

Univerzita Karlova v Praze  
Matematicko-fyzikální fakulta

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**



Jan Čapek

### **Vliv mikrostrukturních parametrů na mechanické vlastnosti polykrystalického hořčíku**

Katedra fyziky materiálů

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Kristián Máthis, Ph.D.,  
Katedra fyziky materiálů

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2011

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří se podíleli na vzniku této práce. Největší dík patří vedoucímu práce RNDr. Kristianu Máthisovi, Ph.D. za pečlivé vedení a pomoc při vzniku této práce. Dále bych chtěl poděkovat paní Martě Čepové a Ing. Janě Kálalové za pomoc s přípravou vzorků.

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 v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne

Jan Čapek

Název práce: Vliv mikrostrukturních parametrů na mechanické vlastnosti  
polykrystalického hořčíku

Autor: Jan Čapek

Katedra: Katedra fyziky materiálů

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Kristian Máthis, Ph.D., Katedra fyziky materiálů

Abstrakt: Předložená práce se zabývá studiem deformace vzorků čistého hořčíku s různými velikostmi zrna v závislosti na teplotě a způsobu deformace. Deformace v tahu a tlaku jsou prováděny na 3 různých vzorcích lišících se velikostí zrna při teplotách od 20°C do 300°C. Rychlost deformace je 1,8 mm/min. Během deformačních zkoušek snímáme záznam akustické emise. Struktura deformovaných vzorků je dále zkoumána pomocí optické mikroskopie. Práce je zaměřena na úlohu dvojčatění během deformace při různých teplotách. Dále je zkoumána asymetrie mezi deformací v tahu a v tlaku.

Klíčová slova: dvojčatění, hořčík, deformace hexagonálních kovů, akustická emise

Title: Dependence of mechanical properties of polycrystalline magnesium on  
microstructural parameters

Author: Jan Čapek

Department: Department of Physics of Materials

Supervisor: RNDr. Kristian Máthis, Ph.D., Department of Physics of Materials

Abstract: The deformation of commercially pure magnesium with various grain size in different temperatures is investigated in the present work. Compression and tensile test were done on three different samples in temperature range of 20°C-300°C. Samples are deformed at strain rate of 1,8 mm/min. Simultaneously, the acoustic emission is recorded. The microstructure of the deformed material is also studied by means of optical microscopy. We focus on twinning activity at various temperatures and asymmetry between tensile and compression deformation.

Keywords: twinning, magnesium, deformation of hexagonal metals, acoustic emission

# Obsah

---

## Obsah

1. Úvod.....	1
2. Použitý materiál a jeho vlastnosti .....	3
2.1. Plastická deformace hexagonálních kovů.....	3
2.2. Použitý materiál .....	6
3. Cíle práce a použité metody.....	7
3.1. Cíle bakalářské práce.....	7
3.2. Experimentální metody.....	7
3.2.1. Deformační zkoušky .....	7
3.2.2. Akustická emise .....	8
3.2.3. Optická mikroskopie.....	9
4. Výsledky měření a diskuse .....	10
4.1. Výchozí stav materiálu .....	10
4.2. Výsledky měření .....	11
4.2.1. Deformace při pokojové teplotě.....	11
4.2.2. Deformace v závislosti na teplotě.....	12
4.2.3. Deformace v závislosti na velikosti zrna .....	18
5. Závěr .....	21
5.1. Shrnutí výsledků.....	21
5.2. Náměty pro další práci .....	21
6. Literatura .....	22

## 1. Úvod

V dnešní době se klade velký důraz na zvyšování kvality přístrojů a zařízení, což klade vyšší nároky na použité materiály. Dalším důležitým faktorem v dnešní době je ochrana životního prostředí, především snižování spotřeby paliv a produkce emisí. V automobilové a letecké dopravě toho lze dosáhnout snížením hmotnosti.

Slitiny na bázi hořčíku jsou jedny z nejlhčích konstrukčních materiálů, mají vysokou specifickou pevnost (poměr pevnosti a hustoty), dobré tlumící vlastnosti, velkou tepelnou vodivost a další vlastnosti, které jsou vhodné pro použití například v automobilovém a leteckém průmyslu.

Další vlastnosti výhodné pro použití v průmyslu jsou dostupnost, energetická nenáročnost výroby a snadná recyklovatelnost. Hořčík tvoří kolem 2% zemské kůry, což ho řadí na 6. místo podle výskytu prvků. Hořčík se ze zemské kůry získává těžbou magnezitu a dolomitu. Nicméně v největším množství se získává z mořské vody, kde je jeho koncentrace 1,35 g/l [1].

Prvním významným použitím hořčíku bylo v roce 1936 použití slitiny AS21 pro VW brouk. Další nárůst v použití hořčíku nastal v 50. letech s objevem tlakového lití, díky kterému byly odstraněny problémy s neefektivností výroby [2]. S rostoucími nároky na vlastnosti použitých materiálů, zejména rozšířením vodou chlazených motorů, docházelo k postupnému snižování použití hořčíkových slitin. Hlavní překážkou v širším používání hořčíkových slitin je omezená tažnost, špatná tvarovatelnost při běžných teplotách, slabá odolnost proti korozi a změna mechanických vlastností, například nižší pevnost, při teplotách nad 200°C.

Další rozvoj v použití hořčíku nastává v 90. letech, kdy byly zpřísněny limity na produkci emisí a spotřebu paliva. Na významu nabývají materiály s vysokým poměrem pevnosti k hustotě.

Omezená tažnost hořčíku je způsobena jeho hexagonální strukturou s těsným uspořádáním. Deformační procesy hexagonálních kovů ještě nejsou zcela objasněny, proto je jím věnována velká pozornost. Jeden z důležitých parametrů ovlivňujících deformační procesy je poměr krystalografických os  $c/a$ , který je v ideálním případě roven  $\sqrt{8/3}$ , což hořčík velmi dobře splňuje.

# Úvod

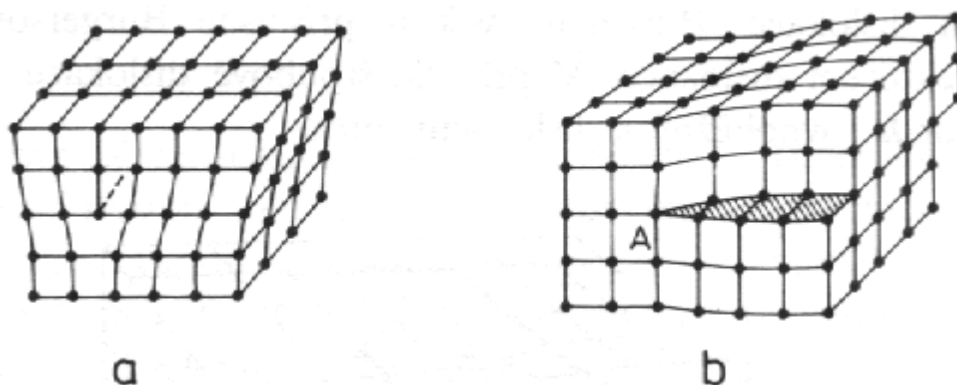
---

Cílem této práce je prostudovat základní deformační mechanismy v čistém hořčíku v závislosti na způsobu namáhání, deformační teplotě a mikrostrukturách parametrech.

## 2. Použitý materiál a jeho vlastnosti

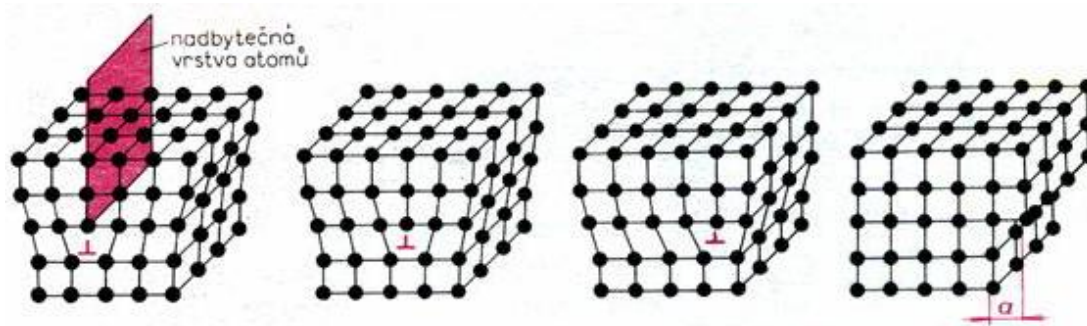
### 2.1. Plastická deformace hexagonálních kovů.

Pro průběh plastické deformace jsou důležité poruchy krystalové mřížky, zejména pak dislokace. Dislokace je čárová porucha, narušuje tedy pravidelnou strukturu krystalu podél určité čáry a tvoří rozhraní mezi nedeformovanou a deformovanou částí krystalu. Rozlišujeme dva základní typy *hranovou dislokaci* (obr. 1.1a) a *šroubovou dislokaci* (obr. 1.1b). *Směšené dislokace* mají charakter obou typů.



Obr. 1.1 a) hranová dislokace, b) šroubová dislokace

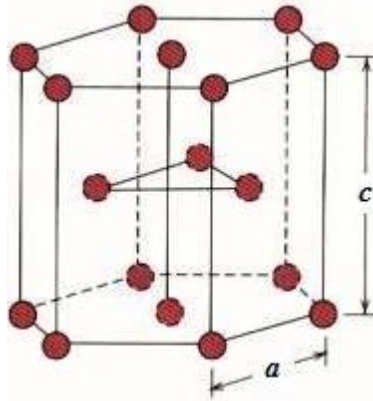
Šroubovou dislokaci si můžeme představit tak, že krystal nařízeme a posuneme rovnoběžně s dislokační čarou. Hranová dislokace v prosté kubické mříži představuje konec vložené poloroviny atomů do pravidelné krystalové mřížky. Během plastické deformace dochází k pohybu (obr. 1.2) a vzniku dislokací.



