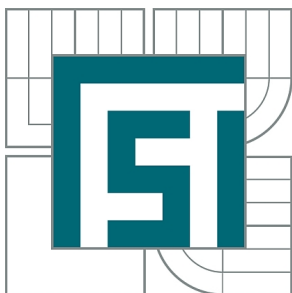


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

NÍZKOCYKLOVÉ ÚNAVOVÉ CHOVÁNÍ LITÉ HOŘČÍKOVÉ SLITINY AZ61

LOW CYCLE FATIGUE BEHAVIOUR OF CAST MAGNESIUM ALLOY AZ61.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MONIKA KAŇOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JOSEF ZAPLETAL

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Monika Kaňová

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:

Nízkocyklové únavové chování lité hořčíkové slitiny AZ61

v anglickém jazyce:

Low cycle fatigue behaviour of cast magnesium alloy AZ61.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na základě analýz odezvy studované slitiny na cyklické zatěžování v tvrdém módu stanovit křivky cyklického zpevnění-změkčení, cyklickou deformační křivku, Mansonovu-Coffinovu křivku a odvozenou Wöhlerovu-Basquinovu křivku. Pomocí regresní analýzy stanovit u hořčíkové slitiny AZ61 připravené metodou odlévání Squeeze Casting únavové parametry a tyto porovnat s literaturou. Dále predikovat únavové chování a životnost.

Cíle bakalářské práce:

1. Stanovení základních mechanických charakteristik hořčíkové slitiny AZ61 v litém stavu.
2. Metalografickou analýzou vyhodnotit strukturu studované slitiny.
3. Stanovit cyklickou odezvu v tvrdém módu zatěžování a únavové charakteristiky v nízkocyklové oblasti dané slitiny

Seznam odborné literatury:

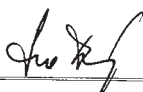
- [1] DRÁPAL, J., KUCHAR, L., TOMÁŠEK, K., TROJANOVÁ, Z.: Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík-příměs. Ostrava: VŠB Ostrava, 2004.
- [2] ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, USA, 1999.
- [3] KLESNIL, M., LUKÁŠ, P.: Fatigue of metallic materials, Academia, Praha, 1992
- [4] POLÁK, J.: Cyclic plasticity and low cyclic fatigue life of metals, Academia, Praha 1991, 2. vydání

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Zapletal

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 4.2.2011





prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá zjištěním cyklické plasticity a nízkocyklovým únavovým chováním lité hořčíkové slitiny AZ61. Slitina byla odlita metodou squeeze casting. Mimo únavových vlastností byla pozorována mikrostruktura dané slitiny a byly změřeny mechanické vlastnosti slitiny AZ61.

Klíčová slova

Hořčíková slitina AZ61, squeeze casting, mechanické vlastnosti, cyklická plasticita, nízkocyklová únava

Abstract

This bachelor's thesis is dealing with the finding of cyclic plasticity and the low cycle - fatigue behavior of magnesium alloy AZ61. Alloy was cast via squeeze casting method. In addition to fatigue properties was observed microstructure of the alloy and was measured the basic mechanical properties of the alloy.

Key words

Magnesium alloy AZ61, squeeze casting, mechanical propetties, cyclic plasticity, low cycle fatigue.

Bibliografická citace

KAŇOVÁ, M. Nízkocyklové únavové chování lité hořčíkové slitiny AZ61. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Zapletal.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Nízkocyklové únavové chování lité hořčíkové slitiny AZ61* vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne: 27. 5. 2011

Monika Kaňová

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Josefu Zapletalovi za odborné rady a připomínky, které mi pomohly při vypracování této práce. Dále bych chtěla poděkovat paní Ivě Davidové za pomoc při řešení experimentů a také všem pracovníkům Ústavu materiálových věd a inženýrství za jejich odbornou pomoc.

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíle práce	2
3	Hořčík a jeho slitiny	3
3.1	Výroba hořčíku	3
3.2	Hořčíkové slitiny	4
3.3	Označování hořčíkových slitin	7
3.4	Tepelné zpracování hořčíkových slitin.....	9
3.5	Mechanické vlastnosti hořčíkových slitin a jejich aplikace	10
4	Technologie odlévání hořčíkových slitin	12
4.1	Odlévání do netrvalých forem.....	12
4.2	Gravitační lití do kovových forem	12
4.3	Nízkotlaké lití.....	12
4.4	Vysokotlaké lití	13
4.5	Squeeze casting	13
5	Únava materiálu	15
5.1	Stadium změn mechanických vlastností	17
5.1.1	Hysterezní smyčka	18
5.1.2	Cyklická křivka napětí – deformace	19
5.1.3	Křivky cyklického zpevnění / změkčení.....	20
5.2	Stadium nukleace únavových trhlin	21
5.3	Stadium šíření trhlin	22
5.4	Křivky životnosti	23
6	Experimentální materiál a zkušební technika	25
6.1	Příprava vzorků pro světelnou mikroskopii.....	25
6.2	Zkušební zařízení pro tahovou zkoušku	25

6.3	Měření tvrdosti.....	26
6.4	Zkušební zařízení pro zkoušky nízkocyklové únavy.....	26
7	Výsledky a diskuze experimentů	27
7.1	Mikrostruktura	27
7.2	Výsledky statických zkoušek v tahu.....	30
7.3	Výsledky zkoušek nízkocyklové únavy.....	31
8	Závěry	38
9	Seznam použitých zdrojů.....	39
10	Seznam použitých symbolů a zkratk.....	41

1 Úvod

Jedním z nejdůležitějších požadavků současných trendů ve strojírenství je snižování zátěže životního prostředí. Toho lze dosáhnout také používáním lehkých konstrukčních materiálů, díky nimž dojde ke snížení hmotnosti dopravních prostředků a z toho vyplívající úspoře energie při akceleraci a provozu. Mezi často využívané lehké kovy patří hliník s měrnou hmotností $2,7 \text{ g/cm}^3$. Významné místo v používání má vedle již zmiňovaného hliníku i hořčík s hustotou $1,74 \text{ g/cm}^3$. Hořčíkové slitiny mají výbornou obrobitelnost, dobrou měrnou pevnost. Mezi jejich nevýhody patří zhoršená svařitelnost, špatná korozní odolnost, nízký modul v tahu, ekologická náročnost zpracování kvůli vysoké reaktivitě hořčíku a nízká odolnost za vyšších teplot [1].

Hořčík krystalizuje v šesterečné soustavě s těsně uspořádanou mřížkou, která se vyznačuje malým počtem kluzových rovin. Z tohoto důvodu se u Mg slitin projevuje mimo již zmíněných nevýhod i nízká schopnost Mg slitin absorbovat rázovou deformaci a omezená tvarová složitost hotových výrobků. Proto se hořčíkové slitiny využijí v automobilovém průmyslu u prvků karoserie, svařence podsedlových rámců. Tvařitelnost se rovněž zhoršuje s rostoucím podílem legur [8].

Dle statistiky IMA (International Magnesium Association = Mezinárodní hořčíková asociace) bylo na světě v roce 2008 vyrobeno 719 000 tun primárního hořčíku. V příštích deseti letech se očekává nárůst spotřeby hořčíkových slitin až o 7 % ročně [9].

Stoupající náklady na pohonné hmoty vyrobených z fosilních paliv a jejich prudce klesající zásoby po celém světě, nutí vědce a technology hledat co nejlehčí materiály pro automobilový a letecký průmysl. Hořčík má o 30 % nižší hustotu než hliník, hmotností se dokonce vyrovná i některým odlehčeným plastům.

Obrovskou nevýhodou hořčíku a jeho slitin je hexagonální krystalová mřížka, která odporuje lisování a tváření. Pro posílení struktury se musí používat slitiny s obsahy drahých příměsí, jako je neodym, yttrium a lanthan.

2 Cíle práce

Cílem této práce je stanovit na základě analýz odezvy studované slitiny na cyklické zatěžování v tvrdém módu stanovit křivky cyklického zpevnění-změkčení, cyklickou deformační křivku, Mansonovu - Coffinovu křivku a odvozenou Wöhlerovu - Basquinovu křivku. Pomocí regresní analýzy je úkolem stanovit u hořčíkové slitiny AZ61 připravené metodou odlévání Squeeze Casting únavové parametry a tyto porovnat s literaturou. Dále predikovat únavové chování a životnost.

Cíle, kterých má být dosaženo:

- 1) Stanovení základních mechanických charakteristik hořčíkové slitiny AZ61 v litém stavu.
- 2) Metalografickou analýzou vyhodnotit strukturu studované slitiny.
- 3) Stanovit cyklickou odezvu v tvrdém módu zatěžování a únavové charakteristiky v nízkocyklové oblasti dané slitiny.

3 Hořčík a jeho slitiny

Hořčík je nepolymorfní kov stříbřitě bílé barvy, který krystalizuje v hexagonální krystalické mřížce. V periodické tabulce se nachází v druhém sloupci s chemickou značkou Mg a latinským názvem Magnesium. Má 2 valenční elektrony, které při slučování snadno odevzdává. Nejvíce reaktivní je s kyslíkem, který je elektronegativní a snadno přijímá 2 valenční elektrony od hořčíku. Má měrnou hmotnost 1738 kg/m^3 , atomové číslo 12 a relativní atomovou hmotnost 24,31. Teplota tavení je 650°C . Za studena je málo pevný a špatně tvárný, protože má jeden skluzový systém. Tvárným se stává až od teplot 225°C . Hořčík hoří intenzivním bílým světlem a uvolňuje se velké množství tepla. Při této reakci vzniká oxid hořečnatý, MgO . Hořící hořčík nemůže být hašen vodou, protože voda reaguje s horkým hořčíkem a uvolňuje se vodík. Hořčík reaguje s halogeny a téměř se všemi kyselinami [1,7].

Hořčík je chemicky málo odolný, má nízkou korozní odolnost, kterou ovlivňují nečistoty. Nepříznivý vliv na odolnost mají prvky Fe, Cu, Ni, které působí při elektrochemické korozi jako mikrokatody. Vliv Fe lze eliminovat přidáním Mn, který obaluje částice Fe během krystalizace a pasivuje je v průběhu koroze. Na povrchu předmětu z hořčíkových slitin se vytváří nesouvislá vrstva MgO , neposkytuje tedy žádnou ochranu [6].

Samotný hořčík má řadu aplikací v pyrotechnice jako vysoce energetické palivo pro rakety. V metalurgii se používá jako prostředek na odsíření oceli, modifikátor při výrobě tvárných litin, jako dezoxidant v neželezných kovech, využití má i v práškové metalurgii a především jako legující prvek v hliníkových slitinách. Využívá se jako redukční činidlo při výrobě titanu. Historie používání hořčíkových slitin je poměrně krátká a je spojena s rozvojem automobilového a leteckého průmyslu. Světová produkce hořčíku přesahuje 429.000 tun ročně a toto číslo každoročně roste [3,4].

3.1 Výroba hořčíku

Hořčík se vyskytuje v zemské kůře, dalším zdrojem hořčíku jsou oceány i suchozemská slaná jezera. Jeho zásoby jsou považovány za nevyčerpatelné. Pro výrobu hořčíku se využívají oxidické a chloridové sloučeniny. Vyrábí se z magnesitu (MgCO_3), dolomitu ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$) a karnalitu ($\text{MgCl}_2 \cdot \text{KCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$). Technologie výroby hořčíku jsou náročné a drahé, což se ve výsledku projevuje na ceně hořčíkových slitin a možnostech jejich využití. Dva základní typy technologií jsou tavná elektrolýza MgCl_2 v prostředí roztaveného chloridového elektrolytu a termická redukce MgO vhodným redukčním činidlem [1].

Proces tavné elektrolýzy je vždy založen na přípravě chloridu hořečnatého, jeho úplné dehydrataci, přípravě chloridového roztaveného elektrolytu a vlastní tavné elektrolýze. Kromě kovového roztaveného hořčíku je produktem plynný chlor, který se recykluje a používá v podobě Cl_2 nebo HCl při předcházejících stupních přípravy MgCl_2 [1].

Termická redukce MgO je možná prostřednictvím kovových a nekovových redukčadel, děj probíhá při vysokých teplotách. Jako redukčadlo se používá křemík, křemík ve slitině

FeSi(ferosilicium), hliník, karbid vápníku nebo uhlík. Nejčastěji se využívá termická redukce ferosiliciem- silikotermická redukce. Proces se uskutečňuje ve vakuu nebo v inertní atmosféře, aby páry hořčíku nereagovaly s kyslíkem. Získaný hořčík má čistotu maximálně 99,8 %. Hlavními nečistotami jsou železo, vápník, křemík a těžké neželezné kovy [1].

Pro odstranění těchto nečistot zařazujeme do technologického postupu i rafinaci pomocí sloučenin chloridů. Roztavené chloridy smáčí a pokrývají povrch nečistot. Vyšší hustota chloridů než hořčíku způsobí, že tavidla s nečistotami klesnou na dno taveniny jako kal [1]. Kovové nečistoty snižují korozní odolnost hořčíku. Pro odplynění se používá probublávání hořčíku chlórem, dusíkem, argonem nebo héliem. Při odlévání je nutné dodržet laminární proudění a ustálený tok kovu, používá se ochranná atmosféra argonu nebo helia. Odlévají se desky, ingoty a bramy. Odlitý hořčík ve výsledku má čistotu 99, 90÷99, 95% Mg. Tavení se provádí v elektrických odporových nebo indukčních pecích [1, 8].

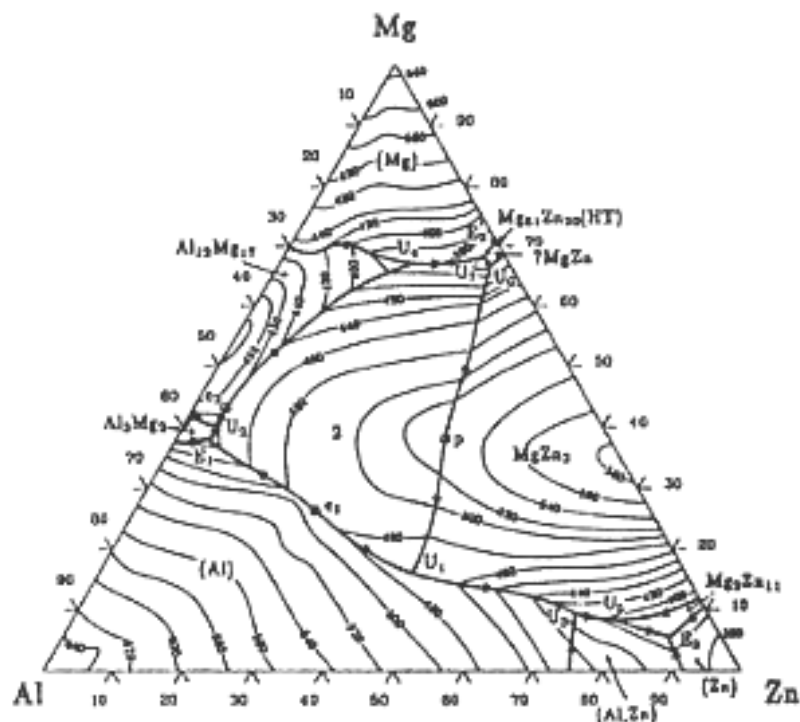
3.2 Hořčíkové slitiny

Vhodnou kombinací hořčíku s jinými prvky získáme konstrukční materiály s výhodným poměrem pevnostních charakteristik a měrné hmotnosti. Většina Mg slitin má výbornou tekutost a zabíhavost, což je výhodné u tvarově složitých a tenkostěnných odlitků. Základem slitin hořčíku jsou binární slitiny rozšířené o další legury, za účelem zlepšení technologických a mechanických vlastností nebo také zvýšení odolnosti vůči korozi [10].

Slitiny hořčíku se dělí na slitiny vhodné ke tváření a na slévárenské slitiny. Slitiny určené ke tváření se zpracovávají při teplotách 200 až 250°C, nejčastěji v rozmezí teplot 300 až 400°C. Za studena jsou hořčíkové slitiny špatně tvárné pro hexagonální mřížku. Chemické složení slitin hořčíku určených ke tváření se liší od slitin určených k odlévání. Slitiny na tváření mají jemnější zrna, homogenní strukturu a lepší mechanické vlastnosti. Slévárenské slitiny mají nízké mechanické vlastnosti. Ke zjemnění zrna se do tavby přidává magnezit, křída nebo zirkonium [7].

Mezi nejdůležitější legury patří hliník, který je zároveň nejčastěji používanou legurou u hořčíku. Rozpustnost hliníku v hořčíku je při eutektické teplotě 11,5 at. % (12hm.%) a klesá postupně až na 1 at. % při pokojové teplotě. Eutektická reakce probíhá při 437 °C, vzniká při ní směs dvou fází. První fází je substituční tuhý roztok Al v Mg, značený jako fáze δ , druhá fáze je značena jako fáze γ a jedná se o intermetalickou sloučeninu $Mg_{17}Al_{12}$ (obr. 3.2). Hliník jako legura zlepšuje pevnost, slitiny s jeho obsahem jsou dobře slévateľné, mohou se ale tepelně zpracovávat až od obsahu 6% Al. Komerční slitiny založené na Mg – Al, obsahující další legující prvek zinek jsou AZ31, AZ61, AZ63, AZ81 a AZ91 [1, 3].

