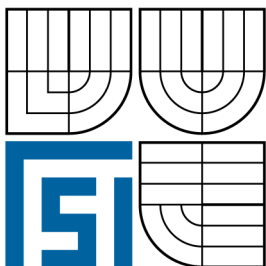


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

STUDIUM ÚNAVOVÝCH VLASTNOSTÍ HOŘČÍKOVÉ SLITINY AZ31

STUDY OF FATIGUE PROPERTIES OF MAGNESIUM ALLOY AZ31

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ BARON

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

PROF. ING. TOMÁŠ PODRÁBSKÝ, CSC.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2009/10

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Baron

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Materiálové inženýrství (3911R011)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Studium únavových vlastností hořčíkové slitiny AZ31

v anglickém jazyce:

Study of Fatigue Properties of Magnesium Alloy AZ31

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Téma bakalářské práce je zaměřeno na studium struktury a vlastností u vybrané slitiny hořčíku po aplikaci únavového zatěžování.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Kvantifikovat morfologii vyskytujících se strukturních fází uvedené slitiny .
- 2) Stanovit křivky nízkocyklové únavy.
- 3) Fraktografické hodnocení lomových ploch.

Seznam odborné literatury:

- [1] DRÁPALA, J., KUCHAR, L., TOMÁŠEK, K., TROJANOVÁ, Z.: Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík - příměs, Ostrava 2004.
- [2] HASEGAWA, S., TSUCHIDA, Y., YANO, H., MATSUI, M.: Evaluation of low cycle fatigue life in AZ31 magnesium alloy.
- [3] ZEMANDL, M.: Fraktografie únavových lomů a její praktické využití při analýze příčin porušení strojních součástí, In: Letná škola únavy materiálů '06, ŽU v Žiline, Žilina - Strečno 2006, s. 114 – 124
- [4] ROUČKA, J.: Metalurgie neželezných slitin. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno, 2004.
- [5] PRŠKOVÁ, V.: Ultravysokocyklová únava hořčíkových zliatin. Žilinská univerzita. Žilina 2008. Dizertační práce.
- [6] YIN, S.M., YANG, F., YANG, X.M., WU, S.D., LI, S.X., LI, G.Y.: The role of twinning–detwinning on fatigue fracture morphology of Mg–3%Al–1%Zn alloy. Materials Science and Engineering A.
- [7] PTÁČEK, L a kol.: Nauka o materiálu II., Akademické nakladatelství CERM, Brno, 1999.
- [8] AVEDESIAN, M.M. – BAKER, H.: ASM Specialty Handbook -Magnesium and Magnesium Alloys, ASM International Ohio, USA 1999.
- [9] TOKAJI, K., KAMAKURA, M., ISHIIZUMI, Y., HASEGAWA, N.: Fatigue behaviour and fracture mechanism of a rolled AZ31 magnesium alloy. International Journal of Fatigue 26 (2004) 1217–1224.

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Tomáš Podrábský, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.

V Brně, dne 18.2.2010





prof. RNDr. Jaroslav Cihlár, CSc.
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na studium struktury a vlastností hořčíkové slitiny AZ31 po aplikaci únavového zatěžování. Jejím cílem je kvantifikovat morfologii vyskytujících se strukturních fází, stanovení křivky nízkocyklové únavy a fraktografické hodnocení lomových ploch.

ABSTRACT

This bachelor thesis is concentrate on studium structure and properties of AZ31 magnesium alloy after using fatigue straining. Its purpose is quantify morphology of existing structure stages, formulation low-cycle fatigue curve and fractography classification of fracture areas.

Klíčová slova

Hořčíková slitina AZ31, nízkocyklová únava, squeeze casting, morfologie, fraktografie.

Key words

Magnesium alloy AZ31, low-cycle fatigue, squeeze casting, morphology, fractography.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BARON, Tomáš. *Studium únavových vlastností hořčíkové slitiny AZ31: Bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 51 s., Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Tomáš Podrábský, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Studium únavových vlastností hořčíkové slitiny AZ31* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Podpis bakaláře

.....
Dne

.....
Tomáš Baron

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat svému školiteli prof. Ing. Tomáši Podrábskému, Csc. za rady a připomínky k mé práci. Dále Ing. Pavlu Gejdošovi za konzultace a Ing. Drahomíře Janové za odborné rady při řešení experimentů.

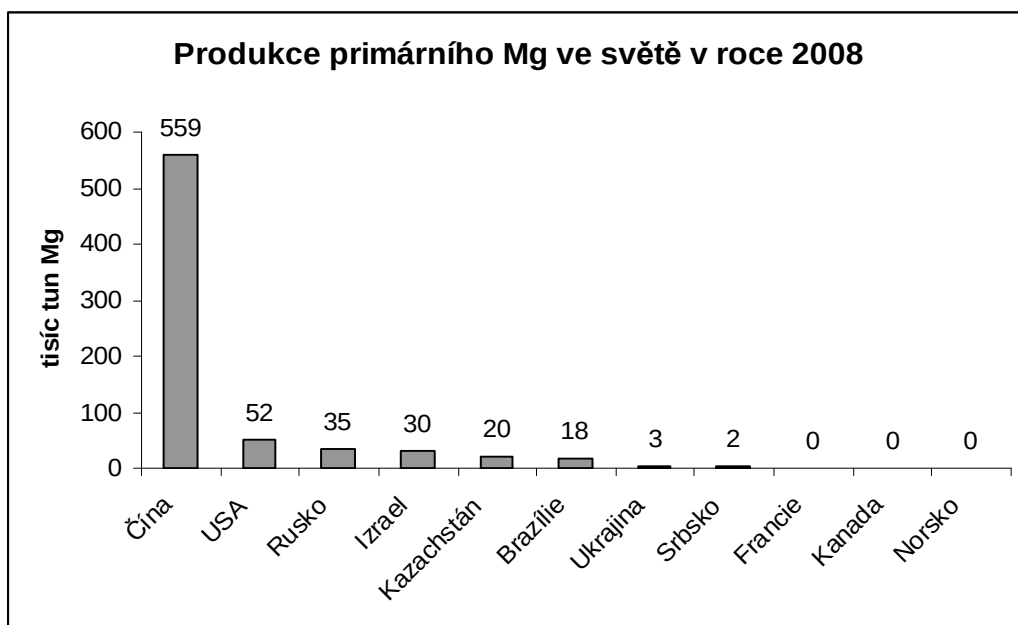
ÚVOD	8
1. HOŘČÍKOVÉ SLITINY	9
1.1. Vlastnosti hořčíku.....	9
1.2. Výroba hořčíku.....	10
1.2.1. Suroviny pro výrobu hořčíku	10
1.2.2. Postupy výroby.....	10
1.3. Vlastnosti slitin hořčíku.....	11
1.3.1. Slévárenské slitiny hořčíku	12
1.3.2. Technologické vlastnosti slitin hořčíku.....	12
1.4. Druhy hořčíkových slitin.....	12
1.5. Označování hořčíkových slitin.....	14
1.6. Výrobky z hořčíkových slitin	16
2. TECHNOLOGIE ZPRACOVÁNÍ HOŘČÍKOVÝCH SLITIN	17
2.1. Technologie zpracování hořčíkových slitin tvářením	17
2.2. Technologie zpracování hořčíkových slitin odléváním.....	19
2.2.1. Odlévání do netrvalých forem.....	19
2.2.2. Odlévání do kovových forem.....	19
3. TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	25
4. ÚNAVA MATERIÁLU	27
4.1. Wöhlerova křivka	29
4.2. Mansonova-Coffinova křivka.....	30
4.3. Cyklická deformační křivka	30
4.4. Křivky cyklického zpevnění-změkčení	31
5. CÍL PRÁCE.....	32
6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	33
6.1. Experimentální materiál	33
6.2. Použití experimentální techniky.....	34
6.2.1. Únavové zkoušky	34
6.2.2. Světelná mikroskopie	35
6.2.3. Elektronová mikroskopie.....	36
7. VÝSLEDKY ZKOUŠEK A JEJICH ROZBOR.....	38
7.1. Únavová zkouška	38
7.1.1. Wöhlerova křivka (S-N křivka).....	38
7.1.2. Křivky cyklického zpevnění-změkčení	39
7.1.3. Parametry regresních funkcí.....	40
7.2. Morfologie strukturních fází.....	42
7.3. Fraktografické hodnocení lomových ploch	43
ZÁVĚR	45
POUŽITÁ LITERATURA.....	46
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	48
PŘÍLOHY	49

Úvod

V současné době je velmi důležité snižování zátěže na životní prostředí. Toho dosahujeme snížením hmotnosti např. u dopravních prostředků. Proto zvyšujeme podíl lehkých konstrukčních materiálů ve stavbě automobilů, letadel, atd. Kromě již tradičně používaných slitin hliníku, zde patří významné místo hořčíkovým slitinám. [3]

Dle statistiky IMA (International Magnesium Association) bylo v roce 2008 vyrobeno celkem 719 tisíc tun primárního Mg (obr. 1). Oproti roku 2007 se snížila produkce o 9 %, kdy bylo vyrobeno 792 tisíc tun primárního hořčíku. Pro legování Al slitin bylo spotřebováno 40–45 %, pro hořčíkové slitiny 33–35 %, dále pro odsíření železa a ocelí 13 %. A zbytek ve elektrochemickém průmyslu a dalších. Hořčík se využívá především jako legura a při přípravě hořčíkových slitin v oblasti tlakového lití s malým podílem gravitačního lití. [7]

Hořčík zaznamenává ze všech neželezných kovů největší expanzi výroby. Velký podíl na tom mají nové aplikace hořčíkových slitin pro automobilový průmysl. Např. v roce 1957 byl vyroben Chevrolet Corvette SS s kompletními panely karoserie z hořčíku. Volkswagen využíval hořčík ve svých motorech již od dob slavného „Brouka“. Porsche použilo hořčík pro snížení hmotnosti svých motorů, zejména díky „špatnému“ umístění motoru. V současné době se přidal i výrobce aut BMW, který se svými motory z hořčíkových bloků vyhrál prestižní cenu Motor roku 2006. [8]



Obr. 1 Porovnání produkce Mg ve světě

1. HOŘČÍKOVÉ SLITINY

1.1. Vlastnosti hořčíku

Hořčík (Mg) je nepolymorfní kov bílé barvy, který krystalizuje v šesterečné soustavě. Má měrnou hmotnost 1738 kg/m^3 , atomové číslo 12 a relativní atomovou hmotnost 24,305. Teplotu tavení 650°C (tj. 922 K) a teplotu varu 1090°C (tj. 1363 K). Za studena je málo pevný a špatně tvárný, protože má jen jeden skluzový systém, což je i příčinou jeho anizotropních vlastností. Tvárným se stává až od teplot 225°C . Vyrábí se z magnesitu (MgCO_3), dolomitu ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$), karnalitu ($\text{MgCl}_2 \cdot \text{KCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$), ze kterého se získává MgCl_2 a dále z mořské vody. Jako další vhodné minerály mohou být použity kizerit nebo kainit. [1,4]

Pevnost technicky čistého hořčíku v tahu je 190 MPa, ale pro konstrukční využití je přesto nízká. Jako konstrukční kov je pro přenos zátěžných sil nepoužitelný. Čistý hořčík se používá především jako redukční činidlo při výrobě titanu a pro modifikaci tvárné litiny. Značné množství hořčíku se spotřebuje při výrobě slitin hliníku, zejména těch, které mají dobrou odolnost proti korozi (řada Al-Mg a Al-Mg-Si). Další místo ve spotřebě hořčíku představují hořčíkové slitiny. Hutní hořčík je veden v ČSN 42 4995. [2]

Většina přísad tvoří s hořčíkem soustavu s eutektickou přeměnou, s omezenou klesající rozpustností na straně hořčíku a s tvorbou intermediární fáze. Rozpustnost přísad v hořčíku se v závislosti na teplotě značně mění. Tvary rovnovážných diagramů binárních slitin umožňují jeho vytvrzení. Toto však nepřináší takové zlepšení vlastností jako u slitin hliníku. [4]

Hořčík je hojně obsažen v zemské kůře a zároveň je nejlehčím známým konstrukčním materiálem, pokud nebereme v úvahu berylium, které je toxické. Zásoby hořčíku jsou považovány za nevyčerpatelné. Vzhledem k náročným technologiím, kterými se hořčík vyrábí, je poměrně drahý a tento faktor bývá zvažován při použití hořčíku a jeho slitin. [5]

Samotný hořčík má řadu aplikací v pyrotechnice jako vysoce energetické palivo pro rakety, ve starších filmech můžeme vidět hořčíkové lampy používané jako jednorázový blesk. V metalurgii se používá jako prostředek na odsíření oceli, k výrobě tvárných litin, jako dezoxidant v neželezných kovech a především jako legující prvek v hliníkových slitinách. V chemii se používá k výrobě elektrod pro suché baterie (podobných jako jsou zinkové) a konečně je používán jako konstrukční materiál. [5]

Tabulka 1 pak ukazuje vybrané vlastnosti různě upraveného hořčíku.

Materiál	Mez kluzu v tahu [MPa]	Maximální napětí [MPa]	Prodloužení [%]	Tvrдость	
				HRC	HB
Odlévaný Mg	21	90	2 - 6	16	30
Protlačovaný Mg	69 - 105	165 - 205	5 - 8	26	35
Válcované plechy	115 - 140	180 - 220	2 - 10	48 - 54	45 - 47
Žíhané plechy	90 - 105	160 - 195	3 - 15	37 - 39	40 - 41
pro zátěž 500 kg a průměr kuličky 10 mm.					

Tab. 1 Typické mechanické vlastnosti nelegovaného Mg [5]

1.2. Výroba hořčíku

1.2.1. Suroviny pro výrobu hořčíku

Přírodní zdroje zodpovídající za jeho zastoupení v litosféře a jeho nerosty jsou rozšířené na mnohých místech světa. Využití jednotlivých druhů surovin se významně posunulo hlavně při jeho současné expanzi do výroby. Pro výrobu hořčíku se využívají suroviny oxidické a chloridové. Oxidické suroviny jsou předurčeny pro procesy termické redukce, chloridové suroviny jsou vstupem pro výrobu hořčíku elektrolýzou chloridové taveniny, avšak současné elektrolytické procesy využívají i oxidické suroviny, ze kterých se vyrábí MgCl_2 chloridovými a chlorovými postupy. [5]

K využívaným oxidickým surovinám patří:

- Magnezit – MgCO_3 , obsahuje 47,82 % MgO , resp. 28,8 % Mg . Krystalizuje v hexagonální soustavě, termicky se rozkládá při 920 °C na MgO a CO_2 .
- Dolomit – $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$, obsahuje 21,8 % MgO , resp. 13,2 % Mg . Poměr $\text{CaO} : \text{MgO} = 1,39$. Krystalizuje v romboedrické soustavě, termický rozklad probíhá při 760–920 °C za vzniku $\text{CaO} \cdot \text{MgO}$.
- Serpentin – $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, hydrosilikát hořečnatý obsahuje 26,3 % Mg , krystalickou vodu uvolňuje při teplotách 400–600 °C. Patří k perspektivním zdrojům hořčíku. [5]

K chloridovým surovinám řadíme:

- Karnalit – $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, obsahuje 8,8 % Mg . Je zdrojem pro elektrolýzu hlavně v Rusku a na Ukrajině.
- Bischofit – $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, hexahydrát chloridu hořečnatého se taví při 203 °C a neomezeně se rozpouští ve vodě vzhledem na oblast neomezené rozpustnosti v soustavě $\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ a tvorbu dodekahydrátu. Úplná dehydratace na bezvodné MgCl_2 je možná jen při velmi pomalém ohřevu v atmosféře chloru nebo chlorovodíku.
- Mořská voda – voda přírodních jezer a průmyslové solanky využívají jako zdroj hořčíku při tradičních postupech. Mořská voda obsahuje 0,08–0,38 % MgCl_2 a 0,12–0,31 % MgSO_4 . Mrtvé moře obsahuje 13 % MgCl_2 . Velké solné jezero v Utahu 1,2 % MgCl_2 . Průmyslové solanky obsahují cca 10 % MgCl_2 . [5]

1.2.2. Postupy výroby

Technologie výroby hořčíku jsou odvozené od fyzikálně-chemických vlastností oxidu hořečnatého a chloridu hořečnatého, které jsou nejčastěji zastoupené sloučeniny v hořčíkových surovinách. Podle jejich vlastností se technologie hořčíku dělí do dvou základních skupin:

a) Tavná **elektrolýza MgCl_2** v prostředí roztaveného elektrolytu: procesy tavné elektrolýzy jsou vždy založené na přípravě MgCl_2 , jeho totální dehydrataci, přípravě chloridového roztaveného elektrolytu a vlastní tavné elektrolýze. Mimo kovového roztaveného Mg je produktem plynný chlor, který se recykluje a používá v podobě Cl_2 nebo HCl při předcházejících stupních přípravy. Technologie výroby touto metodou má dva základní stupně: příprava bezvodného chloridu hořečnatého a elektrolýzu chloridové taveniny obsahující MgCl_2 . Rozdíly jsou ve vstupních surovinách, ze kterých se MgCl_2 připravuje. Používá se mořská voda, voda ze solných jezer, solánek, bischofit, karnalit, magnezit a serpentinit. [5]

b) Termická **redukce MgO** vhodným redukovadlem je možná prostřednictvím kovových a nekovových redukovadel při vysokých teplotách. Od poloviny 20. století se průmyslově realizuje termická redukce výhradně pomocí ferosilicia – tedy silikotermická redukce. [5]

1.3. Vlastnosti slitin hořčíku

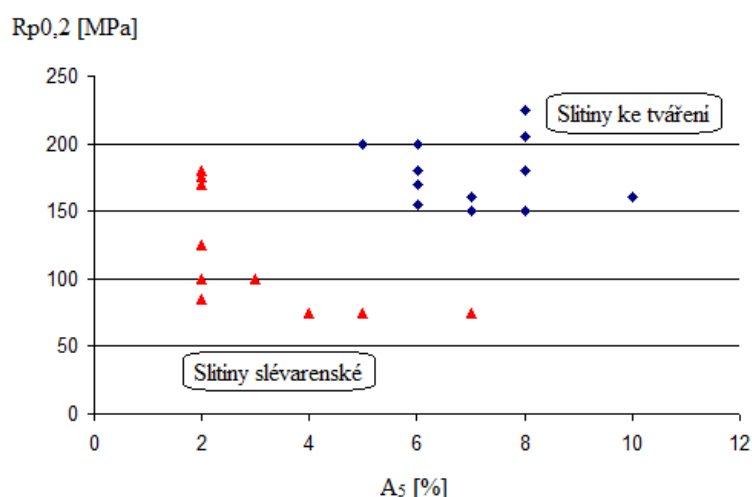
K přednostem slitin hořčíku patří zejména nízká měrná hmotnost ($1\,760$ až $1\,990\text{ kg/m}^3$), měrná pevnost srovnatelná s obdobnými charakteristikami slitin hliníku i řady ocelí, vysoký útlum vibrací a velmi dobrá obrobitelnost. Nedostatkem je naopak obtížnější a tedy nákladnější výroba a zpracování než u slitin hliníku v důsledku vysoké reaktivity hořčíku za vyšších teplot, malé tvárnosti za nižších teplot a nízké rychlosti difúzních pochodů při tepelném zpracování. Nežádoucí vlastností je též sklon slitin hořčíku k intenzivní elektrokorozí v kontaktu s většinou kovů a slitin, obtížnější svařitelnost než u slitin hliníku, nízká pevnost ve střihu ($R_{ms} = 120$ až 150 MPa) a nízká vrubová houževnatost ($KU = 1,2$ až $4,2\text{ J}$). Nízká tvrdost a odolnost proti opotřebení a nízký modul pružnosti v tahu ($E = 42$ až 44 GPa). Na obrázku 2 můžeme srovnat vlastnosti slitin ke tváření a slitiny slévárenské.

