



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

BAUSCHINGERŮV EFEKT A CYKLICKÁ PLASTICITA U KONSTRUKČNÍCH SLITIN HOŘČÍKU.

BAUSCHINGER EFFECT AND CYCLIC PLASTICITY IN CONSTRUCTIONAL MAGNESIUM
ALLOY.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIŘÍ HOLAS

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JOSEF ZAPLETAL, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jiří Holas

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:

Bauschingerův efekt a cyklická plasticita u konstrukčních slitin hořčíku.

v anglickém jazyce:

Bauschinger effect and cyclic plasticity in constructional magnesium alloy.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zjištění cyklické plasticity a nízkocyklové únavové odolnosti extrudované hořčíkové slitiny AZ61. Zaměření se na počáteční stadia cyklování s možným výskytem Bauschingerova efektu. Bauschingerův efekt je definován jako velmi výrazná asymetrie hysterezní křivky v tahové a tlakové oblasti při cyklickém zatěžování nebo jako změna odklonu tahové křivky po odlehčení při jednosměrném zatěžování.

Cíle bakalářské práce:

1. Stanovit základní mechanické vlastnosti extrudované slitiny hořčíku AZ61.
2. Metalografickou analýzou hodnotit strukturu a anizotropii slitiny.
3. Vyhodnotit cyklickou plasticitu s možným výskytem Bauschingerova efektu a jeho vliv na cyklickou odezvu studované slitiny v módu řízení síly.

Seznam odborné literatury:

- [1] J.B. Jordon, M.F. Horstemeyer, K. Solanki, Y. Xue: Damage and stress state influence on the Bauschinger effect in aluminum alloys.
- [2] M. Buciumeanu, L. Palaghian, A.S. Miranda, F.S. Silva: Fatigue life predictions including the Bauschinger effect.
- [3] J.B. Jordon, J.B. Gibson, M.F. Horstemeyer, H. El Kadiri, J.C. Baird, A.A. Luo: Effect of twinning, slip, and inclusions on the fatigue anisotropy of extrusion-textured AZ61 magnesium alloy.
- [4] J. Pokluda, F. Kroupa, L. Obdržálek: Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek.
- [5] S. Hasegawa, Y. Tsuchida, H. Yano, M. Matsui: Evaluation of low cycle fatigue life in AZ31 magnesium alloy.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Zapletal, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 28.3.2012

L.S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá nízkocyklovým únavovým chováním tvářené hořčikové slitiny AZ61 a zjištěním cyklické plasticity s možným vlivem Bauschingerova efektu. Mimo hodnocení únavových vlastností bylo provedeno metalografické hodnocení struktury a také zhodnocení mechanických vlastností.

Klíčová slova

hořčiková slitina AZ61, tváření, nízkocyklová únava, cyklická plasticita, Bauschingerův efekt

Abstract

This bachelor's thesis is dealing with low cycle - fatigue behavior of formed magnesium alloy AZ61 and detection of cyclic plasticity with possibility of Bauschinger effect influence. In addition of fatigue properties metallographic evaluation of microstructure and also evaluation of mechanical qualities was made.

Key words

magnesium alloy AZ61, forming, low cycle fatigue, cyclic plasticity, Bauschinger effect

Bibliografická citace

HOLAS, J. *Bauschingerův efekt a cyklická plasticita u konstrukčních slitin hořčíku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Zapletal, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Bauschingerův efekt a cyklická plasticita u konstrukčních slitin hořčíku vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu na konci této práce. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FSI VUT v Brně.

V Brně dne: 25.5.2012

Jiří Holas

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Josefu Zapletalovi, Ph.D. za pomoc, připomínky a odborné rady. Dále chci poděkovat Ing. Anetě Němcové za pomoc při řešení experimentů a také všem pracovníkům Ústavu materiálových věd a inženýrství. Také bych rád poděkoval svým rodičům za jejich podporu a trpělivost během mého studia.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Hořík a jeho slitiny	2
2.1	Výroba hoříku	2
2.2	Slitiny hoříku	3
2.2.1	Tváření hoříkových slitin	4
2.2.2	Značení hoříkových slitin	5
2.3	Využití hoříkových slitin	7
3	Cyklická plasticita a únava materiálu.....	8
3.1	Proměnné zatížení.....	8
3.2	Změny mechanických vlastností	9
3.2.1	Cyklické zpevnění a změkčení	9
3.2.2	Hysterezní smyčka	10
3.2.3	Cyklická deformační křivka	11
3.3	Nukleace únavových trhlin.....	12
3.3.1	Mechanismy nukleace mikrotrhlin.....	13
3.4	Šíření únavových trhlin	14
3.5	Křivky životnosti	15
3.5.1	Wöhlerova křivka.....	15
3.5.2	Oblast nízkocyklové únavy	16
4	Bauschingerův efekt.....	18
4.1	Hlavní charakteristiky a parametry.....	18
4.2	Mechanismy.....	20
4.2.1	Teorie vnitřních napětí	20
4.2.2	Teorie dislokací.....	21

4.2.3	Kompozitní model.....	22
5	Cíle práce.....	23
6	Experimentální materiál, výsledky a diskuze experimentů.....	24
6.1	Mikroskopie.....	24
6.1.1	Příprava vzorků pro světelnou mikroskopii	24
6.1.2	Mikrostruktura.....	24
6.2	Tahová zkouška	27
6.2.1	Podmínky tahové zkoušky	27
6.2.2	Výsledky tahové zkoušky.....	28
6.3	Cyklická plasticita	29
6.3.1	Podmínky testování	29
6.3.2	Hysterezní smyčky a Bauschingerův efekt	30
6.3.3	Křivky cyklického zpevnění - změkčení.....	33
6.3.4	Cyklická deformační křivka	35
7	Závěry.....	37
8	Seznam použité literatury	39
9	Seznam použitých zkratk a symbolů	41

1 Úvod

Hořčíkové slitiny a kompozity jsou v poslední době velmi intenzivně studovány, obzvláště proto, že jejich hustota umožňuje snižovat hmotnost výrobků. To je zajímavé například v letectví a automobilovém průmyslu, kde dochází k nahrazování těžších materiálů, jako jsou oceli, litiny, slitiny mědi a dokonce i hliníkové slitiny, slitinami hořčíku. Hlavními výhodami hořčíkových slitin jsou schopnost tlumení vibrací, dobrá měrná pevnost, dobrá obrobitelnost a možnost recyklace. Zároveň však jsou zde i některé nepříznivé vlastnosti hořčíkových slitin, jako je špatná korozní odolnost nebo nízká odolnost při vysokých teplotách.

V dnešní době je největší množství havárií a poruch způsobeno hlavně únavovými procesy a degradací vlastností materiálů v dlouhodobém procesu. Snahy o zvyšování výkonu při současném snížení hmotnosti a rozměrů zařízení zvyšuje nároky na jejich konstrukci. Tyto nároky s sebou však přináší nebezpečí únavového selhání. Podrobí-li se zařízení působení časově proměnlivých vnějších sil, dojde vlivem mikroskopických procesů, které probíhají ve struktuře materiálu, k lomu. Jestliže napětí mění svoji hodnotu střídavě od minimální po maximální, dochází ke střídavým změnám velikosti nejen pružné, ale také plastické deformace.

2 Hořčík a jeho slitiny

Hořčík patří do II. hlavní skupiny periodické soustavy prvků. Jeho latinský název je Magnesium a značí se Mg. Je to středně tvrdý, neželezný, nepolymorfní kov stříbrolesklé barvy, který krystalizuje v hexagonální krystalové mřížce. Má atomové číslo 12, relativní atomovou hmotnost 24,3 a s hustotou 1738 kg/m^3 patří k nejlehčím konstrukčním kovům, čehož se využívá ke snížení hmotnosti výrobků. Za studena je hořčík špatně tvařitelný a také málo pevný. Jeho tvařitelnost se zlepšuje až od teplot kolem $225 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota tavení hořčíku je $650 \text{ }^\circ\text{C}$ [1,2].

Díky své poměrně velké reaktivitě se v přírodě hořčík vyskytuje pouze ve sloučeninách, a to ve formě oxidů a chloridů nebo v mořské vodě. Z minerálů je velmi hojný dolomit, směsný uhličitan hořečnatý-vápenatý $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Poněkud vzácněji se vyskytuje čistý uhličitan hořečnatý, MgCO_3 – magnezit. Mg^{2+} kation je druhý nejhojnější kation v mořské vodě, což dělá z mořské vody a mořské soli atraktivní zdroj hořčíku. Relativně hojně je hořčík také zastoupen v zemské kůře (1,9–2,5 %) [3].

Čistý hořčík je velmi silným redukčním činidlem, a proto se využívá k redukcím v organické syntéze, ale i redukční výrobě jiných kovů (např. titanu) z roztoků jejich solí. Velká reaktivita kovového hořčíku se uplatňuje v metalurgii, kde jeho přísady odstraňují malá množství síry nebo kyslíku z roztavené oceli. Dále se používá jako modifikátor při výrobě litiny s kuličkovým grafitem nebo jako legující prvek u slitin hliníku. Pro konstrukční účely se však využívají slitiny hořčíku, jejichž mechanické vlastnosti jsou mnohem lepší, než u čistého hořčíku. [3,4].

2.1 Výroba hořčíku

Díky své vysoké reaktivitě se hořčík v přírodě vyskytuje pouze ve formě sloučenin, jako jsou oxidy, chloridy, sírany a uhličitan. Pro výrobu se však používají zejména oxidy a chloridy hořečnaté, a proto je nutné ostatní suroviny zpracovat na tyto sloučeniny. Chlorid hořečnatý MgCl_2 se zpracovává elektrolýzou taveniny a oxid hořečnatý MgO se zpracovává termickou redukcí pomocí vhodného redukovačla [1].

Elektrolýza taveniny:

Podstatou této metody je příprava dehydratovaného chloridu hořečnatého. Dále následuje elektrolýza chloridové taveniny, při které se surovina roztaví v elektrolyzáru při teplotě $700 - 750 \text{ }^\circ\text{C}$. Výsledným produktem je kovový roztavený hořčík a také plynný chlór [1].

Termická redukce:

Při tomto postupu výroby je důležitá volba vhodného redukčního činidla. Mezi tyto činidla patří uhlík, křemík, hliník a karbid vápníku. Redukce probíhá v reaktorech při teplotách 1100 - 1600 °C, kdy dochází k uvolňování hořčíku. Ostatní složky však zůstávají v tavenině. Celý proces musí probíhat v inertní atmosféře nebo ve vakuu, protože plynný hořčík má vysokou afinitu ke kyslíku. Nejpoužívanější termickou metodou je silikometrická redukce, kde je redukčním činidlem slitina křemíku s železem. Redukujícím prvkem je v tomto případě křemík [1].

2.2 Slitiny hořčíku

Jestliže hořčík vhodně zkombinujeme s dalšími prvky, můžeme získat konstrukční materiály s výhodným poměrem měrné hmotnosti a pevnostních charakteristik. Vhodný legující prvek se volí podle použití slitiny a také podle vlastností, které je potřeba zlepšit. Přidáváním legujících prvků se dají zlepšit korozivzdorné vlastnosti, zvýšit pevnost či zlepšit slévateľnost nebo kujnost. Je však třeba mít na paměti, že zlepšení některých vlastností může vést ke zhoršení vlastností jiných. Záleží také na množství legujícího prvku, které je omezeno rozpustností daného prvku v tavenině hořčíku [1].

Prvky přidávané do hořčíkových slitin se dělí na prvky legující, které způsobují určité vlastnosti nebo na ně působí pozitivně, a příměsi, které působí škodlivě.

Legující prvky:

Hliník - Je to nejčastěji používaný prvek pro legování hořčíku. Jeho maximální rozpustnost v hořčíku je 12,7 hm. %, avšak nejčastěji se jeho obsah ve slitinách pohybuje mezi 3-9 %. Při hodnotách nad 6 % hliníku se dosahuje ideálního poměru tažnosti a pevnosti. Od této hodnoty lze také hořčíkové slitiny tepelně zpracovávat.

Zinek - Tento kov se používá v kombinaci s hliníkem nebo zirkoniem a thoriem. Ve slitinách Mg-Al se převážně rozpouští v hořčíku a stává se složkou precipitující fáze. Také potlačuje škodlivý vliv železa. Ve slitinách zvyšuje pevnost, ale také zvyšuje možnost vzniku mikropórů.

Lithium - Jeho hustota je jen 540 kg/m³ a je to jediný legující prvek, který snižuje hustotu slitiny pod hodnotu čistého hořčíku. Rozpustnost v hořčíku dosahuje až 5,5 hm. % při pokojové teplotě. Jeho přítomnost ve slitině snižuje její pevnost a korozní odolnost, ale zvyšuje tažnost.

Mangan - Je obvykle používán s dalšími legujícími prvky, většinou s hliníkem, s kterým tvoří sloučeniny MnAl, MnAl₄ a MnAl₆. Jeho maximální obsah je 1,2-2 hm. %. Mangan zvyšuje napětí na mezi kluzu a odolnost proti korozi ve slané vodě a snižuje rozpustnost železa v tavenině.

Vápník - S hořčíkem vytváří creepu odolné slitiny. Může působit jako dezoxidant v tavenině nebo při následném tepelném zpracování. Zlepšuje válcovateľnost plechů, ale při obsahu vyšším než 0,3 % zhoršuje svařitelnost. Jestliže obsah vápníku překročí 2 %, snižuje se korozní odolnost slitiny.

Zirkonium - Do hořčkových slitin se přidává pro zjemnění zrna. Lze jej použít se zinkem nebo kovy vzácných zemin. Tyto slitiny však nesmí obsahovat hliník ani mangan, protože by vytvořily stabilní sloučeniny, což by zjemnění zrna potlačilo.

Kovy vzácných zemin - Používají se pro zlepšení vlastností za vyšších teplot a zvýšení creepové odolnosti. Tyto kovy se do slitin přidávají v malých množstvích, většinou v setinách až desetínách procent. Někdy se k nim přiřazuje i yttrium, které se používá ke zvýšení odolnosti za vyšších teplot a zvýšení creepové odolnosti až do 300 °C.

Thorium - Je používáno pro zvýšení odolnosti vůči creepu až do 350 °C. Zlepšuje také slévateľnost a slitiny, které ho obsahují, jsou svařitelné. Kvůli jeho radioaktivitě jsou však slitiny s jeho obsahem postupně vyřazovány.

Křemík - Používá se pro zvýšení tekutosti roztavených slitin. V přítomnosti železa však snižuje protikorozní odolnost.

Škodlivé příměsi:

Měď - Ve větším množství než 0,05 % nepříznivě ovlivňuje korozní odolnost. Příznivě působí na pevnost za vyšších teplot.

Nikl - I ve velice malých koncentracích ovlivňuje korozní odolnost. Pro dobré korozní vlastnosti nesmí přesáhnout 0,005 %.

Berylium - Je velice málo rozpustné a může způsobit zhrubnutí zrna. Přesto se využívá pro snížení oxidace v tavenině.

Železo - V hořčkových slitinách se chová podobně jako nikl, limitní obsah železa pro dobrou korozní odolnost je také 0,005 % [1].

2.2.1 Tváření hořčkových slitin

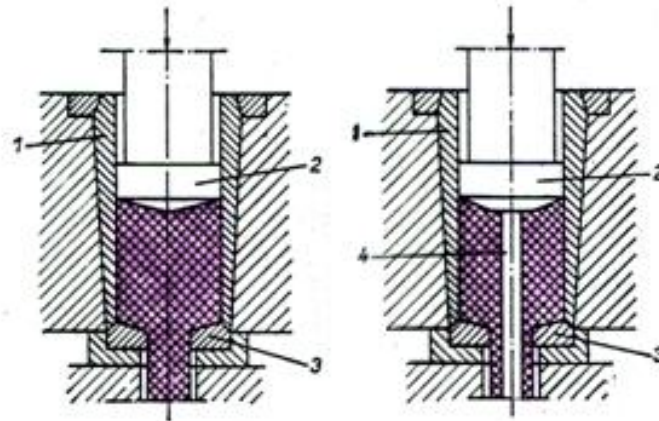
Existuje několik faktorů, které limitují využívání tvářících metod pro zpracování hořčkových slitin. Kvůli tomu, že hořčík krystalizuje v hexagonální krystalové mřížce, která má malý počet skluzových rovin, se u jeho slitin projevuje špatná tvařitelnost za studena a jejich nízká schopnost absorpce rázových deformací. Tvařitelnost se také zhoršuje s rostoucím podílem legujících prvků [5].

Protlačování

Protlačování se může provádět za tepla, za polohřevu a za studena. Tvářený materiál se přemísťuje a směr jeho pohybu je určen konstrukcí protlačovadla. Díky tomu, že umožňuje vyvození všestranné tlakové napjatosti, je protlačování jednou z nejuniverzálnějších metod pro zpracování materiálů. Je také možné jej provádět ve velkém rozmezí teplot. Protlačování spočívá v deformaci materiálu v důsledku působících sil do předem stanoveného směru s dobrými mechanickými a rozměrovými vlastnostmi konečného výrobku. Díky vysoké přesnosti průtlačků je obvykle není nutno před montáží rozměrově upravovat. Velmi vysoké je také využití materiálu, které dosahuje 90 - 100 %. Výkonnost protlačovacích metod je dána volbou procesních parametrů (rychlost protlačování, teplota) [5,6].

