



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



Vliv deformace na cyklickou mez únavy materiálu

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: **Tomáš Bobek**

Vedoucí práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.



Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš Bobek**
Osobní číslo: **S16000450**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Vliv deformace na cyklickou mez únavy materiálu**
Zadávající katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Přehled slitin Al používaných pro tváření.
2. Mechanismy plastické deformace, způsoby porušení materiálu a únavové vlastnosti materiálu. Základní způsoby určování únavových vlastností materiálu.
3. Zjištění základních mechanických hodnot testovaného materiálu pomocí statické zkoušky tahem. Příprava zkušebních vzorků s různou předdeformací.
4. Experimentální zjištění vlivu deformace na únavové vlastnosti testovaného materiálu.
5. Vyhodnocení výsledků měření a doporučení pro další výzkum.
6. Závěr.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 30 stran textu**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:


- [1] HERTZBERG, R.W. *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 1996. s. 786. ISBN 0-471-01214-9.
- [2] ASM HANDBOOK. *Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation*. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389-0.
- [3] SCHIJVE, J. *Fatigue of structures and materials*. 2nd ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2009. s. 508. ISBN 978-1-4020-6807-2.
- [4] RŮŽIČKA, M., HANKE, M. a ROST, M. *Dynamická pevnost a životnost*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1989. s. 212.
- [5] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 64 s. Třídící znak 420310.
- [6] ČSN ISO 12106. *Kovové materiály - Zkoušení únavy - Metoda řízení osové deformace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. 40 s. Třídící znak 420372.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie
Konzultant bakalářské práce: **doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání bakalářské práce: **1. listopadu 2016**
Termín odevzdání bakalářské práce: **1. dubna 2018**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2016

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu této bakalářské práce panu Ing. Jiřímu Sobotkovi Ph.D. a konzultantovi bakalářské práce doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. za odborné a profesionální rady a připomínky k teoretické i experimentální části za celkový dohled nad tvorbou této práce. Poděkování patří i všem ostatním zaměstnancům Katedry strojírenské technologie - oddělení tváření kovů a plastů TUL. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za umožnění studia na vysoké škole a všem blízkým a přátelům za všestrannou podporu během celého studia.

Děkuji

Tomáš Bobek

Název bakalářské práce

Vliv deformace na cyklickou mez únavy materiálu

Bachelor thesis title

Influence of Deformation on the Cyclic Fatigue Limit of Material

Anotace

Tato bakalářská práce je zaměřena na zjišťování vlivu deformace na cyklickou mez únavy a na vlastnosti zkoušeného materiálu při cyklickém zatěžování. V teoretické části bakalářské práce je popsána krystalová stavba kovů a jejich deformační chování, dále testování materiálů a přehled slitin hliníku. V experimentální části je popsáno měření zkoušky tahem, příprava materiálu a zkouška cyklického zatěžování s následnou analýzou naměřených dat. Hlavním cílem této bakalářské práce bylo zjištění charakteristických hodnot pro popis šikmé větve Wöhlerovy křivky.

Klíčová slova: deformace, mez únavy, Wöhlerova křivka, cyklické zatížení

Annotation

This bachelor work is focused on detection of influence of cyclical fatigue limit and on quality of tested material during cyclical fatigue testing. Crystal lattice of metal and its deformation behavior is described in theoretical part of this work, including material testing and overview of aluminum alloys. Experimental part describes measuring the tensile test, preparation of material and cyclical fatigue test with analysis of measured data. Main goal of this bachelor work was finding a characterical values to describe the oblique branch of the Wöhler curve.

Key Words: Deformation, Fatigue Limit, Wohler Curve, Cyclic Loading



Obsah

Seznam použitých symbolů	7
1. Úvod.....	8
2. Teoretická část.....	9
2.1. Krystalová stavba kovů.....	9
2.1.1. Poruchy krystalických mřížek.....	10
2.2. Deformační chování kovů.....	12
2.2.1. Elastická deformace	15
2.2.2. Plastická deformace	16
2.3. Testování Materiálů.....	17
2.3.1. Cyklické zatěžování.....	17
2.3.2. Únava materiálu.....	22
2.4. Hliník a jeho slitiny	23
3. Experimentální část.....	25
3.1. Příprava vzorků	26
3.2. Zkouška cyklického zatěžování	29
3.3. Vyhodnocení výsledků.....	32
4. Závěr.....	39
5. Seznam použité literatury	40

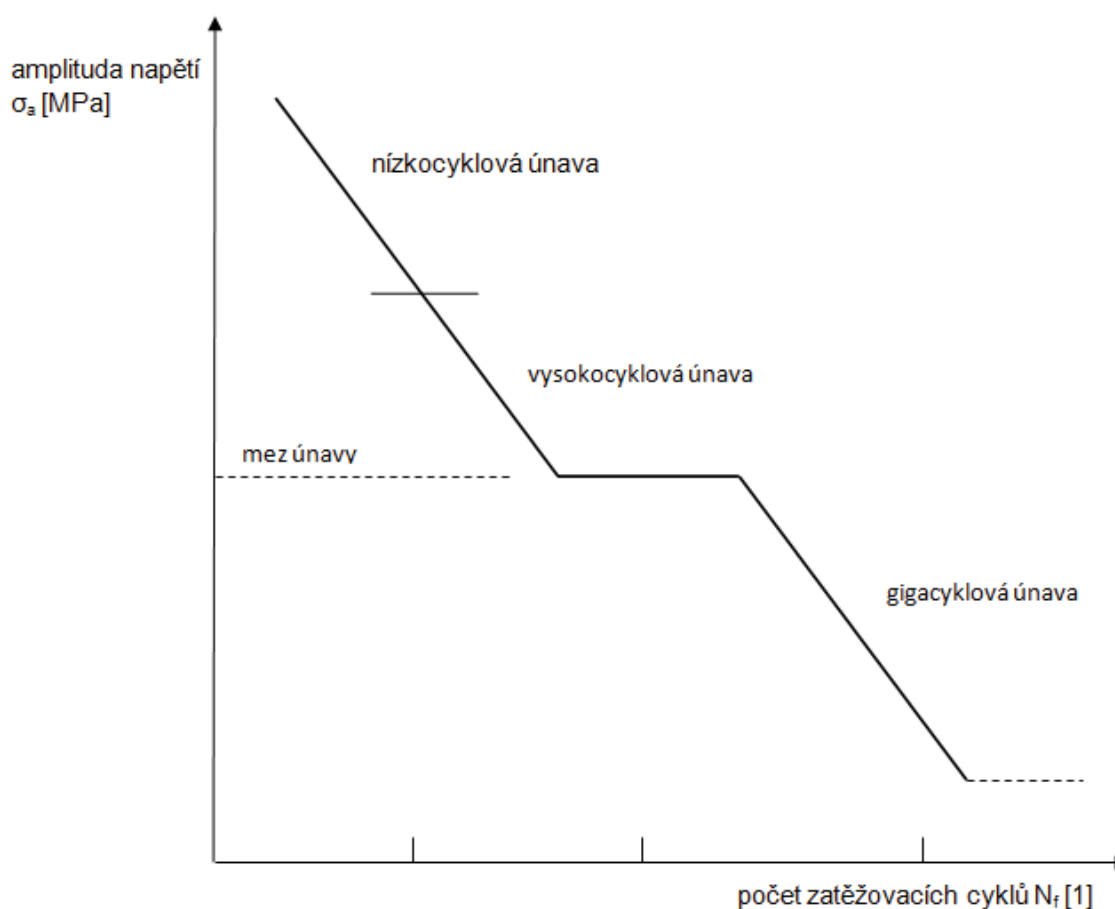
Seznam použitých symbolů

OZNAČENÍ	NÁZEV	JEDNOTKA
σ	Normálové, skutečné napětí	[MPa]
R	Smluvní napětí	[MPa]
τ	Smykové napětí	[MPa]
F_n	Normálová síla	[N]
F_t	Tečná síla	[N]
S	Průřez	[mm ²]
ε	Poměrné prodloužení	[1]
L	Délka po deformaci	[mm]
L_0	Původní délka	[mm]
ψ	Poměrné zúžení	[1]
S_0	Původní průřez	[mm ²]
μ	Poissonův poměr	[1]
φ	Skutečné přetvoření	[1]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
σ_n	Dolní napětí	[MPa]
σ_h	Horní napětí	[MPa]
σ_a	Amplituda napětí	[MPa]
σ_m	Střední napětí	[MPa]
$\Delta\sigma$	Rozkmit napětí	[MPa]
σ_c	Mez únavy	[MPa]
R_m	Mez pevnosti materiálu	[MPa]
σ_c^*	Mez únavy skutečné součásti	[MPa]
β	Vrubový součinitel	[1]
η	Součinitel jakosti povrchu	[1]
v	Součinitel velikosti	[1]
α	Účinek tvaru vrubu	[1]
q	Vrubová citlivost materiálu	[1]
σ_H	Horní napětí ve Smithově diagramu	[MPa]
σ_f'	Součinitel únavové pevnosti	[MPa]
b	Exponent únavové pevnosti	[1]
$R_{p0,2}$	Mez kluzu	[MPa]
A_g	Tažnost	[%]
A_{80mm}	Celková tahnost	[%]

1. Úvod

Cílem této bakalářské práce bylo zjištění charakteristických hodnot pro popis šikmé větve Wöhlerovy křivky a také to, jaký vliv na tyto hodnoty má předchozí deformace. Experiment byl prováděn na únavovém stroji od firmy INOVA, ke kterému byl připojen PC s programem TESTCONTROL. Do prostředí programu se zadávala příslušná hodnota silové hladiny a po skončení testu program zobrazil výsledky. Následné zpracování výsledků probíhalo manuálně pomocí výpočtů a programu pro tvorbu grafů. Z naměřených hodnot byly následně vyvozeny závěry.

Obecně jsou testy cyklického zatěžování v praxi velmi důležité, protože mnoho součástí je zatěžováno právě cyklicky. Pomocí předešlé deformace u jedné skupiny vzorků se také dá zjistit, zda-li se daný materiál AW 5182 zpevňuje. Pro tuto bakalářskou práci byla jako zkušební materiál zvolena slitiny hliníku, protože hliníkové slitiny jsou v posledních letech hojně využívány hlavně v automobilovém průmyslu.



Obr. 1.1 Křivka únavy tyče (z hlediska počtu cyklů)

2. Teoretická část

Teoretická část této bakalářské práce se zabývá především deformačním chováním kovů a také zkoušením materiálů (zejména cyklickým zatěžováním).

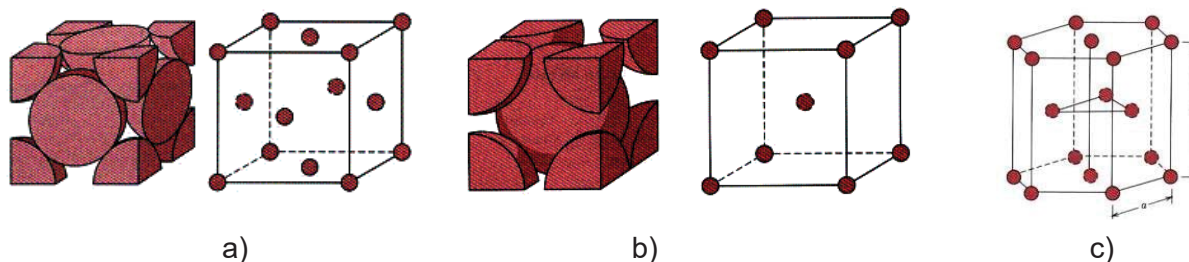
2.1. Krystalová stavba kovů

Krystaly je tvořena struktura kovů, slitin kovů i keramických materiálů. Mechanismus plastické deformace je charakteristický pouze pro kovové materiály. Všechny kovy kromě rtuti jsou za normální teploty (20°C) krystalické. Změna z kapalného do tuhého skupenství je dána uspořádáním částic. Vzniká útvar, v němž jsou částice pravidelně uspořádány podle určitých zákonitostí, u čistých kovů se tyto útvary nazývají krystaly. Ve skutečnosti je ale struktura kovů polykrystalická, což znamená, že se skládá z více krystalů. Při krystalizaci vznikají zpravidla krystaly nepravidelné, zvané zrna. Auguste Bravais v roce 1850 sledoval krystalickou stavbu kovů a zjistil, že uspořádání atomů kovů lze provést čtrnácti způsoby a těchto čtrnáct způsobů soustředil do sedmi krystalografických soustav (viz obr. 2.1).