Obr. 1.2 pohyb hranové dislokace krystalem

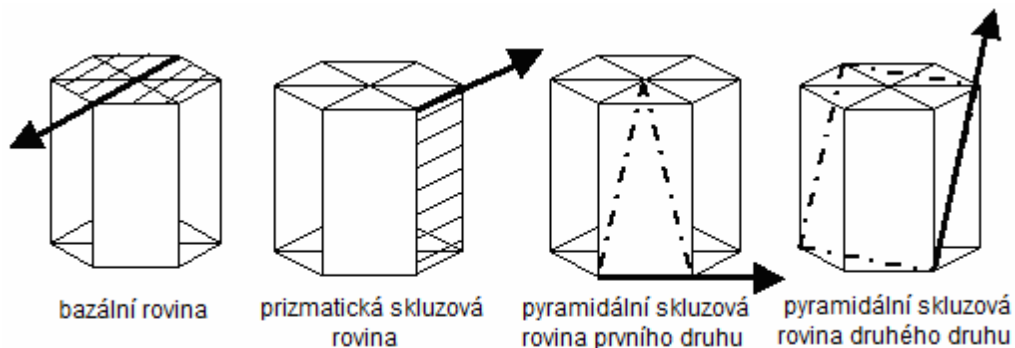
Ke skluzu dochází ve směrech a rovinách s nejhustěji obsazenými atomy a to tam, kde působí největší skluzové napětí. Aby mohlo dojít ke skluzu, musí skluzové napětí  $\tau$  dosáhnout určité hodnoty. Dle Schmidtova zákona je tato hodnota nezávislá na vnějším tahovém napětí, ale závisí na orientaci skluzového systému vůči působící síle [3].





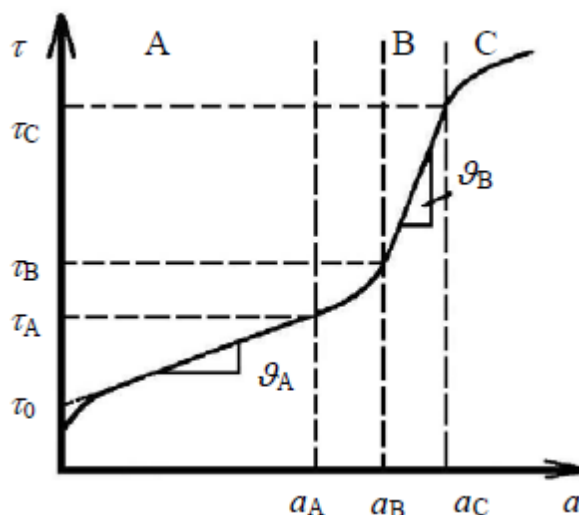
**Obr. 1.3** Hexagonální mřížka s nejtěsnějším uspořádáním

U kovů s hexagonální mřížkou (obr. 1.3) je nejhustěji obsazená rovina (0001), nazývá se bazální, a skluz probíhá ve směrech  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ . Dalšími skluzovými systémy jsou prizmatické skluzové roviny  $\{10\bar{1}0\}$  ve směrech  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ , pyramidální roviny prvního druhu  $\{10\bar{1}1\}$  ve směrech  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  a pyramidální roviny druhého druhu  $\{10\bar{1}0\}$  ve směrech  $1/3 \langle 11\bar{2}3 \rangle$  (obr. 1.4).



**Obr. 1.4** Skluzové roviny hexagonálních kovů

Závislost skluzového napětí  $\tau$  na relativním posunutí monokrystalu s hexagonální mřížkou je znázorněn na obr. 1.5. Aby mohla deformace probíhat po celou dobu, musíme neustále zvyšovat skluzové napětí. Tento jev nazýváme zpevnění. Můžeme jí rozdělit do tří částí. V první části křivky, na obrázku označená jako část A, deformace probíhá snadno a koeficient zpevnění je malý. V části B dochází k prudkému nárůstu koeficientu zpevnění. Ve třetí části koeficient zpevnění klesá s rostoucím skluzem. Extrapolací lineární části křivky A dostaneme *kritické skluzové napětí*  $\tau_0$  [3].



**Obr 1.5** křivka zpevnění

Křivka zpevnění je velmi ovlivněna podmínkami pokusu. Mění se s teplotou nebo rychlostí deformace. Rovněž velmi závisí na orientaci monokrystalu vůči vnějšímu napětí. Kritické skluzové napětí je nejnižší, pokud vnější napětí působí ve směru spojnice  $[0001] - [11\bar{2}0]$  a ke skluzu dochází v bazální rovině. Pokud se úhel mezi směrem deformace a bazální rovinou blíží nule, je potřeba velkého působícího napětí, aby došlo ke skluzu. Může dojít k deformaci dvojčatěním nebo k aktivaci nebazálních skluzových rovin.

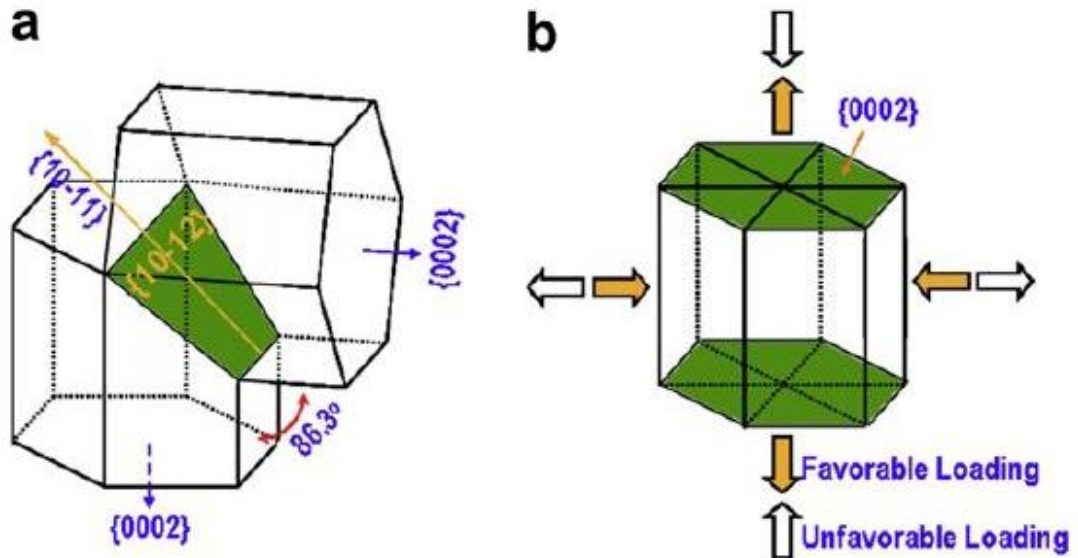
U polykrystalů je situace daleko složitější. Kromě mechanismů pozorovaných pro monokrystalu zde mají významnou roli hranice zrn a jejich velikost a vzájemná orientace.

Hexagonální mřížka nespĺňuje von Misesovo kritérium, které říká, že nutnou podmínkou pro libovolnou homogenní plastickou deformaci polykrystalu je existence 5 nezávislých skluzových systémů [4].

U hexagonální mřížky nejsnadnější skluz nastává v bazální rovině  $(0001)$ , skluz může rovněž nastat v prizmatických rovinách  $\{10\bar{1}0\}$  a pyramidálních rovinách  $\{10\bar{1}1\}$  se třemi směry:  $a_1 = \frac{1}{3}[\bar{1}\bar{1}20]$ ,  $a_2 = \frac{1}{3}[2\bar{1}\bar{1}0]$  a  $a_3 = \frac{1}{3}[\bar{1}2\bar{1}0]$ . Směry  $a$  jsou kolmé na osu  $c$ . Skluz ve směru  $a$  nemůže vytvořit napětí rovnoběžné s osou  $c$ . Musí tedy dojít k aktivaci dalšího nebazálního skluzového systému. Prizmatické a pyramidální skluzové roviny a dvojčatěním jsou potřebné pro deformaci polykrystalů Mg. Rovněž je velmi pravděpodobný skluz v pyramidálním systému druhého druhu

$\{11\bar{2}2\} \frac{1}{3} \langle 11\bar{2}3 \rangle$  [5]. K aktivaci pyramidální roviny druhého druhu dochází při teplotách přes 200°C.

Další způsob, kterým může nastat plastická deformace, je *dvojčatění* (obr. 1.6). Atomy se posunují nejen o celé meziatomové vzdálenosti, ale i o jejich zlomky. Po deformaci dvojčatěním vznikne v krystalu rovina, podle které jsou obě části krystalu v zrcadlové orientaci. Tuto rovinu nazýváme *rovina dvojčatění* [3].



Obr. 1.5 Dvojčatění

Vzhledem k tomu, že kritické skluzové napětí pro aktivaci pyramidálního skluzového systému  $\{11\bar{2}2\} \langle 11\bar{2}3 \rangle$  je mnohem vyšší než kritické skluzové napětí pro dvojčatění, do zhruba 200°C, plastických deformací se zúčastní dvojčata [6][7].

### 2.2. Použitý materiál

Deformační zkoušky byly prováděny na polykrystalickém hořčíku obsahujícím 0,04%, 0,15% a 0,35% Zr (dále Mg04, Mg15 a Mg35). Příměs zirkonia ovlivnila velikost zrna, jak bude uvedeno v kapitole 3.1.

U materiálu nebyla rentgenovou diffrakcí zjištěna žádná přednostní orientace zrn.

## 3. Cíle práce a použité metody

### 3.1. Cíle bakalářské práce

Hlavní cíle bakalářské práce jsou:

- Prozkoumat chování čistého hořčíku za různých teplot deformace
- Studovat průběh akustické emise během deformace
- Pozorovat rozdíl mezi deformací v tahu a tlaku
- Sledovat závislost velikosti zrna na mechanické vlastnosti
- Objasnit úlohu dvojčatění během deformace

### 3.2. Experimentální metody

#### 3.2.1. Deformační zkoušky

Na vzorcích hořčíku byly prováděny tahové a tlakové deformační zkoušky použitím aparatury INSTRON®. Měření probíhalo při pokojové teplotě a dále při teplotách 100°C, 200°C a 300°C při konstantní rychlosti přičnku 1,8 mm min<sup>-1</sup>. Pro ustálení teploty byl vzorek před měřením ponechán určitou dobu v peci. Tahové vzorky měly rozměry 30 × 5 × 5 mm, tlakové 30 × 15 × 15 mm (obr 2.1).