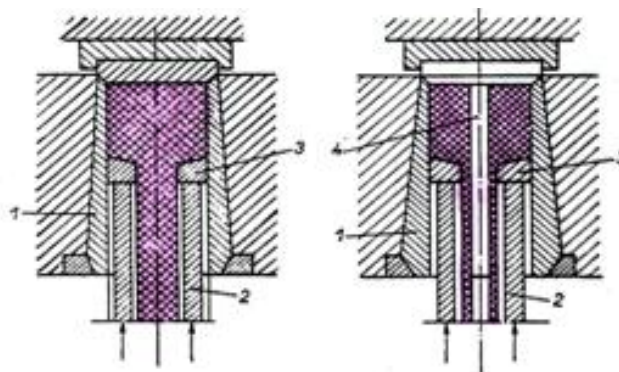
Dopředné protlačování: Při dopředném protlačování se materiál pohybuje ve stejném směru jako průtlačník. Průtlačník uzavře polotovar v průtlačnici a vytlačuje ho ven otvorem.

Výlisek buď propadne, nebo je odstraněn vysunovačem. Dopředné protlačování se používá při tváření výrobků, které nemají konstantní průřez (šrouby, čepy, pouzdra atd.) [6].



2.1 - Princip dopředného protlačování (1,3 - průtlačnice, 2, 4 - průtlačník) [6]

Zpětné protlačování: Při zpětném protlačování se materiál pohybuje kolem průtlačníku proti směru jeho pohybu. Tvar dutiny průtlačku udává průtlačník a jeho vnější tvar je určen průtlačnicí. Zpětné protlačování se používá k výrobě dutých průtlačků, kdy je tloušťka stěny velmi malá v porovnání s průměrem [23].



2.2 - Princip zpětného protlačování (1,3 - průtlačnice, 2, 4 - průtlačník) [6]

Mezi další metody využívané ke tváření hořčíkových slitin patří válcování, kování a hluboké tažení.

2.2.2 Značení hořčíkových slitin

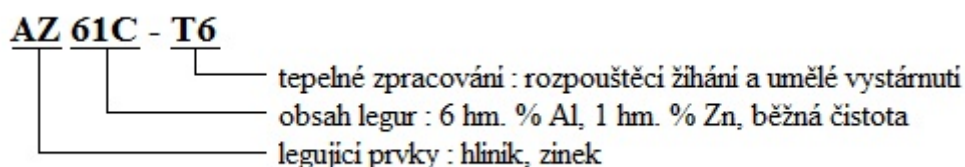
Hořčíkové slitiny se mohou značit podle evropské normy EN. V běžné praxi je však rozšířenější značení dle normy ASTM (American Society for Testing and Materials).

Ke značení dle ASTM se používá čísel a písmen a skládá se ze tří částí. První část tvoří dva hlavní legující prvky, které se značí písmeny (tabulka 1.1) a řadí se podle klesajícího obsahu. V druhé části se udává obsah těchto prvků zaokrouhlený na celá hmotnostní procenta.

Ve třetí části se určuje rozdíl mezi slitinami se stejným obsahem hlavních legur. Za pomlčkou se uvádí stav slitiny popřípadě druh jejího tepelného zpracování [1,2].

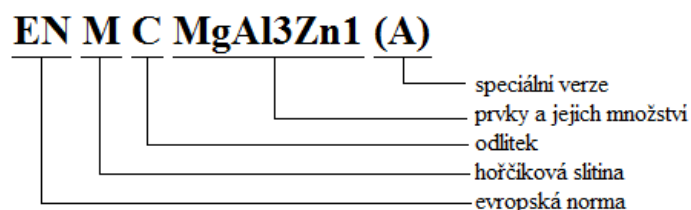
Tab. 2.1 - Označení legujících prvků v hořčikových slitinách

Písmeno	Prvek	Písmeno	Prvek	Písmeno	Prvek
A	hliník	J	stroncium	R	chrom
B	bizmut	K	zirkonium	S	křemík
C	měď	L	lithium	T	čín
D	kadmium	M	mangan	W	yttrium
E	kovy vzácných zemin	N	nikl	X	vápník
F	železo	P	olovo	Y	antimon
H	thorium	Q	stříbro	Z	zinek



Obr. 2.3 - Příklad označení hořčikové slitiny dle ASTM

Značení hořčikových slitin dle EN je odvozeno z německých norem DIN. Ze značky je možné určit přibližné složení. Písmeno M je označení hořčikové slitiny, další písmeno značí, jedná-li se o hořčikové anody (A), ingoty (B) nebo odlitky (C). Dále následují značky hlavních prvků a jejich obsah ve slitině, popřípadě označení speciální verze slitiny [2].



Obr. 2.4 - Příklad označení hořčikové slitiny dle EN

2.3 Využití hořčkových slitin

Hořčkové slitiny se používají jako konstrukční materiál již více než sto let. Historicky největší podíl na jejich rozšíření měl rozvoj vojenského průmyslu. Hlavní výhodou hořčkových slitin je jejich nízká hmotnost. Z environmentálního hlediska je také neméně důležité snížení konstrukční váhy dopravních prostředků, díky čemuž dochází k ekonomičtějšímu využití paliva a tím pádem i ke snížení emisí. Nejčastěji využívanou hořčkovou slitinou je AZ 91 [7].

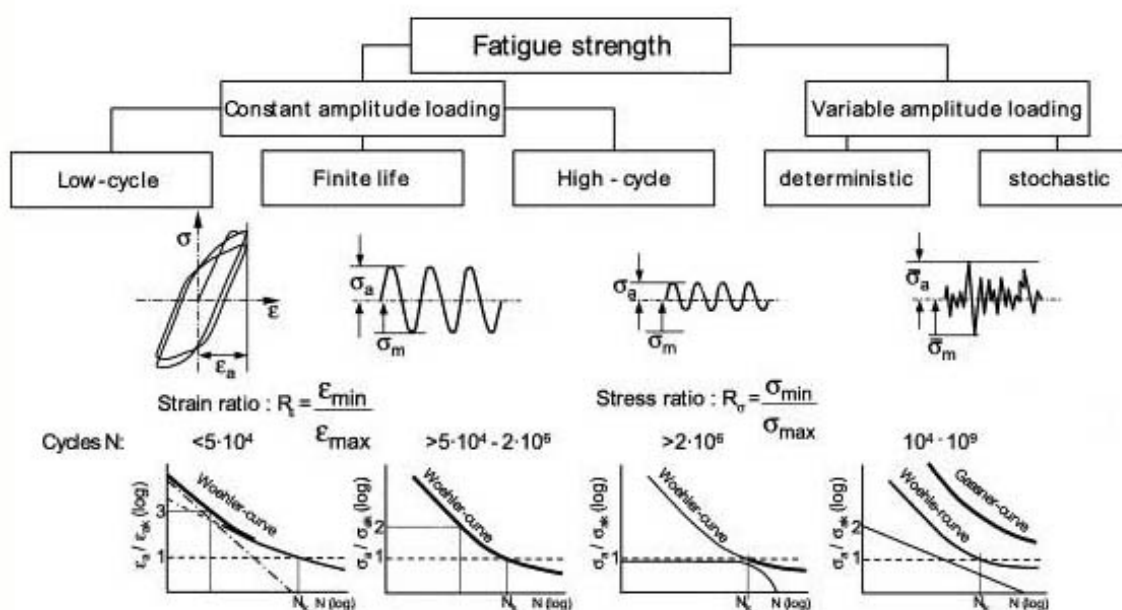
Jedním z hlavních odvětví, kde se aplikují slitiny hořčíku, je automobilový průmysl. Ve dvacátých letech devatenáctého století se začaly používat u závodních aut a trvalo více než deset let, než došlo k využití i pro komerční účely. K nárůstu aplikace hořčkových slitin v automobilovém průmyslu vedly hlavně požadavky na výrobu co nejlehčích a nejvýkonnějších vozidel s důrazem na nízkou spotřebu paliva. Přední výrobci automobilů dnes běžně využívají materiály na bázi hořčíku při výrobě součástí, jako jsou převodovky, kryty palivové nádrže, rámy sedadel, volanty a mnoho dalších. Dalším odvětvím, které tyto slitiny využívá, je letecký a také kosmický průmysl, kde je co nejnižší hmotnost součástí ještě zásadnější, než je tomu u automobilového průmyslu. Z historického hlediska byl hořčík jedním z hlavních konstrukčních kovů německého letectví a byl využíván na německá letadla už v první, ale hlavně ve druhé světové válce. V současné době těží z dobrých mechanických vlastností hořčkových slitin vojenská letadla, jako jsou Eurofighter Typhoon, Tornado, nebo F16. V kosmickém průmyslu se hořčkových slitin využívá hlavně díky jejich schopnosti odolávat bombardování vysokoenergetickými částicemi a malými meteority, vysokým teplotám a působení ozonu [4].

Současným trendem v odvětví elektronických zařízení je, aby výrobky byly přenosné. Proto je důležité, aby komponenty, ze kterých se tato zařízení vyrábí, byly lehké a zároveň odolné. Materiály na bázi hořčíku tyto požadavky splňují. Jsou lehké jako plast, ale jejich mechanické vlastnosti jsou mnohem lepší. Proto se využívají na výrobu krytů mobilních telefonů, notebooků nebo kamer. Hořčkových slitin a kompozit se využívá i ve sportovním průmyslu. V první polovině dvacátého století byly hořčkové slitiny představeny jako ortopedické biomateriály. Avšak vzhledem k jejich nízké odolnosti vůči korozi se začalo jejich používání omezovat. Přesto má však hořčík řadu atraktivních vlastností, které činí z materiálů na bázi hořčíku potenciální kandidáty na výrobu implantátů [4].

3 Cyklická plasticita a únava materiálu

3.1 Proměnné zatížení

V praxi jsou strojní součásti nejčastěji vystaveny nahodilému průběhu zatěžování a jen přibližně 20% provozních namáhání má harmonický průběh. Náhodné zatížení se proto většinou nahrazuje sinusovým průběhem, případně souborem zátěžných bloků o různé hodnotě amplitudy sinusového zatížení [8,9].



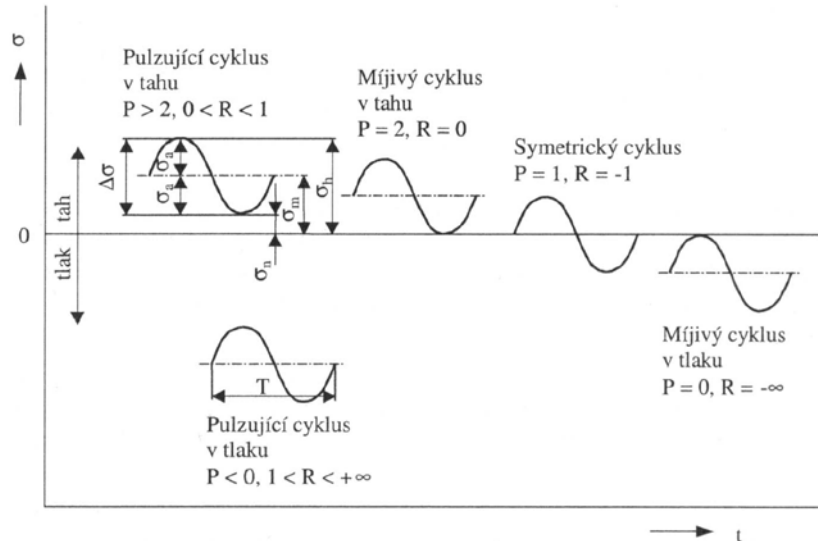
Obr. 3.1 - Rozdělení únavového zatěžování [20]

Zátěžný cyklus se může nalézat jak v tlakové, tak i v tahové oblasti, jak je patrné na obrázku 2.2. Pokud se střední napětí cyklu rovná nule, je cyklus symetrický. V dalších případech, kdy je střední napětí odlišné od nuly, se jedná o asymetrické cykly. Pro posouzení asymetrie se užívají parametry asymetrie R a S , které se určují z následujících vztahů [8]:

$$R = \sigma_n / \sigma_h \quad (1)$$

$$P = \sigma_h / \sigma_a \quad (2)$$

kde σ_n je minimální hodnota cyklického napětí σ_h je maximální hodnota cyklického napětí a σ_a je amplituda napětí. Hodnoty parametrů pro dané cykly jsou uvedeny na obrázku 2.2.



Obr. 3.2 - Typy zátěžných cyklů a jejich charakteristiky [8]

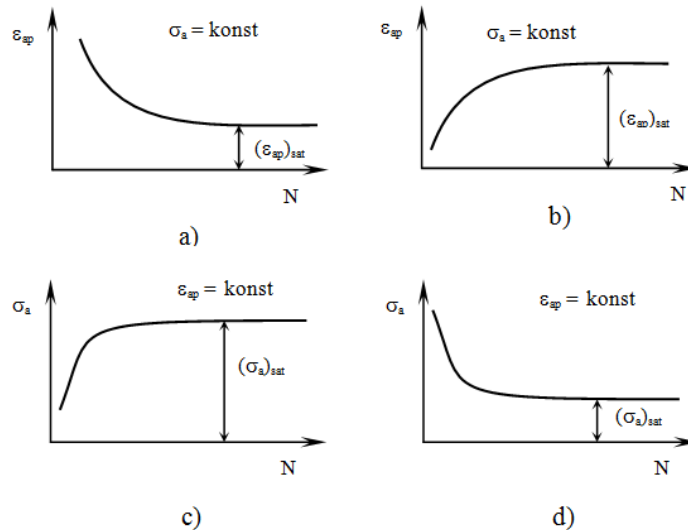
3.2 Změny mechanických vlastností

Při cyklickém zatěžování kovových materiálů dochází ke změnám jejich fyzikálních a mechanických vlastností v důsledku změn v mikrostruktuře. Za mechanické vlastnosti se považují ty, které popisují odpor materiálu vůči deformaci, která je způsobena vnějšími silami [8,10].

3.2.1 Cyklické zpevnění a změkčení

V průběhu únavového zatěžování se mění odpor materiálu vůči cyklické deformaci. Zda bude růst, anebo klesat, záleží na typu materiálu, na teplotě a na podmínkách zatěžování. Jestliže odpor materiálu proti cyklické deformaci vzrůstá, materiál cyklicky zpevňuje. V opačném případě dochází k cyklickému změkčení. Tyto změny mají většinou sytící charakter, což znamená, že jsou nejvýraznější na počátku cyklického zatěžování a s počtem cyklů jejich intenzita klesá, až zcela ustane, nebo je jen nevýrazná. Materiál se tak nachází v saturovaném (ustáleném) stavu [8].

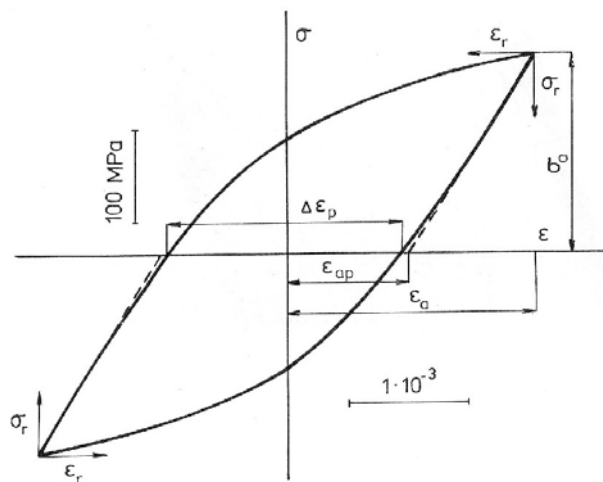
Během cyklického zatěžování s konstantní amplitudou napětí se může měnit jen amplituda deformace. Jestliže amplituda s počtem cyklů klesá, jedná se o cyklické zpevnění (obrázek 2.3a). Pokud amplituda deformace roste, jde naopak o cyklické změkčení (obrázek 2.3b). V režimu napětí s konstantní amplitudou deformace se mění amplituda napětí. Cyklické zpevnění se projevuje růstem amplitudy napětí – roste napětí potřebné k dosažení těžce deformace (obrázek 2.3c). Cyklické změkčení je naopak charakterizováno poklesem amplitudy napětí, což znamená, že klesá napětí potřebné k dosažení těžce deformace (obrázek 2.3d) [10].



Obr. 3.3 - Definice cyklického zpevnění a změkčení pro různé režimy zatěžování [10]

3.2.2 Hysterezní smyčka

Po ukončení počátečního stadia cyklické deformace, během něhož dochází ke zpevnění nebo změkčení, nastává u většiny materiálů stádium stabilizace. Během tohoto stádia je hysterezní křivka uzavřená (obrázek 2.4) a mění se buď nepatrně, nebo vůbec [11].