Soustava	Úseky na osách	Úhly	Elementární buňka
Kubická (krychlová) prostá, prostorově a plošně centrovaná.	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Šesterečná (hexagonální), prostá	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
Čtverečná (tetragonální), prostá a prostorově centrována	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Trigonální - klencová (romboedrická), prostá	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
Kosočtverečná (ortorombická), prostá, bazální, plošně i prostorově centrována.	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Jednoklonná (monoklinická), prostá a bazální centrována	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
Trojklonná (triklinická), prostá	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

Obr 2.1 Krystalografické soustavy

Pro zaměření této bakalářské práce jsou nejdůležitější soustavy kubická a šesterečná, neboť v těchto soustavách krystalizují všechny kovy kromě rtuti. Kubická soustava se dále dělí podle typu elementární buňky na prostou, plošně centrovanou a prostorově centrovanou (viz obr. 2.2).



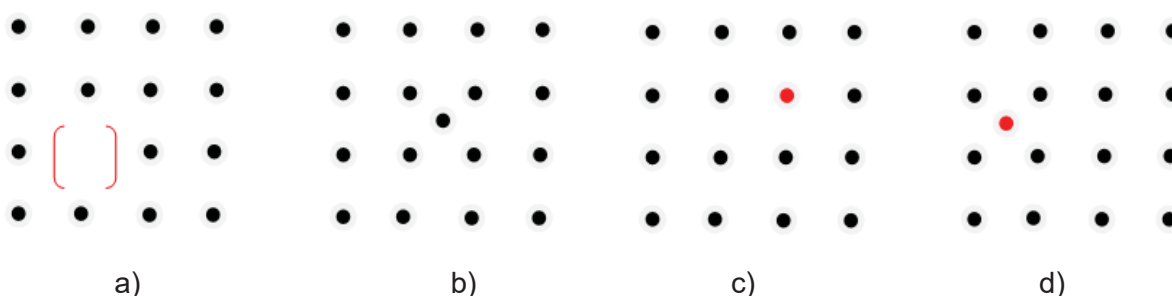
Obr. 2.2 a - soustava kubická plošně centrovaná, b - kubická prostorově centrovaná.

2.1.1. Poruchy krystalických mřížek

Poruchy v krystalických mřížkách jsou důležité, protože mají zásadní vliv na mechanismus plastické deformace. Jsou to vady ve struktuře, které mohou ovlivnit vlastnosti materiálu. Tyto poruchy se dělí na strukturní, chemické a elektrické. Největší význam mají poruchy strukturní, které se dále dělí na bodové, čárové (dislokace), plošné a objemové.

Bodové poruchy

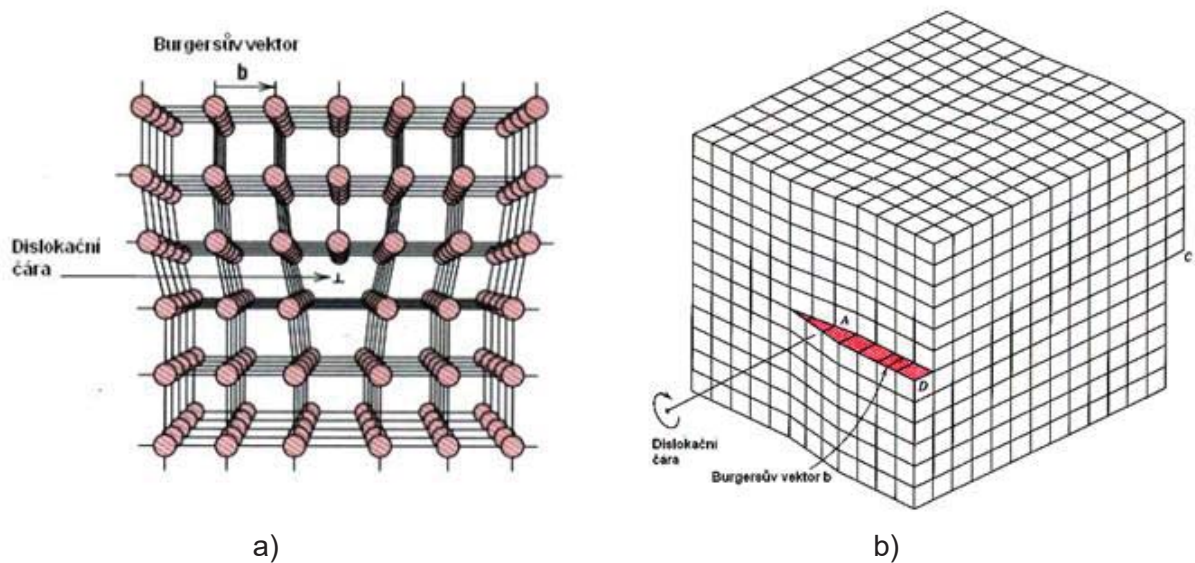
Jsou to nejjednodušší poruchy krystalové mřížky, při kterých se přemísťují částice, a to umožňuje difúzi. Existují čtyři typy bodových poruch: vakance - představuje neobsazený uzlový bod mřížky, intersticiál vlastní - atom neležící v uzlovém bodě, intersticiál příměsi - cizí atom v neuzlové poloze a substituce - atom příměsi, který nahrazuje atom základního kovu v jeho uzlové poloze (viz obr. 2.3).



Obr. 2.3 a - vakance, b - intersticiál vlastní, c - substituce, d - intersticiál příměsi

Čárové poruchy - dislokace

Představují řadu atomů v krystalové mřížce, která má jiné uspořádání než ostatní atomy a porušení pravidelného uspořádání částic v celé linii. Každá dislokace je tvořena třemi faktory - Burgersův vektor, skluzová rovina a dislokační čára. Existují dvě mezní dislokace - hranová a šroubová (viz obr. 2.4). Tyto dva typy se od sebe liší tím, že u hranové dislokace je Burgersův vektor kolmý na dislokační čáru, zatímco u šroubové je s ní rovnoběžný.



Obr. 2.4 a - hranová dislokace, b - šroubová dislokace [1, 14]

Nejdůležitější vlastností dislokací je jejich schopnost pohybu. Což je právě velmi důležité pro plastickou deformaci. Pohyb nastává účinkem napětí v krystalové mřížce, a to v rovině kluzu. Kluzný pohyb je způsoben nepatrnými pohyby atomu v krystalu a jeho rychlost závisí především na typu krystalové mřížky a na množství poruch v mřížce. Deformací se tedy dislokace neodstraní, změní pouze svoji polohu. Důležitou vlastností dislokací je právě jejich pohyb. Rozlišují se dva druhy - skluz a šplhání.

Plošné poruchy

Za rovinné poruchy se považují poruchy, které lze odvodit ze vzájemné vztahu krystalografických rovin reálných krystalů a polykrystalických shluků. Dělí se na hranice podzrn, hranice zrn a vrstevné chyby.



Objemové poruchy

Poruchy, které v krystalu zaujímají určitý objem jsou obecně dutiny. Dutiny v materiálu mohou vznikat při krystalizaci taveniny, v důsledku přítomnosti plynů (kulatý a hladký povrch reliéfu) nebo mohou vznikat v důsledku objemového smršťování (stahování) nebo kombinací obou důsledků.

2.2. Deformační chování kovů

Pojem deformační chování materiálu vyjadřuje chování materiálu při mechanickém namáhání. Materiál jako takový nelze mechanicky namáhat. Z materiálu je nejprve nutné vyrobit těleso (strojní součást, konstrukční díl, zkušební těleso) a to pak můžeme podrobit mechanickému namáhání. Proto chování materiálu za definovaných podmínek mechanického namáhání závisí i na tvaru a rozměrech tělesa. Základní veličiny, které se používají k popisu deformačního chování materiálu jsou napětí a deformace. [2]

Napětí

Napětí se vztahuje k danému řezu v tělese, jeho jednotkou je Pa, případně $N \cdot m^{-2}$. Protože se rozlišují dvě složky vnitřní síly, normálová a tečná, rozlišují se i dvě složky napětí, normálové napětí a smykové (tečné) napětí. Napětí se spočítá jako podíl normálové (tečné síly) ku ploše příslušného průřezu. [3]

$$\sigma = \frac{F_n}{S} \quad [MPa] \quad (1)$$

$$\tau = \frac{F_t}{S} \quad [MPa] \quad (2)$$

Kde:

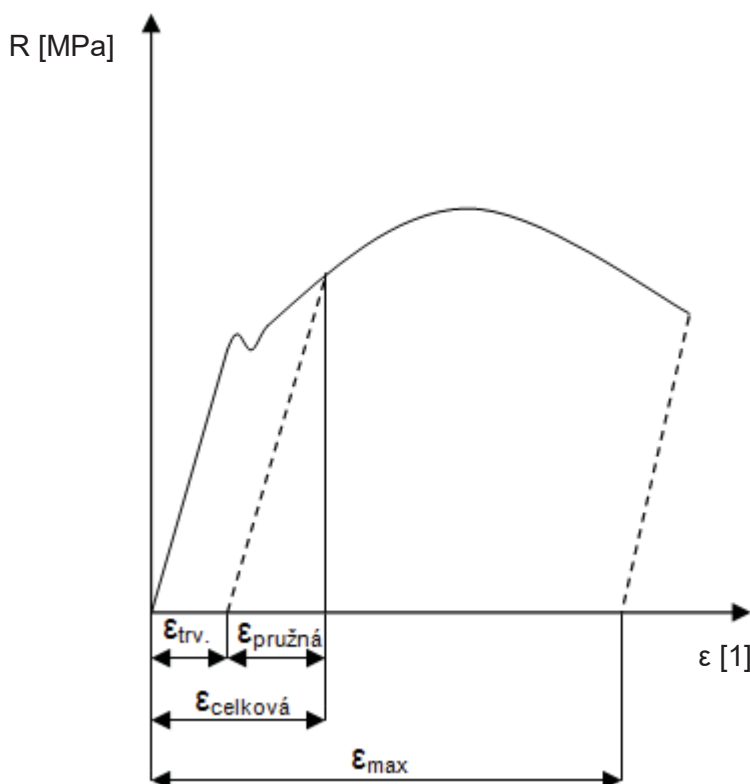
F_n - normálová síla [N]

F_t - tečná síla [N]

S - příslušný průřez [mm^2]

Deformace

Deformace je změna tvaru namáhaného tělesa vyvolaná působením napětí. Deformace se dělí na pružnou (elastickou) a trvalou (plastickou). Součet těchto deformací je poté deformace celková (viz obr. 2.4).



