

Univerzita Karlova v Praze  
Matematicko-fyzikální fakulta

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Kludia Horváth

## **Studium deformačních mechanismů v nových hořčkových slitinách při jednoosém a nízko cyklovém namáhání metodou akustické emise**

Katedra fyziky materiálů

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Patrik Dobroň, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2013

Na tomto místě bych chtěla poděkovat za pomoc všem, kteří mi pomáhali při vypracování bakalářské práce. V první řadě mé poděkování patří vedoucímu práce Ing. Patriku Dobroňovi, Ph.D. za konzultace, poskytnutí materiálů, cenné rady a trpělivost během mé práce. Poděkování patří ještě Ing. Janě Kálalové, za čas a pomoc v chemické laboratoři a paní Martě Čepové, za pomoc při použití světelného mikroskopu.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala 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 v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V ..... dne.....

Kludia Horváth

Název práce: Studium deformačních mechanismů v nových hořčíkových slitinách při jednoosém a nízko cyklovém namáhání metodou akustické emise

Autor: Klaudia Horváth

Katedra / Ústav: Katedra fyziky materiálů

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Patrik Dobroň Ph.D., Katedra fyziky materiálů

Abstrakt: Práce je zaměřená na získání nových poznatků o vztahu mikrostruktury a deformačních mechanismů v hořčíkových slitinách (Mg) během jednoosého (tah, tlak) a nízko cyklového namáhání za použití metody akustické emise (AE). Hlavní důraz je kladen na studium tahovo-tlakové asymetrie na mezi kluzu a detwinning-procesu při změně deformačního módu v nových Mg slitinách bez příměsi hliníku, kde deformační textura ovlivňuje aktivaci jednotlivých deformačních systému. Získané výsledky přispějí k pochopení dislokačních procesů a vzniku dvojčatení během cyklického namáhání. Zmíněné procesy jsou velice důležité, protože výrazně ovlivňují únavovou životnost hořčíkových slitin.

Klíčová slova: Mg slitina, deformační testy, akustická emise, dvojčatení

Title: An Acoustic Emission Study of Deformation Mechanisms in Novel Magnesium Alloys at Uniaxial and Low Cyclic Loading

Author: Klaudia Horváth

Department: Department of Physics of Materials

Supervisor: Ing. Patrik Dobroň, Ph.D., Department of Physics of Materials

Abstract: This work is focused on the study of the relationship between microstructure and deformation mechanisms in magnesium (Mg) alloys during uniaxial (tension, compression) and low cyclic loading by the acoustic emission (AE) technique. The main attention is paid to the study of tension-compression yield asymmetry and twinning-detwinning process during changes in deformation mode in novel aluminium-free Mg alloys, where the deformation texture influences the activation of various deformation mechanisms. The results contribute to the understanding of dislocation processes and twin activation (especially of twinning-detwinning process) during cyclic loading. These processes are of great importance because they influence significantly the fatigue life of Mg alloys.

Keywords: Mg alloy, deformation test, acoustic emission, twinning

# Obsah

Úvod.....	3
<b>1. Teoretická část.....</b>	<b>4</b>
1.1. Plastická deformace kovů s hexagonální mřížkou .....	4
1.2. Extruze .....	6
1.3. Akustická emise .....	8
1.3.1. Definice a metoda akustické emise .....	8
1.3.2. Zdroje akustické emise.....	8
1.3.3. Terminologie a základní parametry AE .....	10
<b>2. Experimentální část .....</b>	<b>11</b>
2.1. Použité materiály.....	11
2.2. Experimentální metody .....	11
2.2.1. Deformační zkoušky .....	11
2.2.2. Měření akustické emise.....	12
2.2.3. Světelná mikroskopie .....	13
<b>3. Výsledky měření.....</b>	<b>14</b>
<b>4. Diskuze .....</b>	<b>24</b>
<b>5. Závěr.....</b>	<b>27</b>
<b>Možnosti dalšího výzkumu .....</b>	<b>28</b>
<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>29</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>31</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>33</b>

## Úvod

Díky rozvoji průmyslu se zvyšují i požadavky na mechanické vlastnosti materiálů. V určitých odvětvích, jako jsou například letecký či automobilový průmysl, je cílem nahradit konvenční materiály lehkými slitinami bez zhoršení požadovaných mechanických vlastností. Příčinou je snaha o snížení spotřeby paliva a tudíž i emisí, na které má velký vliv hmotnost vozidla (při snížení hmotnosti vozidla o 10% se sníží spotřeba paliva přibližně o 5%).

Hořčíkové slitiny jsou nejlehčí z konstrukčních kovů, protože mají mnohem menší hustotu než v průmyslu běžně používané ocele nebo hliníkové slitiny. Jednou z nejstarších průmyslných aplikací (z roku 1936) Mg slitiny je její použití k výrobě klikových a převodovkových skříní ve známém automobilu Volkswagen – Brouk. Koncem 70. a začátkem 80. let se s rozšířením vodou chlazených motorů významně redukovalo použití Mg slitin v důsledku jejich malé odolnosti vůči korozi. V 90. letech se znovu začaly objevovat a aplikovat různé druhy Mg slitin, kvůli přísným limitům emisí a spotřebě paliva. V současné době jsou Mg slitiny využívány v automobilovém průmyslu (např. Volkswagen a Audi), k výrobě sportovního nářadí, v elektronickém průmyslu, v dopravě a při výrobě předmětů domácí potřeby. Mg slitiny mají velkou specifickou pevnost a tuhost. Další výhodou Mg je jeho snadná dosažitelnost (z 1 litru mořské vody dostaneme až 1,4 g hořčíku [1]) a jeho dobrá recyklovatelnost. Porovnáním s polymery má lepší mechanické vlastnosti, větší odolnost vůči stárnutí, lepší elektrickou a tepelnou vodivost. K negativním vlastnostem patří špatná tvárnost za studena a zejména nízká odolnost vůči korozi a větší tepelná roztažnost než mají slitiny Al.

Pojem akustická emise (AE) úzce souvisí s plastickou deformací kovů. Nazývá se tak jev, kdy plastickou deformaci kovů doprovází akustické popraskávání či akustický šum vznikající uvnitř materiálu v průběhu deformace. S fyzikálním jevem AE se setkávají lidé v každodenním životě, např. zemětřesení, sesuvy půdy, sněhové laviny, praskající dřevo.

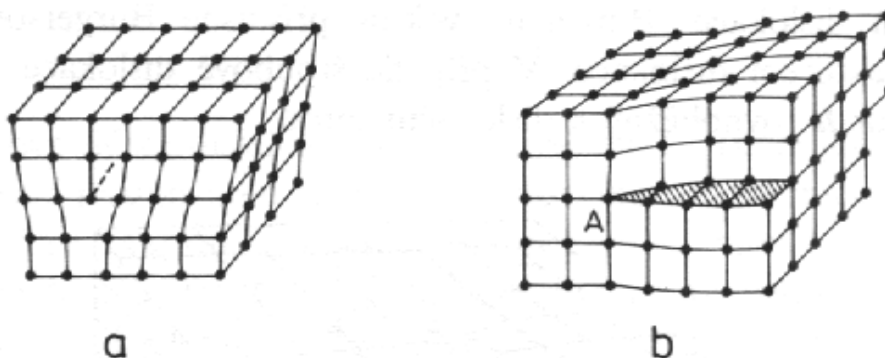
První práce v této oblasti jsou datovány do 50-tých let minulého století a jsou spojeny se jménem německého fyzika Josepha Kaisera, který pomocí AE zkoumal kovové a nekovové materiály [2]. V šedesátých letech došlo k rozvoji metody AE (nedestruktivní zkoušení, in-situ měření) v technických aplikacích, co se projevilo i vývojem nových zařízení pro měření AE [3].

# 1. Teoretická část

## 1.1. Plastická deformace kovů s hexagonální mřížkou

Hořčík má hexagonální krystalovou strukturu (hcp), která silně ovlivňuje jeho mechanické vlastnosti. V hcp materiálech probíhá deformace odlišným způsobem, než v materiálech s kubickou prostorově nebo plošně centrovanou krystalickou mřížkou.

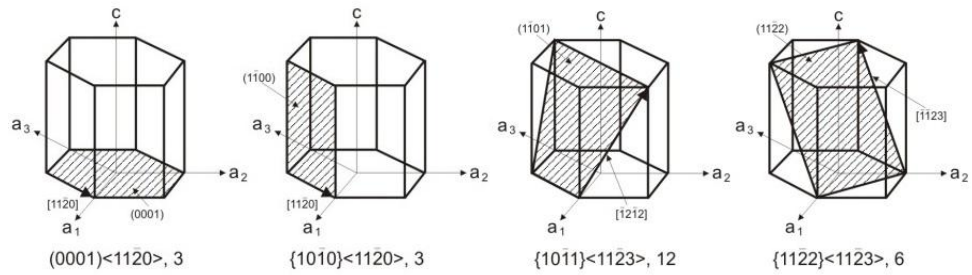
Z hlediska deformace mají největší význam dislokace, které patří mezi čárové poruchy. V závislosti na tom, ve kterém směru působí smykové napětí, mohou vznikat dva typy dislokací: hranová (Obr. 1.1.a)) a šroubová (Obr. 1.1.b)). Okraj vložené poloroviny nazýváme dislokační hranou.



Obr. 1.1. Hranová (a) a šroubová (b) dislokace [4]

V průběhu plastické deformace, dochází nejen ke vzniku dislokací, ale také k jejich pohybu a vzájemné interakci (potínání, anihilace).

V hexagonálních materiálech rozlišujeme tři hlavní skluzové systémy, které jsou uvedené na Obr. 2.2. Nej hustěji obsazena rovina je bazální (0001) se skluzovými směry  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ . Další roviny jsou prizmatické ( $\{10\bar{1}0\}$ ) a pyramidální (prvního  $\{10\bar{1}1\}$  a druhého druhu  $\{11\bar{2}2\}$ )[3].

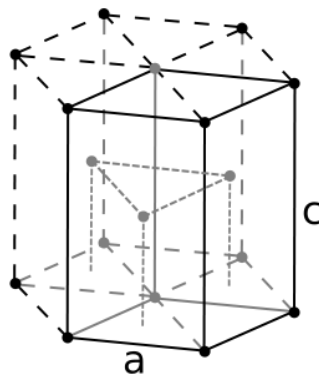


Obr. 1.2. Základní skluzové roviny v hexagonálních kovech [5]

Mikroskopické změny (deformace) probíhající v kovech s hexagonální strukturou silně závisí na poměru krystalických os  $c$  a  $a$  (znázorněno na Obr. 1.3.).

Ideální poměr  $c/a$ , tj. nejtěsnější uspořádání  $j$  je  $\sqrt{\frac{8}{3}}$ . Pokud je tento poměr větší než

ideální, skluz primárně probíhá v bazální rovině ve směrech  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ . V případě hořčíku, kde je tento poměr blízký ideální hodnotě, se můžou za určitých podmínek kromě bazálních rovin aktivovat i prizmatické, či pyramidální roviny. Vliv na jejich aktivaci má zejména teplota deformace nebo chemické složení materiálu.