Obr. 3.4 - Ustálená hysterezní smyčka [11]: σ_a je amplituda napětí, ε_a - amplituda celkové deformace, ε_{ap} - amplituda plastické deformace, $\Delta\varepsilon_p$ - šířka hysterezní smyčky

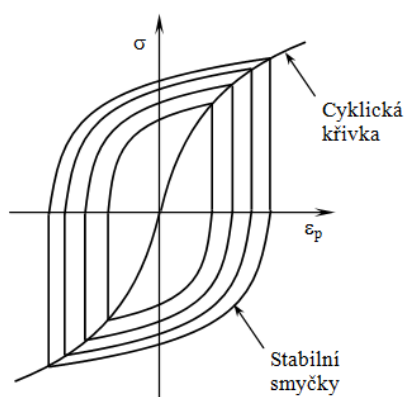
Při posuzování únavy se jedná o pravidelné opakování zatěžovacího cyklu v určitém rozmezí řízené veličiny. Sledujeme přitom amplitudy napětí σ_a , amplitudy celkové deformace ε_a , amplitudy plastické deformace ε_{ap} a amplitudy elastické deformace ε_{ae} . Pro malé hodnoty ε_{ap} je přesnější určovat hodnotu plastické deformace jako poloviční šířku hysterezní smyčky při střední hodnotě napětí [11]:

$$\varepsilon_{ap} = \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} \quad (3)$$

V průběhu změkčení a zpevnění se mění tvar hysterezní smyčky. Pokud materiál cyklicky změkčuje, plocha hysterezní smyčky se zvětšuje. Jestliže dochází k cyklickému zpevnění, velikost plochy hysterezní smyčky klesá. 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 [10,11].

3.2.3 Cyklická deformační křivka

Propojením vrcholů několika saturovaných hysterezních smyček pro různé výchozí hodnoty amplitudy plastické deformace nebo amplitudy napětí získáme závislost, která se nazývá cyklická deformační křivka (obrázek 2.5). Tato křivka vyjadřuje vztah mezi napětím a plastickou deformací v ustáleném stavu a je důležitou materiálovou charakteristikou pro popis únavového chování daného materiálu [8].



Obr. 3.5 - Definice cyklické deformační křivky [17]

Ve většině případů lze cyklickou deformační křivku popsat v oblasti středních a velkých amplitud plastické deformace mocninnou funkcí [8]:

$$\sigma_a = K \cdot \varepsilon_{ap}^n \quad (4)$$

kde σ_a je amplituda napětí, ε_{ap} je amplituda plastické deformace, K je parametr cyklické deformační křivky a n je exponent cyklické deformační křivky.

Cyklickou deformační křivku lze také popsat jako závislost celkové deformace ε_a na amplitudě napětí σ_a [11]:

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K''} \right)^{1/n'} \quad (5)$$

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

Jestliže srovnáme cyklické deformační křivky s tahovým diagramem, můžeme odhadnout cyklickou deformační odezvu materiálu. Pokud je cyklická deformační křivka přibližně totožná s tahovým diagramem, materiál je cyklicky stabilní. Jestliže leží cyklická křivka pod tahovou, materiál cyklicky změkčuje a jeho odpor proti plastické deformaci klesá. Nachází-li se cyklická křivka naopak nad tahovou, materiál cyklicky zpevňuje a jeho odpor proti plastické deformaci roste [8].

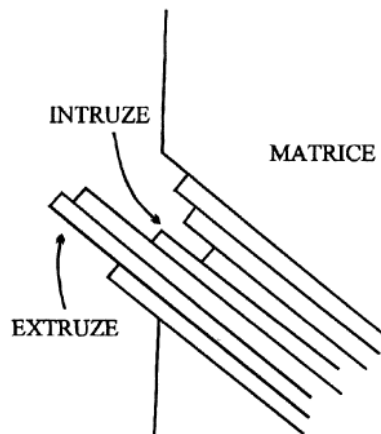
3.3 Nukleace únavových trhlin

Experimenty v oblasti únavy materiálu prokázaly, že únavový proces je závislý na stavu povrchu a životnost se tedy dá výrazně ovlivnit tepelným zpracováním. Důvodem je to, že trhliny vznikají hlavně na povrchu součástí v místech koncentrace cyklické plastické deformace. Nukleace únavových mikrotrhlin je více patrná u součástí s makroskopickými koncentratory napětí (vruby, svarové spoje, neopracovaný povrch, změny průřezu...). K únavovému lomu však dochází u součástí, kde se zmíněné koncentratory napětí neobjevují. Z toho je patrné, že existují i mikroskopické příčiny iniciace únavových trhlin, které také tvoří koncentraci napětí a plastické deformace. K jejich uplatnění však dochází pouze v případě, že v materiálu není přítomen žádný makroskopický koncentrátor napětí [8].

Fraktografické metody prokázaly, že existují v podstatě tři místa, kde dochází k nukleaci únavových trhlin:

- únavová skluzová pásma - nejčastější typ
- hranice zrn - v případě vysokoamplitudové únavy zejména za zvýšených teplot
- rozhraní mezi inkluzemi a matricí - v případě vícefázových materiálů

Základním typem nukleace je nukleace v únavových skluzových pásmech. Tato pásma vznikají během průběhu II. stádia únavového procesu v důsledku tvorby nových dislokací, které se v povrchových vrstvách seskupují do pásů v rovinách maximálního smykového napětí. Díky působícímu napětí dochází v únavových skluzových pásmech u sousedních rovin ke vzájemnému pokluzu (kartový skluz) a následně k tvorbě mikroreliefu, jak lze vidět na obrázku 2.6 [8,10,12].



Obr. 3.6 - Kartový skluz v perzistentním skluzovém pásmu [12]

3.3.1 Mechanismy nukleace mikrotrhlin

Pro vlastní nukleaci mikrotrhlin bylo navrženo velké množství modelů. Z experimentálních výsledků je zřejmé, že tyto mechanismy se budou uplatňovat pouze v nukleačních místech, tj. v kořeni intruze v únavových skluzových pásmech, v blízkosti inkluze nebo v okolí hranice zrna. Je velice obtížné posoudit, zda je zřetelný rozdíl mezi intruzí a mikrotrhlinou, a proto je některé z mechanismů nerozlišují. Avšak většina modelů vychází z toho, že mezi intruzí a mikrotrhlinou je kvalitativní rozdíl [10].

Nukleační mechanismy lze v hrubých rysech rozdělit do pěti skupin [10]:

- **Mechanismy nerozlišující mezi intruzí a mikrotrhlinou.** V tomto případě je vznik mikrotrhliny chápán jako spojitě prorůstání intruze do hloubky, a to díky opakovanému skluzu buď na jednom, nebo na dvou skluzových systémech. V případě skluzu na jednom skluzovém systému je základem představy relativní pohyb více rovnoběžných „karet“. Intruze zde působí jako koncentrátor napětí a podporuje další skluz. Výhodou tohoto modelu je jeho nespecifičnost a rámcovost.
- **Nukleace křehkým prasknutím v kořeni intruze.** Tato představa jasně rozlišuje intruzi a mikrotrhlinu. Vychází z přímého pozorování povrchových vrstev pomocí elektronového mikroskopu. Mikrotrhliny začínají vždy na ostrých intruzích bez ohledu na typ okolní struktury dislokací. Dá se předpokládat, že mikrotrhlina se vytvoří, když koncentrace napětí kolem intruzí (závisující na geometrii intruze), která nemůže být odrelaxována skluzovými procesy (následkem zpevnění), dosáhne takového stupně, že maximální napětí překročí meziatomové vazebné síly. Tato představa je opět značně rámcová, předpokládá extrémně vysokou, i když silně lokalizovanou, koncentraci napětí u kořene intruze. Existenci takto vysoké koncentrace napětí není možné experimentálně ani dokázat, ani vyvrátit.
- **Vznik trhliny kondenzací vakancí.** Některé dislokační interakce vedou ke vzniku vakancí. Během cyklické deformace byla experimentálně zjištěna relativně vysoká koncentrace vakancí v celém zatěžovaném objemu. Protože únavová skluzová pásma se nachází v oblasti se stálou a největší dislokační aktivitou, je možné, že právě v těchto pásmech je koncentrace vakancí největší v důsledku dislokačních

interakcí. Vzniklé vakance mohou vytvářet dutiny a shluky. Dutinu o dostatečné velikosti je možné považovat za trhlinu. Tato představa implicitně předpokládá difúzi vakancí, která je silně závislá na teplotě. Možnost difúze vakancí však není nutnou podmínkou pro nukleaci trhlin. Ale při cyklickém zatěžování ve vysokoteplotních oblastech, kde se již také uplatňuje creep, se mechanismus kondenzace vakancí může na nukleaci podílet.

- **Dekoheze krystalu podél skluzové roviny způsobená akumulací dislokací.** Základní představa je taková, že v kritických místech se tvoří taková dislokační konfigurace, která vede k lokálnímu navýšení napětí nebo energie, postačující ke ztrátě koheze v oblasti několika desetin až jednotek nanometru.
- **Nukleace na hranicích zrn.** Tento model je založen na plastické nestabilitě a předpokládá vysokou úroveň cyklické plastické deformace napříč celou povrchovou vrstvou zrn. Protože hranice zrn vytváří překážku plastické deformaci, dochází v mikroměřítku k plastické nestabilitě a hloubka rýhy se na hranici zrna se zvyšujícím se počtem cyklů prohlubuje, dokud koncentrace deformace u rýhy není tak vysoká, že vytvoří mikrotrhlinu.

Není jasné, do jaké délky a hloubky mikrotrhlin můžeme hovořit pouze o nukleaci a kde již nastává šíření mikrotrhlin. Neexistuje žádné kritérium, podle kterého by se daly tyto procesy rozdělit. Je nutné také připustit to, že nukleace i šíření mikrotrhliny je spojitý proces s nemožností vymezení hranice. Z tohoto důvodu jsme odkázáni jen na konvenci volby délky trhliny, kterou budeme považovat za konec nukleačního stadia [10].

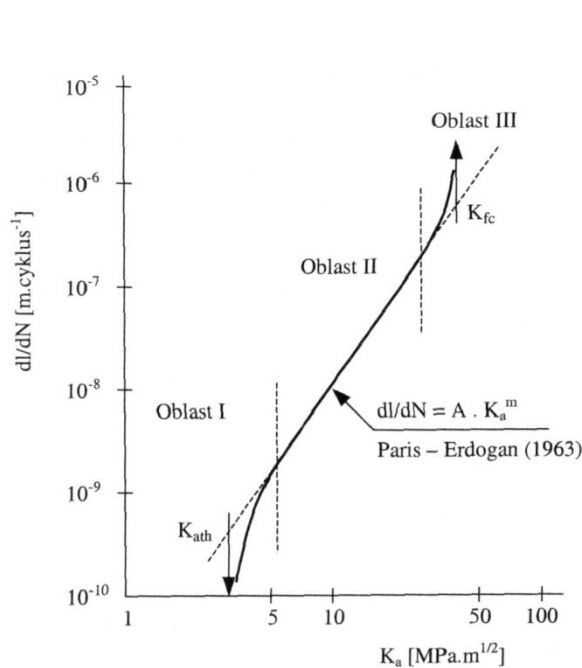
3.4 Šíření únavových trhlin

Stadium šíření únavových trhlin se dělí na 2 fáze. Nejprve se trhliny o malé délce, které mají příznivé podmínky k dalšímu rozvoji, šíří krystalograficky v rovině maximálního skluzového napětí, t.j. zhruba pod úhlem 45° na směr působení cyklického tahového napětí. Po dosažení určité délky má trhlina tendenci stáčet se kolmo na směr působícího napětí. Ve druhé fázi se zpravidla šíří už jen jedna trhlina, zatímco růst ostatních trhlin se zastaví. Šíření probíhá nekystalograficky kolmo na směr hlavního napětí a bývá označováno jako šíření dlouhé trhliny [8,11].

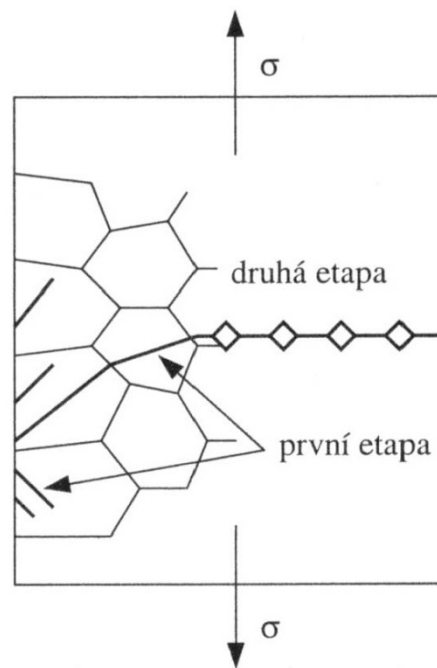
Šíření dlouhé trhliny lze popsat pomocí parametrů lomové mechaniky pomocí tzv. Paris-Erdoganova vztahu [8]:

$$dl/dN = A \cdot K_a^m \quad (6)$$

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



Obr. 3.7 - Kinetický diagram únavového poškození [16]



Obr. 3.8 - Etapy šíření trhliny [17]

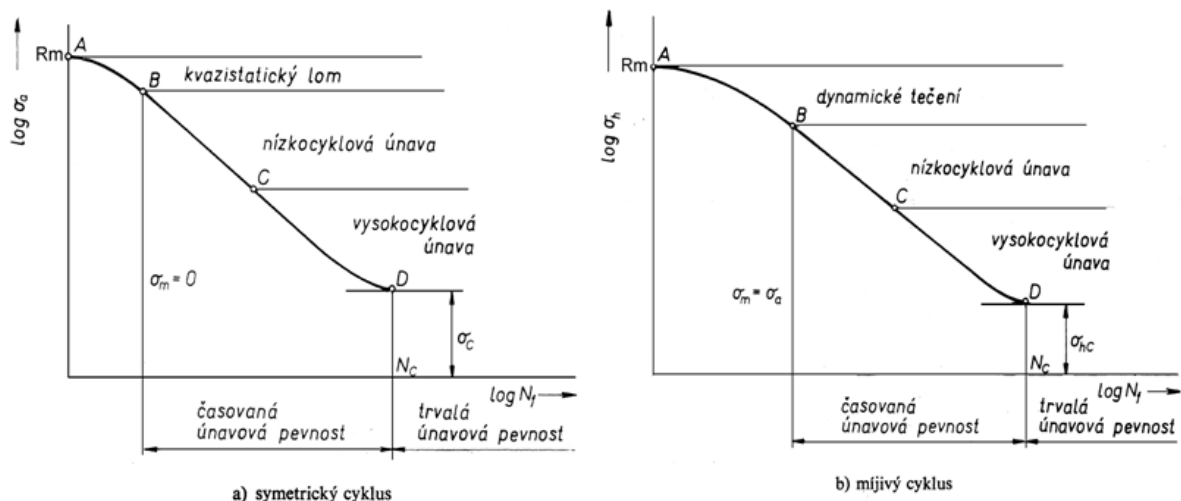
3.5 Křivky životnosti

3.5.1 Wöhlerova křivka

Wöhlerova křivka životnosti (křivka σ_a-N_f , nebo také $S-N$ křivka) poskytuje informace o závislosti počtu cyklů do lomu N_f na napětí σ_a . Tato křivka bývá konstruována pro různá střední napětí σ_m , která ovlivňují její průběh. Obvykle se experimentálně zjišťují pouze dvě σ_a-N_f křivky a to při symetrickém zátěžném cyklu ($\sigma_m = 0$) a při míjivém cyklu ($\sigma_m = \sigma_a$) (obrázek 2.9). Oba diagramy mají společný počet cyklů do lomu s rostoucím napětím. Tato oblast se nazývá časovaná únavová pevnost a je ohraničena zprava počtem cyklů N_c (počet cyklů, nad nímž již nedojde k únavovému porušení). Oblast s vyšším počtem cyklů $N > N_c$ se nazývá oblast trvalé únavové pevnosti [10].

Závislost σ_a-N_f vyjadřuje tyto stádia zákonitosti procesu [13]:

- Počet cyklů do porušení roste s klesající amplitudou napětí.
- Existuje mezní amplituda napětí, pod kterou nedochází k porušení ani při téměř neomezeném množství cyklů.
- Počet cyklů do porušení nezávisí jen na absolutní velikosti maximálního napětí σ_h , ale i na velikosti amplitudy napětí σ_a . Čím je σ_a větší při daném σ_h , tím menší počet cyklů snese materiál do porušení.



Obr. 3.9 - Křivky životnosti σ_a - N_f [13]

3.5.2 Oblast nízkocyklové únavy

V nízkocyklové oblasti lze únavové chování materiálu popsat dvojicí rovnic: Manson-Coffinovou křivkou a Wöhlerovou-Basquinovou křivkou.

