



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

EXTRÉMNĚ NÍZKOCYKLOVÁ ÚNAVOVÁ ŽIVOTNOST HOŘČÍKOVÉ SLITINY

EXTREMELY LOW CYCLE FATIGUE LIFE OF MAGNESIUM ALLOY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MAREK NOVÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JOSEF ZAPLETAL, Ph.D.

BRNO 2019

Abstrakt

Bakalárska práca je zameraná na predpovedanie únavovej životnosti horčíkovej zliatiny AZ61 v oblasti veľmi malého počtu cyklov (menej ako 100) nazývanou oblasť extrémne nízkocyklovej únavy (ELCF). Životnosť predpovedaná Coffin-Mansonovým vzťahom je vyššia ako v skutočnosti a nezodpovedá experimentálne nameraným hodnotám. Hlavným problémom je odklon skutočnej krivky životnosti v oblasti ELCF od funkcie slúžiacej na predpoveď životnosti. Je treba nájsť regresnú funkciu, ktorá s pomocou dodatočných parametrov lepšie zodpovedá nameraným hodnotám. Práca sa venuje literárnej rešerši oblasti ELCF a modelom predpovede únavovej životnosti v danej oblasti. Ďalej v experimentálnej časti sa pracovalo s horčíkovou zliatinou AZ61 v základnom stave bez tepelného spracovania, určovali sa jej mechanické a únavové vlastnosti a mikroštruktúra. Namerané hodnoty únavovej životnosti v oblasti ELCF a LCF boli preložené regresnou funkciou podľa L. Xuea.

Summary

The goal of this bachelor's thesis is to predict the fatigue life of magnesium alloy AZ61 in the very low cycle count range (less than 100), which is also called extremely low fatigue (ELCF) range. Life prediction predicted by Manson-Coffin's law is higher than the experimental values show. The main problem is that the slope of the real life curve in the ELCF range is different than the slope of the predicted one. A new regression function with additional material parameters has to be found to match the experimentally measured values. The thesis deals with the literature search of the ELCF range and models of fatigue life prediction in the said range. Furthermore, in the experimental part of the thesis, magnesium alloy AZ61 without any heat treatment has been measured for mechanical and fatigue properties. Also, the microstructure of the alloy was observed. Measured values of fatigue life in the ELCF and LCF range were fitted by a regression function proposed by L. Xue.

Klíčová slova

ELCF, Extrémne nízkocyklová únava, horčíková zliatina AZ61, únavová životnosť, regresné funkcie, Hatanaka, Xue

Keywords

ELCF, Extremely low-cycle fatigue, magnesium alloy AZ61, fatigue life, regression function, Hatanaka, Xue

NOVÁK, M. *Extrémně nízkocyklová únavová životnost hořčíkové slitiny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 60 s. Vedoucí Ing. Josef Zapletal, Ph.D.

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav materiálových věd a inženýrství
Student:	Marek Novák
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Materiálové inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Josef Zapletal, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

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:

Extrémně nízkocyklová únavová životnost hořčikové slitiny

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro konstrukci křivek životnosti v celé oblasti počtů cyklů do lomu pomocí nelineárních čtyřparametrických regresních funkcí se používá hodnoty meze pevnosti R_m jako hodnoty amplitudy napětí v prvním půlcyklu. Za touto hodnotou bývá většinou oblast experimentálních dat nepokryta až do počátku nízkocyklové oblasti. Výsledkem může být významné zkreslení délky a tvaru kvazistatické oblasti při regresní analýze. Cílem této práce je zachytit chování konstrukčních materiálu v této oblasti s určením daných parametrů.

Cíle bakalářské práce:

1. Stanovení základních strukturálních a mechanických parametrů zkoumané slitiny.
2. Stanovení extrémně nízkých únavových životností pomocí servohydraulického testovacího systému Instron 8801 a jejich následná interpretace.
3. Posouzení vlivu naměřených dat na změny regresních křivek popisující celou oblast únavové životnosti.

Seznam doporučené literatury:

KURODA, M. Extremely low cycle fatigue life prediction based on a new cumulative fatigue damage model, International Journal of Fatigue 24, 2001.

XUE, L. A unified expression for low cycle fatigue and extremely low cycle fatigue and its implication for monotonic loading, International Journal of Fatigue 30, 2008.

TATEISHI, K., HANJI, T., MINAMI, K. A prediction model for extremely low cycle fatigue strength of structural steel. Int J Fatigue 27, 2007.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Prehlasujem, že táto bakalárska práca je mojim pôvodným autorským dielom, ktoré som vypracoval samostatne. Všetky zdroje, pramene a literatúru, ktoré som pri vypracovávaní použil alebo z nich čerpal, sú v práci citované s uvedením úplného odkazu na príslušný zdroj.

Marek Novák

Chcel by som sa poďakovať svojmu vedúcemu práce Ing. Josefovi Zapletalovi Ph.D. za poskytnuté materiály, cenné rady, pomoc a ochotu pri písaní bakalárskej práce a prof. RNDr. Janovi Kohoutovi , CSc. za jeho materiály ohľadom extrémne nízkocyklovej únavy.

Marek Novák

Obsah

1	Úvod	3
2	Únava materiálu	4
2.1	Štádium zmien mechanických vlastností	6
2.1.1	Cyklické spevnenie a zmäkčenie	6
2.1.2	Hysterézna slučka	7
2.1.3	Cyklická deformačná krivka	9
2.1.4	Krivky cyklického spevnenia a zmäkčenia	10
2.2	Štádium nukleácie trhlín	11
2.2.1	Miesta nukleácie únavových mikrotrhlín	11
2.2.2	Mechanizmus nukleácie únavových mikrotrhlín	12
2.3	Štádium šírenia únavových trhlín	14
2.3.1	Mechanizmus šírenia únavových trhlín	14
2.4	Krivky životnosti	17
2.4.1	Wöhlerova krivka životnosti	17
2.4.2	Oblasť nízkokycklovej únavy	18
2.4.3	Oblasť vysokocycklovej a gigacycklovej únavy	20
3	Extrémne nízkokycklová únava	23
3.1	Predpoveď životnosti v celej oblasti nízkokycklovej únavy	23
3.1.1	Model predpovede podľa L. Xue	24
3.1.2	Model predpovede životnosti podľa Kenjiho Hatanaku	32
3.1.3	Model predpovede životnosti podľa Masatoshiho Kurodu	32
3.1.4	Model predpovede životnosti podľa Tateishiho a kolektívu	34
3.2	Dopad extrémne nízkokycklovej únavy v praxi	36
4	Ciele práce	39

5 Stanovenie základných štruktúrnych a mechanických parametrov zliatiny AZ61	40
5.1 Mikroštruktúra zliatiny AZ61	41
5.2 Mechanické vlastnosti zliatiny AZ61	42
6 Stanovenie extrémne nízkych únavových životností	44
6.1 Hysterézne slučky	45
6.2 Krivky cyklického spevnenia/zmäkčenia	46
7 Predpoveď únavovej životnosti zliatiny pomocou parametrických regresných funkcií	48
7.1 Únavová životnosť zliatiny v oblasti ELCF a LCF	48
7.2 Coffin-Mansonova krivka	50
7.3 Predpoveď ELCF životnosti pomocou dvojparametrickej regresnej funkcie podľa Xue-a	51
8 Závery práce	53
9 Zoznam použitých skratiek a symbolov	57

Kapitola 1

Úvod

Konštrukcie veľkých rozmerov, budovy, kolosálne ťažobné stroje a súčasti, sú v určitých prípadoch podrobené vibráciám, ktoré vyvolávajú zaťažovanie s malým počtom cyklov. V takto namáhanom materiáli dochádza k akumulácii poškodenia, a to má často-krát za následok stratu funkčnosti a v najhorších prípadoch zlyhanie celého systému. Z hľadiska bezpečnosti ide o veľký problém, pretože doterajšie predstavy o únavovej životnosti materiálov v oblasti s veľmi malým počtom cyklov boli bohužiaľ vyššie ako je tomu v skutočnosti. Túto oblasť a všeobecne únavu materiálu pri počte cyklov menej ako 10^4 nazývame extrémne nízkokycklová únava (ELCF). Pri cyklickom namáhaní v oblasti ELCF u húževnatých kovov dochádza často ku zlyhaniu už pri veľmi malom počte cyklov. Pre výpočet životnosti v oblasti nízkokycklovej únavy sa používa Manson-Coffinov vzťah, ktorý nám však predpovedá lepšiu životnosť ako je to v skutočnosti. Pre predpovedanie životnosti pri extrémne nízkokycklovej záťaži je treba navrhnúť novú regresnú funkciu, ktorá pomocou experimentov a ďalších materiálových parametrov lepšie vykreslí krivky životnosti. Prvá práca, ktorá sa zaoberá dôkladnejšou predpovedou životnosti v oblasti ELCF, bola napísaná K. Hatanakom a T. Fujimitsuom a publikovaná v japonskej publikácii Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A v roku 1984. Táto práca dodnes slúži ako základ pre viacero modelov predpovede životnosti v oblasti ELCF. Novo navrhnuté regresné funkcie sú však stále iba v hypotetickej fázy. Pre nájdenie vhodnej regresnej funkcie je treba veľa ďalších experimentálnych meraní, aby predpoveď únavovej životnosti smerovala k vedeckej publikácii.

Kapitola 2

Únava materiálu

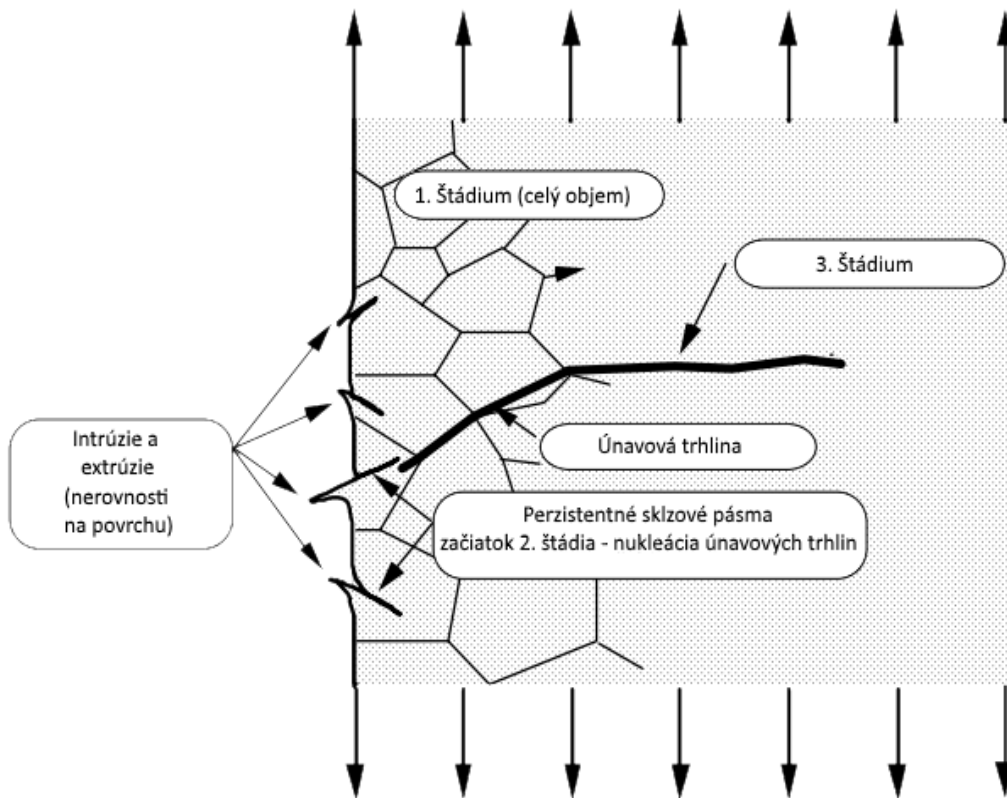
Pojem únava materiálu vznikol na začiatku 19. storočia. Kovy a materiály podrobené opakovanému zaťažovaniu zlyhávali pri napätiach oveľa nižších ako ich medza pevnosti. Prvý zdokumentovaný prípad poškodenia v dôsledku únavy materiálu bol pozorovaný v roku 1829 nemeckým správcom bane Wilhelmom Albertom. Išlo o zlyhanie zdvižných reťazí pri malom cyklickom zaťažení. Prvé štúdiá únavy začali v 60. rokoch 19. storočia, jednalo sa hlavne o vyšetrovanie príčin lomov na železniciach. Posledných 30 rokov sa výskum únavy materiálu venuje hlavne gigacyklovej a extrémne nízkocyklovej únave.

Únava materiálu je proces zmien materiálu a jeho vlastností vyvolaný cyklickým zaťažovaním.[2] Postupné rozrušovanie kovu pri premenlivom zaťažení má nevratný (kumulatívny) charakter, ktorý sa v závere procesu prejaví rastom makroskopickej trhliny a lomom.[6] K lomu súčasti môže dôjsť už pri napätiach nižších ako je medza v ťahu a často-krát aj nižších ako medza klzu.

Existencia únavy kovov je podmienená a determinovaná cyklickou plastickeou deformáciou. Napríklad amplitúda cyklickej plastickej deformácie na medzi únavy (u hladkých vzoriek) je bez ohľadu na typ materiálu 10^{-5} ; jednosmerná, neopakovaná deformácia tejto veľkosti nevedie k žiadnym závažnejším zmenám v štruktúre materiálu ani v jeho vlastnostiach. Iba mnohonásobné opakovanie plastickej deformácie, aj keď je tak malé, že z hľadiska bežného poňatia ide o elastické zaťažovanie, vedie ku kumulatívne mu poškodeniu, končiac únavovým lomom.[3]

Na základe typov nevratných zmien spôsobených cyklickou plastickou deformáciou môžeme celý únavový proces rozdeliť na tri časovo nasledujúce a čiastočne sa prekrývajúce štádiá:[6]

1. Štádium zmien mechanických vlastností
2. Štádium nukleácie trhlín
3. Štádium šírenia únavových trhlín



Obr. 2.1: Štádiá únavového procesu (upravené)[19]

2.1 Štádium zmien mechanických vlastností

Štádium zmien mechanických vlastností je determinované zmenami v celom objeme zaťažovaného kovu. Jedná sa o zmeny v mikroštruktúre materiálu (hustota a konfigurácia mriežkových porúch), ktorá má vplyv na mechanické vlastnosti.[3]

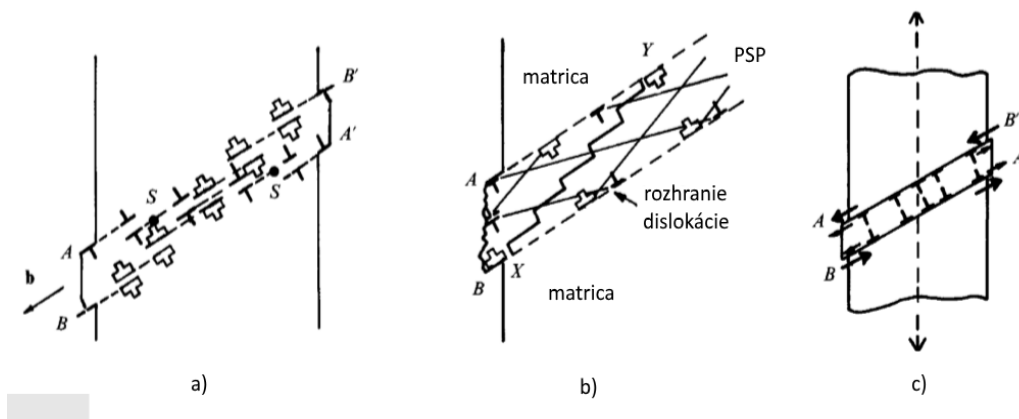
Súčasti vyrobené z každého materiálu majú v sebe množstvo mikroskopických defektov (dutiny, inklúzie, mikrotrhliny, atď.) Po sérii záťažových cyklov sa tieto defekty javia ako koncentrátoři napätia a napomáhajú nukleácii únavových trhlín[4].

