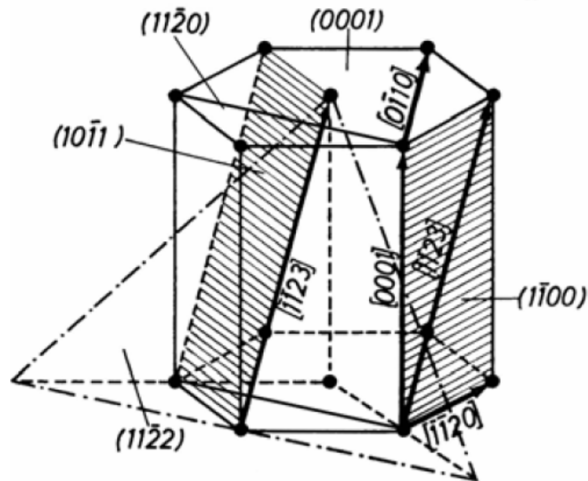


Obr. 1.1: Hexagonálne tesne usporiadaná mriežka [7].

1.1 Deformácia hexagonálnych kovov

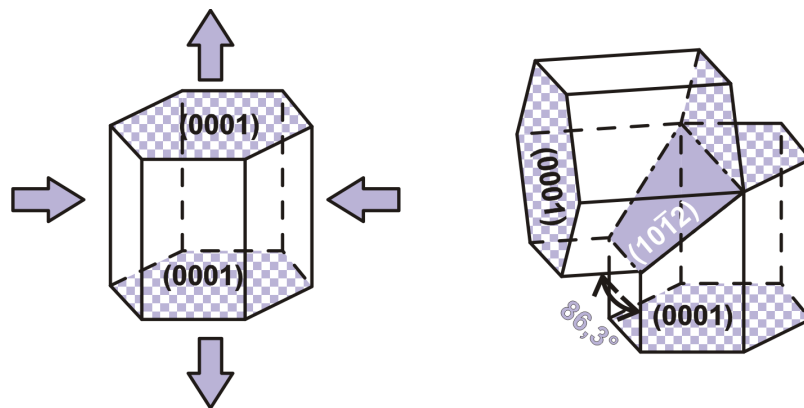
Kovy s hexagonálnou kryštálovou mriežkou s tesným usporiadaním majú tvárnosť za bežných teplôt. Tieto kovy navyše môžu vykazovať významnú anizotropiu v závislosti na osi namáhania. Je všeobecne známe, že pri plastickej deformácii horčíka sa aktivujú sklzové systémy: bazálny $(0001)\langle 11\bar{2}0 \rangle$, prizmatický $\{10\bar{1}0\}\langle 11\bar{2}0 \rangle$, pyramidálny prvého druhu (označovaný π_1) $\{10\bar{1}1\}\langle 11\bar{2}0 \rangle$ a pyramidálny druhého druhu (označovaný π_2) $\{11\bar{2}2\}\frac{1}{3}\langle 11\bar{2}3 \rangle$ [8]. Najľahšie sa aktivuje bazálny sklzový systém, pretože tam je najväčšia hustota atómov. Čiastočne môžu byť aktivované prizmatické sklzové systémy, najmä vďaka blízkej hodnote ideálneho pomeru mriežkových parametrov. Bazálne, prizmatické a pyramidálne sklzové systémy prvého druhu zaistujú deformáciu iba v smere $\langle a \rangle$. Deformácia v smere $\langle c \rangle$ prebieha aktiváciou pyramidálneho sklzového systému druhého druhu. K jeho aktivácii je však potrebné pomerne veľké množstvo energie [9]. V horčíkových zliatinách tak existujú iba 4 nezávislé sklzové systémy, čo znamená, že horčíkové zliatiny nespĺňajú podmienku von Misesovho kritéria, kedy je potrebných aspoň 5 nezávislých sklzových systémov (rovín) [10].

Nedostatok sklzových systémov má za následok aktiváciu ďalšieho deformačného mechanizmu - dvojčatenia. Pri mechanickom namáhaní sa mriežka zrkadlovito pretočí voči pôvodnej mriežke. Hraničné atómy nevedia, ktorým smerom je usporiadaná pôvodná kryštalografická mriežka, preto pasujú do oboch mriežok. Pre lepšiu predstavu tejto situácie je vhodný obrázok 1.3. Najčastejší typ dvojčatenia pri deformácii v tlaku $\{10\bar{1}2\}\langle 10\bar{1}1 \rangle$ je charakterizované uhlom natočenia voči pôvodnej kryštalografickej mriežke o 86° [9]. Dvojčatá pri namáhaní v tlaku



Obr. 1.2: Najvýznamnejšie roviny a smery v hexagonálnej mriežke [9].

vznikajú, ak sú bazálne roviny orientované rovnobežne s osou namáhania, vid' obr. 1.3. Rovnaký efekt ako $\{10\bar{1}2\}$ dvojčatenie má sklz po rovinách $\langle c+a \rangle$, avšak je potrebné naň väčšie napätie než pri dvojčatení [11].



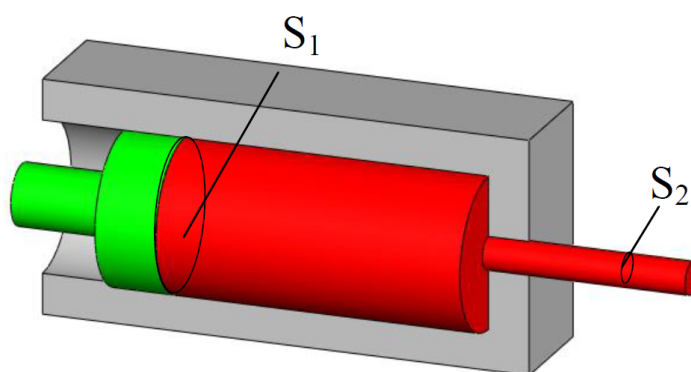
Obr. 1.3: Vznik dvojčata.

V polykrystalických materiáloch je situácia pri plastickej deformácii zložitejšia ako v prípade monokryštálov vzhľadom na existenciu zŕn a ich rozličnú orientáciu. Ale na druhej strane sú mechanizmy plastickej deformácie rovnaké. Všeobecne sú polykrystalické materiály izotropné kvôli náhodnej orientácii zŕn. V prípade silnej textúry, tj. väčšina zŕn má podobnú orientáciu, sa vlastnosti kryštálu blížia monokryštálu. Z výsledkov predošlých výskumov [12, 13] je zrejmé, že správanie pri deformácii horčíkových zliatin s preferovanou textúrou je možno interpretovať ako deformačné módy pozorované v monokryštalickej horčíku [9].

Pohyb dislokácií a dvojčatenie tvorí základ spevňovacích dejov v polykrystalických horčíkových zliatinách. Pohybu dislokácií prekážajú hranice zŕn a takisto aj hranice dvojčiat a iné poruchy kryštalickej mriežky, čím dochádza k nahromadeniu napätových polí. To vedie k spevneniu materiálu. K odpevňovacím procesom patrí priečny sklz a šplhanie dislokácií. Priečny sklz sa vyskytuje v lokálne vysokých napätových poliach, ktoré sú spôsobené hromadiacimi sa dislokáciami.

1.2 Extrúzia

Extrúzia je proces na vytvorenie materiálu s pevným prierezom. Pôvodný materiál sa pretláča kanálom so zvoleným prierezom za pomoci piestu, viď schematický obrázok 1.4. Podľa extrúzneho teploty rozdeľujeme extrúziu na studenú, teplú a horúcu. Studená extrúzia prebieha pri izbovej teplote. Teplá extrúzia prebieha pri teplote pod teplotou rekryštalizácie. Horúca extrúzia prebieha nad teplotou rekryštalizácie. Následne je materiál ochladený. Okrem teploty a extrúzneho rýchlosti je tento proces charakterizovaný extrúznym pomerom, t.j. pomerom plochy prierezu S_1 pôvodného materiálu k ploche prierezu S_2 extrudovaného materiálu. Extrúzia má výrazný vplyv na vnútornú mikroštruktúru materiálu. Používa sa najmä na zjemnenie veľkosti zrna, čo vedie k spevňovaniu materiálu a k príprave výrobkov so špecifickým prierezom.



Obr. 1.4: Schematické znázornenie extrúzie [14].

Horčíkové zliatiny sa najčastejšie extrudujú nad teplotou rekryštalizácie. Takýmto spôsobom spracovaný materiál zvyčajne vykazuje silnú vláknitú textúru, kde os c hexagonálnej mriežky je pri väčšine zrn kolmá na smer extrúzie [15].

1.3 Deformačné skúšky

Pri deformačných skúškach má zmysel definovať relatívne predĺženie:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (1.1)$$

kde l_0 je pôvodná dĺžka vzorky a Δl je zmena dĺžky.