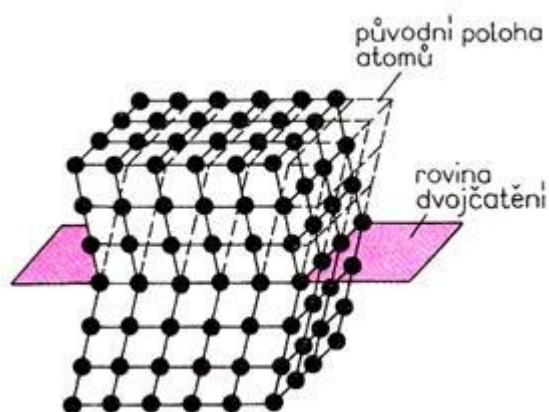


Obr. 1.3. Hexagonální mřížka

Podle von Misesova kritéria [6], ke kompatibilní plastické deformaci v polykrystalických materiálech je zapotřebí minimálně 5 nezávislých skluzových systémů. U Mg a jejich slitin jsou k dispozici jen dva krystalograficky nezávislé směry. Hlavním skluzovým systémem je bazální rovina, která má nejnižší kritické smykové napětí (CRSS, critical resolved shear stress) ze všech skluzových systémů. Skluz v pyramidálních rovinách má CRSS přibližně o dva řády vyšší. Bazální skluzové systémy neumožňují deformaci ve směru osy  $c$ , a protože je velmi složitá



aktivace pyramidálního skluzu, je k plastické deformaci při pokojové teplotě (RT) zapotřebí další deformační mechanismus, který se nazývá dvojčatění. Dvojčatění je způsobeno velkým lokálním napětím, např. od nahromaděných dislokací na hranicích zrn. Nukleace dvojčat je homogenní a závisí na mikrostruktuře [7]. Při dvojčatění dochází k posunutí části krystalu do nové polohy, která je zrcadlovým obrazem té původní, přičemž zrcadlovou rovinou je rovina dvojčatění (Obr. 1.4.). Tento jev přispívá ke zvyšování hustoty dislokací, což se projevuje zpevňováním materiálu. Hlavním dvojčatovým systémem v hořčkových slitinách je systém  $\{10\bar{1}2\} \langle 10\bar{1}1 \rangle$ .



Obr. 1.4. Rovina dvojčatění [8]

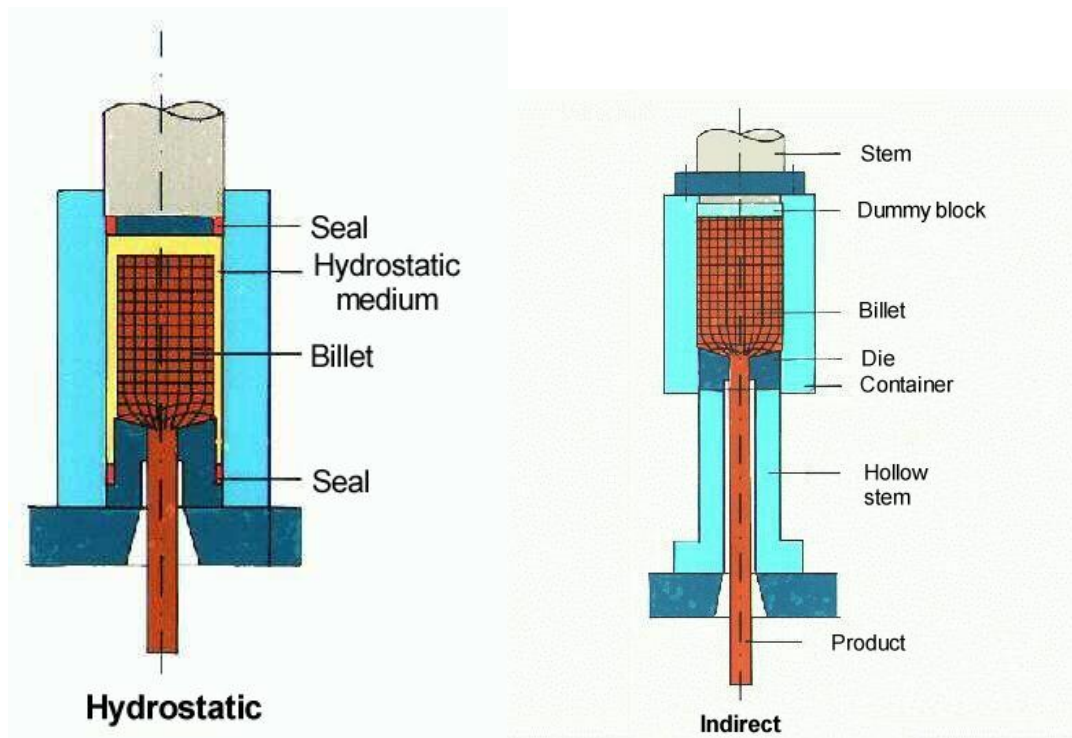
Vznik dvojčat závisí nejenom na napětí ale i na teplotě nebo na velikosti zrn. Se vzrůstající teplotou dochází ke snižování CRSS pro aktivaci nebazálních skluzových systémů a tudíž nad určité teplotě není zapotřebí dvojčatění.

## 1.2. Extruze

Extruze je proces používaný k výrobě polotovarů ale i finálních výrobků. Princip extruze (protlačování) je možné vidět na Obr. 1.5. Vlevo je znázorněno dopřední extrudování, při kterém materiál teče ve směru pohybu průtlačníku a k dosažení rovnoměrného tlaku na stěny extrudovaného materiálu je použito hydrostatické médium. Na Obr. 1.5. vpravo je znázorněno zpětné extrudování, při kterém materiál teče proti směru pracovního pohybu průtlačníku bez použití hydrostatického média.

Finální velikost zrn závisí na technologických parametrech, jako jsou teplota a rychlost extruze. Výhodou hydrostatického extrudování vůči zpětnému extrudování je

v rovnoměrném působení tlaku na povrchu extrudovaného materiálu, přičemž nedochází k přímému styku s nástrojem, a proto nevznikají trhliny na povrchu extrudovaného profilu. Z tohoto důvodu se u hydrostatického způsobu extruze může použít vyšší kompresní poměr, a tak může materiál nabývat jemnozrnější strukturu [9].



Obr. 1.5. Princip dopředního (hydrostatic) a zpětného (indirect) extrudování [10]

## 1. 3. Akustická emise

### 1. 3. 1. Definice a metoda akustické emise

Akustická emise (AE) je definována jako elastické vlnění, které vzniká náhlým uvolněním energie v důsledku lokální dynamické změny v struktuře materiálu, způsobené vnějšími nebo vnitřními silami [11]. Tento proces z hlediska termodynamiky je časově krátký, a proto je možné ho považovat za adiabatický.

Obecně pojem AE označuje fyzikální jev, při kterém jsou pozorovány akustické signály způsobené například plastickou deformací nebo porušováním zkoumaného materiálu. Označuje také diagnostickou metodu založenou na tomto jevu.

Tato metoda patří k pasivním nedestruktivním metodám, podávajícím integrální informace o momentálním dynamickém stavu materiálu (in-situ měření) a tedy má vysokou citlivost k lokálním nestabilitám.

Nevýhodou metody je příliš malá energie většiny vzniklých akustických pulsů, důsledkem čehož tyto pulsy zanikají v šumu pozadí detektoru.

### 1. 3. 2. Zdroje akustické emise

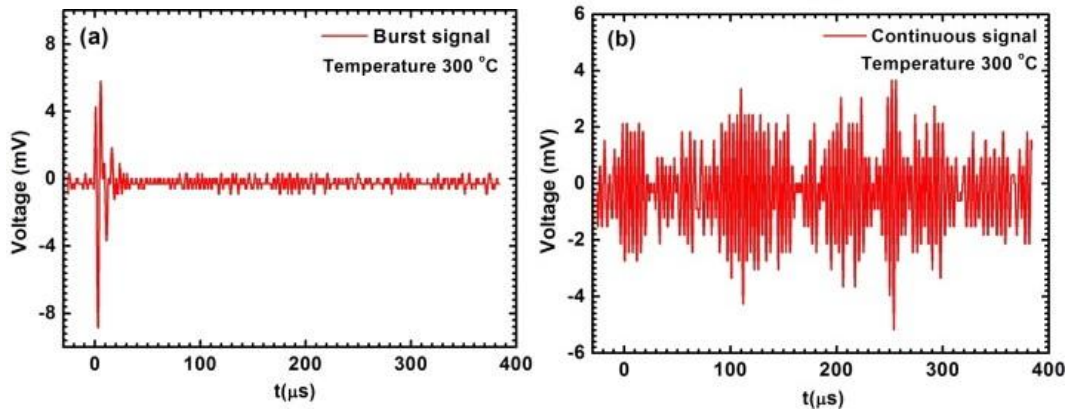
Jednorázový dynamický proces, v důsledku kterého se rychle uvolní určité množství energie, se nazývá emisní událost a lokální proces který produkuje emisní události, se nazývá emisní zdroj [12].

Podle charakteru elastického vlnění lze rozlišit dva základní typy AE:

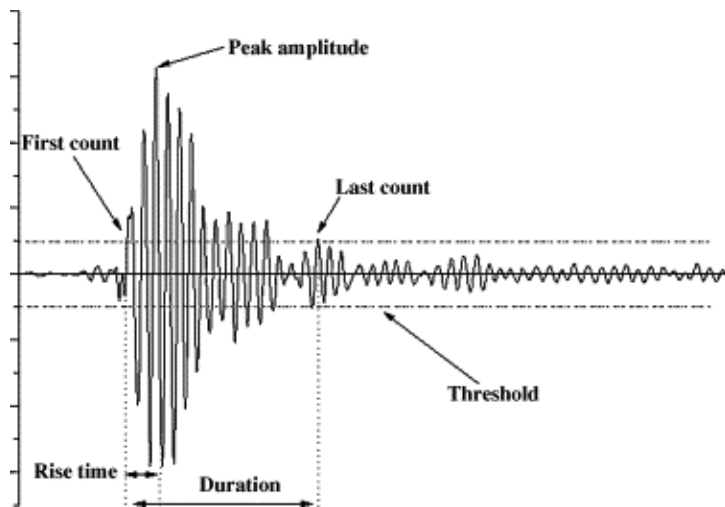
- Spojitá emise (continuous emission) – elastické vlny vzniklé z velkého počtu zdrojů, ale s malou energií, při kterém amplituda AE neklesá pod určitou prahovou úroveň.
- Nespojitá emise (burst emission) – signály AE mají charakter časově oddělených pulzů s velkou energií.

Zdroje spojitě AE jsou dislokace, jejichž chování má dynamický charakter a dokáže svými napěťovými poli generovat AE. Vzájemná interakce (anihilace, protínání) i hromadění dislokací na překážkách, nebo odtrhávání od těchto překážek, vedou ke vzniku spojitě AE. Spojitě AE vzniká i při rekrystalizaci nebo martenzitických fázových transformacích.