Obr. 2.4 Smluvní diagram zkoušky tahem

Na rozdíl od napětí se deformace vztahuje na rozměry tělesa. Její rozměr je však bezrozměrná veličina, protože udává poměr mezi prodloužením a původním rozměrem, popřípadě zúžením a původním rozměrem. Protože se pohybujeme v oblasti malých deformací, lze poměrné prodloužení ε spočítat ze vzorce:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad [1] \quad (3)$$

Kde:

ΔL - absolutní prodloužení [mm]

L - délka po deformaci [mm]

L_0 - původní délka [mm]



Kolmo na deformaci poměrného prodloužení vzniká deformace poměrné zúžení neboli kontrakce. Poměrné zúžení ψ lze určit ze vztahu:

$$\psi = \frac{S_0 - S}{S_0} \quad [1] \quad (4)$$

kde:

S - průřez po deformaci [mm²]

S₀ - původní průřez [mm²]

Vztah mezi těmito deformace vyjadřuje součinitel příčné deformace - Poissonův poměr μ :

$$\mu = -\frac{\psi}{\varepsilon} \quad [1] \quad (5)$$

Poissonovo číslo udává, kolikrát je poměrná změna průřezu menší než poměrná změna délky tyče.

Je důležité vědět, že je-li při zkoušce tahem zkušební vzorek natahován, jeho průřez se zmenšuje. V předchozím výpočtu napětí ze vzorce (1), (2) byl předpokládán konstantní průřez, to však není pravda a proto se skutečné napětí může lišit od počítaného. Z tohoto důvodu se zavádějí dva typy diagramů - smluvní a skutečný. Ve smluvním diagramu vztahujeme napětí k počátečnímu průřezu S₀, zatímco ve skutečném diagramu vztahujeme napětí ke skutečnému průřezu.

Výpočet skutečného napětí σ :

$$\sigma = R(1 + \varepsilon) \quad [MPa] \quad (6)$$

kde:

R - smluvní napětí [MPa]

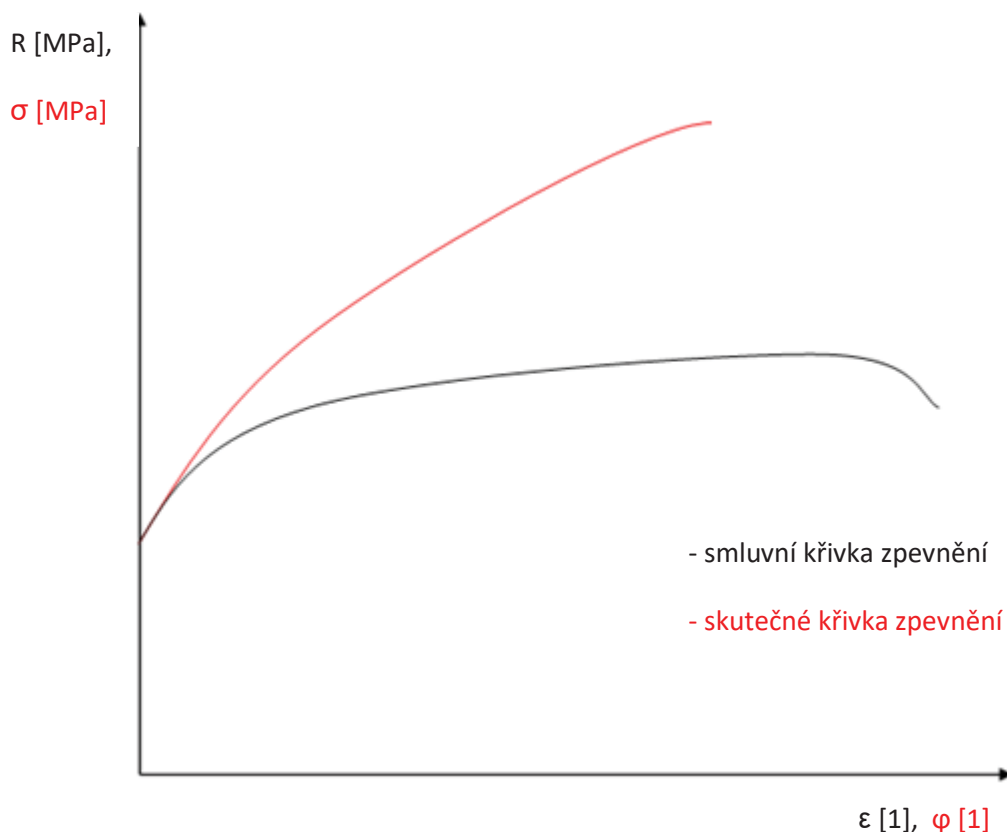
ε - poměrné prodloužení [1]

$R = \frac{F}{S_0}$ [MPa]

Výpočet skutečného (logaritického) přetvoření φ :

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad [1] \quad (7)$$

Porovnání smluvního a skutečného napětí pro hlubokotažný materiál lze vidět na obrázku 2.5.



Obr. 2.5 Křivka smluvního a skutečného napětí (pro statickou zkoušku tahem)

2.2.1. Elastická deformace

Je-li kovový monokrystal namáhán vnějšími silami, dochází k deformacím jeho mřížky a parametr mřížky a se buď zvětšuje nebo zmenšuje. Pokud atomy mění vzájemně svou polohu v rozsahu menším, než je jeden parametr (teoreticky o jednu polovinu parametru, prakticky max. o 15%), nastává pružná (elastická) deformace. Jakmile přestanou vnější síly působit, dojde vlivem vnitřní energie k vyrovnání všech změn a atomy se vrátí do své původní polohy. Elastickou deformací je umožněn relativně malý posun atomů kolem jejich rovnovážných poloh v krystalové mřížce. Průběh výsledné síly působící na atomy v bezprostředním okolí rovnovážné polohy v krystalové mřížce je možné aproximovat přímkovou závislostí - Hookeův zákon. [2,4]

Elastickou deformaci materiálu za působení síly popisuje Hookeův zákon, za předpokladu malých sil a malých deformací, které po odlehčení zmizí. Deformace je přímo úměrná napětí. Hookeův zákon lze vyjádřit ve tvaru:

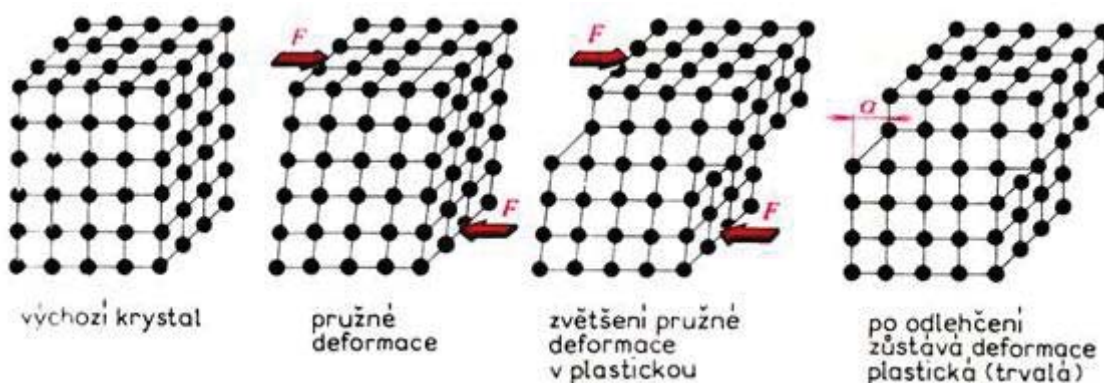
$$\sigma = E \varepsilon \quad [1] \quad (8)$$

kde:

E - modul pružnosti v tahu [MPa]

2.2.2. Plastická deformace

Vzroste-li napětí na určitou hodnotu (mez kluzu), dochází k trvalým změnám, při kterých atomy mění svou vzájemnou polohu nejméně o jeden mřížkový parametr - a. Dochází tak k nevratné (plastické) deformaci. Ke změně polohy atomů dochází v kluzných rovinách (roviny nejhustěji obsazené atomy) atomové mřížky (skluzem) jedné vrstvy atomů po druhou. Tyto posuvy jsou způsobeny poruchami krystalové mřížky, zejména dislokacemi. Tahové napětí je spojováno vždy se vznikem trhliny, způsobuje dekohezi vazeb. Smykové napětí způsobí skluz případně smykový lom. [4]



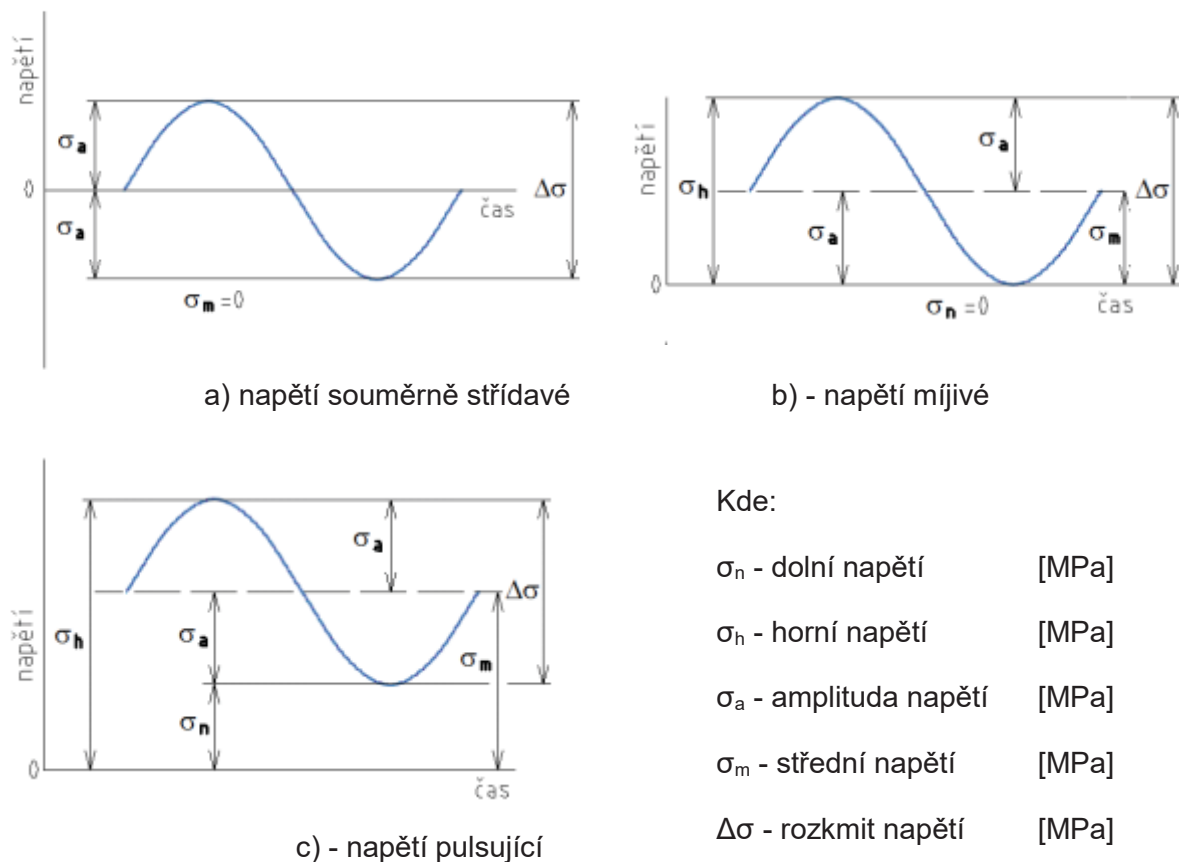
Obr 2.6 Schéma pružné a trvalé deformace [5]

2.3. Testování Materiálů

Testování materiálu je velice důležité pro získávání údajů, ze kterých se poté vychází při návrhu tvaru, rozměrů a materiálu součástí. Z hlediska působení síly na zkušební těleso rozdělujeme mechanické zkoušky na **statické** a **dynamické zkoušky rázové a cyklické**. U statických zkoušek zatížení se zvyšuje poměrně zvolna a rozdělují se na zkoušky pevnosti v tahu, tlaku, ohybu, krutu a stříhu. Pro tuto bakalářskou práci jsou však nejdůležitější cyklické zkoušky materiálu. [6]