Pro obtížnost tváření slitin hořčíku mají v použití přednost slitiny hořčíku na odlitky. Mezi chemickým složením slitin pro tváření a pro odlitky není podstatný rozdíl. [2]

Vzhledem k vysoké afinitě hořčíku ke kyslíku se musí při tavení, odlévání, ale i do formovacích směsí používat tzv. inhibitory hoření. Jako jeden z nejrozšířenějších inhibitorů hoření při odlévání hořčíkových slitin je síra.

Interakce Mg s SO_2 probíhá značně pomaleji než s kyslíkem a dusíkem. Proto SO_2 našel široké uplatnění pro ochranu proudu taveniny před oxidací při lití a povrchu taveniny ve vtokové soustavě slévárenské formy. Další využití pro vytvoření ochranné atmosféry našel fluorid sírový SF_6 . Hořlavost Mg slitin v roztaveném stavu sebou přináší i některé další metalurgické problémy. Tavenina musí být trvale kryta vhodnou struskou, popř. chráněna ochrannou atmosférou. [4]

Velmi důležitá je otázka recyklace hořčíkových slitin. Tento problém se však stane aktuálním až po uplynutí průměrné doby životnosti aut, tj. kolem 10 let. Zároveň s tím, by mělo dojít ke snížení vysokých materiálových nákladů ve srovnání s Al. Je tedy nezbytně nutné vybudovat v následujících pěti až deseti letech výkonný recyklační program. [4]



Obr. 2 Porovnání nejvýznamnějších mechanických vlastností, meze kluzu a tahnosti slévárenských slitin Mg a slitin pro tváření [1]

1.3.1. Slévárenské slitiny hořčíku

Základem slévárenských slitin hořčíku jsou binární slitiny rozšířené o další legury za účelem zlepšení technologických vlastností, mechanických vlastností nebo zvýšení odolnosti proti korozi. Takové základní systémy jsou Mg-Al, Mg-Zn a Mg-Mn, popř. Mg-Li. Další doplňkové kovy jsou Th, Zr, Si, Ag, Ti a kovy vzácných zemin (La, Ce, Nd, Pr, Sc, Gd, Y).

Specifickým slévárenským problémem je vysoká hořlavost hořčíkových slitin v roztaveném stavu. Tavenina musí být chráněna vhodnou struskou nebo atmosférou, která se vyvíjí při hoření sirného květu na hladině taveniny. Plynné atmosféry jsou v současné době většinou směsí vzduchu, oxidu uhličitého a fluoridu sírového. Například pro teplotu tání 650 až 705 °C je doporučena atmosféra nad hladinou taveniny: vzduch + 0,4 % SF₆, nebo 75 % vzduch + 25 % CO₂ + 0,2 % SF₆. Pro teploty lití 705 až 760 °C je doporučená ochranná atmosféra 50 % vzduch + 50 % CO₂ + 0,3 % SF₆. Pro snížení vznívilosti doporučují někteří metalurgové přísadu berylia 0,005 až 0,2 % [14] nebo přísadu 0,2 % vápníku. Vyšší obsah vápníku však zhoršuje odolnost proti korozi. [1]

1.3.2. Technologické vlastnosti slitin hořčíku

Postupy lití hořčíkových slitin byly účelně propracovány pro lití do pískových forem, skořepin i do kokil, gravitačně i pod tlakem. Technologie tváření vybraných hořčíkových slitin je dána specifikem hexagonální krystalické mřížky základního tuhého roztoku a stavem mikrostruktury. V současné době pracuje řada výzkumných pracovišť na ověření podmínek jejich superelasticity. Spojování slitin hořčíku je možno provádět téměř všemi běžnými postupy. Při obloukovém svařování pod inertním plynem je třeba brát v úvahu specifika materiálu, přídatného kovu a tvaru svařovaných dílů. Jako přídatný materiál se bere s dostatečným výsledkem slitina, která se svařuje. Výborné výsledky byly získány při použití přídatného materiálu ze slitin typu HM21 a HM31 (s thoriem a manganem). Bodové a švové svařování vykazuje velmi dobré pevnosti spojů při aplikaci statického namáhání. Není však vhodné pro namáhání únavové nebo tam, kde svařenec bude podroben vibracím. Významná a perspektivní je technologie spojování hořčíkových slitin lepením, kde nedochází ke vzniku koncentrátorů napětí. [1]

1.4. Druhy hořčíkových slitin

Slitiny Mg-Al

Slitiny typu Mg-Al-(Zn, Mn) jsou nejrozšířenější a nejstarší skupinou slitin pro slévárenské účely. Mohou obsahovat ještě další legury (Zr, Th, Ag, Ce). Jejich užité vlastnosti jsou dány existencí relativně široké oblasti tuhého roztoku δ v rovnovážném diagramu Mg-Al a možností změnit chemické složení přidáním dalších prvků. Nejrozšířenější z těchto slitin jsou slitiny s 6–10 % podílem Al. Slitiny s vyšším obsahem Al než 6 % jsou vytvrditelné, dochází k tvorbě diskontinuálního precipitátu Al₁₂Mg₁₇ a bývají doplněny malým množstvím zinku a manganu. [1]

Tvoří rovnovážný diagram se změnou rozpustnosti v tuhém stavu. S eutektickým bodem při koncentraci 32,3 % Al a teplotou eutektické přeměny 437 °C.

Nevýhodou slitin Mg je prudký pokles pevnosti za zvýšených teplot. Toto chování omezuje jejich použití na max. 120 °C. Další nevýhodou je jejich nízká odolnost proti creepu, která je zapříčiněna stoupajícím objemovým množstvím Al a oprava intermetalických složek

$\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$, které mají bod tání okolo 460 °C a snadno se deformují při provozních teplotách. [4]

Slitiny Mg-Al-Zn

Jsou to nejvíce používané slitiny hořčíku známé pod názvem „elektrony“. Hlavním zpevňujícím prvkem je hliník, zinek má na zpevnění podstatně menší vliv. V ČR se odlitky vyrábějí ze slitiny $\text{MgAl}_{18}\text{Zn}_1$, jediné normované hořčíkové slitiny (ČSN 42 4911), která je ekvivalentní slitině, v průmyslově vyspělých zemích označené americkou značkou AZ81, případně ruské slitině ML5. [2]

Výhradním dodavatelem slitin je však v současné době firma Norsk Hydro (Norsko), která produkuje zejména slitiny AZ91, AZ81, AZ63. [4]

Tyto slitiny se odlévají do forem kovových, pískových, nebo pod tlakem. Minimální tloušťka stěny odlitků je 3 mm až 4 mm, maximální pracovní teplota pro dlouhodobou funkci v zatíženém stavu je 150 °C. [2]

V poslední době své uplatnění našly slitiny s označením HP (High purity) s nízkým obsahem železa (MgAl_6Zn_3 a MgAl_9Zn_1 – [2]), které se používají tam, kde jsou nároky na vyšší korozivzdornost odlitků, např. automobilová kola. Po tepelném zpracování se dosahuje následujících mechanických vlastností: modul pružnosti v tahu 42 000 MPa, modul pružnosti ve střihu 16 500 MPa, mez kluzu $R_{p0,2} = 120$ MPa a pevnost v tahu $R_m = 255$ MPa, při tažnosti $A = 6$ %. [4]

Technickou předností litých kol je jejich nízká hmotnost a vysoká tuhost, jejich použití je však ekonomicky odůvodněné pouze u rychlých sportovních vozů a motocyklů. [4]

Slitiny Mg-Zn-Zr

Mají vyšší hodnoty meze kluzu a meze pevnosti v důsledku zpevňujícího vlivu zinku a také zirkonia, které zjemňuje zrna. Další vlastností je menší citlivost mechanických vlastností na tloušťku stěny odlitků a potlačení mikroporovitosti. Slitiny této soustavy jsou konstrukčně použitelné v zatíženém stavu do 200 °C. [2]

Slitiny Mg-Zn-Zr-Nd

Pevnostní charakteristiky těchto slitin obsahujících neodym klesají s rostoucí teplotou pomaleji, než u jiných slitin hořčíku. Proto jsou tyto slitiny konstrukčně použitelné až do teploty 250 °C. [2]

Slitiny Mg-Zn-Zr-PVZ

Prvky vzácných zemin (PVZ) tvoří součást ceriového směsného kovu s min. 45 hm. % ceru. Slitiny této soustavy mají podobné vlastnosti jako slitiny s neodymem. Jejich mechanické vlastnosti za normální teploty jsou srovnatelné s hodnotami ostatních slitin hořčíku. Slitiny s PVZ jsou použitelné do 250 °C v zatíženém stavu. [2]

Slitiny Mg-Zn-Zr-Th

Slitiny s thoriem patří k hořčíkovým slitinám s největší žárupevností. Jsou určeny pro dlouhodobou funkci až do teplot 350 °C. [2]

Slitiny Mg-Li

Legování hořčíku lithiem (měrná hmotnost 530 kg/m³) umožňuje vyrábět slitiny s měrnou hmotností nižší (1 350 až 1 600 kg/m³) než má čistý hořčík (1 740 kg/m³) a některé plastické materiály. [2]

Tyto slitiny patří k nejléčtím a nejperspektivnějším materiálům. Lze je rozdělit na slitiny binární a na slitiny vícekomponentní. Binární slitiny mohou být podle obsahu lithia tvořeny fází α (do 5 hm. % Li), směsí $\alpha + \beta$ (5,7–10,4 hm. % Li) a fází β (nad 10,4 hm. % Li). [1]

Fáze α má hexagonální těsně uspořádanou mřížku, fáze β je kubická, prostorově centrovaná. Krystalická stavba mění ve značném rozsahu mechanické vlastnosti jednotlivých slitin i vlastnosti technologické (zejména tvářitelnost). S rostoucím obsahem lithia se pevnost slitin Mg-Li snižuje, avšak modul pružnosti a mez kluzu v tlaku je vyšší než u většiny hořčíkových slitin. Nedostatkem hořčíkových slitin s lithiem je velká reaktivita komponent v roztaveném stavu, malá odolnost proti tečení a nestabilita mechanických vlastností za pokojových teplot. [1]

Výroba těchto slitin je provázena řadou metalurgických problémů spočívajících zejména v rozdílné teplotě tání obou kovů, rozdílu měrných hmotností a rozdílu tenze par. [13]

1.5. Označování hořčíkových slitin

Písmeno	Legující prvek
A	hliník (Al)
C	měď (Cu)
E	kovy vzácných zemin (RE)
H	thorium (Th)
K	zirkonium (Zr)
L	lithium (Li)
M	mangan (Mn)
Q	stříbro (Ag)
S	křemík (Si)
W	yttrium (Y)
Z	zinek (Zn)
X	vápník (Ca)
J	stroncium (Sr)

Hlavní rozdělení	
F	Podle technologie výroby
O	Žíhání a rekystalizace (jen kované produkty)
H	Deformační zpevnění
T	Tepelné zpracování
W	Rozpouštěcí žíhání

Podskupina H	
H1 , plus 1 nebo více číslic	Jen deformačně zpevněná slitina
H2 , plus 1 nebo více číslic	Deformačně zpevněná a částečně žíhaná
H3 , plus 1 nebo více číslic	Deformačně zpevněná a stabilizovaná

Podskupina T	
T1	Ochlazení a přirozené stárnutí
T2	Žíhání (jen produkty lité)
T3	Rozpouštěcí žíhání a deformace za studena
T4	Rozpouštěcí žíhání
T5	Ochlazení a umělé stárnutí
T6	Rozpouštěcí žíhání a umělé stárnutí
T7	Rozpouštěcí žíhání a stabilizace
T8	Rozpouštěcí žíhání, deformace za studena a umělé stárnutí
T9	Rozpouštěcí žíhání, umělé stárnutí a deformace za studena
T10	Ochlazení, umělé stárnutí a deformace za studena

Označování Mg slitin dle ASTM

Př.

AZ31 C – H1

jen deformačně zpevněná slitina
 běžná čistota
 legující prvky Al (3 %) a Zn (1 %)

Označování Mg slitin dle EN

Př.

EN M C MgAl3Zn1 (A)

speciální verze
 hlavní součásti a složení
 C – lití, B – ingot
 Magnesium – hořčík

1.6. Výrobky z hořčíkových slitin

V současné době jsou kladeny vysoké nároky na vývoj a uplatnění slitin, které musí splňovat větší nároky na mechanické vlastnosti za současné nejefektivnější a ekonomičtější výroby těchto slitin. Proto mají hořčíkové slitiny největší využití v hromadné výrobě, jako jsou „elektrony“, profesionální rámy horských kol, korpusy laptopů, atd (obr. 3 a 4).



Obr. 3 Hořčíkový korpus laptopu [11]



Obr. 4 Disk vyrobený ze slitiny elektron [12]

2. TECHNOLOGIE ZPRACOVÁNÍ HOŘČÍKOVÝCH SLITIN

2.1. Technologie zpracování hořčíkových slitin tvářením

Tvářitelnost je schopnost materiálu plasticky se deformovat, aniž dojde k jeho porušení. Tvářitelnost je možné ovlivnit chemickým složením, zásahem do krystalické struktury, ale i řadou technologických či konstrukčních opatření, jako je zvýšená teplota tváření či tváření všestranným tlakem.

Při tváření za tepla je nutné dosáhnout během dynamické rekrytalizace stabilní homogenní struktury.

Vytvoření jemnozrnné struktury je možné dosáhnout různými způsoby:

1. válcováním za studena a za tepla s tepelným zpracováním, které vyvolá rekrytalizaci
2. protlačováním za tepla s vysokým stupněm redukce
3. zpracováním Mg slitin v práškové podobě za tepla
4. vyvozením vysokého stupně plastické deformace smykovou deformací, opakovaným protlačováním, metodou ECAE (Equal Channel Angular Extrusion) či též technologií nazývanou ECAP (Equal Channel Angular Pressing).

Nejperspektivnější metodou použitelnou v průmyslovém měřítku se jeví válcování desek či tlustých plechů. [3]

1. *Válcování* – obvykle se provádí za tepla, vstupním polotovarem je ingot ve tvaru desky, získaný zpětným protlačováním. Například slitina AZ31 byla experimentálně protlačována při 250 °C, zatímco slitina AZ61 s dvojnásobným obsahem hliníku vyžadovala vyšší teplotu (280 °C). Následným opakovaným válcováním protlačené desky ohřáté na 400 °C bylo dosaženo až 75 % redukce tloušťky. [3]
2. *Protlačování* – jedna z nejuniverzálnějších metod pro zpracování všech druhů materiálů, neboť umožňuje vyvození všestranné tlakové napjatosti. Je možné jej realizovat ve velkém rozmezí teplot. Protlačováním se vyrábějí jak polotovary, určené pro další zpracování, tak hotové výrobky, jakými jsou např. tenkostěnné profily. Volbu metody protlačování ovlivňuje tzv. technologické okno – kombinace podmínek, při kterých nedochází ke vzniku zmetků, např. vnitřních prasklin. Výhodné je využití této metody při výrobě profilů (jak plných, tak dutých, uzavřených i otevřených) z neželezných kovů. V případě dutých profilů z těchto materiálů je ve srovnání s ocelovými profily možné dosáhnout stejné tuhosti v ohybu při značně redukované hmotnosti. V případě náhrady hliníkových slitin hořčíkovými lze dosáhnout až 15 % úspory hmotnosti. Například firma LKR řešila výrobu kolejnic pro schránky v letadle A380 Airbus (dosud vyráběné z hliníkové slitiny AW–6061) protlačováním z hořčíkové slitiny AZ31. Výkonnost jednotlivých metod protlačování je dána volbou procesních parametrů (teploty, rychlosti protlačování), případně zavedením speciálních postupů, jako je hydrostatické protlačování (viz dále). Firma Stolfig GmbH z Německa provedla studii zpracování Mg slitiny AZ31B–F různými metodami. Uskutečnila protlačování slabostěnného dutého profilu (výška 63 mm, šířka 119 mm, tloušťka 1,9 mm), který je použit pro výrobu prototypu vozidla firmy Volkswagen VW-1 litr se spotřebou 1 litru na 100 km. [3]