2.1.1 Cyklické spevnenie a zmäkčenie

Pri cyklickom zaťažovaní kovov a zliatin prichádza ku zmenám v mikroštruktúre materiálu a ku zmenám ich mechanických a fyzikálnych vlastností. Zmeny sú najvýraznejšie na začiatku zaťažovania, s rastúcim počtom cyklov klesá ich intenzita a po pomerne malom počte cyklov (v porovnaní s celkovou životnosťou), sa zmeny zastavia úplne alebo zostanú nevýrazné.[3]

Zo zmienených zmien sú najzávažnejšie zmeny mechanických vlastností, hlavne charakteristiky popisujúce odpor materiálu voči deformácii vyvolanej vonkajšími silami. Odpor materiálu môže počas únavového procesu rásť alebo klesať, závisí to na druhu materiálu, na podmienkach zaťažovania a na teplote. Hovoríme tak o cyklickom spevnení a zmäkčovaní. [3]

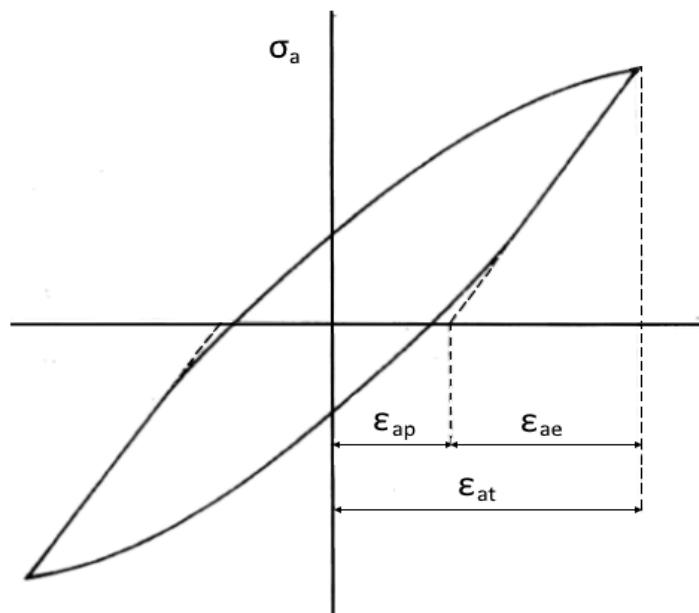
Ku koncu prvého štádia únavového procesu dochádza k lokalizácii cyklickej plastickej deformácie do pásov, ktoré nazývame perzistentné sklzové pásy (PSP). V dôsledku vysokej amplitúdy plastickej deformácie v PSP vzhľadom k okolitej matici vznikajú na povrchu materiálu, kde PSP vychádzajú na povrch, perzistentné sklzové stopy (PSS). PSS sú charakterizované výrazným povrchovým reliéfom, ktorý ma obvykle tvar intrúzií a extrúzií. S rastúcim počtom cyklov sa intrúzie a extrúzie zväčšujú. Intrúzie sú výrazným prirodzeným koncentrátorom napätia a v ich koreni v priebehu ďalšej cyklickej deformácie dochádza k nukleácii únavových trhlín. Hustota nukleovaných trhlín rastie s aplikovanou plastickeou deformáciou.[6]



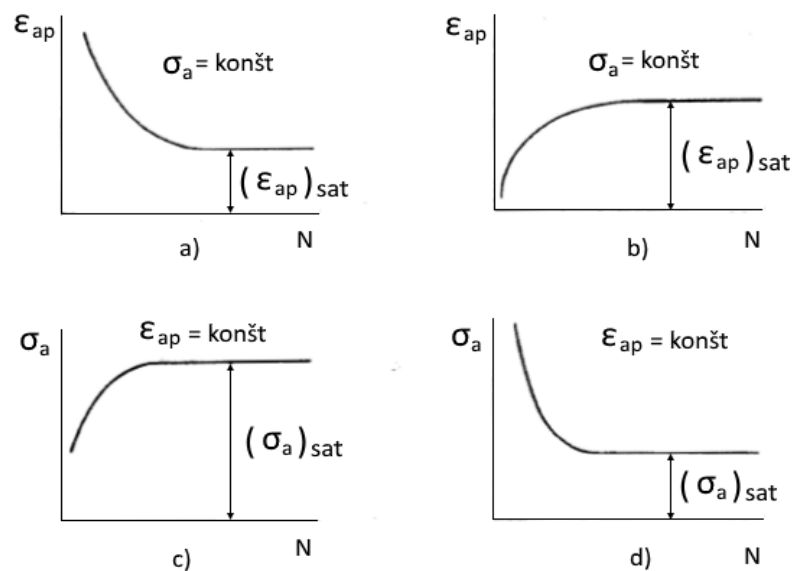
Obr. 2.2: a) Mechanizmus tvorby PSS, b) Perzistentný sklzový pás, c) Kombinované účinky aplikovaných a napätí vnútorných napätí. Väčšie šípky naznačujú odpudzujúce sily pri medzifázových dislokáciách a menšie šípky označujú sily spôsobené aplikovaným zaťažením. (upravené)[2]

2.1.2 Hysterézna slučka

Najlepší a najadekvátnejší spôsob detekcie zmien mechanických vlastností materiálu je priame meranie parametrov hysterézných slučiek za chodu testovacieho stroja. Na obrázku 2.3 je schematicky zakreslená hysterézna slučka. σ_a je amplitúda napätia, ϵ_{at} je amplitúda celkovej deformácie, ϵ_{ap} je amplitúda plastickej deformácie a ϵ_{ae} je amplitúda elastickej deformácie. Moderné elektronicky riadené únavové stroje väčšinou umožňujú udržiavať v priebehu zaťažovania buď konštantnú amplitúdu napätia alebo amplitúdu celkovej deformácie alebo dokonca amplitúdu plastickej deformácie v prípade zaťažovania ťah-tlak a konštantnej hodnoty príslušných momentov a výchyliek v prípade iných spôsobov zaťažovania. Pri cyklickom zaťažovaní s konštantnou amplitúdou napätia sa môže meniť iba amplitúda deformácie. Ak amplitúda deformácie s počtom cyklov klesá, ide o prípad cyklického spevnenia (Obrázok 2.4a) Cyklické zmäkčenie sa naopak prejavuje rastom amplitúdy deformácie (Obrázok 2.4b). Pre režim zaťažovania s konštantnou amplitúdou deformácie (celkovej alebo plastickej) sa mení iba amplitúda napätia, kde sú definície spevnenia a zmäkčenia ešte názornejšie. Cyklické spevnenie sa prejavuje rastom amplitúdy napätia - rastie napätie potrebné k dosiahnutiu rovnakej deformácie (Obrázok 2.4c), cyklické zmäkčenie je naopak charakterizované poklesom amplitúdy napätia - klesá napätie potrebné k dosiahnutiu rovnakej deformácie (Obrázok 2.4d). [3]



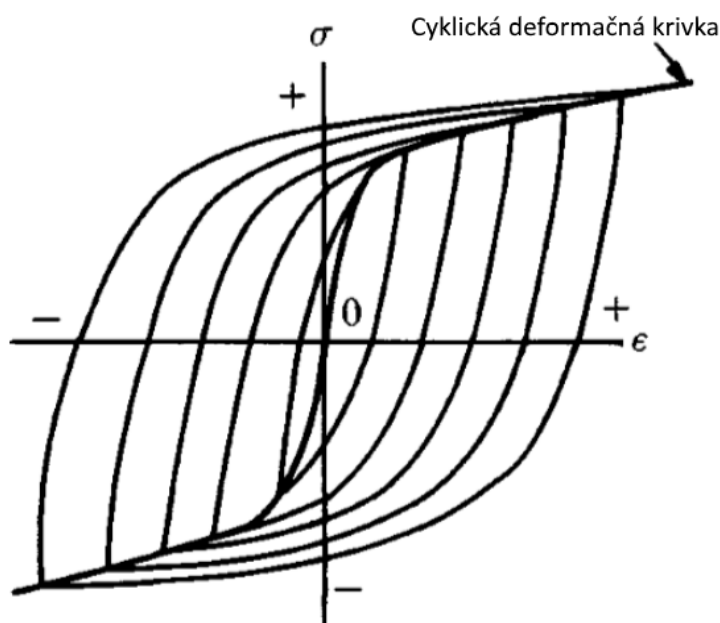
Obr. 2.3: Schéma hysteréznej slučky (upravené).[3]



Obr. 2.4: Definícia cyklického spevnenia a zmäkčenia pre rôzne režimy zaťažovania (upravené).[3]

2.1.3 Cyklická deformačná krivka

Po skončení cyklického spevnenia alebo zmäkčenia sa mechanické vlastnosti v priebehu ďalšieho zaťažovania spravidla ďalej nemenia. Amplitúda napätia aj amplitúda deformácie dosiahne svojich saturovaných hodnôt, vytvorí sa saturovaná a stabilná hysterézná slučka. Rôzne amplitúdy zaťažovania majú rôzne stabilizované hysterézne slučky. Preložíme vrcholovými bodmi stabilných hysteréznych slučiek krivku (Obrázok 2.5), dostaneme vzťah medzi amplitúdou napätia a amplitúdou plastickej deformácie v saturovanom, ustálenom stave. Táto krivka je všeobecne označovaná ako cyklická krivka napätia alebo deformácie.[3]



Obr. 2.5: Definícia cyklickej krivky napätia-deformácie. (upravené)[2]

Priebeh cyklickej deformačnej krivky je možné aproximovať mocninnou závislosťou amplitúdy napätia σ_a na amplitúde plastickej deformácie ϵ_{ap} stanovenej v polovici životnosti vzorky v tvare:

$$\sigma_a = K' \cdot (\epsilon_{ap})^{n'}, \quad (2.1)$$

kde K' je koeficient cyklického spevnenia a n' je exponent cyklického spevnenia.[3]

2.1.4 Krivky cyklického spevnenia a zmäkčenia

Krivky cyklického spevnenia-zmäkčenia sú závislosti amplitúdy plastickej deformácie na počte cyklov v log-log súradniciach pre rôzne hodnoty napätia. Amplitúdu plastickej deformácie môžeme získať zmeraním šírky hysteréznej slučky v nulovej hodnote napätia. Amplitúda plastickej deformácie je rovná polovici tejto šírky. Pre vytvorenie kriviek je nutné zmerať dostatočný počet príslušných hysteréznych slučiek.

Krivky nám slúžia k hodnoteniu reakcie materiálu na cyklické zaťažovanie. Vynesení hodnôt do grafu je závislosť, podľa ktorej dokážeme určiť, či materiál cyklicky spevňuje alebo zmäkčuje. Ak sa amplitúda plastickej deformácie znižuje, materiál cyklicky spevňuje a ak sa zväčšuje tak sa materiál zmäkčuje.

Napriek tomu, že sa v priebehu cyklickej deformácie tvar hysteréznej slučky mení, nie sú zmeny jej tvaru výrazné a za najdôležitejšie zmeny je treba považovať zmeny amplitúdy napätia alebo zmeny amplitúdy deformácie, prípadne plastickej deformácie. Reakciou materiálu na cyklické zaťažovanie charakterizujeme krivkami cyklického spevnenia a zmäkčenia.

Pri tvrdom zaťažovaní s konštantnými hodnotami amplitúdy celkovej alebo plastickej deformácie sú to závislosti amplitúdy deformácie alebo plastickej deformácie na počet cyklov. Pri mäkkom zaťažovaní s konštantnými amplitúdami sú to závislosti amplitúdy deformácie alebo plastickej deformácie na počet cyklov. Cyklické zmäkčenie je vzhľadom na prudké zmeny amplitúdy plastickej deformácie závislé na amplitúde napätia oveľa výraznejšie.[5]

2.2 Štádium nukleácie trhlín

Štádium nukleácie trhlín sa týka iba malej časti z celkového objemu, a to povrchových vrstiev. Spoločným menovateľom všetkých typov nukleácie v povrchových vrstvách je koncentrácia cyklickej plastickej deformácie, ktorá súvisí s koncentráciou napätia. Nukleácia trhlín je viditeľnejšia v prípade tvarovaných súčastí s makroskopickými koncentrátormi napätia (s vrubmi).

Okrem makroskopických dôvodov zvýšenia hladiny napätia na povrchu prispievajú ešte mikroskopické koncentrátoary, ktoré sa uplatňujú aj za podmienok ideálneho homogénneho zaťažovania. Hladina napätia na povrchu je citlivá na povrchovú topografiu. Povrch materiálu nie je nikdy ideálne rovný. V priebehu plastickej deformácie vychádzajú na voľný povrch dislokácie a vytvárajú tak povrchový reliéf. Takže aj v prípade pôvodne ideálne rovného povrchu sa vytvoria v priebehu zaťažovania povrchové nerovnosti, ktoré tiež pôsobia ako lokalizované koncentrátoary napätia.[3]

2.2.1 Miesta nukleácie únavových mikrotrhlín

Veľké množstvo experimentov preukázalo, že k nukleácii trhlín u homogénnych materiálov dochádza vždy na voľnom povrchu. Jediná výnimka je kontaktná únava, kde mikrotrhliny vznikajú v miestach maximálnej zmeny šmykového napätia pod povrchom. Priame metódy pozorovania povrchu ukázali, že sú v podstate 3 typy nukleačných miest:[3]

1. Únavové sklzové pásma
2. Hranice zrn
3. Rozhrania medzi inklúziami a matricou

Najčastejším typom sú nukleačné miesta na únavových sklzových pásmach, na hraniciach zrn trhliny vznikajú v prípade vysokoamplitúdovej únavy za zvýšených teplôt a rozhraní hlavne u viacfázových materiálov s tvrdými inklúziami s veľkosťou aspoň 1 mikrón.[3]

2.2.2 Mechanizmus nukleácie únavových mikrotrhlín

Nukleácia trhlín je nevratný proces, ktorý predchádzajú nevratné dislokačné procesy v kritickom objeme. Nutnými podmienkami pre nukleáciu mikrotrhlín sú vysoko lokalizovaná plastická deformácia v koreni intrúzie a vhodné dislokačné usporiadanie pozdĺž povrchových intrúzií.[6]

Pre nukleáciu mikrotrhlín bolo navrhnuté veľké množstvo modelov. Podľa experimentálnych výsledkov sa môžu tieto mechanizmy uplatňovať iba v nukleačných miestach. Jednou z najobtiažnejších otázok je, či existuje zreteľný rozdiel medzi ostrou intrúziou a mikrotrhlinou. Preto ich niektoré z navrhnutých mechanizmov nerozlišujú. Väčšina z modelov však naopak vychádza z toho, že medzi intrúziou a mikrotrhlinou je kvalitatívny rozdiel. Mechanizmy nukleácie môžeme rozdeliť do 5 skupín podľa ich hrubých rysov.[3]

1. Modely nerozlišujúce medzi intrúziou a mikrotrhlinou

V tomto prípade je vznik mikrotrhliny chápaný ako spojité prerastanie intrúzie do hĺbky, a to pomocou opakovaného sklzu na jednom alebo na dvoch sklzových systémoch. Intrúzia pôsobí ako koncentrátor napätia a podporuje ďalší sklz.[3, 6]

2. Nukleácia krehkým prasknutím v koreni intrúzie

Táto predstava jasne rozlišuje medzi intrúziou a mikrotrhlinou. Mikrotrhliny začínajú vždy na ostrých intrúziách bez ohľadu na typ okolia dislokačnej štruktúry. Môžeme sa domnievať, že sa mikrotrhlina vytvorí práve vtedy, ak koncentrácia napätia okolo intrúzií už nemôže byť odrelaxovaná sklzovými procesmi (následkom spevnenia) a dosiahne takého stupňa, že maximálne napätie presiahne medziatómové väzobné sily. Tento model však nemôžeme experimentálne doložiť, ani vyvrátiť.[3]

3. Vznik trhliny kondenzáciou vakancií

Niektoré dislokačné interakcie vedú k vzniku vakancií. V priebehu cyklickej deformácie bola experimentálne zistená relatívne vysoká koncentrácia vakancií v celom zaťažovanom objeme. únavové sklzové pásma sú oblasti so stálou a najväčšou dislokačnou aktivitou a je možné, že práve v týchto pásmach je v dôsledku dislokačných interakcií najvyššia koncentrácia vakancií. Vzniknuté vakancie môžu vytvárať zhluky a dutiny, ktoré môžeme v dostatočnej veľkosti považovať za trhliny. Táto

predstava predpokladá difúziu vakancií, ktorá je však silne závislá na teplote.

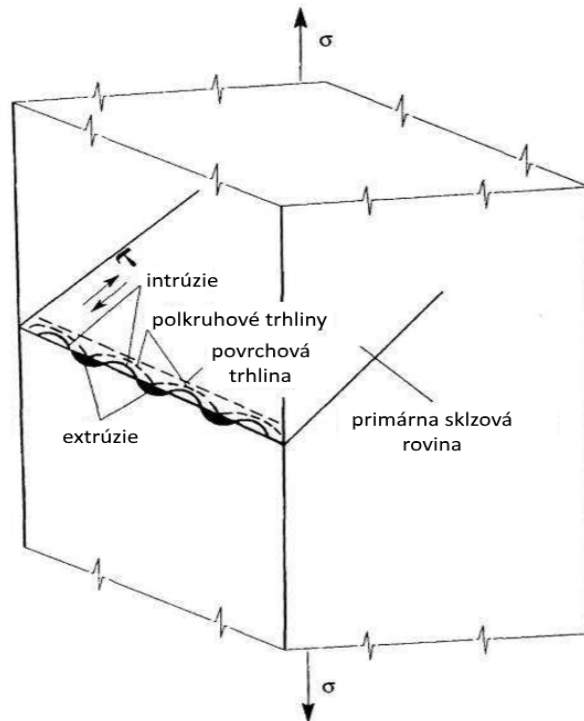
4. Dekohézia kryštálu na hraniciach zrn spôsobená akumuláciou dislokácií[3]

Základná predstava je, že v kritických miestach sa vytvára taká konfigurácia dislokácií, ktorá vedie k lokálnemu zvýšeniu napätia alebo energie dostatočujúcej ku strate kohézie v oblastiach veľkosti od pár do desiatok Angströmov.[3]

5. Nukleácia na hraniciach zrn

Trhlina môže v blízkosti hranice vzniknúť v únavovom sklzovom pásme. Pre jej tvorbu sú potom aplikované mechanizmy uvedené v bodoch 1 až 4. Okrem toho bol navrhnutý mechanizmus tvorby intrúzie priamo na hranici zrn, z ktorej sa môže vyvinúť mikrotrhlina. Tento mechanizmus je aplikovateľný iba pre veľmi vysoké amplitúdy zaťažovania odpovedajúce počtu cyklov do lomu maximálne do 10^3 V prípade takýchto vysokých amplitúd dochádza k intenzívnej cyklickej plastickej deformácii prakticky celej povrchovej vrstvy jednotlivých zrn. V mieste hranice zrna však nemôže prebehnúť deformácia (cyklické posunutie kolmé k povrchu v mieste hranice je skoro nulové). Preto sa v mieste hranice nemôžu vytvárať intrúzie.[3, 6]

Za koniec štádia nukleácie považujeme vznik trhliny určitej dĺžky, pretože ho nedokážeme odlíšiť od štádia šírenie únavových trhlín. Je možné, že tieto dve štádiá sú jedno a to isté.



Obr. 2.6: Mechanizmus nukleácie povrchových mikrotrhlín. (upravené)[5]

2.3 Štádium šírenia únavových trhlín

Štádium šírenia trhlín má rozhodujúce procesy lokalizované do malej časti celkového objemu podobne ako štádium nukleácie trhlín. Šírenie trhlín je determinované vlastnosťami plastickej zóny pred špicom trhliny, kde je vysoká koncentrácia cyklickej plastickej deformácie.