**Obr. 2.1** tahový vzorek a tlakový vzorek před deformací a po ní

V technické praxi se pro charakterizaci deformace používá křivka smluvního napětí  $\sigma_s$  na poměrném prodloužení  $e$ :

$$\sigma_s = \frac{F}{S_0} \quad (1.1)$$

$$e = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (1.2)$$

,  $S_0$  je počáteční průřez,  $l_0$  počáteční délka,  $l$  délka po deformaci a  $F$  působící síla. Tyto vzorce ovšem nepředpokládají změnu průřezu, ke které při plastické deformaci dochází. Pro vědecké účely se zavádí veličiny skutečné napětí  $\sigma$  a skutečná deformace  $\varepsilon$ , které předpokládají zachování objemu po dobu deformace:

## Cíle práce a použité metody

---

$$\sigma = \sigma_s(1 + e) \quad (1.3)$$

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (1.4)$$

Důležitými parametry závislosti  $\sigma$  na  $\varepsilon$  jsou  $\sigma_{02}$ , které udává skutečné napětí při hodnotě deformace  $\varepsilon = 0,002$ , maximální napětí  $\sigma_{max}$  a maximální skutečná deformace  $\varepsilon_{max}$ .

K deformaci polykrystalů, podobně jako u monokrystalů, dochází pohybem dislokací, které však narážejí na hranice zrn. Ty jsou důležité pro zpevnění polykrystalů. Tvoří překážky dislokacím a zároveň slouží jako jejich zdroje. Mez kluzu je nižší, pokud je rozdíl v orientaci sousedních zrn malý, a roste s narůstající desorientací.

Závislost síly na čase jsme přepočítali dle vzorců 1.3 a 1.4 na závislost  $\sigma$  na  $\varepsilon$ . Dále jsme určili napětí  $\sigma_{02}$  a  $\sigma_{max}$  a maximální skutečnou deformaci  $\varepsilon_{max}$ .

### 3.2.2. Akustická emise

*Akustická emise* je fyzikální jev, při kterém dojde k uvolnění části elastické energie (např. při vzniku a šíření trhliny), jenž se hromadí během deformace v určitých místech materiálu díky vnějším a vnitřním silám. Poté se šíří ve formě přechodových elastických vln na povrch materiálu, kde piezoelektrický snímač může zachytit jeho kolmou složku a transformovat na napěťový signál. Signál je následně zesílen a vyhodnocen.

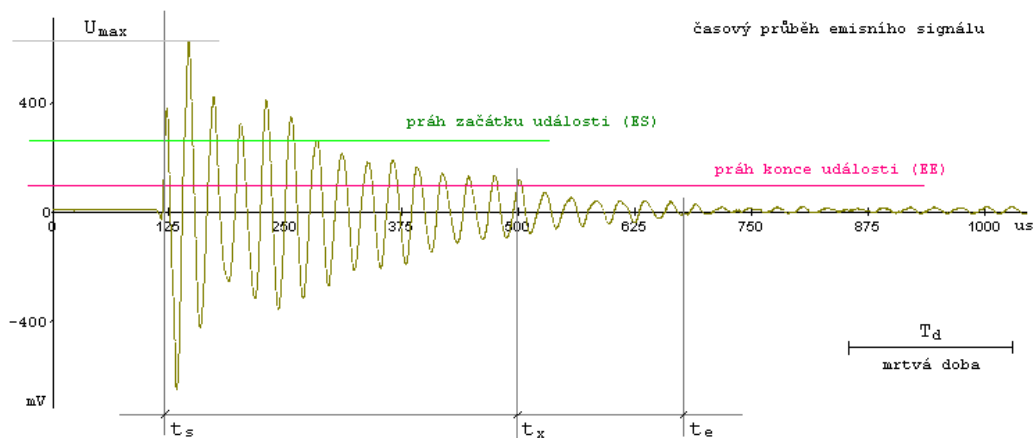
Akustická emise se využívá pro diagnostiku vzniku a vývoje poruch materiálu během mechanického, tepelného nebo korozního namáhání. Akustická emise detekuje pouze aktivní defekty materiálu. V našem případě se jedná především o vznik dvojčat.

Signál akustické emise je buď spojitý kdy hodnota po určitou dobu neklesne pod určitý práh nebo diskrétní a signál má charakter časově oddělených pulsů. Spojitý signál vydávají například pohybující se dislokace, diskrétní pak vznik a šíření trhlin nebo dvojčatění.

Při detekci spojitého signálu se vyhodnocuje počet překmitů přes 2 prahové úrovně *Count 1* a *Count 2* programem Daemon používaným při měření. U diskrétního signálu se hodnotí každá emisní událost zvlášť. Základní parametry aplikace jsou čas začátku emise  $t_s$ , kdy dojde k překmitu přes danou prahovou

## Cíle práce a použité metody

úroveň, *mrtvá doba* a konec emise  $t_e$ . Konec je okamžik, kdy po mrtvou dobu signál nepřekročil prahovou úroveň. *Doba emisní události* je  $t_e - t_s$ .



**Obr 2.2** Schématický obrázek akustické emise

Během měření byl používán systém Daemon s hardwarovou částí XEDO. Na začátku měření byly nastaveny parametry experimentu.

### 3.2.3. Optická mikroskopie

Pomocí optické mikroskopie jsme pozorovali mikrostrukturu základního stavu a deformovaných vzorků. Nejprve byl ze vzorku odříznut kus, velikostí vhodný k pozorování na optickém mikroskopu. Tento kus byl zalit pro jednodušší manipulaci.

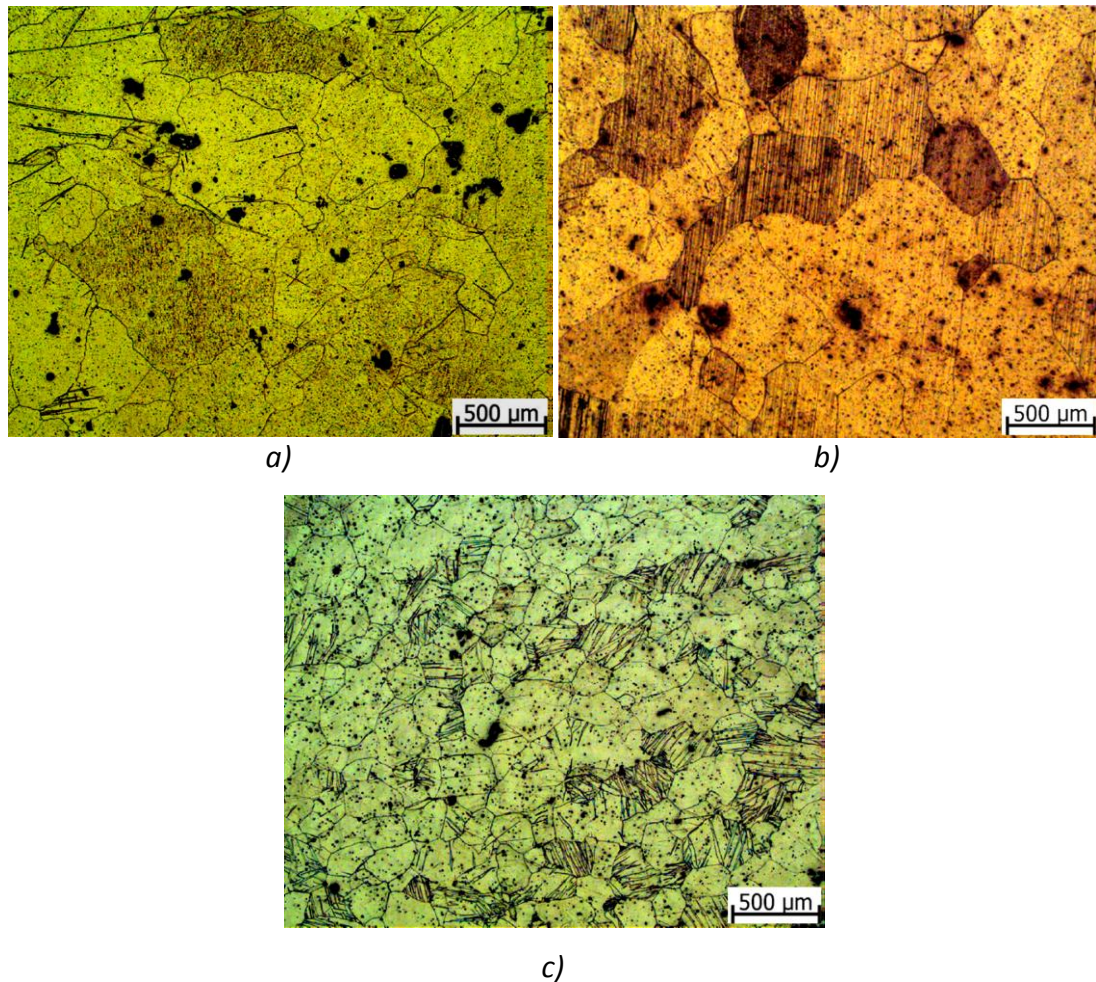
Ze vzorku byla nejprve odstraněna povrchová vrstva a rýhy způsobené opracováním na pile. Dále byly vzorky leštěny diamantovou pastou o velikosti zrna  $3 \mu m$  a následně ještě chemicky. Pro zvýraznění zrn pod mikroskopem byl vzorek naleptán 3% kyselinou octovou.

Obraz z mikroskopu OLYMPUS GX51 byl snímán připojenou kalibrovanou kamerou PIXELINE PL-A662. Snímky byly následně zpracovány na počítači programem LUCIA G. Ve stejném programu byla také pro vzorky v základním stavu spočtena průměrná velikost zrna  $d$  pomocí průsečíkové metody.

## 4. Výsledky měření a diskuse

### 4.1. Výchozí stav materiálu

Nedeformované vzorky byly upraveny pro pozorování optickým mikroskopem.