V technickej praxi sa často uvádza závislosť inžinierskeho napätia na relatívnom predĺžení. Inžinierske napätie je definované pomocou vzťahu:

$$\sigma_i = \frac{F}{S_0}, \quad (1.2)$$

kde S_0 je počiatočný prierez vzorky. Ale plocha prierezu vzorky počas deformácie nezostáva konštantná, preto sa zavádza skutočné predĺženie a skutočné napätie. Pri zavedení týchto parametrov sa predpokladá zachovanie objemu vzorky. Skutočné napätie je v prípade tlakových skúšok definované ako:

$$\sigma = \frac{F}{S_0}(1 - \varepsilon_i). \quad (1.3)$$

V prípade tlakových skúšok skutočné predĺženie je:

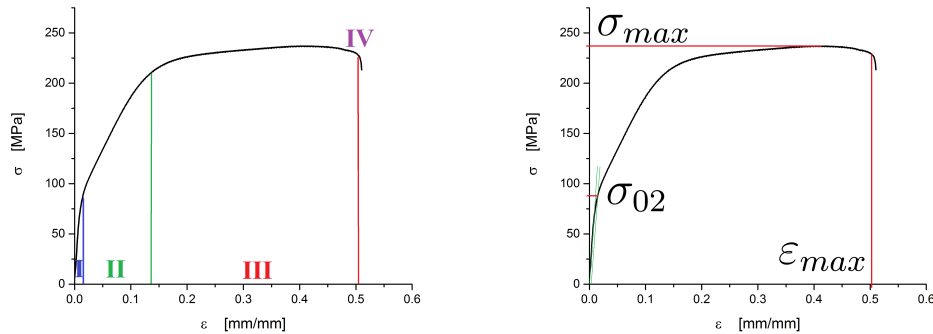
$$\varepsilon = |\ln(1 - \varepsilon_i)|. \quad (1.4)$$

Podrobný popis zavedenia týchto parametrov sa nachádza v [16].

Závislosť skutočného napätia na skutočnom predĺžení sa nazýva deformačná krivka. Má rozličné tvary pre rozdielne materiály, avšak existujú v nich oblasti, ktoré sú podobné pre mnohé materiály. Príklad deformačnej krivky je uvedený na obrázku 1.5a. V prvej časti I dochádza k elastickej deformácii. V tejto časti je závislosť napätia na deformácii lineárna. Pre väčšinu kovov (vrátane horčíka) býva táto oblasť veľmi malého rozsahu a materiál tak rýchlo prejde do plastickej deformácie, časť II. V materiáloch dochádza k najrôznejším mechanizmom spevňovania či odpevňovania (hromadenie dislokácií, nukleácia dvojčiat...), ktoré ovplyvňujú tvar deformačnej krivky. V ďalšej časti III je charakteristické to, že menšia sila je potrebná na relatívne veľké predĺženie. Táto časť prebieha až do bodu pretrhnutia IV.

Z hľadiska pozorovania je najdôležitejšia plastická časť deformácie - oblasť II a III. Preto sa v odborných prácach často zvykne vynechávať elastická časť.

Pre porovnanie výsledkov sa zavádza veličina $\sigma_{0,2}$, ktorá označuje skutočné napätie pri relatívnom predĺžení 0,2%. Ďalej sa zvykne určovať maximálne dosiahnuté napätie σ_{max} a maximálna deformácia ε_{max} , viď 1.5b.



(a) Charakteristické oblasti deformačnej krivky.

(b) Význačné body na deformačnej krivke.

Obr. 1.5: Oblasti deformačnej krivky a významné body.

1.4 Akustická emisia

Akustická emisia (AE) je elasticke vlnenie, ktoré vzniká v dôsledku uvoľnenia energie pri dynamickej zmene v štruktúre materiálu [17]. Táto zmena môže byť spôsobená sklzom dislokácií, nukleáciou dvojčiat, vznikom a šírením trhlín [18]. Senzor pripevnený na čelusti deformačného stroja dokáže pomocou piezoelektrického javu snímať kolmú zložku tohto elastickeho vlnenia [7]. K AE dôjde iba vtedy, ak materiál je namáhaný, v tomto prípade je to mechanické namáhanie. Pozorujú sa iba zmeny, ktoré vznikli deformáciou.

Elastické vlnenie má charakteristickú frekvenciu, na základe ktorej dokážeme rozlíšiť rôzne deformačné mechanizmy: dislokačný sklz a dvojčatenie [1]. Preto je AE výhodná k stanoveniu aktívnych deformačných mechanizmov v materiáloch počas ich mechanického namáhania. Avšak je potrebné si uvedomiť, že AE umožňuje zaznamenávať iba vznik dvojčiat a nie ich rast [19].

Signál AE môže mať rôznu podobu v závislosti od zdroja pôvodu. Spojitému signálu priradujeme sklz dislokácií. Na druhej strane nespojitý signál, ktorý má charakter diskretného rozdelenia, pochádza od vzniku dvojčiat [9].

Tieto signály môžeme vyhodnocovať rôznymi spôsobmi. Pri spojitom signále, keď signál presahuje určitú prahovú úroveň, sa dá vyhodnotiť stredná kvadratická výchylka detekovaného signálu a počty prekmitov za pevne daný časový interval ($\frac{dN}{dt}$). Nespojitý signál je možné rozdeliť na jednotlivé udalosti, ktoré sú charakterizované dĺžkou, najväčšou amplitúdou a časom, za ktorý bola dosiahnutá.

1.5 Zloženie použitého materiálu

V horčíkových zliatinách je väčšina vzácnych zemín relatívne dobre rozpustná. Ich rozpustnosť klesá so znižujúcou sa teplotou. Prímes vzácnych zemín zjemňuje zrná materiálu a vylepšuje vlastnosti materiálu, a to za izbovej teploty, ale aj pri zvýšených teplotách [20]. Zvýšený obsah vzácnych zemín zvyšuje odolnosť voči tečeniu materiálu, čo je dôležité z hľadiska dlhodobého používania materiálu.

Jedna z najpopulárnejších priemyselne vyrábaných horčíkových zliatin je WE43, kde E značí súhrnný obsah všetkých vzácnych zemín v materiáli (tzv. mischmetal). Zmeska vzácnych zemín môže byť nahradená čistým obsahom, tj. jedným vybraným prvkom zo vzácnych zemín ako v prípade WN43, kde z prvkov vzácnych zemín bol použitý iba neodým.

Pre určenie vplyvu yttria a neodýmu na mechanické vlastnosti boli zvlášť odliate binárne horčíkové zliatiny N2 a W4. Ingolt zliatiny N2 obsahuje prímes 2% neodýmu, budeme ju značiť 2Nd. So zvyšujúcim obsahom neodýmu sa zvyšuje odolnosť voči tečeniu materiálu [20]. V praxi by sa zliatina mohla používať na tvorbu nasálnych stentov pre živé organizmy [21]. Podobne ingolt zliatiny W4 obsahuje 4%-nú prímes yttria, značíme 4Y. Biodegradovateľnosť tejto zliatiny bola skúmaná napríklad v [22].

Jednotlivé ingolty boli extrudované pri rýchlostiach 3 mm/s a 5 mm/s, teplote 350°C a extrúznom pomere 30:1.

2. Motivácia

Hlavné ciele bakalarskej práce sú:

- preskúmať mikroštruktúru použitých zliatin,
- premerať charakteristickú deformačnú krivku pri zmene rôznych parametrov,
- spracovať a objasniť výsledky deformačných skúšok pomocou prebiehajúcich deformačných mikromechanizmov,
- diskutovať experimentálne namerané dáta, a prípadné odlišnosti od teoretických očakávaní dostatočne okomentovať.

Jedným z ďalších cieľov bakalárskej práce je potvrdiť nezávislosť tvaru deformačných kriviek na veľkosti vzoriek a overiť nezávislosť výberu miesta výrezu vzorky, tj. v osi extrudovanej tyče a mimo osi extrudovanej tyče.

Určenie anizotropie, resp. izotropie materiálu bolo uskutočnené z pólových obrazcov, kde je zaznamenaná orientácia zŕn (textúra) vo vzorkách. V prípade anizotropie majú zrná preferovanejšiu orientáciu v určitom smere. Kvôli očakávanej textúre je hlavným parametrom deformačných skúšok smer deformácie.

3. Experimentálne metódy

3.1 Deformačné skúšky

Tlakové deformačné skúšky prebiehali na prístroji Instron 5882 za izbovej teploty. Hlavným parametrom testov bola orientácia vzorky voči smeru extrúzie - v smere extrúzie (ED) a v smere kolmom na extrúziu (TD). Skúšky defomácie prebiehali pri konštantnej deformačnej rýchlosti 10^{-3} s^{-1} až do lomu materiálu. Počítač zaznamenával čas, pôsobiacu silu a zmenu dĺžky vzorky. Výsledky tlakových deformačných skúšok sú založené na spriemerovaní troch až siedmich vzoriek pre každý parameter.

3.1.1 Akustická emisia

Počas väčšiny deformačných skúšok bola zaznamenaná akustická emisia. Boli použitý prístroj Micro-II od firmy Physical Acoustics Corporation. Do aparatury bol zapojený predzosilňovač s možnosťami predzosilnenia 20, 40 a 60 dB. Bol použitý širokopásmový senzor s plochou frekvenčnou charakteristikou v danom frekvenčnom pásme. Rozsah frekvencií, ktoré senzor zaznamenáva, je 100 - 600 kHz.

Záznam AE bol získaný nastavením predzosilňovača na 60 dB, prípadne 40 dB podľa intenzity signálu. Prahová úroveň bola nastavená na 27 dB, čo bolo nad úrovňou šumu. Zo surových dát bola pre nás najzaujímavejšia informácia počtu prekmitov N v rôznych časových úsekoch. Namerané dáta boli vyhodnotené pomocou programu Origin vo forme počtu prekmitov za pevný časový interval $\frac{dN}{dt}$, v tomto prípade sme zvolili časový úsek 0,1 s.