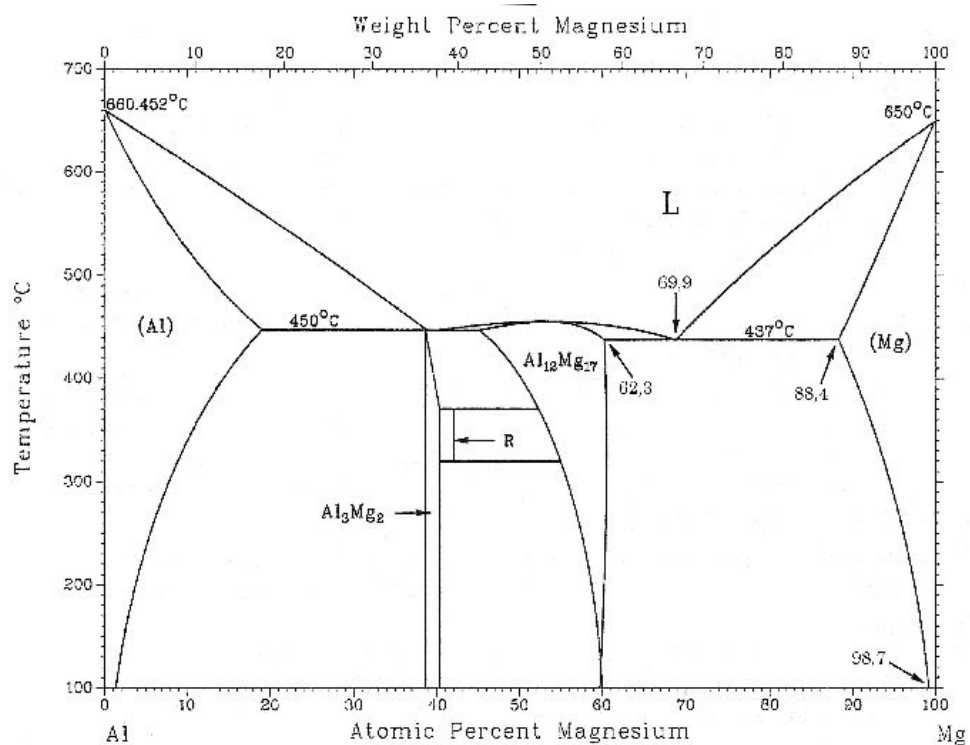
Nejvíce rozšířené slitiny Mg jsou ternární, na bázi Mg – Al – Zn. Na obr. 3.1. je uveden fázový ternární diagram slitiny Mg – Al – Zn. Řezy tímto diagramem jsou uvedeny na dalších dvou obrázcích, obr. 3.2. a obr. 3.3.



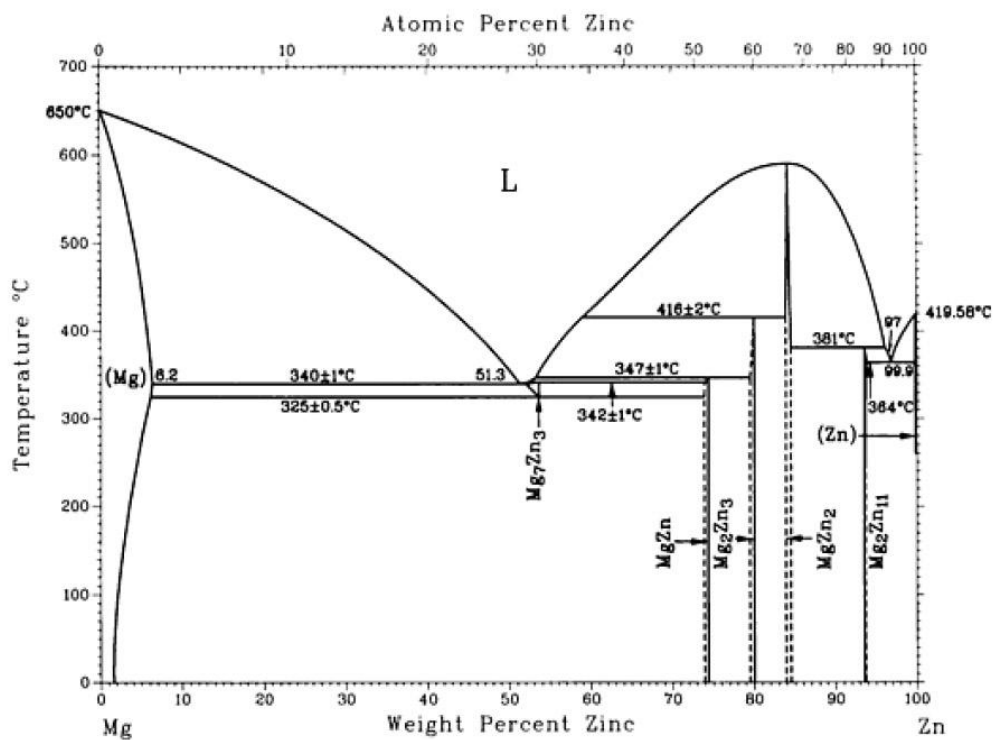
Obr. 3.1 – Ternární diagram hořčikové slitiny Mg – Al – Zn [2].

Mikrostruktura litých hořčikových slitin typu AZ obsahuje kromě matrice tvořené tuhým roztokem ještě intermetalickou fázi $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ označenou v binárním diagramu viz obr. 3.2 jako fáze γ . Fáze γ tvoří s tuhým roztokem δ eutektikum nacházející se v mezidendritických prostorech. Fáze γ krystalizuje v kubické mřížce. Tato fáze způsobuje křehkost u odlitků této slitiny. Při korozi má tato fáze funkci bariéry a rychlost postupu koroze v materiálu zpomaluje, ale zároveň může tvořit s tuhým roztokem korozní články a korozi urychlovat. V binárním diagramu jsou zaneseny atomová procenta hořčíku a hmotnostní procenta hořčíku ve vodorovných osách a na svislé ose je vynesena teplota [1,11].

Zinek je používán společně s hliníkem nebo zirkoniem a thoriem. Ve slitinách Mg – Al se přednostně rozpouští v hořčíku (obr. 3.3) a stává se tak složkou precipitující fáze. Zinek se využívá pro jeho schopnost potlačit škodlivý vliv železa [1].



Obr. 3.2 – Binární diagram systému hořčík – hliník [1]



Obr. 3.3 – Binární diagram systému hořčík – zinek [1]

Dalším prvkem je křemík, který zvyšuje tekutost roztavených slitin. V přítomnosti železa snižuje odolnost proti korozi. U slitin s obsahem 0,5 – 1,5 % Si se dosáhne zvýšení mechanických vlastností za zvýšených teplot a zvýší se také creepová odolnost [1].

Slitiny hořčíku, které obsahují lithium, mají lepší elastické vlastnosti, tento chemický prvek zvyšuje tažnost. Ale na druhé straně snižuje pevnost [1].

Mangan se v hořčíkových slitinách nepoužívá samostatně, ale společně s dalším prvkem, nejčastěji s hliníkem. Mangan zvyšuje napětí na mezi kluzu a zvyšuje odolnost proti korozi ve slané vodě. Tyto slitiny se používají pro odlitky s vysokými požadavky na bezpečnost [1].

Nicméně pouze méně než 30% veškeré produkce hořčíku je užíváno jako konstrukční materiál, a z toho 1÷2 % jsou slitiny připravené tlakovým litím. Nejčastěji používanou slitinou je AZ91 (9 hm. % Al, 1 hm. % Zn, méně než 1hm. % Mn, zbytek Mg). Standardní slitiny jsou málo stabilní při zvýšených teplotách a proto i nevhodné pro aplikace, které jsou exponovány zvýšenými teplotami.

Připravit nové hořčíkové slitiny s vysokou pevností, dobrou tažností, stabilní i při vyšších teplotách a s přijatelnou cenou je aktuálním úkolem dneška [1].

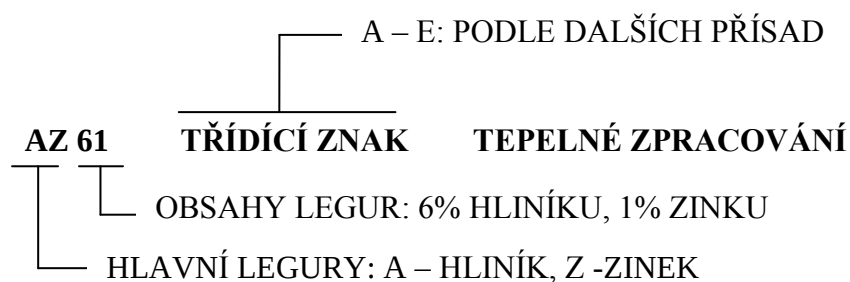
3.3 Označování hořčíkových slitin

Hořčíkové slitiny jsou označovány podle norem ASTM nebo EN. Označování podle normy ASTM je rozšířenější. K označování se používá písmen, která značí použité legující prvky a čísel, která naznačují obsah těchto prvků.

Zkratka ASTM znamená American Society for Testing and Materials. Jedná se o celosvětovou dobrovolnou organizaci. Tato organizace vytváří normy pro materiály, produkty, systémy a servis [11].

Značení dle této normy se skládá ze čtyř částí (*obr. 3.4*). V první části se udávají dva hlavní legující prvky, jsou zapsány ve smluvních písmenech. Tyto prvky jsou uspořádané podle klesajícího obsahu. Druhá část signalizuje množství dvou hlavních legur a skládá se ze dvou celých čísel v odpovídajícím pořadí. V třetí části se rozlišují slitiny se stejným procentuálním složením hlavních legur.

Skládá se z jednoho z následujících písmen: A – první složení, B – druhé složení, C – třetí složení, které je registrované v normě ASTM, D – vysoká čistota, E – vysoká odolnost proti korozi. Poslední část značení udává stav slitiny a její tepelné zpracování.



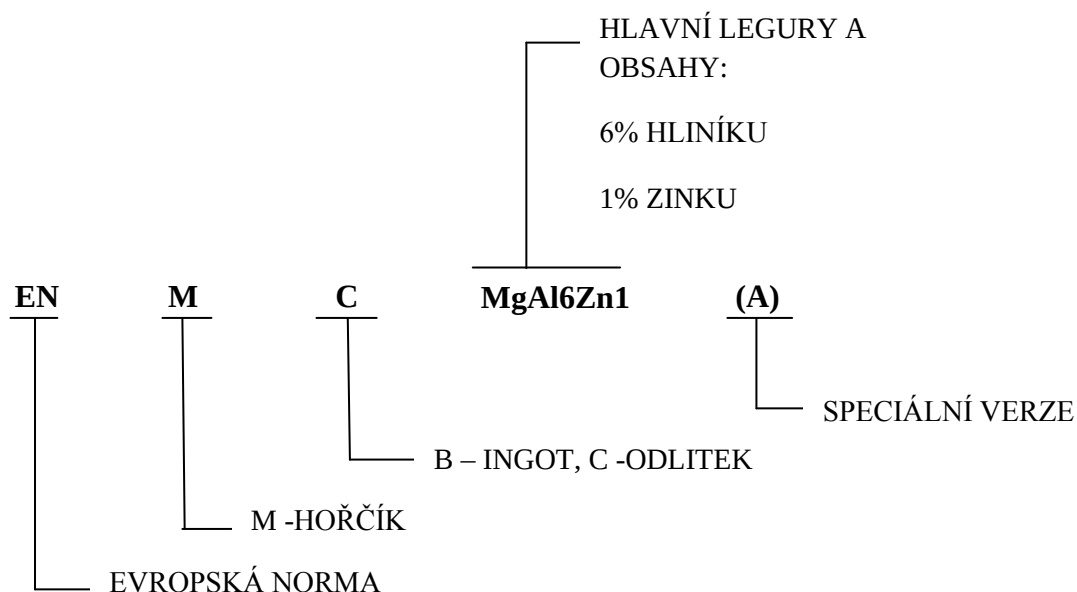
Obr. 3.4 – Význam symbolů ve značení Mg slitin podle ASTM

Tab. 3.1 – Označení zkratk přísadových prvků podle normy ASTM

písmeno	přísadový prvek	značka prvku	písmeno	přísadový prvek	značka prvku
A	hliník	Al	M	mangan	Mn
B	bismut	Bi	N	nikl	Ni
C	měď	Cu	P	olovo	Pb
D	kadmium	Cd	Q	stříbro	Ag
E	kovy vzácných zemin	KVC	R	chróm	Cr
F	železo	Fe	S	křemík	Si
G	hořčík	Mg	T	cín	Sn
H	tórium	Th	W	ytrium	Y
J	stroncium	Sr	X	vápník	Ca
K	zirkonium	Zr	Y	antimon	Sb
L	lithium	Li	Z	zinek	Zn

Evropská norma EN vznikla sloučením více státních norem. Signatura hořčíkových slitin je velmi podobná značení německé normě DIN. Značka EN vychází z anglického spojení European norm [11].

Označování slitin dle této normy se skládá z desetimístního znaku (obr. 3.5). První dvě místa jsou pro označení normy EN, na následujícím místě písmeno M značí charakteristiku základního prvku slitiny. Páté místo se značí písmenem. A – hořčíkové anody, B – ingoty z hořčíku a jeho slitin určených k přetavení, C – odlitky z hořčíkových slitin. Na šestém místě je buď číslice označující hlavní prvek nebo hlavní slitinový prvek nebo chemická značka hořčíku Mg a po ní chemické značky prvkům přičemž se uvádějí maximálně 4 prvky. Na dalších místech se objevuje buď číselné označení skupin hořčíkových slitin, nebo se při označování chemickou značkou udávají číslice označující hmotnostní procento daného prvku v označované slitině.



Obr. 3.5- Význam symbolů ve značení Mg slitin dle EN

3.4 Tepelné zpracování hořčíkových slitin

Tepelné zpracování hořčíkových slitin se provádí pro zlepšení jejich mechanických vlastností a ke snížení vnitřního pnutí u odlitků a tvářených výrobků. Hořčíkové slitiny lze tepelně zpracovávat pouze s obsahem hliníku vyšším než 6 hm %.

Vzhledem k nižší rychlosti difuzních pochodů v hořčíkových slitinách je při tepelném zpracování potřeba menší rychlosti při ohřevu a delší výdrž na teplotě (až 16 hodin). Rychlé ohřátí by mělo za následek vznik velkého napětí a následného vytváření trhlin, které by byly způsobeny tepelnou rozpínavostí odlitku. Při tepelném zpracování se používají pece s nuceným oběhem atmosféry. Důležitým požadavkem na kvalitu tepelného zpracování je vysoká homogenita rozložení teploty v celém objemu pece a stav atmosféry v ní. Jako pecní atmosféry se využívá směs vzduchu s 0,7 až 1 hm. % oxidu siřičitého. Tyto atmosféry se používají pouze u rozpouštěcího žíhání, z důvodu ochrany povrchu součástí před oxidací a také aby se zabránilo případnému hoření. Další možností jak zamezit oxidaci povrchu odlitků při tomto zpracování je ohřev odlitků v taveninách solí, směsi dvojchromanu sodného a draselného. Dusičnany nebo kyanidy jsou zakázány z důvodu nebezpečí exploze nebo nebezpečí otravy [1].

Rozpouštěcí žíhání slouží k odstranění nerovnoměrného rozdělení přísadových prvků ve slitině po krystalizaci. Tímto žíháním docílíme zlepšení tvárnosti odlitků a zvýší se jejich pevnost. Rozpouštěcí žíhání bývá zařazeno před umělým stárnutím [1].

Rekrystalizačního žíhání se využívá jako mezioperace při tváření za studena. Odstraňuje se tím anizotropie materiálu. Bývá aplikováno v rozmezí teplot 250 – 350 °C. Za vyšších teplot dochází k hrubnutí zrna a zhoršují se tak mechanické vlastnosti. Toto žíhání má menší význam, protože většinu slitin hořčíku lze tvářet pouze za tepla [1].

Žíhání k odstranění vnitřního pnutí používáme po operacích, při kterých vzniká v odlitcích vnitřní napětí, u odlitků to bývá nejčastěji následkem nerovnoměrného ochlazování různě velkých průřezů. Výsledkem bývá zlepšení rozměrové stálosti a korozní odolnosti. Aplikuje se při teplotách 235 – 290 °C. Odlitky je nutno žíhat déle než výrobky z tvářených slitin [1].

Homogenizační žíhání slouží k odstranění nerovnoměrného rozdělení přísadových prvků v objemu slitiny po krystalizaci. Tato operace probíhá při teplotách 400 – 420 °C po dobu 15 – 30 hodin [1].

Vytvrzování se u hořčíkových slitin skládá z rozpouštěcího ohřevu v teplotním rozmezí 390 – 420 °C po dobu 10 – 18 hodin a následného umělého stárnutí. U hořčíkových slitin se provádí pouze umělé stárnutí, jedná se o proces, kdy jsou součásti z hořčíkových slitin ponechány na určité teplotě a po prodlevě na této teplotě ochlazovány na klidném vzduchu. Stárnutí se aplikuje ke snížení napětí v odlitku a stabilizování slitiny za účelem rozměrové stálosti. Stárnutím je zvýšena mez kluzu a pevnost na úkor tažnosti, zlepšuje se také korozní odolnost. Teploty tohoto technologického kroku se pohybují v rozmezí 160 – 260 °C a délka výdrže na teplotě je 4 – 8 hodin [1].