**Obr. 3.1** základní stav a)Mg04 b)Mg15 c)Mg35

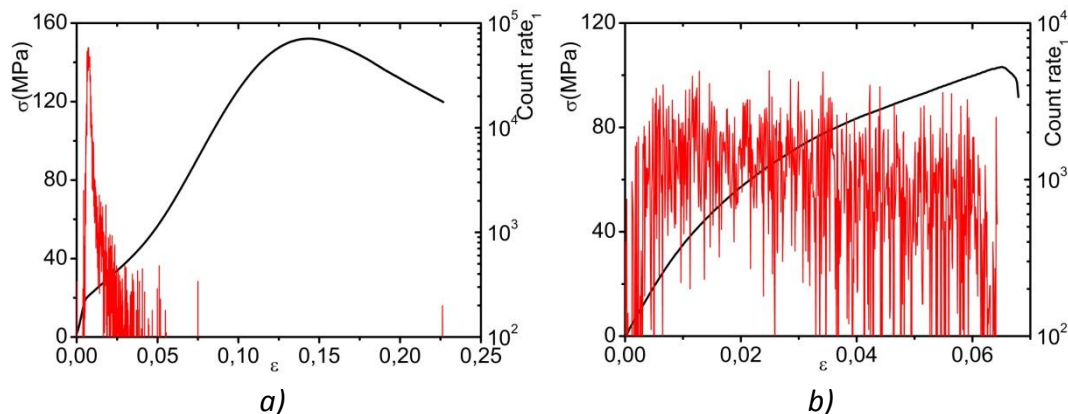
Již z obrázku je patrné, že s rostoucím množstvím přidaného zirkonia dochází ke zjemnění zrn. Rovněž je určitá patrná nerovnoměrnost velikosti v rámci jednoho vzorku. Objevují se zde rovněž dvojčata. Měření velikosti zrna jsme prováděli průsečkovou metodou. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.1

	Mg04	Mg15	Mg35
$d[\mu m]$	550	360	170

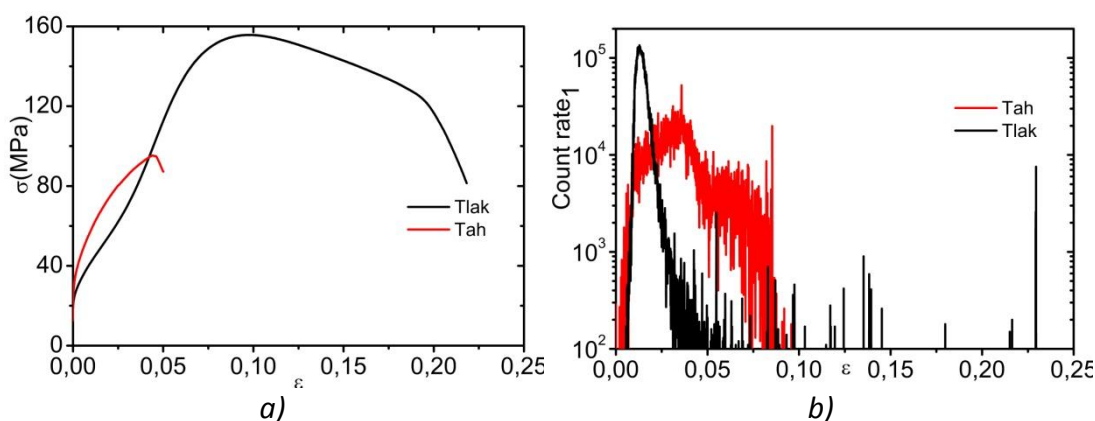
**Tabulka 3.1** Velikost zrna v základním stavu

## 4.2. Výsledky měření

### 4.2.1. Deformace při pokojové teplotě



**Obr. 3.2** křivka deformace a akustické emise Mg15 *a)* v tlaku *b)* v tahu



**Obr. 3.3** porovnání *a)* deformační křivky *b)* akustické emise Mg04 v tahu a tlaku

Z Obr. 3.2 a 3.3 je patrná výrazná asymetrie deformace v tahu a v tlaku. V tlaku můžeme pozorovat křivku ve tvaru S, tj. po oblasti s nižším koeficientem zpevnění při deformaci kolem 3% dochází k výraznějšímu zpevnění materiálu. Oproti tomu křivka deformace v tahu je po celou dobu konvexní. V pozadí rozdílného chování vzorků v tahu a tlaku stojí dvojčatění [8]. Během tahových zkoušek se aktivuje téměř výhradně dvojčatový systém  $\{10\bar{1}2\}\{10\bar{1}1\}$ , v tlaku byla pozorována aktivita dvojčat i v rovinách  $\{10\bar{1}1\}$  nebo  $\{10\bar{1}3\}$  [9].

Velmi výrazný je rovněž rozdíl v záznamu akustické emise. Během deformace v tahu je signál přibližně stejně intenzivní po celou dobu deformace, zatímco při deformaci v tlaku dosahuje signál maxima na počátku plastické deformace a poté se velmi rychle utlumí na téměř nulovou hodnotu.

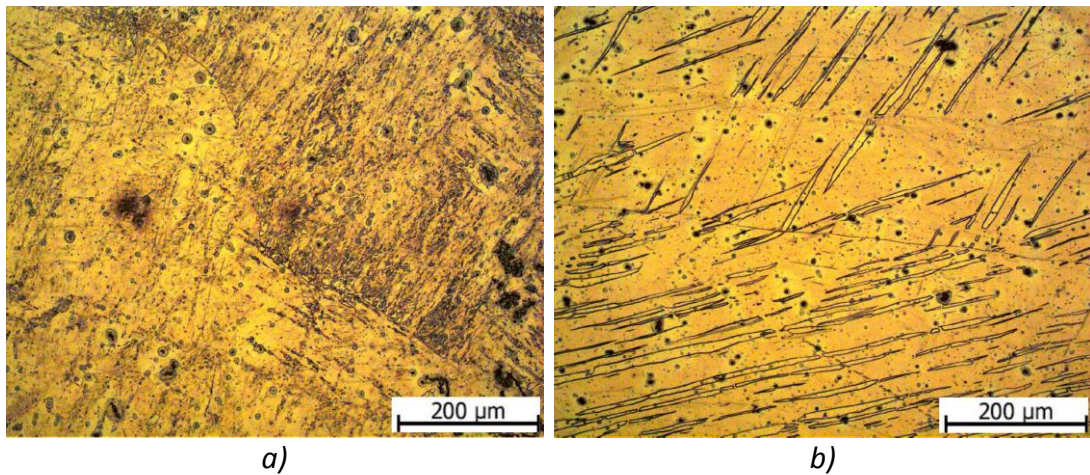
Maximum je spojeno s  $\{10\bar{1}2\}$  dvojčatěním, protože během tlakových experimentů je jejich aktivace jednodušší [9]. Nová dvojčata začnou růst a interakce



## Výsledky měření a diskuse

dislokací s hranicemi dvojčat způsobují zpevnění materiálu. Pokles signálu je způsoben tím, že AE je citlivá pouze na vznik dvojčat, nikoliv jejich růst [10].

Během tahových zkoušek rovněž dochází k aktivaci stejného dvojčatového systému. Vyžaduje ale vyšší napětí a je omezen jejich růst [9]. Proto je potřeba další tvorba dvojčat pro pokračování plastické deformace. Mikrostruktura deformovaného vzorku (Obr 3.4) podporuje předchozí úvahu.

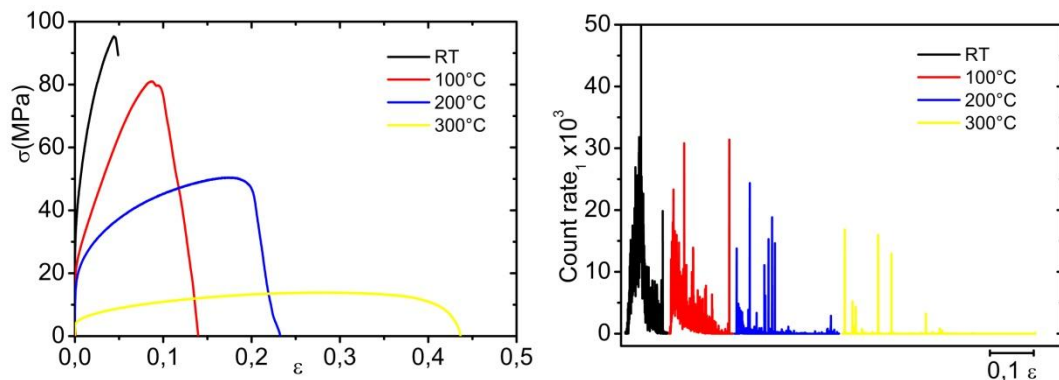


**Obr. 3.4** Mikrostruktura Mg15 po deformaci *a)* v tahu *b)* v tlaku při pokojové teplotě

### 4.2.2. Deformace v závislosti na teplotě

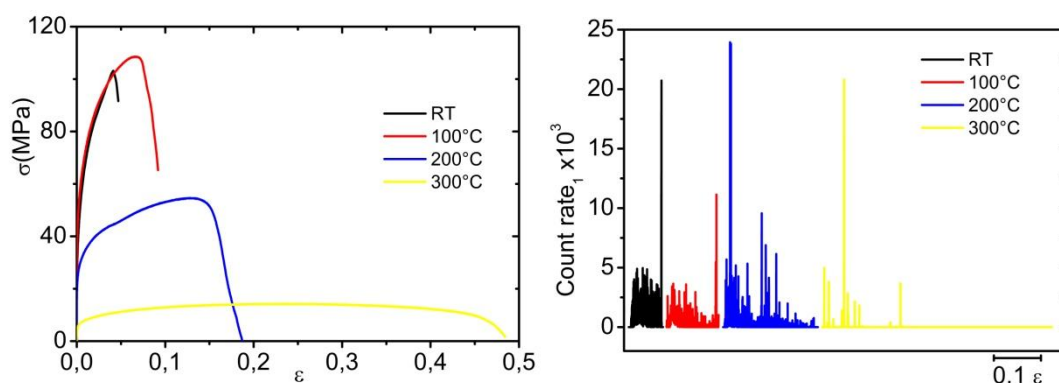
Vzorky jsme deformaovali v tahu a tlaku při různých teplotách. Během deformace jsme snímali záznam akustické emise. Na následujících grafech je vidět změna deformační křivky a záznamu akustické emise v závislosti na teplotě. Z deformační křivky jsme odebrali elastickou část a křivka ukazuje skutečnou plastickou deformaci.