2.3.1 Mechanizmus šírenia únavových trhlín

Povrchové mikrotrhliny vytvorené v prvom štádiu ležia pozdĺž aktívnych sklzových rovín v ktorých je najväčšie šmykové napätie. Pri jedno-osom zaťažovaní sú to roviny ktoré zvierajú uhol 45 stupňov zo smerom vonkajšieho napätia. V priebehu ďalšieho zaťažovania trhliny rastú do hĺbky a spájajú sa a to pozdĺž aktívnych sklzových rovín. Veľká väčšina z nich sa však zastavuje a iba pár ich preniká do hĺbky väčšej než desiatky mikrónov. S narastajúcou dĺžkou sa trhliny stáčajú do smeru kolmému k vektoru hlavného napätia a na ich čele môžeme vhodnými technikami identifikovať plastickejšiu zónu vznika-

júcu účinkom vysokej koncentrácie napätia. Tento prechod sa označuje ako prechod z kryštalografického šírenia trhliny na nekryštalografické. V tejto etape sa zväčša šíri už iba jediná trhlina, označovaná ako magistrálna.[3]

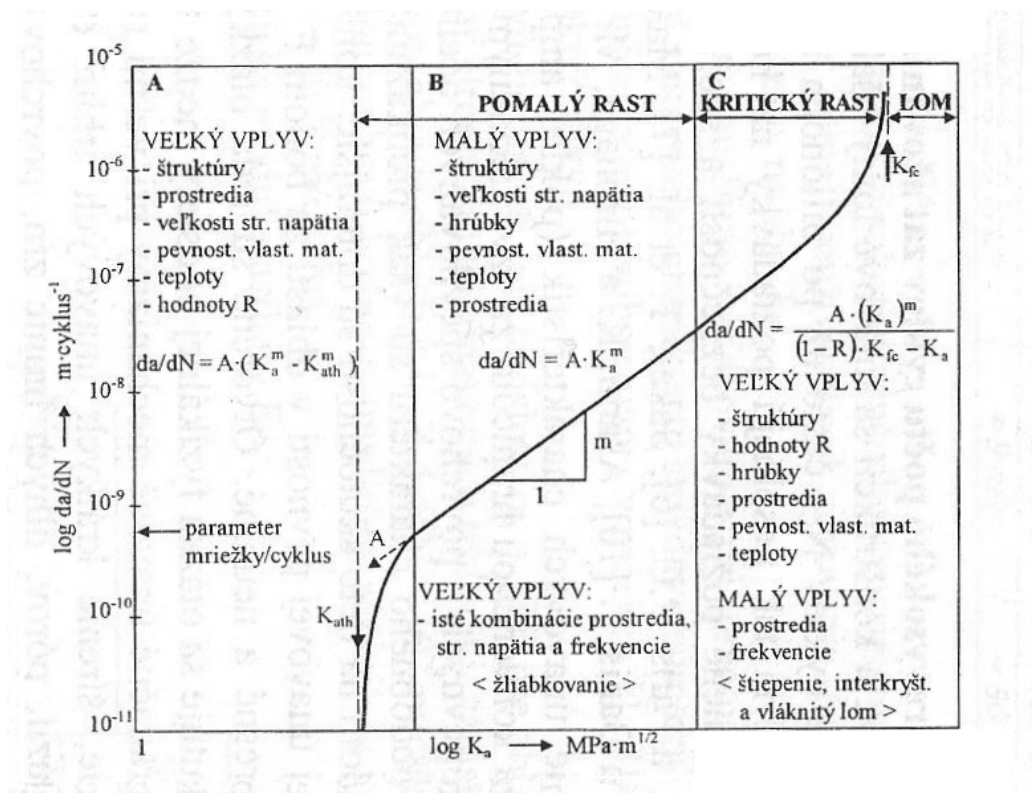
Dĺžka trhliny, pri ktorej dochádza k prechodu z kryštalografického na nekryštalografické šírenie závisí hlavne na druhu materiálu a na amplitúde zaťažovania. Väčšinou to nie je viac ako niekoľko desiatín milimetru. Pretože rýchlosť kryštalografického šírenia trhliny je malá, môže byť počet cyklov potrebný pre jej rozvoj vysoký v porovnaní s počtom cyklov v nekryštalografickom šírení trhliny. U vrubovaných telies je však počet cyklov nepodstatný, v týchto prípadoch prebieha iba nekryštalografické šírenie trhliny. Šírenie končí náhlym lomom zostávajúcej časti prierezu.[3, 6]

Zásadnú zmenu v popise správania únavových trhlín spôsobilo použitie parametrov lomovej mechaniky. Na začiatku 60. rokov sa experimentálne preukázalo, že rýchlosť šírenia trhliny je jednoznačnou funkciou súčiniteľa intenzity napätia (K_a). Zásadný význam K_a pre popis rýchlosti je v tom, že z teoretických úvah a meraní môžeme vylúčiť geometrické faktory (tvar telesa, geometriu pôsobiacich síl). Pre daný materiál je závislosť rýchlosti šírenia trhliny na faktore intenzity napätia rovnaká pre rôzne telesá.[6]

Na obr. 2.7 je krivka závislosti rýchlosti šírenia na amplitúde faktoru intenzity napätia (v log-log súradniciach). Krivka je vo svojej strednej časti lineárna. Smerom k malým rýchlostiam šírenia (malým hodnotám K_a) sa asymptoticky blíži k prahovej hodnote, pod ktorou sa dlhé trhliny nešíria. Smerom k vysokým rýchlostiam (vysoké hodnoty K_a) sa táto krivka asymptoticky blíži k hodnote, pri ktorej nastane záverečný lom. Z praktického hľadiska je najdôležitejšia oblasť malých a stredných rýchlostí vrátane prahových podmienok. Oblasť veľmi vysokých rýchlostí je málo významná, pretože je záležitosťou posledných pár cyklov.[6]

Schematicky ukázaná závislosť rýchlosti šírenia na amplitúde intenzity napätia je prirodzene ďalej modifikovaná mechanickými podmienkami zaťažovania, ale aj materiálovými parametrami a parametrami prostredia. Z mechanických podmienok zaťažovania má najvýznamnejší vplyv na rýchlosť a podmienky zastavenia trhliny asymetrie cyklu a predchádzajúca história zaťažovania.[6]

Únavová trhlina sa začína šíriť merateľnou rýchlosťou vtedy, ak amplitúda súčiniteľa intenzity napätia dosiahne hodnôt K_a . Táto hodnota je určená veľkosťou mikroskopických a makroskopických vnútorných napätí v plastickej



Obr. 2.7: Schéma kinetického diagramu únavového poškodenia.[8]

zóny na špici trhliny. Tlakové napätia predstavujú odpor proti otvoreniu trhliny a vytvárajú aj podmienku pre nešírenie trhliny. Lineárnu časť krivky môžeme vyjadriť Paris-Erdoganovým vzťahom:[6]

$$dl/dN = A \cdot (K_a)^m, \quad (2.2)$$

Kde A a m sú materiálové charakteristiky, dl/dN je rýchlosť šírenia únavovej trhliny a K_a je amplitúda súčiniteľa intenzity napätia.

2.4 Krivky životnosti

Pre posudzovanie únavových vlastností materiálu telies a konštrukcií do- dnes slúži Wöhlerova krivka. V poslednom desaťročíach smeruje svetová ten- dencia v stavbe strojov ku znižovaniu váhy a ku dimenzovaniu na obmedzenú životnosť. Wöhlerov diagram sa tak stal nedostačujúcou únavovou charak- teristikou pre účely inžinierskej práce. Pri vysokom počte cyklov do lomu je odolnosť proti pôsobeniu premenlivých napätí rozhodujúcou veličinou, pri nízkocyklovej únave je rozhodujúca schopnosť kovu znášať striedavé plastické deformácie. U telies s vrubmi, kde dochádza k pružne plastickej striedavej deformácii sú dôležité obe charakteristiky. [3]

2.4.1 Wöhlerova krivka životnosti

Wöhlerova krivka (Krivka životnosti $\sigma_a - N_f$) nám udáva závislosť am- plitúdy napätia σ_a na počte cyklov do lomu N_f a blíži sa medzi únavy σ_c . Priebeh Wöhlerovej krivky závisí na type materiálu. Spoločným rysom pre všetky kovy a zliatiny je nárast počtu cyklov do lomu s poklesom amplitúdy napätia.[3]

Krivka životnosti $\sigma_a - N_f$ môže byť konštruovaná pre rôzne stredné na- pätia σ_m , ktoré ovplyvňujú jej priebeh. Experimentálne sa zisťujú iba dve $\sigma_a - N_f$ krivky, a to pri symetrickom záťažovom cykle ($\sigma_m=0$) a pri dočasnom cykle ($\sigma_m=\sigma_a$).[3]

Pre oba diagramy je spoločný pokles cyklov do lomu s rastúcim napätím. Túto oblasť nazývame časovanou únavovou pevnosťou a je ohraničená sprava počtom cyklov N_C (počet cyklov nad ktorým už nedôjde k únavovému po- škodeniu). Oblasť s vyšším počtom cyklov $N > N_C$ nazývame oblasťou trvalej únavovej pevnosti.[6]

2.4.2 Oblasť nízkocyklovej únavy

Oblasť nízkocyklovej únavy nám popisuje dvojica rovníc, Wöhler-Basquinova a Manson-Coffinova krivka. Wöhler-Basquinova krivka vyjadruje závislosť počtu cyklov do lomu na amplitúde napätia, Manson-Coffinova zasa na amplitúde plastickej deformácie. Krivky v nízkocyklovej oblasti popisujeme mocninnými funkciami.[6]

Wöhler-Basquinovu krivku nám popisuje funkcia navrhnutá Morrowom:

$$\sigma_a = \sigma_{f'} \cdot (2N_f)^b, \quad (2.3)$$

kde $\sigma_{f'}$ je súčiniteľ únavovej pevnosti a b je exponent únavovej pevnosti. Súčiniteľ únavovej pevnosti reprezentuje približnú hodnotu amplitúdy cyklického napätia na prvý polcyklus.

[6]

Únavový proces môžeme definovať aj pomocou deformácie. Manson-Coffinov vzťah nám udáva závislosť medzi amplitúdou plastickej deformácie ϵ_{ap} a počtom cyklov do lomu N_f . Jeho tvar je:

$$\epsilon_{ap} = \epsilon_{f'} \cdot (2N_f)^c, \quad (2.4)$$

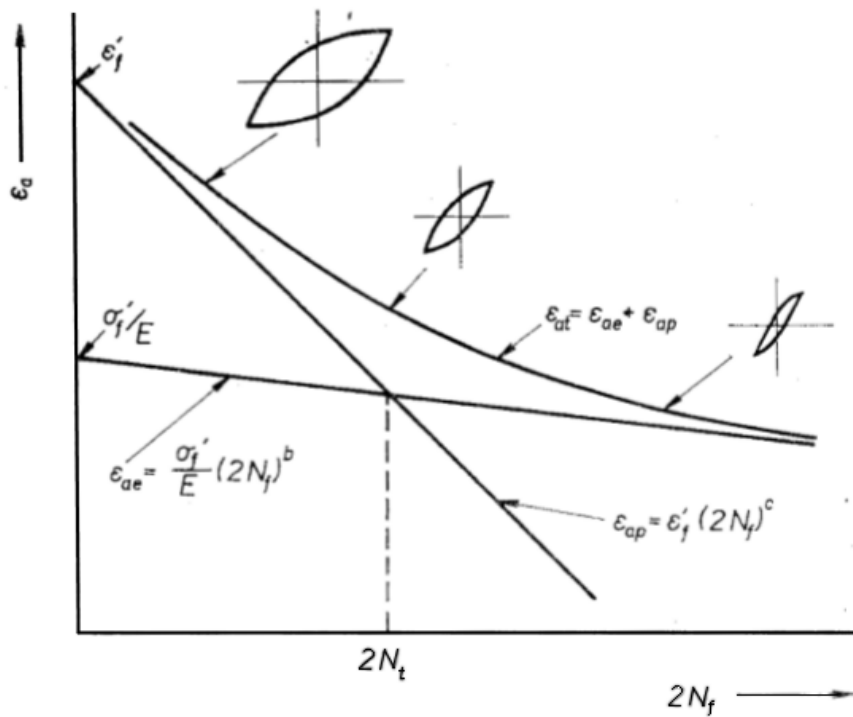
kde $\epsilon_{f'}$ je súčiniteľ únavovej ťažnosti a c je exponent únavovej ťažnosti. Súčiniteľ únavovej ťažnosti reprezentuje približnú hodnotu amplitúdy plastickej deformácie na prvý polcyklus, avšak ho pre množstvo konštrukčných materiálov nie je možné korelovať so skutočnou lomovou deformáciou ϵ_f určenou pri jednosmernom zaťažení.[6]

Dáta pre konštrukciu Manson-Coffinovej krivky najjednoduchšie získame pomocou experimentu v režime riadenej amplitúdy plastickej deformácie, pričom pre hodnotu súčiniteľa únavovej ťažnosti získame určitý počet cyklov do lomu. Môžeme ich získať aj z experimentov kde je riadená amplitúda napätia, pomocou hysteréznych slučiek, z ktorých získame hodnotu amplitúdy plastickej deformácie pre nameraný počet cyklov do lomu.[6]

Z experimentálnych dôvodov je často výhodnejšie aplikovať pri únavovom zaťažovaní amplitúdu celkovej deformácie, ktorá sa skladá z plastickej zložky. Manson navrhol závislosť počtu cyklov do lomu na oboch zložkách deformácie v tvare:

$$\epsilon_{at} = \epsilon_{ae} + \epsilon_{ap} = \sigma_a/E + \epsilon_{ap} = \sigma_{f'}/E \cdot (2N_f)^b + \epsilon_{f'} \cdot (2N_f)^c, \quad (2.5)$$

kde E je modul pružnosti materiálu.[3]



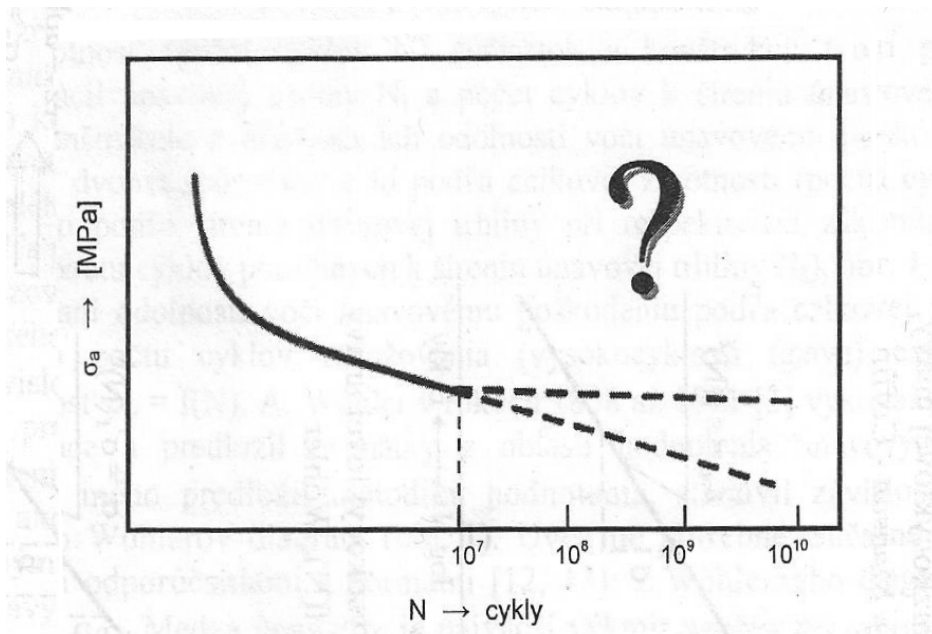
Obr. 2.8: Schematický priebeh kriviek životnosti.[3]

2.4.3 Oblasť vysokocyklovej a gigacyklovej únavy

Celkovú životnosť (počet cyklov N) súčiastok a konštrukcií tvorí počet cyklov potrebných k iniciácii únavovej trhliny N_i a počet cyklov k šíreniu únavovej trhliny N . Súčiastky alebo konštrukcie z hľadiska ich odolnosti voči únavovému poškodeniu je možno posudzovať dvoma spôsobmi, a to podľa celkovej životnosti (počtu cyklov N , kde $N = N_i + N$ alebo podľa šírenia únavovej trhliny pri rešpektovaní zákonitosti lomovej mechaniky (podľa počtu cyklov potrebných k šíreniu únavovej trhliny N).[8]

Pri posudzovaní životnosti voči únavovému poškodeniu podľa celkovej životnosti je v oblasti vysokého počtu cyklov zatažovania (vysokocyklová únava) experimentálne stanovovaná závislosť $\sigma_a = \sigma_{1f} \cdot (N)^b$, známu ako Wöhlerov diagram, z ktorého možno stanoviť hodnotu medze únavy σ_c . Medza únavy je najväčší výkmit napätia pri určitom strednom napätí σ_m , ktoré materiál teoreticky vydrží po nekonečný počet cyklov. Pri únavových skúškach však nie je možné zatažovať materiál po nekonečnú dobu. Prakticky je materiál odolný únave ak znesie tzv. základný počet cyklov N_c , ktorý sa udáva v normách pre konkrétne materiály.[8]