3.5 Mechanické vlastnosti hořčíkových slitin a jejich aplikace

Základní mechanické vlastnosti se odvíjí od chemického složení dané hořčíkové slitiny, jejího způsobu výroby a zvoleného tepelného zpracování. Významný vliv má také výsledná mikrostruktura slitiny, obsahy legur a množství, tvar a rozložení intermetalické fáze $Mg_{17}Al_{12}$, která způsobuje křehkost slitiny. Za studena jsou hořčíkové slitiny málo pevné a špatně tvárné.

Slitiny, které jsou odlity metodou squeeze casting, vykazují lepší mechanické vlastnosti (především tažnost) a křehká fáze $Mg_{17}Al_{12}$ je jemně rozptýlena. Následným vhodným tepelným zpracováním jsme schopni tuto fázi téměř eliminovat. Zvýší se takto lomová houževnatost. Mezi nejpoužívanější tvářené hořčíkové slitiny patří slitiny AZ31 a AZ61. Vyšších hodnot meze pevnosti dosahuje slitina AZ61 a to až $R_m = 310 \text{ MPa}$, a to díky vyššímu obsahu hliníku [9,10,12].

Hořčíkové slitiny jsou využívány především již v zmíněném automobilovém průmyslu pro svou nízkou hmotnost, lepší tlumicí vlastnosti než při použití hliníkových slitin a výbornou slévateľnost. Dalším průmyslovým odvětvím je letecký průmysl. Zde nacházejí využití v motorech konvenčních letadel a vrtulníků. Bohužel jsou zde nižší možnosti využití pro špatné korozní vlastnosti. Ke zlepšení se používají antikorozi povlaky [10].

Rozvojem počítačových a komunikačních prostředků došlo k aplikacím hořčíkových slitin i v tomto odvětví. Slitiny hořčíku jsou velmi používaným materiálem pro svoji vysokou pevnost a tuhost, umožňují tak zredukovat hmotnost a rozměry výsledných výrobků. Hořčíkové slitiny mají tři důležité výhody oproti plastům: odvádění tepla, stínění elektromagnetických a radio frekvencí a tzv. „kovový pocit“ představující kvalitu [1].

Hořčíkové slitiny mají široké možnosti využití. V běžném životě se s nimi setkáváme u součástek v mobilních telefonech, počítačích a noteboocích. V oblasti automobilového

průmyslu našly uplatnění u skříní motorů a různých krytů. Velmi často se používá slitina AZ91, známá také pod názvem Elektron, u litých disků kol. U motocyklů se hořčíkové slitiny využívají na svařence podsedlových rámců a krytů motoru. V leteckém průmyslu se hořčíkové slitiny vyskytují v přepážkách letadel, kde se používá tvářený materiál. S litým materiálem se setkáváme v podobě rámců sedadel a různých držáků.

4 Technologie odlévání hořčíkových slitin

Výběr metody odlévání závisí na výsledném tvaru odlitku, jeho složitosti a velikosti, na jejich počtu a v neposlední řadě také na typu slitiny. Většina odlitků hořčíkových slitin se vyrábí tlakovým litím s vysokým stupněm produktivity a vysokou přesností výrobků, které bývají často velmi tvarově bohaté. Rychlé ochlazení zajišťuje příznivou mikrostrukturu s malým zrnem. Vysoká rychlost ochlazování způsobuje uzavření plynu- porozitu, která způsobuje, že se tyto odlitky nedají svařovat a jsou nevhodné pro tepelné zpracování.

Hořčík má vysokou afinitu ke kyslíku, tudíž se při odlévání hořčíkových slitin používají inhibitory hoření. Mezi nejznámější inhibitor se řadí síra. Chemická reakce hořčíku s oxidem siřičitým SO_2 probíhá mnohem pomaleji než reakce s kyslíkem nebo dusíkem. Proto SO_2 našel široké uplatnění v průmyslu v ochraně proudu taveniny před oxidací při lití a povrchu taveniny ve vtokové soustavě slévárenské formy.

Pro vysokou hořlavost hořčíkových slitin musí být tavenina nepřetržitě kryta vhodnou struskou nebo chráněna ochrannou atmosférou (SO_2 , SF_6 – hexafluorid síry).

4.1 Odlévání do netrvalých forem

Při použití metody odlévání do netrvalých forem musíme dbát na ochranu kovu před atmosférou. Při lití se musí proud rozžhaveného kovu zaprašovat práškovou sírou. Síra se přidává i do forem k zamezení hoření kovu po nalití[13].

Lití do pískových forem se využívá pro kusovou výrobu jednoduchých, tvarově nekomplikovaných odlitků. Pro tvarově složitější odlitky s vnitřními dutinami je vhodná metoda, tzv. V – proces, pro odlitky malých rozměrů s komplikovanými tvary se využívá lití do skořepinových forem vyrobených metodou vytavitelných modelů[13].

Nevýhodou této metody je špatné řízené dodávání kovu při tuhnutí. Dochází k tomu kvůli širokému intervalu tuhnutí a malým dodávaným tlakem [13].

4.2 Gravitační lití do kovových forem

Tato metoda je vhodná pro pracovní velmi namáhané odlitky. Touto metodou se odlévají například bloky spalovacích motorů. Formy pro tento druh odlévání bývají vyrobeny z litiny s lupínkovým nebo kuličkovým grafitem. Velká tepelná akumulace schopnost a značná pevnost kovových forem znemožňuje volné smršťování odlitku. Nevýhodou gravitačního lití je omezená složitost odlitku s větší tloušťkou stěn, omezená hmotnost odlitku max. 15 kg a nevhodné pro odlévání tenkostěnných odlitků. [13,14].

4.3 Nízkotlaké lití

Při nízkotlakém lití dochází ke zvýšení tlaku nad hladinou kovu, čímž je daný kov vytlačován z kelímku vzhůru do formy. Díky tomu, že ústí trubice je ponořeno pod vrstvou oxidů a nečistot, do formy se dostává pouze čistý kov bez vměstků. Kov je do formy vháněn přetlakem 0,03 – 0,5 MPa. Pod tímto tlakem i ve formě kov tuhne. Forma je přehřívána na

teplotu kolem 200 °C. Využití kovu je 90 – 95 %. Hotové odlitky mají dobrou kompaktnost, netvoří se díry a plynové bubliny, neobjevují se mikrořediny ani poréznost odlitku. [13,14].

4.4 Vysokotlaké lití

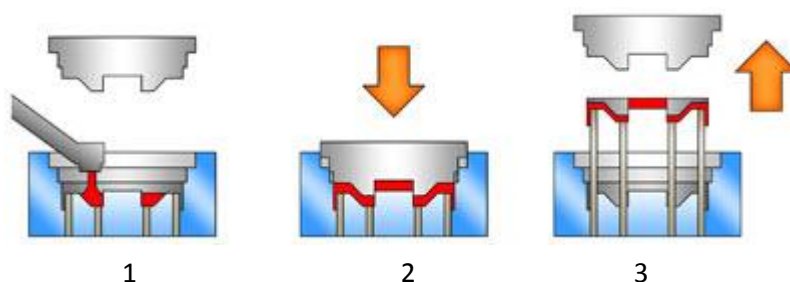
Metoda, kdy se roztavený kov vhání do formy tlakem až 250 MPa. Získávají se tak odlitky s přesnými rozměry, ale nemají stálou vnitřní homogenitu. Roztavený kov proudí vysokou rychlostí přes vtokovou soustavu do dutiny kovové formy, kde tuhne. Metoda je vhodná pro velkosériovou a hromadnou výrobu pro vyšší pořizovací cenu kovové formy. Zařízení na tlakové lití se dle konstrukce dělí na zařízení se studenou a teplou komorou. Odlévání s použitím teplé komory se používá pro odlitky malých rozměrů. Komora je umístěná v roztaveném kovu. Kov se do ní dostává přes zvláštní otvor a do formy je kov následně vtlačen pístem.

Studená tlaková komora může být vertikální nebo horizontální. Tato komora je velkým problémem při tomto způsobu odlévání jsou velké turbulence a s tím spojené oxidace kovu během lití. Výhodou je použití kovových forem, kdy dochází ke značné kumulaci tepla, tedy k intenzivnímu odvádění tepla z tuhnoucího odlitku [14].

4.5 Squeeze casting

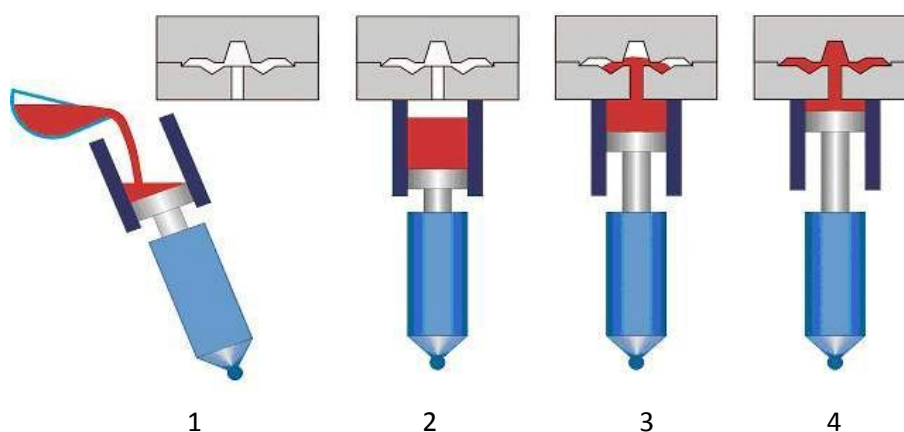
Metoda squeeze casting je kombinací pomalého lití a tuhnutí pod vysokým tlakem. Pórovitost odlitků je mnohem menší než při tlakovém lití, a to díky pomalejšímu plnění a působení tlaku po celou dobu jejich tuhnutí. Díky působení tlaku po celou dobu tuhnutí zabránujeme vzniku makro a mikropórovitosti. Tato technologie potlačuje vznik staženin, proto bývá používána při výrobě odlitků s tepelnými uzly nebo při rozdílné tloušťce stěn. Odlitky vyrobené touto metodou mají výborné mechanické vlastnosti, homogenní strukturu a větší přesnost. Squeeze casting můžeme provádět přímou nebo nepřímou metodou. Tekutý kov je vléván stejně jako u metody vysokotlakého lití do komory kovové formy, která bývá předehřátá na 200 °C pro rychlejší odvod tepla a snížení doby tuhnutí. Teplota taveniny bývá nejčastěji 700°C. První plnicí tlak je obvykle 80 MPa, kov je tímto tlakem vtlačován do formy po dobu 15 s. Následné dotlačení je vykonáváno pod tlakem 140 MPa po dobu 90s [9,11,13].

U přímé metody (*obr. 4.1*) se přesně odměřené množství kovu volně nalije do spodní části formy a uzavře se horní částí formy. Po ztuhnutí se odlitek vytlačí z formy pomocí vyhazovačů. Tato metoda je vhodná pro masivní a méně složité odlitky. Můžeme se setkat i s označením „přímá metoda lití s krystalizací pod tlakem“. U přímé metody nejsou zapotřebí nálitky a vtokové soustavy [13].



Obr. 4.1 – Squeeze casting přímou metodou [13]: 1 – nalití taveniny do spodní části formy, 2 – stlačení horní části formy (získání odlitku), 3 – rozevření formy (vyhazovače vyhodí odlitky ven)

U nepřímé metody (obr. 4.2) se tavenina nalévá do výklopné dávkovací komory, která je umístěná na pístu přímo pod samotnou formou. Pak se soustava vrátí do původní pracovní polohy. Kov je vtlačován nízkou rychlostí, zhruba 0,5 m/s, do formy. Po naplnění formy dochází k dotlačení kovu tlakem až 150 MPa a kov se nechá ztuhnout. Proudění kovu je laminární, proto nedochází k víření a jeho oxidaci. U nepřímé metody lze odlévat součásti s tenčími stěnami a větší složitostí [14].



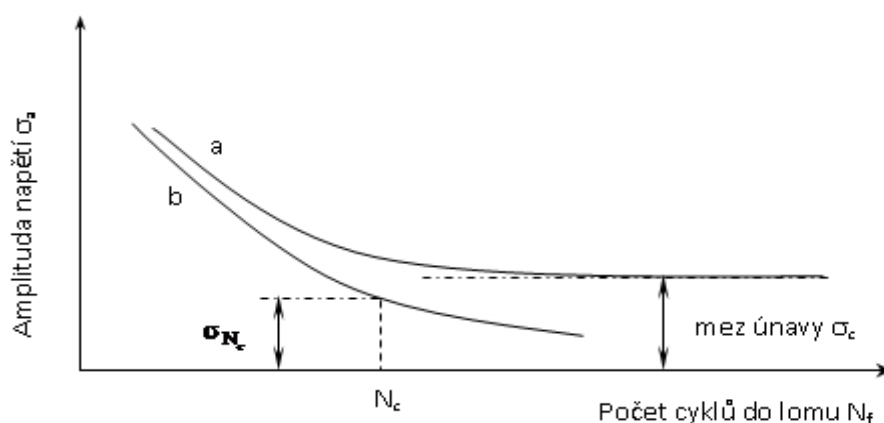
Obr. 4.2 – Squeeze casting nepřímou metodou [13]: 1 – odlévání taveniny, 2 – pohyb pístu (razníku) se sklopným válcem, 3 – přisunutí sklopného válce k formě, 4 – vstříknutí taveniny pístem do dutiny formy

K výhodám používání metody squeeze casting patří vysoká intenzita přestupu tepla z kovu do formy, dokonalé ochlazování po celou dobu tuhnutí díky zamezeným mezerám mezi formou a odlitkem při tuhnutí. Vysoká rychlost tuhnutí vede ke vzniku jemnozrnné struktury a zmenšení velikosti intermetalických fází. Nevýhodou této metody je její značná investiční a provozní náročnost, je zde zmenšená životnost forem. U této metody je také limitující maximální velikost a váha výsledných odlitků [9,14].

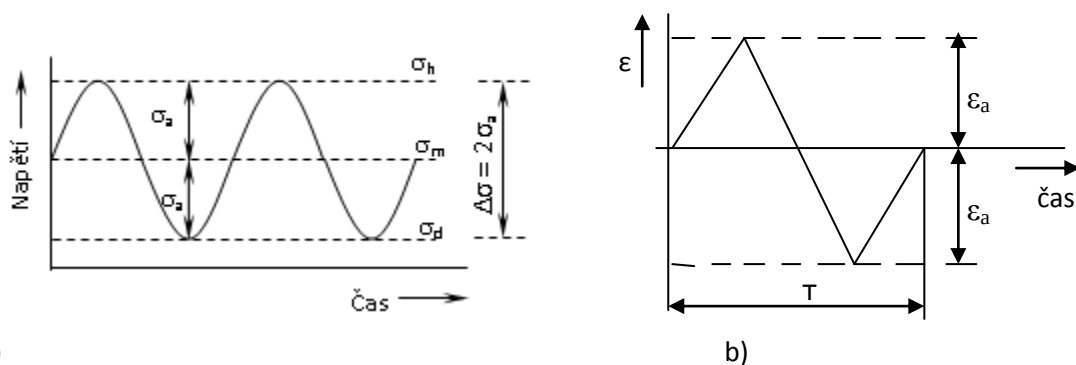
5 Únava materiálu

Podrobíme-li strojní součást nebo konstrukci působení časově proměnlivých vnějších sil, dochází po určité době k jejímu lomu, který je výsledkem mikroskopických procesů probíhajících ve struktuře materiálu. Přitom velikost těchto vnějších sil může být tak malá, že její statické působení snáší kov bez známek porušení. Postupné rozrušování kovu při proměnlivém zatěžování má nevratný, kumulativní charakter, který se až v samotném závěru procesu hmatatelně projeví růstem makroskopické trhliny a lomem [3,4].

Prvotní systematicky uspořádané zkoušky prováděl August Wöhler v letech 1852-1870. Své experimenty prováděl pro určení obecných konstrukčních principů pro výrobu lokomotiv a vagonů, mostních konstrukcí a železničních profilů. Dodnes je jednou ze základních únavových charakteristik Wöhlerova křivka, která udává závislost amplitudy napětí σ_a na počtu cyklů do lomu N_f , kdy N_f se vynáší do logaritmických souřadnic. Tato křivka je známá také pod názvem S – N křivka. Amplituda napětí σ_c , při které nedochází k lomu ani při vysokém počtu cyklů (řádu 10^7), se nazývá mez únavy. Smluvní mez únavy je pro hořčík N_f roven 10^8 cyklu. V obrázku 5.1 jsou vyneseny schematicky 2 Wöhlerovy křivky, první křivka platí u nízkouhlíkové oceli a jiné intersticiální slitiny, pro hliník, hořčík a měď platí křivka b. Časové průběhy zatěžování jsou zobrazeny na obr. 5.2 [3,4,12].