2.3.1. Cyklické zatěžování

V praxi jsou většinou strojní součásti namáhány zatížením, jehož velikost a smysl se prudce, popřípadě opakovaně mění. Základní způsoby cyklického namáhání vysvětluje obr. 2.7. Potřebné údaje o chování takto namáhaného materiálu nemůžeme zjistit statickými zkouškami, ale zkouškami dynamickými. Při tomto namáhání dochází často k náhlému porušení součásti, i když zatěžující síla ještě nedosáhla statické meze pevnosti materiálu. [6, 15]



Obr. 2.7 Druhy cyklického napětí [7]

Platí:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h + \sigma_n}{2} \quad [MPa] \quad (9)$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_h - \sigma_n}{2} \right| \quad [MPa] \quad (10)$$

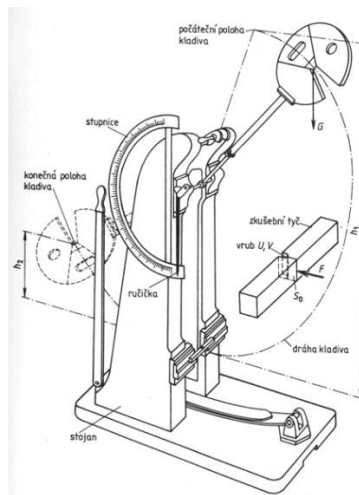
Mezní napětí při dynamickém namáhání

Mezní napětí v nosném průřezu součásti se stanoví podle časového charakteru skutečného napětí. Jestliže bude součást zatížena dynamicky, k jejímu poškození dojde únavovým lomem. Tato situace nastane tehdy, pokud skutečné napětí v nosném průřezu součásti dosáhne meze únavy. Únavový lom odstartuje vznikem trhliny v součásti, která se postupně šíří průřezem tak dlouho, po takový počet cyklů, až zbytkový průřez skutečnému zatížení náhle podlehne. V posledním okamžiku únavového lomu překročí napětí v reálném průřezu mez pevnosti materiálu. Mezní hodnota napětí při dynamickém namáhání, mez únavy, se stanovuje na základě rozsáhlých měření s ohledem na druh dynamického napětí. [8]

Druhy dynamických a cyklických zkoušek

Zkouška rázem

Tato zkouška slouží k zjištění, kolik práce nebo energie se spotřebuje na porušení zkušební tyče. Zkouší se nejčastěji jedním rázem, kdy na porušení zkušební tyčky se použije najednou dostatečné množství energie. Nejběžnější je zkouška vrubové houževnatosti. Pro tuto zkoušku se používá Charpyho kladivo (obr. 2.9), které se upevní v počáteční poloze. V nejnižším bodě kladiva se umístí tyč ze zkoušeného materiálu. Po uvolnění z počáteční polohy kladivo narazí na zkušební tyč, přerazí ji a vykývne do konečné polohy. Konečná poloha je nižší než počáteční, protože na přeražení zkušební tyče se spotřebovává takzvaná nárazová práce. [6,16]



Obr. 2.9 Charpyho kladivo [9]

Zkouška opětvným namáháním

Při namáhání součástí vznikají často poruchy dříve, než odpovídá jeho statické pevnosti. Tomuto jevu říkáme únava materiálu. Při zkoumání se ukázalo, že nebezpečí lomu z únavy je při překročení určité hranice, tzv. meze únavy. Při zjišťování meze únavy je součást namáhána napětím cyklickým, tj. napětím měnícím se periodicky od horní po dolní hodnotu. Zatěžovací cyklus je průběh napětí za jednu dobu kmitu.

Mez únavy se zjišťuje na speciálních zkušebních strojích. Pro střídavé napětí souměrné a nesouměrné se mez stanoví v kombinaci tak - tlak, v ohybu a v krutu. Při napětí pulsujícím a míjivém se určuje mez únavy v tahu, tlaku, ohybu a krutu.

Pro tyto zkoušky se používá několik stejných zkušebních tyčí ze zkoušeného materiálu, které jsou zatěžovány jedním z uvedených způsobů. U první tyče volíme napětí těsně pod mezí kluzu a po porušení tyče se odečte příslušný počet cyklů změn zatížení. Vynesením použitého napětí σ na svislou osu a počtu cyklů na vodorovnou osu se získá první bod. U dalších tyčí volíme stále nižší napětí, takže se dosáhne většího počtu cyklů před porušením. Výslednými body se poté proloží křivka, která se nazývá Wöhlerova křivka. [6]

Wöhlerova křivka

Wöhlerova křivka udává závislost mezi napětím a počtem cyklů. Tato křivka se po určitém počtu cyklů blíží asymptoticky k napětí, které se nazývá mezí únavy σ_c (viz obr. 2.10). Proto je k Wöhlerově křivce nakreslena asymptota jako rovnoběžka s vodorovnou osou, která na ose napětí ukazuje mez únavy. Mez únavy definujeme jako největší napětí, při kterém součást zhotovená z tohoto materiálu vydrží teoreticky neomezený počet cyklů změn zatížení. Pro většinu konstrukčních ocelí je možné pro odhad meze únavy vycházet ze vztahu: [6]

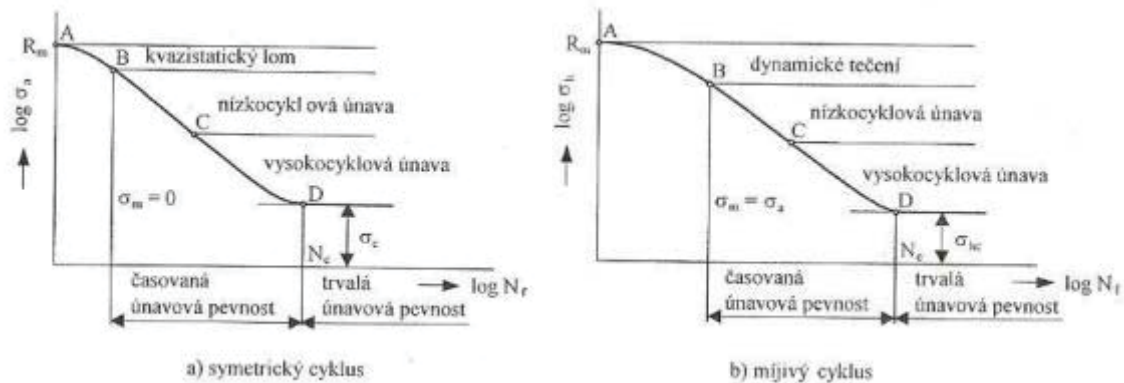
$$\sigma_c \approx (0,33 - 0,43)R_m \quad [MPa] \quad (11)$$

Pro nelegované oceli:

$$\sigma_c \approx 0,38 R_m \quad [MPa] \quad (12)$$

Kde: R_m - je mez pevnosti materiálu

Dle velikosti amplitudy napětí rozdělujeme oblast vymezenou Wöhlerovou křivkou na trvalou pevnost a časovou pevnost. Hranici obou oblastí tvoří mez únavy (obr. 2.10).



Obr. 2.10 Wöhlerova křivka

Hodnota meze únavy σ_c se od meze únavy skutečné součásti, kterou označujeme σ_c^* obvykle výrazně liší. Tato skutečnost potvrzená praktickými poznatky se dá vysvětlit na základě podstaty poškození součásti dynamickým napětím, tedy na základě vzniku a šíření trhliny průřezem. Vznik a průběh trhliny je ovlivněn několika faktory, například jakostí povrchu, nehomogenitou materiálu, nečistotami. Zvláště nepříznivě na velikost meze únavy v nosném průřezu součásti působí náhlá změna jejího tvaru, která se nazývá vrub. Jde o konstrukční prvek, jako je například osazení, zápich nebo drážka pro pero. [8]

Všechny tyto nepříznivé vlivy jsou poté zahrnuty ve vzorci pro výpočet meze únavy skutečné součásti:

$$\sigma_c^* = \sigma_c \frac{\eta v}{\beta} \quad [MPa] \quad (13)$$

Kde:

σ_c - mez únavy zkušební vzorku

η - součinitel jakosti povrchu, ($\eta < 1$)

v - součinitel velikosti (- vyjadřuje vztah rozměrů skutečné součásti a zkušební tyče)

β - vrubový součinitel

$$\beta = 1 + q(\alpha - 1) \quad [1] \quad (14)$$

kde:

α - zavádí do výpočtu účinek tvaru vrubu, ($\alpha > 1$)

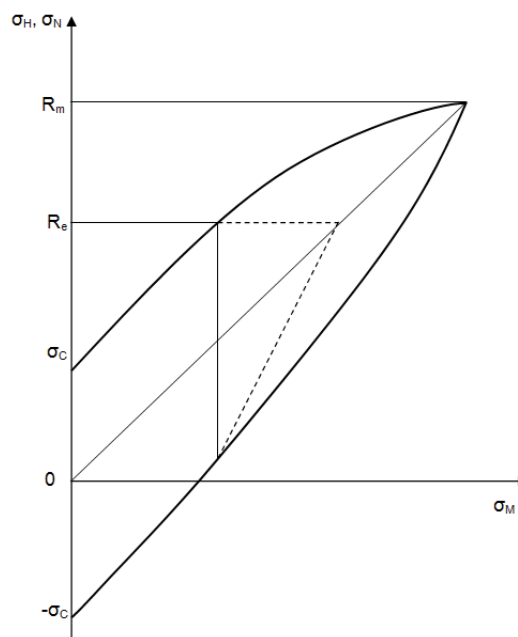
q - vrubová citlivost materiálu, ($0 < q < 1$)

Tímto způsobem vypočtená mez únavy platí pro nosný průřez skutečné součásti. Znamená také největší hodnotu amplitudy σ_A^* střídavého souměrného napětí.

Smithův diagram

Pokud je součást namáhána jiným dynamickým napětím než střídavým souměrným je složitější určit její mezní stav. Zjišťování hodnot jako jsou σ_h , σ_n , popř. σ_m a σ_a je v tomto případě velmi náročné. Při experimentu se nejprve hledá takové napětí, při kterém zkušební tyč vydrží právě "nekonečně velký" počet cyklů ($N=10^7$). [8]

Únavové zkoušky tohoto typu jsou přehledně zobrazovány pomocí tzv. Smithova diagramu (obr. 2.11), na jehož souřadnicové osy se vynášejí hodnoty mezních napětí - střední napětí σ_M a horní napětí σ_H a dolní napětí σ_D . Zkoušky jsou prováděny tak, že se postupně k amplitudě střídavého souměrného napětí superponuje statická složka σ_M . Ta mění toto střídavé souměrné napětí na střídavé nesouměrné, míjivé a pulsující. Velikost amplitudy se postupně snižuje až k nule, kdy samotná velikost statického napětí dokáže způsobit lom zkušební tyče. [8]



Obr 2.11 Smithův diagram

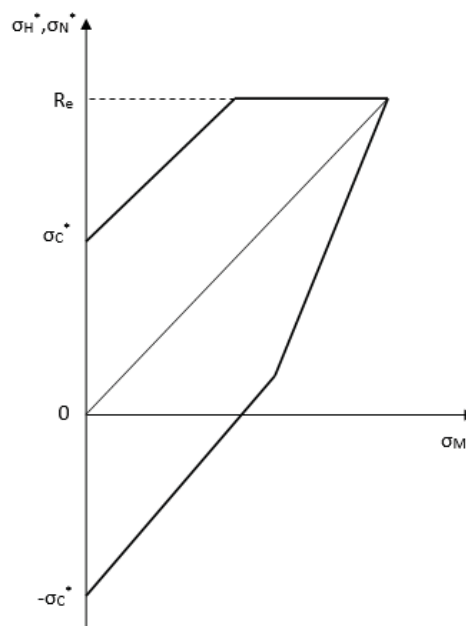
Naměřené hodnoty σ_H a σ_N vytvoří ve Smithově diagramu dvě křivky, které představují geometrická místa horních a dolních hodnot mezních dynamických napětí. Každému bodu horního napětí je tak na svislici přiřazen bod dolního napětí. Pro praktické užití je třeba nahradit naměřené křivky jednoduššími prvky. Smithův diagram můžeme uvažovat pouze pod mezí kluzu při zatížení tah-tlak (obr. 2.11), zbylý úsek horní mezní křivky lze nahradit rovnicí přímky v intervalu pro σ_H (σ_c , R_e). Tento úsek lze popsat dle rovnice: [8]

$$\sigma_H = (1 - \psi)\sigma_M + \sigma_C \quad [MPa] \quad (15)$$

kde:

ψ - součinitel citlivosti materiálu vůči asymetrii cyklu

Mezní dynamická napětí pro skutečnou součást, která jsou nutná pro její navrhování, se stanovují zavedením meze únavy σ_C^* pro střídavé souměrné napětí do vztahu (15). Smithův diagram skutečné součásti můžeme uvažovat pouze do meze kluzu (obr. 2.12). [8]



Obr. 2.12 Smithův diagram pro nosný průřez

2.3.2. Únava materiálu

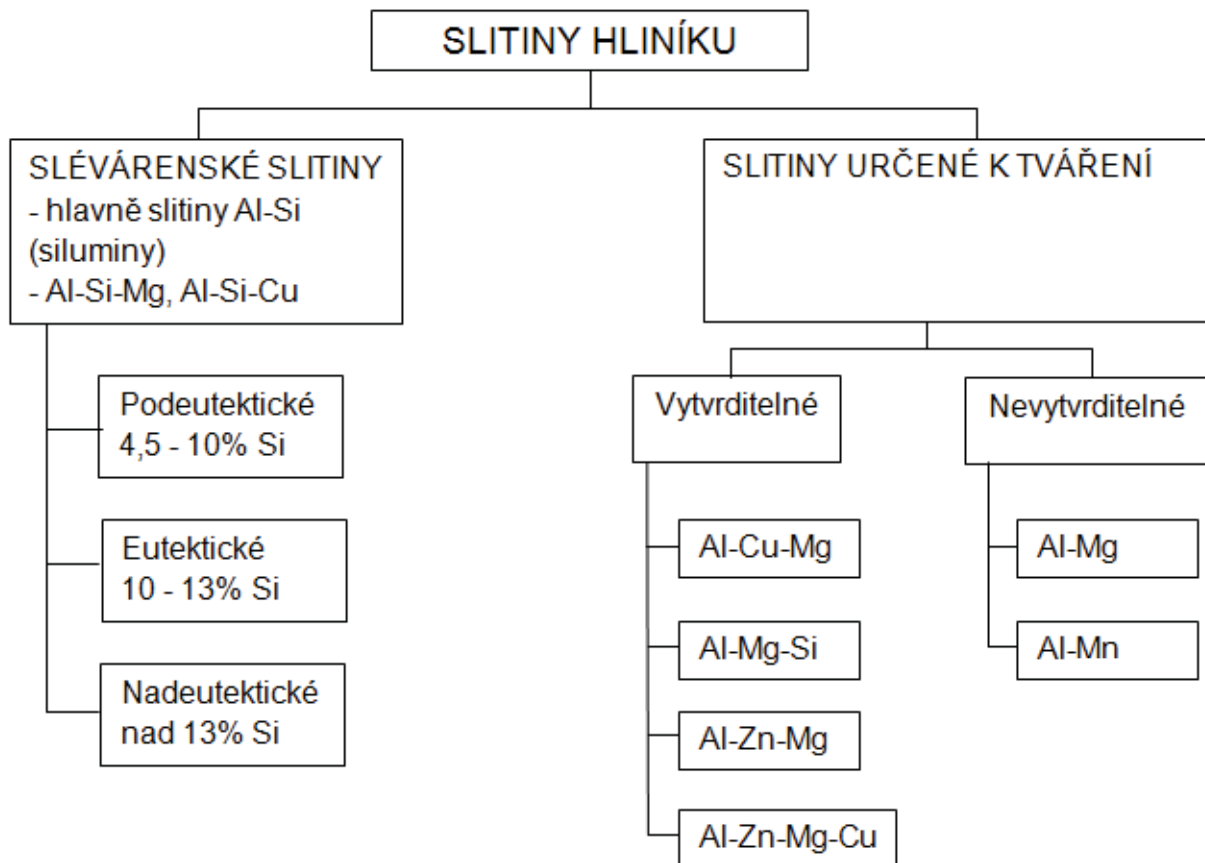
Únava konstrukčních materiálů je degradační proces nevratných změn vlastností a stavu materiálu, vyvolaný jeho opakovaným mechanickým, tepelným nebo tepelně-mechanickým zatěžováním za současného působení dalších vlivů. K únavovému porušení materiálu může docházet při jeho zatěžování časově proměnlivými vnějšími silami, které v něm vyvolávají elastické deformace a napětí nepřevyšující hodnoty přípustné při statickém zatěžování. Zatěžování může probíhat při jednoduchých namáhání, jako je např. jednoosý tah - tlak, rovinný ohyb nebo častěji při kombinovaném namáhání například ohyb při rotaci, atd. [11]

2.4. Hliník a jeho slitiny

Hliník je stříbrobílý, lehký kov, který je dobrým vodičem elektrického proudu a tepla. Je to také nejrozšířenější kov v zemské kůře a ve většině případů se používá ve slitinách, kde získává lepší vlastnosti. Nejčastější využití hliníku a jeho slitiny je ve strojírenském průmyslu, automobilovém průmyslu a stavebnictví. [12]

Jedna ze slitin hliníku (AW 5182) byla použita jako testovaný materiál v této bakalářské práci. Přehled slitin hliníku je na obr. 2.14.

Slitiny hliníku



Obr. 2.14 Rozdělení slitin hliníku

Slévárenské slitiny hliníku

Tyto slitiny jsou určeny k výrobě tvarových odlitků litím do písku, do kovových forem nebo tlakově. Mechanické hodnoty odlitků značně závisí na způsobu odlévání. Slitiny typu Al-Si patří k nejvýznamnějším slitinám. V kapalném stavu je Si v Al neomezeně rozpustný, v tuhém stavu je však rozpustnost malá, slitiny s vyšším obsahem Si je nutno modifikovat, tj. do roztavené slitiny přidat kovový sodík nebo sodné sole těsně před odléváním. Tím vznikne jemná krystalizace křemíku a zlepší se mechanické vlastnosti. Tyto slitiny se používají pro složité, tenkostěnné odlitky. [12]

Slitiny s Cu, Ni, a jiné - dostáváme slitiny, které mají příznivé vlastnosti za vysokých teplot, tyto slitiny se vyznačují zvláště nízkou teplotní roztažností a dobrými kluznými vlastnostmi. Slitiny Al-Mg mají nejvyšší měrnou pevnost a rázovou houževnatost, lepší obrobitelnost, mají však horší slévárenské vlastnosti. [12]

Tvářené slitiny hliníku

Tyto slitiny mají obsah legujících prvků obvykle v rozsahu tuhého roztoku, většina slitin je tedy poměrně málo legována, obsah legujících prvků zpravidla nepřekročí 10%.

Slitiny Al-Mg – tyto slitiny se nevytvrzují, protože i při velmi rychlém ochlazení se dosáhne malého stupně přesycení a při stárnutí se pevnost jen málo zvýší, tyto slitiny mají výbornou odolnost proti korozi, zejména v mořské vodě a jsou významným konstrukčním materiálem i ve strojírenství a chemii.

Slitiny Al-Mn - Mn zvyšuje pevnost, tvárnost i odolnost proti korozi, slitiny tohoto složení se používají náhradou za čistý hliník tam, kde jsou požadovány vyšší pevnosti i dobré chemické odolnosti.

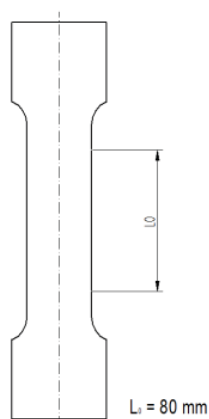
Slitiny Al-Mg-Si na rozdíl od slitin Al-Mg je lze vytvrdit, jsou dobře tvárné a svařitelné, mají dobrou korozní odolnost a schopnost povrchových úprav, používají se zejména v letectví a stavebnictví

Slitiny Al-Cu-Mg – bývají označovány jako duraly. Dosahují značné pevnosti po vytvrzení, jejich předností je přirozené stárnutí, nevýhodou je malá odolnost proti korozi. [12]

3. Experimentální část

Cílem experimentální části bylo zjistit únavové vlastnosti testovaného materiálu v závislosti na deformaci. Tyto vlastnosti vyjadřuje součinitel únavové pevnosti σ_f [MPa] a exponent únavové pevnosti b [1] z Basquinovi rovnice. Měření a následná analýza výsledků probíhala v laboratořích Katedry strojírenské technologie TU v Liberci.

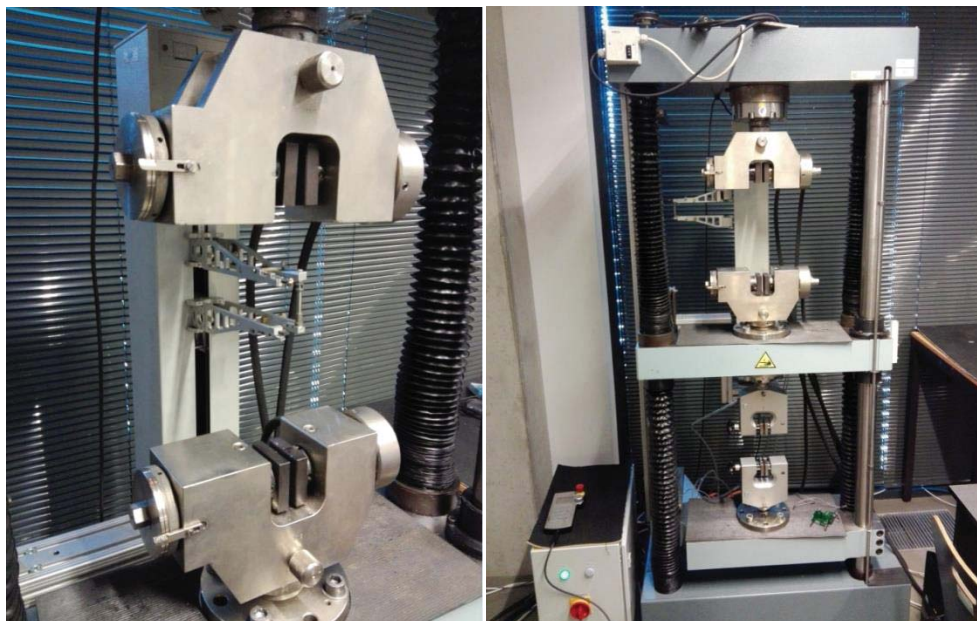
V experimentální části byl zkoušen materiál AW 5182 o tloušťce 1,5mm. Jedná se o slitinu hliníku o složení AlMg4,5Mn0,4, která obsahuje 4,5% Mg a 0,4% Mn. Vlastnosti tohoto materiálu byly nejprve zjištěny při statické zkoušce tahem. Z plechu byly vystřiženy tři vzorky ve směru válcování 0° , které měly požadovaný normalizovaný tvar (viz obr. 3.1) a byly vystřiženy speciálním nástrojem (viz obr. 3.2). Následně byly vloženy do trhacího stroje TIRA test 2300 (viz obr. 3.3). Výsledek statické zkoušky tahem shrnuje tab. 1.