Zdroji nespojitých AE jsou nukleace a šíření trhlin, lom, případně korozní jevy. Nestabilní charakter plastické deformace, vyskytující se v některých materiálech, je způsoben dvojčatěním, nebo kolektivním pohybem velkého množství dislokací. Uvolněná energie může být 10 – 14 řádů větší než u spojitě AE [9].



Obr. 1.6. Nespojitá (vlevo) a spojitá (vpravo) AE [13]



Obr. 1.7. Charakterizace nespojitě AE [14]

### 1. 3. 3. Terminologie a základní parametry AE

- Emisní signál - signál získaný detekcí AE. Signál se popisuje amplitudou, tvarem, časem vzniku, dobou trvání (duration), energií a spektrem.
- Emisní událost – dynamický proces, při kterém se uvolní dané množství energie.
- Emisní kmit – průběh emisního signálu v jedné periodě takové frekvence, která má z celého spektra maximální amplitudu (peak amplitude).
- Emisní překmit (Count) – část emisního kmitu, která přeskočí nastavenou prahovou úroveň (threshold level) (zobrazen na Obr. 1.6.).
- Časová četnost emisních překmitů (Count rate) - počet emisních překmitů za jednotkový časový interval.
- Časová četnost emisních událostí (Event rate) – počet emisních událostí za jednotkový časový interval [9].

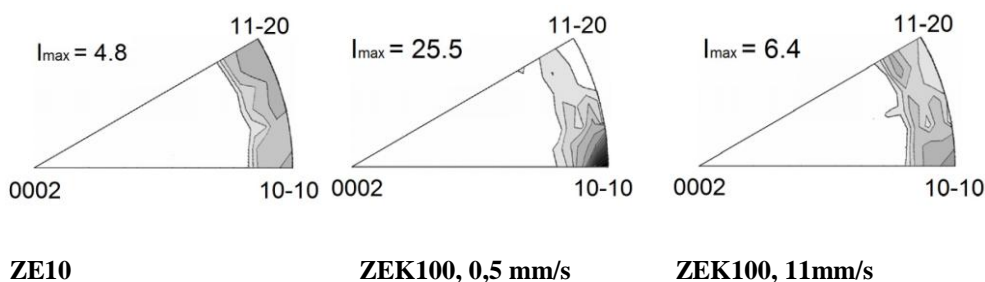
## 2. Experimentální část

### 2. 1. Použité materiály

Deformační zkoušky byly provedeny na hořčíkových slitinách ZE10 a ZEK100, jejíž chemické složení a podmínky přípravy jsou uvedeny v tabulce č. 1. (RE – kovy vzácných zemin). Obě slitiny byly protlačovány při teplotě 300 °C z bloku s původním průměrem 93 mm a délkou 300 mm. Materiály byly vyrobené v Magnesium Innovation Centre, Helmholtz-Zentrum Geesthacht, D21502 Geesthacht v Německu. Se slitinami byly dodány i texturní měření v podobě inverzních pólových obrazců (Obr. 2.1.).

	Chemické složení			Rychlost extruze (mm/s)	Extruzní poměr
	Zn (wt.%)	RE (wt.%)	Zr (wt.%)		
ZEK100	1,4	0,2	0,6	0,5	1:30
				11	
ZE10	1,3	0,1	-	11	

Tabulka č. 1. Chemické složení a podmínky přípravy použitých materiálů



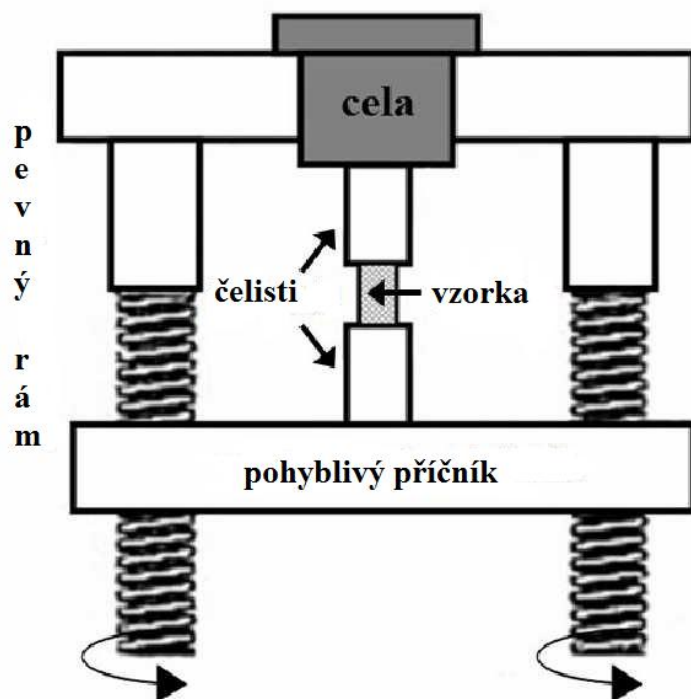
Obr. 2.1. Textura slitin

### 2. 2. Experimentální metody

#### 2. 2. 1. Deformační zkoušky

Na vzorcích byly provedeny deformační zkoušky v tlaku a v tahu na univerzálním deformačním stroji INSTRON® 5882. Schéma přístroje je znázorněno

na Obr. 2.2. Vzorky o průměru 8 mm a aktivní délce 15 mm byly připraveny z extrudovaných Mg slitin. Deformace probíhaly při pokojové teplotě (RT) a s konstantní deformační rychlostí  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Naměřené data se zaznamenávala pomocí programu Blue Hill<sup>®</sup> dodávaného firmou INSTRON<sup>®</sup> pro tento deformační stroj.



Obr. 2.2. Schéma aparatury INSTRON<sup>®</sup>

Všechna získaná data se dále zpracovávala a vynášela do podoby grafů pomocí programu Origin<sup>®</sup> od společnosti OriginLab<sup>®</sup>.

### 2. 2. 2. Měření akustické emise

AE byla detekována počítačem řízeným měřícím systémem DAKEL-IPL od firmy ZD RPETY-DAKEL (Obr. 2.3.), který umožňuje kontinuální záznam na čtyřech měřicích kanálech s různým zesílením (0-20-30-40 dB) při 2 MHz vzorkovací frekvenci a za použití 12-bitového A / D převodníku. Na zesílení signálu se využil předzesilovač s hodnotou 35 dB. Ke snímání AE se použil piezoelektrický snímač MIKRO (průměr dotykové plochy 2,8 mm [15]). Snímač (Obr. 2.4.) byl upevněn na vzorku pomocí svorky a pro zlepšení kontaktu mezi snímačem a vzorkem byla použita silikonová vazelína. Prahová úroveň pro detekci časové četnosti emisních překmitů AE (AE count rate) byla nastavena na 30% z celkového rozsahu pro daný

měřící kanál. Porovnáním hodnot z jednotlivých měřících kanálů (aby nedocházelo k přetečení ani k podtečení dat) byl vybrán kanál se zesílením 40 dB a tudíž dále prezentovány výsledky jsou získány při tomto nastavení.



Obr. 2.3. Měřící zařízení DAKEL-IPL [16]    Obr. 2.4. MICRO snímač [15]

### 2. 2. 3. Světelná mikroskopie

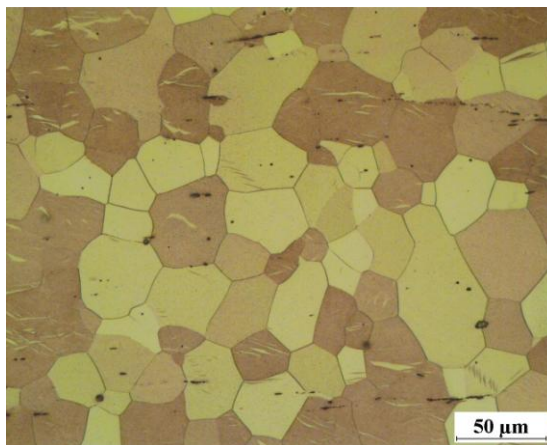
Vzorky před a po deformaci byly rozřezány v aparatuře Accutom-50 od firmy Struers<sup>®</sup> podél hlavní osy a kolmo na tento směr. Vzorky byly nejdřív zalité do Claro Citu, poté byly broušeny za mokra na přístroji TegraPol-15 od firmy Struers<sup>®</sup> s brusnými SiC papíry od firmy Struers<sup>®</sup> o různé hrubosti od 800 až 4000. Dále pak byly leštěny diamantovou pastou o hrubosti 3 mikrometry a nakonec byly leštěny na podložce Opchem pomocí přípravku OP-S. Vyleštěné povrchy byly leptány 7 až 14 vteřin leptadlem, které bylo složeno ze 150 ml ethanolu, 40 ml vody, 5.5 ml kyseliny octové a 3-4 g kyseliny pikrové.

Pro pozorování mikrostruktur byl použit světelný mikroskop OLYMPUS GX51, který byl spojen s kamerou PIXELINE<sup>®</sup> napojenou na počítač. Získané mikrostruktury byly vyhodnoceny pomocí programu Nis – Elements AR<sup>®</sup>, průměrná velikost zrna  $d$  byla určena pomocí lineární průsečíkové metody.

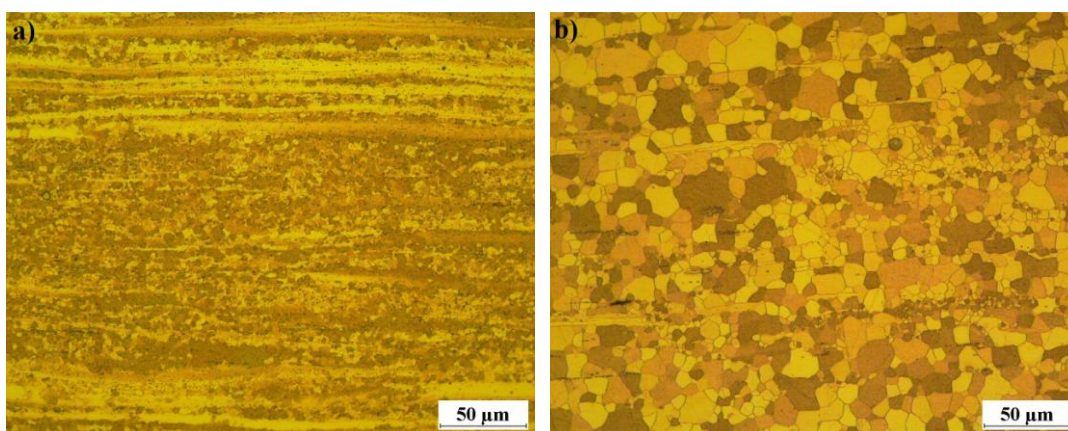


### 3. Výsledky měření

Mikrostruktury zkoumaných materiálů s vyznačenou rychlostí extruze jsou znázorněny na Obr. 3. 1.(ZE10) a 3. 2. (ZEK100).