3. *Kování* – kovatelnost Mg slitin je ovlivněna jejich fyzikálními vlastnostmi (tepelná vodivost, citlivost na deformační rychlost, homogenní jemnozrná struktura). Horní kovací teploty jsou ve srovnání s ocelí relativně nízké (do 400 °C), pro konkrétní slitinu to je obvykle 55 °C pod teplotou solidu. Pro většinu slitin je nutné dodržet úzké rozmezí kovacích teplot a relativně vysokou teplotu předehřevu zápuštěk (260 až 345 °C). Obvykle nelze kovat na více operací a prodlužovat tím dobu kování, neboť setrvání na vyšší teplotě způsobuje rychlý pokles pevnosti Mg slitin. Hrozí zde nebezpečí zhrubnutí zrna, a proto je nutné realizovat co největší deformaci v jedné operaci. Ohřev se provádí indukčně, v plynových nebo elektrických pecích s nucenou cirkulací inertní atmosféry (popř. vzduchu). Je nezbytně nutné rovnoměrné prohřátí polotovaru. Volba atmosféry závisí na typu kované slitiny. Pro kování se nejčastěji používají hydraulické lisы nebo pomaluběžné mechanické lisы. V případě kování na bucharech je nebezpečí praskání za tepla. Kovací tlaky při horních kovacích teplotách jsou zhruba dvojnásobné než u nízkouhlíkových ocelí. Pro návrh technologie i tvaru nástrojů je nezbytné využití numerické simulace. [3]
4. *Hluboké tažení* – nejčastější operací zpracování plechů hořčíkových slitin je tažení. Vzhledem k jejich špatné tvářitelnosti je však možné při tváření za studena dosáhnout pouze mělkých tvarů. Proto jsou rozvíjeny různé varianty tváření za tepla, např. izotermické tváření. Základním problémem při tváření za tepla je ohřev materiálu a udržení vhodného rozmezí tvářecích teplot po celou dobu tváření. Využívání numerické simulace pro návrh a ověření konstrukce nástroje či technologických podmínek je pro úspěšné řešení nezbytnou podmínkou. Kromě pevného tažníku je možné tvářet i tlakem plynu. Kritickým parametrem je zde průběh zvyšování tlaku plynu v závislosti na průběhu tažení. [3]
5. *Speciální metody* – v případě plošného (ale i objemového) tváření je v literatuře zmiňována možnost superplastického tváření. Materiál v tomto stavu vykazuje vysokou tažnost (až 1000 %). Nezbytným předpokladem je dostatečně jemnozrná struktura (pod 10 μm), velmi pomalá rychlost tváření a úzké rozmezí tvářecích teplot. [3]
6. *Hydrostatické protlačování* – při hydrostatickém protlačování je přímý kontakt průtlačníku s materiálem nahrazen působením vysokotlakého média na volný povrch tvářené součástky. Povrch polotovaru je nejčastěji obroben za účelem minimalizace povrchových vad. Polotovar je předehříván na teplotu 250–350 °C a následně vložen do kontejneru s vysokotlakou kapalinou. Pohybem pístu dochází v polotovaru k vytvoření všestranného tlaku a materiál je protlačován profilovým otvorem dutiny. Jako protlačovacích zařízení se používá hydrostatických lisů se speciálním nářadím. Tato technologie je vhodná i pro zpracování dalších materiálů např. některých slitinových ocelí, slitin Al, slitin Cu a kompozitů, tj. materiálů, které jsou díky své křehkosti jinak obtížně zpracovatelné. Protlačováním Mg slitin se nejčastěji vyrábí profily T, L, H, tyče kruhového průřezu, ale i trubky a plechy. Proces hydrostatického protlačování má řadu výhod, např. eliminaci tření mezi vzorkem a nástrojem (kontejnerem), laminární tečení materiálu, rozměrovou přesnost atd. Tato technologie má ale i své nevýhody: nástroj musí být kónický, zbytky použitého vysokotlakého média ulpívají na povrchu výrobku, dutina musí být symetrická. [3]

7. *Thixocasting* – jde o tváření v "kašovitém" (semi-solid) stavu, nazývané též tixotváření. Podstatou je tváření polotovaru, který je po ohřevu na tvářecí teplotu v částečně kapalném a částečně v tuhém skupenství. Tvářený polotovaz vykazuje tixotropní chování. Thixocasting je tedy technologie, při které je speciálně připravený polotovaz tváren a výsledkem je přesný konečný tvar výrobku, který může být geometricky velmi členitý. Teploty ohřevu polotovaru jsou vyšší než pro již uvedené technologie zpracování. Polotovaz je ohříván indukčním ohřevem s následným vložením do předehřáté dutiny zápustky. Kašovité materiál v průběhu kování teče do dutiny zápustky plynuleji, než kdybychom součást vyráběli tlakovým litím. Polotovaz je tváren na hydraulických lisech v uzavřené nebo otevřené dutině zápustky. Náklady na výrobu součásti pomocí thixocastingu nejsou zatím konkurenceschopné vůči výrobě součástek vyrobených pomocí metod přesného lití. [3]

Výhodou použití metody thixocasting je minimální stahování kovu a velmi malý výskyt mikrostaženin, dále nízký obsah plynů, takže prakticky nehrozí vznik plynových dutin, jemná, stejnoměrná struktura a velmi dobré mechanické vlastnosti. [6]

8. *Tažení plechů* – plechy Mg slitin se zpracovávají za vyšších teplot. Ohřev je pro materiál do tloušťky 0,5 mm většinou prováděn v nástroji (u větších tlouštěk klesá produktivita). Nejčastějším výrobkem je válcový kalíšek nebo čtyřhranná nádoba, ohřev je prováděn v oblasti příruby sevřené mezi tažnicí a přidržovačem na teplotu v rozmezí 250–400 °C (dle použité slitiny). V oblasti dna výtažku v průběhu tažení dochází k intenzivnímu ochlazování. Jako ochlazovací médium se nejčastěji používá voda. Pro větší tloušťky plechu se používá elektrická nebo indukční pec, v nástroji se teplota pouze udržuje. [3]

2.2. Technologie zpracování hořčíkových slitin odléváním

2.2.1. Odlévání do netrvalých forem

A) *Lití do pískových forem* – odlévání do pískových forem je velmi flexibilní metodou, která je vhodná pro všechny hmotnostní kategorie odlitků. Používá se především pro kusovou a malosériovou výrobu menších odlitků, pro něž by bylo zhotovení kovových forem neekonomické.

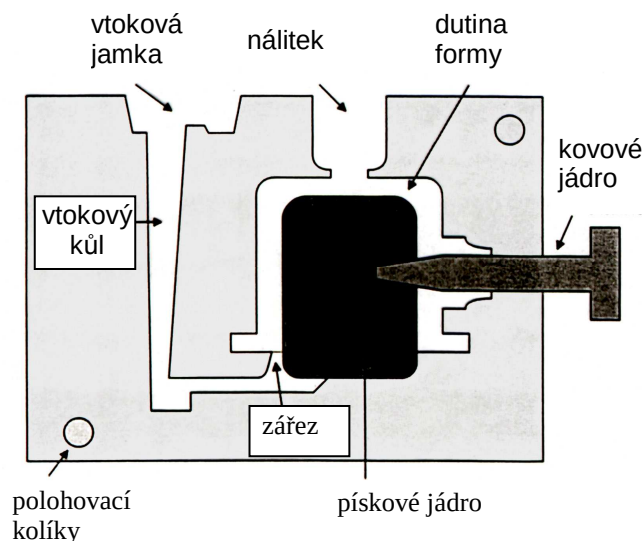
B) *V-proces* – je metodou, která se ve světě uplatňuje ve stále větší míře pro výrobu tvarově složitých odlitků s vnitřními dutinami, které by bylo nutno vyrobít komplikovanými jádry. Typické je použití v automobilovém průmyslu.

C) *Lití do skořepinových forem* – metoda lití do skořepinových forem, vyrobených metodou vytavitelného modelu. Pro výrobu forem se obvykle používá křemenná keramika. Odlitky mají vysokou přesnost, řadu rozměrů je možno předlévat „nahotovo“. [6]

2.2.2. Odlévání do kovových forem

Do trvalých kovových forem se odlévají především odlitky menších až středních rozměrů. Účelnost použití kovových forem je limitována především náklady na jejich zhotovení. Ty jsou, obzvláště při tlakovém lití, velmi vysoké a ekonomická efektivita je podmíněna vysokou sériovostí výroby. [6]

A) *Gravitační lití do kovových forem* – jde o jednoduchou technologii. Formy bývají obvykle zhotoveny odléváním z litiny s lupínkovým nebo kuličkovým grafitem. Formy jsou dvoudílné nebo vícedílné. Jádra mohou být kovová (obr. 5) nebo písková. Písková jádra se používají zejména v těch případech, kdy by kovová jádra nešla z dutiny odlitku vytáhnout. [6]



Obr. 5 Kovová forma s jádry – pohled do dělicí roviny [6]

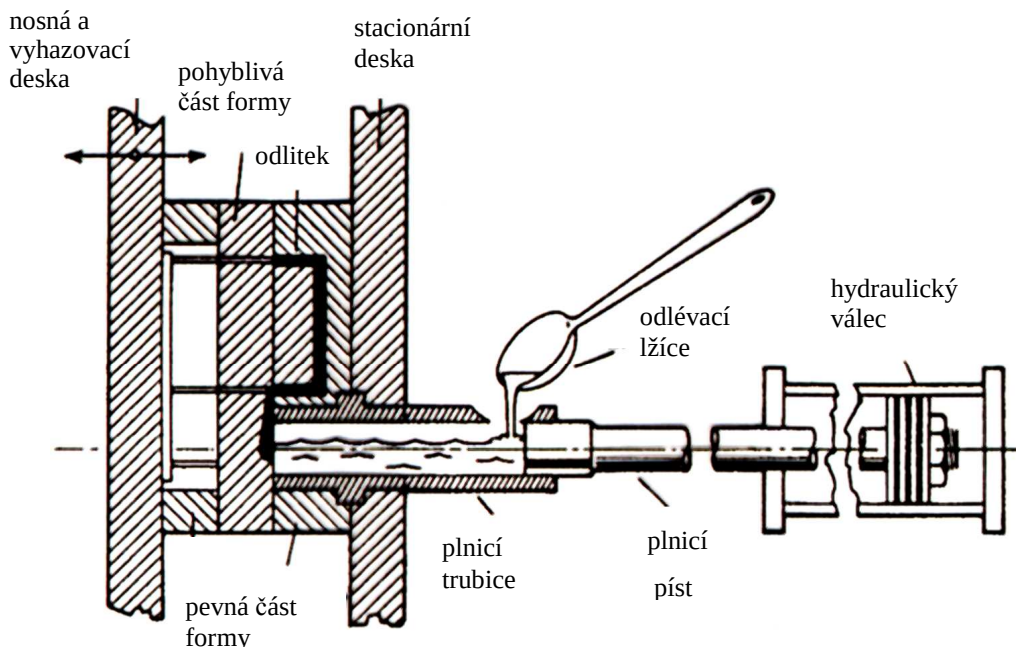
Na odlitcích musí být úkosy alespoň $2-3^\circ$. Hmotnost odlitků je od několika gramů do cca 20–30 kg, výjimečně i více. Kovové formy musí být přehřáté a jejich provozní teplota by se měla pohybovat kolem $200-250^\circ\text{C}$. Chlazení bývá vodní, zalitými chladicími šneky nebo přišroubovanými chladicími deskami. Povrch forem se periodicky ošetřuje nátěry, které zamezují lepení odlitků ke kokile a rozpouštění železa. [6]

B) *Tlakové lití* - principem výroby je vstřikování roztavené slitiny do dutiny kovové formy pod vysokým tlakem až 250 MPa. Za těchto podmínek je možné vyrábět tvarově velmi komplikované odlitky s tloušťkou stěn od přibližně 1–2 mm. Rozměry odlitků jsou velmi přesné – u menších rozměrů lze dosáhnout přesnosti až 0,3–0,5 %. Ve formách lze používat výhradně kovová jádra. Tvar odlitku musí respektovat možnosti rozebrání formy a vytažení volných částí a jader. Velká část otvorů se předlévá. Do forem je před litím možno vkládat kovové zálitky. [6]

Formy se skládají z rámu a vložek, které tvoří funkční část formy, která je přímo ve styku s kovem. Životnost u menších forem dosahuje až 100 000 i více odlití. Vzhledem k nutnosti amortizace ceny forem je technologie tlakového lití vhodná pouze pro vysokosériovou a hromadnou výrobu odlitků.

Maximální velikost odlitků, které se na konkrétním stroji dají vyrobit, je limitována maximální hmotností kovu a uzavírací silou stroje. [6]

Podle konstrukce se tlakové stroje dělí na dva základní typy, se studenou a s teplou komorou. Podle směru pohybu plnicího pístu mohou být stroje se svislou nebo vodorovnou komorou. Slitiny hliníku se v současné době odlévají téměř výhradně na strojích se studenou horizontální komorou. Schéma takového stroje je na obr. 6. [6]

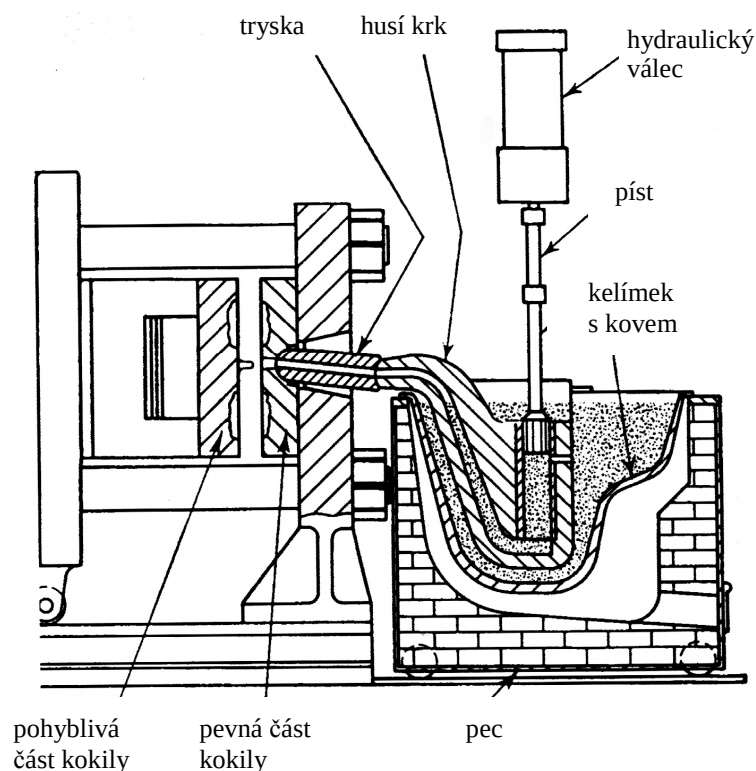


Obr. 6 Horizontální tlakový stroj se studenou komorou [6]

Po ztuhnutí se odlitek z pohyblivé části formy vytlačí pomocí vyhazovačů a odebírá ručně nebo pomocí robota. Následuje ostřížení zateklin a po vychladnutí odlitků jejich konečná úprava. Před dalším licím cyklem se forma nastříká mazací emulzí, která zamezuje nalepování odlitků na formu a usnadňuje jejich vyjímání z formy. V moderních provozech je celý výrobní cyklus automatizován.

Stroje s teplou licí komorou mají plnicí komoru umístěnou pod hladinou kovu v udržovací peci. Jejich výhodou je, že kov se z udržovací do plnicí komory nepřelévá a tak nedochází k jeho oxidaci. Schematicky je znázorněn na obr. 7.

Slitiny pro tlakové lití mají obsah železa zvýšený na přibližně 1 % i více, aby se omezil sklon k nalepování kovu na formy. [6]

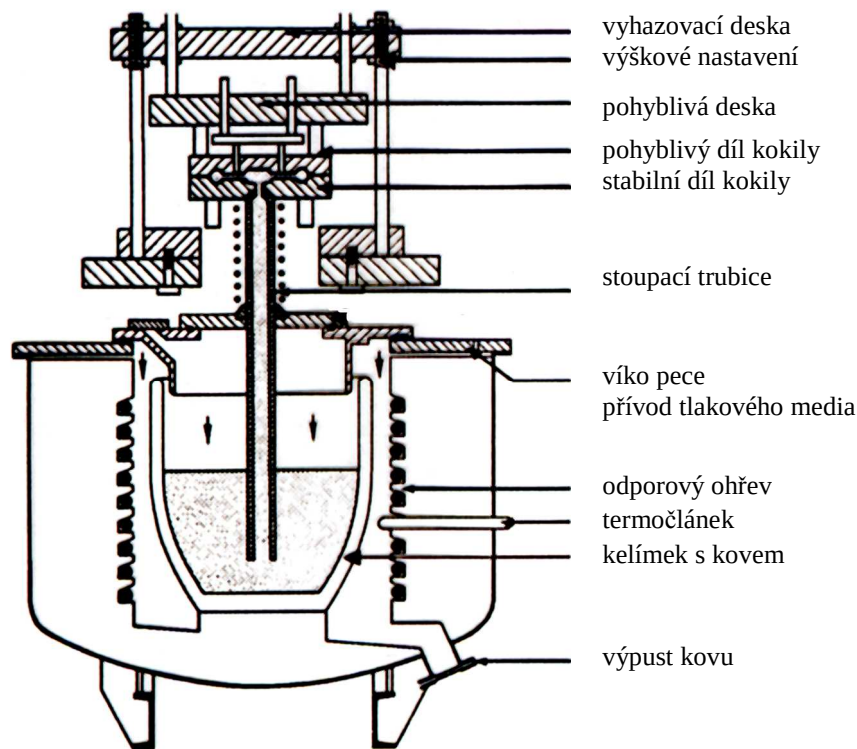


Obr. 7 Tlakový stroj s teplou komorou [6]

Tlakově lité odlitky nejsou, co se týče vnitřní homogenity, příliš kvalitními výrobky. Výrazného zlepšení situace se dosahuje při lití do vakuovaných forem.