Obr. 3.1 Normalizovaný vzorek pro statickou zkoušku tahem



Obr. 3.2 Střížný nástroj pro normalizovaný vzorek (pro statickou zkoušku tahem)

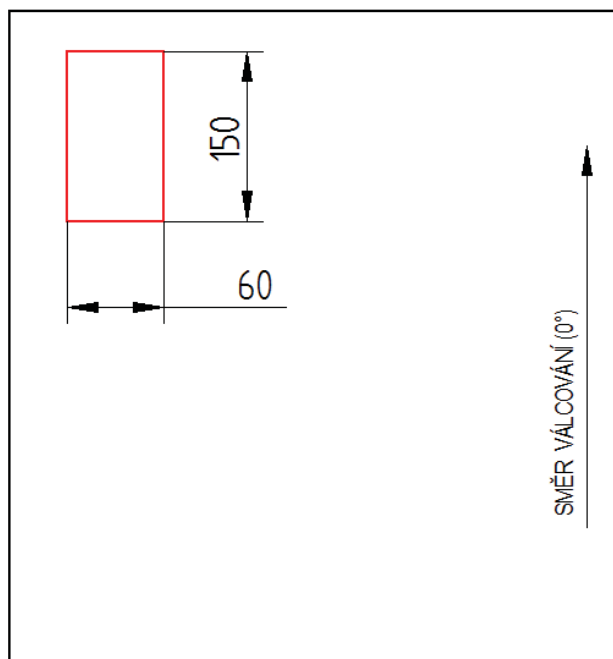
**Obr. 3.3** Trhací zařízení TIRA test 2300**Tab. 1** Vlastnosti zkoušeného materiálu AW 5182:

Vzorek č.	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Homogenní Tažnost A_g [%]	Celková tažnost A_{80mm} [%]
1	151,2	295,5	22,39	22,39
2	148,3	295,4	22,22	23,23
3	150,5	295,9	22,33	23,12

3.1. Příprava vzorků

Ze zkoušeného materiálu AW 5182 bylo nejprve na tabulových nůžkách značky DURMA MS 2004 (viz obr. 3.4) vystřiženo 60 kusů o rozměrech 60 x 150 mm ve směru válcování 0° (viz obr. 3.5).

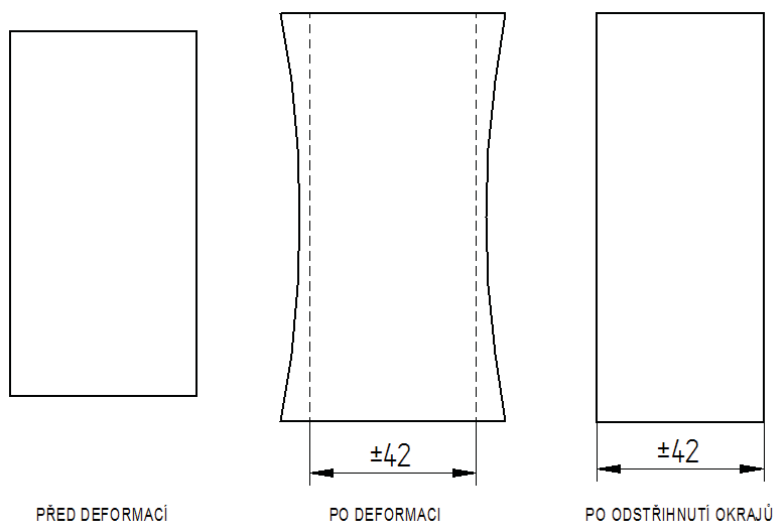
**Obr. 3.4** Tabulové nůžky DURMA MS 2004



Obr. 3.5 Způsob vystřihování vzorků z tabule plechu

Takto připravených 60 kusů bylo rozděleno do dvou skupin po 30 kusech. První skupina vzorků zůstala v původním stavu - nedeformovaná. Druhá skupina vzorků byla předdeformována na 16% celkové tažnosti, což bylo přibližně 8 mm.

Další fází přípravy vzorků bylo odstříhnutí okrajů, které se vlivem deformace natáhly (viz obr. 3.6). Okraje byly odstříhány tak, aby šířka vzorků byla 42 mm. Tato úprava byla provedena pro všechny předdeformované vzorky.



Obr. 3.6 Úprava vzorků po deformaci

Poslední fází přípravy vzorků bylo vyfrézování krčků pomocí svislé konzolové frézky do předpřipravených vzorků (viz. obrázek 3.7). Po vyfrézování krčku byla ještě obrobena plocha obroušena na sloupové vrtačce pomocí lamelového smirkového brusného kotouče (viz. obr. 3.8). Názorné porovnání povrchů před a po broušení lze vidět na obr. 3.9.



Obr. 3.7 Frézování krčku



Obr. 3.8 Stožanová vrtačka
(ilustrační obrázek)



Obr. 3.9 Porovnání povrchů před a po broušení.

3.2. Zkouška cyklického zatěžování

Experiment probíhal v laboratořích Katedry strojírenské technologie na TU v Liberci na únavovém stroji od firmy INOVA, typ FU-O-160-1600-V2 (viz obr. 3.10).



Parametry stroje:

Maximální síla: ± 100 kN

Maximální krouticí moment: ± 200 Nm

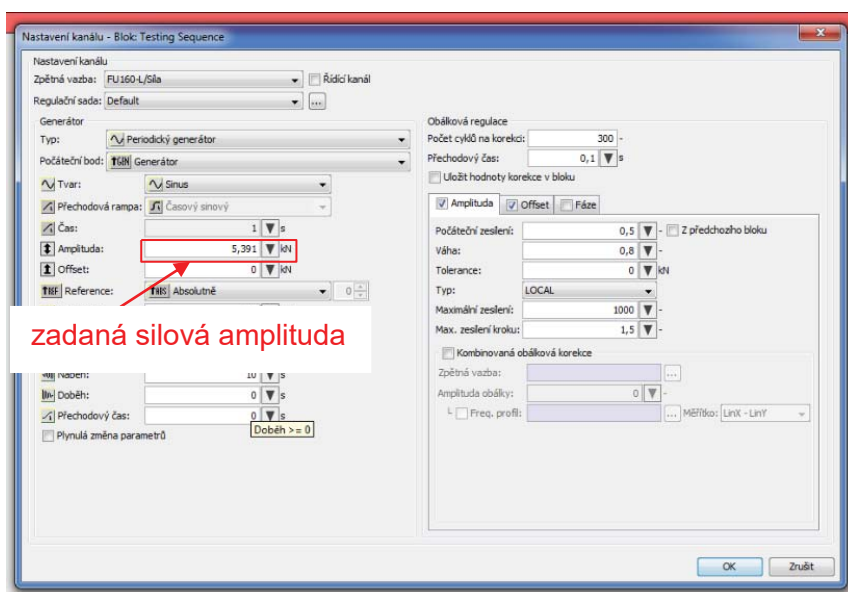
Lineární posuv: 50 mm

Natočení: $\pm 45^\circ$

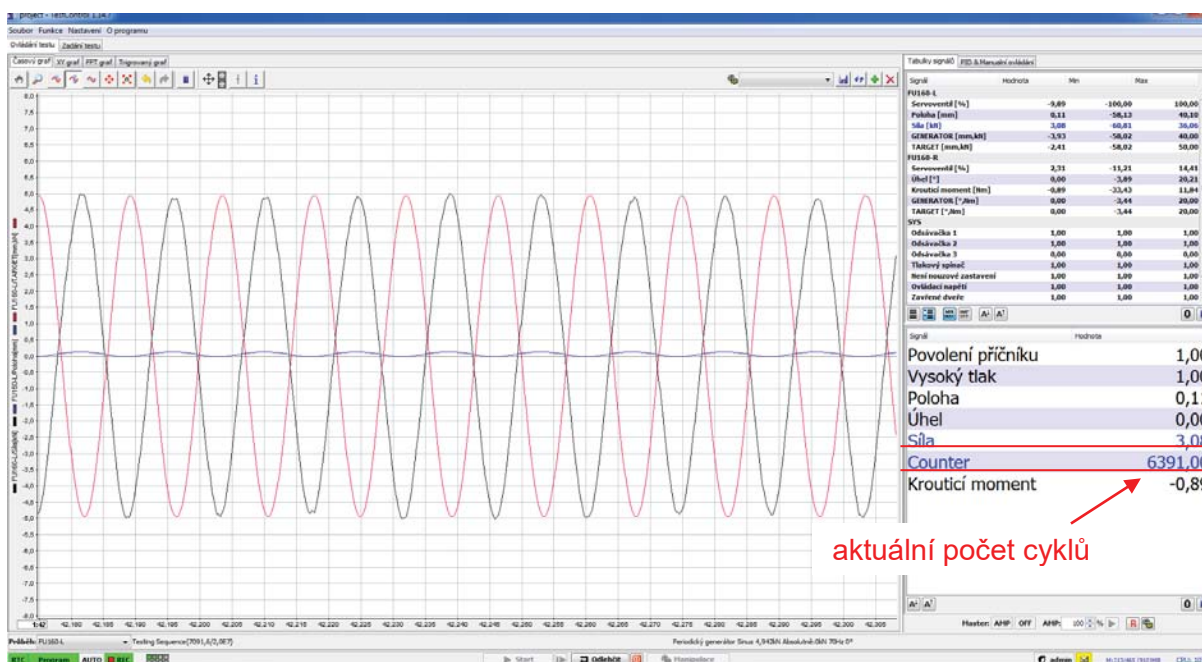
Maximální frekvence zatěžování: 100 Hz

Obr. 3.10 Zařízení pro testování únavy INOVA FU-O-160-1600-V2

Zkušební stroj byl připojen k PC, na kterém byla v prostředí programu TESTCONTROL zadána příslušná napěťová hladina. Následně program zobrazoval počet cyklů a průběh zatěžování v přehledném grafu (viz obr. 3.11 až 3.13).

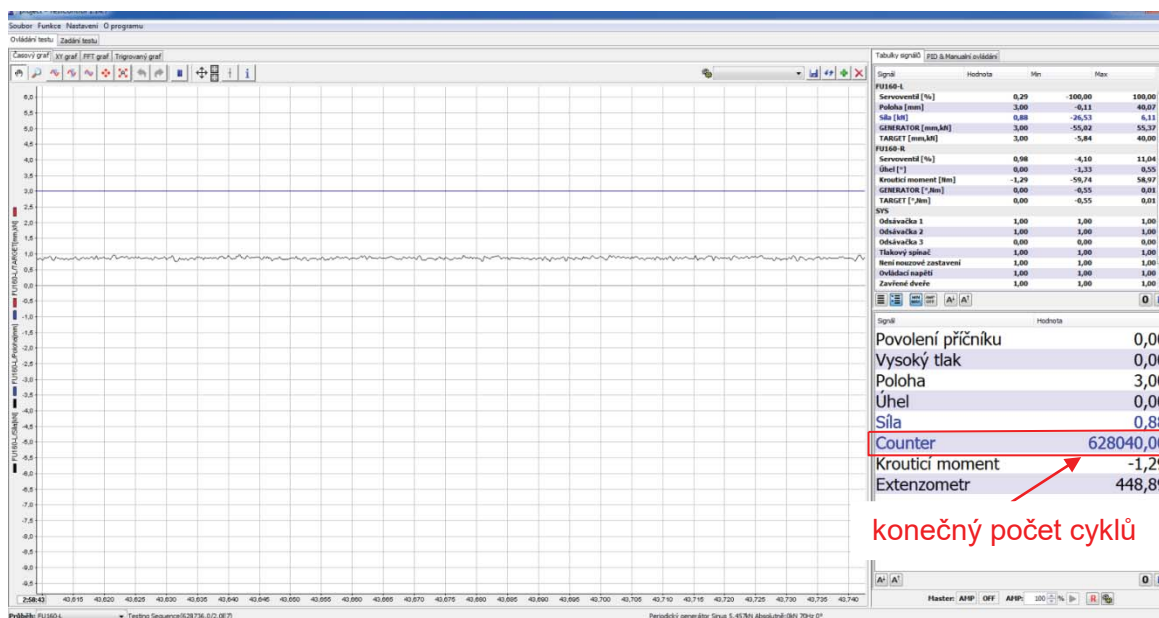


Obr. 3.11 Zadání hodnoty silové amplitudy F [kN]



Obr. 3.12 Prostředí programu TESTCONTROL během zkoušky

Jelikož test některých vzorků trval řádově i několik dnů, byl aktuální stav testu sledován přes vzdálený přístup. Po ukončení zkoušky (viz. obr. 3.13), bylo vidět, že amplituda se ustálila na nulové hodnotě.