*Obr. 3. 1. Mikrostruktura slitiny ZE10, extruzní rychlost 11 mm/s*



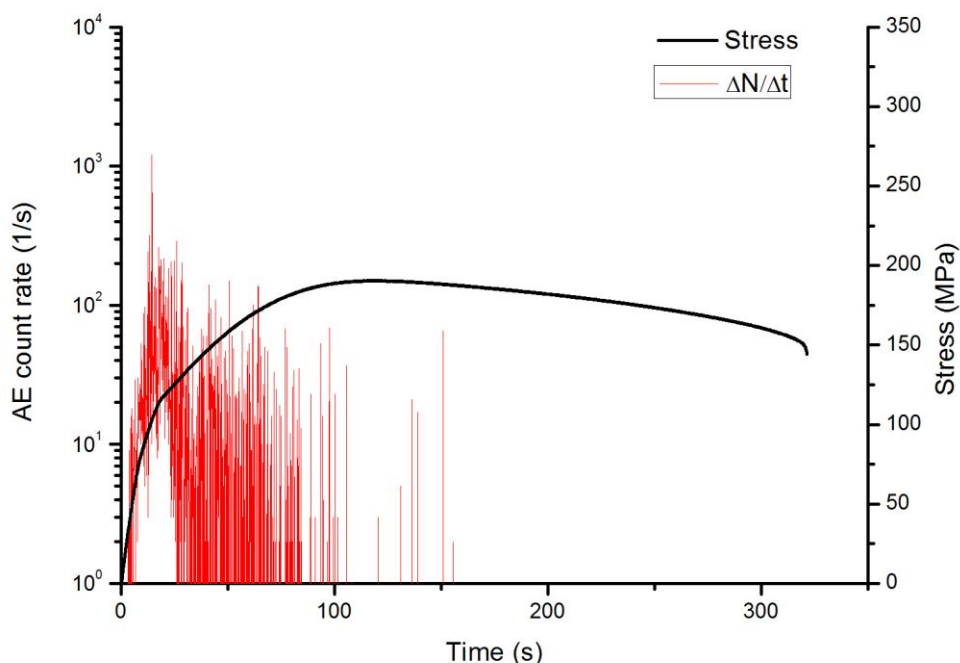
*Obr. 3. 2. Mikrostruktura slitiny ZEK100, extruzní rychlost a) 0,5 mm/s, b) 11 mm/s*

Slitina ZE10 má homogenní polyedrickou strukturu bez výskytu výrazně protáhlých zrn do směru extruze. Průměrná velikost zrn je  $(27,3 \pm 1,5) \mu\text{m}$ . V slitině ZEK100 je patrný vliv rychlosti extruze na výslednou mikrostrukturu. Po extruzi při rychlosti 0,5 mm/s má slitina částečně rekrystalizovanou mikrostrukturu s výrazně protáhlými zrny do směru extruze. V tomto případě nelze pomocí světelné mikroskopie stanovit průměrnou velikost zrn. Použitím vyšší extruzní rychlosti (11 mm/s) došlo v slitině ZEK100 k úplné rekrystalizaci a vzniku bimodální

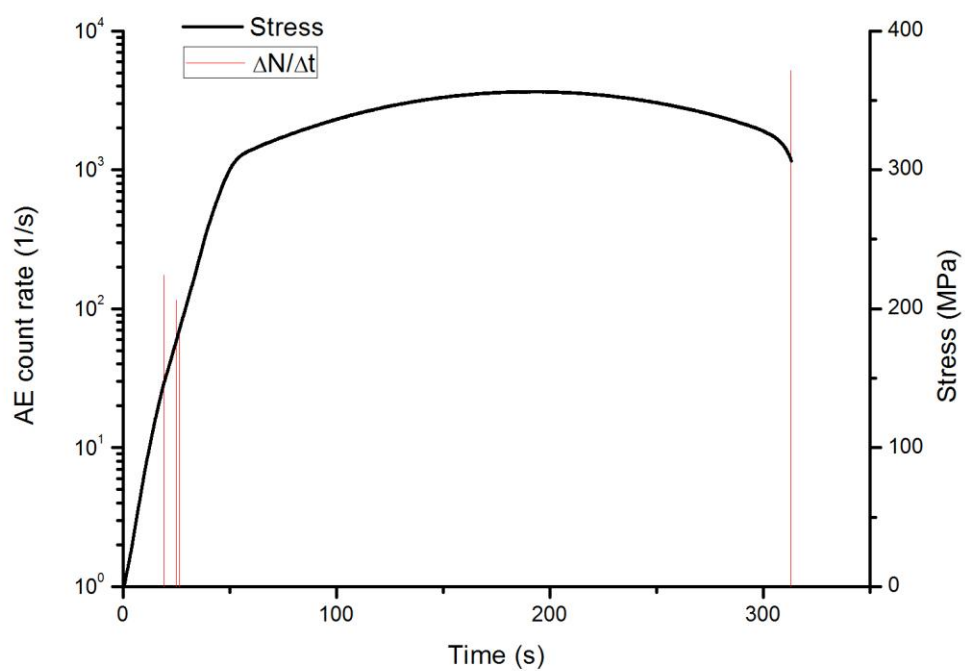
struktury s průměrnými velikostmi zrn ( $17 \pm 1$ )  $\mu\text{m}$ , respektive ( $5,6 \pm 0,5$ )  $\mu\text{m}$ . Z Obr. 3.2. (porovnání extruzních rychlostí) je patrné, že použitím nižší extruzní rychlosti se dosáhla jemnější mikrostruktura, která je však méně homogenní. Srovnáním slitin ZE10 a ZEK100, připravovaných za stejných podmínek (extruzní rychlost 11 mm/s), je pozorována jemnozrnější struktura u ZEK100.

Závislosti tahového napětí a časové četnosti počtu překmitů AE (AE count rate) na čase jsou vyneseny do grafů na Obr. 3.3. - 3.5. Všechny tahové zkoušky mají typický průběh pro polykrystalické materiály. Na začátku jsou lineární, což odpovídá elastické deformaci a po dosažení meze kluzu dochází k plastické deformaci.

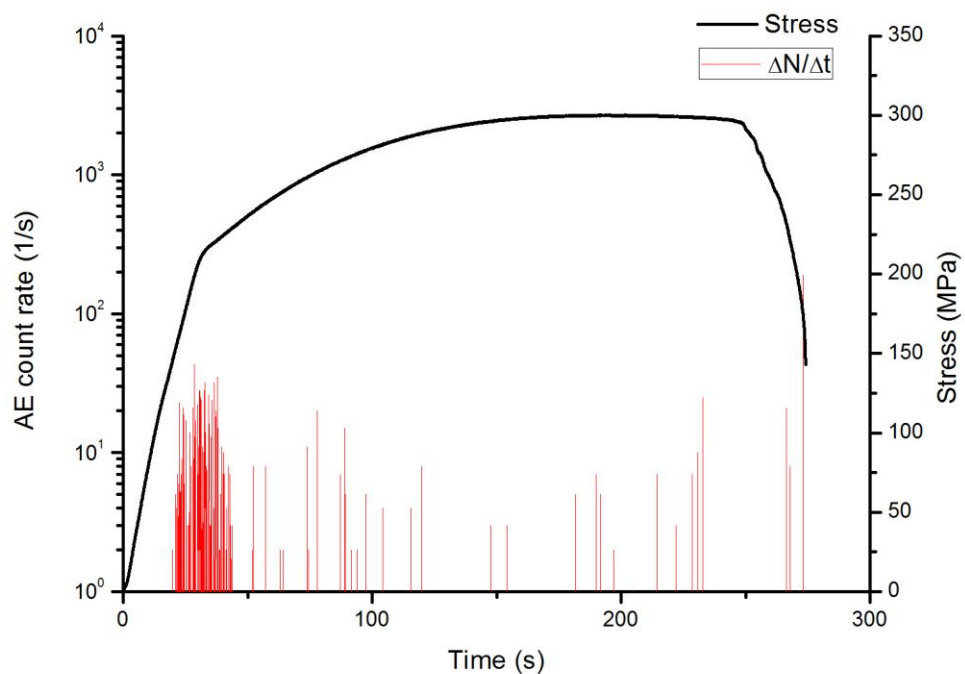
V oblasti elastické deformace lze pozorovat určitou aktivitu AE a její maximum koreluje s makroskopickou mezí kluzu (Obr. 3.3., Obr. 3.5.). V oblasti plastické deformace dochází se vzrůstajícím deformačním zpevněním k poklesu aktivity AE. Nejnižší aktivita AE je pozorována u slitiny ZEK100 extrudované rychlostí 0,5 mm/s a nejvyšší u slitiny ZE10.



Obr. 3.3. Tahová zkouška slitiny ZE10 spojená se záznamem akustické emise

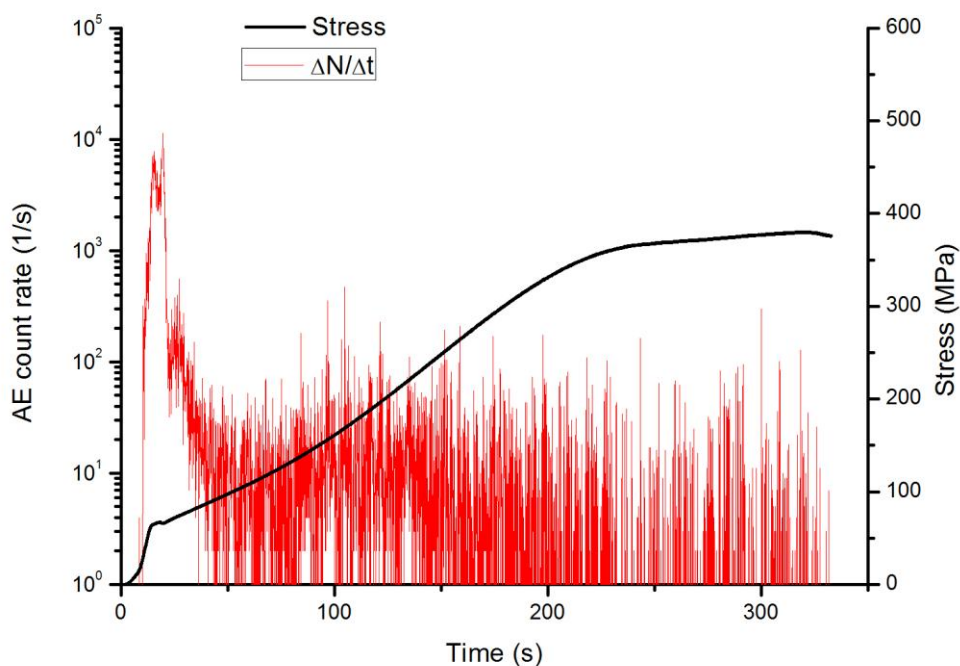


Obr. 3. 4. Tahová zkouška slitiny ZEK100, extrudovaná rychlostí 0,5 mm/s, spojená se záznamem akustické emise