K zajištění konstantní kvality výroby je nutno udržovat v poměrně úzkém rozmezí teplotu forem. V každé formě je vytvořen systém kanálů, které slouží před zahájením výroby k ohřevu forem, během výroby pak k chlazení. [6]

C) *Nízkotlaké lití* – stroj pro nízkotlaké lití je tvořen tlakotěsnou udržovací pecí, nad kterou je namontována dělená kovová forma, obvykle s vodorovnou dělicí rovinou. Tavenina v kelímku pece je se spodním dílem formy propojena stoupací trubicí ze žáruvzdorného materiálu tak, že trubice spodním okrajem zasahuje pod hladinu kovu (obr. 8). [6]



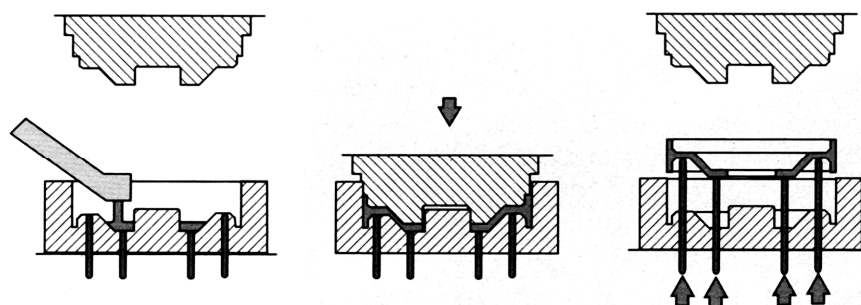
Obr. 8 Schéma stroje pro nízkotlaké lití [6]

Odlévání se provádí zvýšením tlaku nad hladinou kovu, čímž je kov z kelímku vytlačován stoupací trubicí vzhůru do formy. Protože je ústí stoupací trubice ponořeno pod vrstvu oxidů a nečistot na hladině pece, vstupuje do formy čistý kov bez vměstků. Rychlost stoupání kovu je regulována nárůstem tlaku tak, aby plnění bylo naprosto klidné. Působením tlaku se do tuhnoucího odlitku průběžně doplňuje kov, takže vtok působí současně jako nálitek. Přetlak se v peci ponechá po celou dobu tuhnutí odlitku, pak se zruší a kov ze stoupací trubice samovolně vyteče zpět do kelímku pece. Po rozevření formy se odlitek vyhazovači vytlačí z pohyblivé části formy. [6]

Kvalita odlitků, vyrobených touto metodou, je velmi vysoká. V odlitcích je minimum vměstků i plynových dutin a vyznačují se proto vynikající těsností vůči tlakovým mediím. [6]

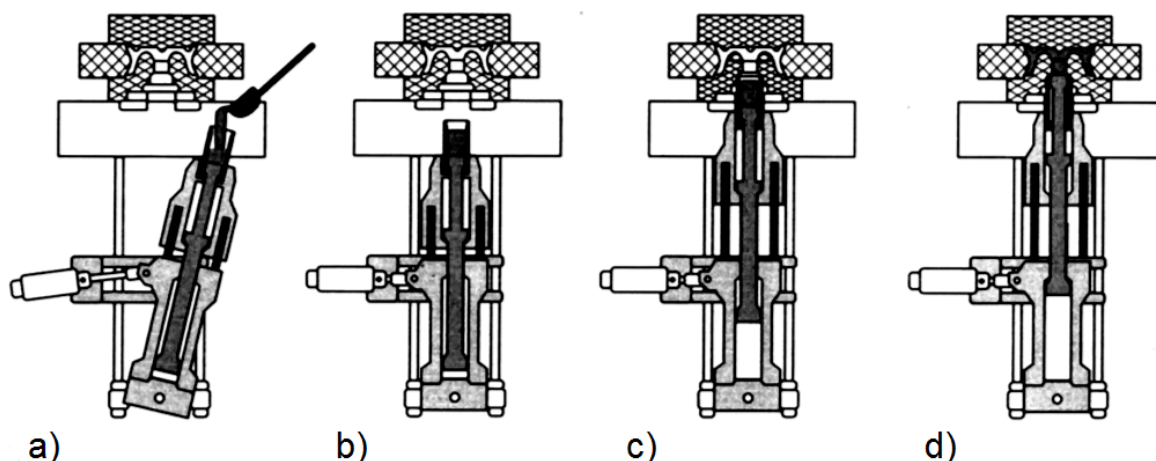
D) Lití s krystalizací pod tlakem – Squeeze Casting – metoda je progresivní, dosud málo rozšířenou metodou lití do kovových forem, která v sobě kombinuje výhody pomalého plnění formy a vysokého tlaku během tuhnutí. Podle způsobu provedení se provádí tzv. přímý nebo nepřímý squeeze casting. [6]

Přímý squeeze casting – přesně odměřená dávka kovu se volně nalije do spodní části kovové formy, připomínající raznici. Kov se uzavře a stlačí horní částí formy (razníkem). Tlak působí po celou dobu tuhnutí (obr. 9). Po ztuhnutí se odlitek pomocí vyhazovačů vytlačí z formy. Metoda je vhodná pro výrobu relativně masivních odlitků. [6]



Obr. 9 Výrobní postup při přímém squeeze castingu [6]

Nepřímý squeeze casting – připomíná způsob tlakového lití se studenou komorou. Kov se dává do komory lisu pod vlastní kovovou formou (obvykle je válec s komorou výklopný (obr. 10a). Válec se vrátí do pracovní polohy (obr. 10b) a kov se velkými zářezy malou rychlostí vytlačuje do formy (obr. 10c). Rychlost proudění kovu je malá, řádově 0,5 m/s (oproti rychlostem kovu v zářezích při tlakovém lití, které jsou řádu několika desítek m/s). Kov proto proudí laminárně, nedochází k jeho víření a oxidaci. Lisovací tlak až 150 MPa působí během celé doby tuhnutí (obr. 10d). [6]



Obr. 10 Schéma nepřímého squeeze castingu [6]

Vedle všech výhod, spojených s klidným plněním forem, dochází u metod lití s krystalizací pod tlakem k dalším významným efektům: [6]

- 1) Výrazně se zvyšuje intenzita přestupu tepla z kovu do formy (zvýšení součinitele přestupu tepla je oproti gravitačnímu lití řádové). Tlak zamezuje vzniku mezery mezi odlitkem a formou, proto je ochlazování intenzivní po celou dobu tuhnutí.
- 2) Vysoká rychlost tuhnutí vede ke vzniku jemnozrné struktury, zmenšuje se i velikost intermetalických fází. Rovněž morfologie fází bývá příznivější.
- 3) Odlitky neobsahují plynové dutiny.
- 4) Téměř se zamezuje vzniku mikrostaženin.
- 5) Zvyšuje se přesnost odlitků.

Výsledkem těchto příznivých vlivů je zvýšení mechanických vlastností a vnitřní homogenity odlitků. Nevýhodou metody je zejména značná investiční i provozní náročnost. Určitou modifikací této metody je vytvoření místního dotlaku speciálním trnem při klasickém tlakovém lití. [6]

3. TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

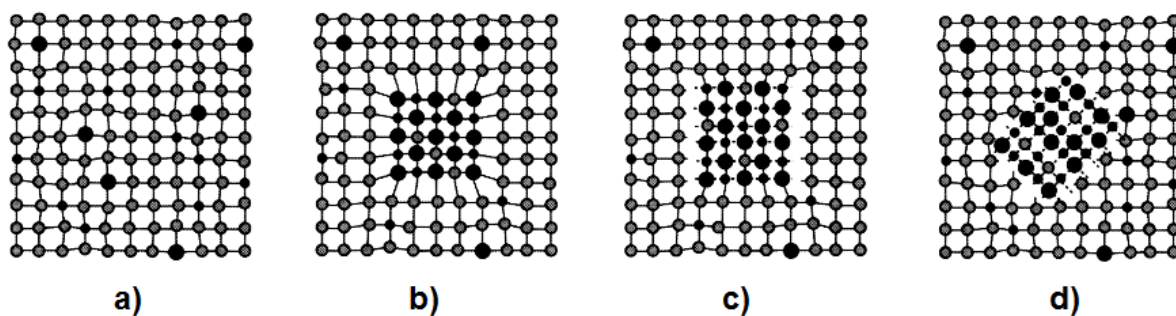
Ve srovnání se slitinami hliníku jsou při tepelném zpracování slitin hořčíku nutné podstatně delší doby výdrže na teplotách (až 16 h), protože difúzní pochody ve slitinách hořčíku probíhají mnohem pomaleji. Stárnutí hořčíkových slitin je možné pouze umělé.

Tepelné zpracování odlitků z hořčíkových slitin se provádí většinou v elektrických komorových pecích, někdy též vakuových. Jsou to pece s automatickou regulací teploty s přesností $\pm 5^\circ\text{C}$ a nuceným oběhem atmosféry. Pro zamezení oxidace se doporučuje atmosféra vzduch s 0,7 hm. % až 1 hm. % oxidu siřičitého.

Ohřev odlitku ze slitin hořčíku lze provádět i v taveninách solí, ve směsi dvojchromanu sodného a draselného. Pro nebezpečí exploze a otravy jsou dusičnany a kyanidy zakázány. Způsob tepelného zpracování závisí na složení slitiny a na požadovaných konečných vlastnostech součástí:

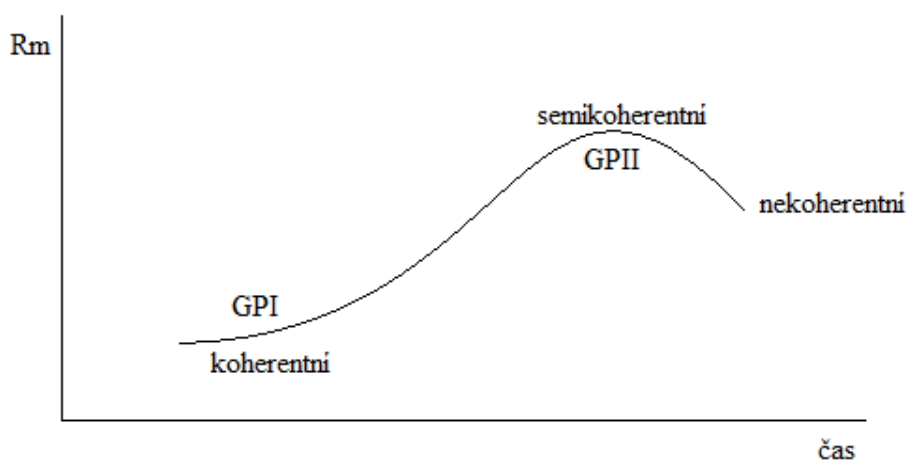
- *Homogenizační žíhání* slouží k odstranění nerovnovážného rozdělení přísadových prvků v objemu slitiny po krystalizaci a tím ke zlepšení pevnostních a tvárnostních charakteristik odlitků. [2]
- *Žíhání ke snížení vnitřního pnutí tvářených slitin* se používá ke zmírnění nebo odstranění zbytkových pnutí indukovaných ve tvářených hořčíkových výrobcích po tváření za studena i za tepla, obrábění, lisování, tažení a svařování. Při svařování tvrdých válcovaných plechů by měly být použity nižší žíhací teploty a delší doba chladnutí, aby nedocházelo k jejich zkroucení, např. 150°C po dobu 60 minut. [10]
- *Žíhání ke snížení vnitřních pnutí odlévaných slitin* je přesné obrábění odlitků k jejich rozměrovým limitům, nutnost vyhnout se deformačnímu stárnutí a zkroucení, a prevence korozního praskání ve svařovaných hořčíko-hliníkových a prevence korozního praskání ve svařovaných hořčíko-hliníkových odlévaných slitinách způsobuje to, že z odlévaných komponent je nutné důkladně odstranit vnitřní pnutí. Ačkoli hořčíkové slitiny nejsou zpravidla náchylné ke vzniku vlastních pnutí, nízký modul pružnosti hořčíkových slitin umožňuje, že poměrně nízký tlak může způsobit patrnou elasticko-plastickou deformaci. Vlastní pnutí mohou vznikat smršťováním v důsledku omezení tvarem formy v průběhu tuhnutí, nestejnoměrným chladnutím po tepelném zpracování nebo po kalení. Strojní operace mohou mít také za následek vznik vnitřních pnutí, které vyžadují žíhání před finálním opracováním. [10]
- *Rekrystalizační žíhání* má menší význam, protože většinu slitin hořčíku lze tvářet pouze za tepla. Provádí se jako mezioperace při tváření slitin hořčíku za studena. Obvykle se používá teplota 250 až 350°C . Za vyšších teplot dochází k hrubnutí zrna a zhoršení mechanických vlastností. [2]
- *Rozpouštěcí žíhání a stárnutí* – při rozpouštěcím žíhání hořčíko-hliníko-zinkových slitin by součásti měly být vkládány do pece při teplotách kolem 260°C . Poté je teplota pozvolna zvyšována na teplotu rozpouštěcího žíhání, tak aby se zabránilo natavení eutektických komponent, které by mohly vést ke vzniku pórů. Doba takového ohřevu závisí na velikosti a složení dané vsázky, ale běžně se pohybuje kolem dvou hodin. [10]
- *Precipitační vytvrzování* – precipitačním žíháním rozumíme proces (obr. 11), při kterém dochází k postupnému rozpadu tuhého roztoku. Při stárnutí dochází k difúzi přísadového prvku do mikroskopických oblastí bohatších na tento prvek a v nich k nukleaci nové fáze. Růstem těchto zárodků vznikají koherentní precipitáty, které se označují jako Guinier–Prestonovy zóny. Koherentnost znamená, že tyto oblasti jsou součástí krystalické mřížky tuhého roztoku, jehož mřížku poněkud deformují a

vyvolávají v ní vnitřní pnutí, která jsou příčinou zvýšení pevnosti a tvrdosti slitiny [10].



Obr. 11 Vyloučení precipitační fáze: a) tuhý roztok, b) koherentní precipitát, c) semikoherentní precipitát, d) nekoherentní precipitát [6]

V dalším průběhu se koherence postupně ztrácí. Slitiny obvykle po vytvrzení obsahují koherentně až semikoherentně vyloučenou vytvrzující fázi (obr. 12). Podle pohyblivosti atomů vytvrzujícího prvku může k precipitačnímu vytvrzování docházet již za normální teploty nebo až za teplot zvýšených. [6]



Obr. 12 Postup koherence v materiálu

Zvláštností je možnost ochlazování slitin hořčíku z teploty rozpouštěcího ohřevu volně na vzduchu nebo ve vřelé vodě. U některých slitin se doporučuje provádět umělé stárnutí bez předchozího rozpouštěcího ohřevu. [2]

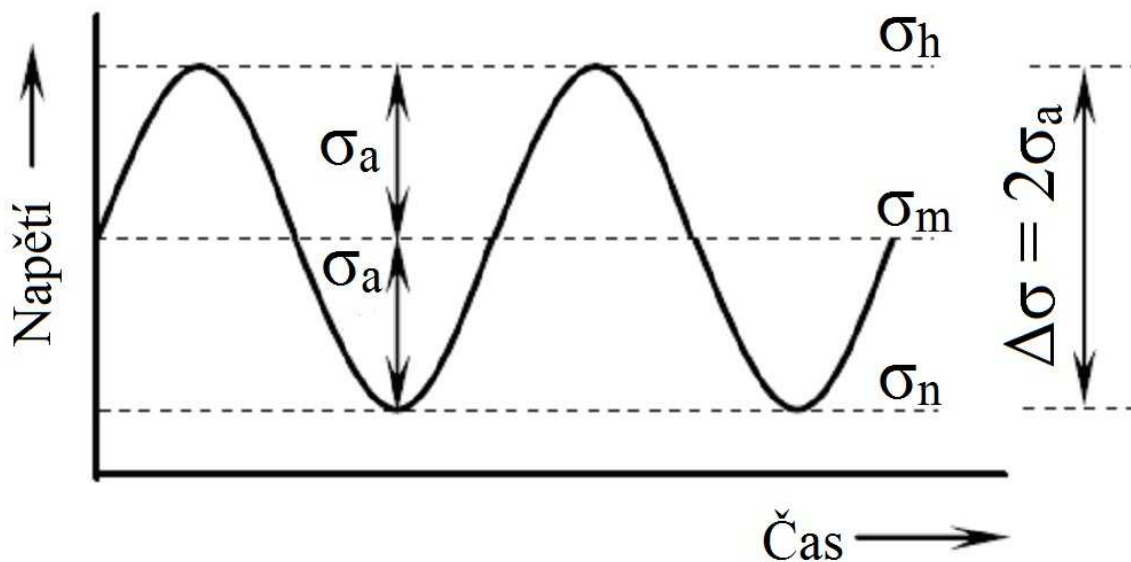
4. ÚNAVA MATERIÁLU

Únava neboli cyklické zatěžování materiálu je proces změn strukturního stavu materiálu a jeho vlastností vyvolaný cyklickým (kmitavým) zatěžováním. Přitom nejvyšší napětí je menší než mez pevnosti R_m . V materiálu dochází k hromadění poškození, které se v závěru projeví růstem makroskopické trhliny a únavovým lomem. Většinou vzniká iniciace na povrchu.

Strojní součásti jsou v praxi vystaveny nahodilému průběhu zatěžování. Tento průběh je často zjednodušován. Nejčastější náhradou je pak sinusový průběh zatížení.

Rozlišujeme dva módy zatěžování: tvrdý a měkký. Při měkkém módu je řízenou veličinou síla, případně smluvní nebo skutečné napětí. Pokud probíhá zatěžovací proces tak, že řízenou veličinou je deformace, mluvíme o tvrdém módu zatěžování. Časový průběh řízené veličiny je v tomto případě pilovitý (u měkkého módu sinusový).

Závislost průběhu a označování jednotlivých napětí, používaných při měkkém únavovém zatěžování, je naznačeno na obr. 13 a jsou to amplituda napětí (σ_a), střední napětí (σ_m), horní napětí (σ_h) a dolní napětí (σ_n) a rozkmit $\Delta\sigma$. [16].



Obr. 13 Napětí při zatěžování [17]

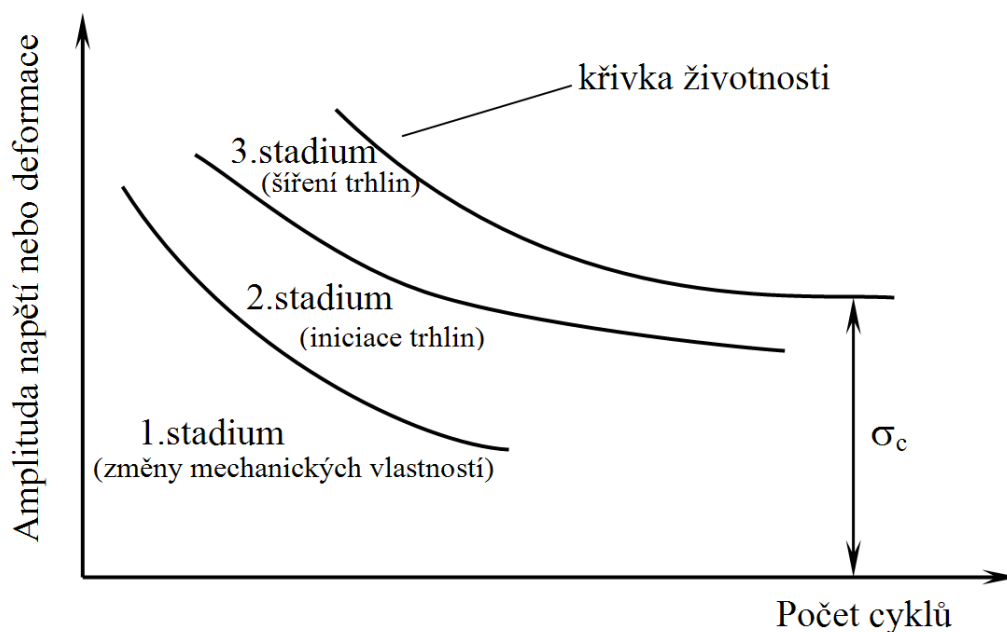
Pro popis asymetrie zátěžného cyklu se využívá dvou parametrů. Jedna se o parametr R , což je napětíový poměr, a parametr P , což je amplitudový poměr. Tyto parametry jsou určeny:

$$\begin{aligned} R &= \sigma_n / \sigma_h \\ P &= \sigma_h / \sigma_a \end{aligned} \quad (1)$$

Pro tyto parametry platí, že pro symetrický cyklus bude $R = -1$ a $P = 1$.

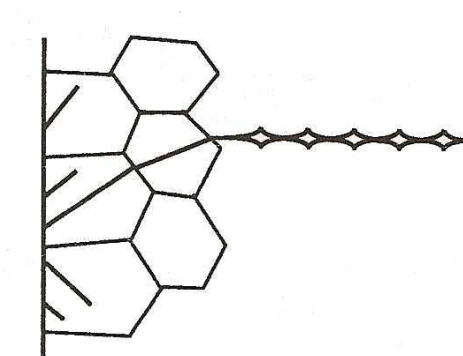
Na obr. 14 jsou schematicky naznačeny stádia únavového procesu. Tato stádia přecházejí plynule z jednoho do druhého a neexistuje mezi nimi jasná hranice [15]. V prvním stádiu dochází ke změnám mechanických vlastností, tj. cyklické změkčení, zpevnění, či stabilní stav. Dochází zde ke změně uspořádání a hustotě mřížkových poruch. Druhé stadium

je charakterizováno nukleací trhlin a vzniku mikrotrhlin v důsledku hromadění napětí a deformace. Ve třetím stádiu se tyto mikrotrhliny šíří a přecházejí v magistralní trhlinu. Ta se dále šíří až dojde k překročení kritického napětí a vyústí v únavový lom.