Obr. 3.13 Prostředí programu TESTCONTROL po ukončení zkoušky

Před spuštěním stroje bylo nejprve potřeba zadat do programu napěťovou hladinu. Jako první napěťová hladina byla zvolena přibližná hodnota meze kluzu, která byla získaná ze statické zkoušky tahem. Do zkušebního programu bylo však nutné napěťové hladiny přepočítat tak, aby jednotky byly v kN. Přepočet byl proveden pomocí vzorce (16). Zvolené napěťové hladiny a jejich příslušný přepočet jednotek na kN je zaznamenán v tab. 2.

$$\sigma = \frac{F}{S} \rightarrow F = \sigma S \quad [N] \quad (16)$$

Kde:

σ - napětí (napěťová hladina) [MPa]

F – síla (silová amplituda) [N]

S - průřez vzorku [mm²]

Šířka každého vzorku byla změřena posuvným měřítkem, poté byl spočítán průřez vzorku S [mm²].

$$S = b t \quad [mm^2] \quad (17)$$

kde:

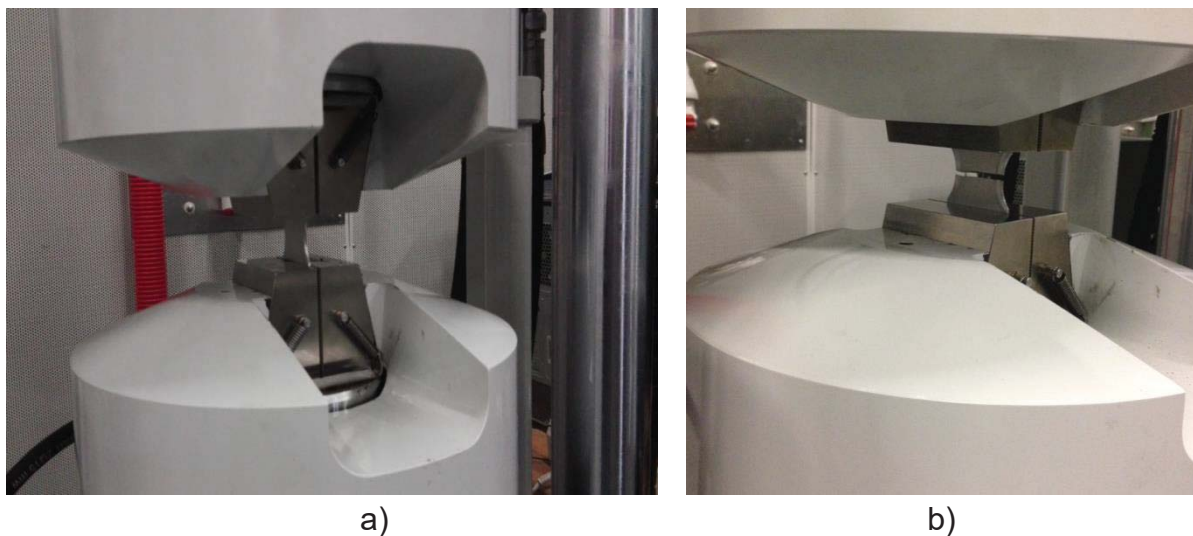
b - šířka vzorku [mm]

t - tloušťka vzorku [mm]

Získaná hodnota síly byla zadána do programu (viz. obr. 3.11) a následně byl vzorek upnut do čelistí stroje (viz obr. 3.14).

Tab. 2 Zvolené napěťové hladiny a jejich přepočet do kN

Napěťová hladina	silová hladina	
	σ [MPa]	F [kN]
150	7200	7,20
140	6720	6,72
130	6240	6,24
120	5760	5,76
110	5280	5,28
100	4800	4,80
90	4320	4,32

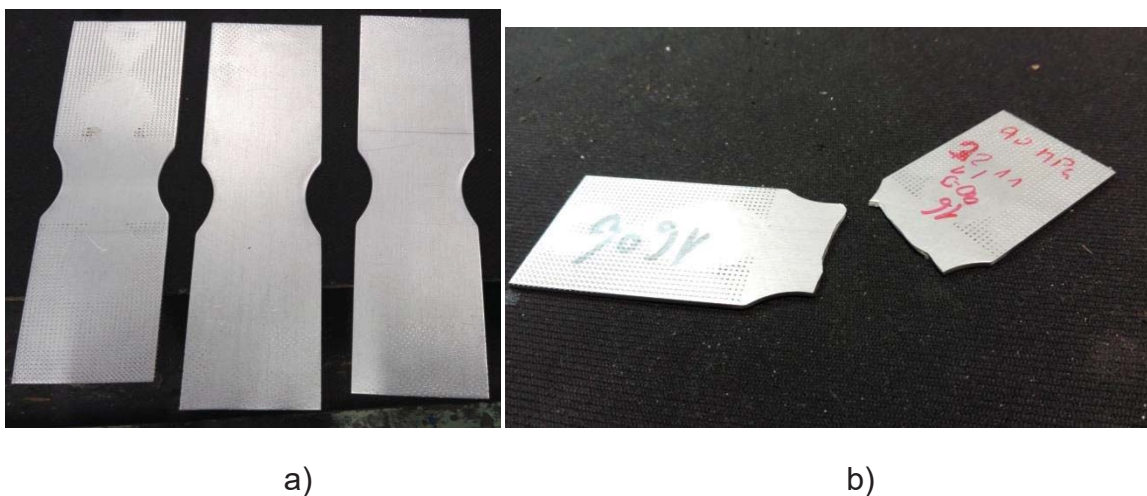


Obr. 3.14 Vzorek upnutý v čelistech stroje - a) během testu, b) po porušení

Po upnutí do čelistí se spustil proces cyklického zatěžování. Druh cyklického namáhání byl souměrně střídavý. Pro tuto bakalářskou práci byl důležitý počet cyklů do porušení vzorku N_f [1] respektive $2N_f$ [1] - půlkmitů. Zkoušení bylo časově velmi náročné, jelikož v některých případech se jednalo řádově o dny.

3.3. Vyhodnocení výsledků

Po skončení testu a porušení vzorku (viz obr. 3.15) program zobrazil konečný počet cyklů (viz. obr. 3.13), které jsou zaznamenány v tab. 3 pro vzorek bez deformace a v tab. 4 pro vzorek s předdeformací 16%.



Obr. 3.15 Zkušební vzorek - a) původní, b) po porušení

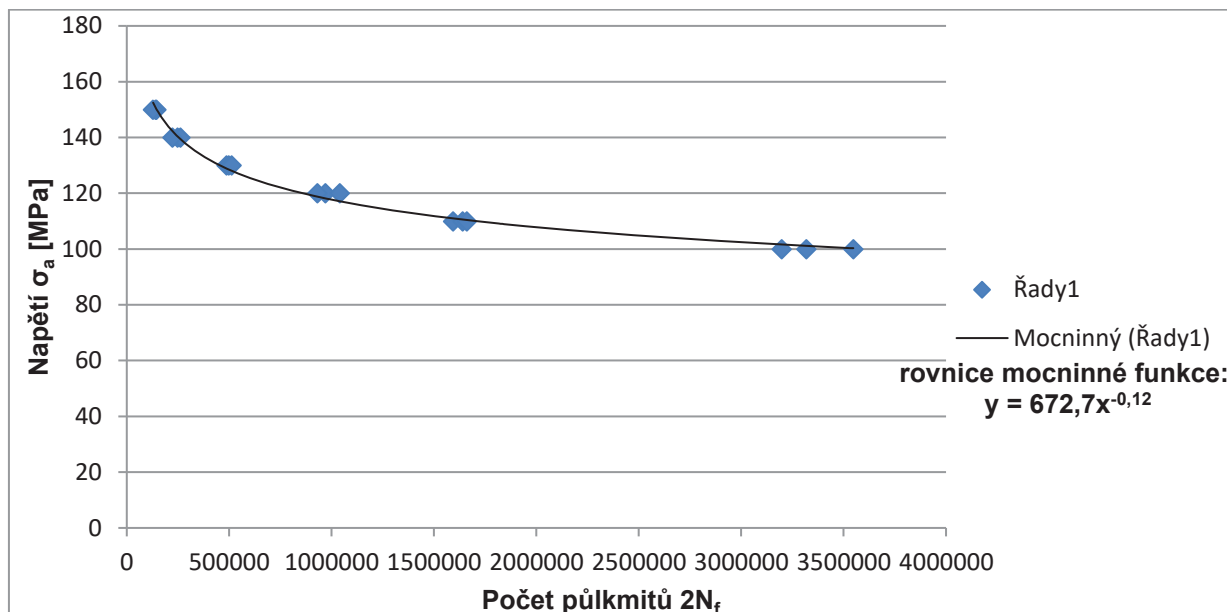
Tab. 3 Hodnoty $[\sigma_a - N_f]$ a $[\sigma_a - 2N_f]$ pro vzorek bez deformace

σ_a [MPa]	N_f [1]	$2N_f$ [1]
150	69718	139436
150	72039	144078
150	64224	128448
140	123902	247804
140	131200	262400
140	111571	223142
130	243343	486686
130	249233	498466
130	255984	511968
120	485233	970466
120	465332	930664
120	520378	1040756
110	796204	1592408
110	820369	1640738
110	830125	1660250
100	1658944	3317888
100	1773687	3547374
100	1599151	3198302

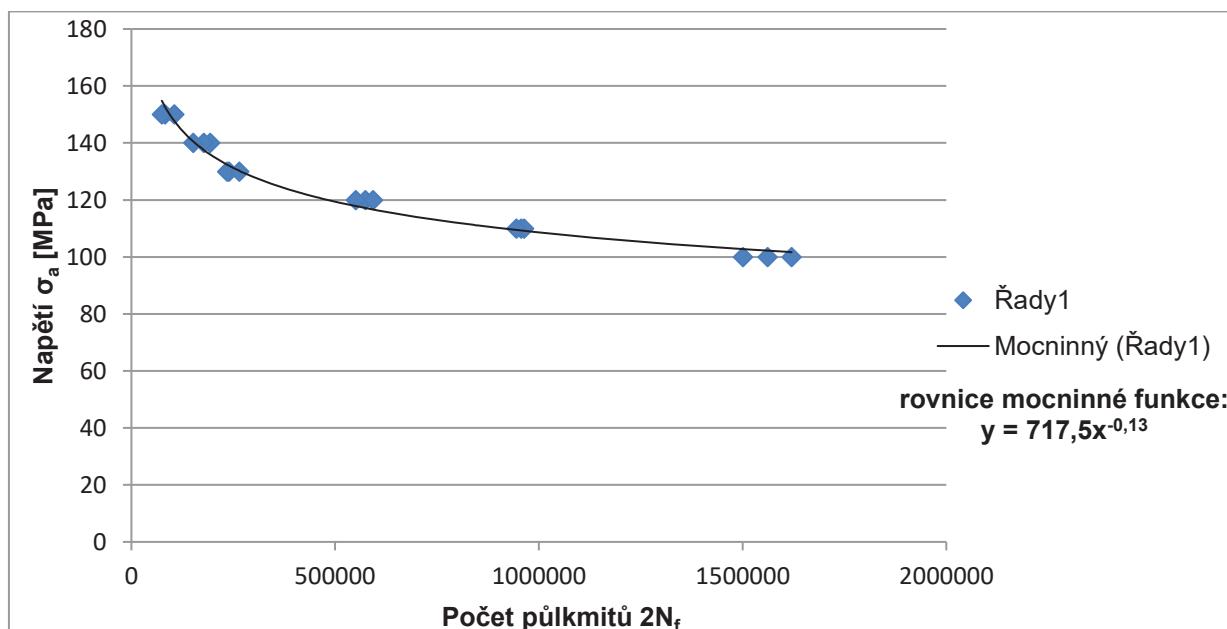
Tab. 4 Hodnoty $[\sigma_a - N_f]$ a $[\sigma_a - 2N_f]$ pro vzorek s 16% deformace

σ_a [MPa]	N_f [1]	$2N_f$ [1]
150	41421	82842
150	52690	105380
150	37351	74702
140	96863	193726
140	88942	177884
140	75982	151964
130	119775	239550
130	117607	235214
130	132456	264912
120	287192	574384
120	296487	592974
120	275367	550734
110	478343	956686
110	482131	964262
110	472381	944762
100	750462	1500924
100	780713	1561426
100	810279	1620558

Na obrázcích 3.16 a 3.17 je v grafech zobrazena závislost počtu půlkmitů $2N_f$ na napětí, obě osy mají lineární měřítko.