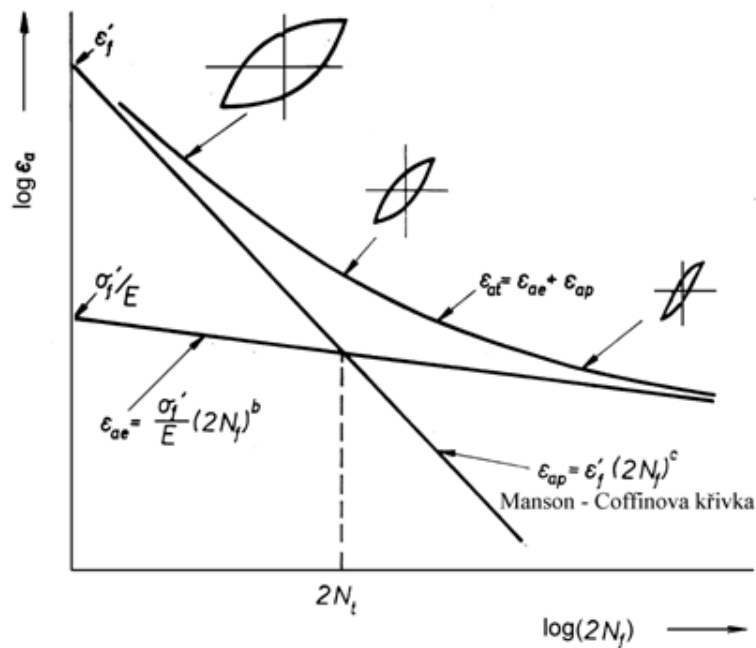
Masonova-Coffinova křivka

Tato křivka je výsledkem únavové zkoušky v tvrdém módu zatěžování (řízenou veličinou je deformace). Jedná se o závislost amplitudy plastické deformace na počtu cyklů do lomu. U tvrdého módu se jedná o pilový časový průběh řízené veličiny. Masonova-Coffinova křivka se skládá ze dvou částí: plastické ε_{ap} a elastické ε_{ae} . V místě, kde se protnou, se nachází tranzitní počet cyklů N_T [3,10,11]:

Mason-Coffinův vztah se uvádí ve tvaru [11]:

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon_f' \cdot (2N_f)^c \quad (7)$$

kde N_f je počet cyklů do lomu, ε_f' je součinitel únavové tažnosti a c je exponent únavové tažnosti.



Obr. 3.10 - Mason-Coffinova křivka [11]

Wöhlerova-Basquinova křivka

Křivku životnosti σ_a-N_f popisuje mocinná Basquinova závislost [11]:

$$\sigma_a = \sigma'_f \cdot (2N_f)^b \quad (8)$$

kde σ'_f je koeficient únavové pevnosti a b je exponent únavové pevnosti. Dříve se tato křivka využívala pouze v oblasti vysokocyklové únavy, ale v současné době se její využití rozvíjí i do nízkocyklové oblasti, kde se napětí blíží pevnosti v tahu. Mez únavy je 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, která popisuje cyklickou deformační křivku, je zřejmé, že ze šesti parametrů v těchto rovnicích jsou pouze čtyři nezávislé. Dva parametry můžeme vyjádřit pomocí ostatních čtyř pomocí vztahů [11]:

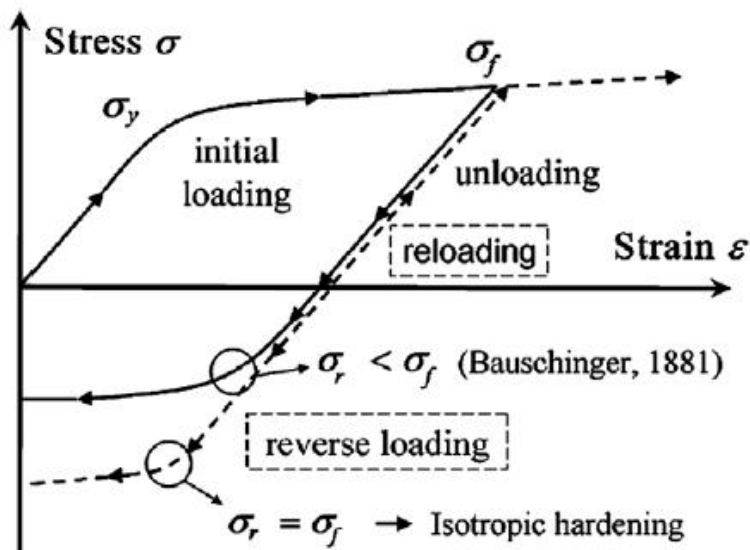
$$b = n \cdot c \quad (9)$$

$$K = \frac{\sigma'_f}{\epsilon'_f{}^n} \quad (10)$$

Tyto rovnice 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 [11].

4 Bauschingerův efekt

U kovů, které se plasticky deformují, závisí mechanická odezva nejen na jejich aktuálním stavu napjatosti, ale také na jejich deformační historii. To se může projevit změnami mechanické odezvy, jako rozdíl meze kluzu v tahu a v tlaku, jak ukazuje obrázek 3.1. Jestliže je dopředné napětí σ_f rovno zpětnému napětí σ_r , materiál se chová jako izotropní. Nicméně experimenty u mnoha tvárných materiálů ukázaly, že pokud je materiál jednoose namáhán v jednom směru (např. v tahu), poté odlehčen na nulové napětí a namáhán ve směru opačném (např. v tlaku), zpětné napětí může být nižší, než napětí dopředné. Toto asymetrické chování je známo jako Bauschingerův efekt, pojmenovaný podle Johanna Bauschingera, německého profesora aplikované mechaniky, který poprvé popsal tuto problematiku v roce 1881 [14,15,16].



Obr. 4.1 - Křivka napětí-deformace, která ukazuje účinky Bauschingerova efektu na typické kovové slitiny

Příkladem praktického využití Bauschingerova efektu je tváření a válcování plechů. Zatímco tváření a válcování může být prováděno v jednom směru, provozní napětí může působit v opačném směru. Kvůli tomu se v praxi využívá předdeformace součástí ve smyslu orientace hlavního provozního napětí. Díky tomu se získá reverzní napětí, které má schopnost po určitou dobu ovlivňovat odolnost materiálu nebo případně vyvolat počáteční reverzní cyklický creep. Znalost Bauschingerova efektu je důležitým předpokladem pro pochopení cyklického únavového chování kovových materiálů a kompozit [12,15,17].

4.1 Hlavní charakteristiky a parametry

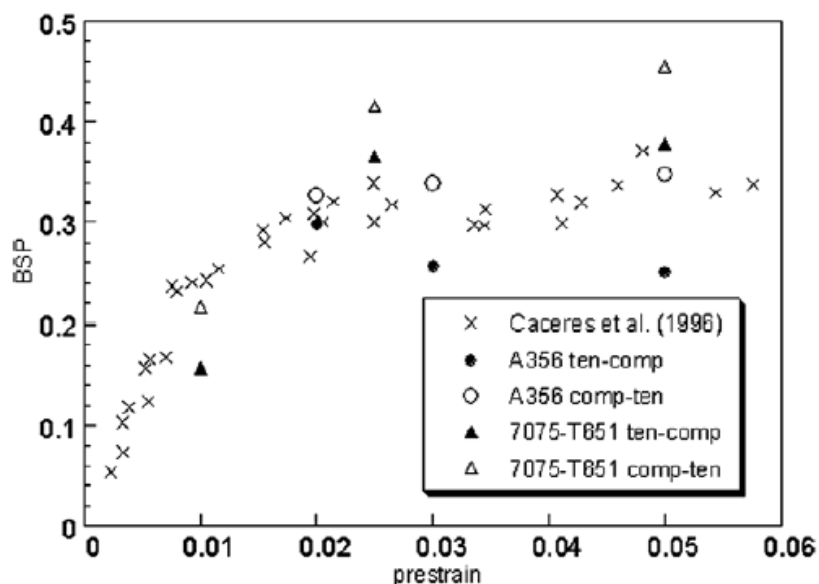
Jsou zavedeny tři hlavní parametry, které se používají k posouzení Bauschingerova efektu: napěťové, deformační a energetické.

Napěťový parametr β_σ

Bauschingerův efekt bývá popisován jako snížení meze pružnosti, pozorované během namáhání v určitém směru, v důsledku předchozí plastické deformace ve směru opačném. Napěťový parametr závisí na předdeformaci a je určen vztahem [16]:

$$\beta_\sigma = \frac{\sigma_p - \sigma_r}{\sigma_p} \quad (11)$$

kde σ_p je maximální předpětí a σ_r je mez kluzu v opačném směru namáhání. Čím vyšší je hodnota β_σ , tím vyšší je i účinek Bauschingerova efektu [16,18].



Obr. 4.2 - Závislost napěťového parametru na předdeformaci u hliníkových slitin 7075 a A356 [14]

Deformační parametr β_ε

Tento parametr popisuje výši deformace ve zpětném směru, potřebné k dosažení předdeformace. Je dán vztahem [16]:

$$\beta_\varepsilon = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_p} \quad (12)$$

kde ε_p je plastická předdeformace a ε_r je hodnota plastické deformace v opačném směru, odpovídající předdeformaci [16].

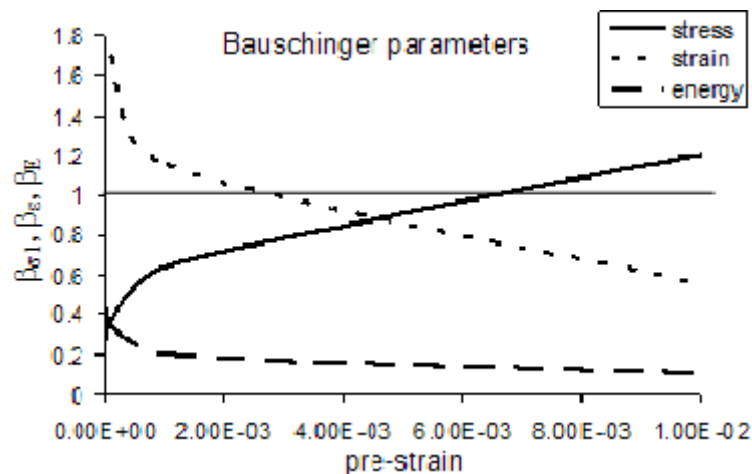
Energetický parametr β_E

Při deformaci je množství energie ve vzorku uloženo ve formě dislokací, bodových poruch atd. Část takto akumulované energie se mění s procentuálním podílem deformace. Ušetřená energie je definována jako Bauschingerova energie E_s a energie vynaložená na předdeformaci jako E_p . Bauschingerův energetický parametr potom určuje vztah [18]:

$$\beta_E = \frac{E_s}{E_p} \quad (13)$$

Tento parametr znázorňuje vztah mezi kinematickým a izotropním zpevněním, které je pozorováno během deformace. Mimoto nám může poskytnout představu o tom, kolik anizotropie se objeví v materiálu během zpětného zatěžování [14,18].

Tyto tři parametry, použity dohromady, umožňují co nejkomplexnější posouzení vlivu Bauschingerova efektu.



Obr. 4.3 - Závislost napěťového, deformačního a energetického parametru Bauschingerova efektu na předdeformaci u oceli s 0,17 % uhlíku [16]

4.2 Mechanismy

Od objevu Bauschingerova efektu bylo provedeno mnoho studií, které by jej vysvětlily. Původní představy považovaly za jeho příčinu vnitřní napětí spolu s makroskopickými zbytkovými napětími vznikajícími v důsledku nehomogenní deformace jednotlivých zrn u polykrystalických kovů. Ve čtyřicátých letech dvacátého století přišel maďarský fyzik Egon Orowan s alternativní teorií, která byla založena na anizotropii hnací síly pohybu dislokací v důsledku předdeformace. Obecně existují dva hlavní směry vysvětlující Bauschingerův efekt, teorie vnitřních napětí a teorie dislokací (Orowanova teorie). Kromě toho jej lze také popsat pomocí kompozitního modelu poprvé představeného Georgem Masingem [14,18].

4.2.1 Teorie vnitřních napětí

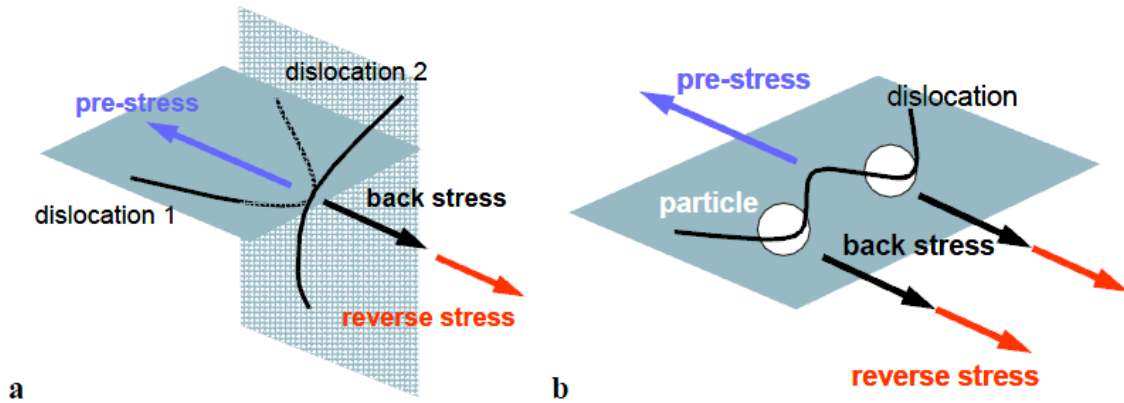
V roce 1918 přišel Emil Heyn s teorií, kterou vysvětloval snížení meze kluzu pozorovanou během zpětného zatěžování. Vycházel z těchto tří předpokladů:

- materiál se skládá z částic o velice malých objemech, které mají ideální křivku napětí-deformace
- meze pružnosti jednotlivých částic si nejsou vzájemně rovny
- absolutní hodnota meze pružnosti jakékoliv částice nezávisí na směru deformace jak v tahu, tak v tlaku

Pomocí těchto předpokladů teorie říká, že dochází k zakřivení původní křivky napětí-deformace na elasticko-plastickém rozhraní. Během zatěžování je deformace homogenní, ale při plastické deformaci není rozložení napětí rovnoměrné, a proto po odlehčení dochází ke vzniku zbytkových napětí, které jsou odpovědné za snížení meze kluzu při zpětném zatěžování. Důsledkem účinků těchto napětí je snížení únavové životnosti materiálu [18,19].

4.2.2 Teorie dislokací

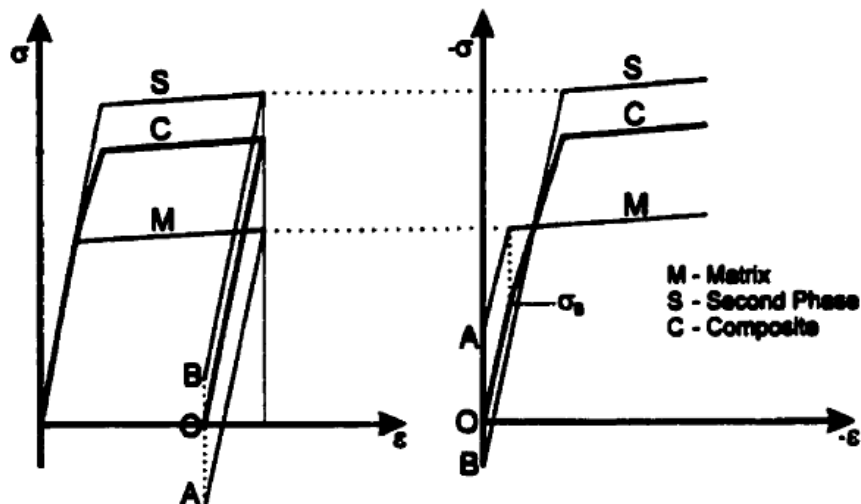
Během dopředné plastické deformace interagují pohyblivé dislokace s různými překážkami (jiné dislokace, hranice zrn, precipitáty). Tyto překážky jsou dostatečně pevné, aby zabránily dalšímu šíření pohyblivých dislokací. Tím se vytváří zpětné napětí okolo místa jejich styku a zabraňuje budoucímu postupu dalších obdobných dislokací. Během zpětné deformace toto zpětné napětí vypuzuje dislokace z překážek v opačném směru, čímž klesá hodnota meze kluzu podle úrovně zpětného napětí. V souladu s touto teorií zvýšení hustoty dislokací zvyšuje i hustotu míst, kde mohou dislokace interagovat, následkem čehož se zvyšuje úroveň zpětného napětí. Proto by měl být Bauschingerův efekt vyšší u materiálů s vyšší hustotou dislokací, avšak s nárůstem hustoty původních dislokací se může snížit počet pohyblivých dislokací. K tomu dochází v důsledku nahromadění dislokací a jejich následnému znehybnění. Koncentrace napětí v okolí dislokací vyvolává plastické deformace protínajících se skluzových ploch. Pohyblivé dislokace na těchto plochách interagují se shlukem dislokací a tvoří tzv. Lomel-Cotrellův zámek, což je nepohyblivá dislokace, která brání pohybu ostatních dislokací v příslušných rovinách. Tím se zabraní nahromaděným dislokacím v pohybu zpět, poté co dojde k odlehčení [16,18].