3.2 Mikroštruktúra

3.2.1 Optická mikroskopia

Optická mikroskopia bola použitá na pozorovanie mikroštruktúry a na analýzu veľkosti zŕn všetkých skúmaných vzoriek. Na pozorovanie bol použitý mikroskop Olympus GX 51. Veľkosť zrna bola štatisticky vypočítaná na základe kruhovej metódy a vzťahu:

$$d = \frac{3\pi D}{2n}, \quad (3.1)$$

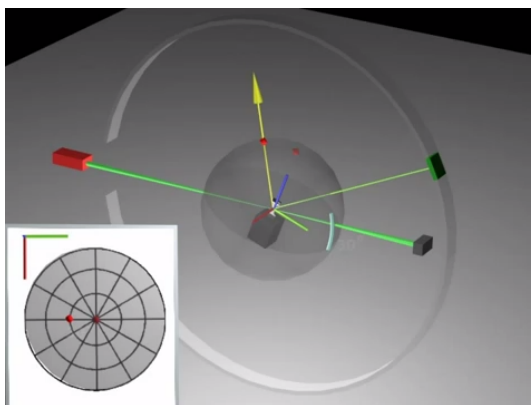
kde n je počet preŕatých zŕn kružnicou s priemerom D . Na analýzu bol použitý program ImageJ.

3.2.2 Röntgenova difrakcia

Metóda röntgenovej difrakcie (X-ray diffraction, XRD) sa používa na určenie kryštalickej štruktúry tuhých látok, chemického zloženia, meranie vnútorných napätí, meranie veľkosti častíc a určovanie orientácie kryštálu alebo popripade

orientácií jednotlivých zložiek v polykryštalickej štruktúre. Bola použitá na zistenie textúry.

Pri röntgenovej difrakčnej analýze je vzorka ožiarená krátkovlnným zdrojom žiarenia. Toto röntgenové žiarenie je rozptýlené najmä na elektrónových obaloch. Množina všetkých možných rozptylových vektorov tvorí sféru, vid' 3.1. Obmedzením sa na kladné rozptylové vektory dostaneme polosféru reálnych rozptylových vektorov. Planimetrickou projekciou týchto rozptylových vektorov počítač zaznamená intenzitu difraktovaného žiarenia do pólového obrazca.



Obr. 3.1: Schematický princíp goniometra pre meranie textúry difrakciou [23].

3.3 Príprava materiálu

3.3.1 Tlakové skúšky

Extrudované tyče boli valcového tvaru s priemerom 17 mm. Z nich boli odrezané vzorky v tvare kvádrov s rozmermi $5 \times 5 \times 8 \text{ mm}^3$ a to v smere paralelnom s extrúziou (ED) a v smere kolmom na smer extrúzie (TD). K deformačným testom boli ďalej vypílené vzorky $7,5 \times 7,5 \times 12 \text{ mm}^3$, ktoré boli použité na analýzu vplyvu veľkosti vzorky na charakter deformačnej krivky.

3.3.2 Optická mikroskopia a XRD

Vzorky z priečného rezu nedeformovaných extrudovaných tyčí 4Y, 2Nd a WN43 boli pri každej z dvoch extrúzných rýchlostí zaliate epoxidovým prípravkom. Následne boli systematicky zbrusované so zjemňujúcou sa hrubosťou kotúča. Zbrúsené vzorky boli doleštené diamantovou pastou s veľkosťami zrn 3, 1 a $0,25 \mu\text{m}$. Na záver bol povrch vzorky naleptaný zriedeným koncentrátom kyseliny pikrovej, čím sa zviditeľnili hranice zrn. Pre meranie textúry bol vynechaný krok naleptania kyselinou.

4. Výsledky merania a diskusia

4.1 Mikroštruktúra materiálu

Vyhotovené fotky z optického mikroskopu sú na obrázku 4.1. Z nich bola kruhovou metódou stanovená veľkosť zŕn, vid' tabuľka 4.1.

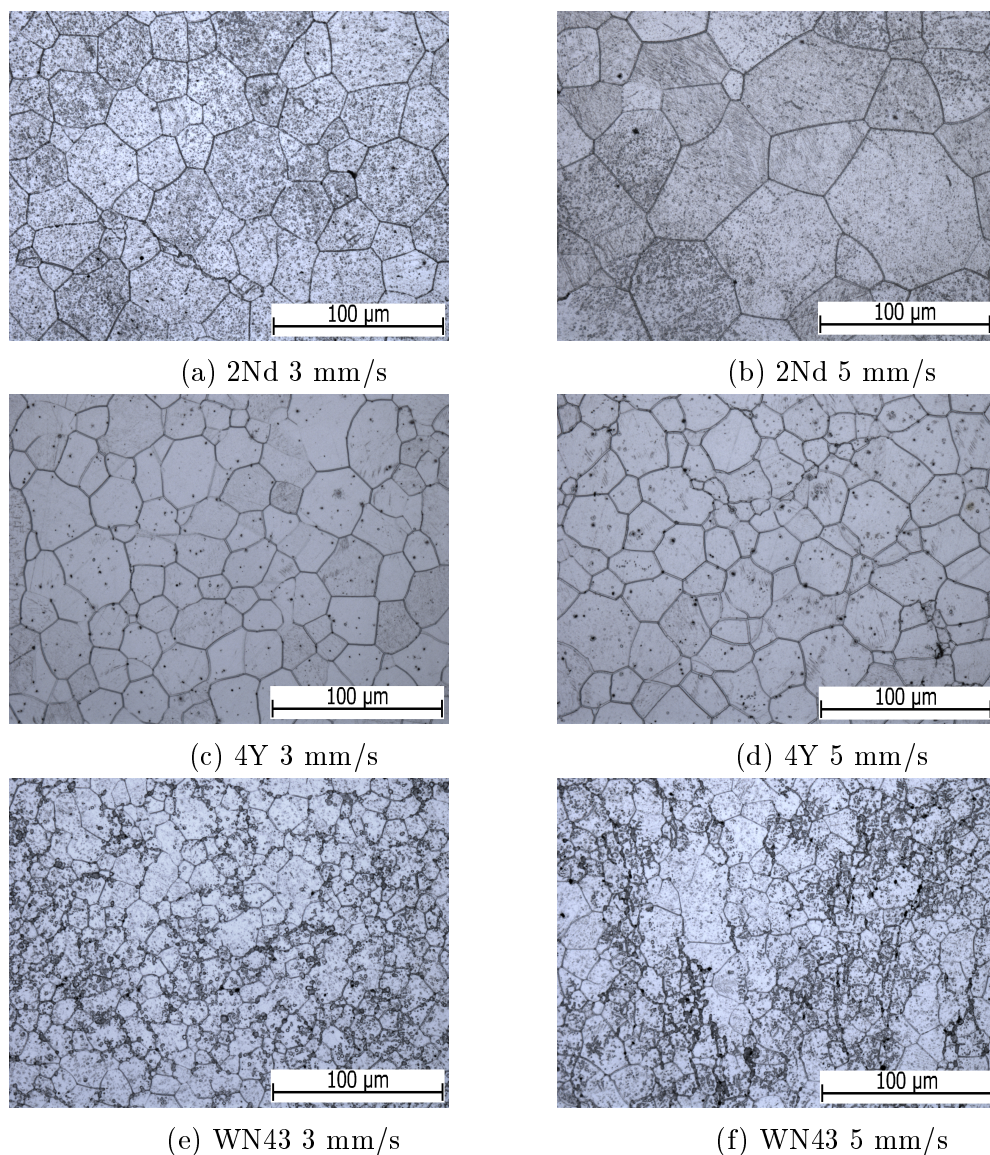
Zrná sú polyedrického tvaru s vysokouhlovými hranicami. Materiál javil heterogénnu štruktúru. Na snímkach je vidno, že sekundárne fázy sa vyprecipitovali v celom objeme zŕn. Tieto sekundárne fázy sa nezhlukujú do väčších tvarov a sú rovnomerne rozmiestnené po celom objeme vnútra zŕn, nielen pri hraniciach ako je to zvykom pri iných materiáloch.

So zvýšeným obsahom vzácnych zemín narastá aj frakčný objem častíc sekundárnych fáz. Najlepšie to bolo vidieť pri zliatine WN43 na snímkoch 4.1e a 4.1f s najväčším počtom vyprecipitovaných fáz. Porovnaním vzoriek 2Nd a 4Y na obrázkoch 4.1a až 4.1d sa zisťuje, že prímesové prvky vzorky 4Y sú viac rozpustné v horčíkovej zliatine.