#### 4.2.2.1. Deformace v tahu

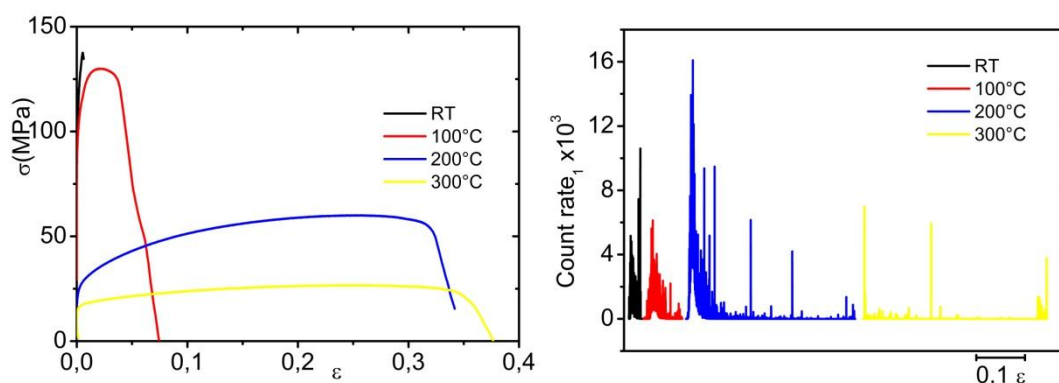


**Obr. 3.5** křivka deformace a akustické emise Mg04

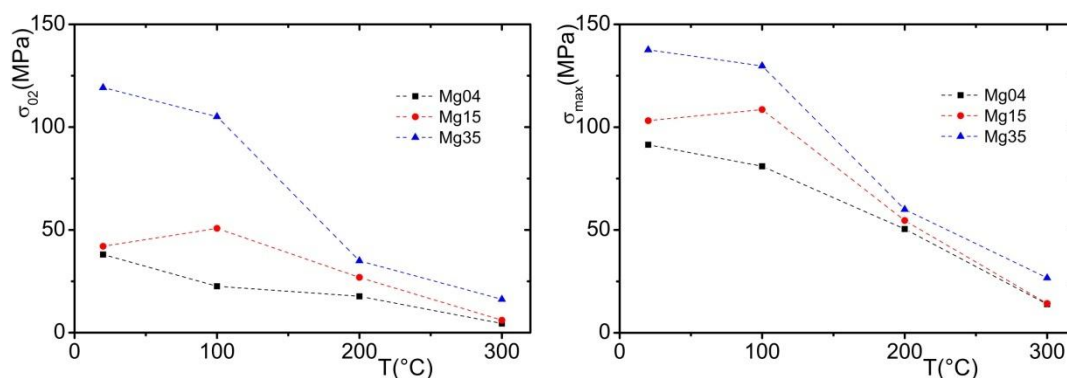
## Výsledky měření a diskuse



Obr. 3.6 křivka deformace a akustické emise Mg15



Obr. 3.7 křivka deformace a akustické emise Mg35

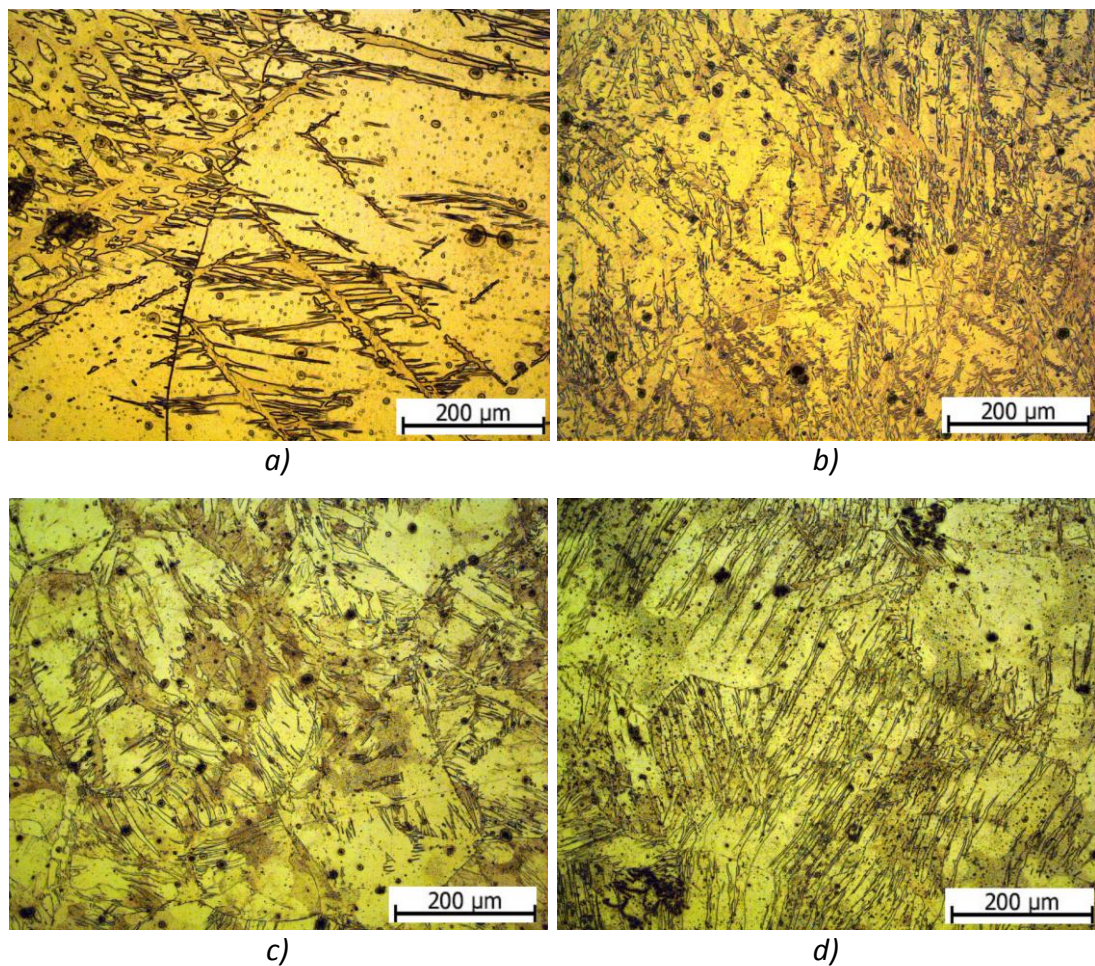


Obr. 3.8 Graf  $\sigma_{02}$  a  $\sigma_{max}$

Z křivky deformace je patrné, že při vyšších teplotách dochází degradaci mechanických vlastností. S vyšší teplotou klesá kritické napětí pro nebazální skluzu. Zároveň dochází k anihilaci dislokací a nenastává nakupení a zpevnění. Při teplotě 100°C jsou vlastnosti podobné vlastnostem při pokojové teplotě. Při teplotě přes 200°C klesá maximální dosažené napětí na méně než polovinu. Rovněž výrazně klesá i napětí na mezi kluzu  $\sigma_{02}$ . To je způsobeno tím, že již dochází k aktivaci nebazálních skluzových systémů [6].

## Výsledky měření a diskuse

Ze záznamu AE je patrné, že v tahu dochází k maximu dvojčatění při 200 °C. Tato teplotní závislost je způsobena vlivem tepelně aktivovaných procesů. Chapius [6] dokázal, že kritické skluzové napětí pro pyramidální skluz klesá s rostoucí teplotou. Maximum pozorované při teplotě 200°C je pravděpodobně způsobeno současným působením pyramidálního skluzu a dvojčatění. Pomocí rentgenových metod bylo ukázáno, že pyramidální skluzový systém je aktivován při této teplotě [11]. Pokles aktivity při dalším zvýšení teploty je ovlivněn rekrystalizací a nebazálními skluzy. Od 300°C je kritické napětí pro pyramidální skluzy nižší než u dvojčatění.