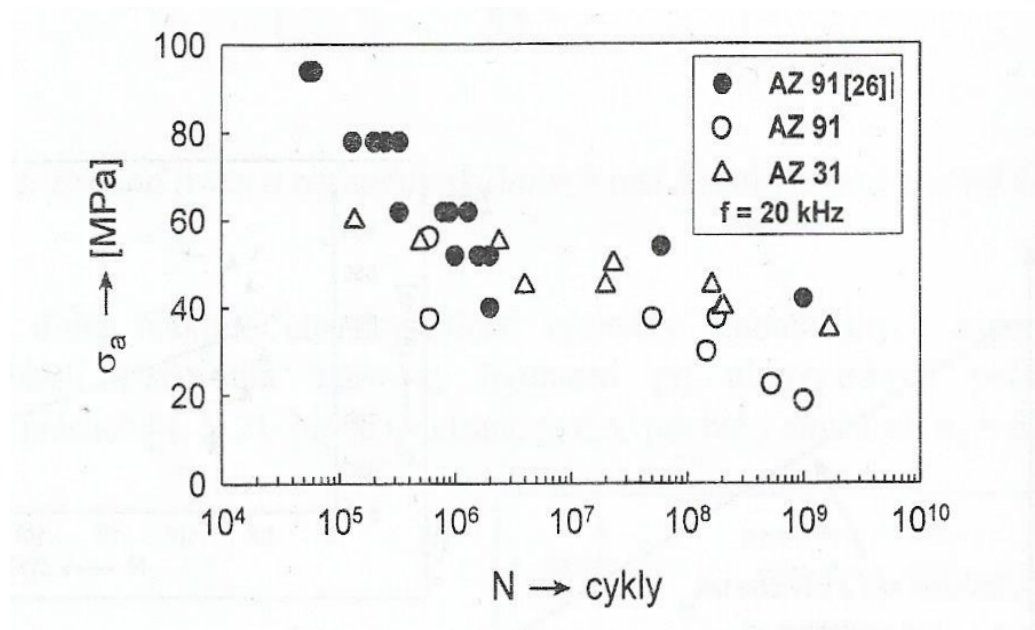
V reálnej prevádzke súčiastok a konštrukcií sa však únavové lomy objavujú až po vyššie uvádzanom základnom počte cyklov N_c (oblasť gigacyklovej únavy - 10^7 cyklov a viac) často až po miliónoch cyklov. Predpokladaná únavová životnosť v rôznych systémoch používaných v leteckom, železničnom a automobilovom priemysle a v zdravotníctve preyšuje v niektorých prípadoch aj 10^8 cyklov. Stanovenie dlhodobého správania súčastí v oblasti gigacyklovej únavy je veľmi dôležité pre správny dizajn komponentov.[18] Autori rôznych prác konštatovali znižovanie únavových charakteristík (pokles amplitúdy napätia σ_a s rastúcim počtom cyklov N) za konvenčnou hranicou, za základným počtom $N_c = 10^7$ cyklov predovšetkým vo vysokopevných a povrchovo spevňovaných oceliach. Z ohľadom na tieto skutočnosti sú doterajšie konštatovania a úvahy o bezpečnom namáhaní a trvalej únavovej pevnosti na konci oblasti trvalej pevnosti nepresné a neúplné. Otvorené sú otázky, aký je priebeh Wöhlerovej krivky, diskutuje sa otázka podstaty a existencie medze únavy a ďalej aké sú degradačné únavové mechanizmy pri veľmi nízkych hodnotách amplitúdy plastickej deformácie a šírenie a iniciácia únavových trhlín v oblasti gigacyklovej únavy materiálov.[8]



Obr. 2.9: Všeobecná závislosť $\sigma_a = f(N)$ [8]

Problémom zisťovania únavovej životnosti za hranicou $N = 10^7$ cyklov je časová náročnosť rastúca s počtom cyklov zaťažovania a preto výskum smeruje hlavne na vyvíjanie skúšobných zariadení. Posledným prevratom je ultrazvukový piezoelektrický únavový testovací stroj, dosahujúci frekvenciu až 20 kHz. Testovanie je nízkonákladové a rýchle. Ultrazvukovou únavovou skúškou dokážeme v rozumnom čase získať dáta S-N krivky až pre počet cyklov 10^{10} . [18]

Charakteristickým javom pri zaťažovaní konštrukčných materiálov v oblasti gigacyklovej únavy je iniciácia únavových trhlín pod povrchom (v objeme) skúšaných vzoriek. Aktívne iniciačné miesta sú predovšetkým inklúzie, mikrotrhliny, stiahnutiny, veľmi malé zrná a dlhé hranice zrn vhodne orientované voči pôsobiacemu zaťaženiu. Lokálna koncentrácia napätia môže v danom objeme materiálu generovať vznik krátkych trhlín a ich rast až po záverečné porušenie únavovým lomom. Na obrázku 2.8 môžeme vidieť únavovú životnosť horčíkových zliatin AZ31 a AZ91 pri vysokofrekvenčnom cyklickom zaťažovaní v oblasti gigacyklovej únavy. V gigacyklovej oblasti bol zaznamenaný pokles amplitúdy cyklického napätia. Únavové trhliny iniciovali na mikroskopických zlievarenských chybách (póry, mikropóry stiahnutiny, mikrostiahnutiny). Únavová životnosť v oblasti UHCF má kontinuálny charakter. [8]



Obr. 2.10: Závislosť $\sigma_a = f(N)$, MG-zliatin AZ31 a AZ61[8]

Nárast plastickej deformácie pri nukleácii únavových trhlin v oblasti gigacyklovej únavy vedie k nárastu teploty materiálu a tak sa zistenie pre počtu lomov u ktorých začínajú iniciovať únavové trhliny využívajú metódy infračervenej termografie. Vďaka tejto metóde sa potvrdil dohad, že mechanizmus gigacyklovej únavy je vo väčšine materiálov riadený iniciáciou únavových trhlín. Pre presnú predpoveď únavového života v oblasti UHCF je treba lepšie pochopiť mechanizmus iniciácie trhlín, vplyv nehomogenít, defektov a inklúzií. Štúdium gigacyklovej oblasti je stále nejasné a je treba ďalší výskum.[18]

Kapitola 3

Extrémne nízokocyklová únava

Extrémne veľké cyklické zaťažovanie spôsobuje u kovov lom už pri menej ako 100 cykloch. Tento termín nazývame extrémne nízokocyklová únava (ELCF). ELCF je najviac viditeľná pri zlyhaní ťažkých nákladných strojov a zemetraseniach. Hlavný rozdiel v kategorizácii únavy do skupín spočíva v počte cyklov do lomu. U klasická ťahovej skúšky prichádza ku lomu už po 1 polcykle. Extrémne nízokocyklová únava je typicky menej ako 100 cyklov do lomu. Nízokocyklová únava (LCF) je od 100 do 10^4 , ďalej vysokocyklová (HCF) od 10^4 do 10^7 a poslednú kategóriu tvorí gigacyklová únava, u ktorej je to viac ako 10 miliónov cyklov.

Prechody medzi kategóriami sú založené na mechanizmoch zlyhania, líšia sa pre každý materiál a nemôžeme špecifikovať presný bod kedy dochádza k prechodu z jedného typu únavy na druhý. Únava je graduálny proces kde sú na rozhraní aktívne obidva mechanizmy príslušných kategórií.

3.1 Predpoveď životnosti v celej oblasti nízokocyklovej únavy

Oblasť extrémne nízokocyklovej únavy je sprevádzaná veľkým množstvom plastickej deformácie charakterizovanej zmenami v mikroštruktúre materiálu. Najčastejšie používaným vzťahom na predpoveď životnosti materiálu v oblasti ELCF je Manson-Coffinov vzťah, založený na striedavej amplitúde plastickeho napätia, ktorý bol navrhnutý pred viac ako 60 rokmi nezávisle obidvomi autormi. Od 50. rokov minulého storočia boli uskutočnené rôzne experimentálne programy na kalibráciu materiálových konštánt pre rôzne kovové materiály. Z nameraných dát sa zistilo, že Manson-Coffinova krivka nie je

vhodná na predpoveď životnosti materiálu pri počte cyklov nižšom ako 100. Experimentálne krivky v oblasti ELCF majú konkávny tvar, Manson-Coffinova krivka predpovedá lepšiu životnosť ako v skutočnosti. Režimy zlyhania v oblasti LCF a ELCF sa od seba tiež líšia, napríklad v mieste iniciácie únavovej trhliny. Na prekonanie nedostatku Manson-Coffinovho vzťahu bolo predstavených viacero modelov, ktoré navrhujú matematické funkcie lepšie popisujúce oblasť ELCF.[9]

3.1.1 Model predpovede podľa L. Xue

V nasledujúcich sekciách sa budeme venovať predpovedi životnosti materiálu v oblasti ELCF publikovanej L. Xueom.

Akumulácia poškodenia plastickou deformáciou

Existujú rôzne spôsoby charakterizácie poškodenia húževnatých kovov plastickou deformáciou, a to napríklad pomocou pomeru prázdneho objemu, zníženia tuhosti materiálu alebo stratou húževnatosti. Pre predpovedanie začiatku húževnatého lomu bolo predstavených viacero modelov, avšak v praxi sa najviac využíva takzvané Palmgren-Minerovo pravidlo. Poškodenie materiálu vyjadrené Palmgren-Minerovým pravidlom je spájané s relatívnym znížením tvárnosti pre vyčíslenie poškodenia pri obrátenom zaťažovaní [9]

$$D = \frac{4n\Delta\epsilon_p}{4N\Delta\epsilon_p} = \frac{n}{N}, \quad (3.1)$$

kde D je skalárna veličina vyčísľujúca integritu materiálu, $\Delta\epsilon_p$ je amplitúda plastickej deformácie, n je aktuálny počet cyklov, a N je počet cyklov do lomu. Menovateľ zlomku predstavuje súčasnú plastickú deformáciu a číateľ zasa celkovú plastickú tvárnosť, ktorá sa mení v závislosti od danej amplitúdy plastickej deformácie.[9]

Pre viacero materiálov môžeme krivku životnosti $\Delta\epsilon_p - N$ popísať Manson-Coffinovým vzťahom:

$$\Delta\epsilon_p \cdot N^k = C, \quad (3.2)$$

kde C a k sú materiálové konštanty.

Typ cyklického plastickeho zaťažovania môžeme charakterizovať pomerom minimálneho a maximálnej plastickej deformácie, $R = \frac{\epsilon_{min}}{\epsilon_{max}}$. Ak zoberieme špecifický prípad periodického zaťažovania kde je pomer minimálnej deformácie ku maximálnej nulový ($R=0$), monotónnym zaťažovacím testom dostaneme $N=\frac{1}{2}$ a $\Delta\epsilon_p = \epsilon_f$, čo je deformácia pri lome pri monotónnej zaťažovacej

dráhe. Materiálovú konštantu C môžeme vyjadriť ako $\epsilon_f/2^k$. Ďalej sa predpokladá, že spätný pohyb vytvára rovnako veľké plastické poškodenie ako pohyb napred. V súlade s Palmgren-Minerovým pravidlom je to ekvivalentné ako predpoklad, že cyklické plastické poškodenie je riadené ekvivalentným plastickým skreslením, ktoré je definované na súčasnej zložke plastického deformácie:

$$\epsilon_d = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2}, \quad (3.3)$$

kde ϵ_1 , ϵ_2 a ϵ_3 sú tri hlavné časti tenzoru napätia. Plastické skreslenie však musíme rozlíšiť od ekvivalentnej plastickej deformácie, ktorá zohľadňuje vplyv histórie všetkých prírastkových komponentov plastického napätia:

$$\epsilon_p = \int d\epsilon_p, \quad (3.4)$$

kde $d\epsilon_p = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{d\epsilon_1^2 + d\epsilon_2^2 + d\epsilon_3^2}$.

Zderivovaním Manson-Coffinovho vzťahu a s poznatkom, že prírastok plastického skreslenia je rovnaký ako prírastok plastickej deformácie ($\Delta\epsilon_d = \Delta\epsilon_p$) môžeme vyjadriť vzťah pre výpočet poškodenia pre prírastku plastickej deformácie pri monotónnom zatažovaní:

$$dD = m \left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_f} \right)^{(m-1)} \frac{1}{\epsilon_f} d\epsilon_p, \quad (3.5)$$

kde $m=1/k$. Kritérium lomu je celková strata tvárnosti, ktorú môžeme vyjadriť ako:

$$D = \int_0^{\epsilon_c} m \left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_f} \right)^{(m-1)} \frac{1}{\epsilon_f} d\epsilon_p = 1, \quad (3.6)$$

kde ϵ_c je kritická plastická deformácia, pri ktorej dochádza k lomu pri samovolnom zatažovaní. Pri monotónnom zatažovaní získame napätie lomu $\epsilon_c = \epsilon_f$ pre všetky pozitívne hodnoty m .

Ako príklad môžeme uviesť priebeh vývoja ekvivalentnej plastickej deformácie a ekvivalentného plastického skreslenia na obrázku 3.1a, ten ich znázorňuje ako plnú a bodko-čiarkovanú čiaru. Priebeh kriviek akumulácie poškodenia je znázornený na obrázku 3.1b. Plná čiara znázorňuje krivku akumulácie poškodenia a bodko-čiarkovaná krivka zasa cyklické plastické zatažovanie s počtom cyklov do lomu 2.

V prípade že sa $m=1$, kritérium lomu môžeme zjednodušiť na tvar:

$$D = \int_0^{\epsilon_c} \frac{d\epsilon_p}{\epsilon_f} = 1, \quad (3.7)$$

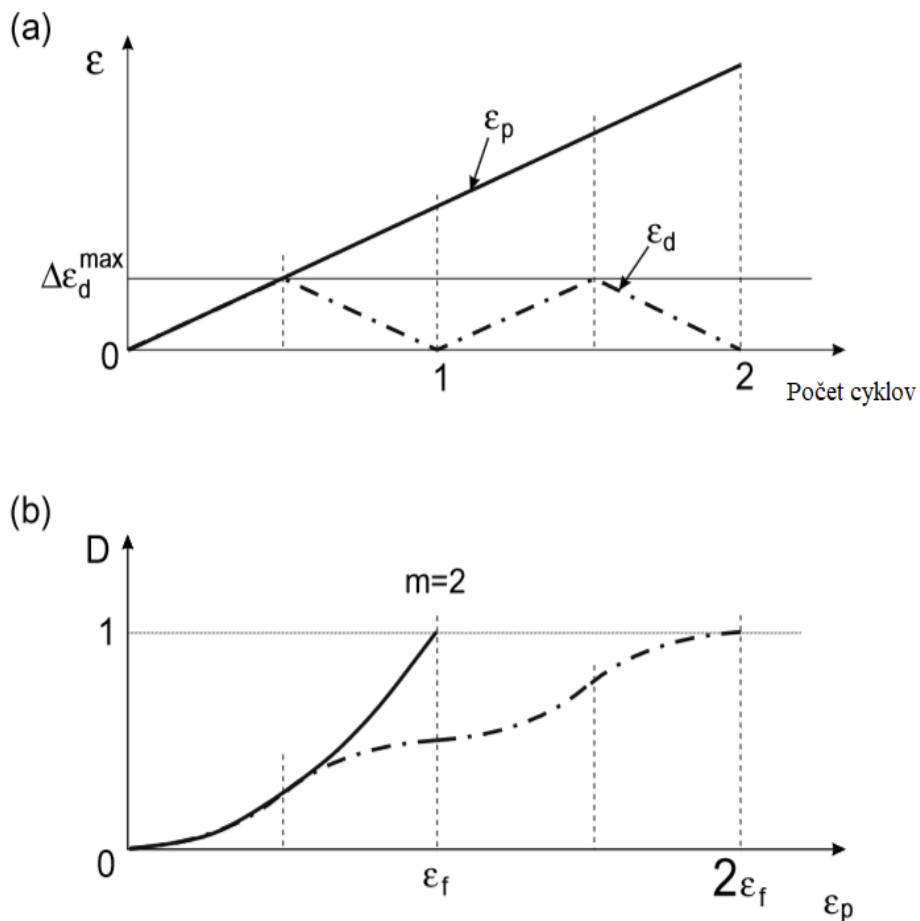
čo je vzťah pre priebeh poškodenia používaný viacerými modelmi poškodenia a lomu, napríklad Johnson-Cookovým modelom.

Integráciou tohto vzťahu dostaneme funkciu potenciálneho plastického poškodenia, ktorej deriváciou je okamžitá miera poškodenia.

$$\Psi \left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_f} \right) = \left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_f} \right)^m \quad (3.8)$$

Tento vzťah sa v dnešnej dobe používa na simuláciu húževnatých lomov pri monotónnych záťažoch.

Pomocou experimentálnych meraní sa zistilo, že sa hodnoty materiálovej konštanty k pre kovy pohybujú v intervale od 0,33 do 0,75 a materiálová konštantá m sa bude pohybovať v rozmedzí 1,33 až 3.[9]



Obr. 3.1: (a) Plastické napätie a skreslenie, (b) akumulácia poškodenia[9]

Na obrázku 3.1 môžeme vidieť náčrt vývoja ekvivalencie plastickej deformácie a skreslenia pri opakovanom plastickom zaťažovaní pri $R=0$ (a) a v prípade b príklad akumulácie poškodenia materiálu pre $m = 2$ pri monotónnom cyklickom zaťažovaní kde sa jeho amplitúda napätia rovná polovici jeho medze pevnosti.