Analýzou snímok optickej mikroskopie sme zistili, že mikroštruktúra je zrekryštalizovaná. Všetky materiály majú rovnoosé s rovnomerným rozdelením veľkosti zŕn. Vplyv rýchlosti extrúzie na veľkosti zŕn je zrejmý pre vzorky 2Nd a WN43, keď so zvyšujúcou sa rýchlosťou extrúzie rastie veľkosť zŕn. Pri vzorke 4Y nebol zaznamenaný žiaden rozdiel veľkosti zŕn pri rôznych rýchlostiach extrúzie, potvrdzuje to aj tabuľka 4.1.

vzorka	d [μm]
2Nd 3 mm/s	39 \pm 4
2Nd 5 mm/s	64 \pm 4
4Y 3 mm/s	34 \pm 2
4Y 5 mm/s	34 \pm 3
WN43 3 mm/s	16 \pm 2
WN43 5 mm/s	23 \pm 2

Tabuľka 4.1: Veľkosti zŕn horčíkových zliatin s prímesami vzácnych zemín (neodýmu a yttria) určené kruhovou metódou.



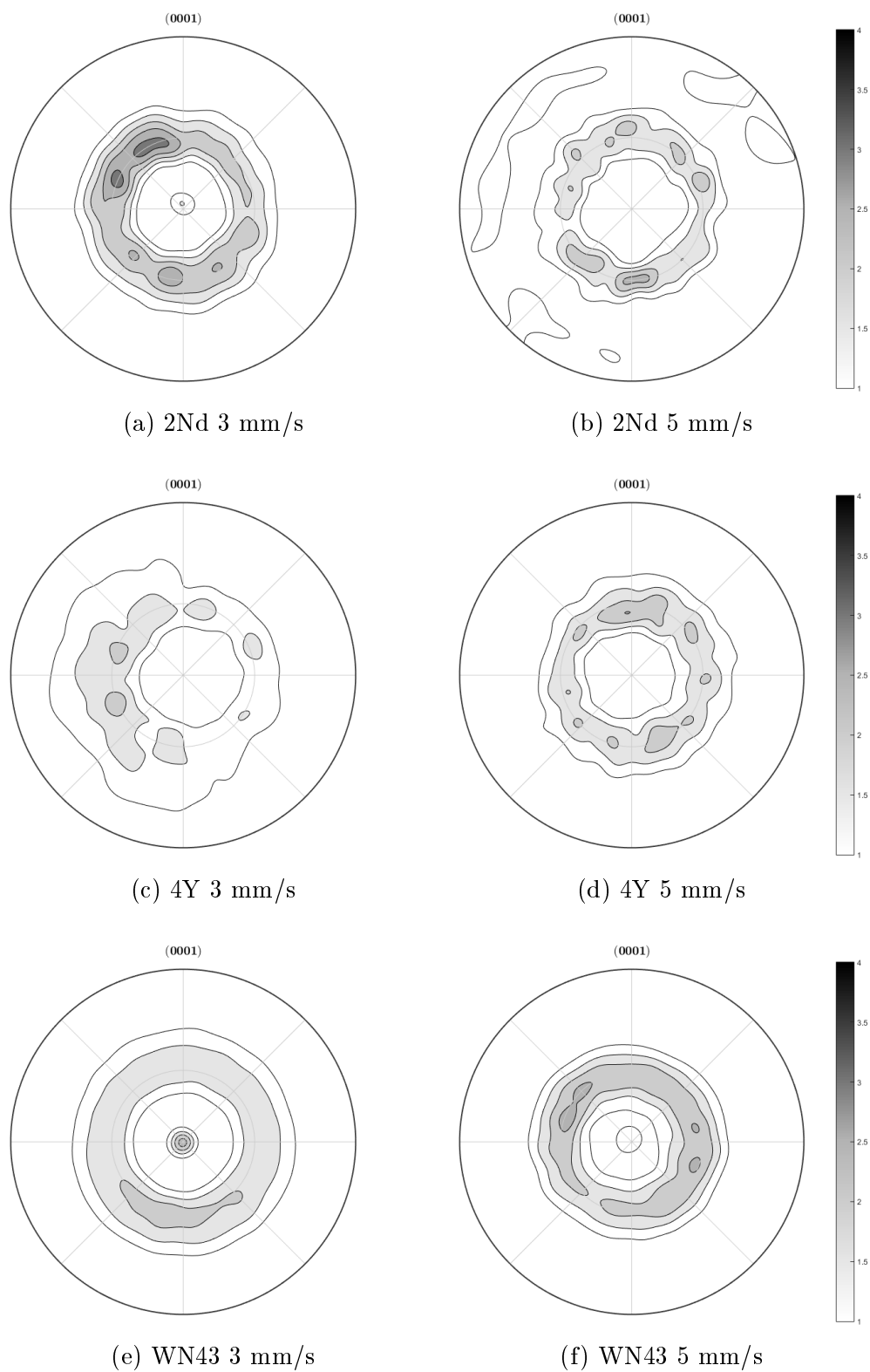
Obr. 4.1: Mikroštruktúra extrudovaných vzoriek so zväčšením 500x.

4.1.1 Textúra

Snímky pólových obrazcov boli namerané pomocou röntgenovej difrakcie. Použité materiály vykazujú slabšiu textúru ako iné horčíkové zliatiny, napr. AZ31 [24].

Väčšina zŕn všetkých vzoriek mala bazálne roviny odklonené asi o 45° od smeru extrúzie. V menšej miere mali vzorky 2Nd 3 mm/s a WN43 3 a 5 mm/s niektoré zrná orientované tak, že bazálne roviny boli kolmé na smer extrúzie. Malá časť zŕn vzorky 2Nd 5 mm/s má bazálne roviny otočené asi o 10° od smeru extrúzie. Extrudované zliatiny majú podobnú textúru ako zliatina ZN11 spracovaná podobne [25].

Analýza snímok pólových obrazcov 4.2 ukázala, že so znižujúcou sa rýchlosťou extrúzie sa mierne znižuje anizotropia vzoriek 4Y a WN43. Pri vzorke 2Nd sa naopak zvýšila jej anizotropia, viď obr. 4.2a a 4.2b.



Obr. 4.2: Pólové obrazce roviny (0001) jednotlivých vzoriek.

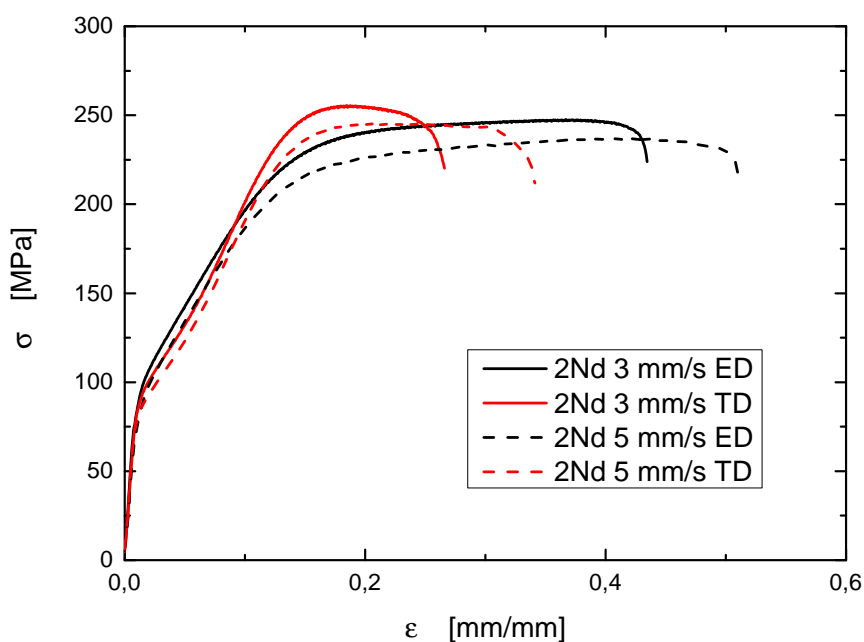
4.2 Deformačné skúšky

Merania štandardne prebiehali za konštatnej deformačnej rýchlosti 10^{-3} s^{-1} . Namerané dáta boli za použitia teoretických znalostí uvedených v kapitole 1.3

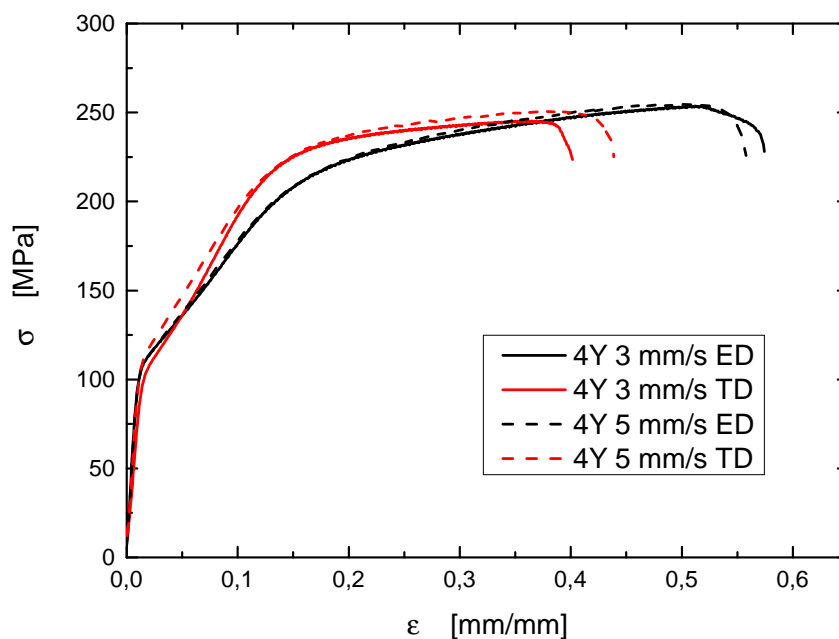
spracované v programe Origin, kde boli následne vykreslené do grafov závislosti skutočného napätia σ na skutočnom predĺžení ε .