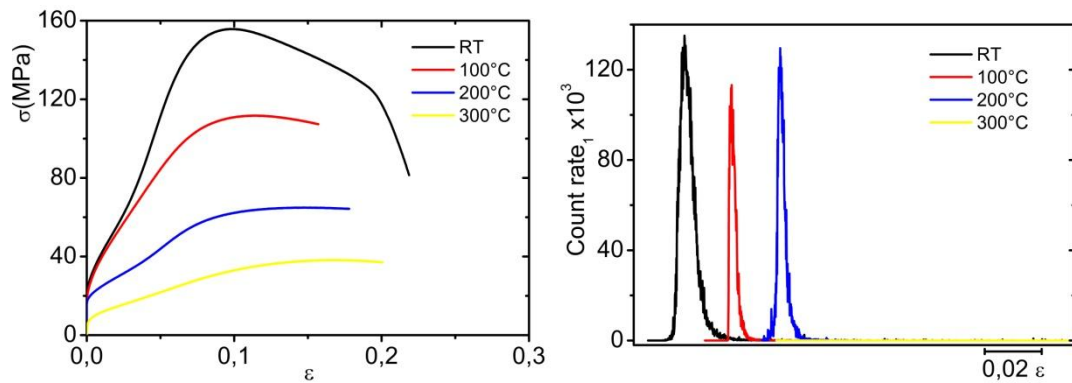


**Obr. 3.9** Struktura Mg35 po deformaci v tahu a)RT b)100°C c)200°C d)300°C

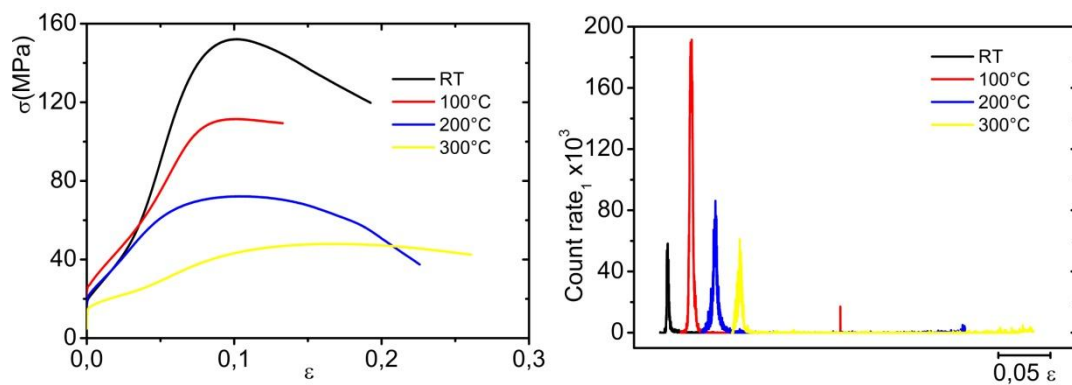
## Výsledky měření a diskuse

### 4.2.2.2. Deformace v tlaku

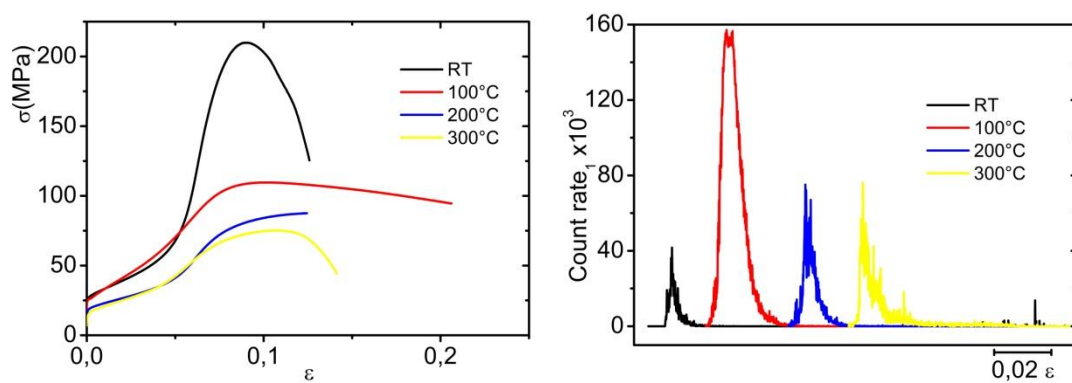
Během deformace v tlaku jsme museli dávat pozor, aby nedošlo k poškození senzoru. Proto musela být deformace občas zastavena ještě před dosažením lomu



Obr. 3.10 křivka deformace a akustické emise Mg04

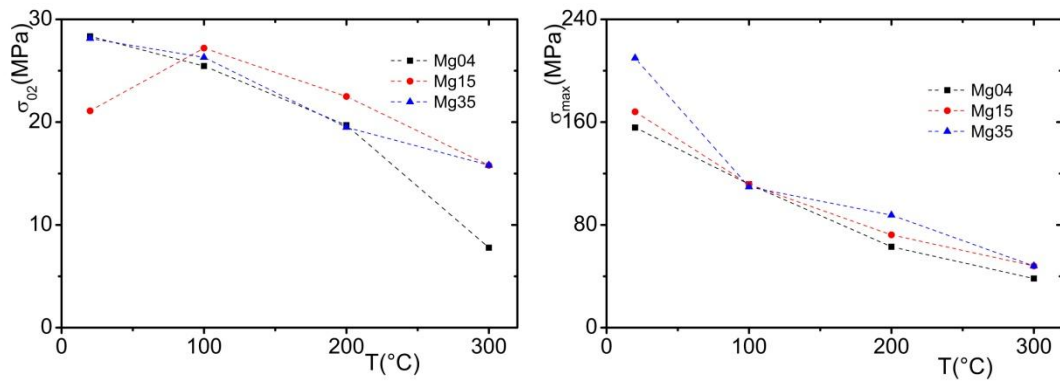


Obr. 3.11 křivka deformace a akustické emise Mg15



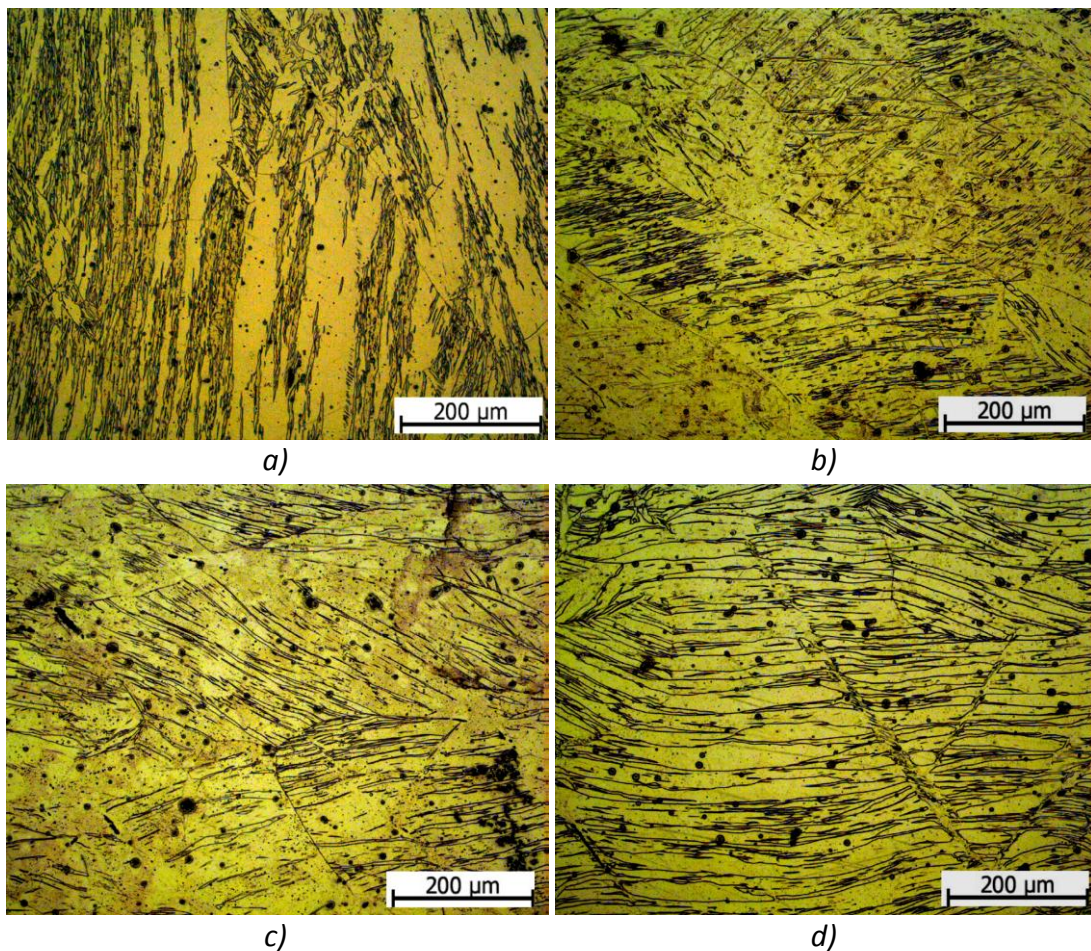
Obr. 3.12 křivka deformace a akustické emise Mg35

## Výsledky měření a diskuse



Obr. 3.13 Graf  $\sigma_{02}$  a  $\sigma_{max}$

Již při teplotě 100°C dochází k výrazné změně mechanických vlastností. Při této teplotě také dostáváme maximum signálu AE. S rostoucí teplotou dochází ke snižování maximálního napětí. Rovněž opět dochází k snížení aktivity dvojčatění. Při vyšších teplotách je oproti dvojčatění výhodnější nebazální skluz.

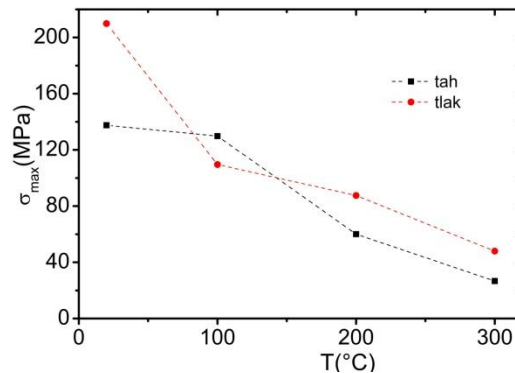


Obr. 3.12 Struktura Mg35 po deformaci v tlaku a) RT b) 100°C c) 200°C d) 300°C

## Výsledky měření a diskuse

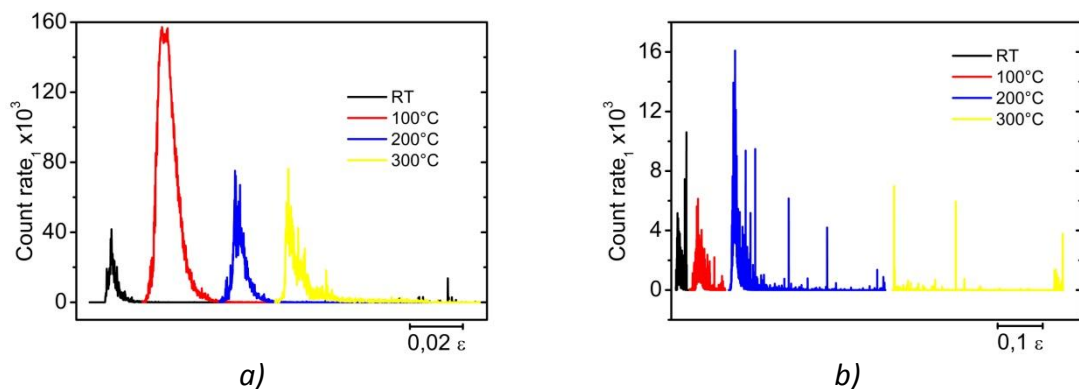
### 4.2.2.3. Teplotní asymetrie tah-tlak

V kapitole 3.2.1 jsme ukázali asymetrii tlak-tah při pokojové teplotě. Nyní se zaměříme na rozdíly v teplotní závislosti. V obou případech dochází k výrazné degradaci mechanických vlastností a dochází ke snižování maximálního dosaženého napětí, než vzorek praskne (Obr.3.13).