Vzťah pre exponenciálne poškodenie - Extrémne nízkocyklová únava

Pre viacero kovových materiálov nám Manson-Coffinov vzťah nám dáva nedostatočné výsledky v oblasti ELCF, a je to najviac pozorovateľné ak sú únavové skúšky prevádzané za zvýšených teplôt. Aby sme dokázali zosúladiť hodnoty predpovedané Manson-Coffinovým vzťahom v oblasti ELCF s hodnotami vyplývajúcimi z experimentálnych meraní, bolo predložených viacero modelov. Hlavným problémom Manson-Coffinovo vzťahu je nadhodnocovanie únavovej životnosti materiálu v oblasti ELCF, teda nám predpovedá viac cyklov do lomu ako je to v skutočnosti. Súčasný výskum sa zaoberá hľadáním exponenciálnej funkcie na predpovedanie poškodenia materiálu, ktorá je v súlade s krivkou $\Delta\epsilon_p - N$ v oblasti ELCF. Túto exponenciálnu funkciu môžeme vyjadriť ako:

$$\Psi\left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_f}\right) = \frac{e^{\lambda \frac{\epsilon_d}{\epsilon_f}} - 1}{e^\lambda - 1}, \quad (3.9)$$

kde λ je parameter poškodenia. Tento vzťah môžeme zderivovať do tvaru:

$$dD = \frac{\lambda e^{\lambda \frac{\epsilon_d}{\epsilon_f}}}{(e^\lambda - 1)} \frac{1}{\epsilon_f} d\epsilon_p, \quad (3.10)$$

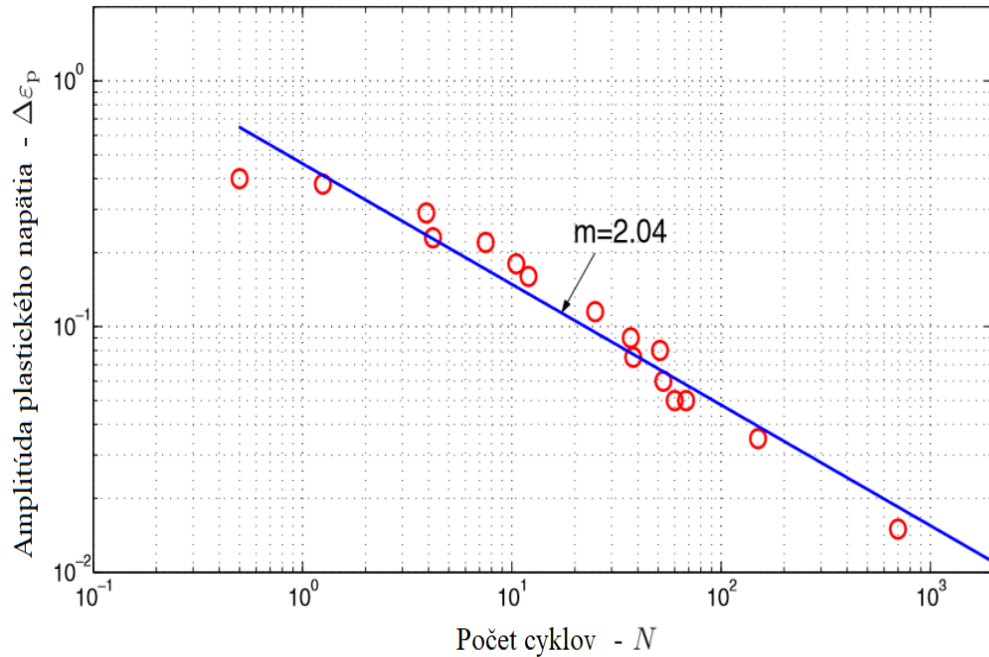
Vzťah pre poškodenie a jeho mieru môžeme vidieť vykreslený na obrázku 3.3. Pri hodnote materiálovej charakteristiky $\lambda=0$ nabera funkcia potenciálu poškodenia lineárny tvar.

Vzťah pre krivku životnosti $\Delta\epsilon_p - N$ pre materiály s nulovým pomerom minimálnej a maximálnej amplitúdy napätia $R=0$ dostaneme upravením rovnosti derivácie vzťahu 3.1 a vzťahu 3.10:

$$2N \frac{e^{\lambda \left(\frac{\Delta\epsilon_p}{\epsilon_f}\right)} - 1}{e^\lambda - 1} = 1, \quad (3.11)$$

ktorý má po následnej úprave tvar:

$$N = \frac{1}{2} \frac{e^\lambda - 1}{e^{\lambda \left(\frac{\Delta\epsilon_p}{\epsilon_f}\right)} - 1}. \quad (3.12)$$



Obr. 3.2: Porovnanie krivky $\Delta\epsilon_p - N$ a experimentálne nameraných hodnôt hliníkovej zliatiny 2024 T6[9]

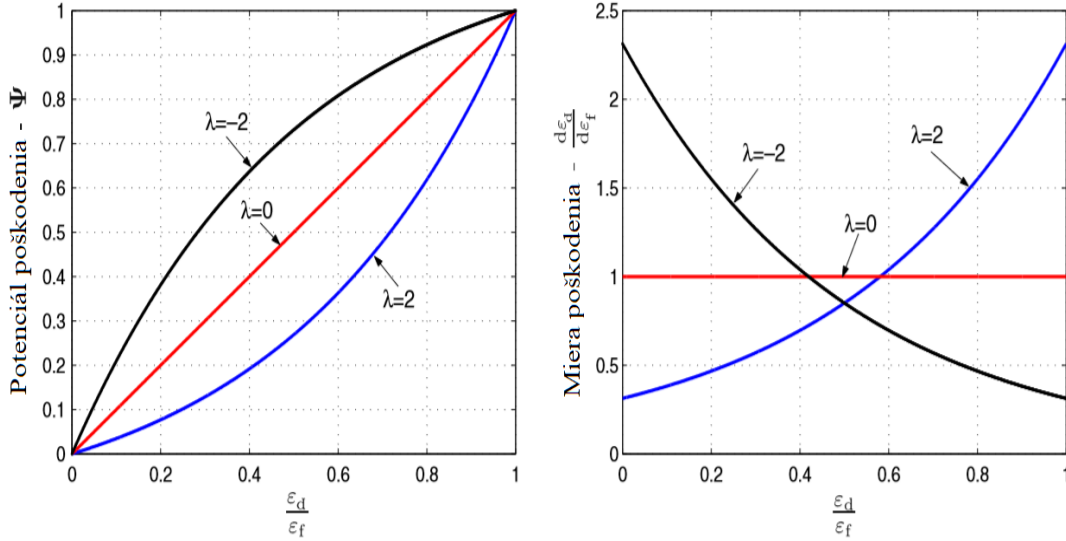
Materiálová konštanta λ sa volí tak, aby vzniknutá funkcia kopírovala krivku životnosti $\Delta\epsilon_p - N$. Pre konkávne funkcie má λ kladnú hodnotu a pre konvexné zasa zápornú. Na príklad na obrázku 3.4, kde sa s experimentálnych údajov z obrázku 3.2 nakalibrovala hodnota konštanty $\lambda=5,10$. [9]

Klesanie krivky sa s narastajúcim počtom cyklov zvyšuje a je závislé iba od konštanty λ . Asymptotický sklon pri veľmi malej amplitúde plastickej deformácie je rovný -1. Je to preto, že vzťah exponenciálneho poškodenia degeneruje na lineárnu funkciu pre malú amplitúdu plastickej deformácie. V tomto prípade môže byť poškodenie oproti ekvivalentnému vzťahu skreslenia prepísané ako:

$$D = \frac{e^{\lambda \frac{\epsilon_d}{\epsilon_f}} - 1}{e^\lambda - 1} \approx \frac{\lambda \epsilon_d}{(e^\lambda - 1) \epsilon_f}, \quad (3.13)$$

Ďalej môžeme pre počet cyklov vyjadriť vzťah v tvare:

$$N = \frac{1}{2D} \approx \frac{(e^\lambda - 1) \epsilon_f}{2\lambda \epsilon_d}. \quad (3.14)$$



Obr. 3.3: Funkcia potenciálu a miery poškodenia pre tri rôzne hodnoty λ [9]

Taktiež môžeme vyjadriť krivku životnosti $\Delta\epsilon_p - N$ v logaritmickom tvare:

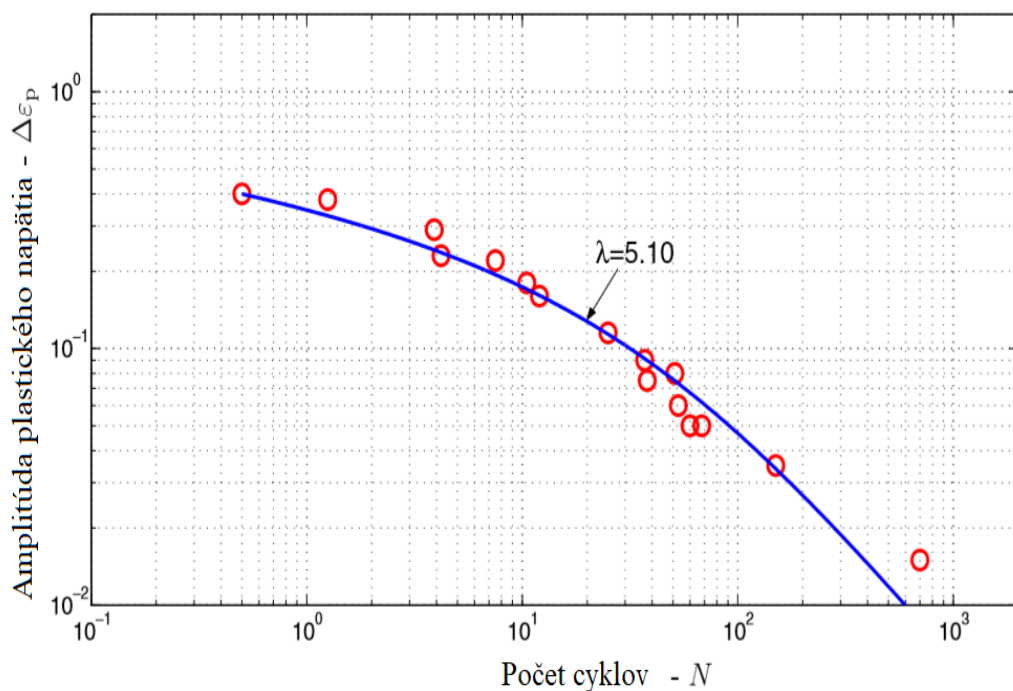
$$\log N + \log \Delta\epsilon_p = \log \left(\frac{e^\lambda - 1}{\lambda} \right) + \log \epsilon_f - \log 2. \quad (3.15)$$

Potenciál poškodenia vykazuje dobrú súhlasnosť s experimentálne nameranými dátami (obrázok 3.4). V oblasti nízkocyklovej únavy ($100 < N < 10^4$) však krivka vďaka zápornej asymptote skreslená a tak pre krivku v oblasti LCF nevyhovuje.

Vzájomný efekt materiálových charakteristík λ a m na krivku $\Delta\epsilon_p - N$

Z predchádzajúcich dvoch sekcií vyplýva, že zatiaľ odvodené vzťahy dokonale neodhadujú oblasť tvorenú ELCF a LCF ($1/2 < N < 10^4$). Táto sekcia má za úlohu vytvoriť funkciu ktorá pomocou λ a m dokáže predpovedať životnosť v celej oblasti nízkocyklovej únavy. Kombináciou doterajších vzťahov môžeme odvodiť funkciu:

$$\Psi \left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_f} \right) = \frac{e^{\lambda \left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_f} \right)^m} - 1}{e^\lambda - 1}, \quad (3.16)$$



Obr. 3.4: Krivka životnosti $\Delta\epsilon_p - N$ preložená odvodenou funkciou hliníkovej zliatiny 2024-T6.[9]

Z ktorej následnou deriváciou dostaneme vzťah pre mieru poškodenia:

$$dD = \frac{m\lambda \left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_f}\right)^{(m-1)} e^{\lambda\left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_f}\right)^m}}{(e^\lambda - 1)} \frac{d\epsilon_p}{\epsilon_f}, \quad (3.17)$$

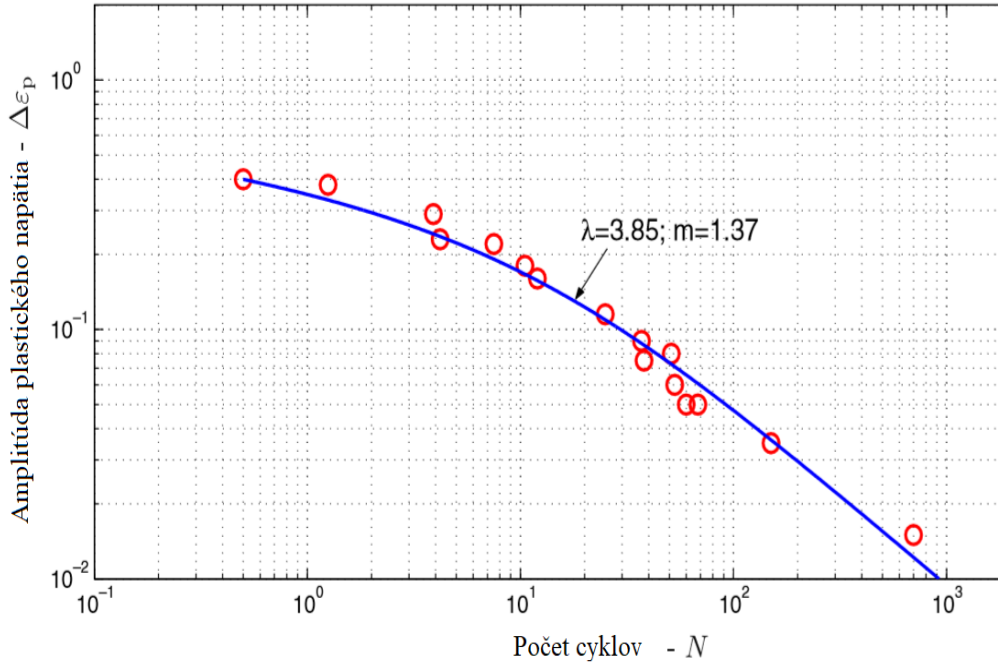
z ktorého ďalej odvodíme výslednú funkciu:

$$N = \frac{1}{2} \frac{e^\lambda - 1}{e^{\lambda\left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_f}\right)^m} - 1}, \quad (3.18)$$

ktorá sa dá vyjadriť aj v logaritmickej tvare:

$$\log N + \log \left(e^{\lambda\left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_f}\right)^m} - 1 \right) = \log(e^\lambda - 1) - \log 2. \quad (3.19)$$

Obe materiálové charakteristiky (λ a m) získame ak danú funkciu preložíme cez experimentálne namerané hodnoty krivky $\Delta\epsilon_p - N$. Na obrázku 3.5 je



Obr. 3.5: Krivka životnosti $\Delta\epsilon_p - N$ hliníkovej zliatiny 2024-TG s použitím oboch materiálových parametrov.[9]

uvedený príklad na hliníkovej zliatine 2024-T6.[9] Sklony krivky sa dajú určiť pre dva prípady rozsahu amplitúdy plastickej deformácie. Na ľavej strane krivky, kde je $\Delta\epsilon_p$ vysoká ($\Delta\epsilon_p \approx \epsilon_f$), je sklon:

$$\frac{d \log \Delta\epsilon_p}{d \log N} = \frac{e^{-\lambda} - 1}{\lambda m}. \quad (3.20)$$

Na pravej strane krivky, pre veľmi malé amplitúdy plastickej deformácie je asymptota sklonu:

$$\frac{d \log \Delta\epsilon_p}{d \log N} = -\frac{1}{m}, \quad (3.21)$$

A vzťah krivky $\Delta\epsilon_p - N$ môžeme redukovať na lineárny:

$$\log \Delta\epsilon_p = -\frac{1}{m} \left(\log N + \log \frac{2\lambda}{e^\lambda - 1} \right) + \log \epsilon_f. \quad (3.22)$$

Ak teda z experimentálnych meraní poznáme tieto dva sklony, dokážeme ľahko zistiť obidve materiálové charakteristiky. Teplotná závislosť materiálových konštánt podľa experimentálnych meraní prevedených na 2.25Cr-1Mo oceli pánmi Polákom, Helešicom a Klesnilom[13], avšak iba v oblasti LCF.[9]

3.1.2 Model predpovede životnosti podľa Kenjiho Hatanaku

Hatanakova funkcia vychádza z rovnice $\Delta\epsilon_{pe}N_f^a = C$. Zavádza novú veličinu $\Delta\epsilon_{pe}$ s extrapoláčnymi vlastnosťami $\Delta\epsilon_{ps} \rightarrow \infty$ a $\Delta\epsilon_{ps} = \Delta\epsilon_{pe}$. Hatanaka volí $\Delta\epsilon_{ps} = (1 - e^{-a\Delta\epsilon_{ps}}) \Delta\epsilon_{pe}$, odkiaľ plynie:

$$\Delta\epsilon_{pe} = \frac{\Delta\epsilon_{ps}}{1 - e^{-a\Delta\epsilon_{ps}}} \quad (3.23)$$

Regresnú funkciu potom môžeme vyjadriť v tvare:

$$\frac{\Delta\epsilon_{ps}}{1 - e^{-a\Delta\epsilon_{ps}}} = \epsilon_0 N^b. \quad (3.24)$$

parameter približovania a z rovnice získame vypočítaním lineárnej regresie aby bolo dosiahnutého maximálneho koeficientu determinácie:

$$\log \frac{\Delta\epsilon_{ps}}{1 - e^{-a\Delta\epsilon_{ps}}} = b \log N + \log \epsilon_0 \quad (3.25)$$

Hatanakov vzťah popisuje iba malý odklon krivky pre ELCF od priamky pre krátky úsek vyššieho počtu cyklov do lomu a tak je jeho rozsah obmedzený do počtu cyklov do lomu cca 10^4 .

3.1.3 Model predpovede životnosti podľa Masatoshiho Kurodu

Kurodov model vychádza z Hatanakovej funkcie:

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{1 - e^{-a\Delta\epsilon_p}} N_f^a = C, \quad (3.26)$$

a nadväzuje na model kumulatívneho únavového poškodenia podľa Du a kolektívu[16].