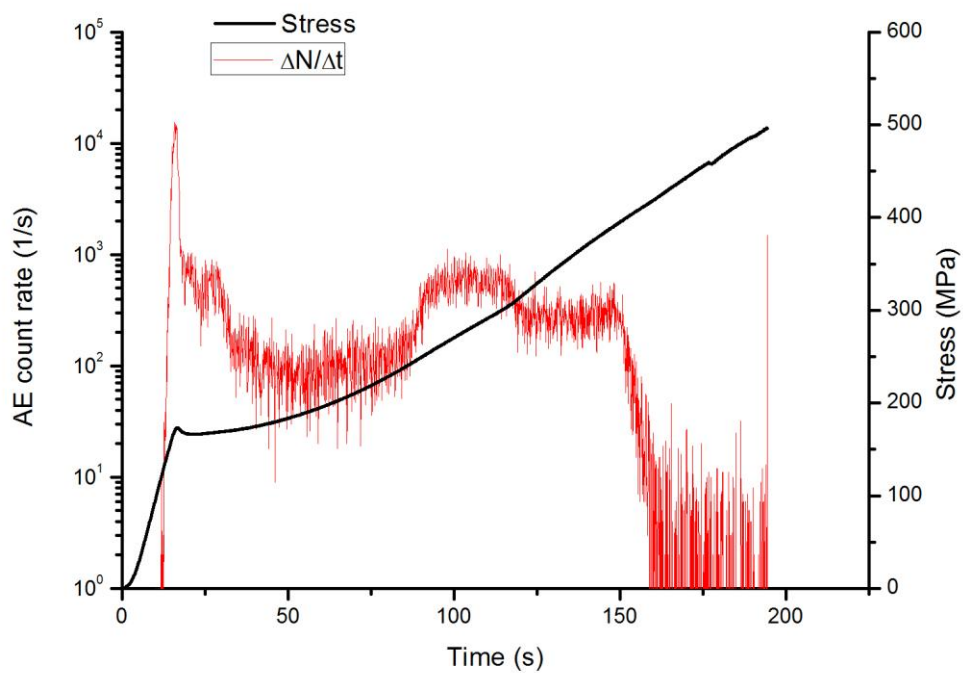


Obr. 3. 5. Tahová zkouška slitiny ZEK100, extrudovaná rychlostí 11 mm/s, spojená se záznamem akustické emise

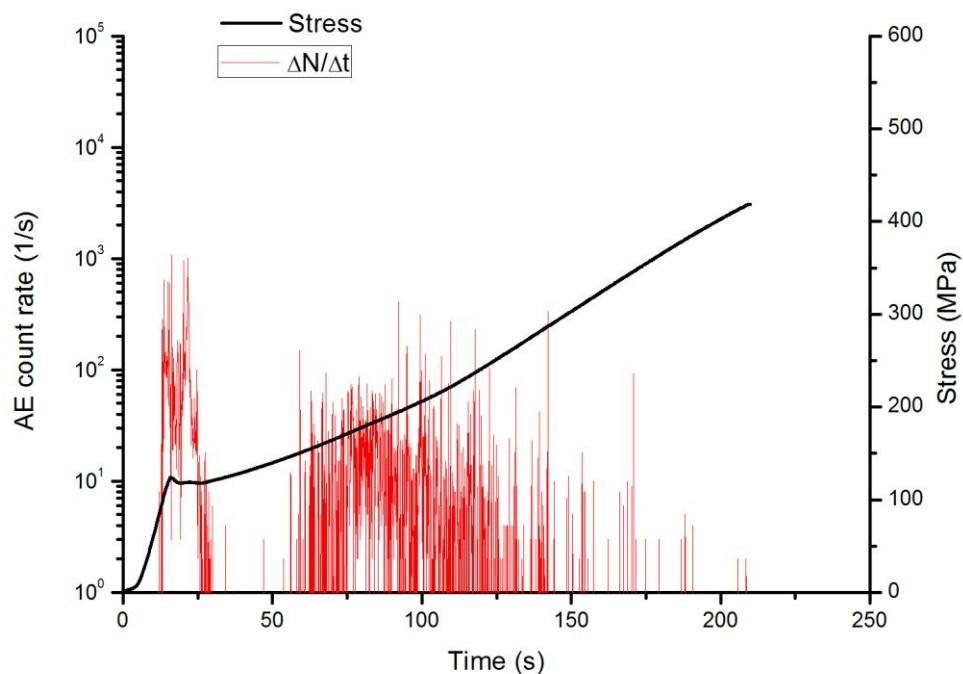
Do grafů na Obr. 3. 6. – 3. 8. jsou vyneseny závislosti tlakového napětí a časové četnosti počtu překmitů AE na čase. Obdobně, jako při tahových deformačních zkouškách, je pozorována maximální aktivita AE na makroskopickém mezi kluzu s jejím následným poklesem, což je projevem vzrůstající plastické deformace. Při deformaci v tlaku je AE výrazně vyšší než při deformaci v tahu. Na rozdíl od tahových zkoušek, nejvíc signálů emituje slitina ZEK100 s pomalejší rychlosti extruze, ve které při tahové zkoušce nebyla naměřena téměř žádná AE. Nejnižší signály AE jsou detekovány pro ZEK100 s rychlostí extruze 11 mm/s. U slitin ZEK100 jsou pozorovány dva píky signálu AE, přičemž první se nachází v oblasti meze kluzu a druhý v oblasti výrazného deformačního zpevnění. U pomaleji protlačované slitiny ZEK100 je druhý pík AE přibližně o řád nižší než ten první.



Obr. 3. 6. Tlaková zkouška slitiny ZE10 spojená se záznamem akustické emise

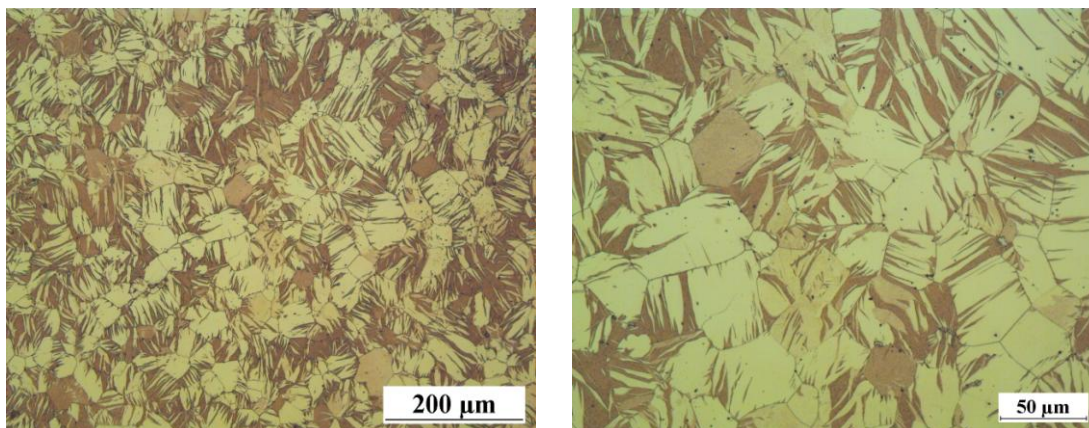


Obr. 3. 7. Tlaková zkouška slitiny ZEK100 s rychlostí extruze 0,5 mm/s spojená se záznamem akustické emise

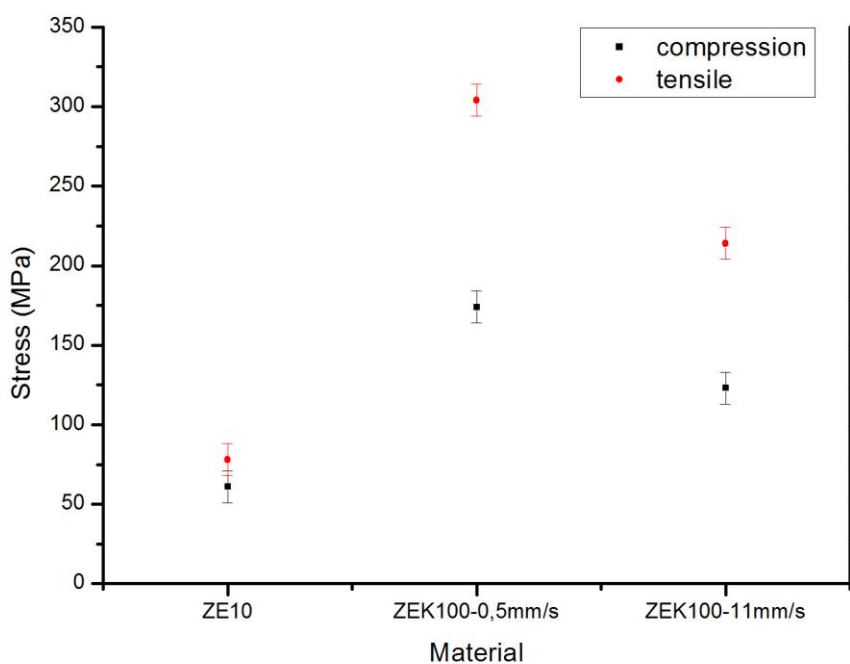


Obr. 3. 8. Tlaková zkouška slitiny ZEK100 s rychlostí extruze 11 mm/s spojená se záznamem akustické emise

Na Obr. 3. 9. je mikrostruktura slitiny ZE10 po deformaci v tlaku. V důsledku tohoto typu deformace vznikla dvojčata, která jsou rozmístěna po celé mikrostruktuře.