Obr. 14 Stadia únavového procesu [17]

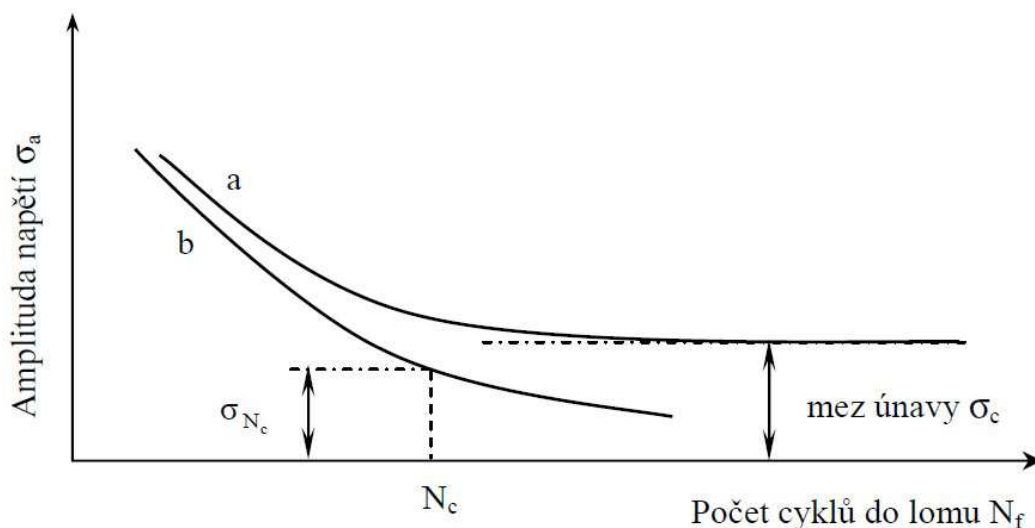
Stádium šíření únavových trhlin, které je schematicky zaznačeno na obr. 15, můžeme rozdělit na 2 části. V první probíhá šíření trhlin krystalograficky pod úhlem 45° na působící napětí. A druhé stádium, kdy se trhlina stočí kolmo ke směru působícího napětí a její šíření můžeme popsat pomocí lomové mechaniky. [16]



Obr. 15 Šíření únavové trhliny [18]

4.1. Wöhlerova křivka

Je jednou ze základních únavových charakteristik. Jde o závislost mezi počtem cyklů do lomu (N_f) a amplitudou napětí (σ_a), kdy N_f se vynáší do logaritmických souřadnic. Wöhlerova křivka (obr. 16) nám umožňuje vyčíst mez únavy. Tou je amplituda napětí (σ_c), u které ani při vysokém počtu cyklu nedochází k lomu. Pokud se křivka blíží asymptoticky k určité hodnotě amplitudy napětí a stále klesá, používá se časovaná mez únavy (σ_{Nc}) stanovena pro určitý počet cyklů. [16]



Obr. 16 Schéma Wöhlerovy křivky [16]

Pro získání materiálových parametrů σ'_f a b je možné proložit experimentálně získanými daty v logaritmických souřadnicích mocninnou funkcí ve tvaru [15]:

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b; \quad (2)$$

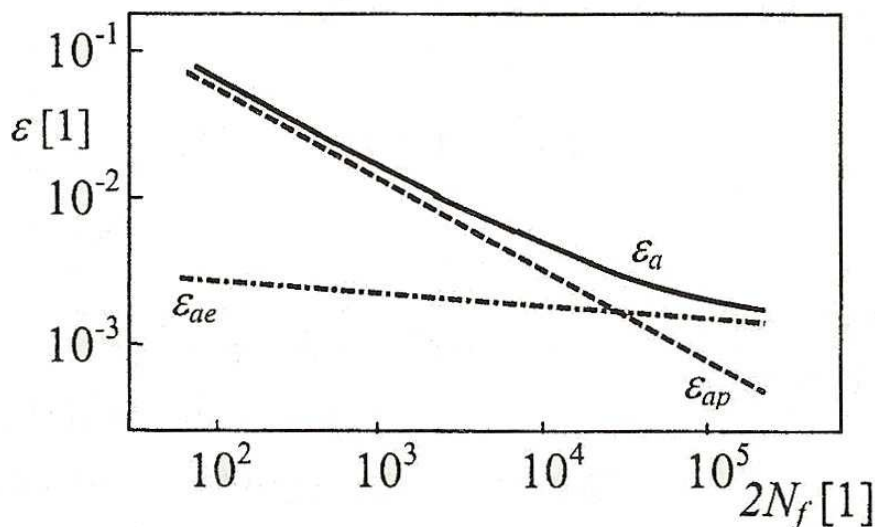
kde σ_a je amplituda napětí, σ'_f je součinitel únavové pevnosti, N_f počet cyklů do lomu nebo do ukončení zkoušky a b je elastický exponent křivky životnosti.

Při pomyslném rozdělení Wöhlerovy křivky do několika oblastí podle počtu cyklů do lomu ji lze dělit na tyto oblasti:

- a) počátek až $10^2 N_f$ – oblast kvazistatické pevnosti v případě symetrického zátěžného cyklu a oblast cyklického creepu při asymetrickém zatížení s tahovým předpětím
- b) 10^2 – $10^4 N_f$ – oblast nízkocyklové únavy
- c) 10^4 – 10^8 (10^9) N_f – oblast vysokocyklové únavy
- d) 10^8 (10^9) N_f a výše – oblast gigacyklové únavy

4.2. Mansonova–Coffinova křivka

Pokud použijeme při provádění únavové zkoušky tvrdý mód zatěžování, tzn. řízenou veličinou je deformace, výsledkem je Mansonova–Coffinova křivka. Vynášenými hodnotami je v tomto případě amplituda plastické deformace v závislosti na počtu cyklů do lomu (obr. 17).



Obr. 17 Mansonova–Coffinova křivka [18]

Tato křivka se skládá z plastické (ε_{ap}) a elastické (ε_{ae}) části. V místě jejich protnutí se nachází tranzitní počet cyklů (N_t).

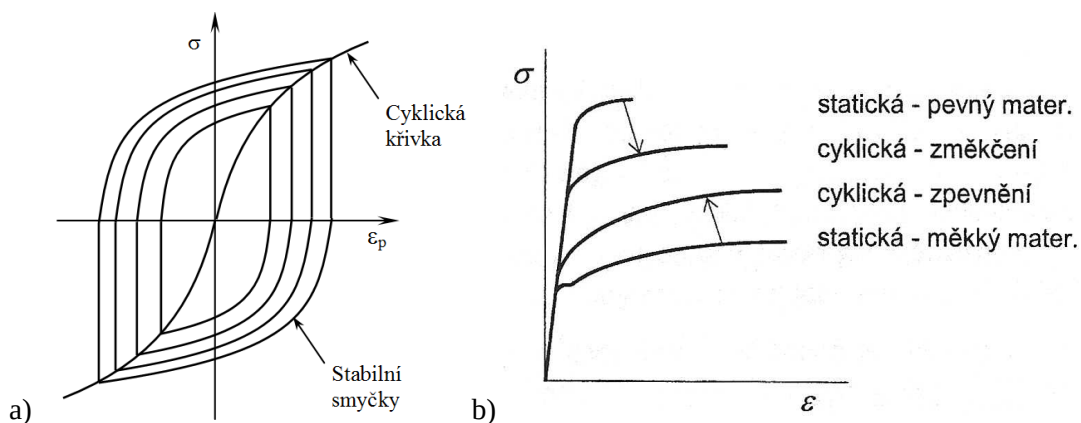
Stejně jako u Wöhlerovy křivky lze také u Mansonovy–Coffinovy křivky získat materiálové parametry. V tomto případě ε'_f a c . Je potřeba experimentálně získanými daty závislosti amplitudy plastické deformace stanové v polovině životnosti na počtu cyklů do lomu proložit mocninovou funkcí [15]:

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon'_f (2N_f)^c; \quad (3)$$

kde ε_{ap} je amplituda plastické deformace, ε'_f součinitel únavové tažnosti (je dán extrapolací ε_{ap} na prvním půlcyklu zatížení), N_f počet cyklů do lomu nebo do ukončení zkoušky a c plastický exponent křivky životnosti.

4.3. Cyklická deformační křivka

Spojením vrcholů několika saturovaných hysterezních smyček pro různé výchozí hodnoty amplitudy napětí σ_a získáváme tuto závislost. Je to důležitá materiálová charakteristika pro popis únavového chování daného materiálu. Jedná se o závislost smluvního napětí na amplitudě celkové poměrné deformace. [16] Pokud porovnáme statickou křivku s cyklickou, zjistíme, zda materiál cyklicky zpevňuje či změkčuje (obr. 18).



Obr. 18 Cyklická deformační křivka a) z hysterezních křivek [17], b) porovnání se statickou křivkou [18]

4.4. Křivky cyklického zpevnění-změkčení

Křivky cyklického zpevnění-změkčení jsou závislostí amplitudy plastické deformace na počtu cyklů v log-log souřadnicích pro různé hodnoty napětí. Amplitudu plastické deformace lze získat změřením šířky hysterezní smyčky v nulové hodnotě napětí. Amplitudě plastické deformace je pak rovna polovina této šířky. [16]

Pro vytvoření křivek je nutné změřit dostatečný počet příslušných hysterezních smyček. Odečítáme vhodně pro následné zanašení do logaritmického měřítka.

Výsledkem vynesení hodnot do grafu je závislost, podle které lze určit, zda materiál cyklicky zpevňuje, nebo změkčuje. Pokud se amplituda plastické deformace zmenšuje, materiál cyklicky zpevňuje. Ke konci vynášené křivky se hodnoty výrazně liší, což je dáno rozevíráním trhliny.

5. CÍL PRÁCE

Bakalářská práce se zaměřuje na studium struktury a vlastností hořčíkové slitiny AZ31 po aplikaci únavového zatěžování. Morfologie vyskytujících se strukturních fází byla hodnocena za použití světelného mikroskopu a rastrovacího elektronového mikroskopu. Fraktografické hodnocení lomových ploch bylo provedeno na stereomikroskopu a rastrovacím elektronovém mikroskopu. Určení chemického složení experimentálního materiálu bylo provedeno pomocí optické emisní spektrometrie s doutnavým výbojem. Křivka nízkocyklové únavy byla stanovena na základě dat získaných z únavově zatěžovacího stroje.

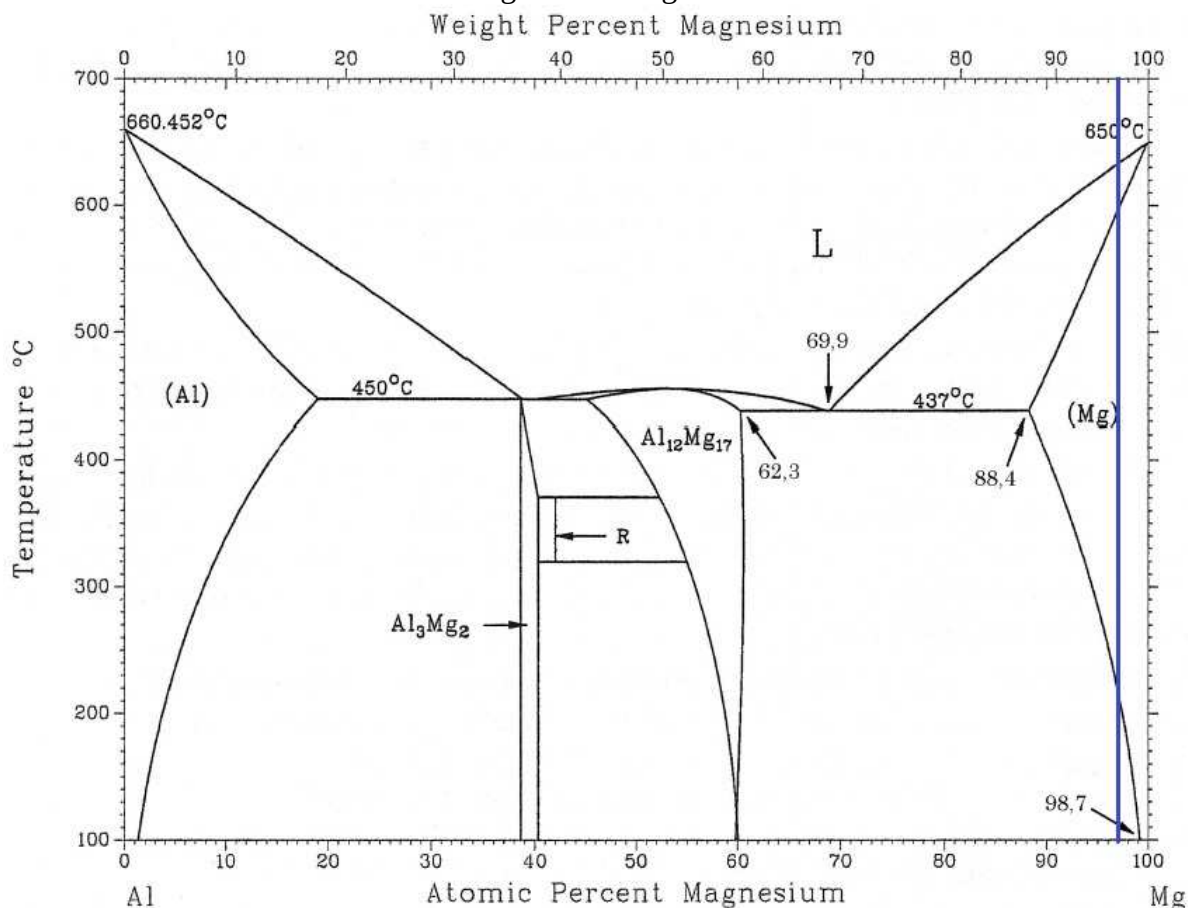
Cíle bakalářské práce:

- 1) Určení chemického složení experimentálního materiálu.
- 2) Stanovení únavových vlastností v oblasti nízkocyklové únavy.
- 3) Kvantitativní a kvalitativní hodnocení morfologie vyskytujících se strukturních fází.
- 4) Fraktografická analýza lomových ploch.

6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

6.1. Experimentální materiál

Jako experimentální materiál byla použita hořčíková slitina AZ31, odlitá metodou squeeze casting bez tepelného zpracování. Na obr. 19 je vyznačené složení zkoušeného materiálu v binárním rovnovážném diagramu Al-Mg.



Obr. 19 Vyznačené složení experimentálního materiálu v BRD Al-Mg [5]

Chemické složení této slitiny je dáno podle ASTM norem. Zkoušený vzorek tomuto složení odpovídá, jak ukazuje tab. 2.

Hořčíkové slitiny s obsahem hliníku do 6 % se tepelně nezpracovávají. Proto tento experimentální vzorek s obsahem 3 % Al ve slitině nebyl tepelně nezpracován.

Prvek	Al [hm. %]	Zn [hm. %]	Mn [hm. %]	Cu [hm. %]	Si [hm. %]	Ni [hm. %]	Fe [hm. %]	ostatní [hm. %]
AZ31B	2,5 – 3,5	0,6 – 1,4	0,2 – 1,0	max 0,04	max 0,1	max 0,005	max 0,005	max 0,3
GDOES	2,98	1,08	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02 Sn

Tab.2 Srovnání chemického složení materiálu dle norem se zkoumaným vzorkem

6.2. Použití experimentální techniky

Hodnocení chemického složení materiálu bylo provedeno za pomoci optické emisní spektrometrie s doutnavým výbojem – GDS 750.

Zkouška únavy materiálu byla provedena na únavovém zatěžovacím zkušebním stroji Instron 8801.

Pro pozorování struktury experimentálního vzorku byl použit světelný mikroskop Olympus GX71 s digitální kamerou DP11. Jde o metalografický mikroskop v převráceném uspořádání využívající pro pozorování viditelnou část spektra elektromagnetického záření. [16]

Vzorek pro světelnou mikroskopii byl postupně broušen brusnými papíry o drsnosti 600, 1200 a 4000. Dále leštěn 3 μm , 1 μm a 0,25 μm diamantovou pastou. Následovalo leptání leptadlem acetic picral (kyselina octová, kyselina pikrová, voda, ethanol).

Dále byly vybrány vzorky pro fraktografické hodnocení lomových ploch. K tomuto účelu jsme využili rastrovací elektronový mikroskop Philips XL30 a stereomikroskop Olympus SZ61.

6.2.1. Únavové zkoušky

Testování bylo prováděno na servohydraulickém testovacím systému Instron 8801 (obr. 20), v módu měkkého zatěžování, tedy řízení amplitudy napětí. Elasticko-plastická odezva byla měřena pomocí citlivého axiálního extenzometru umístěného na zkoušeném vzorku s pracovní velikostí o průměru 6 mm a délce 12,5 mm.

Pro vyšší amplitudy zátěžného cyklu byla zvolena konstantní frekvence $f = 3 \text{ Hz}$ a zkoušky byly řízeny softwarem Instron LCF. Pro nižší amplitudy zátěžného cyklu, tj. pro oblast vysokocyklové únavy byla frekvence zátěžného cyklu zvýšena na frekvenci $f = 20 \text{ Hz}$.



Obr. 20 Zkušební stroj Instron 8801 [16]

6.2.2. Světelná mikroskopie

Pro metalografické potřeby rozdělujeme dvě základní rozdělení mikroskopů: světelné a elektronové.

Světelná mikroskopie využívá viditelné spektrum světelného záření, které má vlnovou délku $\lambda_f = 0,5 \mu\text{m}$.

Metalurgický světelný mikroskop se sestává z objektivu, okuláru, clony a osvětlovacího systému. V tomto případě existují 2 varianty: normální a převrácený (obr. 21).

Pro metalografické účely se využívá převrácený mikroskop, u kterého není nutné zajistit rovnoběžnost pozorované a základní roviny.



Obr. 21 Převrácený mikroskop [20]

Celkové zvětšení:

$$Z_{\text{celk}} = Z_{\text{ob}} \times Z_{\text{ok}},$$

kde Z_{ob} je zvětšení objektivu a Z_{ok} zvětšení okuláru.

(4)

Numerická apertura objektivu:

$$A = n \times \sin \alpha,$$

kde α je poloviční otvorový úhel objektivu a n index lomu prostředí.