V oblasti ELCF Du a kolektív navrhli kategorizáciu únavového poškodenia do 2 častí: prvá časť poškodenia je "statickej" povahy, ktorá reprezentuje stav materiálu pri monotónnom zaťažovaní až do maximálnej hodnoty napätia (statické poškodenie D_s). Druhou časťou je akumulácia poškodenia spôsobeného cyklickým zaťažovaním v súlade s Manson-Coffinovým vzťahom

(cyklické poškodenie D_c . Ak zoberieme do úvahy obidve časti, vzťah pre kritérium poškodenia môžeme vyjadriť ako:

$$D_s + D_c = 1, \quad (3.27)$$

$$D_s = \frac{\epsilon_d^0}{\epsilon_f}, \quad (3.28)$$

$$D_c = \frac{\Delta\bar{\epsilon}_d \cdot N_f^a}{C}, \quad (3.29)$$

kde ϵ_d^0 je radiálne napätie v prvom zaťažovacom cykle, ϵ_f je korešpondujúce radiálne napätie lomu spôsobené monotónnym zaťažovaním. $\Delta\bar{\epsilon}_d$ je priemerný rozsah radiálneho napätia počas celej únavovej životnosti. Avšak model podľa Du a kolektívu nezohľadnil vplyv vyčerpania ťažnosti počas cyklického namáhania ani dostatočne nerozoberá fyzikálny význam cyklického poškodenia a preto bolo treba ich model upraviť:

1. Poškodenie spôsobené napínaním v ťahu D_t ,

$$D_t = \frac{\epsilon_{pmax}}{\epsilon_f} \quad (3.30)$$

2. Poškodenie spôsobené vyčerpaním ťažnosti počas cyklického namáhania D_d ,

$$D_d = \frac{\epsilon_{pmax}}{\epsilon_f} + 4n \left(\frac{\Delta\epsilon_p}{2\epsilon_f} \right)^{a'} \quad (3.31)$$

3. Poškodenie spôsobené šírením trhlín D_c .

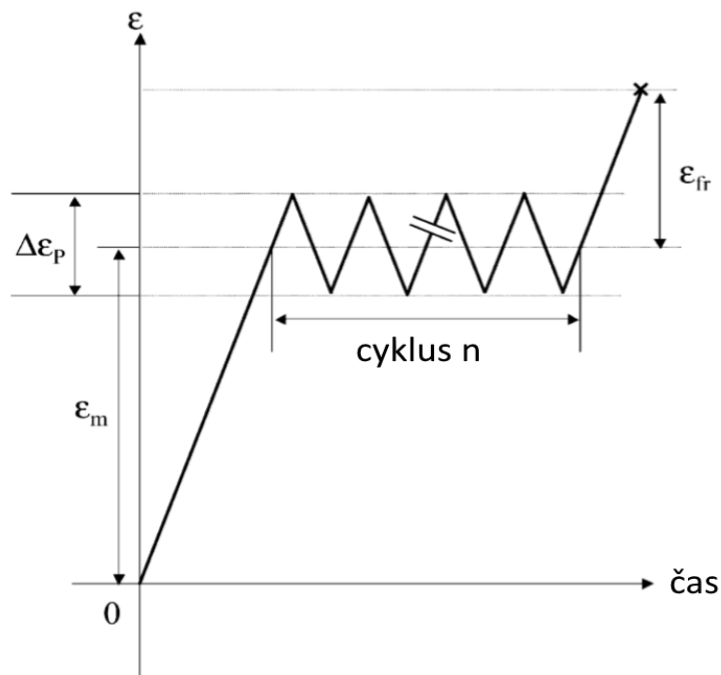
$$D_c = \frac{\Delta|\epsilon_p \cdot n^{a'}}{C'} \quad (3.32)$$

Kde $a' = \frac{1}{\gamma}$ a $C' = \left(\frac{1}{B} \ln \frac{l_f}{l_0} \right)^{1/\gamma}$ sú materiálové konštanty získané substitúciou zo vzťahu pre rast trhlín:

$$\frac{dl}{dn} = B \cdot \Delta\epsilon_p^\gamma \cdot dn, \quad (3.33)$$

kde B a γ sú materiálové konštanty a l je dĺžka trhliny. Získavame nový vzťah pre kritérium poškodenia:

$$1 - D_d = D_c, \quad (3.34)$$



Obr. 3.6: Schematický diagram deformácie pre testy húževnatosti.[10]

ktorý má po dosadení tvar:

$$\frac{\epsilon_{pmax}}{\epsilon_f} + 4n \left(\frac{\Delta\epsilon_p}{2\epsilon_f} \right)^{a'} + \frac{\Delta|\epsilon_p \cdot n^{a'}}{C'} = 1. \quad (3.35)$$

Ďalším dosadzovaním dostaneme finálny vzťah v tvare:

$$\frac{\epsilon_{fr}}{\epsilon_f} = 1 - \frac{\epsilon_m}{\epsilon_f} - 4n \left(\frac{\Delta\epsilon_p}{2\epsilon_f} \right)^{a'} \quad (3.36)$$

3.1.4 Model predpovede životnosti podľa Tateishiho a kolektívu

Tateishi a kolektív vychádzajú s rovnakého vzťahu ako Hatanaka: $\Delta\epsilon_p N_f^a = C$, a z Minerovho vzťahu pre kritérium poškodenia:

$$D_{Miner} = \sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1, \quad (3.37)$$

kde n_i je počet cyklov a N_i je únavová životnosť.

Ďalej vychádza zo vzťahu pre kritérium húževnatého a cyklického poškode-

nia:

$$D_{ductile} = \frac{D}{D_c} = \frac{\epsilon_{max} - \epsilon_{pD}}{\epsilon_{pR} - \epsilon_{pD}}, \quad (3.38)$$

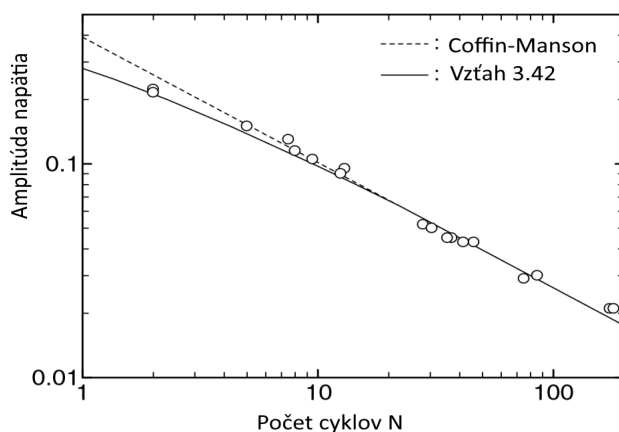
kde D je premenná poškodenia, D_c je kritické poškodenie pri iniciácii trhliny, ϵ_{max} je maximálna hodnota napätia, ϵ_{pR} je napätie pri lome a ϵ_{pD} je prah napätového poškodenia v ťahu. Vzťah pre cyklické poškodenie má vzťah:

$$D_{cyclic} = \sum_i \frac{n_i - N_0}{N_i - N_0}, \quad (3.39)$$

$$N_0 = \frac{pD}{2\Delta\epsilon}, \quad (3.40)$$

$$pD = \epsilon_{pD} \frac{\sigma_u - \sigma_f}{\sigma_M - \sigma_f}, \quad (3.41)$$

kde N_0 je počet cyklov pri ktorom začne nuklácia trhlín, $\Delta\epsilon$ je rozsah napätia (dvojnásobok amplitúdy napätia), σ_u je pevnosť v ťahu, σ_f je limit únavového namáhania a σ_M je ekvivalentné namáhanie podľa von Misesa.



Obr. 3.7: Porovnanie Manson-Coffinovo a Tateishiho vzťahu pre oblasť ELCF oceli.[11]

Pomocou predchádzajúcich rovníc môžeme únavové poškodenie vyjadriť ako:

$$D = D_{cyclic} + D_{ductile} = \begin{cases} \sum_i \frac{n_i}{N_i} + \frac{\epsilon_{max} - \epsilon_{pD}}{\epsilon_{pR} - \epsilon_{pD}} ak \Delta\epsilon_{max} > \epsilon_{pD} \\ \sum_i \frac{n_i}{N_i} ak \Delta\epsilon_{max} \leq \epsilon_{pD} \end{cases} \quad (3.42)$$

Pre praktické využitie je príhodne vyjadriť model pomocou ekvivalentnej deformácie ϵ_{eq} :

$$\epsilon_{eq} = \left(\frac{\sum_i \epsilon_i^{1/k} \cdot N_i}{N} \right)^k \quad (3.43)$$

kde $N = \sum N_i$. Potom môžeme vyjadriť finálny vzťah v tvare:

$$\begin{aligned} \epsilon_{eq} \cdot N^k &= C \cdot C_m \\ C_m &= \begin{cases} \left(\frac{\epsilon_f - \Delta\epsilon_{max}}{\epsilon_f - \epsilon_{pD}} \right)^k & ak \Delta\epsilon_{max} > \epsilon_{pD} \\ 1.0 & ak \Delta\epsilon_{max} \leq \epsilon_{pD} \end{cases} \end{aligned} \quad (3.44)$$

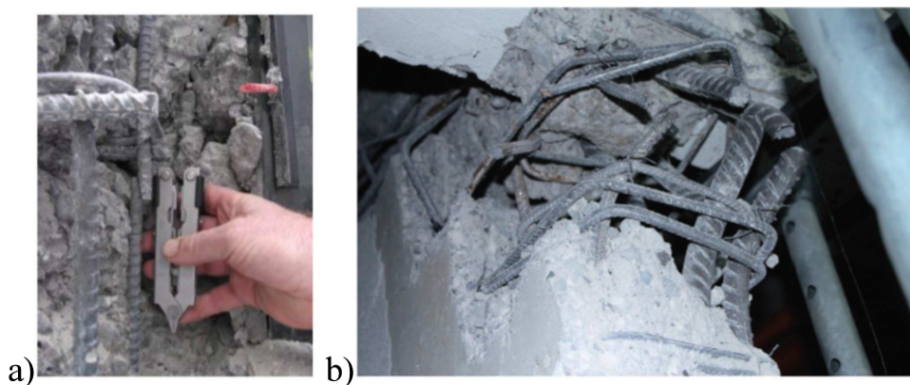
kde C_m je koeficient poškodenia ťahom.

3.2 Dopad extrémne nízkocyklovej únavy v praxi

Zemetrasenia vyvolávajú záťažové cykly na konštrukciách budov na základe dynamických vlastností ich konštrukčných systémov a parametrov pohybu zeme. Vzhľadom na cyklickú povahu zataženia pri zemetraseniach sa očakáva strata pevnosti a tuhosti u dôležitých štruktúrnych prvkov budov, čo má za následok kumulatívne zníženie životnosti. Počet záťažových cyklov vyvolaných zemetraseniami je relatívne malý (pod 10^3 cyklov), teda spadá pod oblasti ELCF a LCF.

V dnešnej dobe sú železobetónové konštrukcie navrhované tak, aby sa energia rozptýlila pomocou tvárnej neelastickej ohybovej odozvy na špeciálne navrhnutých nosníkoch, ktoré sú schopné zvládnuť veľkú plastickú deformáciu. Na základe experimentálnych štúdií boli zistené 3 typy železobetónových konštrukcií:

1. Roztrhnutie pozdĺžnych výstužných ocelových tyčí v dôsledku nízko-cyklovej únavy
2. Lom priečnej výstuže, ktorá vedie k porušeniu uzavretého betónového jadra
3. Kompresné vzpieranie pozdĺžnych výstužných tyčí



Obr. 3.8: Zlyhanie v dôsledku nízko-cyklovej únavy, (a) roztrhnutie zvislých výstuží betónu na Novom Zélande, (b) roztrhnutie hlavnej výstuže na konci steny, Chile[12]

Najväčší vplyv na zlyhanie vystužených betónových konštrukcií má celkový počet záťažových cyklov, ktorými daná konštrukcia prešla. Posledné dva druhy zlyhania sa dajú obmedziť správnym návrhom konštrukcie, avšak poškodeniu výstuže v dôsledku únavy materiálu zabrániť nedokážeme. To má za následok stratu kapacity rozložiteľnej energie sústavy a pevnosti konštrukcie vystavenej ďalšiemu zaťažovaniu.[12]

Podobne ako zemetrasenia, aj ďalšie prírodné úkazy ako napríklad vietor alebo príliv a odliv tiež spôsobujú vysokoamplitúdové cyklické zaťažovanie, pri ktorom dochádza ku zlyhaniu behom 10 až 20 cyklov. Najviac postihnuté

sú súčasti navrhované na pohltenie energie rozdelením plastickej deformácie.[23]

V oblasti ťažobného priemyslu sú používané stroje obrovských rozmerov. Ich veľké rozmery a hmotnosť presahujúca až pár tisíc ton spoločne s vonkajšou záťažou spôsobujú nízkofrekvenčnú záťaž, podliehajú nízkocyklovej únave. Nesprávny dizajn a operačné podmienky častokrát vedú ku katastrofálnym zlyháním. V súčasnosti sa pracuje na nových, presnejších predpovediach únavovej životnosti aby sa predišlo nehodám. [15]

S extrémne nízkocyklovou únavou sú tiež spájané húževnaté lomy súčastí motorov lietadiel a turbín v oblasti energetiky. ELCF spôsobuje poškodenie pri častom zapínaní a vypínaní plynu v plynom poháňaných turbínach. Je tiež častým mechanizmom zlyhania plášťu motoru pri vypadnutí listu rotoru, ktoré môže byť spôsobené nárazom cudzieho objektu do turbíny.[14]

Kapitola 4

Ciele práce

Práca je zameraná na nájdenie správnej funkcie popisujúcej únavovú životnosť horčíkovej zliatiny v oblasti ELCF. V experimente bola použitá horčíková zliatina AZ61 v stave po odliatí (bez tepelného spracovania).

Ciele bakalárskej práce:

- Stanovenie základných štruktúrnych a mechanických parametrov zliatiny AZ61
- Stanovenie extrémne nízkych únavových životností pomocou servohydraulického testovacieho systému Instron 8801 a ich následná interpretácia
- Posúdenie vplyvu nameraných dát na zmeny regresných kriviek popisujúcich celú oblasť únavovej životnosti.

Kapitola 5

Stanovenie základných štruktúrnych a mechanických parametrov zliatiny AZ61

Horčíková zliatina AZ61, má vysokú pevnosť v ťahu, vynikajúcu koróznou odolnosť a je odolná voči hrubnutiu zrna aj po žíhaní. Odlievajú sa z nej plechy hrúbky 0,5 až 4 mm a z tých sa ďalej vyrábajú napríklad kryty na mobilné telefóny, počítače.

Experimentálne meranie bolo prevedené na horčíkovej zliatine AZ61 vyrobenej metódou squeeze casting v ZFW GmbH Clausthal vo forme rondelov s rozmermi 200 mm v priemere a 40 mm na výšku. Plniaci tlak bol 97 MPa a tuhnutie prebiehalo pri tlaku 150 MPa. Jej chemické zloženie zistené pomocou optického emisného spektrometru Spectrumat GDS 750:

Prvok [%]	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Ni	Zr	Sn, Cu, Pb	Mg
AZ61	5,2	0,99	0,42	0,013	0,003	0,01	0,01	max 0,01	93,3

Tabuľka 5.1: Chemické zloženie zliatiny AZ61

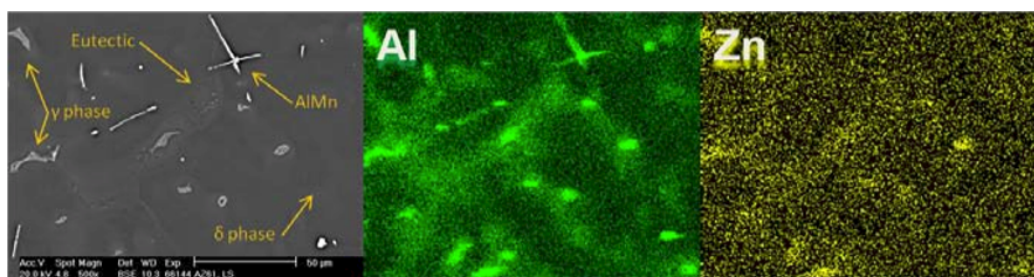
Prvok [%]	Al	Zn	Mn	Si	Cu
AZ61	5,8-7,2	0,4-1,5	<0,15	<0,1	<0,05
Prvok [%]	Ni	Fe	ostatné	Mg	∅
AZ61	<0,005	<0,005	<0,3	zbytok	∅

Tabuľka 5.2: Chemické zloženie zliatiny AZ61 dané normou ASTM[24]

V tabuľke 5.1 je uvedené chemické zloženie zliatiny použitej pri mechanických a únavových skúškach. Oproti normou udávaným hodnotám (tabuľka 5.2) má zliatina nižší obsah hliníku a vyšší obsah mangánu a niklu. Hlavný legujúci prvok je pod spodnou hranicou udávanou normou ASTM.

5.1 Mikroštruktúra zliatiny AZ61

Mikroštruktúra zliatiny s popisom jednotlivých štruktúrnych zložiek je zobrazená na obrázku 5.1 pomocou REM (Rastrovací elektrónový mikroskop). Taktiež je možné vidieť rozloženie Al a Zn zobrazených pomocou SEM EDS (Skenovacia elektrónová mikroskopia a röntgenová spektroskopia). Štruktúra zliatiny je tvorená tuhým roztokom δ , intermetalickou γ fázou ($Mg_{17}Al_{12}$), eutektikom ($\delta + \gamma$) v medzidendritických priestoroch a častíc AlMn.



Obr. 5.1: Mikroštruktúra a rozloženie prvkov AZ61 po odliatí[1]

Mikroštruktúra zliatiny bola publikovaná v článku [20]. Častice AlMn na hraniciach zŕn (obrázok 5.1) spôsobujú zhoršenie pevnostných charakteristík zliatiny. Je to viditeľné na diagrame monotónnych skúšok na obrázku 5.2, kde sú hodnoty medze pevnosti pri ťahovej skúške oveľa menšie ako pri skúške tlakovej. Modul pružnosti však zostáva rovnaký.

5.2 Mechanické vlastnosti zliatiny AZ61

Testovanie zliatiny bolo uskutočnené v laboratóriách fakulty strojného inžinierstva v Brne. Všetky namerané hodnoty pochádzajú z nepublikovaných materiálov. Ing. Josefa Zapletala Ph.D. a Ing. Pavla Doležala Ph.D..

Skúšky ťahom prebiehali pomocou počítačom riadeného trhacieho stroja Zwick Roell pri izbovej teplote. Bola udržiavaná konštantná rýchlosť pozdĺžnej deformácie $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Skúšky boli vykonané na valcových skúšobných tyčiach s rozmermi $d_0=6 \text{ mm}$, $L_0=30 \text{ mm}$. Metodika skúšania je v súlade s normou EN ISO 6892-1 a DIN 50125. Výsledné hodnoty sú priemerami z troch meraní.