Pri horčíkovej zliatine 2Nd je zrejмый rozdiel v charaktere deformačných kriviek medzi deformáciou v smere extrúzie a v transversálnom smere. Zmieneny rozdiel je vidno na začiatku plastickej časti deformačnej krivky. Pri deformácii vzorky odpílenej v transversálnom smere je potrebná menšia záťaž na relatívne väčšiu zmenu dĺžky než pri vzorke deformovanej v ED. Toto správanie možno vysvetliť pozorovanou textúrou. V zrnách orientovaných s mriežkovým parametrom c kolmo na smer záťaže dochádza k mechanizmu dvojčatenia, čo má za následok esovitý tvar.

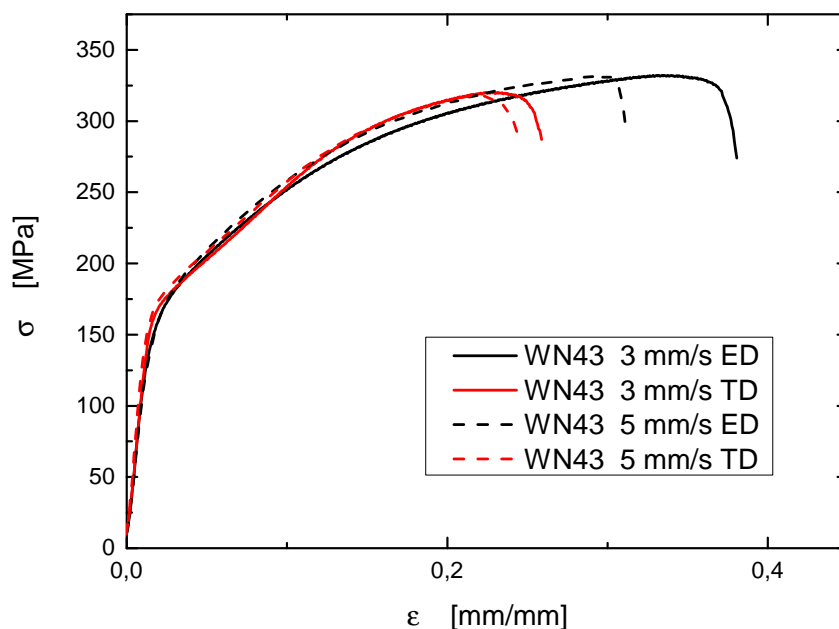
Orientácia zrn vo všetkých vzorkách je pri deformácii v tlaku v TD výhodnejšia pre vznik dvojčiat, viď obr. 4.6, naopak pri deformácii v tlaku pri ED je takých zrn menej. Tento rozdiel sa prejavuje v charaktere deformačnej krivky v podobe esovitého tvaru. Pri vzorke 4Y nie je pozorovaný výrazný esovitý tvar deformačnej krivky ako pri 2Nd, avšak sa dá pozorovať rozdiel v tvare deformačných kriviek medzi ED a TD. Meranie textúry ukázalo, že menej výrazný esovitý tvar deformačnej krivky možno vysvetliť väčším rozptylom v orientácii zrn, viď obr. 4.2a a 4.2c. Deformačná krivka v TD vzorky WN43 nevykazuje esovitý tvar, čo možno vysvetľovať malou veľkosťou zrn, viď tab. 4.1. Taktiež deformačné krivky v smere ED a TD horčíkovej zliatiny WN43 sa na začiatku plastickej časti deformačnej krivky nelíšia viac, než je štatistická chyba merania.



Obr. 4.3: Deformačné krivky vzoriek 2Nd 3 mm/s a 5 mm/s.

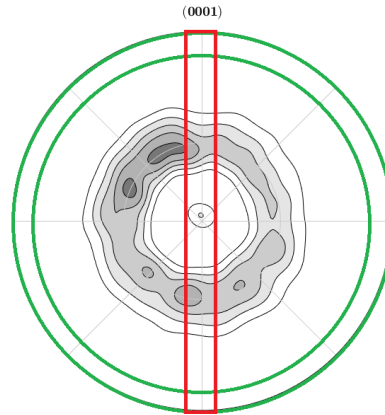


Obr. 4.4: Deformačné krivky vzoriek 4Y 3 mm/s a 5 mm/s.



Obr. 4.5: Deformačné krivky vzoriek WN43 3 mm/s a 5 mm/s.

S ohľadom na zloženie materiálu vykazujú vysoké pevnosti vzorky s vyšším obsahom vzácnych zemín resp. yttria. Vysvetliť je to možné veľkosťou zrna vo vzorkách a množstvom sekundárnych fáz v materiáli. S vyšším obsahom sekundárnych fáz sa zvyšuje pevnosť materiálu.



Obr. 4.6: Vhodne orientované zrná pre vznik dvojčatenia v ED zelená farba, v TD červená farba.

vzorka	smer	σ_{02} [MPa]	σ_{max} [MPa]	ε_{max}
2Nd 3 mm/s	ED	82 ± 7	245 ± 2	$0,30 \pm 0,04$
	TD	85 ± 1	253 ± 6	$0,16 \pm 0,01$
2Nd 5 mm/s	ED	79 ± 4	238 ± 3	$0,33 \pm 0,06$
	TD	77 ± 6	245 ± 2	$0,16 \pm 0,02$
4Y 3 mm/s	ED	100 ± 3	247 ± 4	$0,41 \pm 0,03$
	TD	94 ± 6	243 ± 4	$0,29 \pm 0,04$
4Y 5 mm/s	ED	97 ± 4	255 ± 2	$0,45 \pm 0,02$
	TD	102 ± 5	247 ± 4	$0,30 \pm 0,03$
WN43 3 mm/s	ED	133 ± 4	328 ± 3	$0,28 \pm 0,01$
	TD	156 ± 2	319 ± 3	$0,19 \pm 0,03$
WN43 5 mm/s	ED	127 ± 7	322 ± 12	$0,22 \pm 0,04$
	TD	153 ± 2	317 ± 8	$0,20 \pm 0,03$

Tabuľka 4.2: σ_{02} , σ_{max} a ε_{max} jednotlivých vzoriek.

Všeobecne však platí, že čím má materiál jemnejšie zrná, tým má vyššiu hodnotu σ_{02} , hovorí o tom Hall-Petchov vzťah [26]. Pre 2Nd a 4Y tvoril tento nárast pevnosti pri znížení rýchlosti extrúzie približne o 3 - 8 MPa v oboch smeroch deformácie (ED a TD). Materiál 4Y pri oboch extrudovaných rýchlostiach mal rovnaké veľkosti zrn, preto rozdiely v medziach pevnosti možno pripisovať štatistickej neistote.

Vplyv smeru deformácie bol badateľný iba pri vzorke WN43. Nárast pevnosti o 17 až 20 % bol pozorovaný pre vzorky v TD. Pevnosť vzoriek 2Nd a 4Y v oboch smeroch plastickej deformácie sa zhodovala v rámci štatistickej chyby merania.

Porovnaním medze sklzu medzi meranými vzorkami vykazuje jednoznačné maximum materiál WN43 v TD s hodnotou 156 MPa.

Čo sa týka hodnoty maximálneho napätia σ_{max} , maximum nastalo pri vzorke WN43 3 mm/s v ED s nameranou hodnotou 328 MPa. V priemere sa maximálne hodnoty napätia materiálu WN43 odlišujú od vzoriek 2Nd a 4Y asi o 70 MPa, čo predstavuje markantný rozdiel asi o 30 % pri narastajúcom obsahu vzácnych zemín. Najnižšiu hodnotu σ_{max} mala vzorka 2Nd 5 mm/s v ED s nameranou hodnotou záťažou iba 238 MPa, čo nepredstavuje výraznejšiu odchýlku v porovnaní s výsledkami zvyšných vzoriek 2Nd a 4Y, pri ktorých sme namerali σ_{max} približne 250 MPa.

Najväčšiu plasticitu vykazuje vzorka 4Y 5 mm/s, ktorá sa dokáže plasticky zdeformovať až na 55 % svojej dĺžky. Najnižšiu plasticitu má materiál 2Nd 3 mm/s v TD a 2Nd 5 mm/s v TD, keď prasknutie materiálu nastalo pri relatívnom predĺžení o 16 %.

Plasticita všetkých vzoriek je závislá na smere deformácie. Vzorky vykazovali vyššiu plasticitu pri TD deformácii. Na druhej strane plasticita je nezávislá na rozmeroch zrn.

Vlastnosti binárnych horčíkových zliatin 2Nd a 4Y boli najmä skúmané pre ich budúce využitie v biomedicíne, zväčša biodegradovateľnosť. M. Socjusz nameril vo svojej práci $\sigma_{02} = 72$ MPa pre neextrudovanú vzorku Mg - 4Y pri podobnej schéme experimentu [27]. Porovnaním výsledkov s extrudovanou vzorkou 4Y (94 - 102 MPa) sa zistilo, že vzorka 4Y extrúziou zvýšila svoju pevnosť asi o 30 MPa, čo predstavuje nárast asi o 40 %.