Obr. 4.4 - Schématický diagram interakce a) dislokace - dislokace b) dislokace - částice [16]

4.2.3 Kompozitní model

Bauschingerův efekt lze také popsat pomocí kompozitního modelu, dvou fází (matrice a druhá fáze), nebo dvou komponent s různými mechanickými vlastnostmi, v rámci jednoho vzorku. Tento model předpokládá, že ve vzorku jsou dvě fáze nebo komponenty, které mají stejný modul pružnosti, ale rozdílnou mez pružnosti. Když vzorek podléhá napětí v jednom směru a toto napětí je dostatečně vysoké, u fáze nebo komponenty s nižší mezí pružnosti se vyskytne plastická deformace, zatímco druhá se bude chovat pružně. Při nulovém napětí bude jedna fáze nebo komponenta pod tahovým napětím a druhá bude pod zbytkovým tlakovým napětím. Při opětovném namáhání ve stejném směru na stejnou úroveň napětí se budou obě fáze nebo komponenty chovat pružně, ale při namáhání v opačném směru způsobí vnitřní napětí v „měkčí“ fázi nebo komponentě, spolu s použitým napětím, předčasné ustoupení od ideálního průběhu. Proto je chování asymetrické [18,20].



Obr. 4.5 - Schéma kompozitního modelu [18]

5 Cíle práce

Cílem této práce je zjištění cyklické plasticity a nízkocyklové únavové odolnosti extrudované hořčíkové slitiny AZ61 se zaměřením na počáteční stádia cyklování s možným výskytem Bauschingerova efektu.

Cíle, kterých má být dosaženo:

- 1) Stanovení základních mechanických vlastností extrudované hořčíkové slitiny AZ61.
- 2) Vyhodnocení struktury a anizotropie slitiny pomocí metalografické analýzy.
- 3) Vyhodnocení cyklické plasticity s možným výskytem Bauschingerova efektu a jeho vlivu na cyklickou odezvu studované slitiny v módu řízení síly.

6 Experimentální materiál, výsledky a diskuze experimentů

Pro vlastní experiment byla použita tvářená hořčíková slitina AZ61 připravená metodou dopředného protlačování. Protlačování bylo prováděno při teplotě 360-400°C. Materiál ve tvaru kruhové tyče měl průměr = 20mm. Tyč byla vyrobena firmou Magnesium Elektron sídlící v Manchesteru. V tabulce 5.2 je uvedeno chemické složení slitiny, které bylo určeno pomocí opticko emisního spektrometru s doutnavým výbojem Spectramat GDS750.

Tab. 6.1 - Chemické složení slitiny AZ61 dle normy ASTM

Prvek [hm. %]	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Fe	Ni	Součet ostatních
AZ 61	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

Tab. 6.2 - Naměřené chemické složení slitiny AZ 61

Prvek [hm. %]	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Fe	Ni	Mg
AZ 61	6,1	0,61	0,27	0,00	0,00	0,004	0,00	zbytek

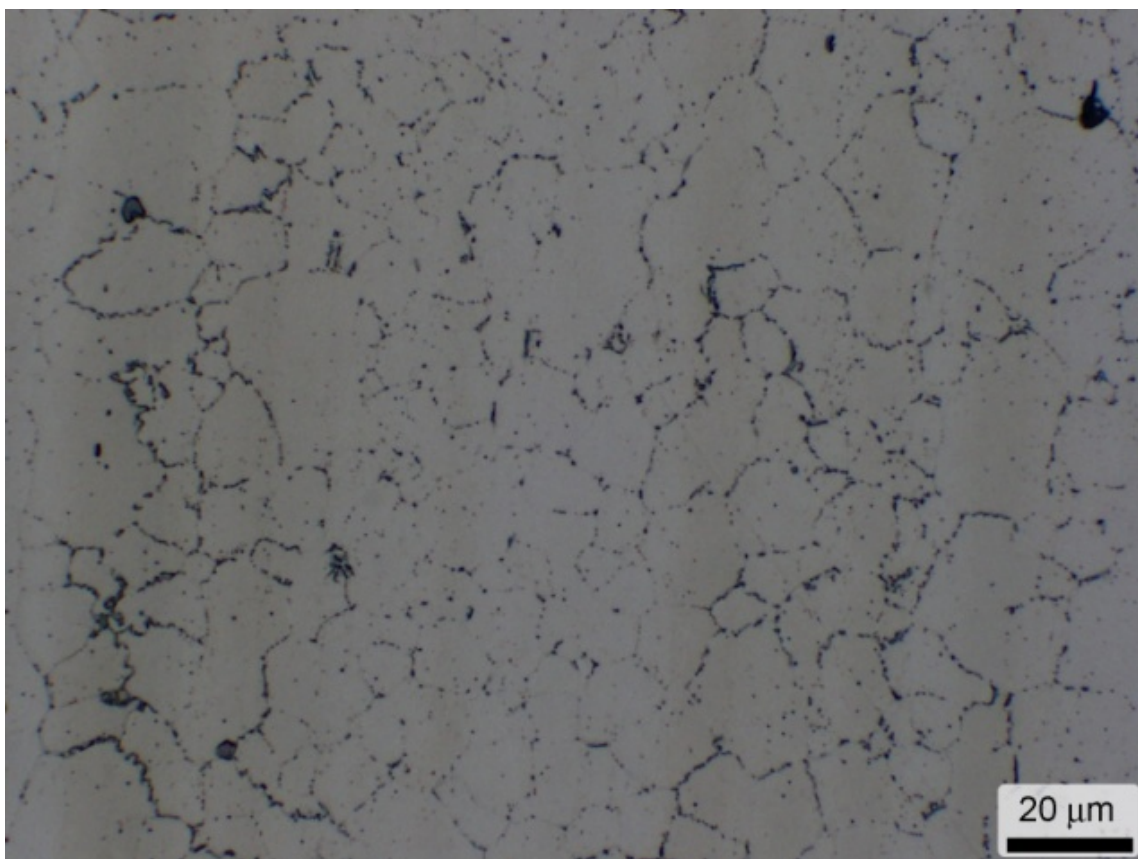
6.1 Mikroskopie

6.1.1 Příprava vzorků pro světelnou mikroskopii

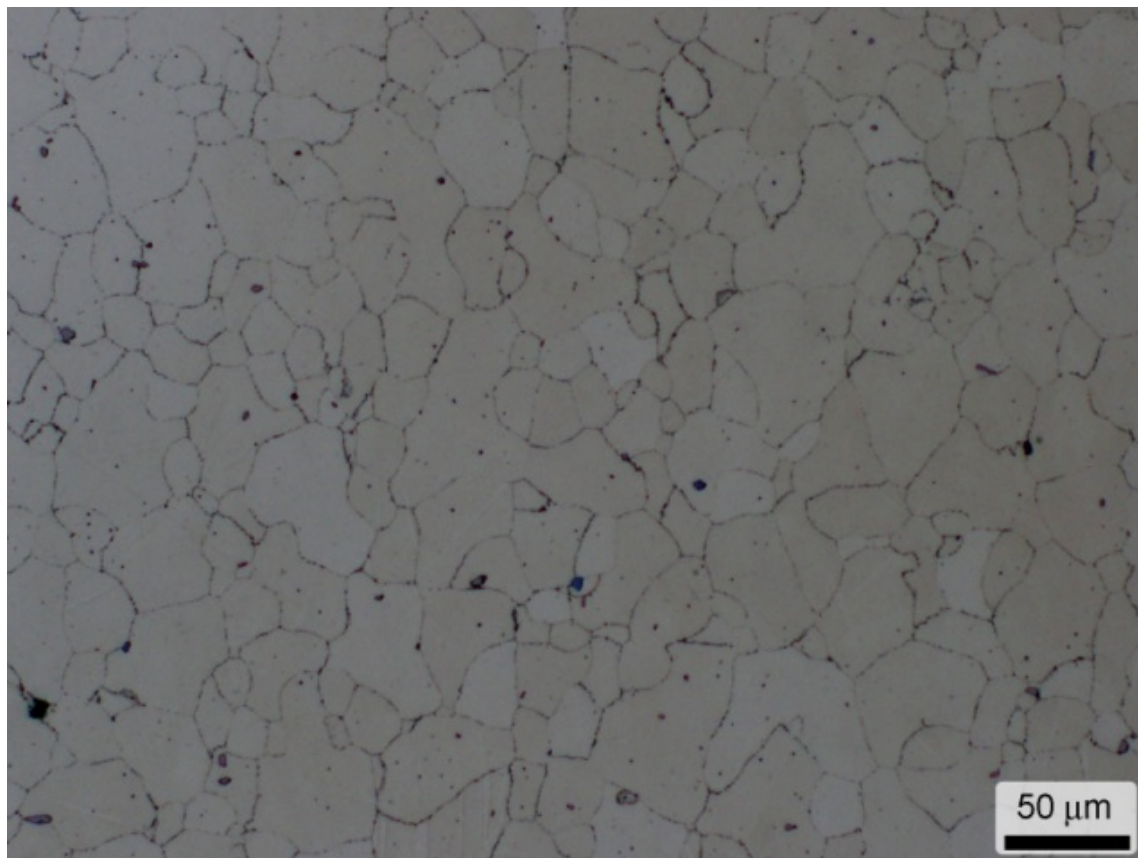
Vzorek byl odebrán ze zkušební tyče metodou abrazivního rozbrušování pomocí kotouče Struers 10S25 (36TRE). Zalisování vzorku za tepla do lisovací hmoty Dentacryl bylo provedeno za použití lisu Struers LaboPress – 3 při tlaku 20 kN za teploty 180 °C po dobu deseti minut. Dále byl vzorek broušen brusnými papíry s drsností 400, 1200 a 4000 na bruskách Pedemin. Během broušení byl vzorek chlazen vodou. Následné leštění bylo provedeno 3 μm a 1 μm diamantové pasty, při použití smáčedla DP-Lubricant Red, Struers, Depo 5320. K vyvolání struktury byla použita směs kyseliny pikrové (4,2 g kyseliny pikrové, 10 ml kyseliny octové, 10 ml vody a 70 ml ethanolu) [21].

6.1.2 Mikrostruktura

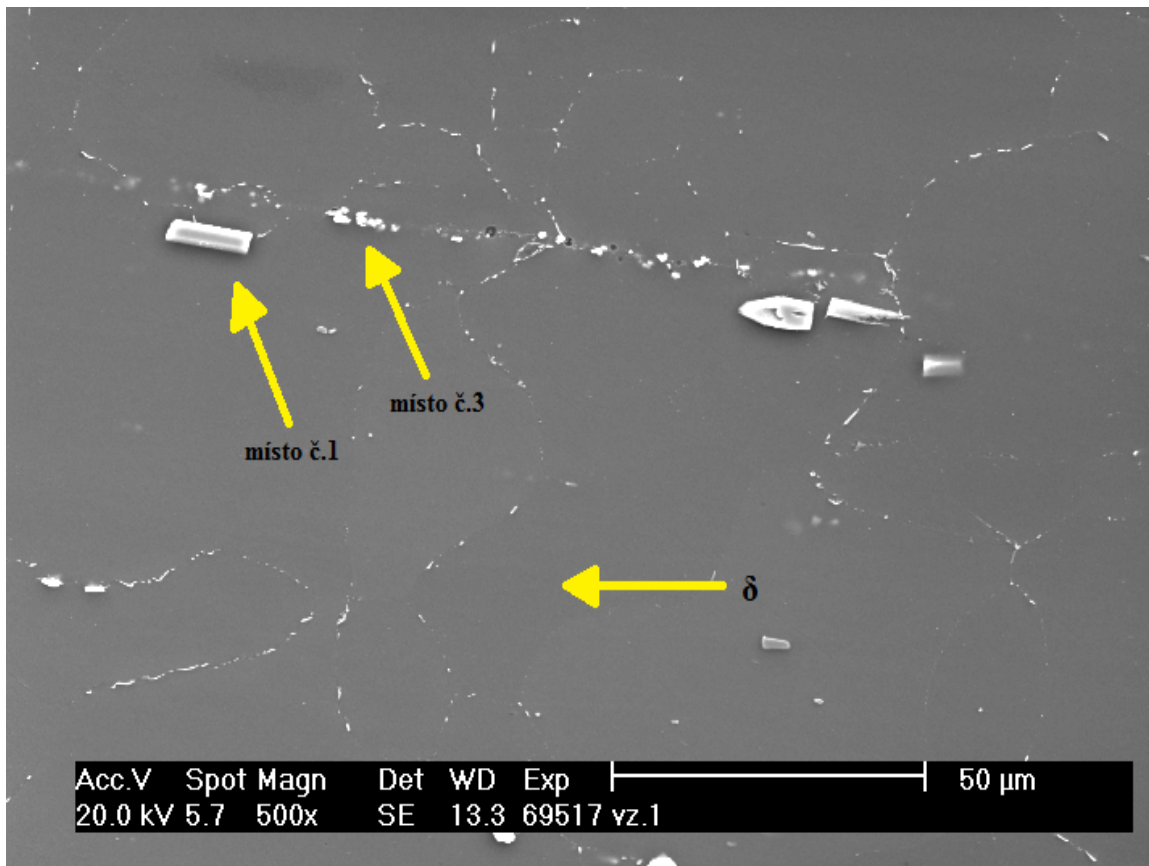
Pozorování vzorků bylo prováděno ve směru rovnoběžném a kolmém na hlavní směr tváření. Mikrostruktura tvářené hořčíkové slitiny AZ61 je tvořena tuhým roztokem δ . Po hranicích zrn je vyloučeno malé množství intermetalické fáze γ ($Mg_{17}Al_{12}$) ve srovnání s litou slitinou AZ61 [21].



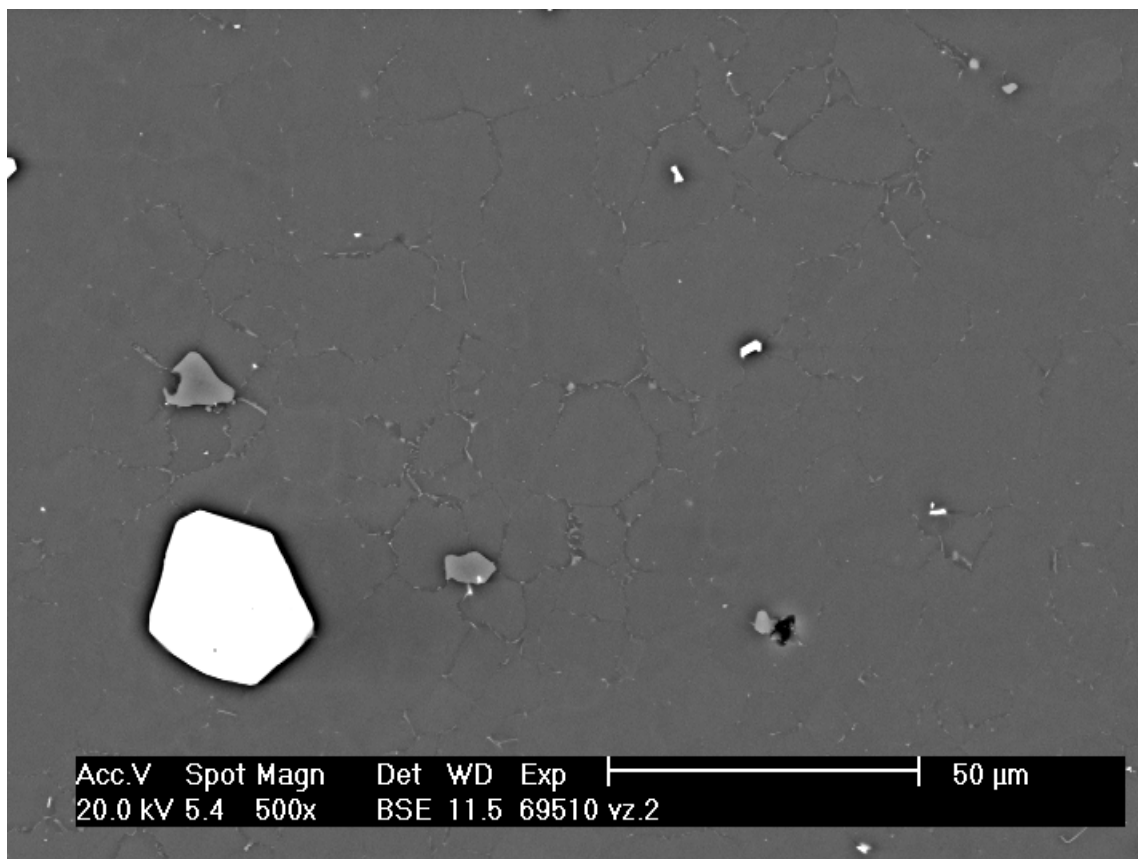
Obr. 6.1 - Mikrostruktura slitiny AZ61 v podélném směru



Obr. 6.2 - Mikrostruktura slitiny AZ61 v příčném směru

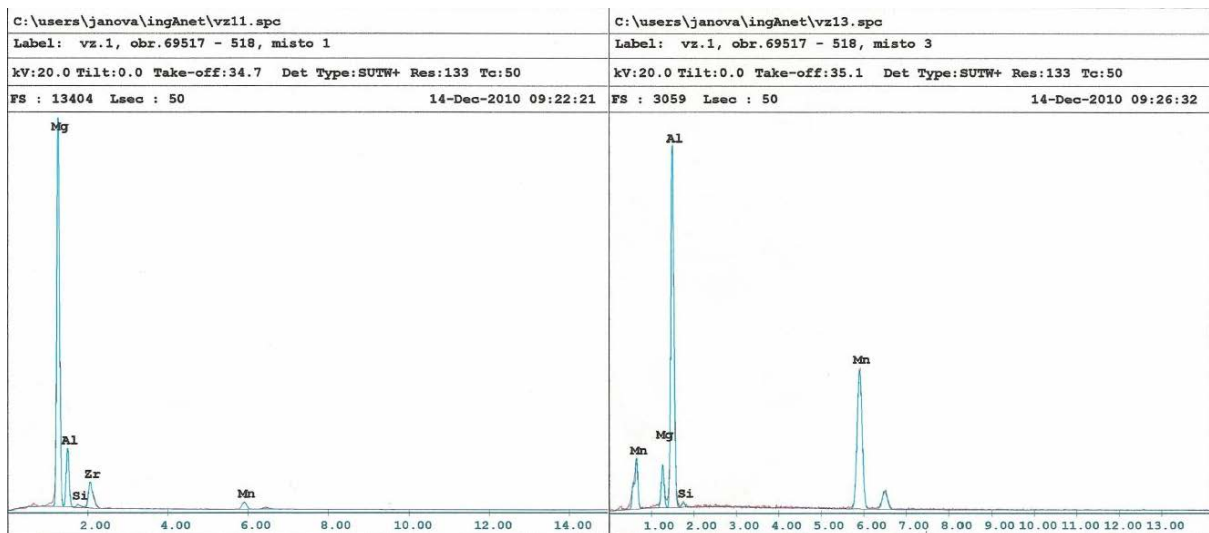


Obr. 6.3 - Mikrostruktura slitiny AZ61 ve směru v podélném směru, REM



Obr. 6.4 - Mikrostruktura slitiny AZ61 v příčném směru, REM

Z hodnocení mikrostruktury zkoumaného materiálu plyne, že není patrná výrazná směrovost struktury protlačované tyče. Střední velikost polyedrických zrn je zhruba 15 μm ve směru L a 20 μm ve směru T. Tento efekt je dán způsobem výroby a dynamickou rekrytalizací v průběhu protlačování. Ve struktuře jsou také přítomny vměstky na bázi AlMn a MgMn viz. obrázek č. 6.5.