(5)

Rozlišitelná vzdálenost:

$$d_{\text{min}} = \lambda / A,$$

kde λ je vlnová délka použitého světla (0,35 až 0,7 μm pro viditelné spektrum).

(6)

Abbeho pravidlo pro stanovení užitečného zvětšení, odvození:

$$Z_{\text{celk. už.}} = d_1 / d_{\text{min}},$$

kde $d_1 = 0,3 \text{ mm}$, což je rozlišitelná vzdálenost lidského oka.

(7)

Prázdné (abnormální) zvětšení:

$$Z_{\text{celk.už.}} > 1000 \times A \quad (8)$$

Minimální zvětšení:

$$Z_{\text{celk.už.}} = (250-500) \times A \quad (9)$$

Hloubka ostrosti:

$$H = d_{\min}/\text{tg}\alpha, \quad (10)$$

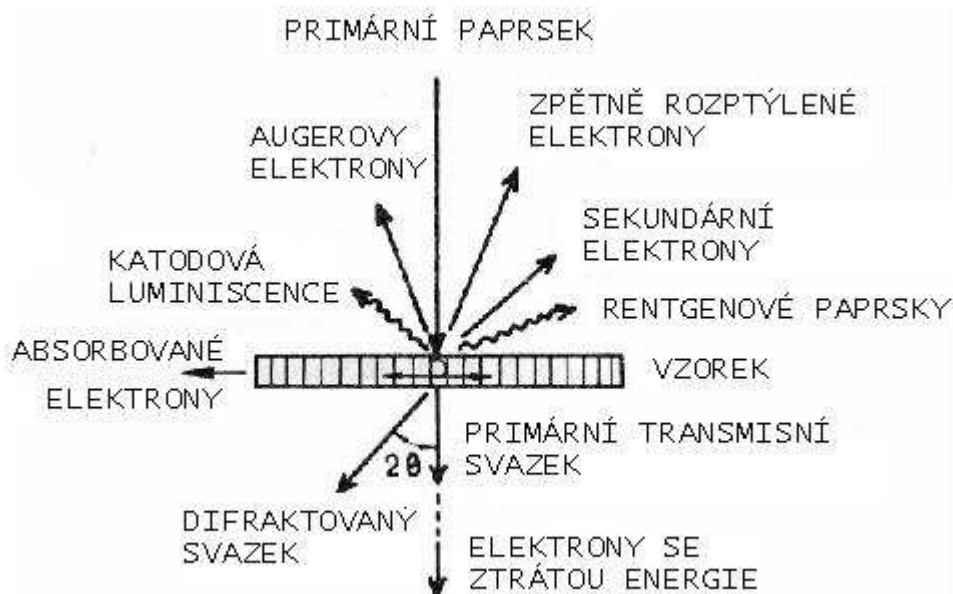
6.2.3. Elektronová mikroskopie

V případě elektronového mikroskopu se používá proud elektronů, které při průchodu elektrostatickým nebo magnetickým polem mění svoji rychlost a směr. Pomocí cívek a válců s elektrostatickým polem lze tvarovat dráhu elektronového paprsku. Elektrony jsou vystřeleny ze zdroje a jsou urychlovány napětím směrem k anodě.

Elektronovou mikroskopii lze dělit podle metody na rastrovací (REM) a transmisní (TEM) elektronovou mikroskopii.

V případě REM závisí rozlišovací schopnost na jeho urychlovacím napětí, které se pohybuje od 1 do 50 kV, při rozlišitelnosti od 3 do 10 nm. Zvětšení je pak 5 až 200 000 ×. Je nutné dosáhnout pracovního vakua v řádu 10^{-5} Pa.

Obrázek 22 ukazuje interakci primárního svazku elektronů se vzorkem.



Obr. 22 Schéma interakce elektronového svazku se vzorkem [19]

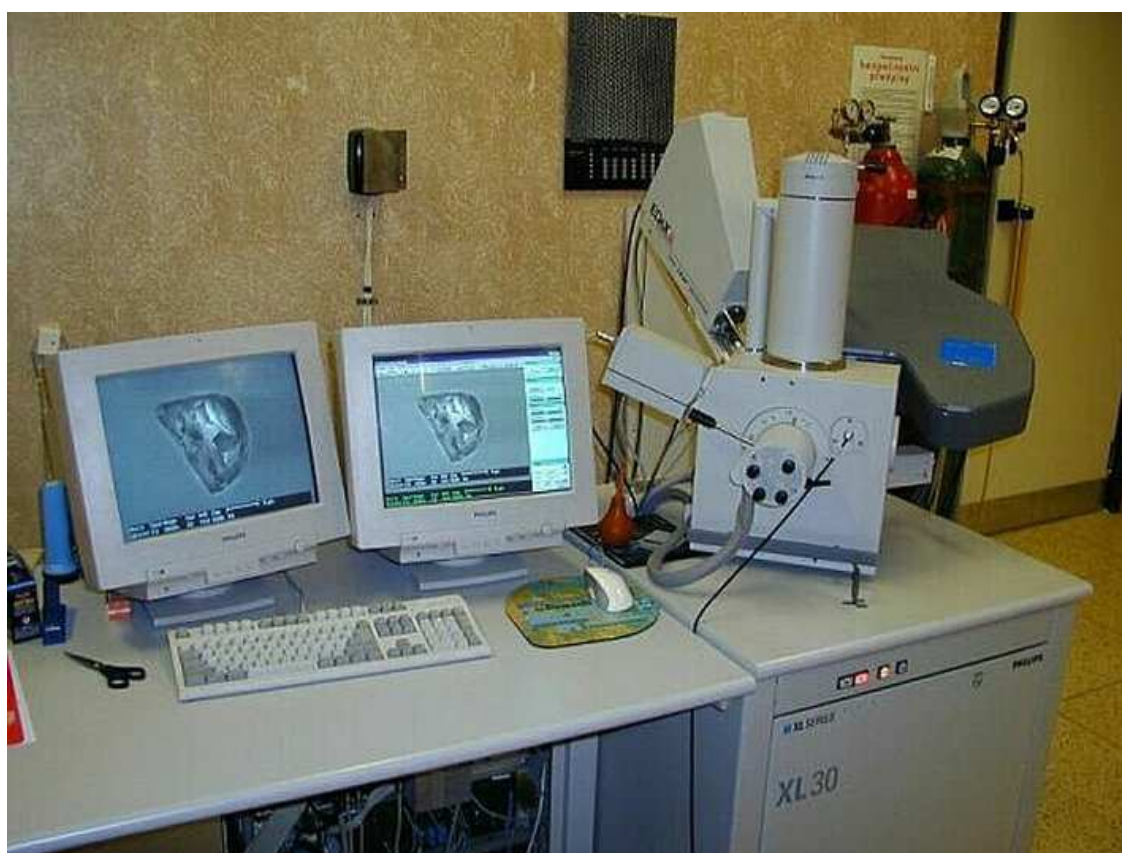
Rastrovacím elektronovým mikroskopem (obr. 23) lze získat dva typy obrazu:

Obraz za využití BSE – citlivý na chemické složení a krystalografii, mají energii téměř shodnou s energií primárního svazku.

Obraz za využití SE – zobrazuje lépe reliéf, kdy energie je mnohem menší než primární svazek.

Tato metoda vyžaduje vzorky, které lze pozorovat ve vakuu, protože vzduch zeslabuje a odkloňuje elektronový paprsek. Vzorky vytváří významné množství par, proto musí být vysušeny. Procesy zahrnující fázové přechody jako taveniny, chemické reakce a živé organismy nemůžou být pozorovány.

Vzorky musí být elektricky vodivé, v případě, že nejsou, tak nanášíme elektricky vodivý povlak, nejčastěji ze zlata. Zároveň musí být vzorek s podložkou uzemněn, aby nedošlo k hromadění elektrostatického náboje.



Obr. 23 Rastrovací elektronový mikroskop [20]

Pro účely měření různých krystalových mřížek se využívá difrakce rentgenového záření a Braggovy rovnice:

$$2d_{hkl} \sin\theta = n\lambda, \quad (11)$$

kde d je mezikrystalová vzdálenost, θ velmi malý úhel, n řád difrakce a λ vlnová délka záření.

7. VÝSLEDKY ZKOUŠEK A JEJICH ROZBOR

7.1. Únavová zkouška

V tabulce 3 jsou uvedeny výsledky únavových testů. Pro daný počet cyklů byly vykresleny hysterezní smyčky a z nich odečteny přesné hodnoty amplitudy celkové a plastické deformace. Hodnoty zjištěné v polovině počtu cyklů do lomu sloužily pro určení únavových charakteristik studovaného materiálu.

Na základě těchto dat byla vynesena závislost amplitudy napětí na počtu cyklů do lomu N_f , tzv. Wöhlerova křivka. Na základě studia elasticko-plastické odezvy byla sestrojena odvozená Mansonova-Coffinova křivka. Pro určení, zda slitina cyklicky zpevňuje, či změkčuje, byly vytvořeny křivky cyklického zpevnění-změkčení. Jednotlivé závislosti jsou popsány v následujících kapitolách.

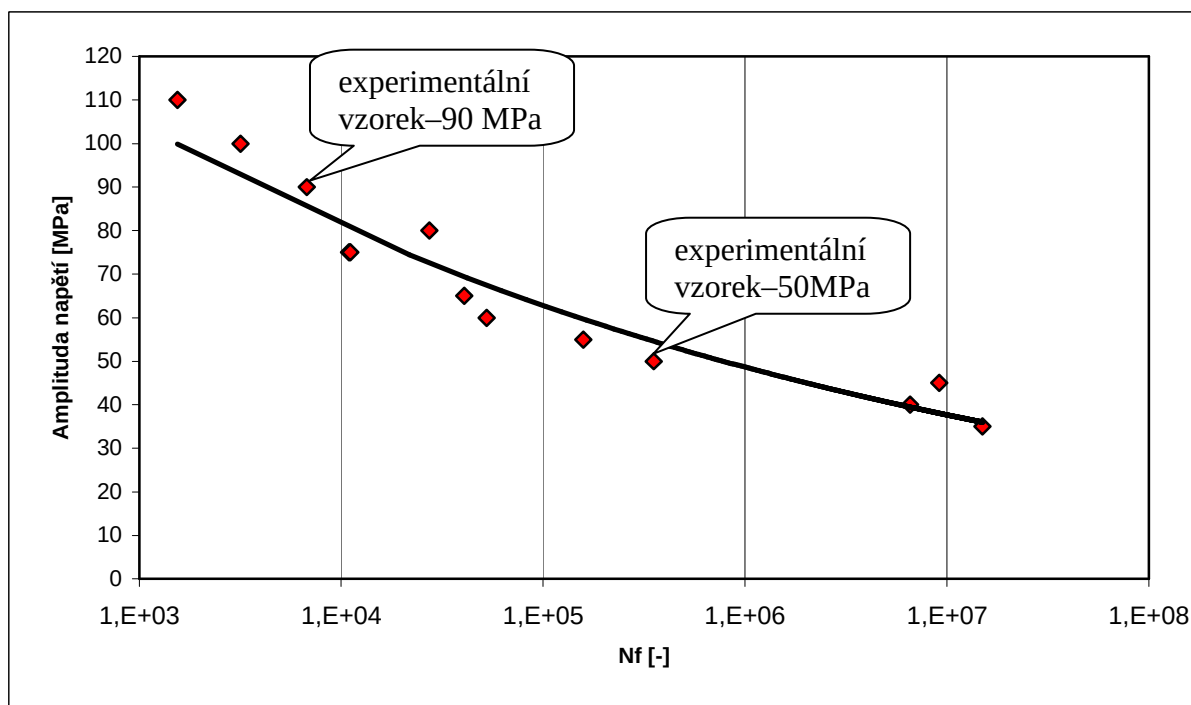
Při srovnání s prací [16] bylo zjištěno, že v případě křivky cyklického zpevnění-změkčení ovlivnil vápník kladně deformační odezvu. Při stejné zátěžné amplitudě napětí byla amplituda plastické deformace nižší. Nízkocyklové únavové charakteristiky se liší cca. 7 %.

Únava AZ31 S.C., velký rondel, d=6,00mm, l=12,5mm, Instron 8801							
vzorek	Stanoveno v $N_f/2$				N_f	$N_f/2$	f
	σ_a	ϵ_a	ϵ_{ap}	ϵ_e			
	[MPa]	[-]	[-]	[-]			[Hz]
1	35	0,000809	6E-06	0,000803	15000000	7500000	20
2	40	0,000459249	9,06E-07	0,000458343	6568587	3284294	20
3	45	0,001048252	2,3222E-05	0,00102503	9181222	4590611	20
4	50	0,0012385	0,00075	0,0004885	352681	176341	20
5	55	0,0014125	0,000109	0,0013035	158152	79076	20
6	60	0,001715	0,000205	0,00151	52635	26318	20
7	65	0,0018322	0,000251115	0,001581085	40721	20361	3
8	75	0,002758335	0,00066826	0,002090075	10949	5475	3
9	75	0,002665045	0,00058124	0,002083805	11090	5545	3
10	80	0,002329325	0,00033045	0,001998875	27327	13664	3
11	90	0,0034194	0,000882723	0,002536678	6751	3376	3
12	100	0,00451689	0,001421833	0,003095058	3174	1587	3
13	110	0,00557449	0,002057955	0,003516535	1543	772	3

Tab. 3 Naměřené hodnoty nízkocyklové únavy

7.1.1. Wöhlerova křivka (S-N křivka)

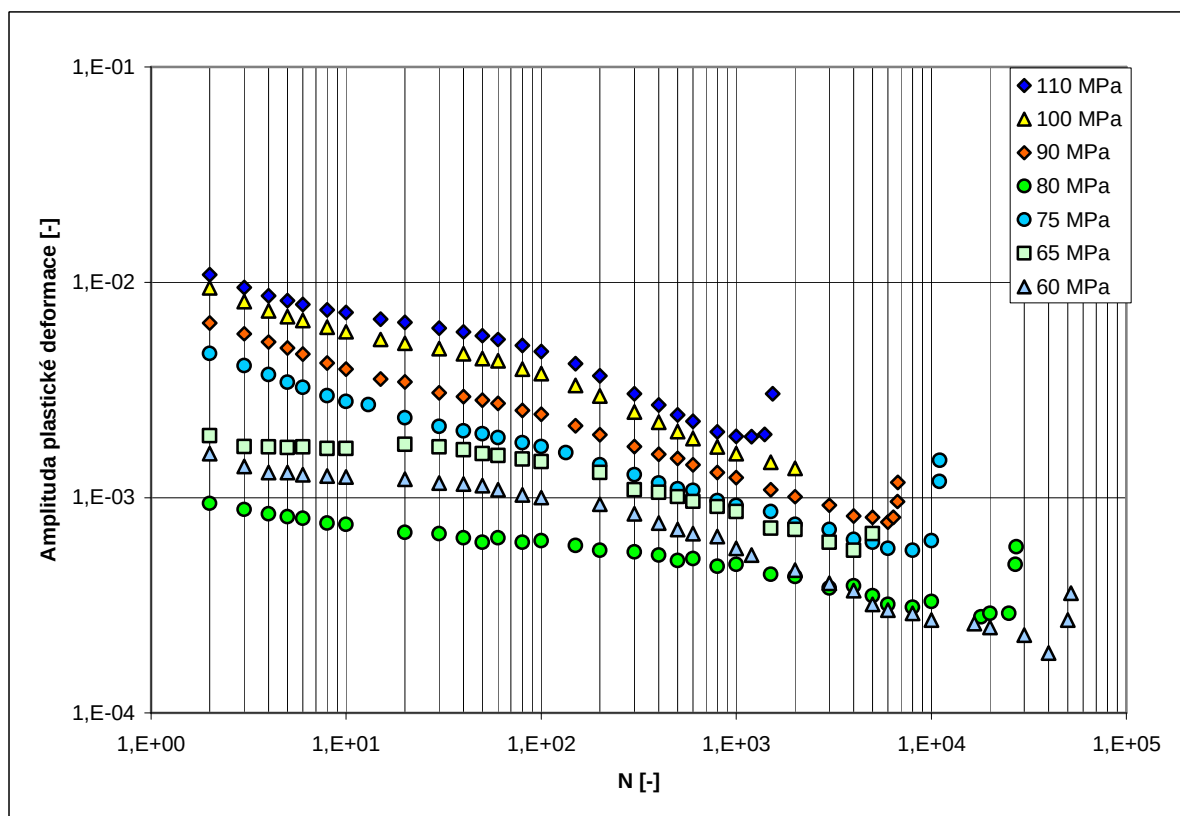
Experimentálně naměřenou závislost amplitudy napětí na počtu cyklů do lomu je možno aproximovat vhodnými regresními funkcemi, např. Strommayer, tříparametrická Kohout-Věchet. Z obr. 24 plyne, že vlivem změny frekvence nedošlo v experimentálních datech k výskytu nespojitostí.



Obr. 24 Wöhlerova závislost

7.1.2. Křivky cyklického zpevnění-změkčení

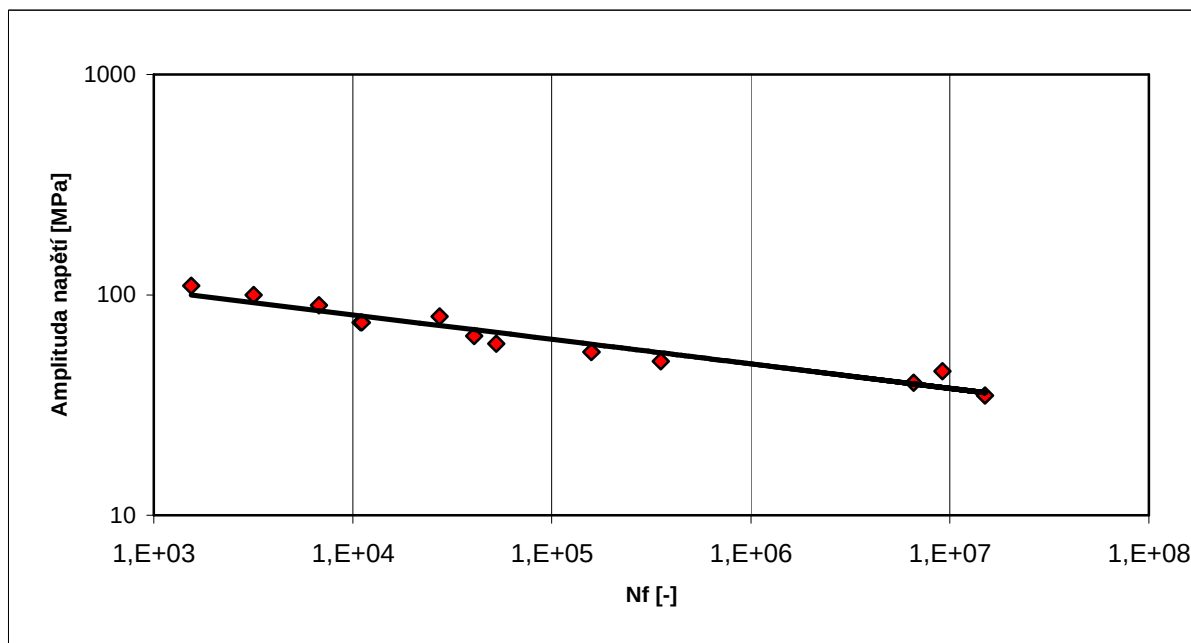
Analýzou hysterezních smyček byly odvozeny křivky cyklického zpevnění-změkčení (obr. 25). Zde je jasně patrné, že tento materiál cyklicky zpevňuje, protože v průběhu cyklování se snižuje amplituda plastické deformace pro všechny hladiny amplitudy napětí.