Obr. 3.13 závislost  $\sigma_{max}$  na teplotě u Mg35

Při deformaci v tlaku dochází k výraznému snížení maximálního dosaženého napětí již při 100°C, naproti tomu u deformace v tahu je pouze o něco nižší a k výraznému snížení dojde až při teplotě 200°C. Podobný jev můžeme pozorovat z porovnání záznamů AE (Obr. 3.14). V tlaku dosahuje dvojčatění maxima při 100°C, zatímco v tahu při 200°C. Při teplotě 300°C pak v tahu již není skoro žádný signál, ale v tlaku je na stejné úrovni jako při 200°C

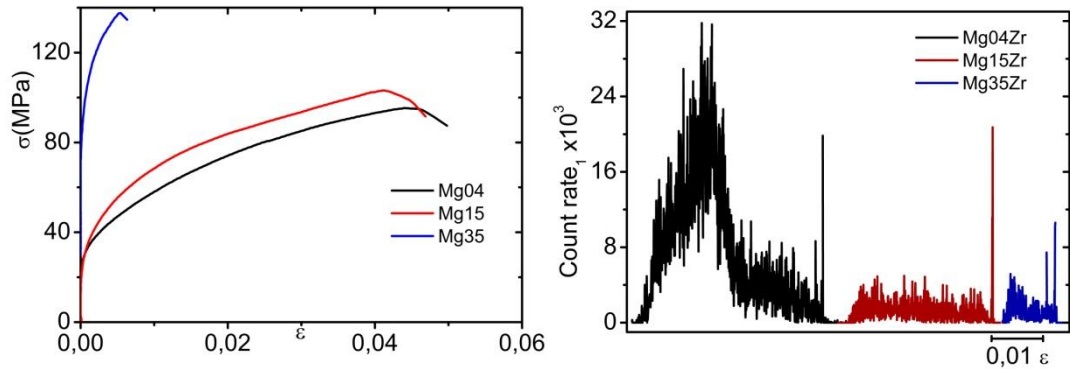


Obr. 3.14 závislost AE na teplotě u Mg35 v a)tlaku b)tahu

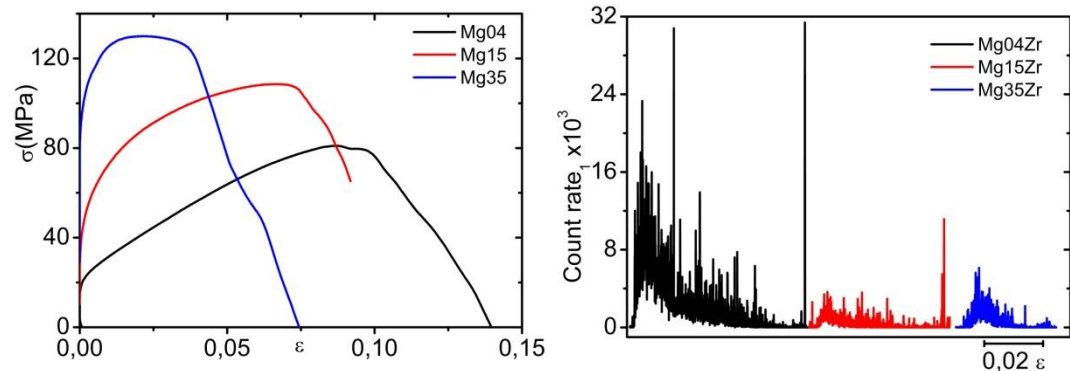
# Výsledky měření a diskuse

## 4.2.3. Deformace v závislosti na velikosti zrna

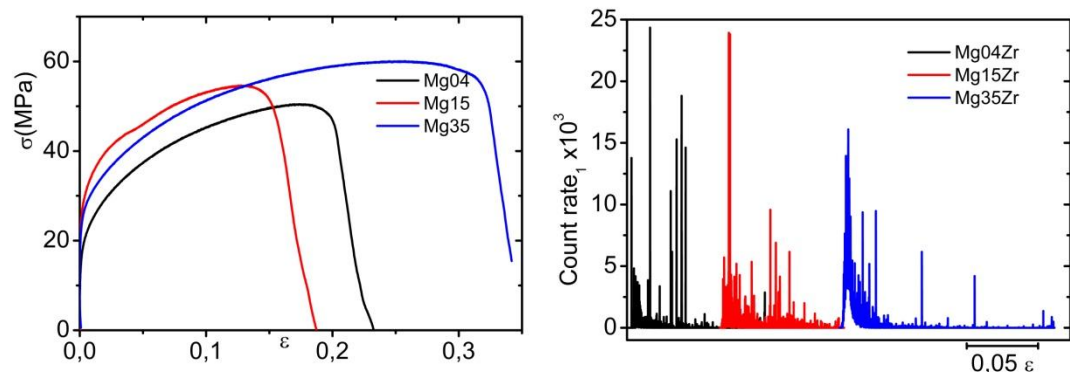
### 4.2.3.1. Deformace v tahu



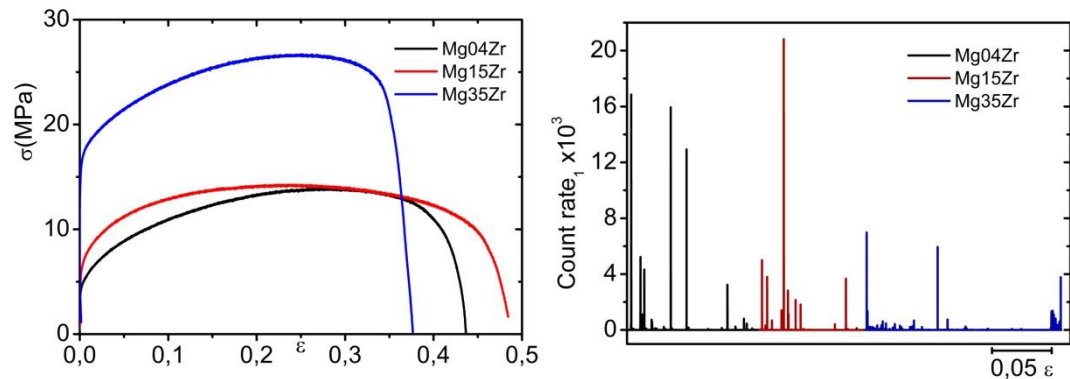
Obr. 3.15 křivka deformace a akustické emise při pokojové teplotě



Obr. 3.16 křivka deformace a akustické emise při teplotě 100°C

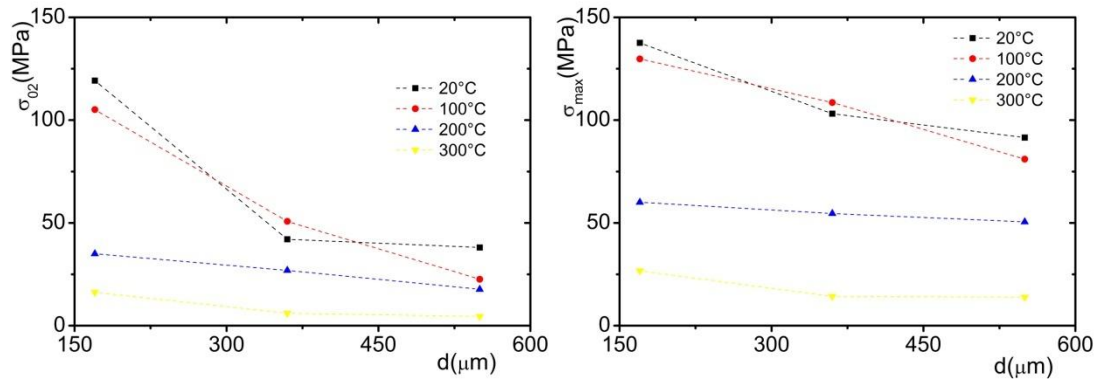


Obr. 3.17 křivka deformace a akustické emise při teplotě 200°C



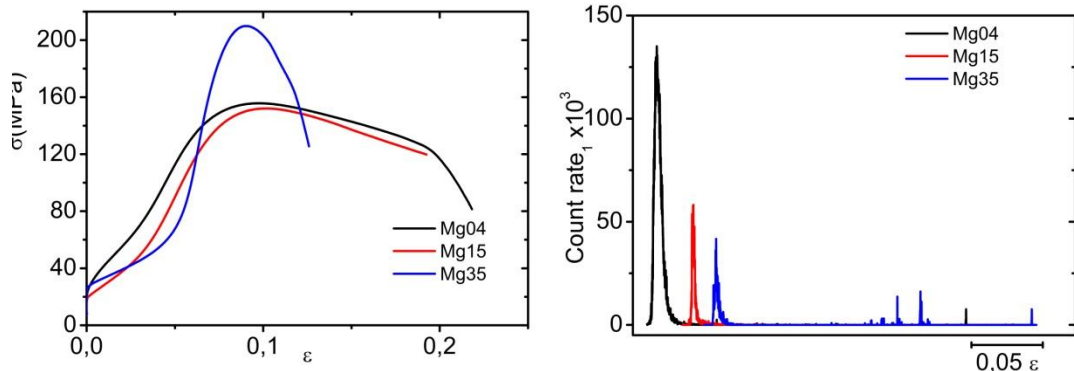
Obr. 3.18 křivka deformace a akustické emise při teplotě 300°C