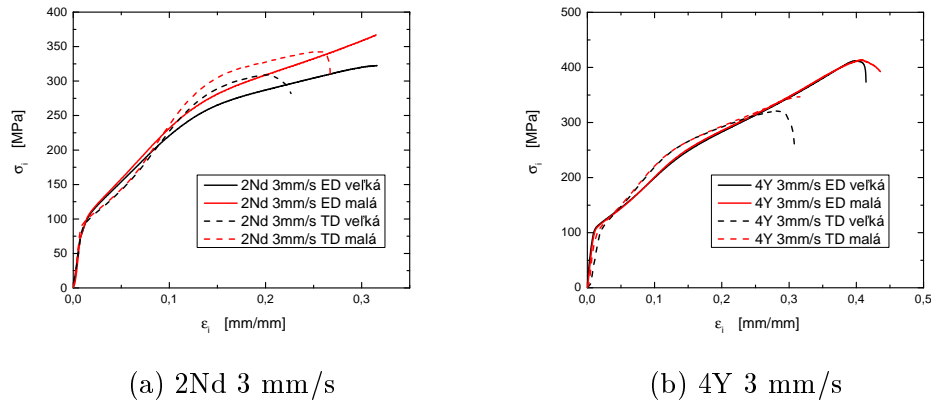
Výsledky WN43 možno porovnať s výsledkami Mackenzieho práce [28]. Tlakové deformačné skúšky vykonával na vzorke WE43 extrudovanej pri rýchlosti 1,05 m/min, teplote 360°C a extrúznom pomere 4:1. V ED nameril hodnotu medze sklzu $\sigma_{02} = 184$ MPa. Rozdielnosť výsledkov možno vysvetliť odlišnou textúrou a zložením. WE43 obsahovalo navyše 0,8 % zirkónia, ktorý vytvrdzuje materiál.

4.3 Vplyv rozmerov vzorky

Merania deformačných skúšok prebiehali na relatívne malých vzorkách 5x5x8 mm³. Je dôležité overiť, či nedochádza k nejakému nežiadanému efektu pri takých malých vzorkách, preto boli vyrezané najväčšie možné vzorky rovnaké v oboch smeroch, a to konkrétne s rozmermi 7,5x7,5x12 mm³. Pre overenie boli vybrané extrudované tyče 2Nd 3 mm/s a 4Y 3 mm/s.

Výsledky vplyvu veľkosti vzorky je možno vidieť na grafoch 4.7a a 4.7b. Deformačné krivky materiálu 4Y 3 mm/s sa dobre navzájom kopírujú pre oba smery

deformácie. Pri materiáli 2Nd 3 mm/s sa deformačné krivky zhodujú v rámci štatistickej chyby merania. Týmto meraním sme vylúčili vplyv veľkosti vzorky a miesta vypílenia vzorky na charakter deformačnej krivky.



Obr. 4.7: Porovnanie vplyvu rozmerov vzoriek.

4.4 Deformačné krivky spolu so záznamom akustickej emisie

Meranie deformačných skúšok je výhodné prevádzať spolu so záznamom akustickej emisie kvôli stanoveniu aktívnych deformačných mechanizmov. Najväčšími zdrojmi AE sú najmä lavínový pohyb dislokácií, nukleácia dvojčiat, vznik a šírenie mikrotrhlín. Počet prekmitov za daný časový interval 0,1 s v závislosti na čase sú vyobrazené na obr. 4.8 a 4.9.

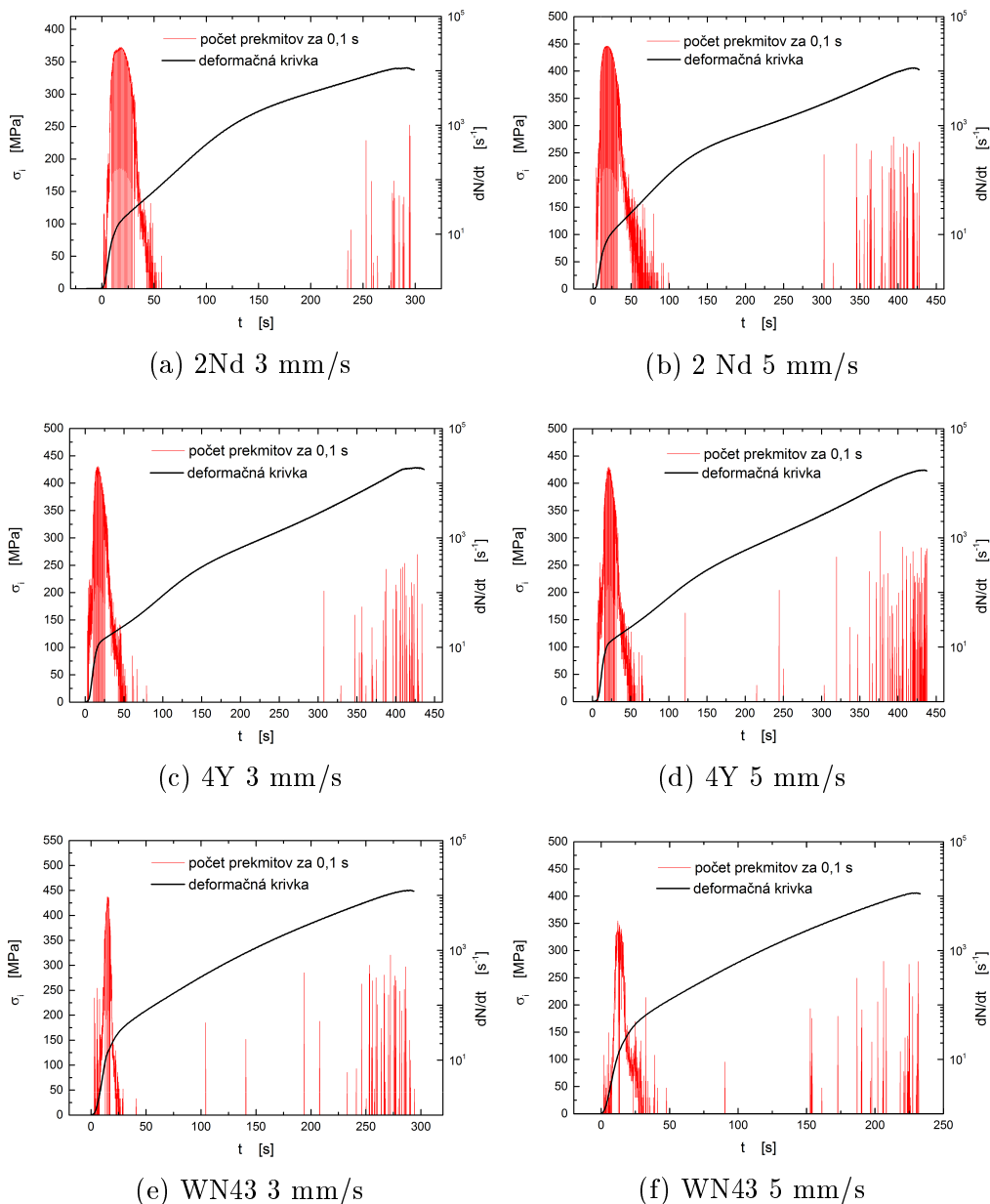
Na všetkých záznamoch signál AE na začiatku deformačných skúšok prudko vzrastá až do svojho maxima, ktoré sa nachádza na medzi sklzu na deformačnej krivke. Potom signál AE prudko poklesne. Po ostrom poklese signál AE v ED vymizne, objavuje sa až na konci záznamu tesne pred prasknutím vzorky. Signál AE na konci deformačných skúšok možno vysvetliť vznikom a šírením mikrotrhlín. Orientáciou vzorky v transversálnom smere deformácie si signál AE po prudkom poklese udržiava relatívne konštantnú hladinu.

Výraznejší signál AE počas celej doby experimentu v TD než v ED je možno pripisovať vzniku dvojčiat. Z obrázka 4.2 je vidieť, že orientácia zrn je výhodná pre ich vznik, osa c HCP mriežky je kolmá na smer deformácie v tlaku v TD, vid' obr. 1.3. Nie tak výrazný záznam signálu AE pri vzorkách WN43 v TD je spôsobený veľmi malými zrnami, v ktorých dvojčatá nevznikajú. Masívny vznik dvojčiat pri vzorkách 2Nd a 4Y potvrdzuje už spomínaný esovitý charakter deformačnej krivky.

Maximum signálu AE na medzi sklzu v ED je spôsobené lavínovým pohybom dislokácií. Vplyvom tlaku vznikajú v materiáli dislokácie a šíria sa v zrne. Signál AE klesá z dôvodu pribúdajúceho množstva dislokácií. Priestor pre pohyb dislokácií sa postupne zahusťuje dislokáciami, ich stredná voľná dráha sa skraca, až dokým sa nespomalia alebo nezastavia vplyvom prekážok (napr. hranice zrn,

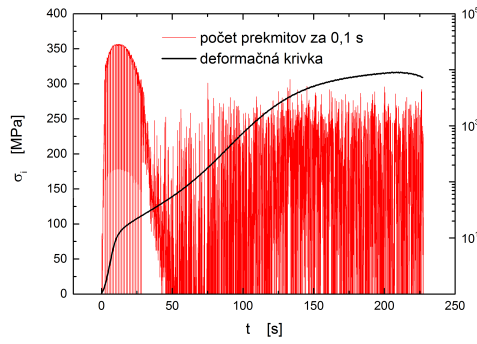
percipitáty, iné dislokácie...). To spôsobuje pokles signálu AE až do stavu, keď je materiál presýtený dislokáciami a signál AE je pod prahom rozlíšiteľnosti.