Zliatina	E [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
AZ61	42,9	73	175	5,0

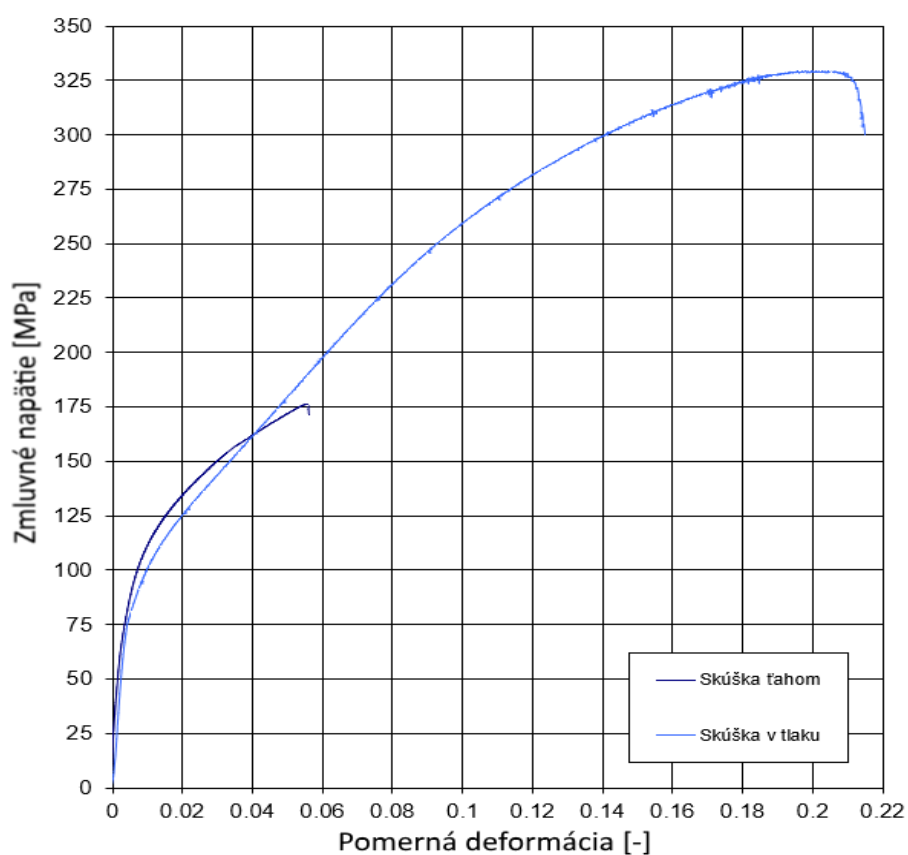
Tabuľka 5.3: Mechanické vlastnosti zliatiny AZ61 získané ťahovou skúškou pri izbovej teplote

Skúšky tlakom prebiehali pomocou počítačom riadeného servohydraulického systému Instron 8801 pri izbovej teplote. Bola udržiavaná konštantná rýchlosť pozdĺžnej deformácie $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Skúšky boli vykonané na valcových skúšobných tyčiach s rozmermi $d_0=8 \text{ mm}$, $H_0 = 12 \text{ mm}$ v súlade s normou ASTM E9-89. Výsledné hodnoty sú priemerami z troch meraní.

Zliatina	σ_y [MPa]	σ_u [MPa]	ϵ_c [%]
AZ61	81	325	20,5

Tabuľka 5.4: Mechanické vlastnosti zliatiny AZ61 získané skúškou v tlaku pri teplote 23° C

Namerané hodnoty zo skúšky pevnosti v ťahu a tlaku sú uvedené v tabuľkách 5.3 a 5.4, ich diagram je na obrázku 5.2. Vysoký rozdiel medzi hodnotami pevnosti v ťahu a tlaku je spôsobený mikroštruktúrou a rozdielnym módom zaťažovania. Mechanické vlastnosti zliatiny boli testované aj v článku [20] a výsledky meraní sú porovnateľné. Medza klzu je pri oboch módoch monotónneho zaťažovania približne rovnaká a v súlade s normálnymi hodnotami pre danú zliatinu. Kontrakcie neboli zmerané. Pevnostné charakteristiky zliatiny by sa dali zlepšiť tepelným spracovaním (rozpušťačie žihanie).



Obr. 5.2: Diagram ťahovej a tlakovej skúšky zliatiny AZ61

Kapitola 6

Stanovenie extrémne nízkych únavových životností

Cielom únavových skúšok bolo získanie dát zliatiny AZ61 pre oblasti ELCF. Pre oblasť ELCF bolo použitých 6 vzoriek. Taktiež prebehli únavové skúšky v oblasti LCF, aby bolo vidieť odklon krivky životnosti v oblasti ELCF od Coffin-Mansonovho vzťahu.

Cyklické skúšky prebiehali pomocou počítačom riadeného servohydraulického systému Instron 8801 pri izbovej teplote. Skúšky boli riadené v móde konštantnej celkovej deformácie s parametrom symetrie $R_\epsilon = -1$. Bola udržiavaná konštantná rýchlosť pozdĺžnej deformácie $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-3}/s$. Skúšky boli vykonané na valcových skúšobných tyčiach s rozmermi $d_0=7$ mm, snímanie deformácie pomocou extenzometru na dĺžke $L_0 = 12,5$ mm.

Č. vzorku	ϵ_a [-]	N_f	σ_a [MPa]	ϵ_{ap} [-]	E_{eff} [GPa]	f [Hz]	$N_f/2$ [-]
1	0,010	312	150,36	0,0049	32,77	0,125	157
2	0,015	69	170,83	0,0092	32,50	0,083	36
3	0,020	23	181,97	0,0136	30,71	0,062	11
4	0,025	8	196,50	0,0179	31,36	0,050	4
5	0,030	7	213,50	0,0227	32,80	0,041	3
6	0,035	2	212,00	0,0276	30,68	0,035	2

Tabuľka 6.1: Namerané a dopočítané experimentálne hodnoty v oblasti ELCF

Č. v.	ϵ_a [-]	N_f	σ_a [MPa]	ϵ_{ap} [-]	E [GPa]	f [Hz]	$N_f/2$ [-]
1	0,0041	6597	120	0,00096	42,63	3	3099
2	0,0034	10981	110	0,00068	43,58	3	5457
3	0,0030	11883	100	0,00052	40,06	3	5943
4	0,0024	20385	90	0,00033	43,70	3	10192
5	0,0021	21802	80	0,00025	342,92	3	10901
6	0,0016	309702	70	0,00012	43,45	20	142365
7	0,0013	350976	60	0,00003	43,06	20	184108
8	0,0011	1178289	50	0,00001	42,94	20	589145

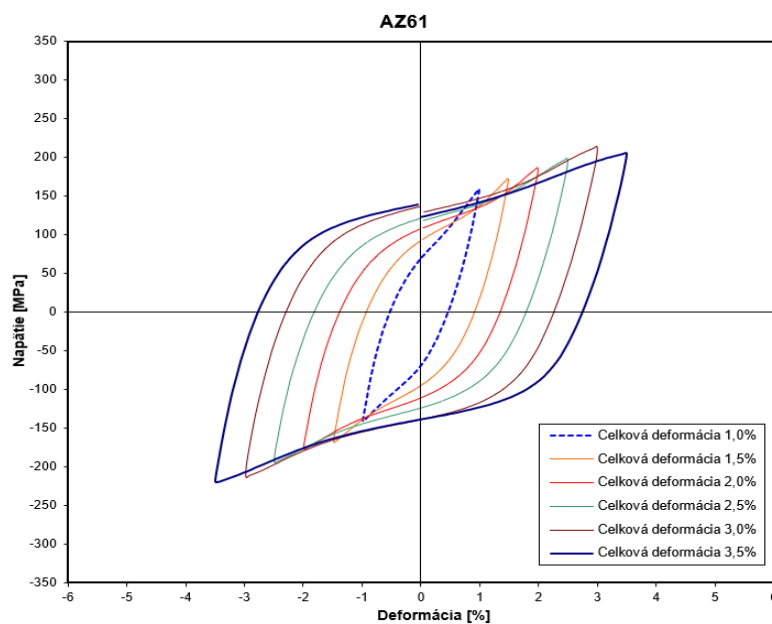
Tabuľka 6.2: Namerané a dopočítané experimentálne hodnoty v oblasti LCF

Frekvencia f bola stanovená pomocou vzťahu: $f = \dot{\epsilon}/4\epsilon_a$, amplitúda napätia σ_a je polovicou rozptylu napätia a efektívny modul pružnosti E_{eff} je priemernou hodnotou nameraných modulov pružnosti pri odľahčovaní materiálu. V oblasti LCF bol modul pružnosti stanovený pri sile 800 N.

Experimentálne namerané hodnoty únavových životnosti od prvého polcyklu do počtu cyklov do lomu 10^6 zliatiny sú uvedené v tabuľkách 6.1 a 6.2 a vynesené na obrázku 6.4. Pri meraní dát v oblasti LCF meranie pokračovalo až do začiatku vysokocyklovej oblasti. Frekvencia pri únavovej skúške bola zvýšená na 20 Hz, aby meranie trvalo rozumnú dobu.

6.1 Hysterézne slučky

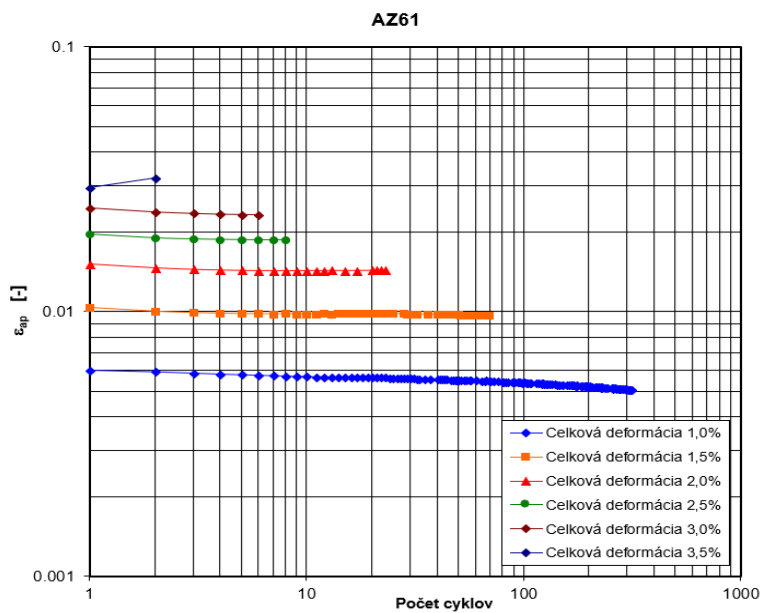
Pomocou únavových skúšok bolo pre zliatinu AZ61 stanovených 6 hysterézných slučiek, ktoré sú vynesené na obrázku 6.1. Každá zo slučiek je pre určitú celkovú deformáciu. V priebehu cyklického zatažovania dochádzalo s narastajúcim počtom cyklov ku nárastu amplitúdy napätia, zvyšovalo sa napätie potrebné k dosiahnutiu rovnakej deformácie.



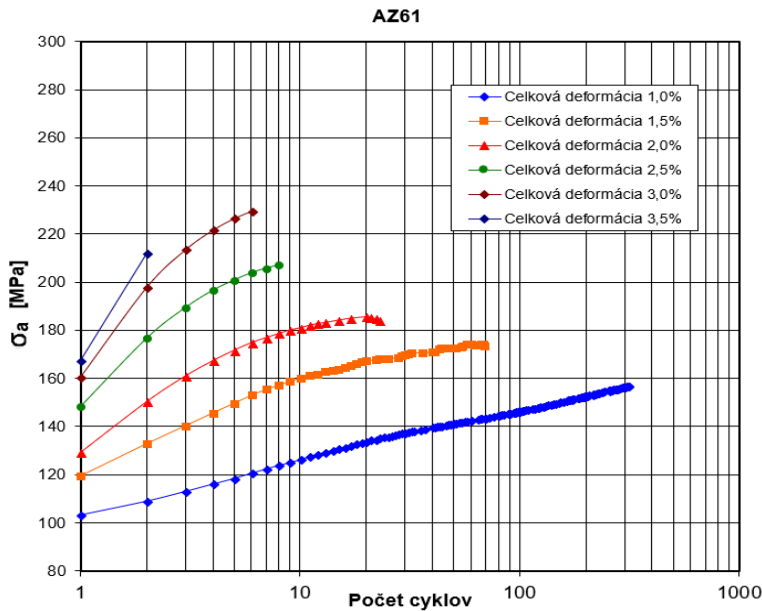
Obr. 6.1: Hysterézne slučky zliatiny AZ61 v $N_f/2$

6.2 Krivky cyklického spevnenia/zmäkčenia

Cyklické deformačné krivky boli vytvorené na základe odčítania z hysterézných slučiek v polovici počtu cyklov do lomu. Sú zobrazené na obrázkoch 6.2 a 6.3. Hodnoty materiálových charakteristík potrebných na vykreslenie kriviek cyklického spevnenia/zmäkčenia sú uvedené v tabuľke 6.1. Z ich priebehu plynie, že pre všetky amplitúdy celkovej deformácie skúšaný materiál cyklicky spevňuje v priebehu celého únavového života a nedochádza u neho k saturácii.



Obr. 6.2: Krivky cyklického spevnenia/zmäkčenia - plastická odozva zliatiny AZ61



Obr. 6.3: Krivky cyklického spevnenia/zmäkčenia - napätová odozva zliatiny AZ61

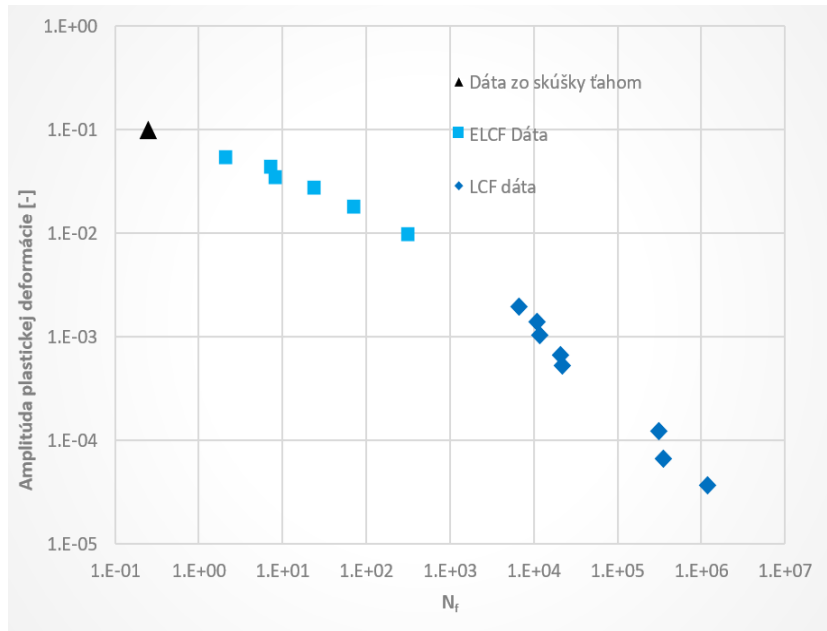
Kapitola 7

Predpoved' únavovej životnosti zliatiny pomocou parametrických regresných funkcií

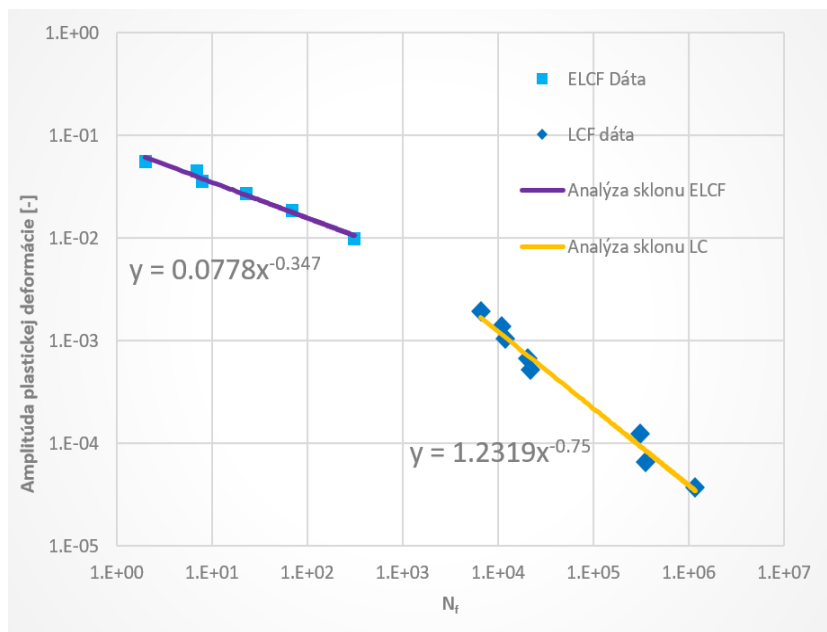
Z nameraných dát získaných únavovými skúškami sme získali priebeh kriviek životnosti pre celú oblasť únavy materiálu od prvého polcyklu až do začiatku vysokocyklovej únavy. Cieľom kapitoly je pomocou regresnej analýzy nájsť takú funkciu, ktorá bude schopná pomocou materiálových parametrov predpovedať životnosť daného materiálu tak, aby bol jej odklon od nameraných dát čo najmenší.

7.1 Únavová životnosť zliatiny v oblasti ELCF a LCF

Na obrázku 7.1 sú zobrazené experimentálne namerané hodnoty únavovej životnosti horčíkovej zliatiny AZ61 v oblasti ELCF a LCF doplnené o dáta z ťahovej skúšky. Hodnoty pre LCF a ELCF sú na obrázku 7.2 preložené funkciami reprezentujúcimi krivky životnosti v príslušných únavových oblastiach. Na obrázku 7.2 je viditeľné, že sklony kriviek životnosti v oboch oblastiach nízkokycklovej únavy sú rozdielne. ELCF dáta, narozdiel od LCF hodnôt, smerujú k hodnote amplitúdy plastickej deformácie získanej pomocou mechanickej skúšky v ťahu.