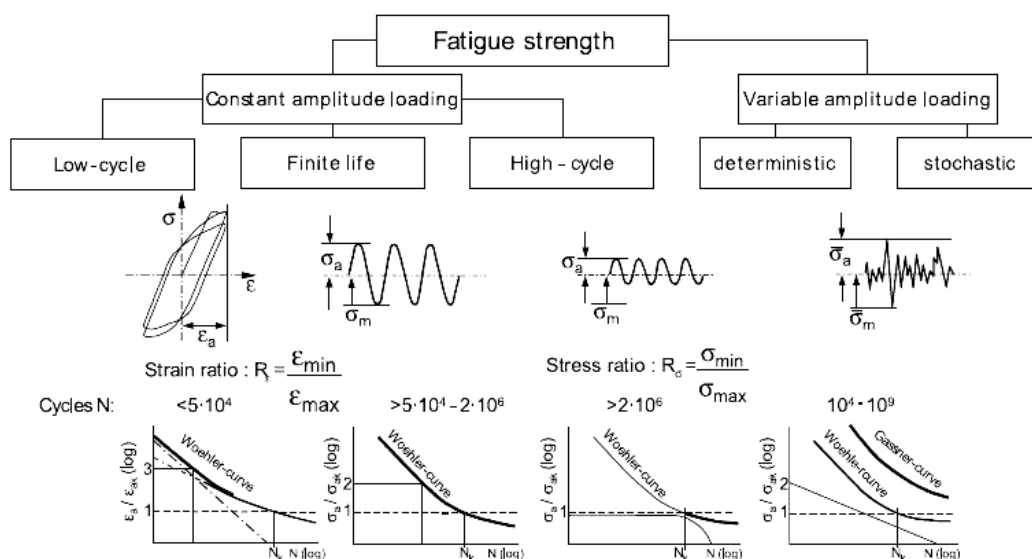


Obr. 5.1 - Wöhlerova křivka [6]



Obr. 5.2 – časový průběh pro a) měkký mód, b) tvrdý mód zatěžování [8]

σ_h – horní napětí, σ_a – amplituda napětí, σ_m – střední napětí, ε_a – amplituda deformace, T – perioda.



Obr. 5.3 – Rozdělení únavového zatěžování. Testy únavové odolnosti se dělí dle použité amplitudy zatěžování a oblastí počtů cyklů do lomu. [24]

Je-li řízenou veličinou síla potažmo napětí, jedná se o měkké zatěžování. Časový průběh řízené veličiny je sinusového tvaru.

Frekvenci kmitočtu u měkkého módu zatěžování získáme ze vztahu [4]:

$$f = \frac{\dot{\sigma}}{4 \cdot \sigma_a} \quad (1)$$

Při zatěžování tvrdým módem platí vztah [14]:

$$\nu = \frac{\dot{\varepsilon}}{4 \cdot \varepsilon_a} \quad (2)$$

kde $\dot{\varepsilon}, \dot{\sigma}$ značí rychlost celkové deformace potažmo rychlost změny napětí, ν je frekvence zátěžného cyklu u tvrdého módu.

Existence únavy kovů je podmíněna cyklickou plastickou deformací. S plastickou deformací se mění modul pružnosti E . Mnohonásobné opakování plastické deformace, byť tak malé, že z hlediska běžného pojetí jde o zatěžování elastické, vede ke kumulativnímu poškození, končícímu únavovým lomem. Únava se rozděluje na únavu vysokocyklovou (počet cyklů do lomu řádu 10^5 a výše) a na únavu nízkocyklovou (počet cyklů do lomu řádu $5 \cdot 10^4$ a méně). Do počtu cyklů do lomu řádu 10^2 hovoříme o oblasti kvazistatické pevnosti v případě symetrického zátěžného cyklu a oblasti cyklického creepu při asymetrickém zatížení s tahovým předpětím. Oblast gigacyklové únavy se udává od počtu cyklů do lomu vyšších jak $10^8(10^9)$ [4].

Parametry asymetrie bývají zapisovány ve tvarech [4]:

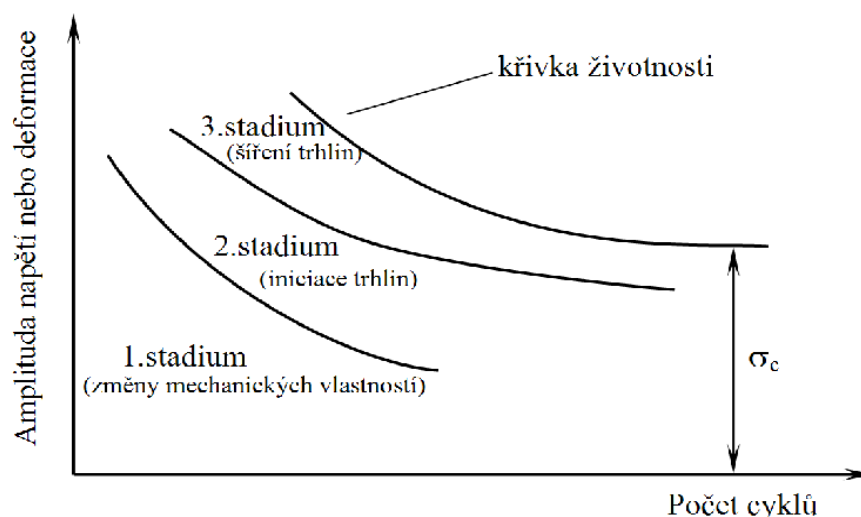
$$R = \sigma_n / \sigma_h \quad (3)$$

$$P = \sigma_h / \sigma_a \quad (4)$$

$$P = 2/(1 - R) \quad (5)$$

Na základě typů nevratných změn, způsobených cyklickou plastickou deformací, lze celý únavový proces rozdělit na tři časově následujících a do jisté míry se překrývajících stadia (obr. 5.4):

1. Stadium změn mechanických vlastností - toto stadium je charakteristické změnami v celém objemu zatěžovaného kovu. Mění se hustota a konfigurace mřížkových poruch a následkem toho i mechanické vlastnosti.
2. Stadium nukleace trhlin – týká se již jen malé části z celkového objemu, a to povrchových vrstev
3. Stadium šíření trhlin - pro šíření únavových trhlin jsou rozhodující podmínky na špičce trhliny.



Obr. 5.4 – Stadia únavového procesu [8]

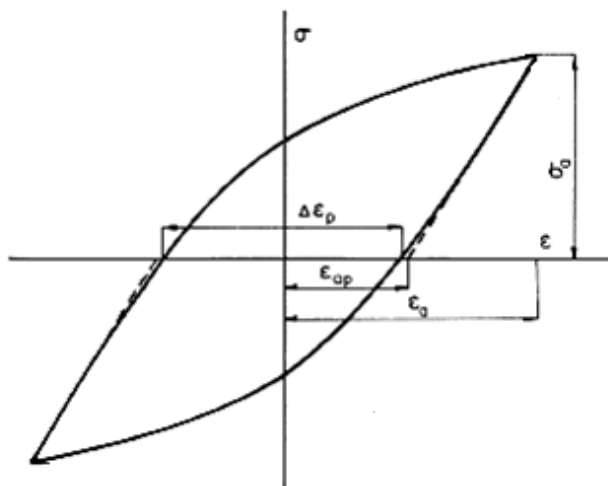
5.1 Stadium změn mechanických vlastností

Při cyklickém zatěžování kovů a slitin dochází v důsledku změn v mikrostruktuře materiálu ke změnám jejich mechanických, elektrických, magnetických a jiných fyzikálních vlastností. Za mechanické vlastnosti zde budeme považovat vlastnosti, které charakterizují odpor materiálu proti deformaci vyvolané vnějšími silami. Odpor materiálu vůči cyklické deformaci může v průběhu únavového procesu růst nebo klesat, a to v závislosti na typu materiálu, na podmínkách zatěžování a na teplotě. Nejlepší a nejadekvátnější způsob detekce změn mechanických vlastností je přímé měření parametrů hysterezních smyček[3,5].

5.1.1 Hysterezní smyčka

Po ukončení počátečního stadia cyklické deformace, u kterého probíhá cyklické zpevnění nebo změkčení, nastává u větší části materiálů stadium stabilizace. V tomto průběhu je hysterezní smyčka uzavřená a mění se s rostoucím počtem cyklů jen nepatrně nebo vůbec (obr. 5.4).

Při posuzování únavy se jedná o pravidelné opakování zatěžovacího cyklu v určitém rozmezí řízené veličiny. Sledujeme přitom amplitudy napětí σ_a , amplitudy celkové deformace ϵ_{at} , amplitudy plastické deformace ϵ_{ap} a amplitudy elastické deformace ϵ_{ae} .



Obr. 5.4 – Schéma hysterezní smyčky [4]: σ_a – amplituda napětí, ϵ_a – amplituda deformace, ϵ_{ap} – amplituda plastické deformace, $\Delta \epsilon_p$ – šířka hysterezní smyčky

V literatuře [4] se uvádí, že pro malé hodnoty ϵ_{ap} je přesnější určovat amplitudu plastické deformace jako poloviční šířku hysterezní smyčky při střední hodnotě napětí. Jedná se o vztah [4]:

$$\epsilon_{ap} = \frac{\Delta \epsilon_p}{2} \quad (6)$$

Pokud amplituda deformace s počtem cyklů klesá a roste při tom amplituda napětí, jedná deformace a poklesem amplitudy napětí. Plocha a tvar hysterezní křivky se v průběhu zpevnění či změkčení se mění. Po ukončení počátečního stadia cyklické deformace, během něhož probíhá cyklické zpevnění nebo změkčení, nastává u většiny materiálů stadium stabilizace, v jehož průběhu je hysterezní smyčka uzavřená a mění se s počtem cyklů jen nepatrně nebo se nemění vůbec. Závislost napětí na deformaci je charakterizována

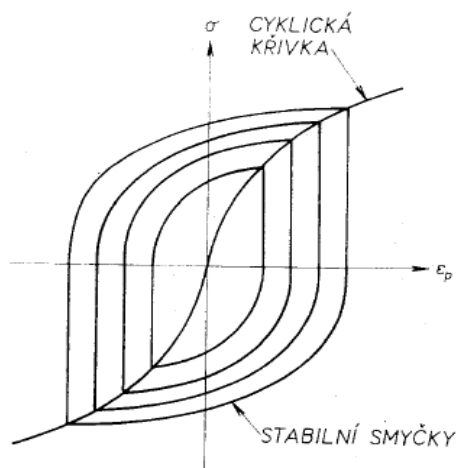
neuzavřenými hysterezními smyčkami. V průběhu cyklického zatěžování rostou rozkmity napětí, klesají rozkmity plastické deformace a hysterezní smyčka se postupně uzavírá a ustaluje [3,4].

5.1.2 Cyklická křivka napětí – deformace

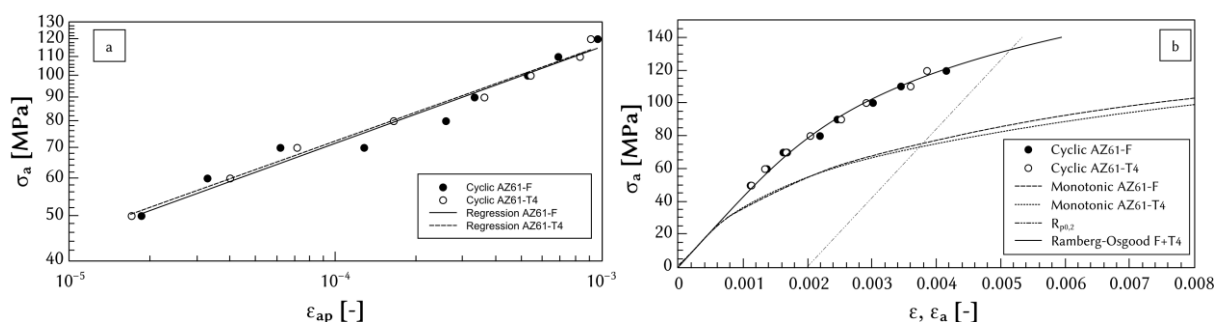
Po skončení cyklického zpevnění nebo změkčení se mechanické vlastnosti v průběhu dalšího zatěžování dále už nemění. Vytvoří se takto stabilní hysterezní smyčka. Množina těchto ustálených hysterezních smyček charakterizuje ustálené cyklické chování zkoušeného materiálu. Proložíme-li vrcholovými body stabilních hysterezních smyček křivku, dostaneme relaci mezi amplitudou napětí a amplitudou plastické deformace v ustáleném stavu. Tato křivka se označuje jako cyklická křivka napětí – deformace (obr. 5.5). Tato křivka charakterizuje cyklickou plastickou odezvu materiálu po větší část únavového života [3,4]. Tuto závislost lze napsat ve tvaru [4]:

$$\sigma_a = K' \cdot \varepsilon_{ap}^{n'} \quad (7)$$

σ_a – amplituda napětí, ε_{ap} – amplituda plastické deformace, K' – koeficient cyklického zpevnění, n' – exponent cyklického zpevnění



Obr. 5.5 – Cyklická křivka napětí – deformace [3]



Obr. 5.6 – a) CDK slitiny AZ61 – F a AZ61 – T4, b) Jednosměrná a CDK slitin AZ61 – F a AZ61 – T4 [23]

Cyklickou deformační křivku lze zapsat též jako závislost celkové deformace ε_a na amplitudě napětí σ_a ve tvaru [4]:

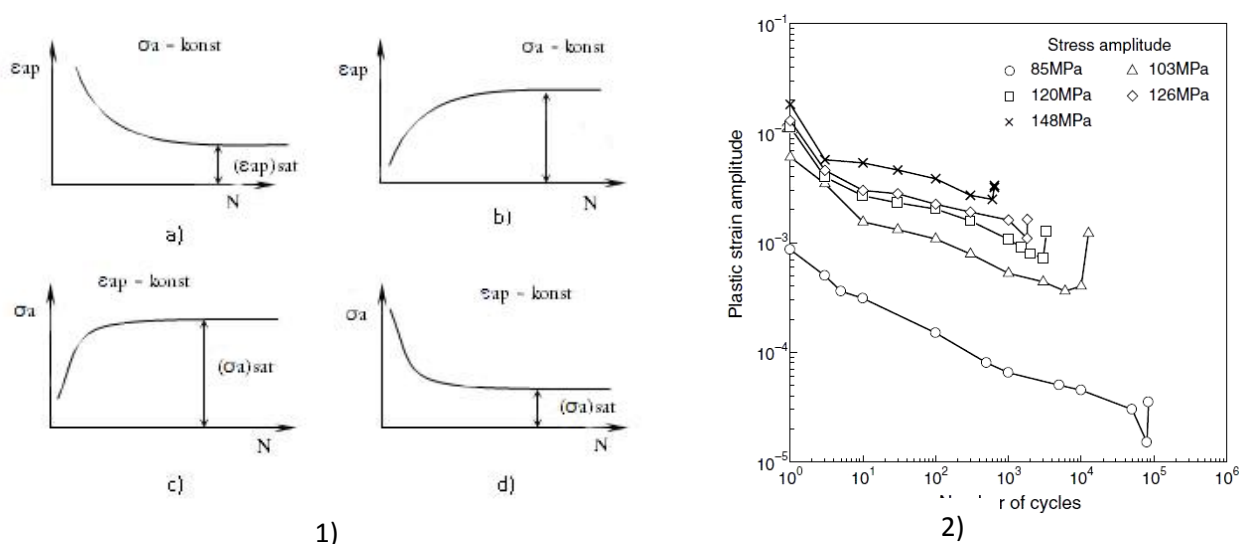
$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K''} \right)^{1/n'} \quad (8)$$

kde E značí modul pružnosti v tahu, K'' je součinitel cyklického zpevnění a n' je exponent cyklického zpevnění

Pro oblast nízkocyklové únavy byly vyvinuty zkoušky, umožňující získat cyklickou křivku napětí – deformace z jediného vzorku. Jedná se o metody zkráceného určení CDK. Podstatou těchto metod je postupné zvyšování nebo snižování amplitudy zatěžování. Na každém stupni musí proběhnout takový počet cyklů, aby došlo ke stabilizování hysterezní smyčky [3,4].

5.1.3 Křivky cyklického zpevnění / změkčení

Křivky cyklického zpevnění/změkčení slouží k vyhodnocení chování materiálu na cyklické zatěžování. U tvrdého módu zatěžování se jedná se o závislost amplitudy napětí na počtu cyklů do lomu pro různé hodnoty napětí, tyto závislosti se vynášejí do grafu s logaritmickými souřadnicemi. Při použití měkkého módu s konstantními amplitudami napětí jsou to závislosti amplitudy plastické deformace na počtu cyklů do lomu a opět se výsledné hodnoty vynášejí do grafu s logaritmickými souřadnicemi. Při cyklickém zatěžování s konstantní amplitudou napětí se mění pouze amplituda deformace. Pokud amplituda deformace s počtem cyklů klesá, jedná se o cyklické zpevnění, viz obr. 5.7.a.. Cyklické změkčení nastává při růstu amplitudy deformace, obr. 5.7.b.. Při režimu zatěžování s konstantní amplitudou deformace se mění amplituda napětí. Projev růstu amplitudy napětí se označuje za cyklické zpevnění, obr 5.7.c..



Obr. 5.7 – 1) Schémata cyklického zpevnění a změkčení pro různé režimy zatěžování [3],
2) Křivky cyklického zpevnění – změkčení AZ61 v měkkém módu zatěžování [25].

Na toto stadium navazuje stadium saturace, u které se amplituda napětí téměř nemění. Dalším stadiem může být pomalé cyklické zpevňování, kdy jsou vyšší amplitudy deformace, nebo u nižších hodnot amplitud deformace nastává cyklické změkčení. Pokles amplitudy napětí respektivě nárůst amplitudy plastické deformace ke konci únavové zkoušky souvisí se vznikem magistrální trhliny. Jinými slovy se dá říci, že roste napětí potřebné k dosažení stejně velké deformace. Cyklické změkčení se projevuje poklesem amplitudy napětí, klesá tedy napětí potřebné k dosažení stejné deformace, obr 5.7. d. [3,4,12].