Obr. 3. 9. Mikrostruktura slitiny ZE10 po deformaci v tlaku

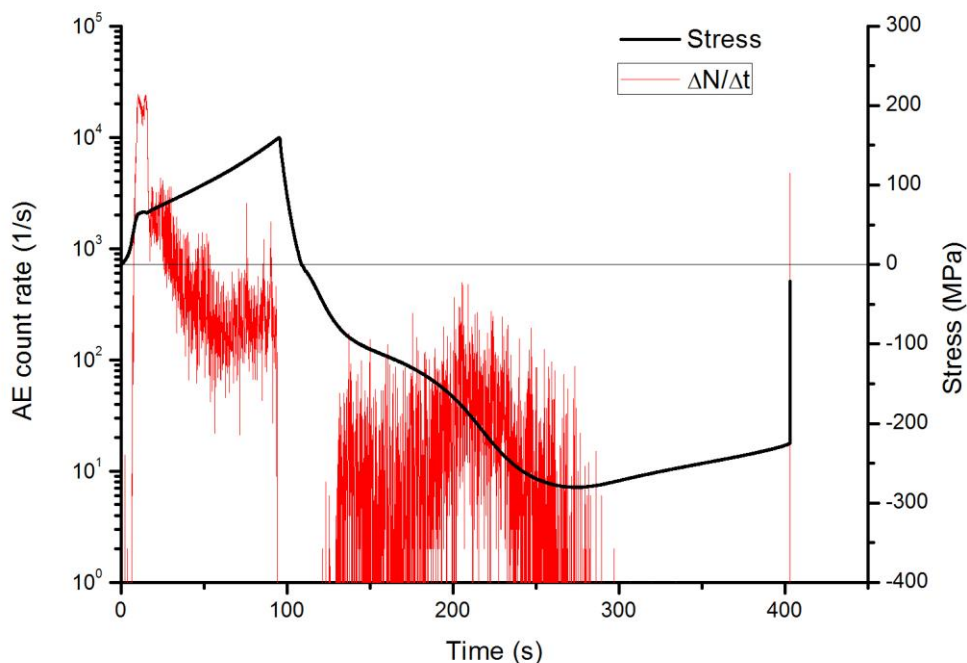


Obr. 3. 10. Tahově-tlaková asymetrie na mezi kluzu

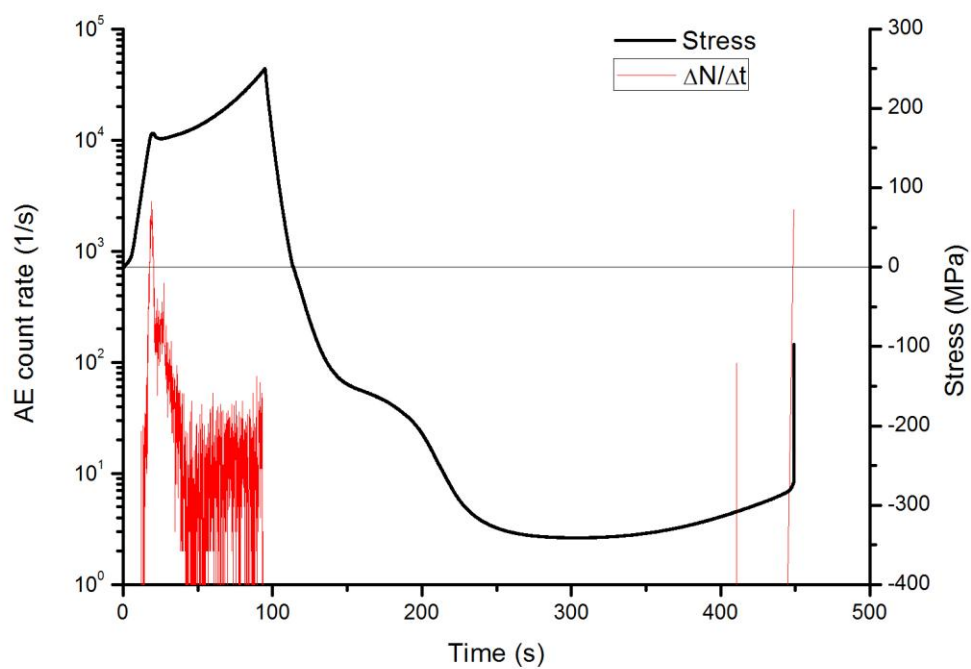
Na obr. 3. 10. jsou znázorněny hodnoty mezi kluzů (yield strength – YS) pro deformaci v tahu a v tlaku. Největší rozdíl mezi hodnotami YS v tahu a tlaku je pozorován u slitiny ZEK100 s rychlostí extruze 0,5 mm/s, nejmenší u ZE10. Hodnoty jsou určeny z grafů na obr. 3. 3. – 3. 8. Vzhledem k tomu, že máme k

dispozici pouze jedno měření, chyba v určení meze kluzu byla stanovena z chyby měření rozměru vzorku a určení síly.

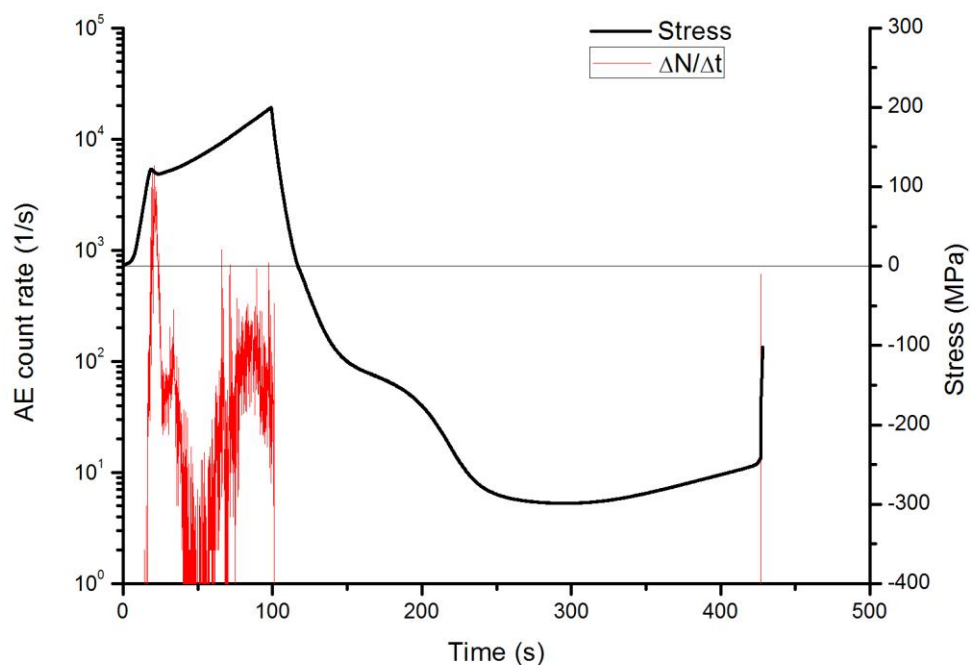
Do grafů na Obr. 3. 11. – 3. 13. jsou vyneseny deformační křivky a časové četnosti počtu překmitů AE v závislosti na čase. Vzorky jsou deformované nejdříve v tlaku (kladná hodnota napětí) a posléze v tahu (záporná hodnota napětí) z důvodu studie procesu vzniku a zániku dvojčat (twinning-detwinning proces) v těchto Mg slitinách. Na Obr. 3.11. je deformační křivka slitiny ZE10, deformovaná v tlaku do 160 MPa, pak v tahu do lomu. Obdobně jako u tlakové zkoušky je detekováno maximum AE v tlakovém půlcyklu na makroskopickém mezi kluzu s následným poklesem se vzrůstající plastickou deformací. Po dosažení hodnoty 160 MPa a změně směru zatížení došlo k vymizení AE. Výrazná aktivita AE je zaznamenána až v tahovém půlcyklu. ZEK100 s menším rychlostí extruze bylo deformováno v tlakovém půlcyklu do 250 MPa a v tahovém do lomu (Obr. 3. 12.). ZEK100 s větším rychlostí extruze bylo deformováno v tlakovém půlcyklu do 200 MPa, v tahovém do lomu (Obr. 3. 13.). Je pozoruhodné, že v tahovém půlcyklu není ani u jedné ze slitin ZEK100 detekován signál AE.



Obr. 3. 11. Tlaková-tahová zkouška slitiny ZE10 spojená se záznamem akustické emise



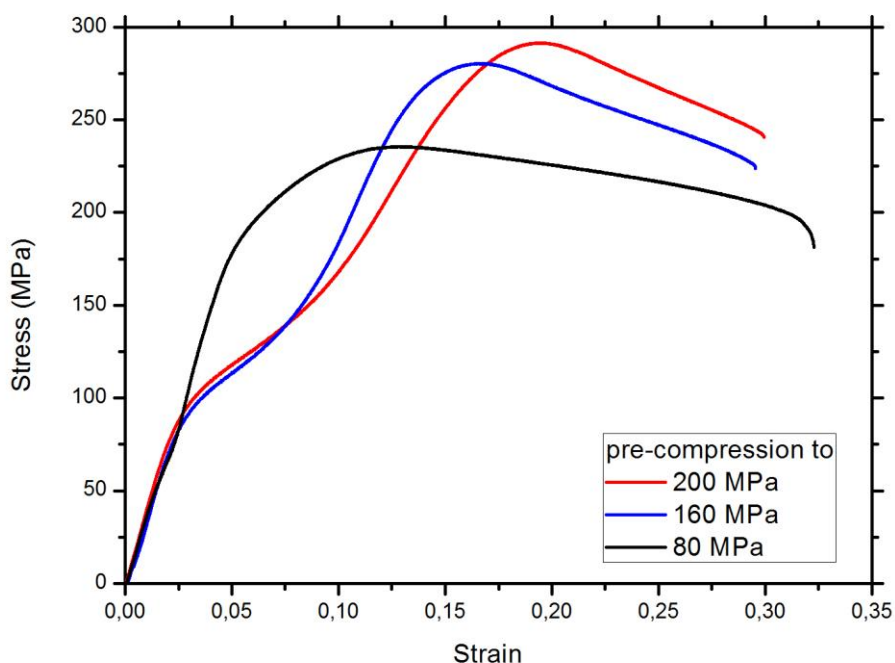
Obr. 3. 12. Tlaková-tahová zkouška slitiny ZEK100, extrudovaná rychlostí 0,5 mm/s, spojená se záznamem akustické emise



Obr. 3. 13. Tlaková-tahová zkouška slitiny ZEK100, extrudovaná rychlostí 11 mm/s, spojená se záznamem akustické emise

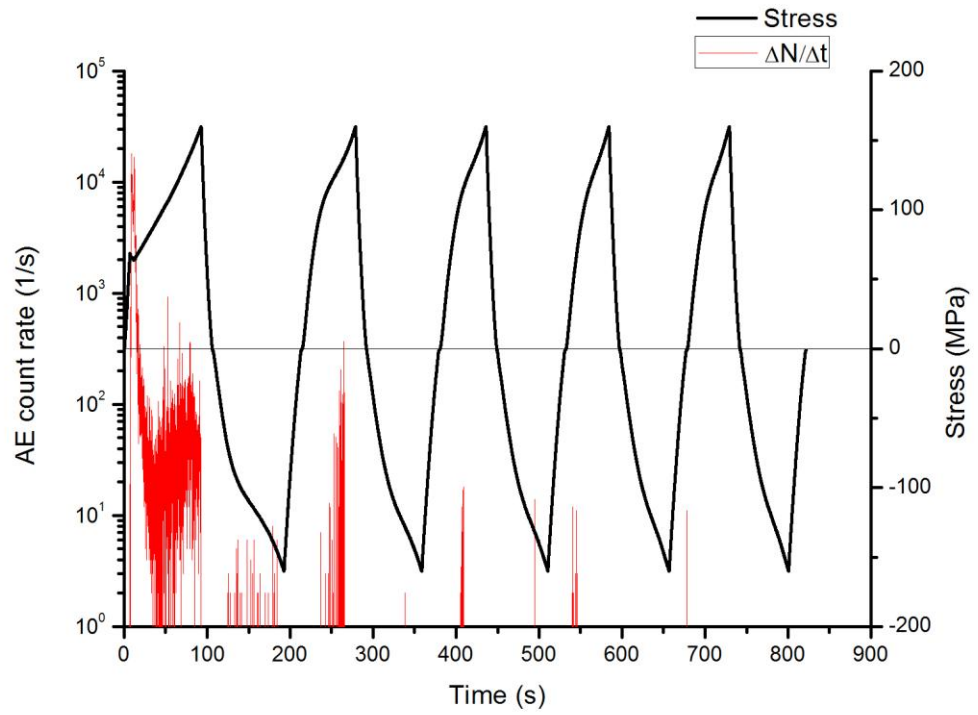


Do grafu na Obr. 3. 14. jsou vyneseny tahové pŮlcykly pro slitinu ZE10, která byla pŮreddeformována v tlakovém pŮlcyklu (do 80, 160 a 200 MPa). Tahové napětí je vyneseno na kladnou osu v závislosti na relativním prodloužení. Čím vyšší byla tlaková pŮreddeformace, tím vyšší je dosažení maximální napětí v tahu. Při použití pŮreddeformace do 80 MPa má deformační křivka v tahovém pŮlcyklu tvar, který je typický pro tahové zkoušky. Při použití vyšší pŮreddeformace mají deformační křivky tzv. S-tvar, který je charakteristický pro tlakové zkoušky u extrudovaných Mg slitinách.