Počet prekritov nezávisle na smere deformácie klesá postupne od vzorky 2Nd cez 4Y až po WN43. Dá sa teda povedať, že so znižujúcou sa veľkosťou zrna klesá početnosť signálov AE.

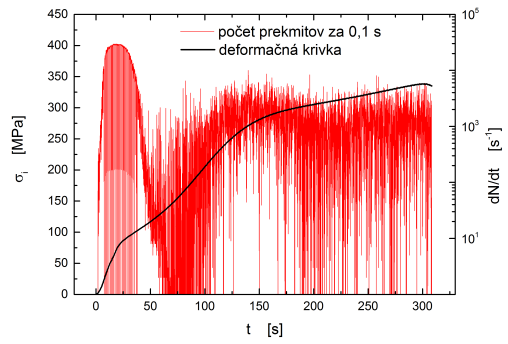


Obr. 4.8: Deformačné krivky spolu so záznamom akustickej emisie pre deformáciu v smere extrúzie.

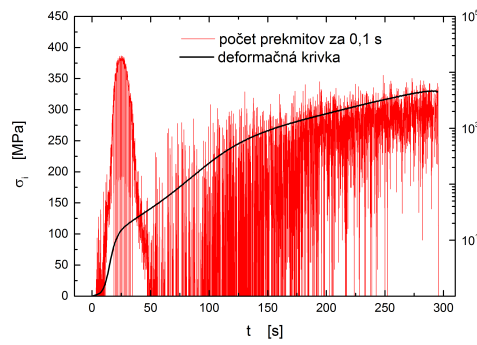
Porovnanie charakteru záznamu akustickej emisie bolo uskutočnené na vzorkách 2Nd a 4Y s rozmermi 7,5x7,5x12 mm³. Veľkosť vzorky nemá na charakteristický tvar krivky počtu prekritov za daný časový interval žiaden vplyv, preto boli publikované iba grafy pre vzorky 2Nd 3 mm/s, viď obr. 4.10. Dá sa pozorovať iba nárast počtu prekritov za časový interval počas celej doby experimentu, avšak ten sa dá jednoducho vysvetliť väčším objemom vzorky, z ktorej bol signál



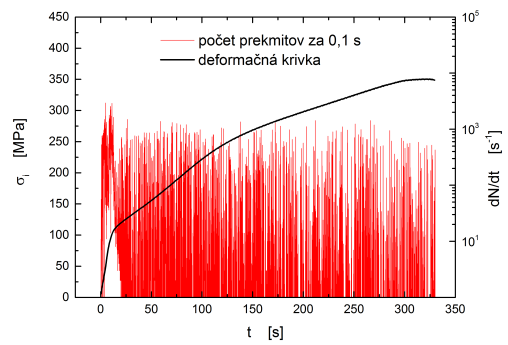
(a) 2Nd 3 mm/s



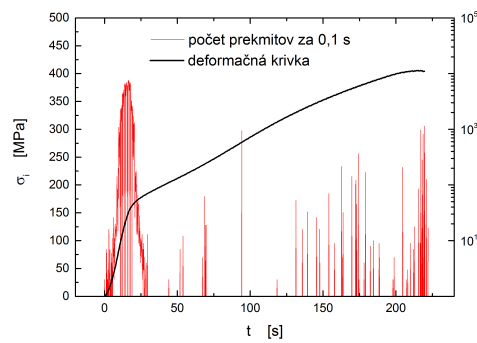
(b) 2Nd 5 mm/s



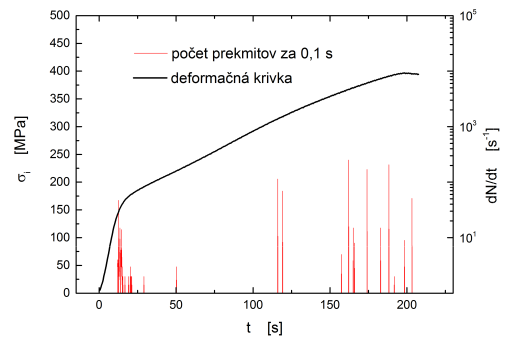
(c) 4Y 3 mm/s



(d) 4Y 5 mm/s



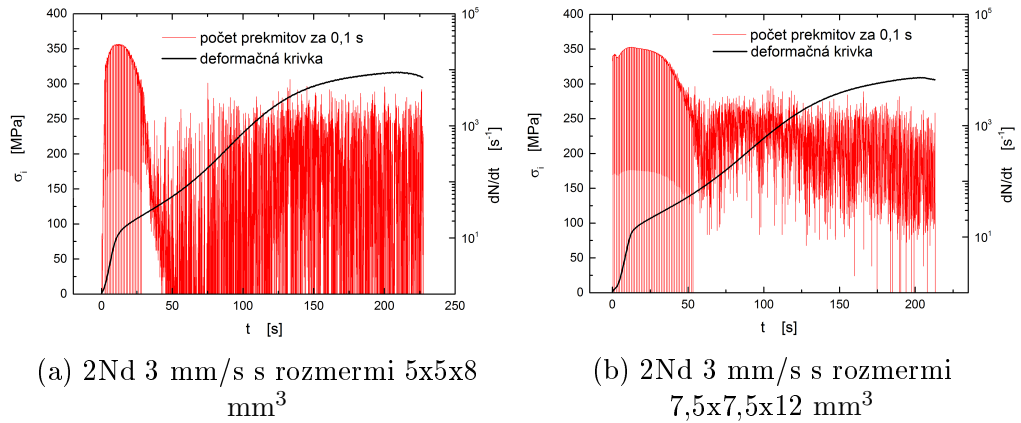
(e) WN43 3 mm/s



(f) WN43 5 mm/s

Obr. 4.9: Deformačné krivky spolu so záznamom akustickej emisie pre deformáciu v smere kolmom na smer extrúzie.

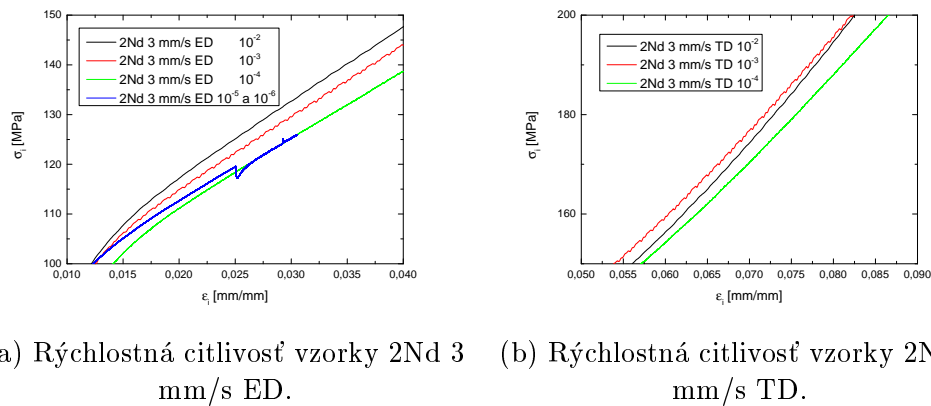
AE detekovaný.



Obr. 4.10: Vplyv rozmerov vzorky na záznam AE.

4.5 Vplyv rýchlosti deformácie

Meranie bolo uskutočnené pre vzorky 2Nd 3 mm/s v ED a TD. Na obrázkoch 4.11 sú vyobrazené deformačné krivky vo väčšom detaile. Analýzou týchto grafov sa zistilo, že deformačné krivky nezávisia na rýchlosti deformácie, keď deviácia v tvare deformačných kriviek je menšia než štatistická chyba merania. Na obrázku 4.11a je pri zmluvnom predĺžení $\varepsilon_z = 0,25$ zaznamenaný skok na deformačnej krivke, ktorý bol spôsobený zmenou deformačnej rýchlosti z 10^{-5} s^{-1} na 10^{-6} s^{-1} .



Obr. 4.11: Detail deformačných kriviek pre rôzne deformačné rýchlosti.

Záver

Zámerom bakalárskej práce bolo skúmať extrudované horčíkové zliatiny s prídavkami neodýmu a yttria. Boli prevedené deformačné skúšky v tlaku pre dve rôzne orientácie vzorky, pri ktorých bol súbežne zaznamenávaný signál akustickej emisie. Pomocou optickej mikroskopie sme získali obraz o mikroštruktúre materiálu.

Výsledky bakalárskej práce zhrnuté vo viacerých bodoch

Mikroštruktúra

- Zrná horčíkových zliatin 2Nd, 4Y a WN43 extrudovaných pri rýchlostiach 3 a 5 mm/s sú polyedrického tvaru oddelené vysokouhlovými hranicami.
- Zrná vzoriek 2Nd, 4Y a WN43 sú rovnoosé s rovnomerným rozdelením veľkosti zrn.
- S narastajúcim obsahom vzácnych zemín klesá priemerná veľkosť zrn.
- So zvyšujúcou sa rýchlosťou extrúzie narastá priemerná veľkosť zrn.