Obr. 25 Křivky cyklického zpevnění-změkčení

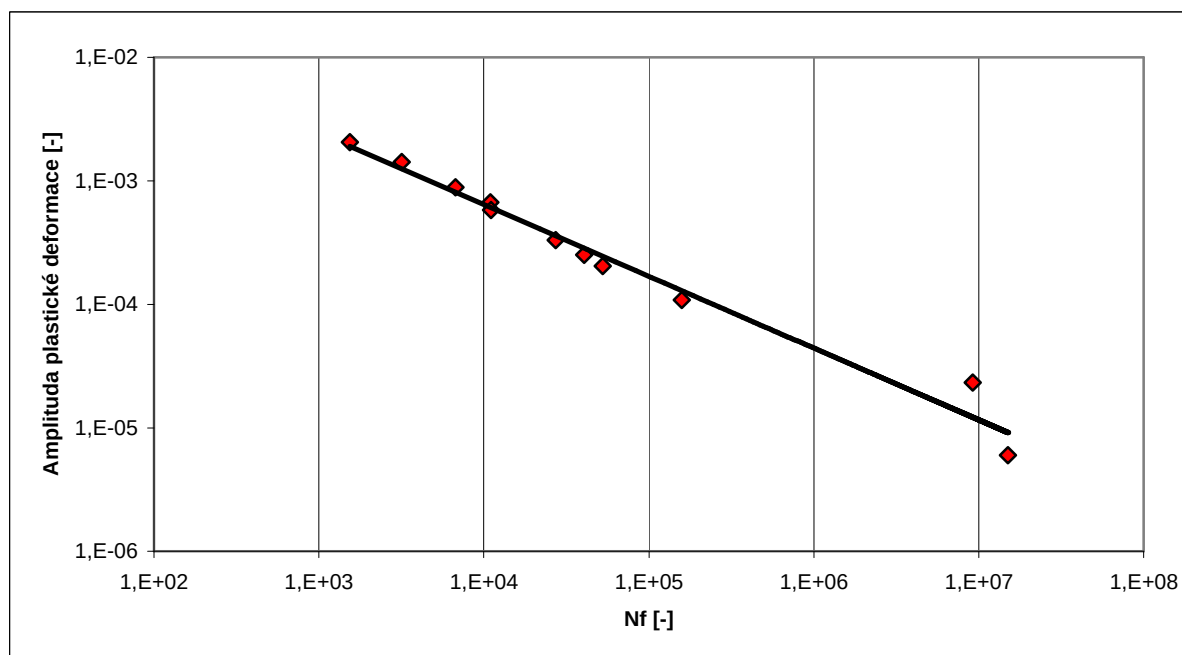
7.1.3. Parametry regresních funkcí

Pomocí tabulkového procesoru byly získány parametry regresních funkcí. Na obr. 26 je Wöhlerova křivka v log-log souřadnicích proložena regresní přímkou, viz. rovnice (2), vypočítané parametry jsou uvedeny v tab. 4.



Obr. 26 Wöhlerova závislost proložena regresní funkcí v log-log souřadnicích

Obdobně jako v případě Wöhlerovy křivky jsme vynesli do log-log souřadnic odvozenou Mansonovu-Coffinovu křivku (obr. 27) a vhodným proložením regresní funkce dle rovnice (3) byly získány parametry, které jsou uvedeny v tab. 4.



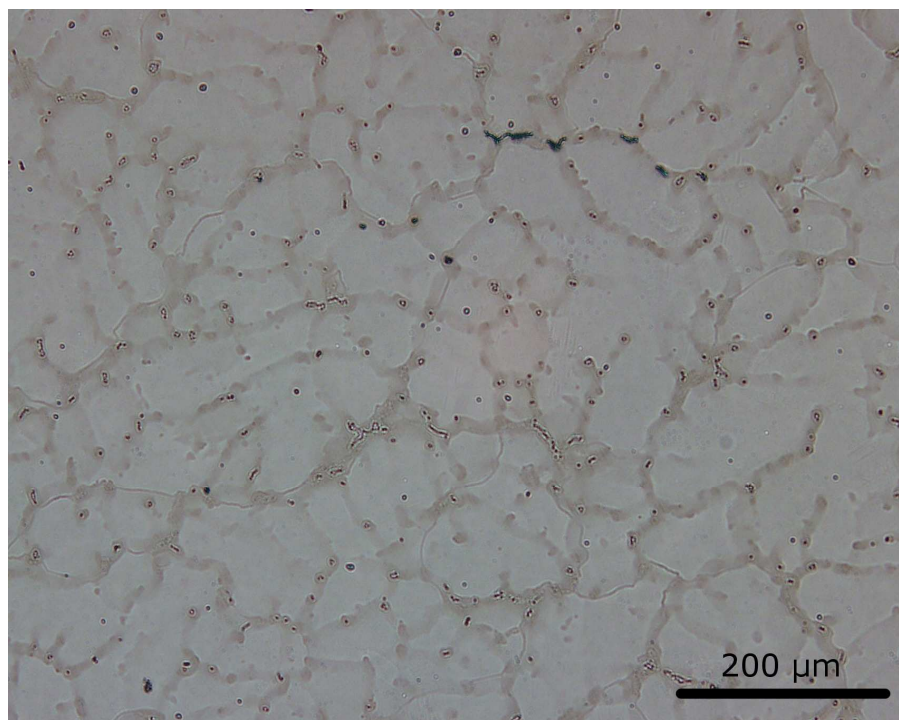
Obr. 27 Mansonova-Coffinova závislost proložena regresní funkcí v log-log souřadnicích

Parametry regresních funkcí pro rovnici (2) a (3)			
σ'_f	b	ε'_f	c
396,89	-0,1603	0,6158	-0,6972

Tab. 4 Parametry regresních funkcí pro naměřené hodnoty

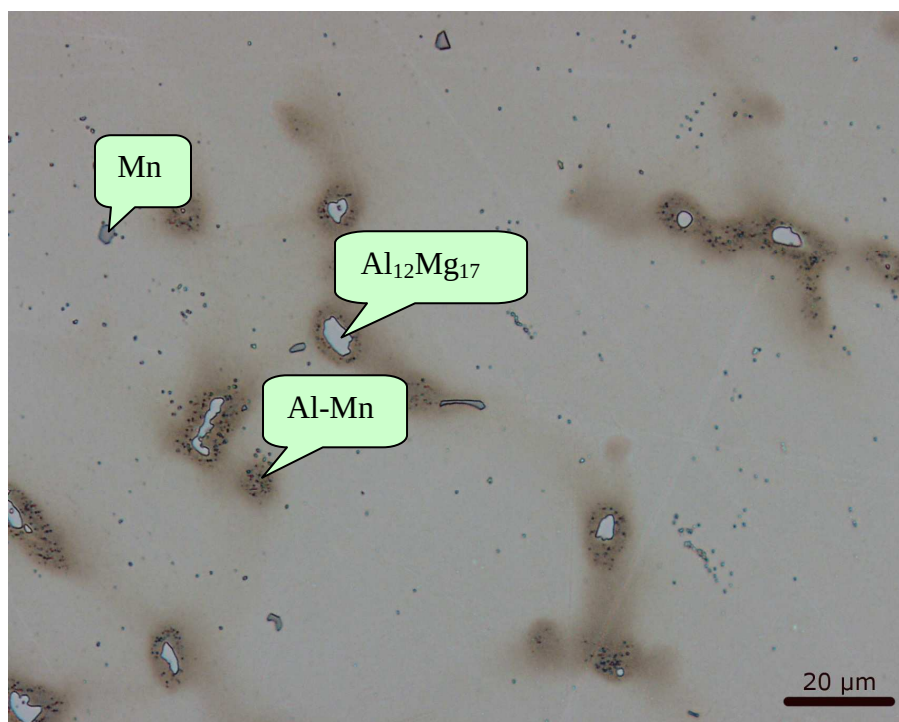
7.2. Morfologie strukturních fází

Při studování struktury na světelném mikroskopu, po naleptání leptadlem acetic picral, lze pozorovat po hranicích zrn tuhého roztoku delta intermediární fáze (obr. 28).



Obr. 28 Struktura slitiny AZ31

Obrázek 29 je pořízen pomocí světelného mikroskopu a jsou v něm vyznačeny vyskytující se fáze. V práci [21] na základě EDS analýzy bylo zjištěno, že jde o $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$, segregace manganu a částice Al-Mn. Základní matici pak tvoří tuhý roztok δ .

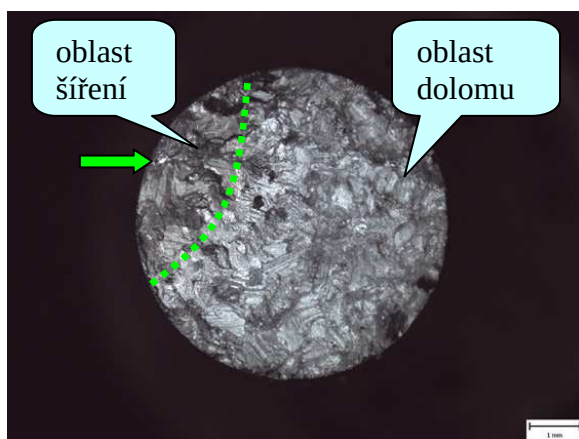


Obr. 29 Struktura slitiny AZ31

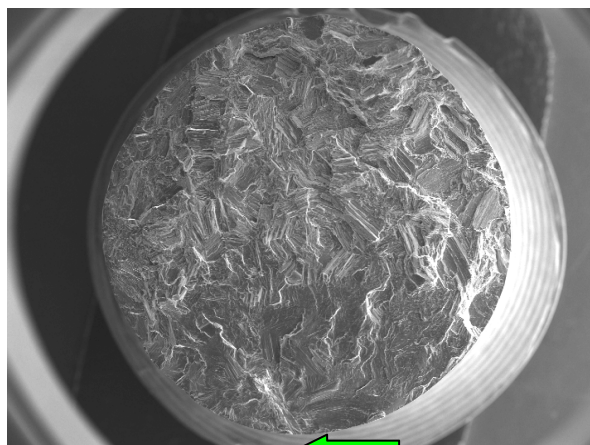
7.3. Fraktografické hodnocení lomových ploch

Snímky lomových ploch byly pořízeny rastrovacím elektronovým mikroskopem Philips XL30 a stereomikroskopem SZH10. Pro fraktografické hodnocení byly vybrány dva vzorky zatížené napětím 90 MPa a 50 MPa. Na obr. 24 jsou tyto vzorky vyznačeny na Wöhlerově závislosti.

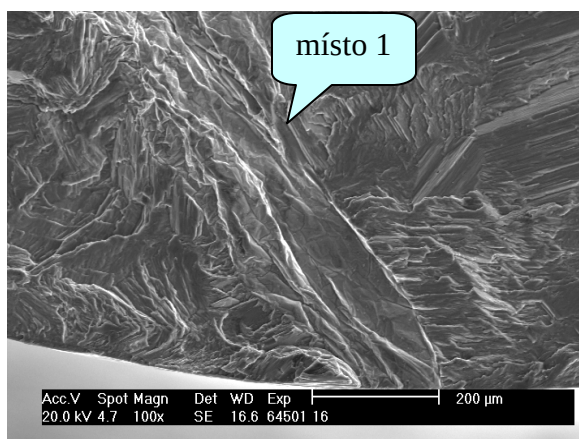
Na obr. 30–33 jsou uvedeny lomové plochy vzorku zatěžované napětím 90 MPa. Na snímku ze stereomikroskopu (obr. 30) je lom s vyznačenou oblastí šíření a dolomu. Zelenou šipkou je zde označeno místo, kde došlo k iniciaci trhliny. Na dalších snímcích je vzorek pozorován a snímkován na rastrovacím elektronovém mikroskopu (dále REM). Místo iniciace je zde rovněž označeno zelenou šipkou (obr. 31). U tohoto obrázku není uvedeno měřítko z důvodu přehlednosti – obr. s měřítkem je součástí přílohy (snímek 64499). Obr. 32 je detail na místo iniciace trhliny. U obr. 33 byl předpoklad, že jde o oxidickou plenu, na které došlo ke kumulaci napětí, iniciaci trhliny a jejímu následnému šíření vzorkem. Provedením EDS analýzy v místě 1 byl tento předpoklad potvrzen výskytem kyslíku v místě iniciace.



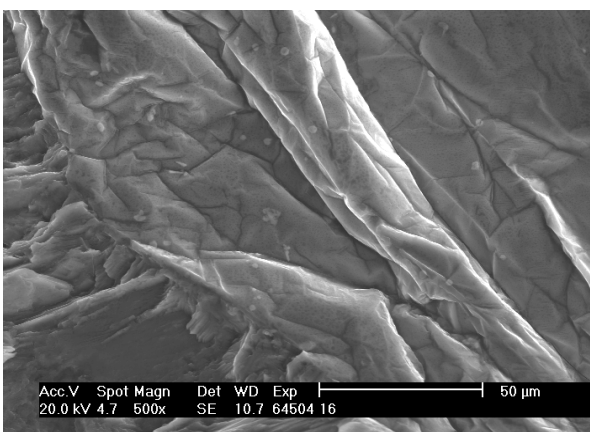
Obr. 30 Celkový pohled stereomikroskopem



Obr. 31 Celkový pohled REM



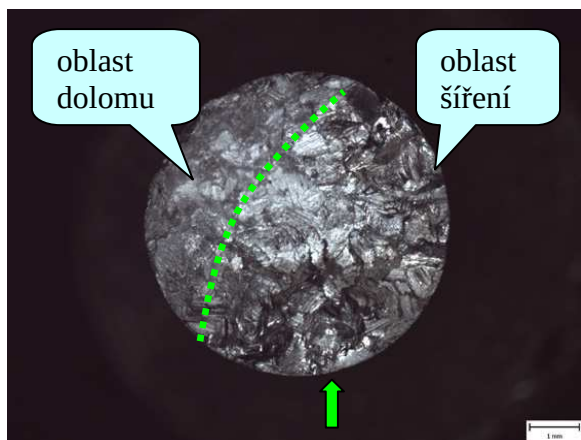
Obr. 32 Místo iniciace (REM)



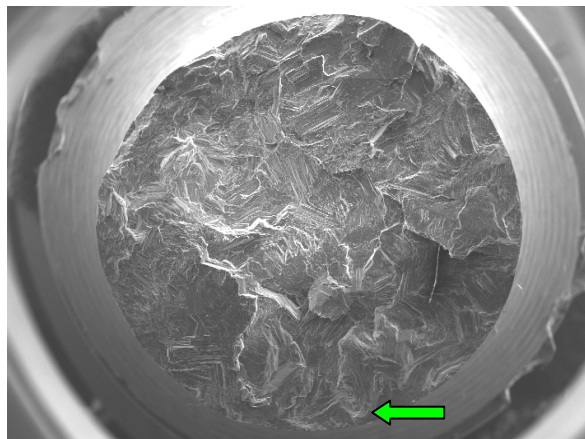
Obr. 33 Detail iniciace- oxidická plena (REM)

Na obr. 34–37 je zachycena lomová plocha vzorku, který byl cyklicky namáhan napětím 50 MPa. Na obr. 34 je lomová plocha se znázorněnou oblastí šíření a dolomu pod stereomikroskopem. Místo iniciace je naznačeno zelenou šipkou. Obr. 35 je zhotoven REM, kdy místo iniciace je opět zaznamenáno zelenou šipkou. Pro přehlednost je obr. 36 zde vyobrazen bez měřítka – stejný obrázek je pak v příloze již se zaneseným měřítkem – snímek 64472. Na obr. 36 je přiblížena oblast pravděpodobné iniciace trhliny. Obrázek 37 pak

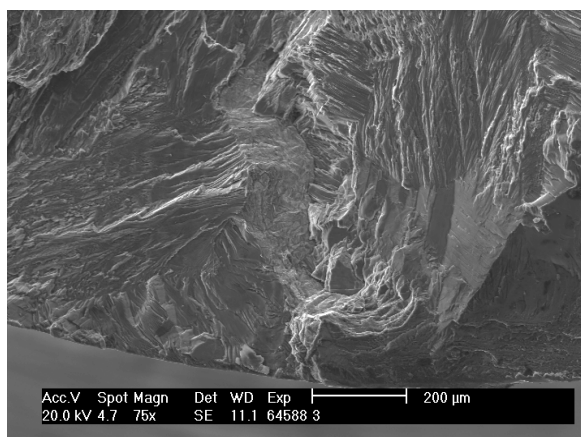
přibližuje tuto oblast a lze zde zaznamenat oxidickou plenu a zvýrazněné částice Mg,Al. U tohoto vzorku jsou na rozdíl od předchozího jasně patrné striace v oblasti šíření trhliny (obr. 38).