Obr. 7.1: Experimentálne namerané dáta celej oblasti nízkocyklovej únavy



Obr. 7.2: Namerané dáta v obidvoch oblastiach preložené funkciami a znázornenie rozdielu ich sklonov

7.2 Coffin-Mansonova krivka

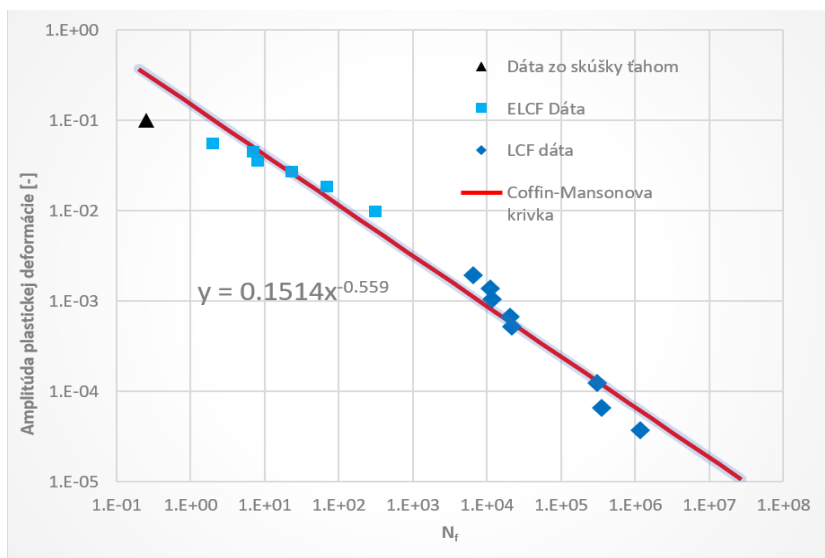
Coffin-Mansonovu krivku pre skúšanú zliatinu AZ61 získame pomocou mocninnej regresnej analýzy experimentálne nameraných dát. Pracujeme z funkciou v tvare:

$$\epsilon_{ap} = \epsilon_0 \cdot (N)^b, \quad (7.1)$$

pre celé cykly (prípadný prepočet na polcykly ne je problémom). Sklon funkcie vyjadríme dodatočnými materiálovými parametrami. ϵ_0 je únavová pevnosť materiálu a b je exponent únavovej pevnosti. Obe tieto materiálové parametre získame prostredníctvom metódy najmenších štvorcov. Výsledné hodnoty parametrov sú uvedené v tabuľke 7.1. Coffin-Mansonova krivka je spolu s experimentálne nameranými hodnotami zobrazená na obrázku 7.3.

ϵ_0	b
0,1514	-0,5591

Tabuľka 7.1: Nakalibrované hodnoty materiálnych parametrov pre Coffin-Mansonovu krivku



Obr. 7.3: Porovnanie únavovej životnosti predpovedanej Coffin-Mansonovou krivkou a skutočne nameraných dát

Z obrázku 7.3 je zrejmé, že Coffin-Mansonova krivka sa v oblasti extrémne nízkočyklovej únavy odkláňa od nameraných dát a výrazne nadhodnocuje únavovú životnosť v danej oblasti. Pre správnu predpoveď životnosti je treba použiť iný, presnejší vzťah.

7.3 Predpoveď ELCF životnosti pomocou dvojparametrickej regresnej funkcie podľa Xue-a

..

Pre celkovú predpoveď životnosti v oblasti od prvého polcyklu do počtu cyklov do lomu 10^6 budeme vychádzať z regresnej funkcie vytvorenej L. Xue-om, ktorá má tvar:

$$N = \frac{1}{2} \frac{e^\lambda - 1}{e^{\lambda \left(\frac{\Delta\epsilon_p}{\epsilon_f}\right)^m} - 1}. \quad (7.2)$$

Použijeme k nej inverznú funkciu:

$$\Delta\epsilon_p = \epsilon_f \left[\frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{e^\lambda - 1}{2N} + 1 \right) \right]^{\frac{1}{m}} \quad (7.3)$$

Aby bola táto funkcia použiteľná pre regresiu, musíme ju vyjadriť v logaritmickom tvare:

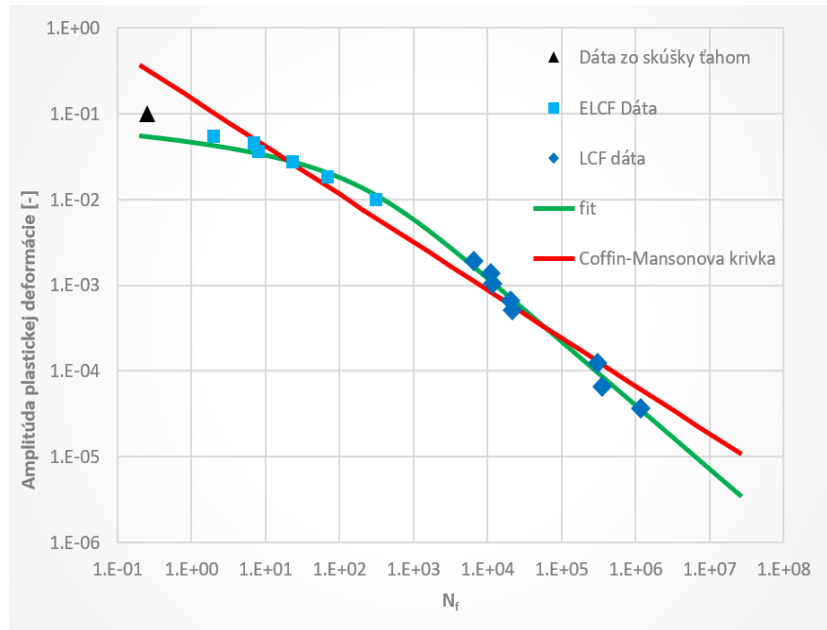
$$\log \Delta\epsilon_p = \frac{1}{m} \log \left[\frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{e^\lambda - 1}{2N} + 1 \right) \right] + \log \epsilon_f \quad (7.4)$$

Pomocou experimentálne nameraných únavových životností a metódy najmenších štvorcov a získame materiálové konštanty λ a m , ktorých hodnoty sa nachádzajú v tabuľke 7.2.

λ	m
6,82	1,34

Tabuľka 7.2: Hodnoty materiálových parametrov pre funkciu L. Xue-a

Známé hodnoty materiálových parametrov dosadíme do Xue-ovej funkcie pre počty cyklov v rozsahu celej oblasti nízkokycklovej únavy. Vykreslená funkcia spolu s nameranými dátami a Coffin-Mansonovou krivkou sa nachádza na obrázku číslo 7.4.



Obr. 7.4: Regresná funkcia podľa L. Xue-a popisujúca celú oblasť nízkokycklovej únavy spolu s Coffin-Mansonovou krivkou

Regresná funkcia podľa Xue-a zachycuje konkávny priebeh nameraných dát v oblasti ELCF, a zároveň prijateľne popisuje oblasť nízkokycklovej únavovej životnosti od prvého polcyklu do 10^6 cyklov do lomu.

Kapitola 8

Závery práce

Na základe elektrónovej mikroskopie, hodnotenia mikroštruktúry, testovania mechanických vlastností stanovených ťahovou a tlakovou skúškou, analýzy cyklickej napätovej odozvy, výsledkov experimentálneho merania nízko-cyklovej a extrémne nízko-cyklovej únavovej životnosti a regresnej analýzy nameraných dát horčíkovej zliatiny AZ61 boli vyvodené nasledujúce závery:

- Opticko emisná spektrometria preukázala, že zliatina obsahuje oproti norme menší obsah hliníku a vyšší obsah mangánu a niklu.
- Mikroštruktúra materiálu je tvorená tuhým roztokom δ , intermetalickou γ fázou ($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$), eutektikom ($\delta + \gamma$) v medzidendritických priestoroch a častic AlMn.
- Hodnota medze pevnosti v ťahu pre zliatinu AZ61 R_m je 175 MPa, zmluvná medza klzu $R_{p0,2}$ je 73 MPa, medza pevnosti v tlaku σ_u je 325 MPa a medza klzu v tlaku σ_y je 81 MPa.
- Z cyklických deformačných kriviek jasne vyplýva, že materiál cyklicky spevňuje pre všetky amplitúdy celkovej deformácie.
- Pomocou mocninnej regresnej analýzy dát získaných únavovými skúškami boli stanovené konštanty Coffin-Mansonovho vzťahu. Odklon krivky životnosti od nameraných hodnôt je výrazný, Coffin-Mansonova krivka výrazne nadhodnocuje životnosť zliatiny v oblasti extrémne nízko-cyklovej únavy.
- Pre lepšiu predpoveď životnosti zliatiny bola použitá dvojparametrická regresná funkcia podľa L. Xue-a, ktorej materiálové konštanty boli taktiež získané pomocou regresnej analýzy nameraných dát. Regresná funkcia podľa Xue-a prijateľne popisuje celú oblasť životnosti od prvého polcyklu do 10^6 cyklov do lomu.

Literatúra

- [1] ZAPLETAL, J., DOLEŽAL, P., GEJDOŠ, P., HORYNOVÁ, M. *Influence of heat treatment on microstructure and fatigue behavior of AZ61 magnesium alloy*. Acta Metallurgica Slovaca.
- [2] SURESH, S. *Fatigue of materials*. 2. vyd. Cambridge University Press, 1991. 679 s. ISBN 0 521 57046 8
- [3] KLESNIL, M., LUKÁŠ, P. *Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání*. Academia Praha, 1975. 224s.
- [4] *Introduction to Fatigue* TECHNICAL TIDBITS, Issue No. 52, April 2013
- [5] POLÁK, J. *Cyklická plasticita a nízkocyklová únavová odolnost kovových materiálů*. Academia Praha, 1986. 135s
- [6] ZAPLETAL, J. *Nízkocyklové a vysokocyklové únavové vlastnosti ADI*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 100 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Stanislav Věchet, CSc..
- [7] *MatNet Výskumno-vývojová a inovačná sieť pre oblasť materiálov a technológií*. [online]. 2000 [citované 2018-24-04]. Dostupné z: <<http://www.matnet.sav.sk/>>.
- [8] BOKŮVKA, O., NOVÝ, F. *Únavová životnosť konštrukčných materiálov v oblasti vysokého a ultravysokého počtu cyklov zatažovania* Letná škola únavy materiálov 2006, Žilina-Strečno
- [9] XUE, L. *A unified expression for low cycle fatigue and extremely low cycle fatigue and its implication for monotonic loading*. International Journal of Fatigue 30 (2008) 1691-1698
- [10] KURODA, M. *Extremely low cycle fatigue life prediction based on a new cumulative fatigue damage model*. International Journal of Fatigue 24 (2001) 699-703

- [11] TATEISHI, K., HANJI, T., MINAMI, K. A. *A prediction model for extremely low cycle fatigue strength of structural steel*. International Journal of Fatigue 27 (2007) 887-896
- [12] MANTAWY, A., ANDERSON, J. C. *Earthquake damage potential due to low-cycle fatigue in R.C. moment frame buildings*. Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering Frontiers of Earthquake Engineering July 21-25, 2014 Anchorage, Alaska
- [13] POLÁK, J., HELEŠIČ, J., KLESNIL, M. *Effect of elevated temperatures on the low cycle fatigue of 2.25Cr-1Mo steel Part I: constant amplitude straining. Low cycle fatigue*. ASTM STP 942, Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1988. p. 43-57.
- [14] ALGAMI, M. S., JIA, Y. KARL, J., GORDON, A. P., BAI, Y. *Linkage between ductile fracture and extremely low cycle fatigue of inconel 718 under multiaxial loading conditions*. TMS2015 Annual Meeting Supplemental Proceedings TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2015 Department of Mechanical & Aerospace Engineering, University of Central Florida.
- [15] PIETRUSIAK, D., MOCZKO, P., SMOLNICKI, T., RUSINSKI, E. *Identification of low cycle dynamic loads acting on heavy machinery* Faculty of Mechanical Engineering – Wrocław University of Science and Technology, Procedia Engineering 199 (2017) 254–259
- [16] DU, M., LI, G., ZHANG, Y., FANG, W. *Fracture behavior of axisymmetric bars under high triaxial stress and large strain cyclic loading*. Fat Fract Engng Mater Struct 1992;15:1009–24.
- [17] GONDA METAL, *Magnesium alloy sheets*. [online]. 2008 [citované 2018-16-05]. Dostupné z: <http://gondametal.co.jp/en/product_mag/magnesium_alloy_sheets/>.
- [18] WANG, Q., KHAN, M. K., BATHIAS, C. *Current understanding of ultra-high cycle fatigue* THEORETICAL & APPLIED MECHANICS LETTERS 2, 031002 (2012)
- [19] *Fracture Control Program*. [online]. 2018 [citované 2018-22-05]. Dostupné z: <<http://fcp.mechse.illinois.edu/>>.

- [20] HORYNOVÁ, M., DOLEŽAL, P., GEJDOŠ, P., ZAPLETAL, J., JANOVÁ, D. *Influence of heat treatment on mechanical properties and microstructure of AZ61 magnesium alloy*. Transaction of the VŠB-Technical university of Ostrava, Mechanical series. 2010. LVI(2). p. 73–82. ISSN 1210-0471.
- [21] ZAPLETAL, J., NĚMCOVÁ, A., GEJDOŠ, P. *The Study of Low Cyclic Behaviour of AZ61 Magnesium Alloy*. 2010. LVI(2). p. 225–231. ISSN 1210-0471.
- [22] POLÁK, J. *Cyclic Deformation, Crack Initiation, and Low-cycle Fatigue*. Comprehensive structural integrity. 1st ed. Boston: Elsevier/Pergamon, 2003. ISBN 00804415059.
- [23] DE CASTRO e SOUSA, A., NUSSBAUMER, A. *Ultra low cycle fatigue of welded steel joints under multiaxial loading*. Resilient Steel Structures Laboratory - RESSLAB, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne
- [24] HOUSH, S.; MIKUCKI, B.; STEVENSON, A. *ASM Metals Handbook Volume 02 : Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special Purpose Material. 2*. Materials Park OH : ASM International, 1990. 3470 s. ISBN 0-87170-378-5.

Kapitola 9

Zoznam použitých skratiek a symbolov

ELCF	Extrémne nízkocyklová únava
PSP	Perzistentné sklzové pásy
PSS	Perzistentné sklzové stopy
σ_a	Amplitúda napätia [-]
ϵ_{at}	Amplitúda celkovej deformácie [-]
ϵ_{ae}	Amplitúda elastickej deformácie [-]
ϵ_{ap}	Amplitúda plastickej deformácie [-]
σ	Napätie [MPa]
ϵ	Deformácia [-]
K'	koeficient cyklického spevnenia [-]
n'	exponent cyklického spevnenia [-]
K_a	Súčiniteľ intenzity napätia [-]
A	Materiálová konštanta [-]
m	Materiálová konštanta (Xue) [-]
N_f	Počet cyklov do lomu [-]
σ_c	Medza únavy [MPa]
σ_m	Stredné napätie [MPa]
N_c	Počet cyklov, za ktorým začína trvalá únavová pevnosť [-]

σ'_f	Súčiniteľ únavovej pevnosti [-]
b	Exponent únavovej pevnosti [-]
ϵ_f	Skutočná materiálová deformácia [-]
E	Modul pružnosti [GPa]
N_i	Počet cyklov potrebných k iniciácii únavovej trhliny [-]
UHCF	Gigacyklová únava
LCF	Nízkocyklová únava
HCF	Vysokocyklová únava
D	Skalárna veličina vyčísľujúca integritu materiálu [-]
$\Delta\epsilon_p$	Amplitúda plastickej deformácie [-]
n	Aktuálny počet cyklov [-]
C	Materiálová konštanta [-]
k	Materiálová konštanta [-]
R	Pomer minimálnej a maximálnej plastickej deformácie[-]
ϵ_{pmax}	Maximálna hodnota plastickej deformácie [-]
ϵ_d	Ekvivalentné plastické skreslenie [-]
$\epsilon_{1,2,3}$	Hlavné časti tenzoru napätia [-]
ϵ_c	Kritická plastická deformácia [-]
λ	Parameter poškodenia (Xue) [-]
$\Delta\epsilon_{ps}$	Veličina s extrapoláčnymi vlastnosťami [-]
a	Parameter približovania [-]
D_s	Statické poškodenie [-]
D_c	Cyklické poškodenie [-]
ϵ_d^0	Radiálne deformácia v prvom zaťažovacom cykle [-]
$\Delta\bar{\epsilon}_d$	Priemerný rozsah radiálnej deformácie [-]
D_t	Poškodenie spôsobené napínaním v ťahu [-]
D_d	Poškodenie vyčerpaním ťažnosti [-]
D_c	Poškodenie šírením trhlín [-]
a'	Materiálová konštanta [-]

C'	Materiálová konštanta [-]
γ	Materiálová konštanta [-]
B	Materiálová konštanta [-]
D_{miner}	Minerovo kritérium poškodenia [-]
$D_{ductile}$	Kritérium húževnatého poškodenia [-]
D_{cyclic}	Kritérium cyklického poškodenia [-]
N_0	Počet cyklov, pri ktorom začne nukleácia trhlín [-]
p_D	Prah poškodenia [-]
$\Delta\epsilon$	Rozsah napätia [-]
σ_u	Pevnosť v tlaku [MPa]
σ_f	Limit únavového namáhania [MPa]
σ_M	Ekvivalentné namáhanie podľa von Misesa [MPa]
C_m	Koeficient poškodenia ťahom [-]
REM	Rastrovací elektrónový mikroskop
SEM EDS	Skenovacia elektrónová mikroskopia a röntgenová spektroskopia
R_ϵ	Parameter symetrie [-]
$\dot{\epsilon}$	Rýchlosť pozdĺžnej deformácie [s^{-1}]
d_0	Priemer skúšobnej tyče [mm]
L_0	Dĺžka skúšobnej tyče [mm]
$R_{p0,2}$	Medza klzu [MPa]
R_m	Medza pevnosti [MPa]
A	Ťažnosť [%]
$\dot{\epsilon}$	Rýchlosť pozdĺžnej deformácie [s^{-1}]
H_0	Výška skúšobnej tyče [mm]
σ_y	Medza klzu v tlaku [MPa]
ϵ_c	Tlaková plasticita pri lome [%]
E_{eff}	Efektívny modul pružnosti [GPa]

f	Frekvencia [Hz]
ASTM	American Society for testing and materials
ϵ_0	Únavová pevnosť materiálu
b	Exponent únavovej pevnosti