## Výsledky měření a diskuse

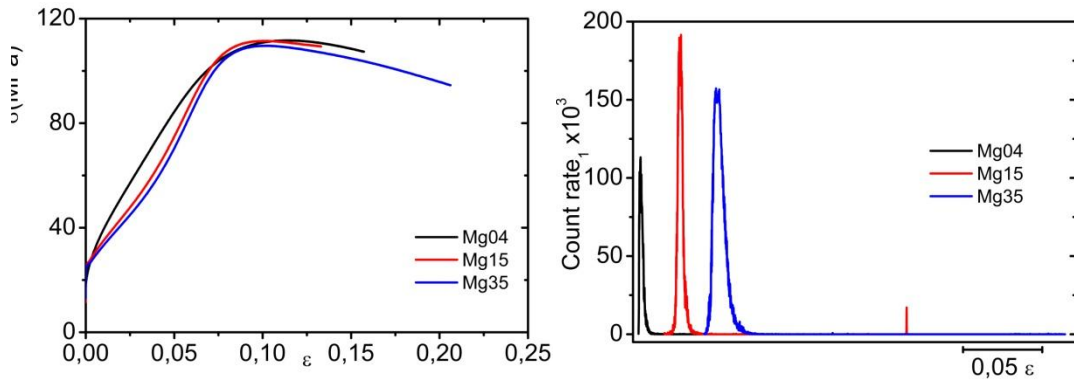


Obr. 3.18 Graf  $\sigma_{02}$  a  $\sigma_{max}$

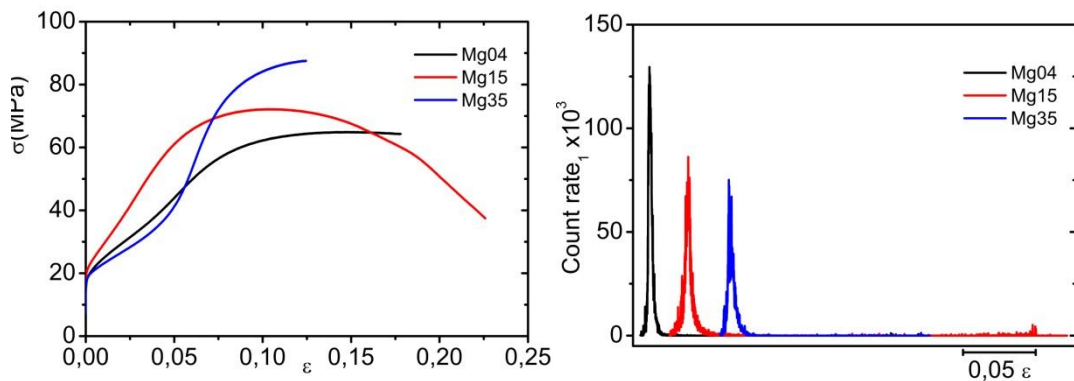
### 4.2.3.2. Deformace v tlaku



Obr. 3.18 křivka deformace a akustické emise při pokojové teplotě



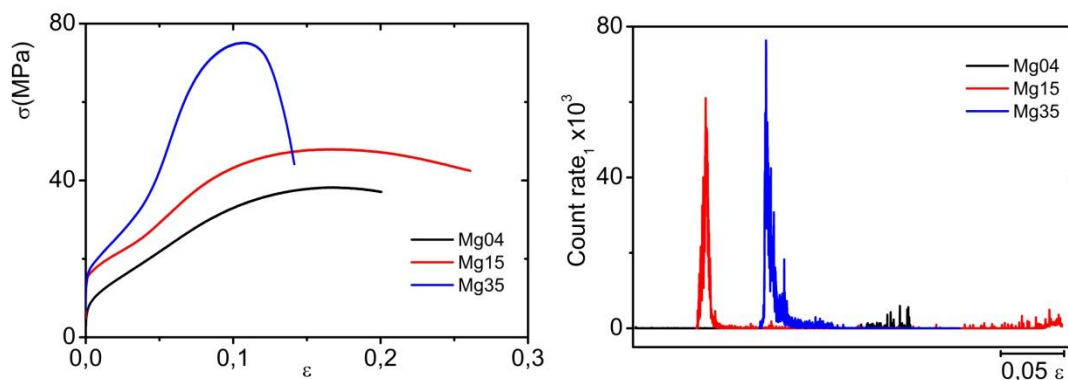
Obr. 3.19 křivka deformace a akustické emise při teplotě 100°C



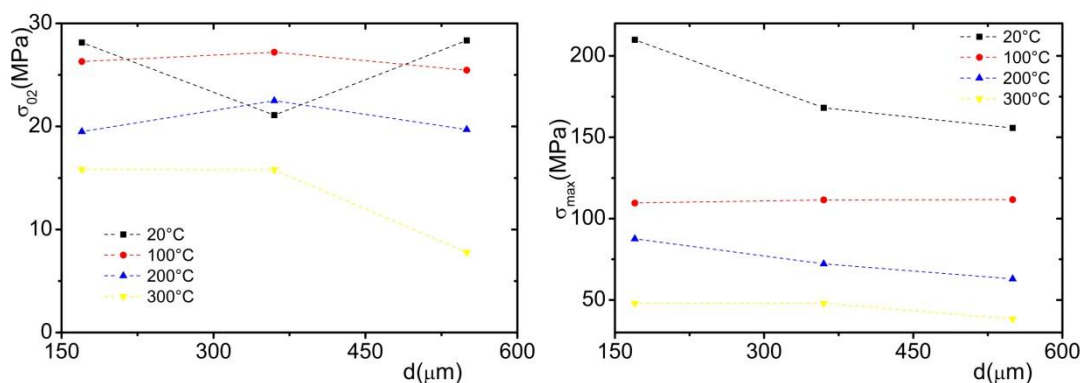
Obr. 3.20 křivka deformace a akustické emise při teplotě 200°C



## Výsledky měření a diskuse



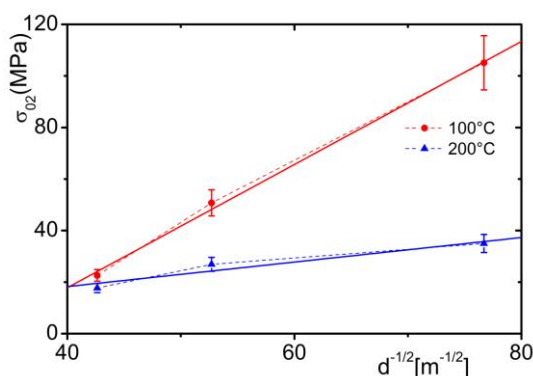
**Obr. 3.21** křivka deformace a akustické emise při teplotě 300°C



**Obr. 3.22** Graf  $\sigma_{02}$  a  $\sigma_{max}$

Signál akustické emise je nejsilnější u vzorku s největší velikostí zrna. To umožňuje tvorbu větších dvojčat a způsobuje, že uvolněná energie při vzniku dvojčat je větší. Zároveň to umožňuje větší volnou trasu pro dislokace, na které úroveň signálu závisí lineárně [12].

Rovněž můžeme pozorovat, že maximální napětí závisí na velikosti zrna. Větší napětí je potřeba pro deformaci vzorku s menším zrnem, což odpovídá Hall-Petchovu vzorci pro deformační napětí  $\sigma$ , podle nějž existuje vztah mezi velikostí zrna  $d$  a napětím  $\sigma$ :  $\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}$



**Obr. 3.23** Hall-Petchův vztah pro mez kluzu při deformaci v tahu

## 5. Závěr

### 5.1. Shrnutí výsledků

Hlavní výsledky práce jsou shrnuty v následujících bodech:

- Hoříčik vykazuje silnou asymetrii mezi deformací v tlaku a tahu
- V průběhu deformace v tlaku bylo pozorováno napěťové plató na začátku deformace. Poté (zhruba od 5% deformace) dochází k výraznému zpevnění.
- V průběhu deformace v tlaku dochází ke vzniku dvojčat pouze na počátku deformace. Maximum dvojčatění nastává na počátku plastické deformace, poté signál rychle klesá k nule. Vznik nových dvojčat se redukuje, a dochází k nárůstu stávajících dvojčat.
- V průběhu deformace v tahu dochází ke vzniku dvojčat po celou dobu deformace.
- U deformace v tlaku nastává maximum dvojčatění při teplotě 100°C, při deformaci v tahu je to při 200°C.
- Při deformaci v tlaku dochází k výrazné degradaci mechanických vlastností již při teplotě 100°C, u deformace v tahu až při 200°C.
- S rostoucí teplotou roste tažnost materiálu.
- Při teplotě 300°C je v tlaku signál AE na úrovni signálu při pokojové teplotě a 200°C, kdežto při deformaci v tahu je výrazně nižší.
- Napětí na mezi kluzu roste se snižující se velikostí zrna.
- Signál AE závisí na velikosti zrna. Větší signál byl změřen u vzorku s větší velikostí zrna

### 5.2. Náměty pro další práci

Z naměřených výsledků jsme získali několik námětů pro další práci

- Prověření zjištěných deformačních mechanismů na slitinách.
- Zjistit chování na vzorcích s přednostní orientací.
- Prozkoumat deformační chování materiálu během deformace pomocí neutronové difrakce.

### 6. Literatura

- [1] *Database Mg*, Magnesium Electron Limited, on CD-ROM
- [2] M.A. AVEDSIAN and H. BAKER, *ASM Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys*. ASM International, Materials Park, OH (1999), pp. 3-4
- [3] P. Kratochvíl, P. Lukáč, B. Sprášil, *Úvod do fyziky kovů I*, SNTL, Praha, 1984
- [4] P. Lukac, *Czech. J. Phys.*, 35 (1985) 275-285.
- [5] M. Boček, P. Lukáč, M. Švábová, *Phys Stat Sol* 1964;4:343
- [6] A. Chapuis, Driver Julian H., *Acta Mater*, 59 (2011) 1986-1994.
- [7] K. Mathis, F. Chmelik, M. Janecek, B. Hadzima, Z. Trojanova, P. Lukac, *Acta Mater*, 54 (2006) 5361-5366.
- [8] A. Jain, S.R. Agnew, *Mat Sci Eng a-Struct*, 462 (2007) 29-36.
- [9] H. Yoshinaga, T. Obara, S. Morozumi, *Materials Science and Engineering*, 12 (1973) 255-264.
- [10] O. Muransky, M.R. Barnett, D.G. Carr, S.C. Vogel, E.C. Oliver, *Acta Mater*, 58 (2010) 1503-1517.
- [11] K. Mathis, K. Nyilas, A. Axt, I. Dragomir-Cernatescu, T. Ungar, P. Lukac, *Acta Mater*, 52 (2004) 2889-2894.
- [12] N. Kiesewetter, P. Schiller, *Phys. Status Solidi A-Appl. Res.*, 38 (1976) 569-576.