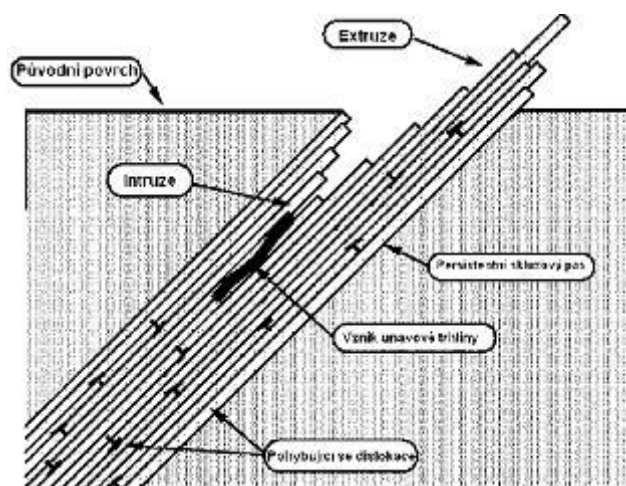
5.2 Stadium nukleace únavových trhlin

Nukleace únavových trhlin probíhá z velké části na povrchu součásti, v místech koncentrace cyklické plastické deformace. Byly vypořádovány 3 základní typy nukleačních míst:

1. Únavová skluzová pásma - nejčastěji se uplatňující typ
2. Hranice zrn – v případě vysokoamplitudové únavy za zvýšených teplot
3. Rozhraní mezi inkluzemi a matricí – vyskytuje se u vícefázových materiálů

Tvorba únavových skluzových pásem začíná až ke konci prvního stadia únavového procesu. Můžeme se setkat s označením perzistentní skluzové čáry nebo pásy. Základní schéma je uvedeno na obrázku 5.8.. Tyto pásy se objevují na vzorcích i po odleštění povrchových vrstev. S přibýváním počtu cyklů roste intenzita i četnost pásem. Vznikají tak povrchové nerovnosti, extruze - výstupky na povrchu nebo intruze - prohloubeniny v povrchu. Lze pozorovat první mikrotrhliny v řádech desetin a jednotek mikrometrů. Vše je podmíněno vnější plastickou deformací. Nukleační stadium končí vytvořením povrchových mikrotrhlin. Tyto mikrotrhliny leží podél skluzových rovin, v nichž je největší smykové napětí. Únavová trhlina vzniká působením nakupením dislokací u hranice zrna. Iniciace trhliny v perzistentním skluzovém pásu nebo na hranicích zrn probíhá nejčastěji v rovině nejbližší krystalografické rovině svírající úhel 45° se směrem hlavního napětí. Magistrální trhlina se vytváří až postupným šířením nebo spojováním trhlin vzniklých na hranicích zrn. Hranice zrn omezují spojitost deformací, tyto hranice zrn mohou až úplně zastavit šíření trhlin. Jako zárodečná místa se uplatňují především při vyšších teplotách nebo velkých amplitudách deformace. Jako koncentrátoři napětí zde pak působí místa styku více zrn či větších nerovností hranic [3,4,19].

U hořčíkových slitin byla pozorována iniciace únavových trhlin hlavně z pórů a dutin z povrchu nebo z podpovrchové oblasti součásti. Z provedených experimentů jednoznačně vyplývá, že se zvyšující se velikostí pórů klesá napětí potřebné k jejich iniciaci. K nukleaci trhlin však může docházet i na hranicích δ – Mg zrn nebo na interdendritickém eutektiku Mg [11].



Obr. 5.8 – Schéma kartového skluzu v perzistentním skluzovém pásu [19]

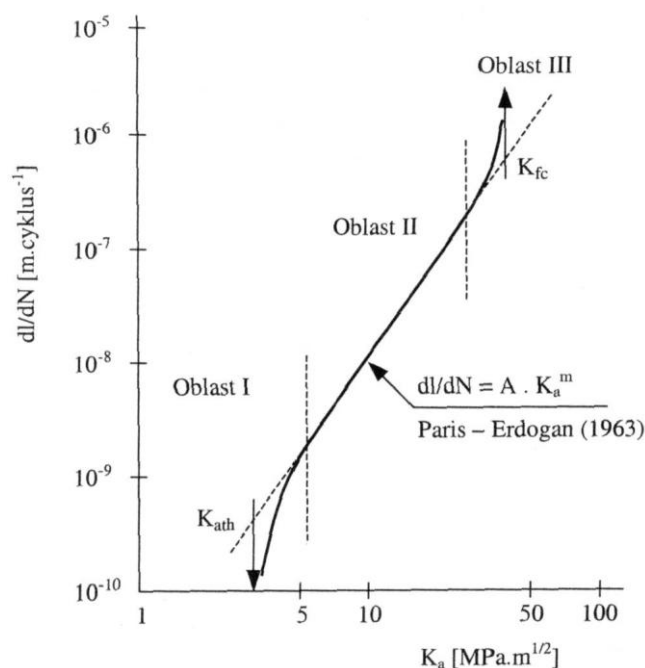
5.3 Stadium šíření trhlin

Stadium šíření trhlin se rozděluje na dvě části. V první fázi probíhá šíření trhlin pod úhlem 45° na působící napětí. Toto se označuje za krystalografické šíření. Po dosažení určité délky se trhlina stočí kolmo na směr působícího napětí. Pak se jedná o druhé stadium šíření. Toto šíření se popisuje pomocí lomové mechaniky a bývá označováno jako šíření dlouhé trhliny. Mikrotrhliny vznikají v místech maximální skluzové aktivity podporované vrubovým účinkem [3,4].

Šíření dlouhých trhlin je možné popsat pomocí parametrů lomové mechaniky. Stadium šíření trhlin popisuje Paris - Erdoganův vztah [5]:

$$\frac{dl}{dN} = A \cdot K_a^m \quad (9)$$

kde dl/dN je rychlost šíření únavové trhliny [$\text{m} \cdot \text{cyklus}^{-1}$], A a m jsou parametry rovnice, K_a je amplituda součinitele intenzity napětí [$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$].



Obr. 5.9 – Kinetický diagram únavového poškození[5]

5.4 Křivky životnosti

V nízkocyklové oblasti lze únavové chování materiálů popsat dvojicí rovnic, a to Wöhlerovou – Basquinovou křivkou a Manson – Coffinovou křivkou.

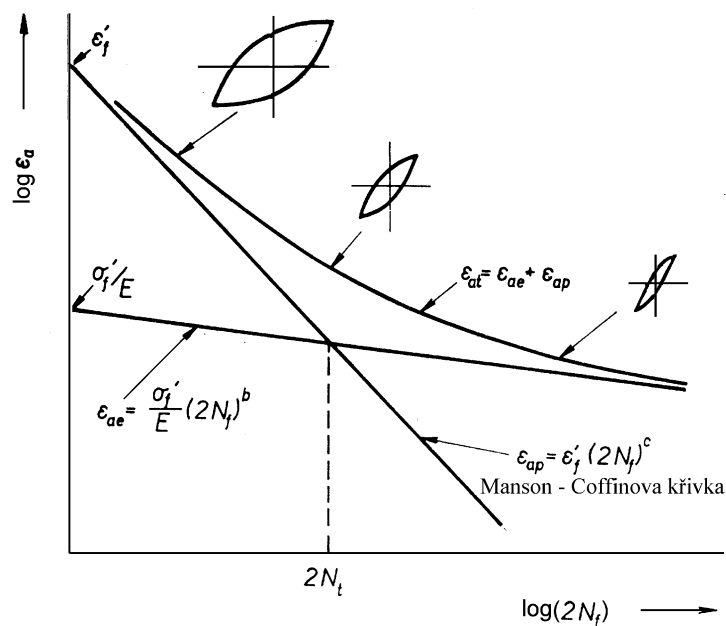
Mansonova – Coffinova křivka

Pokud použijeme při provádění únavové zkoušky tvrdý mód zatěžování, tzn. řízenou veličinou je deformace, výsledkem je Mansonova – Coffinova křivka (obr. 5.10). Vynáší se do závislosti amplituda plastické deformace s počtem cyklů do lomu. Časový průběh řízené veličiny u tvrdého módu zatěžování je pilový [3,4].

Tato křivka se skládá z plastické (ϵ_{ap}) a elastické (ϵ_{ae}) části. V místě jejich protnutí se nachází tranzitní počet cyklů (N_T). U této křivky se stanovují charakteristiky materiálu: součinitel únavové tažnosti ϵ'_f a plastický exponent c [8].

Manson – Coffinův vztah píšeme ve tvaru [4]:

$$\epsilon_{ap} = \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (10)$$



Obr. 5.10 – Mansonova – Coffinova křivka [4]

Wöhlerova - Basquinova křivka

Křivku životnosti $\sigma_a - N_f$ popisuje mocninná Basquinova závislost [4]:

$$\sigma_a = \sigma'_f \cdot (2N_f)^b \quad (11)$$

kde σ'_f je koeficient únavové pevnosti, b je exponent únavové pevnosti.

V minulosti se Wöhlerova křivka stanovovala pouze ve vysokocyklové oblasti. V současné době se její aplikace se rozvíjí i do oblasti nízkocyklové únavy. Napětí se v této oblasti blíží pevnosti v tahu. Mez únavy bývá definována jako největší výkmit napětí při daném středním napětí, který daný materiál teoreticky vydrží po nekonečný počet cyklů.

Časová mez únavy je největší výkmit napětí při určitém středním napětí, které materiál vydrží po předem známý počet cyklů.

Při srovnání rovnic křivek životnosti s rovnicí popisující cyklickou deformační křivku je zřejmé, že ze šesti parametrů v těchto rovnicích jsou nezávislé pouze čtyři. Dva parametry můžeme vyjádřit pomocí ostatních čtyř. Platí vztahy:

$$b = n' \cdot c \quad (12)$$

$$K = \frac{\sigma'_f}{\epsilon'^{n'}} \quad (13)$$

Rovnice (12) a (13) jsou velmi dobře splněny pro soubor šesti parametrů z nichž každý byl nezávisle určen regresní analýzou z experimentálních údajů. Vzhledem k tomuto tedy můžeme za základní parametry charakterizující cyklickou plasticitu a únavovou životnost v nízkocyklové oblasti volit čtyři parametry, tj. K' , n' , ϵ'_f , c .

6 Experimentální materiál a zkušební technika

Pro vlastní experiment byla použita hořčíková slitina AZ61 odlitá metodou squeeze casting. Byl použit plnicí tlak 97 MPa s následným dotlačením a tuhnutím pod tlakem 150 MPa. Materiál ve tvaru rondelu o rozměrech průměru = 200mm a tloušťce = 50 mm. Rondel byl vyroben v ZWF GmbH v německém Clausthalu. V tabulce 6.1 je uvedeno chemické složení slitiny, které bylo určeno pomocí opticko emisního spektrometru s doutnavým výbojem Spectramat GDS750.

Tab. 6.1 – a) Chemické složení slitiny AZ61 ve tvářeném stavu dle normy

Prvek [hm %]	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Fe	Ni	součet ostatních	Mg
AZ61	5,8 - 7,2	0,04 - 1,5	0,15 - 0,5	max 0,1	max 0,05	max 0,005	max 0,005	max 0,3	bal.

b) Naměřené chemické složení slitiny AZ61 ve litém stavu

Prvek [hm%]	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Ni	Zr	Mg
AZ61	5,22	0,99	0,42	0,013	0,003	0,01	0,01	bal.

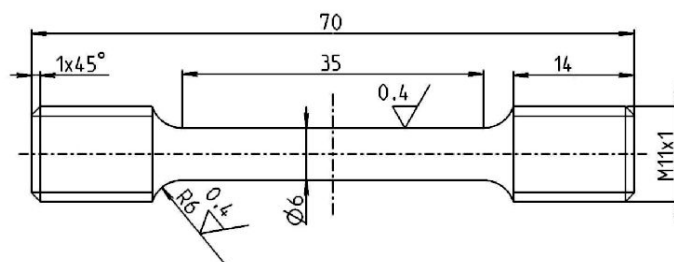
6.1 Příprava vzorků pro světelnou mikroskopii

Vzorek byl odebrán ze zkušební tyče metodou abrazivního rozbrušování pomocí kotouče Struers 10S25 (36TRE). Dále byl zalisován za tepla do lisovací hmoty DENTACRYL za použití lisu Struers LaboPress – 3 při 180 °C, tlaku 20 kN po dobu lisování 10 minut. Broušení bylo prováděno na bruskách Pedemin za použití brusných papírů zrnitosti 400, 1200, 4000 po dobu 3 minut. Po celou dobu byl vzorek chlazen vodou. Následně byl vzorek leštěn pomocí diamantové pasty 3 a 1 μm po dobu 3 minut a $\frac{1}{4}$ μm , po dobu 1 minuty, smáčedlo DP-Lubricant Red, Struers, Depo 5320. Jako leptadlo se použila směs kyseliny pikrové (5 ml kyseliny octové, 6 g kyseliny pikrové, 10 ml vody a 100 ml ethanolu) [16].

6.2 Zkušební zařízení pro tahovou zkoušku

U tahové zkoušky byly použity poměrné válcové krátké zkušební tyče (obr. 6.1). Z výsledného tahového digramu, v závislosti napětí – deformace, se určují základní mechanické charakteristiky, $R_{p0,2}$, R_m , A , Z .

Tahová zkouška v této bakalářské práci byla provedena dle normy [20] na stroji TIRA Test 2300. Pro snímání prodloužení byl použit extenzometrem MFA 2 Mini.



Obr. 6.1 – Zkušební těleso pro tahovou zkoušku [8]

6.3 Měření tvrdosti

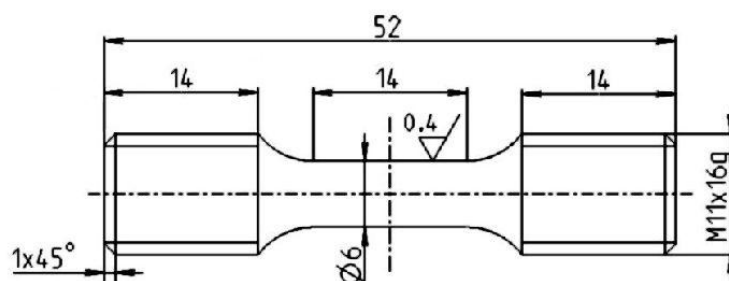
Pro vyhodnocení tvrdosti pro tuto bakalářskou práci byla použita metoda podle Brinella dle normy [22] na přístroji LECO HBE300. Vtisky byly vyhodnoceny pomocí stereomikroskopu SZ61 – TR se softwarem Olympus QuickPHOTO Industrial 2.3. Indentorem při této zkoušce byla kulička z tvrdokovu o průměru 2,5 mm, zátěžná síla $F = 1225$ N. Tvrdost materiálu byla měřena na metalografickém výbrusu, připraveném pro světelnou mikroskopii. Výsledné hodnoty jsou zaneseny v tabulce 6.1.

6.4 Zkušební zařízení pro zkoušky nízkocyklové únavy

Měření nízkocyklové únavy bylo provedeno na servohydraulickém testovacím stroji Instron 8801. Tento zkušební stroj umožňuje zatížení maximální zátěžnou silou o velikosti ± 100 kN, maximální možná frekvence je 100 Hz a minimální je 0,001 Hz. Celá zkouška byla prováděna v režimu řízené celkové podélné deformace při trojúhelníkovém průběhu s asymetrií $R\varepsilon = -1$.

Během průběhu zkoušky byla udržována konstantní průměrná rychlost celkové deformace $\dot{\varepsilon} = 0,01$ s⁻¹. Deformace byla měřena axiálním extenzometrem s měrnou délkou 12,5 mm.

Na obrázku 6.2 je znázorněna zkušební tyč pro únavovou zkoušku s přesně danými tvary a rozměry. Průměr tyče je 6 mm a měrná délka 14 mm. Tyče jsou na obou koncích opatřeny závitovými hlavami. Velikost délky snímané pomocí extenzometru byla 12,5 mm.