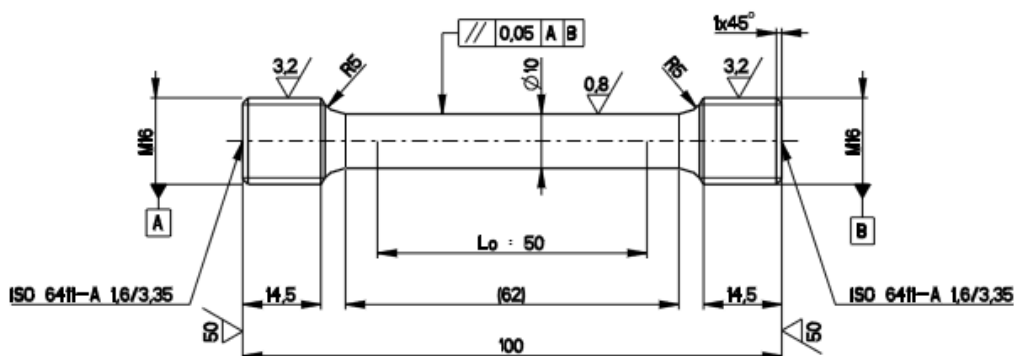


6.5 - EDS analýza místa č.1 a č.3

6.2 Tahová zkouška

6.2.1 Podmínky tahové zkoušky

Experimenty pro zjištění základních mechanických charakteristik v tahu byly provedeny na univerzálním trhacím stroji TIRA TEST 2300 řízeném počítačem. Řízení a vyhodnocení bylo provedeno pomocí softwaru LabTest v. 3 v souladu s platnými normami ČSN EN ISO 6892-1 a DIN 50125. Pro zkoušky byly použity válcové poměrné zkušební tyče s počátečním průměrem válcové části $d_0 = 10 \text{ mm}$, viz obrázek 5.5. Prodloužení bylo snímáno průtahoměrem MINI MFA 2 na počáteční měřené délce $L_0 = 50 \text{ mm}$. Řízenou veličinou byla rychlost pohybu příčnicku, 1 mm/min.



Obr. 6.6 - Zkušební těleso pro zkoušku tahem

6.2.2 Výsledky tahové zkoušky

Tahová zkouška byla provedena na sérii tří vzorků. V tabulce 5.3 jsou uvedeny naměřené hodnoty. Na obrázku 5.6 je tahová křivka pro vzorek č.1 spolu s určením meze kluzu $R_{p0.2}$.

Tab. 6.3 - Výsledky tahových zkoušek

Číslo vzorku	E	R_{p0.2}	F_{max}	F_{lom}	R_m	A	Z
	[GPa]	[MPa]	[N]	[N]	[MPa]	[%]	[%]
1	43.11	244	25805	24616	329	17.9	31.1
2	41.18	243	25724	24721	328	17.7	30.8
3	44.61	247	25826	24877	329	16.7	30.5
statistika							
	E	R_{p0.2}	F_{max}	F_{lom}	R_m	A	Z
	[GPa]	[MPa]	[N]	[N]	[MPa]	[%]	[%]
x	42.97	244.7	25784.81	24737.91	328.74	17.43	30.79
s	1.72	2.16	54.08	131.51	0.67	0.67	0.32
v [%]	4.01	0.88	0.21	0.53	0.2	3.83	1.03

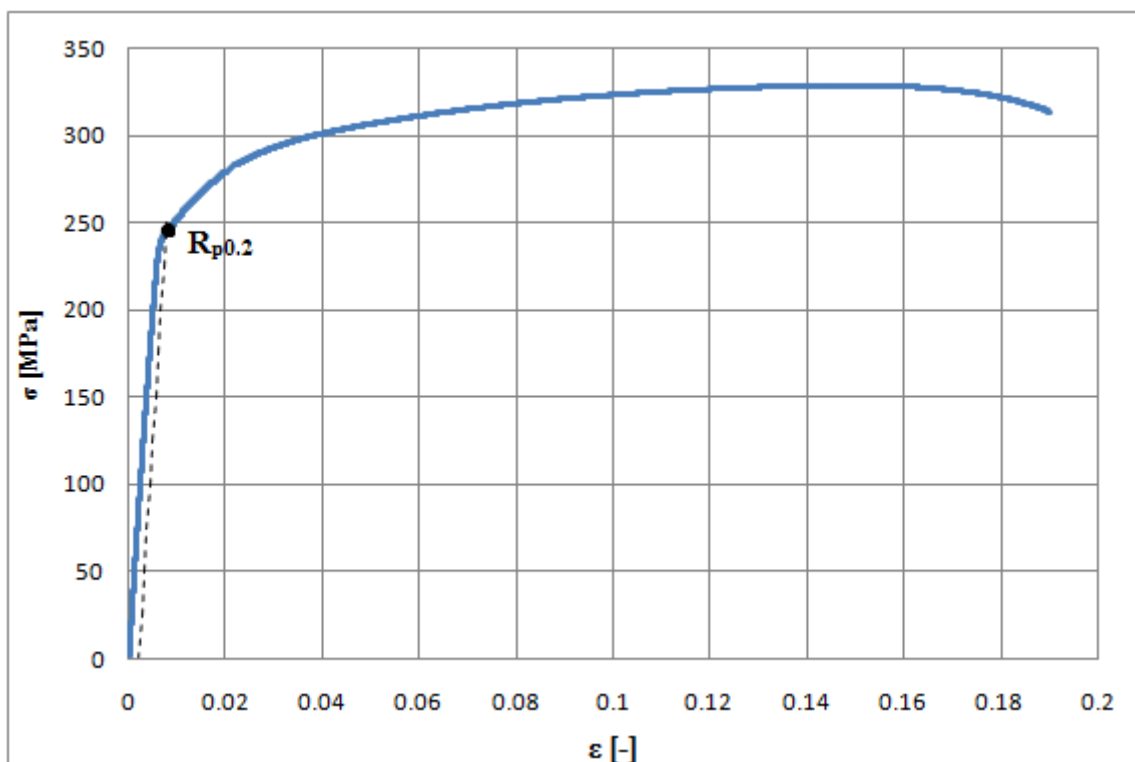
Vzorce pro výpočet aritmetického průměru \bar{x} , směrodatné odchylky s a variačního koeficientu v :

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

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

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (16)$$

Tahová zkouška byla provedena pro určení mechanických vlastností. Průměrné experimentální hodnoty mechanických vlastností slitiny AZ61 jsou mez pevnosti $R_m = 329$ MPa, smluvní mez kluzu $R_{p0.2} = 245$ MPa, tažnost $A = 17$ % a kontrakce $Z = 31$ %.



Obr. 6.7 - Tahový diagram pro vzorek č.1

Průměrné hodnoty naměřených mechanických charakteristik tvářené hořčikové slitiny AZ61 jsou velmi vysoké při velice dobrém plastickém chování, ve srovnání s hodnotami litých nebo pomocí squeeze casting připravených hořčikových slitin, uvedených v literatuře [22,23].

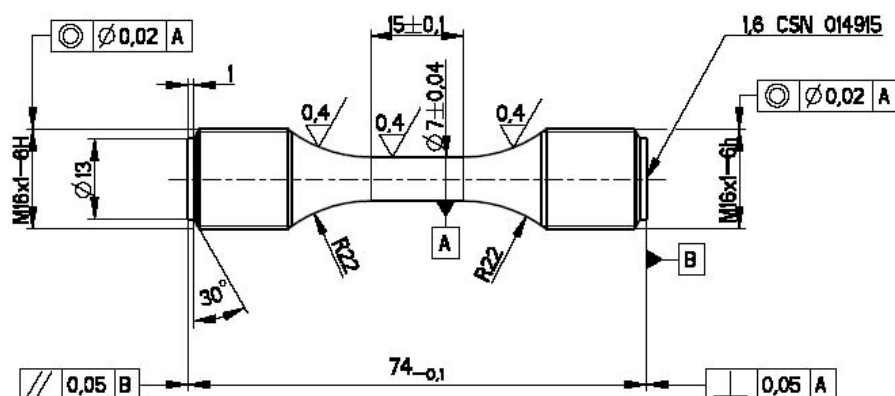
6.3 Cyklická plasticita

6.3.1 Podmínky testování

Vzorky pro zjištění cyklické plasticity a nízkocyklových únavových parametrů byly zatěžovány v elektrohydraulickém testovacím systému INSTRON 8801 řízeném počítačem v režimu řízení zátěžné síly při sinusovém průběhu zadané veličiny s asymetrií $P = 1$. Během zkoušek byla udržována konstantní průměrná rychlost změny napětí $\dot{\sigma} = 500$ MPa/s. Byla použita zkušební tělesa válcového tvaru s průměrem $d_0 = 7$ mm. Deformace byla měřena citlivým axiálním extenzometrem s měrnou délkou 12,5 mm. Tvar a rozměry zkušebních těles jsou uvedeny na obr. 5.7.

Řízení zkoušek nízkocyklové únavy a získávání experimentálních údajů v jejich průběhu bylo zajištěno programem Low Cycle Fatigue (LCF) dodaným firmou Instron. Pro vybrané počty cyklů tvořící přibližně geometrickou posloupnost byla do elektronické paměti zaznamenávána digitální forma hysterezních smyček pro další zpracování. Kromě toho řídicí program vyhodnocoval a ukládal do paměti amplitudu napětí, amplitudu celkové deformace, maximální a minimální hodnoty napětí a deformace v daném cyklu a efektivní modul pružnosti při odlehčení z tlaku a tahu. Amplituda plastické deformace ϵ_{ap} rovnající se poloviční šířce hysterezní smyčky při průchodu středním napětím ($\sigma_m = 0$ MPa) byla

vyhodnocena po ukončení zkoušky s využitím digitálních údajů o jednotlivých zaznamenaných hysterezních smyčkách.



Obr. 6.8 - Zkušební těleso pro nízkocyklové zatěžování

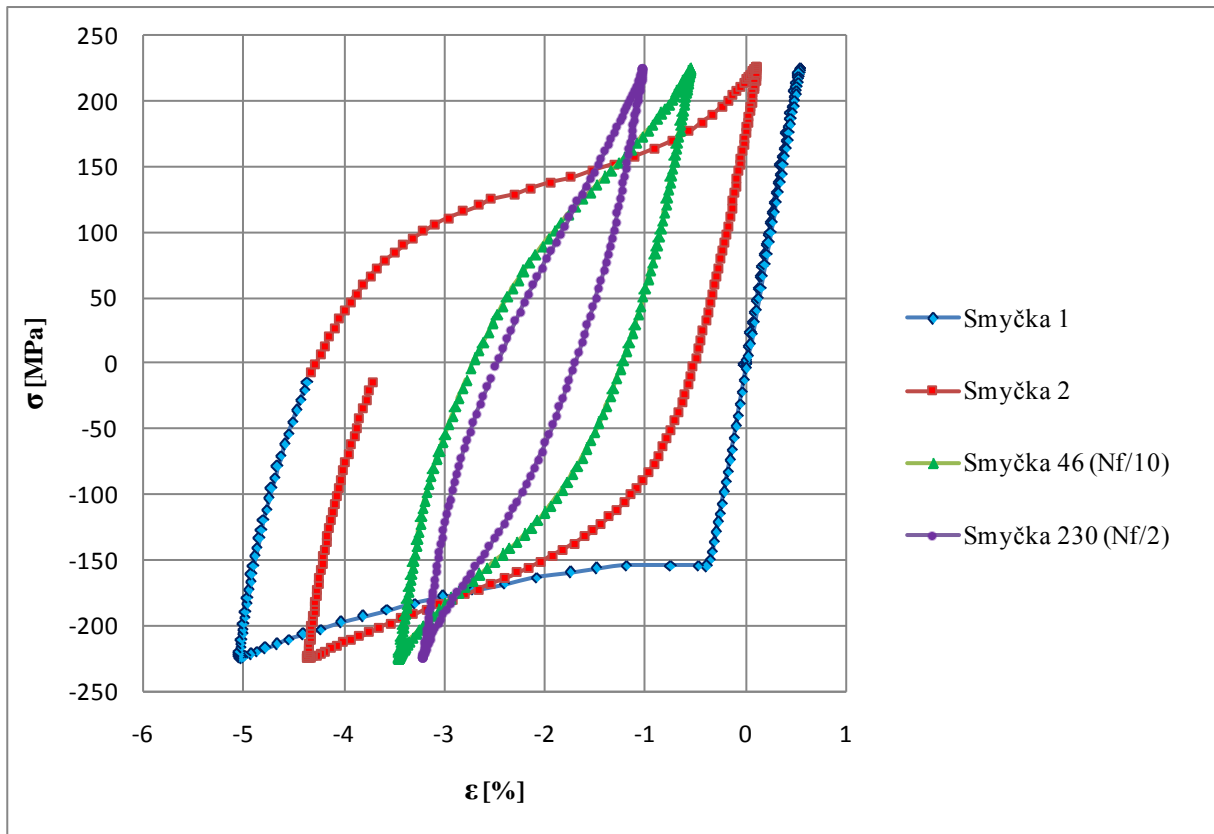
Experimenty na dané hladině zátěžného cyklu probíhaly až do úplné separace tělesa na dvě části. Kriterium pro určení počtu cyklů do lomu N_f , u použitého zátěžného cyklu u těles s trhlinou uvnitř měrné délky byla zvolena změna efektivního modulu E_{eff} o 3 %.