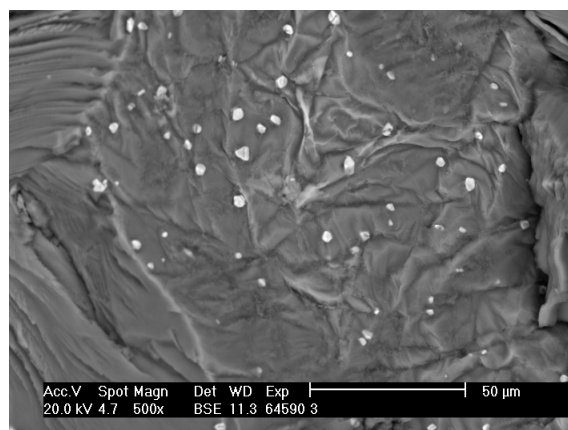
Obr. 34 Celkový pohled stereomikroskopem



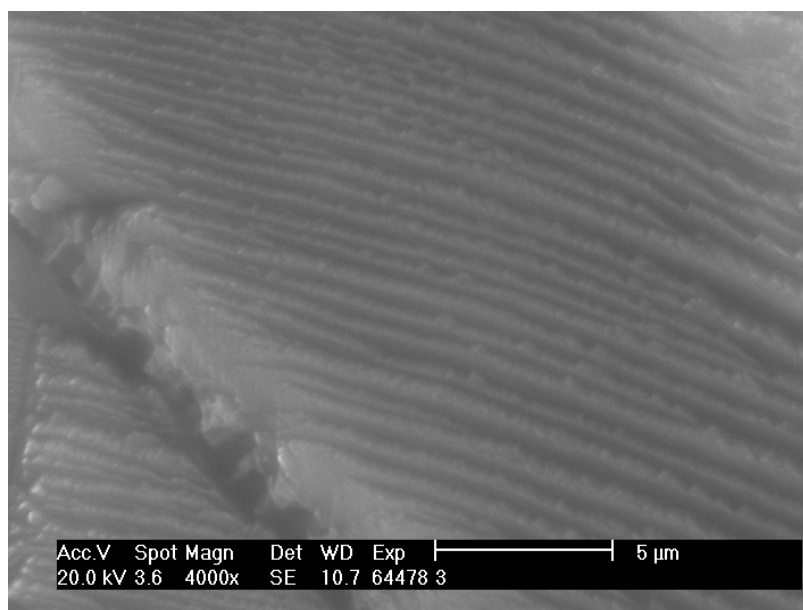
Obr. 35 Celkový pohled REM



Obr. 36 Místo iniciace (REM)



Obr. 37 Oxidická plena s částicemi Mg,Al (REM)



Obr. 38 Striace v oblasti šíření trhliny (REM)

ZÁVĚR

Při srovnání naměřeného chemického složení s požadavky ASTM normy, lze dojít k závěru, že materiál této normě odpovídá a lze považovat získaná data za platná.

Ze zpracovaných dat únavové zkoušky byly vyhodnoceny závislosti amplitudy napětí na počtu cyklů do lomu. Z těchto závislostí je patrné, že tato slitina cyklicky zpevňuje.

Pro experimentální vzorek byl použit program nízkocyklové únavy LCF s frekvencí 3 Hz. Druhým programem byl SAX, zde byla nastavena frekvence na 20 Hz. Těchto dvou různých programů bylo použito z důvodu úspory času.

Obecně dochází při zvyšování frekvence ke zahřívání vzorku a tedy k ovlivnění vzorku. V tomto případě však vlivem změny frekvence nedošlo v experimentálních datech k výskytu nespojitostí.

Základní matrice je tvořena tuhým roztokem delta (bohatá na Mg), pouze na hranicích zrn se vyskytuje intermediární fáze gama $Al_{12}Mg_{17}$ (bohatá na Al). Tato fáze tvoří diskontinuální precipitát, který zhoršuje mechanické vlastnosti.

Při fraktografickém hodnocení byl uveden příklad na dvou zkušebních vzorcích při zátěžné amplitudě napětí 90 MPa, při které vzorek nacykloval 6751 cyklů než se přetrhl. Druhý 50 MPa s 352681 cykly do lomu. Ze snímků z REM je patrné, že došlo k iniciaci v místech chemické a strukturní nehomogenity, tj. v oxidických plenách.

V příloze si lze prohlédnout snímky pořízené z rastrovacího elektronového mikroskopu a vyhodnocení EDS analýzy z výše uvedeného vzorku s vyznačeným místem odběru.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] PTÁČEK, L. Slévárenské slitiny hořčíku. *Slévárenství*. 2004, roč. 52, č. 2–3, s. 61–66.
- [2] PTÁČEK, L.; a kolektiv. *Nauka o materiálu II*. Brno: vyd. CERM, 2002. 392 s. ISBN 80–7204–248–3.
- [3] ČERMÁK, Jan; HAWELKA, Martin; TATÍČEK, František. Současné trendy ve zpracování hořčíkových slitin tvářením. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005, č. 10 [cit. 28.listopadu 2009]. Dostupné na WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasne-trendy-ve-zpracovani-horcikovych-slitin-tvarenim>
- [4] ČECH, J.; JUŘIČKA, I.; BOUCNÍK, P. Použití hořčíkových slitin ve slévárenství. In 5. *Medzinárodná vedecká konferencia CO–MAT–TECH, Trnava, 14.10. – 15.10.1997* [online]. 1997 [cit. 28.listopadu 2009]. Dostupné z WWW: http://www.boucnik.cz/TRNAVA_97.pdf
- [5] DRÁPALA, J.; KUCHAR, L.; TOMÁŠEK, K.; TROJANOVÁ, Z. *Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík – příměs*, 1. vyd. Ostrava : Vysoká škola báňská – Technická Univerzita Ostrava, 2004. 172 s. ISBN 80–248–0579–0.
- [6] ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných slitin*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno, 2004.
- [7] International Magnesium Association (IMA) [databáze online]. USA. 2008 [cit. 14.března 2010]. Dostupné z WWW: <http://www.intlmag.org/files/yend2008.pdf>
- [8] Navajo – otevřená encyklopedie. *navajo.cz* [online]. 2010 [cit. 3.března 2010]. Dostupné z WWW: <http://horcik.navajo.cz/>
- [9] AVEDESIAN, M.M.; BAKER, H. *ASM Specialty Handbook – Magnesium and Magnesium Alloys*. ASM International Ohio. USA 1999.
- [10] BROOKS, Ch. *Heat treatment, structure and properties of nonferrous alloys*. Ohio: American Society for metals, 1982. 420s. ISBN 0–87170–138–3.
- [11] Water Owl's Boons. *blogspot.com* [online]. 2007 [cit. 8.dubna 2010]. Dostupné z WWW: http://regmedia.co.uk/2007/05/09/sony_vaio_fz_4.jpg
- [12] Borbet. *borbet.cz* [online]. 2010 [cit. 8.dubna 2010]. Dostupné z WWW: <http://www.borbet.cz/elektrony-borbet-velke/elektrony-borbet-XL-antracit.jpg>
- [13] PTÁČEK, L.; USTOHAL, V.; PTÁČKOVÁ, M.. Structure, properties and surface treatment of Mg-Li alloys. In *Intern. Congress on Advanced Materials, Munich, 2000*.
- [14] PÍŠEK, F. *Nauka o materiálu I/3*, Praha, Akademia, 1973.
- [15] VĚCHET, S.; KOHOUT, J.; BORŮVKA, O. *Únavové vlastnosti tvárné litiny*. Žilinská univerzita. Žilina 2002. 157 s. ISBN 80–7100–973–3.

- [16] GEJDOŠ, P. *Studium nízkocyklových únavových vlastností hořčíkové slitiny AZ31 s 0,5 % vápníku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 50 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Tomáš Podrábský, Csc.
- [17] PANTĚLEJEV, L. *Únava kovových materiálů* [online]. 2010 [cit. 20.dubna 2010]. Dostupné z WWW: <http://ime.fme.vutbr.cz/studijni%20opory.html>
- [18] LAUCHMANN, H. *Mezní stavy I.*, Nakladatelství ČVUT. Praha 2007. ISBN 978–80–01–03671–6.
- [19] PTÁČEK, L.; a kolektiv. *Nauka o materiálu I*. Brno: vyd. CERM, 2003. 516 s. ISBN 80–7204–283–1.
- [20] VUT v Brně. Ústav Materiálových Věd a Inženýrství [online]. 2010 [cit. 15.dubna 2010]. Dostupné z WWW: <http://ime.fme.vutbr.cz/laboratore.html>
- [21] HORYNOVÁ, M. *Mechanicko-strukturní charakteristiky slitiny hořčíku AZ31 s rozdílným obsahem vápníku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 44 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Tomáš Podrábský, Csc.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratky

IMA	International Magnesium Association
ECAE	Equal Channel Angular Extrusion
ECAP	Equal Channel Angular Pressing
BRD	binární rovnovážný diagram
SM	světelná mikroskopie
REM	rastrovací elektronová mikroskopie
TEM	transmisní elektronová mikroskopie
EDS	energieově disperzní spektrometrie
BSE	zpětně odražené elektrony (backscattered electrons)
SE	sekundární elektrony (secondary electrons)
GP	Guinier-Prestonovy zóny
hm. %	hmotnostní procenta

Symboly

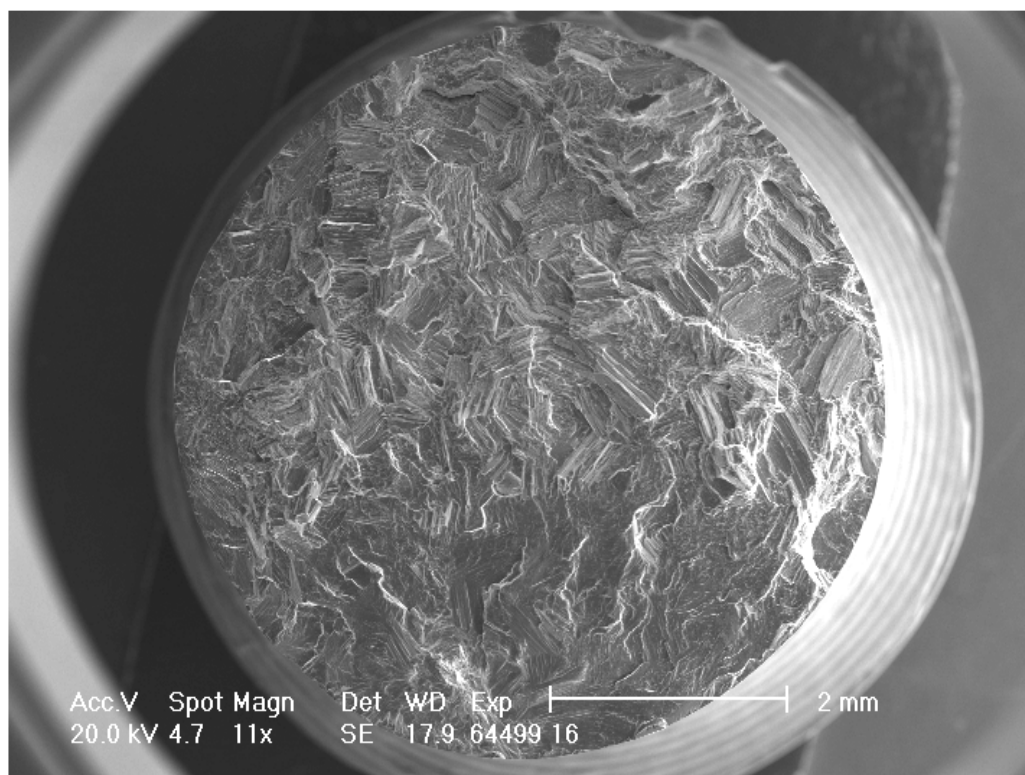
σ_a	amplituda napětí [MPa]
σ_h	horní napětí [MPa]
σ_m	střední napětí [MPa]
σ_c	mez únavy [MPa]
σ_n	dolní napětí [MPa]
$\Delta\sigma$	rozkmit napětí [MPa]
σ_{Nc}	časovaná mez únavy [MPa]
σ'_f	součinitel únavové pevnosti [-]
ε_{ap}	amplituda plastické deformace [-]
ε_e	amplituda elastické deformace [-]
ε_a	amplituda celkové deformace [-]
ε'_f	součinitel únavové tažnosti [-]
R_e	mez kluzu [MPa]
R_m	mez pevnosti [MPa]
R_{ms}	mez pevnosti ve střihu [MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu [MPa]
N_f	počet cyklů do lomu [-]
$N_{f/2}$	poloviční počet cyklů do lomu [-]
N_t	tranzitní počet cyklů [-]
KU	vrubová houževnatost [J]
E	modul pružnosti [GPa]
A	tažnost [%]
b	elastický exponent křivky životnosti [-]
c	plastický exponent křivky tažnosti [-]
f	frekvence [Hz]

PŘÍLOHY

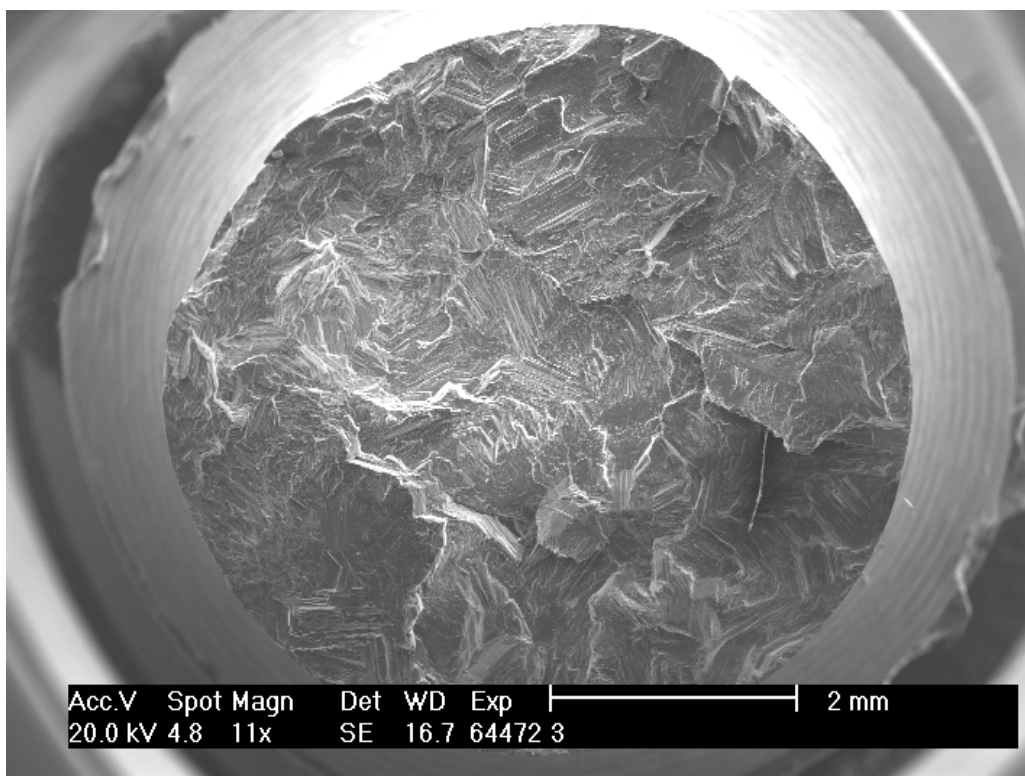
Příloha 1 Fotografie vybraných vzorků z REM

Příloha 2 Vyhodnocení z EDS analýzy v místě iniciace trhliny

Příloha 1

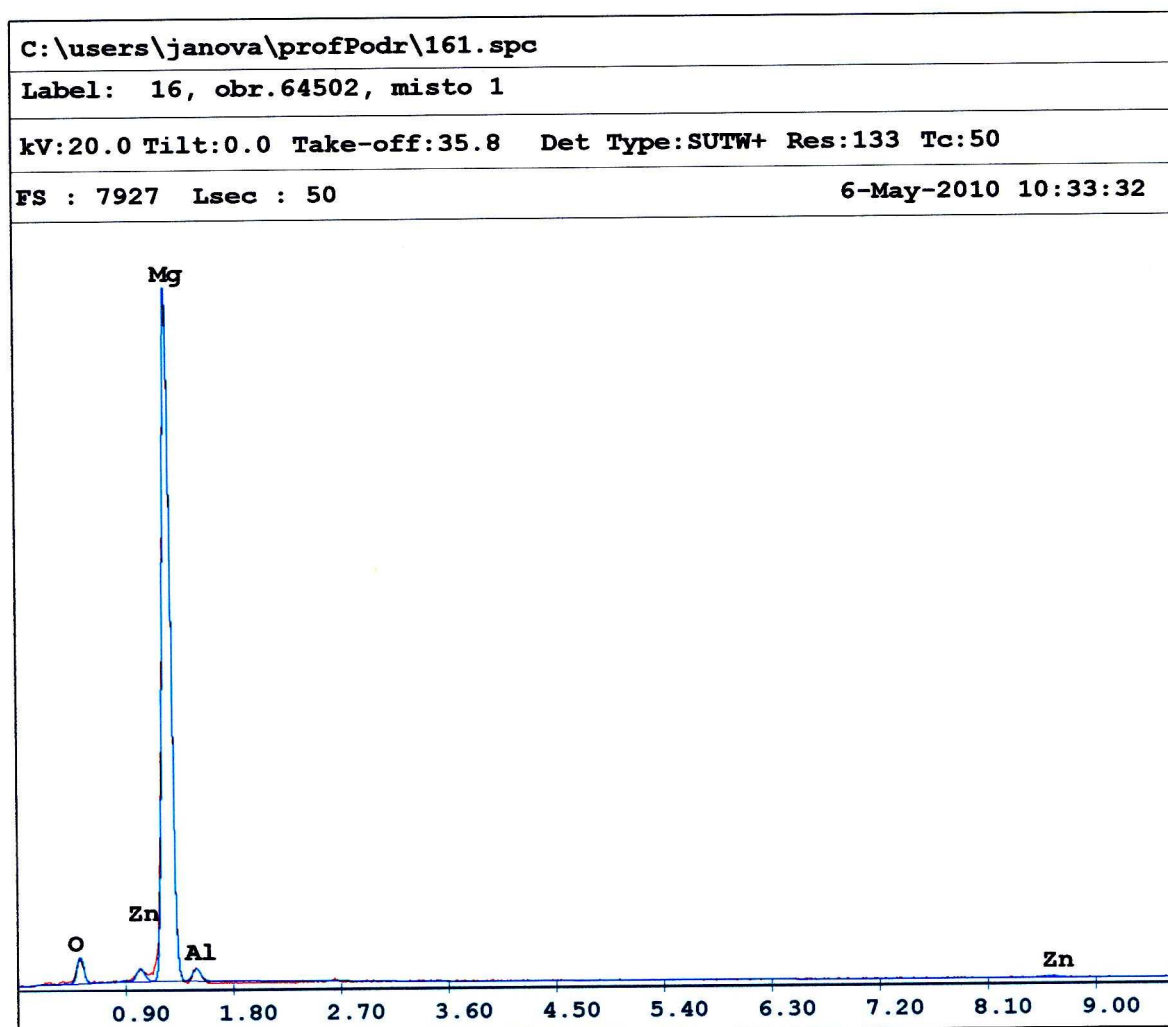


Snímek 64499– obr. 30 se vloženým měřítkem



Snímek 64472– obr. 34 se vloženým měřítkem

Příloha 2



EDAX ZAF Quantification (Standardless)

Element Normalized

SEC Table : Default

Element	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
O K	8.96	13.30	0.0315	1.0431	0.3368	1.0022
MgK	83.72	81.80	0.6852	1.0007	0.8174	1.0006
AlK	4.33	3.81	0.0120	0.9713	0.2865	1.0000
ZnK	2.99	1.09	0.0256	0.8515	1.0064	1.0000
Total	100.00	100.00				

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
O K	31.70	3.42	2.77	9.27
MgK	992.86	7.38	0.45	134.53
AlK	17.26	7.30	4.62	2.36
ZnK	4.70	0.96	7.74	4.90

Vyhodnocení EDS analýzou v místě iniciace trhliny