Obr. 6.2 – Schéma zkušební tyče pro únavovou zkoušku [8]

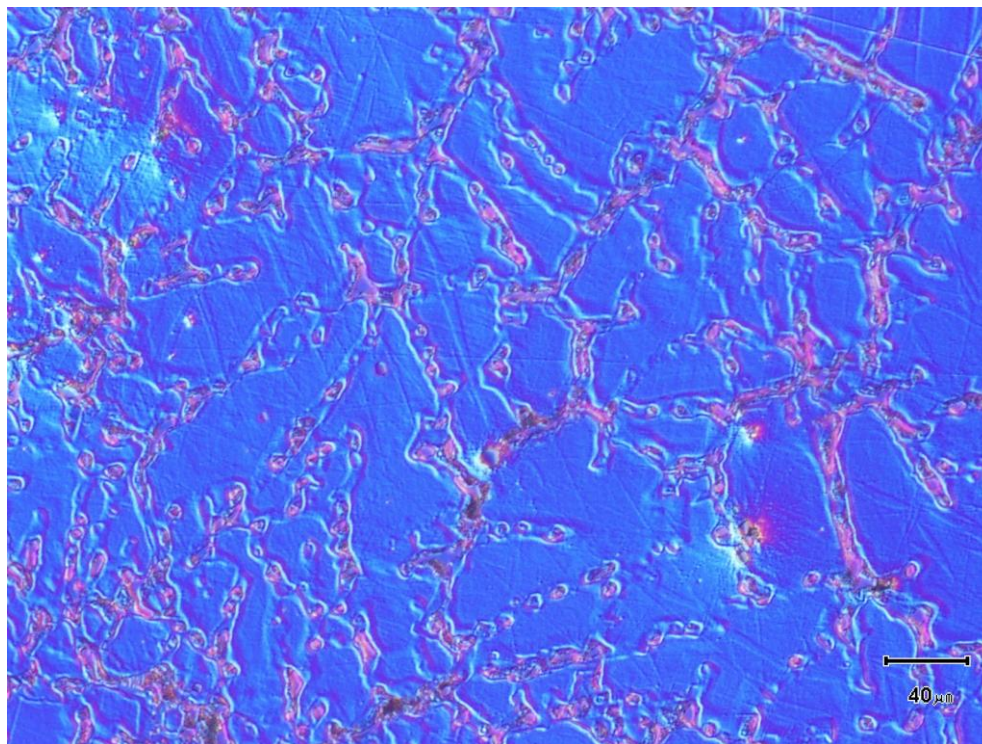
7 Výsledky a diskuze experimentů

7.1 Mikrostruktura

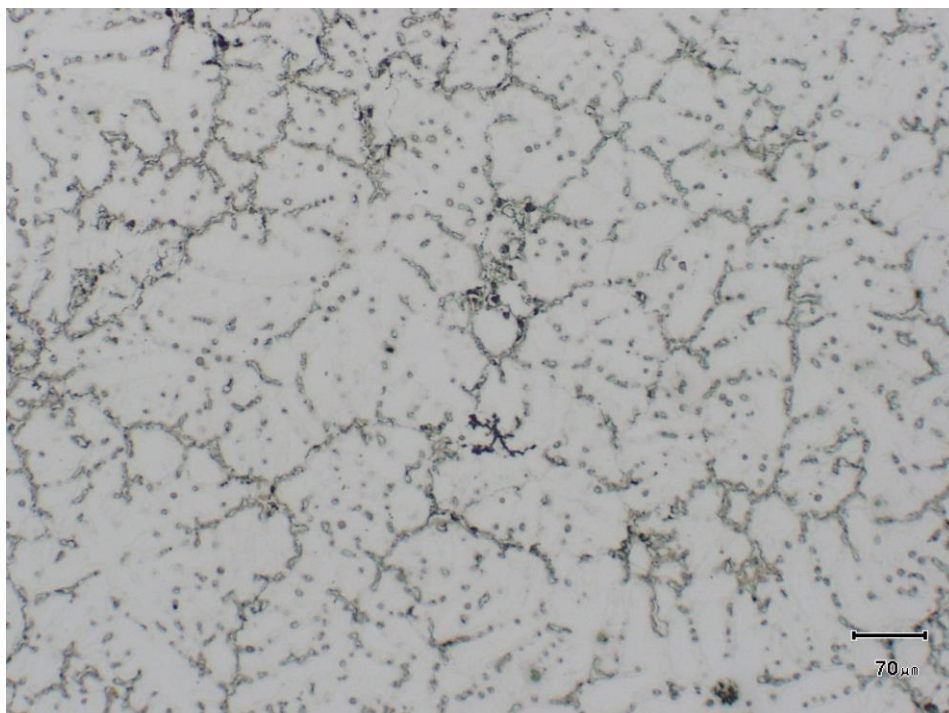
Mikrostruktura experimentálního vzorku byla pozorována na metalografickém mikroskopu Olympus GX71 s kamerou Olympus DP11.

V materiálu v litém stavu bez následného tepelného zpracování je vyloučeno velké množství fáze γ (obr. 7.2, 7.3). Materiál je heterogenní, z analýzy rozložení prvků (obr. 7.4) je patrné, že hranice zrn a okolí vyloučených fází obsahují vyšší podíl Al [15, 16].

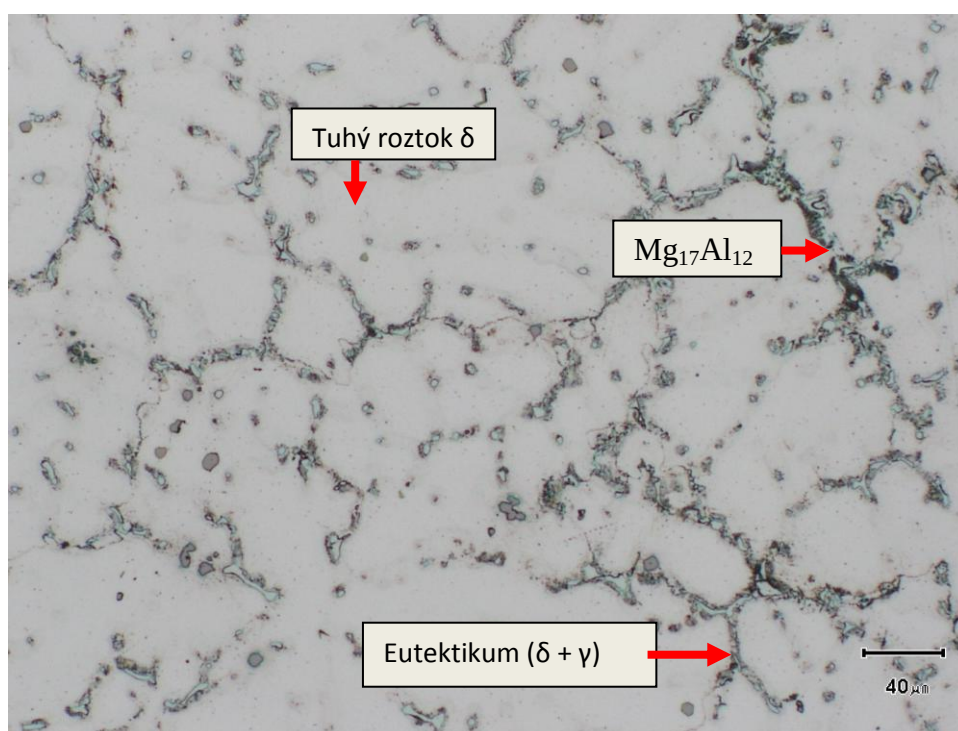
Pro tuto bakalářskou práci byla studovaná hořčíková slitina pozorována i pomocí diferenciálního interferenčního kontrastu (Nomarski), který je zobrazen na obr. 7.1. Princip metody je založen na lámání světelného paprsku na 2 nebo více paprsků, které po proběhnutí rozdílných drah se znovu spojují a interferují. Výškové rozdíly na povrchovém reliéfu vzorku způsobují fázová posunutí sousedních vln odraženého světla, dojde ke změně intenzity. Pozorujeme rozdíly převýšení na povrchu vzorku v mezích 1 – 5 nm.



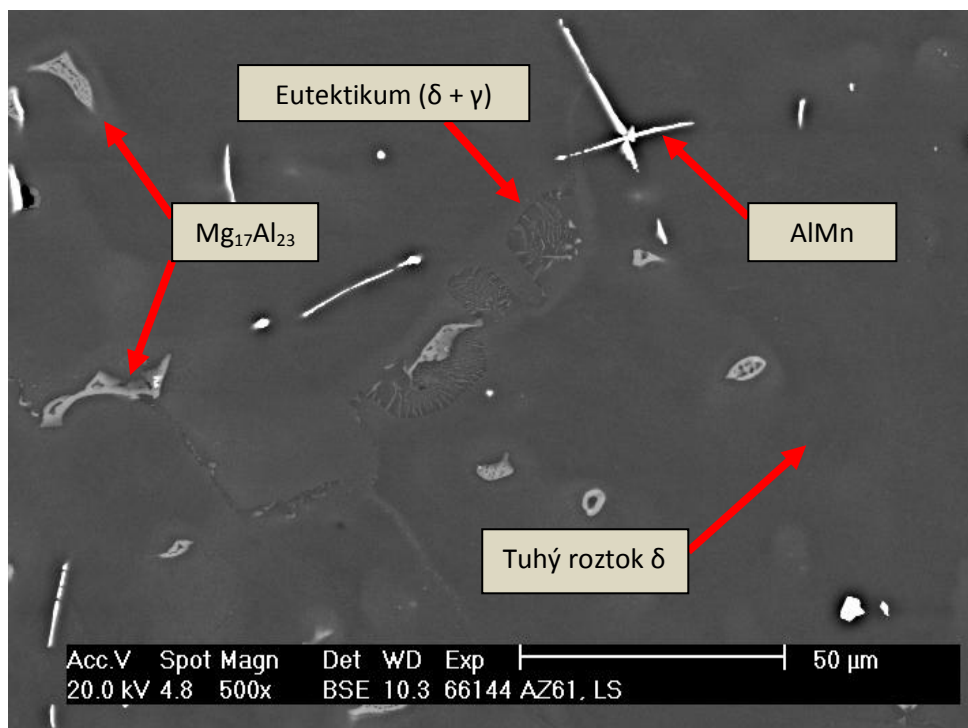
Obr. 7.1 – Diferenciální interferenční kontrast, mikrostruktura slitiny AZ61, světelná mikroskopie, leptáno, Nomarski,



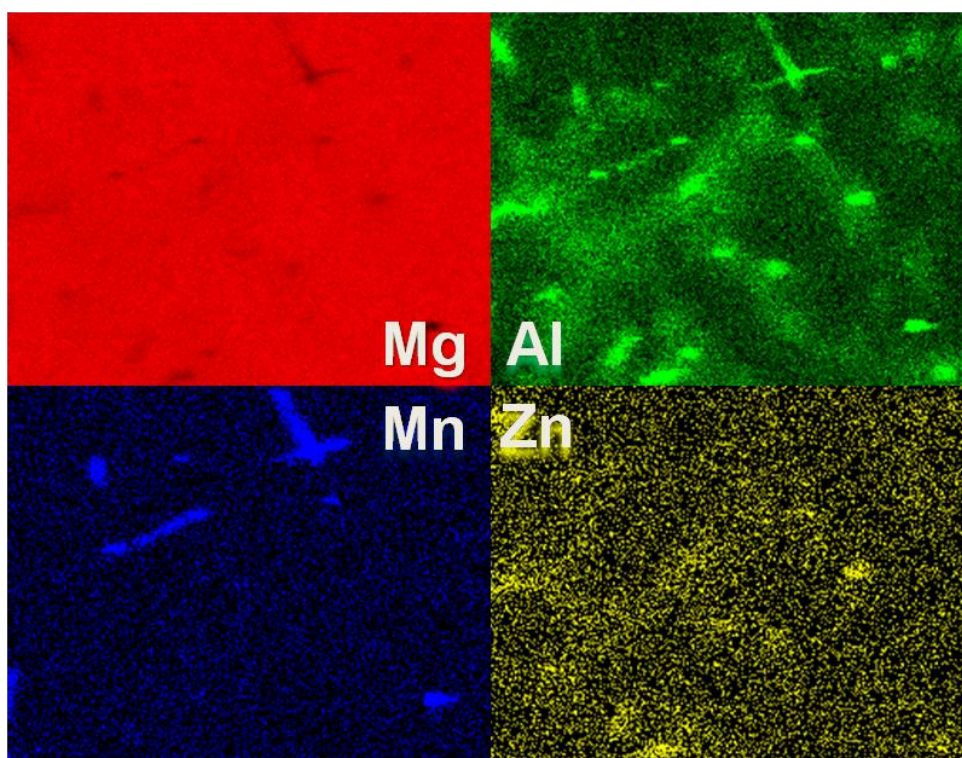
Obr. 7.2 – Mikrostruktura slitiny AZ61, světelná mikroskopie, leptáno



Obr. 7.3 – Mikrostruktura slitiny AZ61, světelná mikroskopie, leptáno



Obr. 7.4 – Mikrostruktura slitiny AZ61, REM, leptáno [23]



Obr. 7.5 – Analýza plošného rozložení prvků v slitině AZ61 v litém stavu (mapping) [16]

Mikrostruktura zkoumané hořčíkové slitiny AZ61 je tvořena tuhým roztokem δ . V mezidendritických oblastech se nachází eutektikum, které je tvořeno tuhým roztokem δ a intermetalickou fází γ ($Mg_{17}Al_{12}$). Intermetalická fáze se vyskytuje na hranicích zrn.

Na obr. 7.4 z rastrovacího elektronového mikroskopu můžeme detailněji pozorovat fázi AlMn. tato fáze byla zkoumána lokální analýzou chemického složení EDS. Analýza plošného rozložení prvků ve slitině AZ61 (obr. 7.5) jasně dokazuje pravidelné rozložení zinku v matici, hliník se vyskytuje na rozhraních eutektických buněk a mangan se vyskytuje převážně v částicích spolu s hliníkem.

7.2 Výsledky statických zkoušek v tahu

Na sérii 3 vzorků byla provedena též zkouška tahem pro zjištění základních mechanických charakteristik. Pro měření byl použit počítačem řízený zkušební stroj TIRA 2300. Řízenou veličinou při zatěžování byl posuv příčnicku s rychlostí příčnicku, 1,4 mm/min. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7.1 a na obrázku 7.6 jsou uvedeny tahové křivky pro všechny tři vzorky.

Tab. 7.1 – Výsledky tahových zkoušek

Číslo vzorku	E [Gpa]	R _{p0,2} [MPa]	F _m [N]	F _{lom} [N]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]	HBW 5/125
1	45,91	73	4986	4847	176	5,2	5,3	59
2	31,67	77	4759	4648	168	4,5	4,9	60
3	45,56	73	5109	4973	181	5,4	5,6	57
statistika								
	E [Gpa]	R _{p0,2} [MPa]	F _m [N]	F _{lom} [N]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]	HBW 5/125
$\bar{x}$	41,05	74	4951	4826	175	5	5,3	58,6
s	8,12	2,01	177,78	164	6,29	0,5	0,34	1,25
v [%]	19,79	2,72	3,59	3,39	3,59	10,02	6,39	2,13

Použité vzorce pro výpočet aritmetického průměru $\bar{x}$, směrodatné odchylky s a variačního koeficientu v:

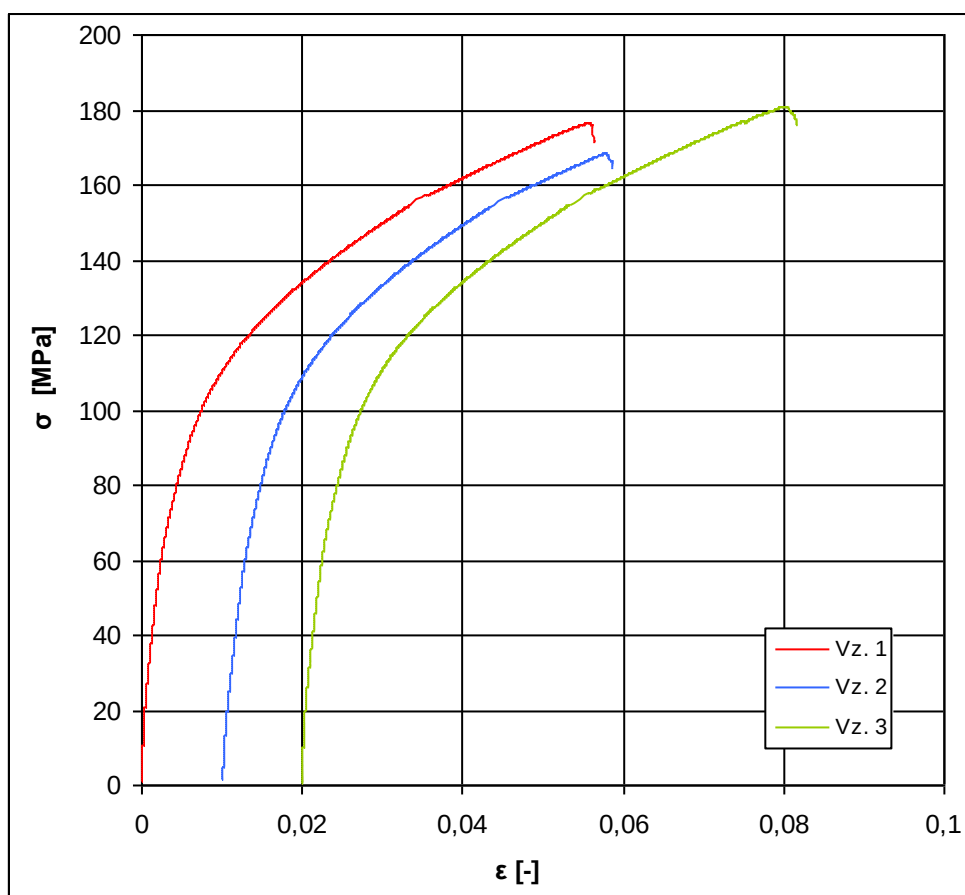
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (14)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (15)$$

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \quad (16)$$

Pro určení mechanických vlastností zkoumaného materiálu byla provedena tahová zkouška (obr. 7.6). Pro srovnání s jinými hořčíkovými slitinami byl vypočten aritmetický průměr naměřených hodnot. Průměrné experimentální hodnoty mechanických vlastností slitiny AZ61 jsou mez pevnosti $R_m = 175$ MPa, smluvní mez kluzu $R_{p0,2} = 74$ MPa, tažnost $A = 5\%$ a kontrakce $Z = 5,3\%$.