6.3.2 Hysterezní smyčky a Bauschingerův efekt

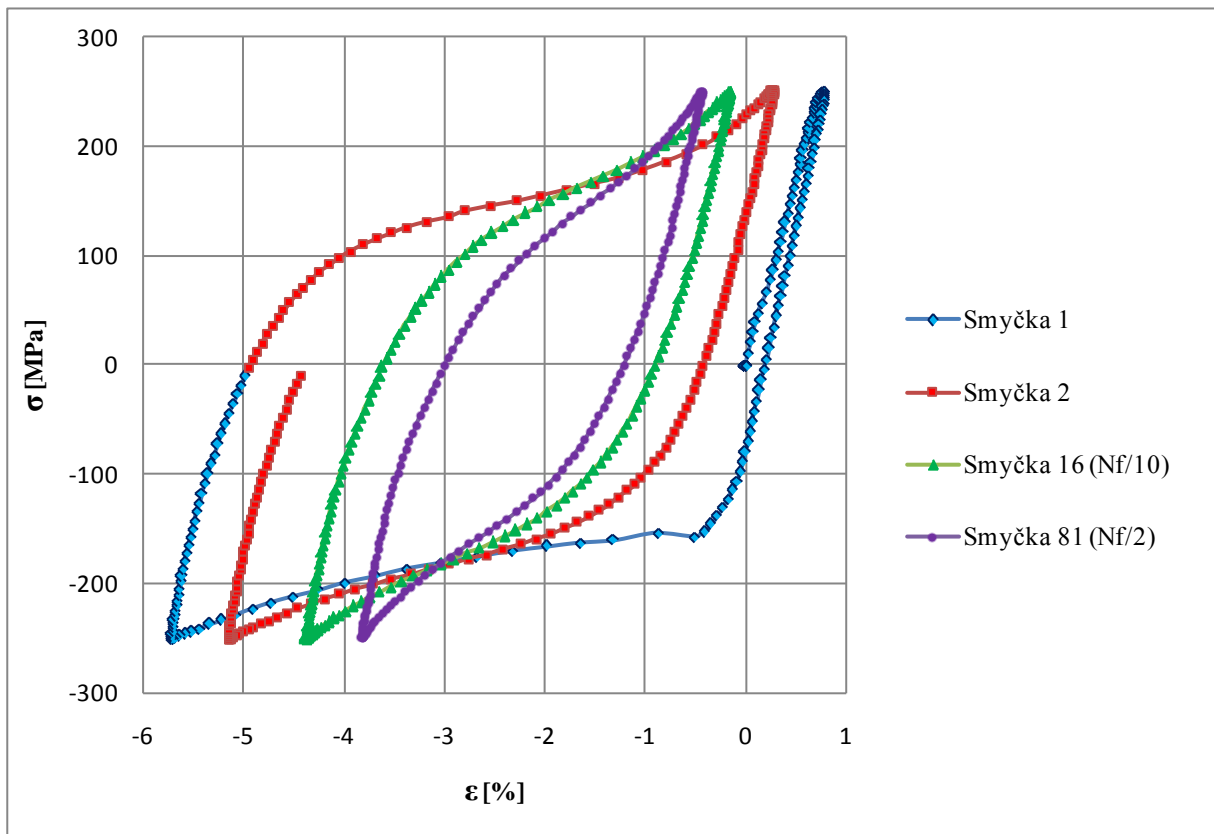
Na obrázcích 5.8, 5.9 a 5.10 jsou uvedeny hysterezní smyčky tvářené hořčikové slitiny AZ61. Smyčky byly zaznamenány pro amplitudy napětí 225, 250 a 275 MPa a následně na nich byl zkoumán vliv Bauschingerova efektu analýzou prvního zátěžného cyklu na dané hladině zatěžování. V tabulce 5.4 jsou uvedeny hodnoty Bauschingerova napěťového parametru, vypočítaného ze vztahu [16]:

$$\beta_{\sigma} = \frac{\sigma_p - \sigma_r}{\sigma_p} \quad (17)$$

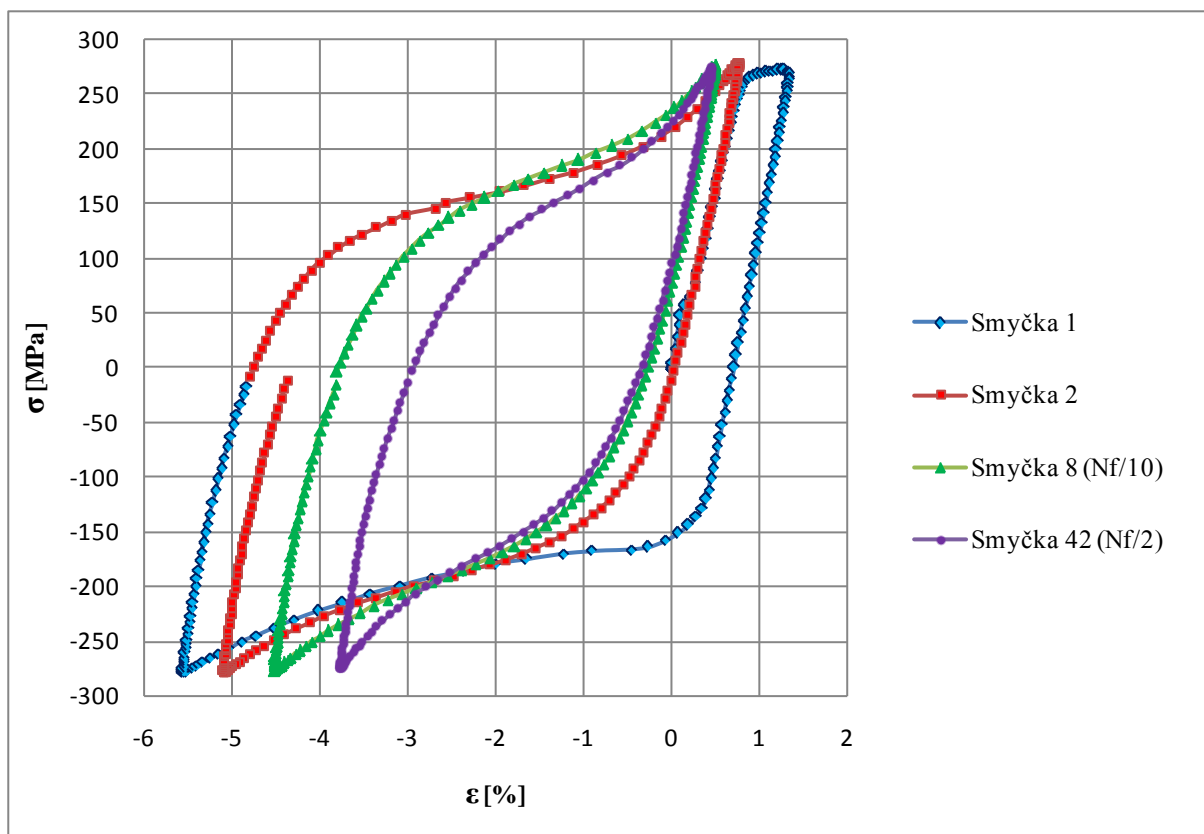
kde σ_p je maximální předpětí a σ_r je mez kluzu v opačném směru namáhání. Ze závislosti Bauschingerova parametru na maximálním předpětí (obrázek 5.11) je zřejmé, že vliv Bauschingerova efektu stoupá spolu se zvyšující se hodnotou předpětí, jak je uváděno v literatuře [14].



Obr. 6.9 - Hysterezní smyčky při amplitudě napětí 225 MPa



Obr. 6.10 - Hysterezní smyčky při amplitudě napětí 250 MPa

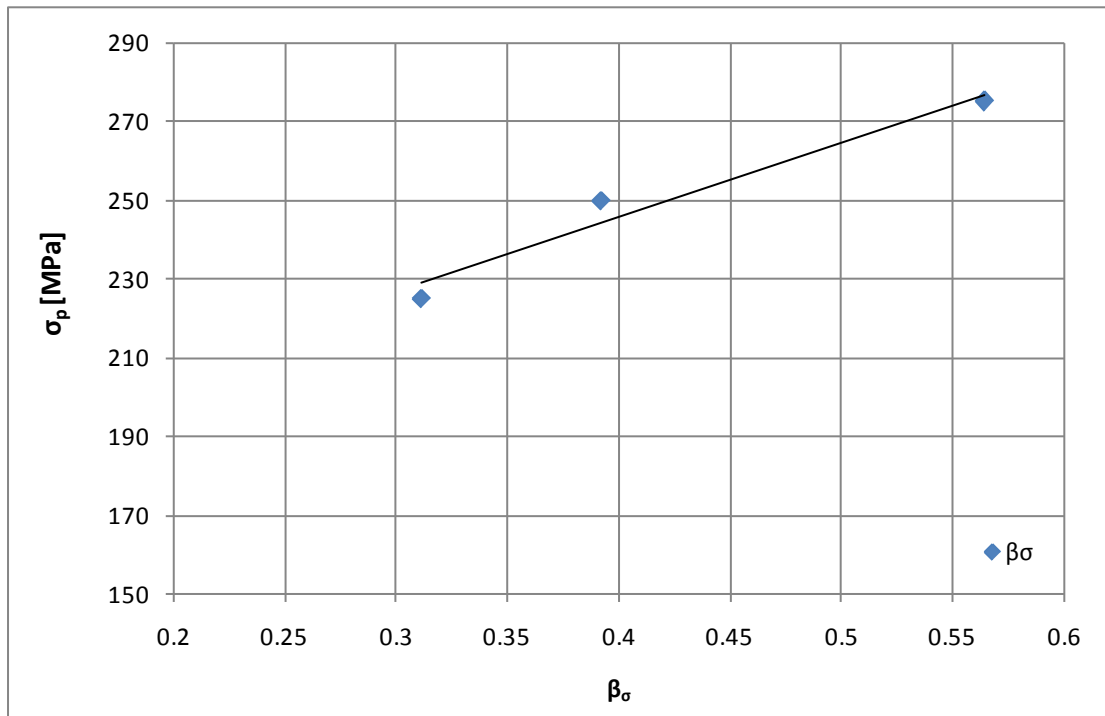


Obr. 6.11 - Hysterezní smyčky při amplitudě napětí 275 MPa

Prakticky totožné chování bylo zjištěno při zatěžování s řízenou amplitudou napětí u tvářené slitiny hořčíku AZ31 v práci [25]. Analogické chování se dá ověřit i při zatěžování s řízenou amplitudou celkové deformace, kde v tlakové části první hysterezní smyčky pod hodnotou σ_r nedochází opět k výraznému deformačnímu zpevnění [25]. Experimenty v tvrdém módu zatěžování nebyly součástí této práce.

6.4 - Hodnoty napětí, deformace a Bauschingerova deformačního parametru získané z hysterezních smyček

σ_p [MPa]	σ_r [MPa]	β_σ	ϵ_{max} [%]	ϵ_r [%]	ϵ_{min} [%]
225	155	0,31	0,54	-0,38	-5,03
250	152	0,39	0,79	-0,42	-5,71
275	120	0,56	1,34	0,39	-5,55

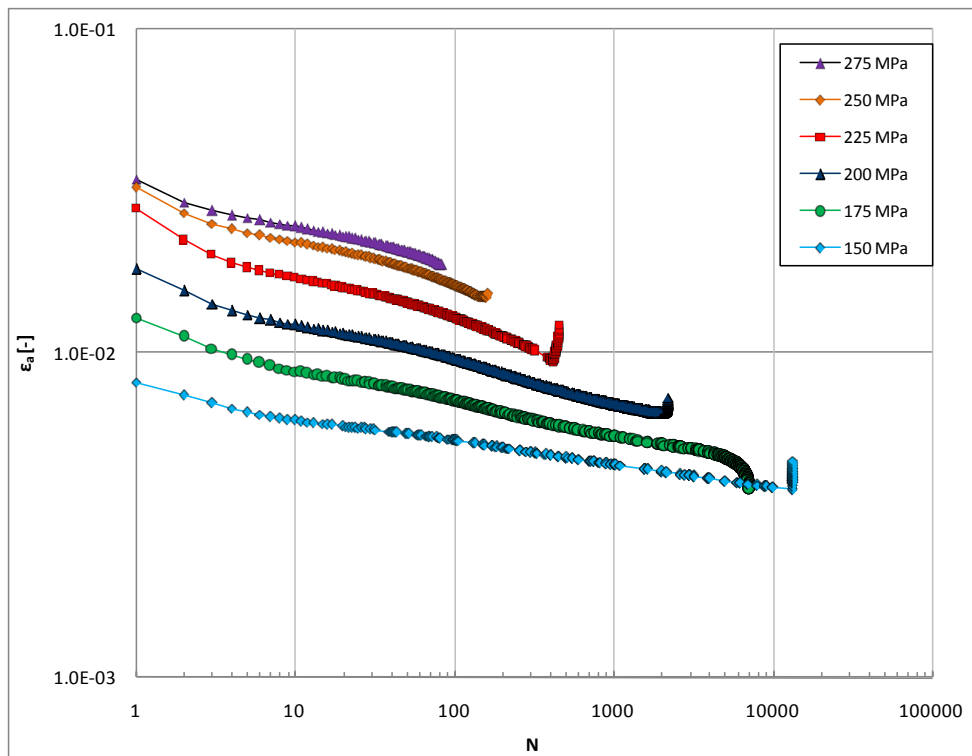


6.12 - Závislost Bauschingerova napět'ového parametru na maximálním předpětí

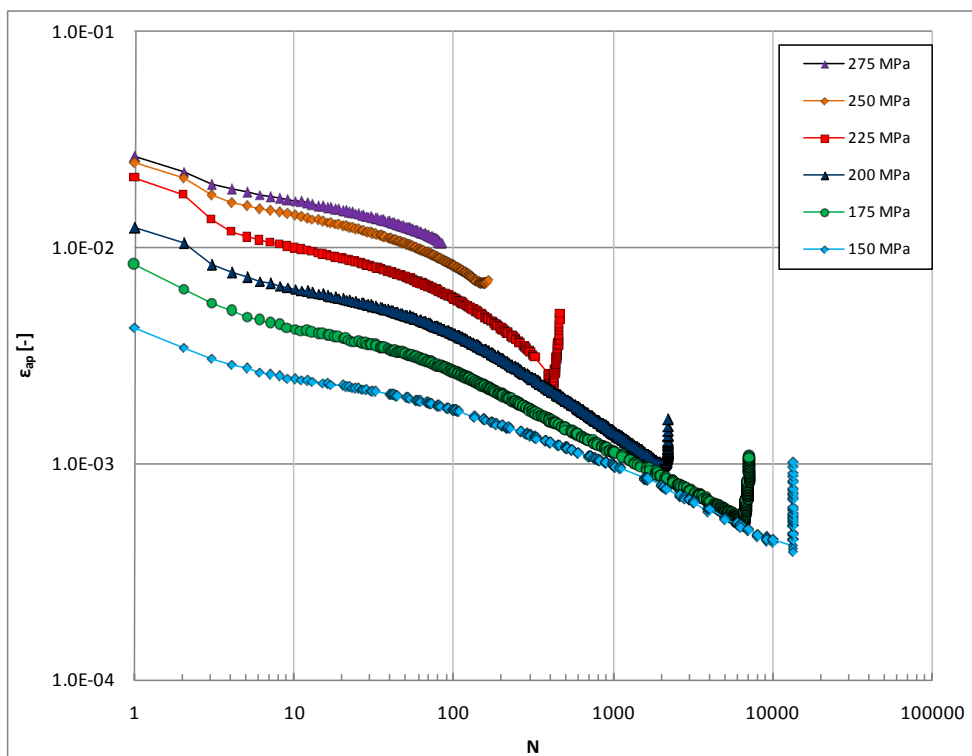
Jak je patrné z hysterezních smyček při amplitudě napětí 225 MPa, při startu zatěžného cyklu na nižších hladinách než je statická mez kluzu, tj 244,7 MPa, nedochází v tahové části diagramu prakticky k žádné plastické deformaci a odlehčení z maxima zatížení leží na prvním čtvrtcyklu hysterezní smyčky. Z důvodu přítomnosti Bauschingerova efektu dochází k odklonu do elasticko-plastické části v tlaku již při napětí -155 MPa, což je ve srovnání se statickou mezí kluzu pokles o 36,7 %. Při vyšších hladinách zatěžování dochází v tahové části k odklonu srovnatelnému s hodnotou $R_{p0,2}$. V reverzní části hysterezní smyčky dochází opět k výraznému odklonu od elastické závislosti s nízkou hodnotou deformačního zpevnění v tlaku. Tyto efekty vedou jak ke značné kompresní redukci měřené délky (maximální hodnota -5,71 %), tak ke značnému efektu neuzavření hysterezních smyček v prvních zatěžovacích cyklech.

6.3.3 Křivky cyklického zpevnění - změkčení

Na obrázcích 5.11 a 5.12 jsou uvedeny křivky cyklického zpevnění - změkčení pro tvářenou hořčíkovou slitinu AZ61. Na obrázku 5.11 jsou zobrazeny závislosti amplitudy deformace ε_a na počtu cyklů N a na obrázku 5.12 závislosti amplitudy plastické deformace na počtu cyklů N . Z uvedených křivek je patrné, že po většinu zkoušky docházelo k cyklickému zpevnění, čemuž odpovídá pokles amplitudy deformace s počtem zátěžných cyklů a to jak při napět'ové, tak i při plastické odezvě.