*Obr. 3. 14. Tahové pŮlcykly deformačních křivek slitiny ZE10 po kompresi na různé hodnoty napětí*

Na Obr. 3. 15. je znázorněno cyklický test slitiny ZE10. Vzorek byl pŮtkrát cyklicky deformován, nejdřív v tlaku (kladná hodnota napětí) do 160 MPa a posléze v tahu (záporná hodnota napětí) do 160 MPa. Se vzrŮstajícím počtem cyklŮ vzrŮstala i hodnota meze kluzu. Počet signálŮ AE jak v tlakovém tak v tahovém pŮlcyklu klesá s rostoucím počtem cyklŮ. Nejvyšší aktivita AE byla detekovaná na makroskopickém mezi kluzu v prvním tlakovém pŮlcyklu. V tomto pŮlcyklu byly pozorovány dvě maxima detekovaných signálŮ AE, v dalších tlakových pŮlcyklech už jenom na mezi kluzu.



Obr. 3. 15. Cyklický test slitiny ZE10 spojená se záznamem akustické emise

## 4. Diskuze

Porovnáním mikrostruktur na Obr. 3.1. a 3.2. je patrný vliv chemického složení a extruzních parametrů (rychlosti extruze) na výslednou mikrostrukturu Mg slitin. Bylo pozorováno v [17, 18], že zirkonium (Zr) účinně snižuje velikost zrn v Mg slitinách bez příměsi Al, a proto menší zrna v ZEK100 ve srovnání se ZE10 je možné přičíst na vrub přítomnosti Zr ve slitině. Rychlost extruze taktéž ovlivňuje velikost zrn, přičemž při nižší rychlosti vznikne jemnější struktura, která je však méně homogenní než při vyšší rychlosti extruze.

Výsledky deformačních testů jsou v souladu s pozorováním mikrostruktury. Vyšší hodnoty deformačních napětí v ZEK100 než v slitině ZE10 lze vysvětlit Hallovým-Petchovým vztahem [4]:

$$\sigma_{\varepsilon} = \sigma_{\varepsilon_0} + K_{\varepsilon} d^{-1/2}, \quad (1)$$

kde  $\sigma_{\varepsilon_0}$  je napětí nutné pro pohyb dislokace,  $K$  je materiálová konstanta (tzv. Hallův-Petchův parametr) a  $d$  je průměrná velikost zrna.

Největší aktivita AE při deformaci v tahu je detekována pro slitinu ZE10, která má největší zrna. Bylo prokázáno [19], že velikost zrn má vliv na aktivitu AE, kde četnost AE klesá s klesající průměrnou velikostí zrn. To je možné vysvětlit tím, že ve hrubozrnných strukturách je velká volná dráha pro kolektivní pohyb dislokací, zatímco v jemnozrnných materiálech je vyšší podíl hranic zrn, které tvoří překážky pro pohyb dislokací.

Kromě velikosti zrn, významným faktorem ovlivňujícím mechanické vlastnosti a potažmo i AE je přednostní orientace zrn (textura). Texturním měřením, prezentovaným ve formě inverzních pólových obrazců (Obr. 2.1.), byla u všech studovaných Mg slitin zjištěna silná textura s uspořádáním basálních rovin (0001) téměř rovnoběžně se směrem extruze. Tato přednostní orientace v kombinaci s podmínkami aktivace jednotlivých skluzových mechanismů v hcp mřížce Mg způsobuje, že při deformaci v tlaku je ke kompaktní plastické deformaci zapotřebí dvojčatění. Při dvojčatění dochází k překlopení bazálních rovin o úhel  $86^\circ$  vůči jejich původní poloze, což umožňuje pokračování dislokačního skluzu v těchto bazálních rovinách. Při tahovém zatížení dvojčatění téměř nepřispívá k celkové deformaci [20].

Při tahových zkouškách se maximum AE na počátku plastické deformace obvykle vysvětluje masivní multiplikací dislokací, které následně vytváří tzv. dislokační les (forest dislocations) a dochází k poklesu AE.

V kompresním testu extrudovaných Mg slitin je dvojčatění, jakožto vynikající zdroj AE [19], zodpovědné za silnou AE. Dvojčatění přispívá ke zvyšování hustoty dislokací, což se projevuje zpevněním materiálu. Snižování aktivity AE je způsobené poklesem intenzity dvojčatění, zvyšující se hustotou dislokací v jednotlivých skluzových systémech, jejich vzájemnou interakcí, čímž se snižuje volná dráha pro jejich pohyb [9].

U tlakových zkoušek ZEK100 byla detekována větší aktivita AE pro nižší extruzní rychlost, čili pro jemnozrnnější slitinu, což není v souladu s předchozími pozorováními [19, 21, 22]. To může být způsobené tím, že tato slitina není plně rekrystalizovaná a v její mikrostruktuře zůstává i několik velikých zrn, ve kterých mohou vznikat větší dvojčata (silnější AE) a proto i navzdory menší průměrné velikosti zrn vykazují vyšší AE než slitina ZEK100 připravená s vyšší rychlostí extruze.

Dvě maxima AE byly pozorovány u obou slitin ZEK100, které mají nehomogenní mikrostruktury s různými velikostmi zrn. Obdobné průběhy AE byly pozorovány v extrudované slitině AZ31 [23]. Pomocí EBSD (Electron Back-Scattered Diffraction, difrakce zpětně odražených elektronů) bylo prokázáno, že aktivace dvojčatění závisí na velikosti zrn. Nejdřív vznikají dvojčata ve větších zrnech a s postupující plastickou deformací dochází ke dvojčatění i v menších zrnech.

Velká asymetrie v hodnotách napětí na mezi kluzu (YS) je výsledkem hcp mřížky a silné deformační textury vzniklé při procesu extruze. Je-li tlakové napětí aplikováno ve směru extruze, dochází ke tvorbě dvojčat, čehož projevem je nízká hodnota napětí na mezi kluzu [24]. Dvojčatění se tedy může aktivovat buď při tlakovém namáhání ve směru rovnoběžném s bazálními rovinami, nebo v tahovém namáhání ve směru kolmém na bazální roviny [25]. Z Obr. 3. 11. je zjevné, že slitina ZE10 má nejnižší hodnoty napětí a taktéž i nejnižší tahově-tlakovou asymetrií na YS v porovnání se ZEK100. Bylo prokázáno, že zjemněním zrna v Mg slitinách lze docílit snížení tahově-tlakové asymetrie na YS v důsledku redukce vlivu dvojčatění na celkovou deformaci [26]. V našem případě však vychází, že asymetrie vzrůstá s klesající velikostí zrna. Toto je možné vysvětlit pomocí nehomogenity

mikrostruktury. Slitina ZE10 má homogenní strukturu a největší průměrnou velikost zrn ze všech slitin. Podle Hallova-Petchova vztahu má tedy i nejnižší hodnoty napětí na YS. Naproti tomu slitiny ZEK100 mají nehomogenní strukturu s výskytem velkých, protáhlých zrn ve směru extruze. Průměrná velikost zrn je nižší než u ZE10, čehož důkazem jsou vyšší hodnoty YS pro oba módy zatěžování. Nehomogenita mikrostruktury způsobuje, že při deformaci v tlaku dochází nejdříve k dvojčatění v největších zrnech a proto jsou hodnoty YS nižší než by byly naměřeny v homogenních slitinách se stejnou průměrnou velikostí zrn.

Na rozdíl od ZE10, u slitiny ZEK100 při nízko cyklických testů v tahovém půlcyklu nebyla detekována žádná aktivita AE. Příčina absence AE může být v jemnozrnné struktuře a předchozí deformaci v tlaku. V důsledku malých zrn nemají dislokace velký prostor k pohybu, protože hranice zrn se chovají jako překážky. U slitiny ZE10 je detekována dost silná aktivita AE i v tahovém půlcyklu, což indikuje kolektivní pohyb dislokací a vznik nových dvojčat. V tahovém půlcyklu je možné u extrudovaných Mg slitin pozorovat i další jev tzv. detwinning, čili zanikání dvojčat, která vznikly v tlakovém půlcyklu [27]. Princip spočívá v tom, že mřížka se v opačném módu zatížení překlopí nazpět do původního stavu a tak dvojče zanikne. AE vzniká jen v důsledku nukleace dvojčat, protože jejich růst nebo „detwinning“ jsou pomalé procesy, neprodukují žádnou AE.

Z Obr. 3. 14. je patrné, že čím vyšší je počáteční napětí v tlaku, tj. existuje více dvojčat v mikrostruktuře, tím více se deformační křivky v následném tahovém půlcyklu podobají tlakovým křivkám s charakteristickým S-tvarem. Při tlakovém půlcyklu se vytvoří dvojčata, které v důsledku změny zatížení mohou během tahového namáhání zanikat, aby byla zachována kompatibilita plastické deformace.

Bylo prokázáno, že napětí, které je požadováno, pro nukleace nových dvojčat je vyšší, než je napětí potřebné pro „pohyb“ dvojčete, tj. zvětšení nebo zmenšení hranice dvojčat [28]. Z toho vyplývá, že untwinning, tj. zkracování stávajících dvojčat a re-orientace na původní orientaci mateřského zrna, má přednost před nukleací a růstem nových dvojčat. Jelikož AE vzniká jenom při nukleace dvojčat, je zřejmé, proč není detekována žádná aktivita v tahových půlcyklech.

Z cyklového namáhání slitiny ZE10 je patrné, že signál AE klesá s rostoucím počtem cyklů. Absence AE v pátém cyklu ukazuje na velké deformační zpevnění a nasycení počtu dvojčat.

## 6. Závěr

Změna rychlosti extruze vede ke značným změnám v mikrostruktuře slitiny ZEK100. S rostoucí rychlostí extruze mikrostruktura téměř překrystalizuje a stává se homogenní. Přítomnost Zr ve slitině ZEK100 přispívá ke stabilizaci mikrostruktury slitiny a vede k jemnozrnnější struktuře v porovnání se slitinou ZE10. Na základě texturních měření dodaných z Německa a naměřenými výsledky pomocí AE vyplývá, že v důsledku přednostní orientace, kdy bazální roviny jsou téměř rovnoběžné se směrem extruze, dochází přednostně k dvojčatění při deformaci v tlaku.