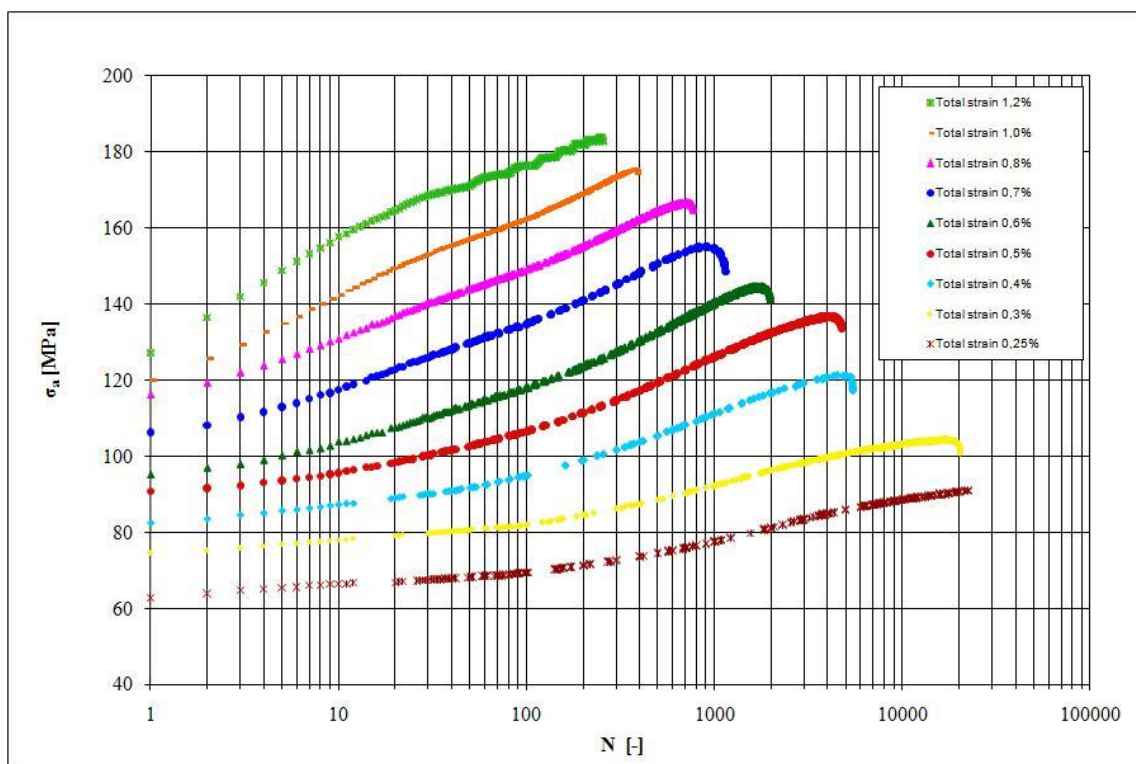
Na experimentálním vzorku se měřila i tvrdost materiálu. Byla použita metoda podle Brinella, která je vhodná pro odlévané materiály.



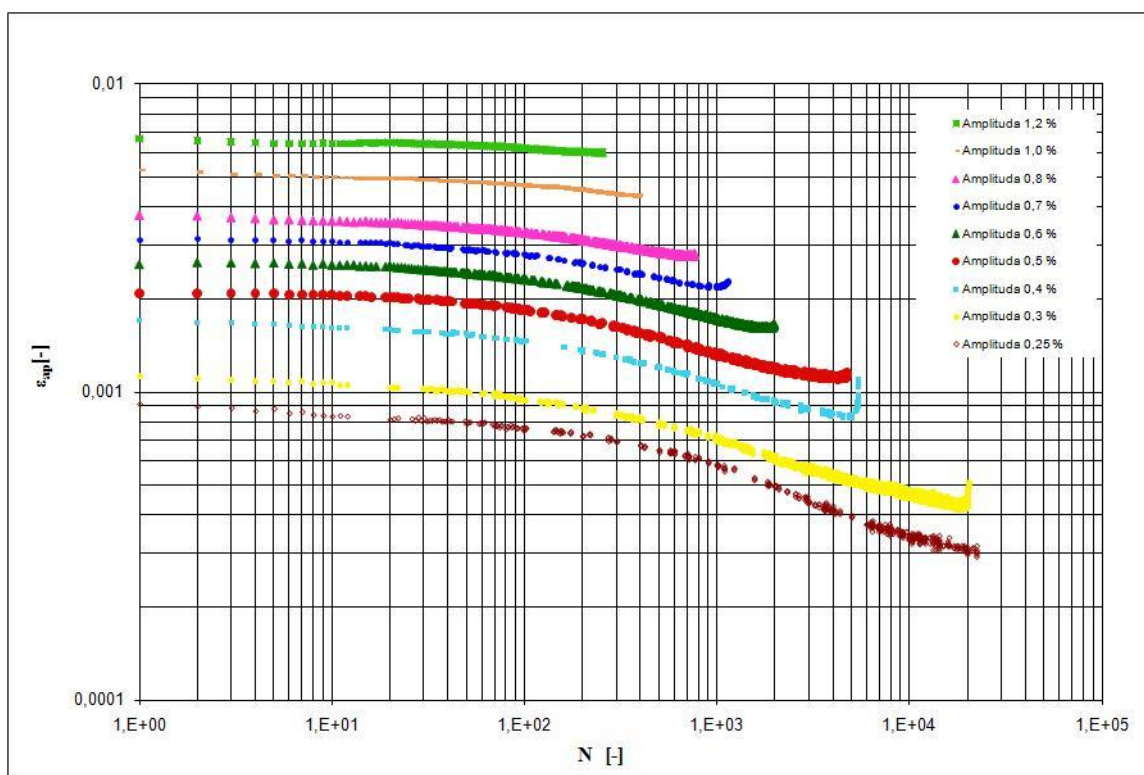
Obr. 7.6 – Výsledné průběhy tahových křivek Mg slitiny AZ61

7.3 Výsledky zkoušek nízkocyklové únavy

Na obrázcích 7.7, 7.8 jsou uvedeny křivky cyklického zpevnění / změkčení hořčíkové slitiny AZ61 v litém stavu. Na obrázku 7.7 jsou zaneseny do závislosti amplitudy napětí σ_a na počtu cyklů N a na obr. 7.8 vyneseny do závislosti ϵ_{ap} na počtu cyklů N . Po větší část zkoušky únavové životnosti docházelo k cyklickému zpevňování. To je zobrazeno na obr. 7.7. Dochází k nárůstu amplitudy napětí σ_a během rostoucího počtu zátěžných cyklů. Na obr. 7.8 cyklickému zpevňování odpovídá pokles amplitudy plastické deformace s počtem zátěžných cyklů.

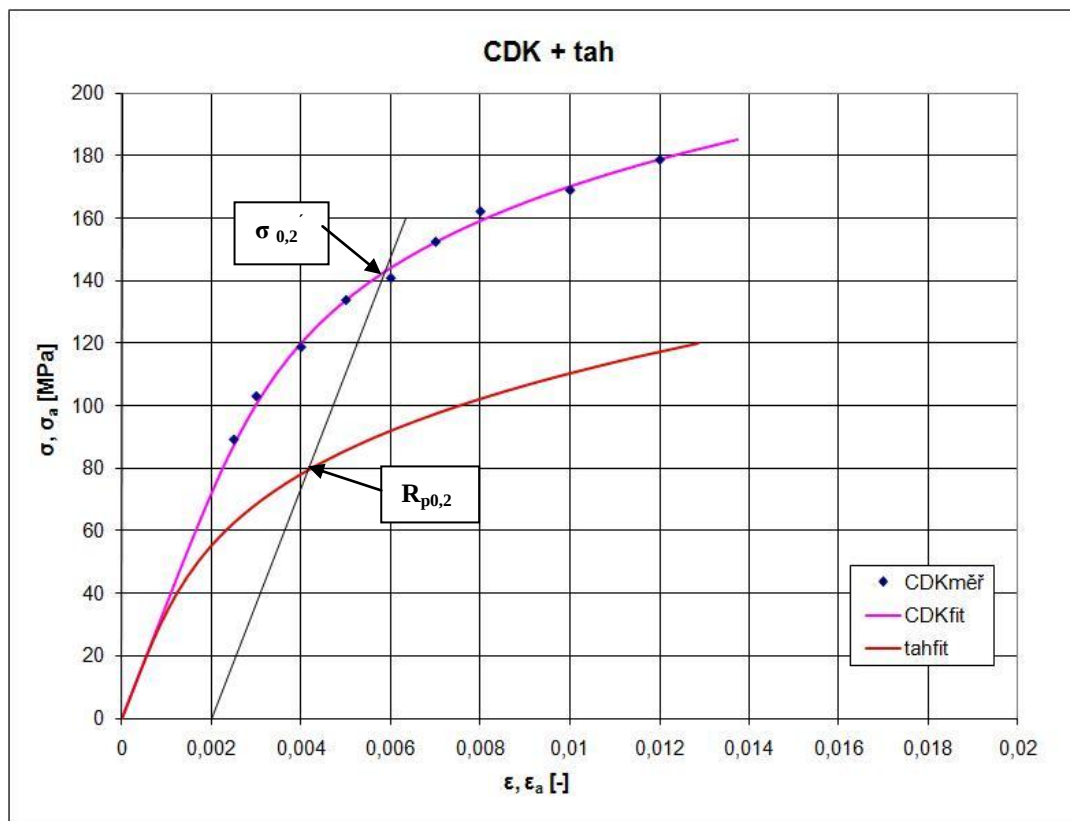


Obr. 7.7 – Křivky cyklického zpevnění – změkčení (napětová odezva)



Obr. 7.8 – Křivky cyklického zpevnění – změkčení (platická odezva)

Cyklická deformační křivka je závislost smluvního napětí na amplitudě celkové poměrné deformace. Závislost je vynesena na obr. 7.9. Je zde porovnána cyklická a statická jednosměrná křivka. Z grafu lze vyčíst, zda materiál cyklicky zpevňuje nebo změkčuje. Cyklická deformační křivka se nachází nad statickou křivkou. Z toho vyplývá, že zkoumaná hořčiková slitina cyklicky zpevňuje.



Obr. 7.9 – Cyklická deformační křivka

Tab. 7.2 – Parametry regresních parametrů

	E [MPa]	σ_0	m
Ramberg - Osgood jednosměrná	37235,14	408,49	3,791
Ramberg - Osgood cyklická	36789,39	424,49	5,713

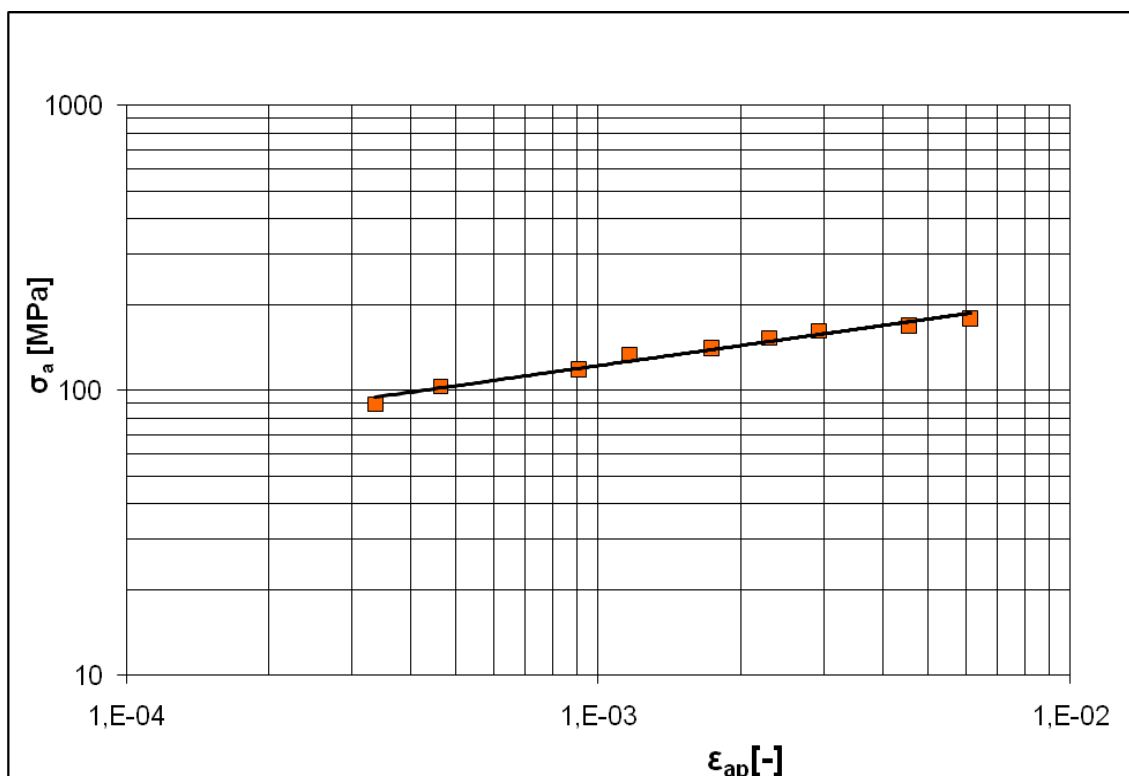
Závislost cyklické plastické odezvy materiálu po větší část únavového života lze zapsat ve tvaru:

$$\sigma_a = K' \cdot \varepsilon_{ap}^{n'} \quad (17)$$

Pro srovnání se statickou mezí kluzu $R_{p0,2}$ se používá cyklická mez kluzu $\sigma'_{0,2}$, která znamená amplitudu napětí odpovídající amplitudě plastické deformace $2 \cdot 10^{-3}$. Pro tuto souvislost platí vztah [11]:

$$R'_{p0,2} = K' \cdot 0,002^{n'} \quad (18)$$

Byla vynesena cyklická deformační křivka (obr. 7.10) z naměřených experimentálních dat pro zkoumanou slitinu AZ61. Parametry regresních funkcí CDK a vypočtené hodnoty cyklické meze kluzu jsou uvedeny v tabulce 7.3.

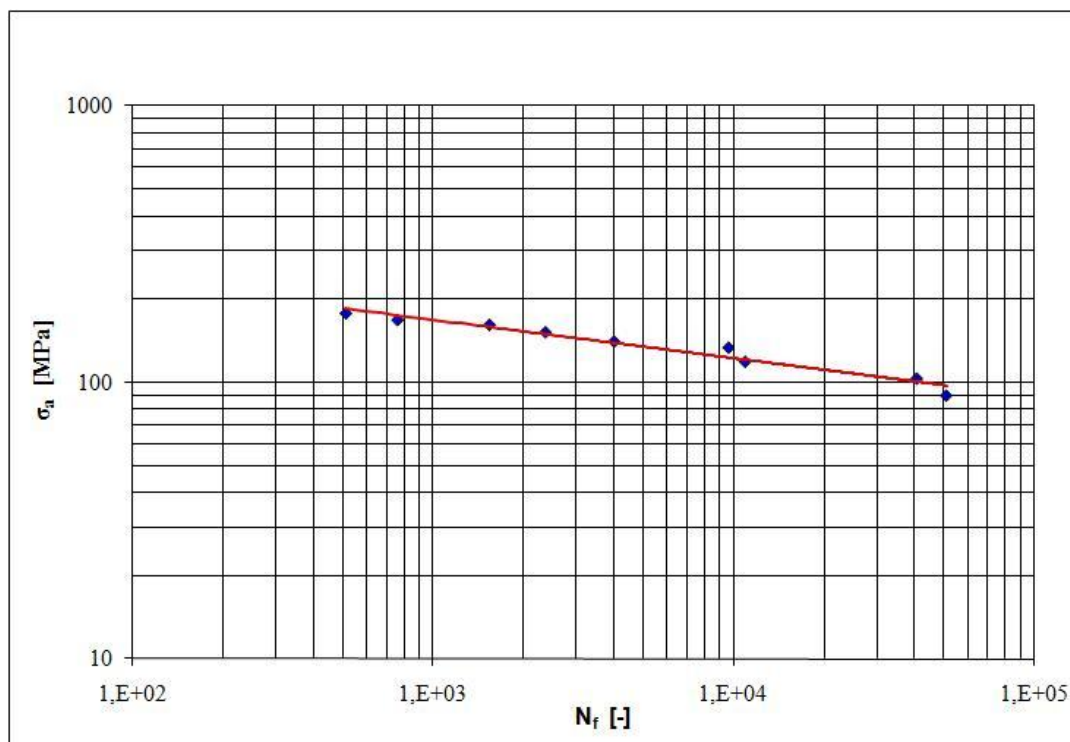


Obr. 7.10 – Cyklická deformační křivka

Tab. 7.3: Parametry CDK v závislosti σ_a na ϵ_{ap}

K' [MPa]	n' [-]	$\sigma'_{0,2}$ [MPa]
614,78	0,233	143,7

Wöhlerova křivka, známá také jako S – N křivka je závislost amplitudy napětí na počtu cyklů do lomu, viz obr. 7.12. Je vynesena v logaritmických souřadnicích proložená regresní přímkou. Regresní parametry jsou zaznamenány v tab. 7.4. Z grafu lze vyčíst nárůst počtu cyklů do lomu při klesající amplitudě napětí.