Obr. 6.13 - Křivky cyklického zpevnění - změkčení (napěťová odezva)



Obr. 6.14 - Křivky cyklického zpevnění - změkčení (plastická odezva)

6.3.4 Cyklická deformační křivka

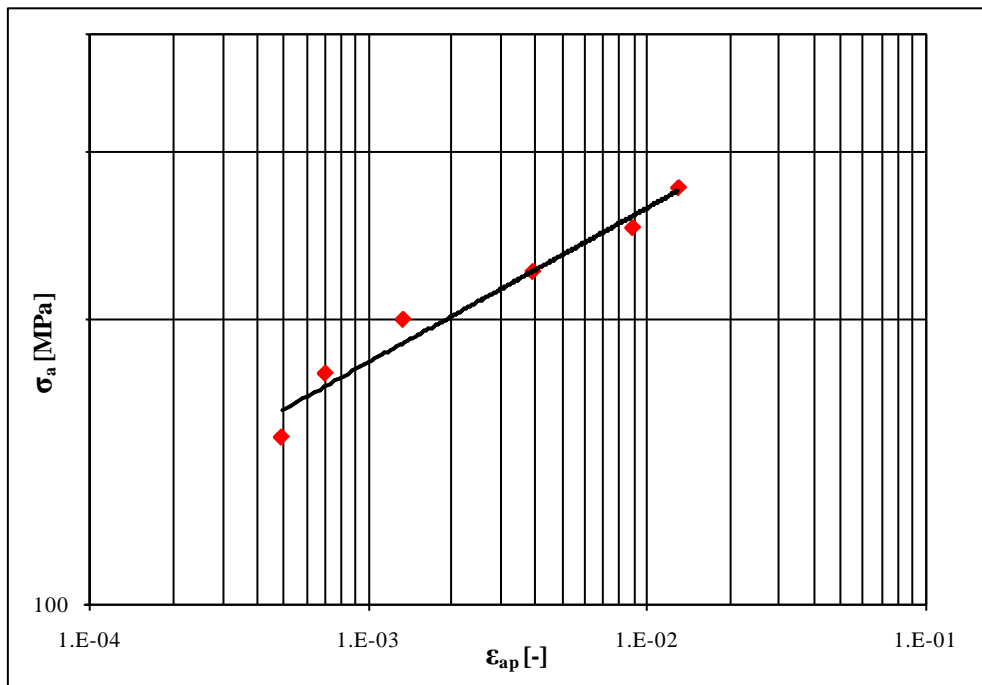
Cyklická deformační křivka je závislost smluvního napětí na amplitudě celkové poměrné deformace. Tato závislost pro extrudovanou hořčíkovou slitinu AZ61 je uvedena na obrázku 5.14. Experimentální body jsou proloženy regresní funkcí, díky které získáme hodnoty parametrů K' a n' použitím vztahu [11]:

$$\sigma_a = K' \cdot \varepsilon_{ap}^{n'} \quad (18)$$

kde K' je součinitel cyklického zpevnění a n' je exponent cyklického zpevnění. Pomocí rovnice [11]:

$$R'_{p0,2} = K' \cdot 0,002^{n'} \quad (19)$$

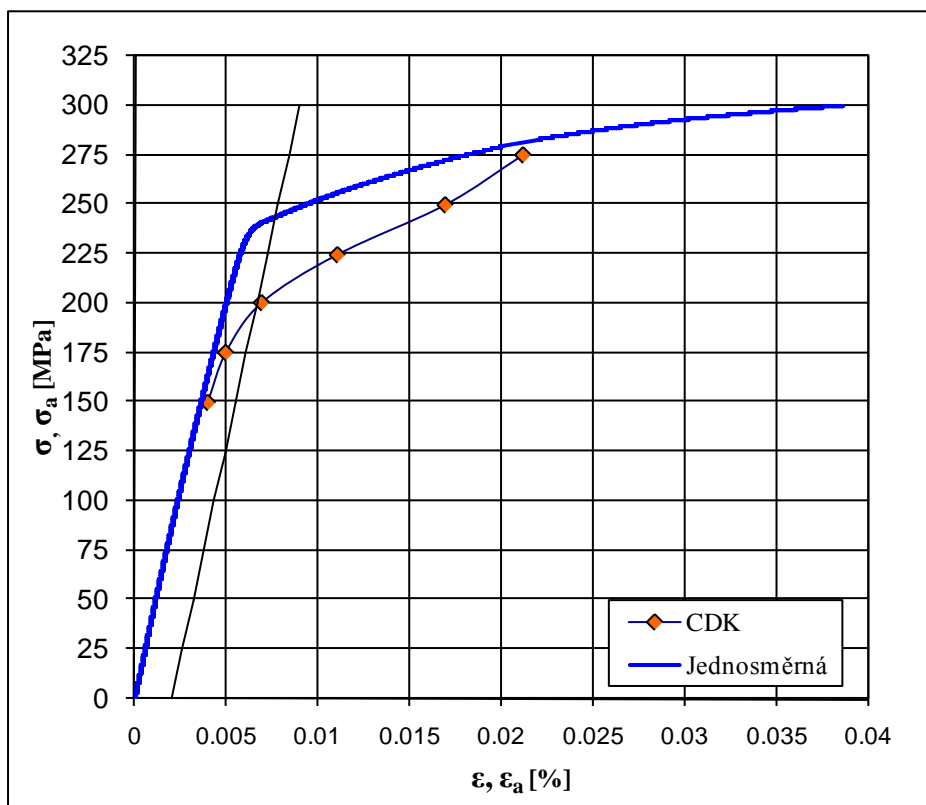
můžeme určit cyklickou mez kluzu $R'_{p0,2}$. Získané parametry regresních funkcí cyklické deformační křivky a vypočtená hodnota cyklické meze kluzu jsou uvedeny v tabulce 5.5.



6.15 - Cyklická deformační křivka v log-log souřadnicích

6.5 - Parametry cyklické deformační křivky v závislosti σ_a na ε_{ap}

K' [MPa]	n' [-]	$R'_{p0,2}$ [MPa]
558,5	0,164	201,5



6.16 - Srovnání cyklické deformační křivky a jednosměrné křivky

Srovnání, spolu se směrnicí protínající jednosměrnou a cyklickou deformační křivku v hodnotách mezí kluzu s plastickou deformací 0,2 procent v souřadnicích σ - ϵ je znázorněno na obrázku 6.16. Ze srovnání jednoznačně vyplývá, že pro nižší amplitudy zátěžného cyklu leží cyklická deformační křivka pod jednosměrnou, což ukazuje na cyklické změkčení. Pouze pro nejvyšší amplitudu zátěžného cyklu $\sigma_a=275$ MPa ukazuje na přibližnou cyklickou stabilitu. Tyto výsledky jsou v rozporu s experimentálními daty zjištěnými u velkého množství litých slitin [2,3,23,24] a u menšího množství slitin tvářených [25].

Cyklická deformační křivka je popsána mocninnou funkcí $\sigma_a=558,5(\epsilon_{ap})^{0,164}$. Součinitel cyklického zpevnění K' a exponent cyklického zpevnění n' tvářené hořčikové slitiny dosahují nižších hodnot, než je tomu u litých hořčikových slitin [23,24], což je dáno nižší hustotou dislokací a nižšími mezemi kluzu u litých materiálů.

Hodnoty cyklických mezí kluzu určených ze závislosti σ_a - ϵ_{ap} i σ_a - ϵ_a jsou prakticky totožné, což je v souladu s pracemi [23,24] a ukazuje na totožné průběhy křivek cyklického zpevnění - změkčení viz obrázky 6.13 a 6.14 a nízkou míru anelasticity hysterezních smyček v oblasti poloviny počtu cyklů do lomu.

Chování studovaného materiálu při cyklickém zatěžování lze předpovědět na základě poměru $R_m/R_{p0,2}$. Poměr u této slitiny je roven 1,34, což značí, že materiál by měl být cyklicky stabilní. Predikce cyklického zpevnění tedy není v souladu s naměřenými údaji.

7 Závěry

Na základě hodnocení mikrostruktury, mechanických vlastností a nízkocyklové únavy s vlivem Bauschingerova efektu tvářené hořčíkové slitiny AZ61 lze stanovit následující závěry:

- Z hodnocení mikrostruktury zkoumaného materiálu plyne, že není patrná výrazná směrovost struktury protlačované tyče. Střední velikost polyedrických zrn je zhruba 15 μm ve směru L a 20 μm ve směru T. Tento efekt je dán způsobem výroby a dynamickou rekrytalizací v průběhu protlačování.
- Struktura je tvořena tuhým roztokem δ . Po hranicích zrn je vyloučeno malé množství intermetalické fáze γ ($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$) ve srovnání s litou slitinou AZ61. Ve struktuře jsou také přítomny vměstky na bázi AlMn.
- Průměrné hodnoty naměřených mechanických charakteristik tvářené hořčíkové slitiny AZ61 jsou velmi vysoké při velice dobrém plastickém chování, ve srovnání s hodnotami litých nebo pomocí squeeze casting připravených hořčíkových slitin, uvedených v literatuře.
- Analýzou hysterezních smyček na počátku zatěžování byla zjištěna významná asymetrie v tahové a tlakové části smyček. Z důvodu přítomnosti Bauschingerova efektu dochází k odklonu do elasticko-plastické části v tlaku již při podstatně nižších napětích, ve srovnání s $R_{p0,2}$.
- V reverzní části hysterezní smyčky dochází k výraznému odklonu od elastické závislosti s nízkou hodnotou deformačního zpevnění v tlaku. Tyto efekty vedou jak ke značné kompresní redukci měřené délky (maximální hodnota -5,71 %), tak ke značnému efektu neuzavření hysterezních smyček v prvních zatěžovacích cyklech.
- Hodnoty Bauschingerova napětíového parametru β_σ při amplitudách napětí 225, 250 a 275 MPa jsou 0,31, 0,39 a 0,56. Ze závislosti Bauschingerova parametru na maximálním předpětí je zřejmé, že Bauschingerův napětíový parametr stoupá spolu se zvyšující se hodnotou předpětí.
- Z křivek cyklického zpevnění - změkčení jasně plyne, že tvářená hořčíková slitina AZ61 během zatěžování cyklicky zpevňuje v průběhu celé své životnosti na všech hladinách zátěžného cyklu.
- I přes totožné průběhy cyklického zpevnění na všech hladinách z důvodu počátečního rozvoje záporné plastické deformace, leží cyklická deformační křivka pod jednosměrnou. Tento efekt poukazuje na cyklické změkčení materiálu. Hodnota cyklické meze kluzu $R'_{p0,2}$ dosáhla hodnoty 201,5 MPa, což představuje pokles o 17,7 % vzhledem ke statické mezi kluzu (244,7 MPa).

8 Seznam použité literatury

- [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] 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.
- [3] 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.
- [4] GUPTA, M a Nai Mui Ling SHARON. *Magnesium, magnesium alloys, and magnesium composites*. New York: John Wiley, 2011, 257 s. ISBN 978-047-0494-172.
- [5] ČERMÁK, Jan, Martin HAWELKA a František TATÍČEK. *Současné trendy ve zpracování hořčíkových slitin tvářením*. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasne-trendy-ve-zpracovani-horcikovych-slitin-tvarenim.html>
- [6] LENFELD, Petr. *Technologie objemového tváření - protlačování*. [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/05.htm
- [7] LOSERTOVOVÁ, Monika. *Hořčík a jeho slitiny*. [online]. 2007[cit. 2012-04-10]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/637/soubory/KovyI_Mg.pdf
- [8] KOHOUT, Jan, Otakar BOKŮVKA a Stanislav VĚCHET. *Únavové vlastnosti tvárné litiny*. Žilina: Edičně středisko ŽU, 2002. ISBN 80-7100-973-3.
- [9] SONSINO, C a K DIETERICH. *Fatigue design with cast magnesium alloys under constant and variable amplitude loading*. *International Journal of Fatigue* [online]. 2006, roč. 28, č. 3, s. 183-193 [cit. 2012-04-14]. ISSN 01421123. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2005.06.043. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112305001611>
- [10] KLESNIL, M.; LUKÁŠ, P. *Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání*. 1. vydání. Praha: Academia, 1975. 224 s.
- [11] POLÁK, J. *Cyklická plasticita a nízkocyklová únavová odolnost kovových materiálů*. 1. vyd. Praha: Academia, 1986. 136 s.
- [12] POKLUDA, Jaroslav. *Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek: kovy, keramika, plasty*. Vyd. 1. Brno: PC-DIR, 1994, 385 s. ISBN 80-214-0575-9.
- [13] VELES, P. *Mechanickém vlastnosti a skúšanie kovov*. Alfa, Bratislava, 1985. 401 s.

- [14] JORDON, J.B., M.F. HORSTEMEYER, K. SOLANKI a Y. XUE. Damage and stress state influence on the Bauschinger effect in aluminum alloys. *Mechanics of Materials* [online]. 2007, roč. 39, č. 10, s. 920-931 [cit. 2012-04-15]. ISSN 01676636. DOI: 10.1016/j.mechmat.2007.03.004. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167663607000579>
- [15] BUCIUMEANU, M., L. PALAGHIAN, A.S. MIRANDA a F.S. SILVA. Fatigue life predictions including the Bauschinger effect. *International Journal of Fatigue* [online]. 2011, roč. 33, č. 2, s. 145-152 [cit. 2012-04-15]. ISSN 01421123. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2010.07.012. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142112310001660>
- [16] KOSTRYZHEV, Andrii Gennadiyovich. *Bauschinger effect in Nb and V microalloyed line pipe steels*. Birmingham, duben 2009. Dizertační práce. The University of Birmingham.
- [17] DENG, X, G PIOTROWSKI, J WILLIAMS a N CHAWLA. Effect of porosity and tension-compression asymmetry on the Bauschinger effect in porous sintered steels. *International Journal of Fatigue* [online]. 2005, roč. 27, 10-12, s. 1233-1243 [cit. 2012-04-16]. ISSN 01421123. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2005.06.041. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112305001544>
- [18] YAN, Jun. *Study of Bauschinger effect in various spring steels*. Toronto, 1998. Diplomová práce. University of Toronto.
- [19] KASSNER, M.E., P. GEANTIL, L.E. LEVINE a B.C. LARSON. Backstress, the Bauschinger Effect and Cyclic Deformation. *Materials Science Forum* [online]. 2009, 604-605, s. 39-51 [cit. 2012-04-13]. ISSN 1662-9752. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.604-605.39. Dostupné z: <http://www.scientific.net/MSF.604-605.39>
- [20] SKELTON, R.P., H.J. MAIER a H.-J. CHRIST. The Bauschinger effect, Masing model and the Ramberg-Osgood relation for cyclic deformation in metals. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 1997, roč. 238, č. 2, s. 377-390 [cit. 2012-04-14]. ISSN 09215093. DOI: 10.1016/S0921-5093(97)00465-6. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509397004656>
- [21] VUT v Brně. Ústav Materiálových Věd a Inženýrství [online]. 2011 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/PHMV/mg_tv_az61.php
- [22] SVOZIL, L. *Mechanicko-strukturní charakteristiky slitiny hořčíku AZ61*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 51 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Tomáš Podrábský, CSc.
- [23] PROVAZNÍKOVÁ, A. *Únavové vlastnosti hořčíkové slitiny AZ61*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Libor Pantělejev, Ph.D.

[24] ZAPLETAL, Josef, Aneta NĚMCOVÁ a Pavel GEJDOŠ. The study of low cyclic fatigue behaviour of AZ61 magnesium alloy. *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Mechanical Series*. 2012, roč. 56, č. 1.

[25] HASEGAWA, S, Y TSUCHIDA, H YANO a M MATSUI. Evaluation of low cycle fatigue life in AZ31 magnesium alloy. *International Journal of Fatigue* [online]. 2007, roč. 29, 9-11, s. 1839-1845 [cit. 2012-05-22]. ISSN 01421123. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2006.12.003. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112306003598>

9 Seznam použitých zkratk a symbolů

A	tažnost	[%]
ASTM	American Society for Testing Materials	
AZ	hořčíková slitina	
b	exponent únavové pevnosti	
c	exponent únavové tažnosti	
CDK	cyklická deformační křivka	
DIN	Deutsche Industrie-Norm	
dl/dN	rychlost šíření únavové trhliny	[m·cyklus ⁻¹]
d ₀	průměr zkušebního tělesa	[mm]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
EDS	energieově disperzní spektroskopie	
E _{eff}	efektivní modul	[MPa]
EN	European Standart	
E _p	energie vynaložená na předdeformaci	[J]
E _s	Bauschingerova energie	[J]
F _{lom}	lomová síla	[N]
F _{max}	maximální síla	[N]
K´	koeficient cyklického zpevnění	
K _a	amplituda součinitele intenzity napětí	
L ₀	měrná délka	[mm]
LFC	low cycle fatigue	
n´	exponent cyklického zpevnění	
N _c	počet cyklů odpovídající časované mezi únavy	
N _f	počet cyklů do lomu	
N _T	tranzitní počet cyklů	
P	parametr asymetrie cyklu	
R	parametr asymetrie cyklu	
REM	rastrovací elektronová mikroskopie	
R _m	mez pevnosti	[MPa]
R _{p0,2´}	cyklická mez kluzu	[MPa]
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu	[MPa]
s	směrodatná odchylka	
v	variační koeficient	
\bar{x}	aritmetický průměr	
Z	kontrakce	[%]
β _E	Bauschingerův energetický parametr	
β _ε	Bauschingerův deformační parametr	
β _σ	Bauschingerův napěťový parametr	
γ	intermetalická fáze	
δ	tuhý roztok	
Δε _p	šířka hysterezní smyčky	

ε_a	amplituda celkové deformace	
ε_{ae}	amplituda elastické deformace	
ε_{ap}	amplituda plastické deformace	
ε_f'	součinitel únavové tažnosti	
ε_{max}	maximální deformace	
ε_{min}	minimální deformace	
ε_p	plastická předdeformace	
ε_r	plastická deformace v reverzním směru	
σ_f'	koeficient únavové pevnosti	[MPa]
σ_a	amplituda napětí	[MPa]
σ_f	dopředné napětí	[MPa]
σ_h	maximální hodnota cyklického napětí	[MPa]
σ_m	střední napětí	[MPa]
σ_n	minimální hodnota cyklického napětí	[MPa]
σ_p	maximální předpětí	[MPa]
σ_r	mez kluzu v reverzním směru	[MPa]