Výsledky deformačných skúšok

- Pre vzorky 2Nd, 4Y a WN43 rástla medza pevnosti so znižujúcou sa veľkosťou zrn, čo zodpovedá teoretickému Hall-Petchovmu vzťahu.
- Textúra má významný vplyv na tvar deformačnej krivky.
- Tvar deformačných kriviek vzorky 2Nd 3 mm/s pri mechanickom namáhaní v ED a TD nezávisí na rýchlosti deformácie.
- Pri vzorkách 2Nd 3 mm/s a 4Y 3 mm/s nezávisí charakter deformačnej krivky na veľkosti vzorky.

Záznam akustickej emisie

- Pri všetkých vzorkách bol pozorovaný nespojitý signál akustickej emisie, pričom skoky odpovedajú nukleácii dvojčiat, dislokačným lavínam a vzniku a šíreniu mikrotrhlín.
- Maximum početnosti prekmitov sa nachádza na medzi sklzu na deformačnej krivke.
- Výraznejší signál AE pri mechanickom namáhaní v TD než ED.
- Počet prekmitov pri oboch smeroch deformácie klesá postupne od vzorky 2Nd cez 4Y až po WN43.
- Malá početnosť prekmitov vzorky WN43 je spôsobená malou veľkosťou zrn.

Zoznam použitej literatúry

- [1] Patrik Dobroň. *Štúdium mechanických a fyzikálnych vlastností nových konštrukčných materiálov na báze hořčika metódou akustickej emisie*. PhD thesis, 2007.
- [2] BL Mordike and Tü Ebert. Magnesium: Properties—applications—potential. *Materials Science and Engineering: A*, 302(1):37–45, 2001.
- [3] Frank Czerwinski. Oxidation characteristics of magnesium alloys. *JOM*, 64(12):1477–1483, 2012.
- [4] Zdeněk Drozd. Hořčík – materiál budoucnost, 2009.
- [5] Jiří Mikulčák. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. SPN, 1990.
- [6] FW Von Batchelder and RF Raeuchle. Lattice constants and brillouin zone overlap in dilute magnesium alloys. *Physical Review*, 105(1):59–61, 1957.
- [7] Zuzana Zdražilová. Studium anizotropie tvorby mechanických dvojčat v hořčíkové slitině AZ31. 2016.
- [8] Michael M Avedesian, Hugh Baker, et al. *ASM specialty handbook: magnesium and magnesium alloys*. ASM international, 1999.
- [9] Daria Drozdenko. *Study of novel magnesium alloys with controlled microstructure and texture*. PhD thesis, Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy, 2016.
- [10] J Koike, T Kobayashi, T Mukai, H Watanabe, M Suzuki, K Maruyama, and K Higashi. The activity of non-basal slip systems and dynamic recovery at room temperature in fine-grained az31b magnesium alloys. *Acta materialia*, 51(7):2055–2065, 2003.
- [11] Wei Wu, Hua Qiao, Ke An, Xiaoqian Guo, Peidong Wu, and Peter K Liaw. Investigation of deformation dynamics in a wrought magnesium alloy. *International Journal of Plasticity*, 62:105–120, 2014.
- [12] Hosford E.W. Kelley, W.F. Plane-strain compression of magnesium a magnesium alloy crystals. *Trans. Metall. Soc. AIME 242*, pages 5–13, 1968.
- [13] D. Steglich S. Graff, W.Brocks. Yielding of magnesium: drom single crystal to polycrystalline aggregates. *Int. J. Plast 23*, pages 5–13, 2007.
- [14] Peter Minárik. *Effect of composition and microstructure on mechanical and corrosion properties in magnesium alloys with a potential for medical applications*. PhD thesis, Univerzita Karlova. Matematicko-fyzikální fakulta. Katedra fyziky materiálů., 2014.

- [15] Daria Drozdenko, Jan Bohlen, Sangbong Yi, Peter Minárik, František Chmelík, and Patrik Dobroň. Investigating a twinning–detwinning process in wrought mg alloys by the acoustic emission technique. *Acta Materialia*, 110:103–113, 2016.
- [16] Petr Kratochvíl, Pavel Lukáč, and Boris Sprušil. *Úvod do fyziky kovu. I*. Nakl. techn. lit., 1984.
- [17] J Bohlen, F Chmelik, P Dobroň, F Kaiser, D Letzig, P Lukáč, and KU Kainer. Orientation effects on acoustic emission during tensile deformation of hot rolled magnesium alloy az31. *Journal of alloys and compounds*, 378(1):207–213, 2004.
- [18] CR Heiple and SH Carpenter. Acoustic emission produced by deformation of metals and alloys—a review. *Journal of Acoustic Emission*, 6:177–204, 1987.
- [19] JP Toronchuk. Acoustic emission during twinning of zn single crystals. *Materials Evaluation*, 35(10):51–53, 1977.
- [20] Jingli Yan, Yangshan Sun, Feng Xue, Shan Xue, and Weijian Tao. Microstructure and mechanical properties in cast magnesium–neodymium binary alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 476(1):366–371, 2008.
- [21] Martin Durisin, Janin Reifenrath, Constantin M Weber, Rainer Eifler, Hans J Maier, Thomas Lenarz, and Jan-Marten Seitz. Biodegradable nasal stents (mgf2-coated mg–2 wt% nd alloy)—a long-term in vivo study. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 105(2):350–365, 2017.
- [22] K Bobe, E Willbold, I Morgenthal, O Andersen, T Studnitzky, J Nellesen, W Tillmann, C Vogt, K Vano, and F Witte. In vitro and in vivo evaluation of biodegradable, open-porous scaffolds made of sintered magnesium w4 short fibres. *Acta Biomaterialia*, 9(10):8611–8623, 2013.
- [23] Determining strain pole figures from diffraction experiments, YouTube, , <https://www.youtube.com/watch?v=6POi6h4dfVs>, 29.6.2017.
- [24] Marko Knezevic, Amanda Levinson, Ryan Harris, Raja K Mishra, Roger D Doherty, and Surya R Kalidindi. Deformation twinning in az31: influence on strain hardening and texture evolution. *Acta Materialia*, 58(19):6230–6242, 2010.
- [25] L Nascimento, S Yi, J Bohlen, L Fuskova, D Letzig, and KU Kainer. High cycle fatigue behaviour of magnesium alloys. *Procedia Engineering*, 2(1):743–750, 2010.
- [26] W Yuan, SK Panigrahi, J-Q Su, and RS Mishra. Influence of grain size and texture on hall–petch relationship for a magnesium alloy. *Scripta Materialia*, 65(11):994–997, 2011.
- [27] M Socjusz-Podosek and L Lityńska. Effect of yttrium on structure and mechanical properties of mg alloys. *Materials Chemistry and Physics*, 80(2):472–475, 2003.

- [28] LWF Mackenzie, B Davis, FJ Humphreys, and GW Lorimer. The deformation, recrystallisation and texture of three magnesium alloy extrusions. *Materials Science and Technology*, 23(10):1173–1180, 2007.

Zoznam obrázkov

1.1	Hexagonálne tesne usporiadaná mriežka [7].	3
1.2	Najvýznamnejšie roviny a smery v hexagonálnej mriežke [9].	4
1.3	Vznik dvojčata.	4
1.4	Schematické znázornenie extrúzie [14].	5
1.5	Oblasti deformačnej krivky a významné body.	6
3.1	Schematický princíp goniometra pre meranie textúry difrakciou [23].	10
4.1	Mikroštruktúra extrudovaných vzoriek so zväčšením 500x.	12
4.2	Pólové obrazce roviny (0001) jednotlivých vzoriek.	13
4.3	Deformačné krivky vzoriek 2Nd 3 mm/s a 5 mm/s.	14
4.4	Deformačné krivky vzoriek 4Y 3 mm/s a 5 mm/s.	15
4.5	Deformačné krivky vzoriek WN43 3 mm/s a 5 mm/s.	15
4.6	Vhodne orientované zrná pre vznik dvojčatenia v ED zelená farba, v TD červená farba.	16
4.7	Porovnanie vplyvu rozmerov vzoriek.	18
4.8	Deformačné krivky spolu so záznamom akustickej emisie pre de- formáciu v smere extrúzie.	19
4.9	Deformačné krivky spolu so záznamom akustickej emisie pre de- formáciu v smere kolmom na smer extrúzie.	20
4.10	Vplyv rozmerov vzorky na záznam AE.	21
4.11	Detail deformačných kriviek pre rôzne deformačné rýchlosti.	21

Zoznam tabuliek

4.1	Veľkosti zrn horčíkových zliatin s prímiesami vzácnych zemín (neodýmu a ytria) určené kruhovou metódou.	11
4.2	σ_{02} , σ_{max} a ε_{max} jednotlivých vzoriek.	16

Zoznam použitých skratiek

HCP - hexagonálne tesne usporiadaná kryštálová mriežka

a, c - mriežkové parametre hexagonálnej mriežky

$\pi 1$ - pyramidálny sklzový systém prvého druhu

$\pi 2$ - pyramidálny sklzový systém druhého druhu

AE - akustická emisia

ED - pozdĺžny smer (smer extrúzie)

TD - priečny (transverzálny) smer

XRD - difrakcia za použitia röntgenových lúčov