Obr. 7.11 – Wöhlerova – Basquinova závislost

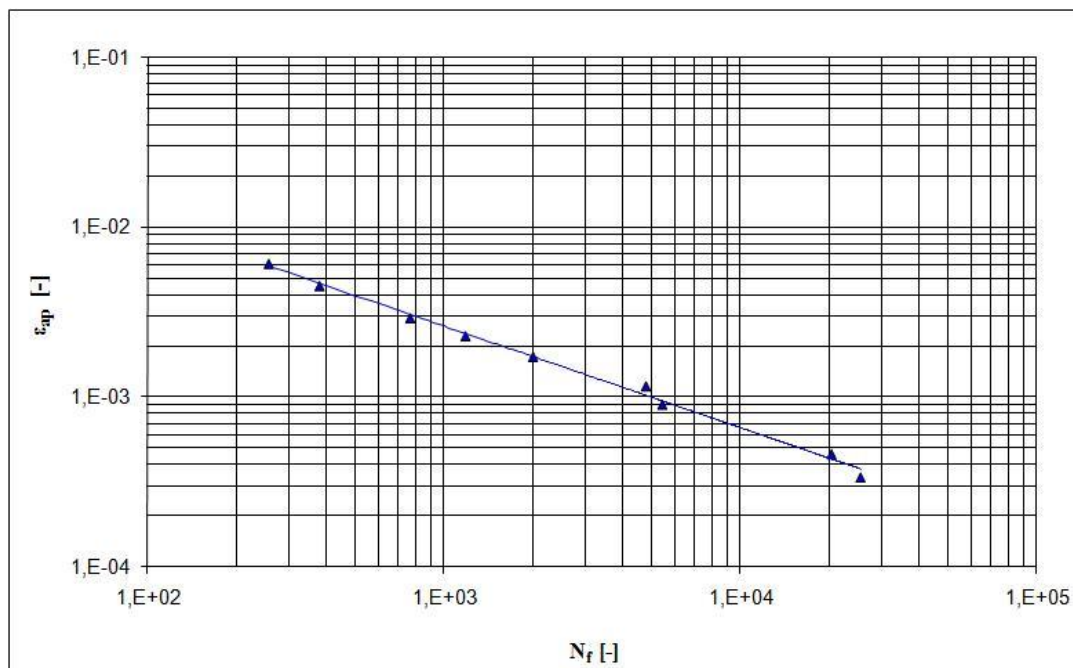
Tab. 7.4: Parametry regresních funkcí Wöhlerovy – Basquinovy závislosti

σ'_f [MPa]	b [-]
440,3	-0,139

Mansonova – Coffinova křivka je vynesena v logaritmických souřadnicích. Součinitel únavové životnosti c je dán sklonem životnostní přímky. Součinitel únavové tažnosti ε'_f je dán použitím amplitudy plastické deformace na první půlcyklus zatížení ($2N_f = 1$). Tyto parametry jsou uvedeny ve vztahu (10). Výsledná experimentální křivka je zobrazena na obr. 7.12. Naměřené hodnoty byly proloženy regresní funkcí. Parametry této funkce jsou zaznamenány v tab. 7.5. Z grafu lze vyčíst nárůst počtu cyklů do lomu při klesající amplitudou plastické deformace.

Tab. 7.5: Parametry regresní funkce Mansonovy – Coffinovy závislosti

ε'_f [-]	c [-]
0,248	-0,598



Obr. 7.12 – Mansonova – Coffinova závislost

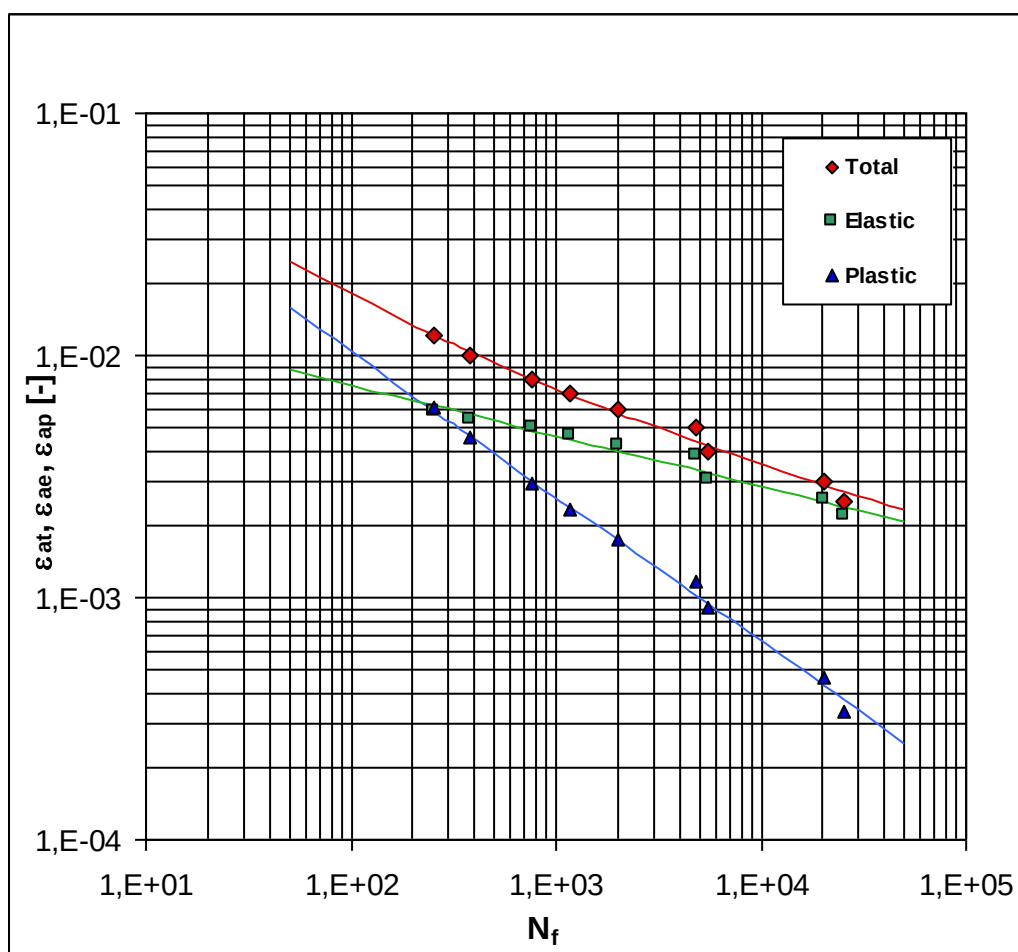
Závislost celkové deformace na počtu cyklů do lomu byla vhodně proložena součtem amplitudy plastické a elastické deformace:

$$\frac{\Delta \varepsilon_a}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_{ae}}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_{ap}}{2} \quad (19)$$

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_f'}{E} \cdot (2N_f)^b + \varepsilon_f' \cdot (2N_f)^c \quad (20)$$

Závislost amplitudy celkové deformace na počtu cyklů do lomu znázorňuje obr. 8.14. Současně s amplitudou celkové deformace jsou zde vyneseny i její dvě složky, amplituda plastické deformace a amplituda elastické deformace, které jsou proloženy vhodnými mocninnými funkcemi.

Z grafů křivek cyklického zpevnění – změkčení a z grafu porovnání CDK s tahovou křivkou jasně vyplývá, že materiál cyklicky zpevňuje.



Obr. 7.13 – Mansonova – Coffinova závislost

Tab. 8.4 - Výsledné hodnoty všech parametrů zkoumaných křivek

	Parametr	Jednotka	Hodnota
Wöhlerova - Basquinova závislost	σ_f'	[MPa]	440,3
	b	[-]	-0,139
Mansonova - Coffinova závislost	ε_f'	[-]	0,248
	c	[-]	-0,598
Cyklická deformační křivka	K'	[MPa]	614,78
	n'	[-]	0,233
	$\sigma_{p0,2'}$	[MPa]	143,7
Rambergova - Osgoodova CDK	E	[MPa]	36789,39
	σ_o	[MPa]	424,49
	n	[-]	5,713
	$\sigma_{p0,2''}$	[MPa]	142,8
Parametry jednosměrné křivky vyjádřené funkcí R - O	E	[MPa]	37235,14
	σ_o	[MPa]	408,49
	n	[-]	3,791

8 Závěry

Tato bakalářská práce se zabývala mikrostrukturou, mechanickými vlastnostmi a nízkocyklovou únavou lité hořčíkové slitiny připravené metodou squeeze casting. Na základě výsledků získaných v řešení bakalářské práce lze stanovit tyto závěry:

- Mikrostruktura lité hořčíkové slitiny AZ61 odlitá metodou squeeze casting je tvořena tuhým roztokem δ a eutektikem $\delta + \gamma$, kdy γ je křehká fáze $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$. Eutektikum se nachází v mezidendritických prostorech. Ve struktuře nebyla zjištěna přítomnost slévárenských vad.
- Na základě provedeného srovnání požadovaného chemického složení slitiny s naměřenými hodnotami lze stanovit, že obsah hlavního legujícího prvku je pod spodní hranicí spolu s vyšším obsahem niklu.
- Hodnota meze pevnosti je $R_m = 175 \text{ MPa}$, smluvní mez kluzu $R_{p0,2} = 74 \text{ MPa}$, tažnost $A = 5 \%$ a kontrakce $Z = 5,3 \%$. Bylo provedeno i měření tvrdosti podle Brinella, výsledná hodnota tvrdosti byla 58,6HBW5/125.
- Na základě měření bylo zjištěno, že slitina AZ61 v průběhu zatěžování cyklicky zpevňuje po celou dobu své životnosti, tento efekt je nejvýraznější u nejvyšších amplitud deformace. Analogicky se zvyšující se napětíovou odezvou dochází ke snižování amplitudy plastické odezvy průběhu cyklování.
- Hodnota cyklické meze kluzu $\sigma'_{0,2}$ vzrostla z hodnoty 77 [MPa] pro statickou mez kluzu na hodnotu 143 [MPa], což je navýšení o 86 %.
- Byly získány tyto závislosti:
 - Cyklická deformační křivka je popsána mocninou funkcí ve tvaru
$$\sigma_a = 614,78(\varepsilon_{ap})^{0,2339}, \text{ koeficient determinace } R^2 = 0,974.$$
 - Mansonova – Coffinova závislost, která je popsána mocninou funkcí
$$\varepsilon_{ap} = 0,1638(2N_f)^{-0,599}, \text{ koeficient determinace } R^2 = 0,995.$$
 - Wöhlerova – Basquinova křivka životnosti je popsána mocninou funkcí ve tvaru
$$\sigma_a = 440,3(2N_f)^{-0,139}, \text{ koeficient determinace } R^2 = 0,956.$$
- Cyklické a únavové parametry jsou ve srovnání s tvářeným materiálem obdobného chemického složení mírně horší, což je způsobeno typem přípravy a pevnostními a plastickými vlastnostmi matrice s nepříznivým působením vyloučené intermediální fáze $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$

9 Seznam použitých zdrojů

- [1] DRÁPAL, J., KUCHAR, L., TOMÁŠEK, K., TROJANOVÁ, Z. *Hořčík, jeho slitiny a binární systémy hořčík-příměs*. Ostrava: VŠB Ostrava, 2004. 172 s. ISBN 80-248-0579-0.
- [2] *ASM Speciality Handbook: Magnesium and magnesium Alloys*. Edited by Michael M. Avedesien, Hugh Baker. Materials Park, OH: ASM International, 1999. 314 s. ISBN 0-87170-657-1.
- [3] KLESNIL, M.; LUKÁŠ, P. *Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání*. 1. vydání. Praha: Academia, 1975. 224 s.
- [4] POLÁK, J. *Cyklická plasticita a nízkocyklová únavová odolnost kovových materiálů*. 1. vyd. Praha: Academia, 1986. 136 s.
- [5] VĚCHET, S.; KOHOUT, J.; BOKŮVKA, O. *Únavové vlastnosti tvárné litiny*. Žilina: EDIS, 2002. 157 s. ISBN 80-7100-973-3.
- [6] SKOČOVSKÝ, P.; PALČEK, P.; KONEČNÁ, R.; VÁRKOLY, L. *Konstruktivní materiály*. Žilina: EDIS ŽU Žilina, 2000. 268s. ISBN 80-7100-608-4
- [7] 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 bakalářské práce prof. Ing. Tomáš Podrábský, CSc.
- [8] 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.
- [9] International Magnesium Association [online]. 2008 [cit. 15. března 2011]. INDUSTRYnSTATISTICS. Dostupné WWW: <http://www.intlmag.org/files/yend2008.pdf>
- [10] ČERMÁK, J.; HAWELKA, M.; TATÍČEK, F. Současné trendy ve zpracování hořčíkových slitin tvářením. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005, č. 10 [cit. 15. března 2011]. Dostupné na WWW: <http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasne-trendy-ve-zpracovani-horcikovych-slitintvarenim>
- [11] PROVAZNÍKOVÁ, A. *Únavové vlastnosti hořčíkové slitiny AZ61*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 74 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Tomáš Podrábský, CSc.
- [12] PANTĚLEJEV, L. *Únava kovových materiálů*.
- [13] ROUČKA, J. *Metalurgie neželezných slitin*, Brno: CERM, 2004. 148s. ISBN 80-214-2790-6.
- [14] MICHNA, Š. *Strojírenská technologie* [online]. 2008 [cit. 21. března 2011]. Dostupné na WWW: http://www.stefanmichna.com/download/opory/strojirenska_technologie.pdf

- [15] HORYNOVÁ, M.; DOLEŽAL, P.; JANOVA, D.; GEJDOŠ, P. *Effect of heat treatment on chemical and microstructural heterogeneity of magnesium alloy AZ61*, Brno: Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering
- [16] VUT v Brně. Ústav Materiálových Věd a Inženýrství [online]. 2011 [cit. 25. května 2011]. Dostupné z WWW:
http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/PHMV/mg_li_az61.html
- [17] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu I*, Brno: CERM, 2003. 505s. ISBN 80-7204-283-1.
- [18] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu II*, Brno: CERM, 2002. 392s. ISBN 80-7204-248-3.
- [19] DĚDKOVÁ, K. *Kritéria životnosti při biaxiálním únavovém namáhání*. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, 2008. 77 s.
- [20] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem- Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*, Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [21] DIN 50125. *Testing of metallic materials- Tensile test pieces*.
- [22] ČSN EN 10003- 1. *Kovové materiály- Zkoušení tvrdosti podle Brinella- Část 1: Zkušební metoda*, Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [23] ZAPLETAL, J.; DOLEŽAL, P.; GEJDOŠ, P.; HORYNOVÁ, M. *Influence of Heat Treatment on Microstructure and Fatigue Behavior of AZ61 Magnesium Alloy*, Brno: Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, připraveno pro tisk
- [24] SONSINO, C. M.; DIETRICH, K. *Fatigue design with cast magnesium alloys under constant and variable amplitude loading*. International Journal of Fatigue [online]. 2006, č. 28 [cit. 25. května 2011], s. 183 – 193. Dostupný z WWW:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112305001611>
- [25] HASEGAWA, S.; TSUCHIDA, Y.; YANO, H.; MATSUI, M. *Evaluation of low cycle fatigue life in AZ31 magnesium alloy*. International Journal of Fatigue [online]. 2007, č. 29 [cit. 25. května 2011], s. 1839 – 1845. Dostupný z WWW:
<http://library.nmlindia.org/FullText/IJF290791839.pdf>
- [26] NĚMCOVÁ, A.; ZAPLETAL, J.; PODRÁBSKÝ, T. *Únavové vlastnosti hořčíkové slitiny AZ91*. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Řada strojní.[online] 2009, roč. 55, č. 3 [cit. 25. května 2011], s. 141-147. Dostupný z WWW:
<http://dspace.vsb.cz/dspace/handle/10084/83440>

10 Seznam použitých symbolů a zkratek

A	[%]	tažnost
ASTM		American Society for Testing of Materials
b		exponent únavové pevnosti
c		exponent únavové tažnosti
CDK		cyklická deformační křivka
d₀	[mm]	průměr zkušebního tělesa
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu
EN		European Standart
F	[N]	síla
F_{lom}	[N]	lomová síla
F_m	[N]	maximální síla
f	[Hz]	frekvence zátěžného cyklu
HB		tvrdost podle Brinella
hcp		hexagonální mřížka
IMA		International Magnesium Association
K'		koeficient cyklického zpevnění
L₀	[mm]	měrná délka
m		exponent funkce Ramberg-Osgood
n'		exponent CDK
N_c		počet cyklů odpovídající časované mezi únavy
N_f		počet cyklů do lomu
R		parametr asymetrie cyklu
Re	[MPa]	mez kluzu
REM		rastrovací elektronová mikroskopie
R_m	[MPa]	mez pevnosti
R_{p0,2}	[MPa]	smluvní mez kluzu
s		směrodatná odchylka
T	[°C]	teplota
t	[min]	čas
$\bar{x}$		aritmetický průměr
v	[%]	variační koeficient
Z	[%]	kontrakce
γ		inetrmetalická fáze Mg ₁₇ Al ₂₃
δ		tuhý roztok
Δ		rozkmit
ε	[-]	deformace
$\dot{\epsilon}$	[-]	rychlost celkové deformace
ε'_f	[-]	součinitel únavové tažnosti

ϵ_{ae}	[-]	elastická složka amplitudy cyklické deformace
ϵ_{ap}	[-]	plastická složka amplitudy cyklické deformace
$(\epsilon_{ap})_{sat}$	[-]	saturovaná hodnota amplitudy deformace
$(\sigma_a)_{sat}$	[MPa]	saturovaná hodnota amplitudy napětí
ϵ_{at}	[-]	amplituda celkové cyklické deformace
$\Delta\epsilon_p$		šířka hysterezní smyčky
σ	[MPa]	napětí
$\sigma_{p0,2'}$	[MPa]	cyklická mez kluzu
σ'_f	[MPa]	koeficient únavové pevnosti
σ_a	[MPa]	amplituda napětí
σ_C	[MPa]	mez únavy materiálu
σ_m	[MPa]	střední napětí
σ_{max}	[MPa]	maximální napětí
σ_{min}	[MPa]	minimální napětí
ν	[Hz]	frekvence zátěžného cyklu u tvrdého módu