Pomocí měření AE byla pozorována závislost aktivace dvojčat na velikosti zrn při deformaci v tlaku. Dvě maxima AE pozorována u obou slitin ZEK100 s nehomogenní mikrostrukturou je možné vysvětlit právě touto závislostí. Prvé maximum AE souvisí s makroskopickou mezí kluzu, kde dochází k masivní multiplikaci dislokací a tvorbě dvojčat. Druhé maximum AE je způsobeno dvojčatěním, protože nejdřív vznikají dvojčata ve větších zrnech a s postupující plastickou deformací dochází ke dvojčatění i v menších zrnech.

Dále byla pozorována tahově-tlaková asymetrie na mezi kluzu. Bylo zjištěno, že se snižováním středné velikosti zrn se u slitiny ZEK100 zvyšuje hodnota asymetrie, což je v protikladu s dosud publikovanými výsledky získanými na Mg slitinách. Toto neobvyklé chování je nutno přičíst k nehomogenitě mikrostruktury, kdy stanovením středné velikosti zrn se nezíská odpovídající parametr pro charakterizaci nehomogenních mikrostruktur. Jak již bylo spomenuto výše, nehomogenní mikrostruktura výrazně ovlivňuje aktivaci dvojčat, čehož projevem je i změna mechanických vlastností dané Mg slitiny. Vyšší aktivita dvojčat vede k nižším hodnotám meze kluzu.

V průběhu nízko cyklických deformací byla pozorována odlišná aktivita AE pro slitiny ZE10 a ZEK100. U ZE10 byla detekována aktivita AE během tahového půlcyklu, zatímco u ZEK100 nebyla zaznamenána žádná AE.

Pro slitinu ZE10 byly porovnávány křivky tahových půlcyklů různě tlakově předdeformovaných vzorků. Čím více je materiál předdeformovaný v tlaku, tím více se tahová deformační křivka podobá té tlakové s jejím charakteristickým S-tvarem. Je to způsobeno tzv. detwinning procesem, kdy v průběhu tahového půlcyklu, který následuje po tlakové deformaci, dochází v důsledku změny vnějšího zatížení k překlopení mřížky do původního stavu a k zániku deformačního dvojčete.

## Možnosti dalšího výzkumu

Z doposud získaných výsledků je možné navrhnout vhodnou rychlost extruze, která povede k získání jemnozrné a zároveň homogenní mikrostruktury s požadovanými mechanickými vlastnostmi.

Naměřený kontinuální záznam AE umožňuje další zpracování pomocí parametrizace signálů AE, za účelem rozlišení dislokačního skluzu od mechanického dvojčatění, které by mohlo vést k stanovení podmínek aktivace nežádoucího dvojčatění v Mg slitinách.

Dále pak statistickým zpracováním získaných parametrů AE (např. velikost amplitudy nebo energie emisních událostí) lze studovat dislokační dynamiku při plastické deformaci.

## Seznam použité literatury

- [1] [http://kdf.mff.cuni.cz/~koudelkova/U3V/Drozd\\_horcik.pdf](http://kdf.mff.cuni.cz/~koudelkova/U3V/Drozd_horcik.pdf) (stav ke dni 20. 5. 2013).
- [2] J. Kaiser: *Dr. – Ing. Dissertation: Untersuchung über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch, TU München (1950).*
- [3] K. Máthis: *Doktori értekezés: Deformációs mechanizmusok magnézium alapú könnyűfém ötvözetekben, ELTE, Általános Fizika Tanszék (2004).*
- [4] P. Kratochvíl, P. Lukáč, B. Sprušil: *Úvod do fyziky kovů I., Praha (1984).*
- [5] <http://www.intechopen.com/source/html/32760/media/image19.jpeg> (stav ke dni 20. 5. 2013).
- [6] R. von Mises: *Mechanik der plastischen Formaenderung von Kristallen, Z. Angew. Math. Mech., 6 (1928) 85.*
- [7] R. L. Bell, R. W. Cahn: *The Dynamics of Twinning and the Interrelation of Slip and Twinning in Zinc Crystals, Proc. Rpy. Soc. 239 (1957) 494.*
- [8] [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm) (stav ke dni 20. 5. 2013).
- [9] P. Dobroň: *Doktorská dizertačná práca: Štúdium mechanických a fyzikálnych vlastností nových, konštrukčných materiálov na báze horčíka metódou akustickej emisie, MFF UK (2007).*
- [10] <http://www.fzs.tu-berlin.de/lib/html/en/> (stav ke dni 20. 5. 2013).
- [11] *Akustická emise – Metodické pokyny, Smernica celoštátneho defektoskopického strediska, Brno (1987).*
- [12] *Zkoušení materiálů a výrobků metodou akustické emise – Názvosloví, Smernica celoštátneho defektoskopického strediska (1987).*
- [13] J. Xu, E.-H. Han, X. Wu: *Acoustic emission response of 304 stainless steel during constant load test in high temperature aqueous environment, Corros. Sci. 63 (2012)91.*
- [14] B. Legros, P.-X. Thivel, Y. Bultel, M. Boinet, R.P. Nogueira: *Acoustic emission: Towards a real-time diagnosis technique for Proton Exchange Membrane Fuel Cell operation, J. Power Sources 195/24 (2010) 8124.*
- [15] <http://www.dakel.cz/index.php?pg=prod/sens/micro> (stav ke dni 20. 5. 2013).
- [16] <http://www.dakel.cz/index.php?pg=prod/dev/ipl> (stav ke dni 20. 5. 2013).



- [17] D. H. StJohn, M. Qian, M. A. Easton, P. Cao, Z. Hildebrand: *Grain Refinement of Magnesium Alloys*, *Metall. Mater. Trans A* 36 (2005) 1669.
- [18] M. Qian, A. Das: *Grain refinement of magnesium alloys by zirconium: Formation of equiaxed grains*, *Scripta Mater.* 54 (2006) 881.
- [19] C. R. Heiple, S. H. Carpenter: *Acoustic Emission Produced by Deformation of Metals and Alloys – A Review: Part I*, *J. Acoust. Emission* 6 (1987) 177.
- [20] I. J. Polmear: *Light Alloys*, Melbourne (2006).
- [21] C. R. Heiple, S. H. Carpenter: *Acoustic Emission Produced by Deformation of Metals and Alloys – A Review: Part II*, *J. Acoust. Emission* 6 (1987) 215.
- [22] J. Bohlen, P. Dobroň, J. Swiostek, D. Letzig, F. Chmelík, P. Lukáč, K. U. Kainer: *On the influence of the grain size and solute content on the AE response of magnesium alloys tested in tension and compression*, *Mater. Sci. Eng. A* 462 (2007) 302.
- [23] P. Dobroň, F. Chmelík, S. Yi, K. Parfenenko, D. Letzig, J. Bohlen: *Grain size effects on deformation twinning in an extruded magnesium alloy tested in compression*, *Scripta Mater.* 65 (2011) 424.
- [24] P. Dobroň, F. Chmelík, K. Parfenenko, D. Letzig, J. Bohlen: *On the Effect of the Extrusion Speed on Microstructure and Plastic Deformation of ZE10 and ZEK100 Magnesium Alloys - an Acoustic Emission Study*, *Acta Phys. Pol. A* 122/3 (2012) 593.
- [25] W. F. Hosford: *The Mechanics of Crystals and Textured Polycrystals*, Oxford University Press, Oxford (1993).
- [26] J. Jain, W. J. Poole, C. W. Sinclair, M. A. Gharghour: *Reducing the tension–compression yield asymmetry in a Mg–8Al–0.5Zn alloy via precipitation*, *Scripta Mater.* 62 (2010) 301.
- [27] Y.N. Wang, J.C. Huang: *The role of twinning and untwinning in yielding behavior in hot-extruded Mg–Al–Zn alloy*, *Acta Mater.* 55 (2007) 897.
- [28] R. E. Reed Hill, R. Abbaschian, *Physical Metallurgy Principles*, PWS Publ. Company, Boston (1994).

## Seznam obrázků

1.1. Hranová a šroubová dislokace .....	4
1.2. Základní skluzové roviny v hexagonálních kovech .....	5
1.3. Hexagonální mřížka .....	5
1.4. Rovina dvojčatní .....	6
1.5. Princip dopředného (hydrostatic) a zpětného (indirect) extrudování.....	7
1.6. Nespojité a spojitá AE.....	9
1.7. Charakterizace nespojitě AE .....	9
2.1. Textura slitin .....	11
2.2. Schéma aparatury INSTRON® .....	12
2.3. Měřicí zařízení DAKEL-IPL.....	13
2.4. MICRO snímač .....	13
3.1. Mikrostruktura slitiny ZE10, extruzní rychlost 11 mm/s.....	14
3.2. Mikrostruktura slitiny ZEK100, extruzní rychlost a) 0,5 mm/s, b) 11 mm/s .....	14
3.3. Tahová zkouška slitiny ZE10 spojená se záznamem akustické emise....	15
3.4. Tahová zkouška slitiny ZEK100, extrudovaná rychlostí 0,5 mm/s, spojená se záznamem akustické emise.....	16
3.5. Tahová zkouška slitiny ZEK100, extrudovaná rychlostí 11 mm/s, spojená se záznamem akustické emise.....	16
3.6. Tlaková zkouška slitiny ZE10 spojená se záznamem akustické emise...	17
3.7. Tlaková zkouška slitiny ZEK100, extrudovaná rychlostí 0,5 mm/s, spojená se záznamem akustické emise.....	18
3.8. Tlaková zkouška slitiny ZEK100, extrudovaná rychlostí 11 mm/s, spojená se záznamem akustické emise.....	18
3.9. Mikrostruktura slitiny ZE10 po deformaci v tlaku .....	19
3.10. Tahová-tlaková asymetrie na mezi kluzu.....	19
3.11. Tahová-tlaková zkouška slitiny ZE10 spojená se záznamem akustické emise .....	20
3.12. Tahová-tlaková zkouška slitiny ZEK100, extrudovaná rychlostí 0,5 mm/s, spojená se záznamem akustické emise.....	21
3.13. Tahová-tlaková zkouška slitiny ZEK100, extrudovaná rychlostí	

11 mm/s, spojená se záznamem akustické emise.....	21
3.14. Tahové půlcykly deformačních křivek slitiny ZE10 po kompresi na různé hodnoty napětí .....	22
3.15. Cyklický test slitiny ZE10 spojená se záznamem akustické emise .....	23

## Seznam použitých zkratek a symbolů

AE ..... akustická emise

Al ..... hliník

CRSS ..... critical resolved shear stress, kritické skluzové napětí

d ..... velikost zrna

hcp ..... hexagonal close packed, hexagonální nejtěsnější uspořádání

K ..... materiálová konstanta

Mg ..... hořčík

RE ..... kovy vzácných zemin

RT ..... room temperature, pokojová teplota

YS ..... yield strength, mez kluzu

Zn ..... zinek

Zr ..... zirkonium

$\sigma_{\epsilon 0}$  ..... napětí nezbytné pro pohyb dislokace