Obr. 3.16 Graf závislosti napětí na počtu půlkmitů - bez předchozí deformace



Obr. 3.17 Graf závislosti napětí na počtu půlkmitů - s 16% předchozí deformací

Hodnoty napětí a počty cyklů byly pro praktické využití a pro větší přehlednost v grafu převedeny do logaritmických hodnot (viz. tab. 5 a tab. 6).

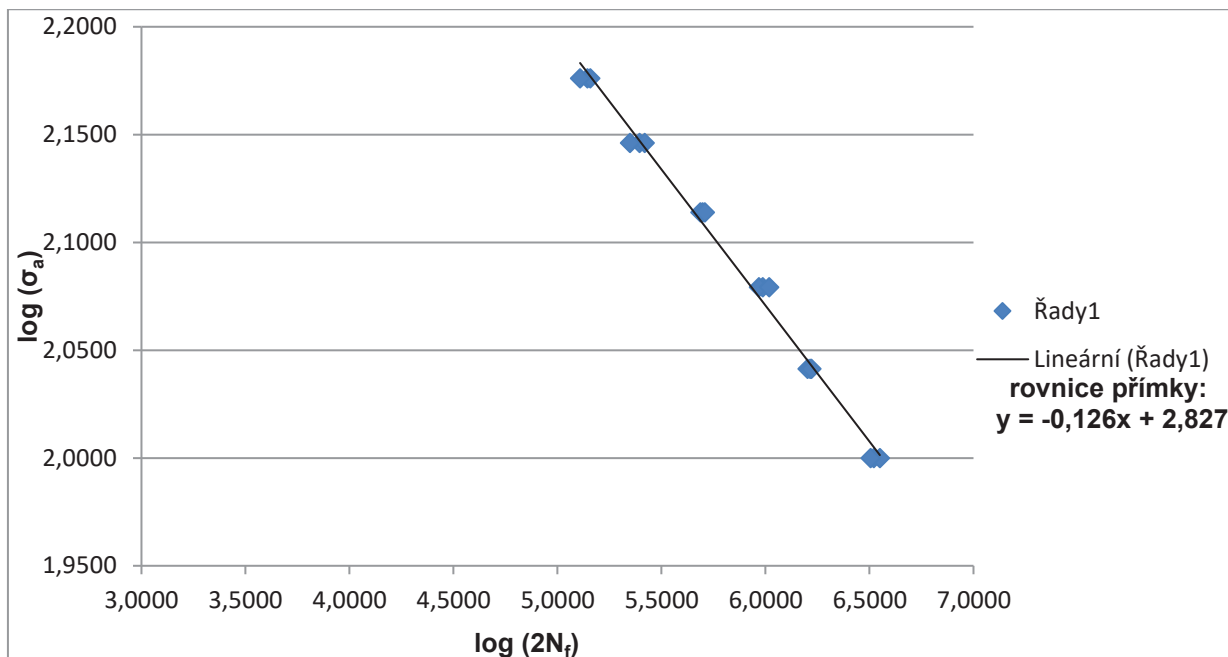
Tab. 5 Hodnoty $[\sigma_a - 2N_f]$, a $[\log(\sigma_a) - \log(2N_f)]$ pro vzorek bez deformace

σ_a [MPa]	N_f [1]	$2N_f$ [1]	$\log(\sigma_a)$	$\log(2N_f)$
150	69718	139436	2,1761	5,1444
150	72039	144078	2,1761	5,1586
150	64224	128448	2,1761	5,1087
140	123902	247804	2,1461	5,3941
140	131200	262400	2,1461	5,4190
140	111571	223142	2,1461	5,3486
130	243343	486686	2,1139	5,6872
130	249233	498466	2,1139	5,6976
130	255984	511968	2,1139	5,7092
120	485233	970466	2,0792	5,9870
120	465332	930664	2,0792	5,9688
120	520378	1040756	2,0792	6,0173
110	796204	1592408	2,0414	6,2021
110	820369	1640738	2,0414	6,2150
110	830125	1660250	2,0414	6,2202
100	1658944	3317888	2,0000	6,5209
100	1773687	3547374	2,0000	6,5499
100	1599151	3198302	2,0000	6,5049

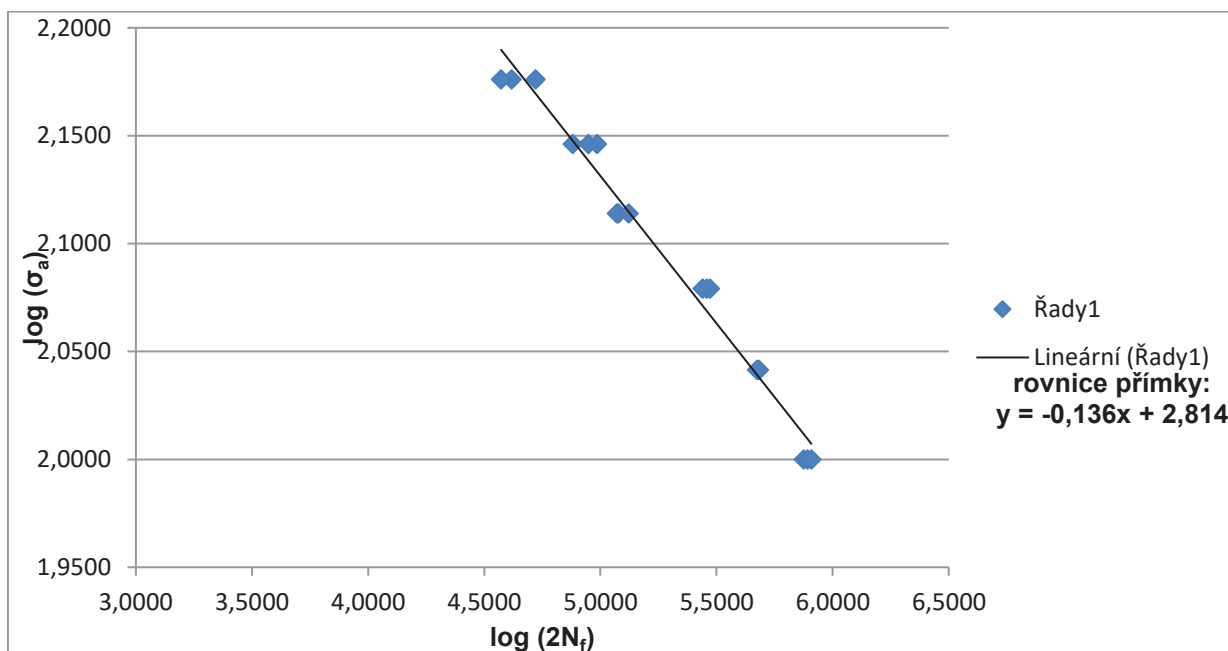
Tab. 6 Hodnoty $[\sigma_a - 2N_f]$, a $[\log(\sigma_a) - \log(2N_f)]$ pro vzorek s 16% deformace

σ_a [MPa]	N_f [1]	$2N_f$ [1]	$\log(\sigma_a)$	$\log(2N_f)$
150	41421	82842	2,1761	4,6172
150	52690	105380	2,1761	4,7217
150	37351	74702	2,1761	4,5723
140	96863	193726	2,1461	4,9862
140	88942	177884	2,1461	4,9491
140	75982	151964	2,1461	4,8807
130	119775	239550	2,1139	5,0784
130	117607	235214	2,1139	5,0704
130	132456	264912	2,1139	5,1221
120	287192	574384	2,0792	5,4582
120	296487	592974	2,0792	5,4720
120	275367	550734	2,0792	5,4399
110	478343	956686	2,0414	5,6797
110	482131	964262	2,0414	5,6832
110	472381	944762	2,0414	5,6743
100	750462	1500924	2,0000	5,8753
100	780713	1561426	2,0000	5,8925
100	810279	1620558	2,0000	5,9086

Na obr. 3.18 a 3.19 jsou grafy s osami v logaritmickém měřítku. Body v grafech s lineárním měřítkem jsou prokládány mocninou funkcí, kdežto body v grafech s logaritmickým měřítkem jsou prokládány funkcí lineární. U každého grafu je také zobrazena rovnice mocninné funkce resp. přímky.



Obr. 3.18 Graf závislosti napětí na počtu půlkmitů - bez předchozí deformace



Obr. 3.19 Graf závislosti napětí na počtu půlkmitů - s 16% předchozí deformací

Z praktického hlediska jednotného popisu únavových zkoušek při měkkém a tvrdém zatěžování (pouze pro případ symetricky střídavého zatížení hladkých tyčí v tahu - tlaku), užívá se mocninová aproximace šikmé větve Wöhlerovy křivky od meze únavy k mezi kluzu v závislosti na počtu půlkmitů $2N_f$ do poruchy. Jedná se o tzv. Basquinovu rovnici (18). [13]

$$\sigma_a = \sigma_f'(2N_f)^b \quad (18)$$

kde:

σ_f' - součinitel únavové pevnosti [MPa]

b - exponent únavové pevnosti [1]

V rovnici (18) je počet cyklů N_f vynásoben dvěma, proto je počet cyklů N_f v tab. 2 a v tab. 3 také vynásoben dvěma. Rovnice (18) je rovnicí mocninné funkce, ve které jsou pro tuto bakalářskou práci důležité hodnoty σ_f' a b . Tyto dvě hodnoty jsou numerickým výsledkem následujícího postupu.

Postup určení σ_f' :

$$\sigma_a = \sigma_f'(2N_f)^b$$

$$y = A x^B$$

$$\text{kde: } \sigma_a \equiv y, \quad \sigma_f' \equiv A, \quad 2N_f \equiv x, \quad b \equiv B$$

- rovnici zlogaritmuje

$\log(y) = \log(A) + B \log(x)$ tento tvar odpovídá rovnici přímky: $y=q+kx$

$$y \equiv \log(y), \quad q \equiv \log(A), \quad B \log(x) \equiv kx$$

$$q = \log(A) \rightarrow A = 10^q \quad (19)$$

Hodnoty B a byly zjištěny přímo z rovnice mocninné funkce na obr. 3.16 a 3.17. Hodnoty A byly vypočteny z rovnice (19). Hodnoty q byly získány z rovnice přímky na obr. 3.18 a 3.19. Výsledné hodnoty shrnuje Tab. 7 a obr. 3.20.

Ukázka výpočtu (pro vzorek bez předchozí deformace):

$$B = -0,12$$

$$A = 10^q = 10^{2,827}$$

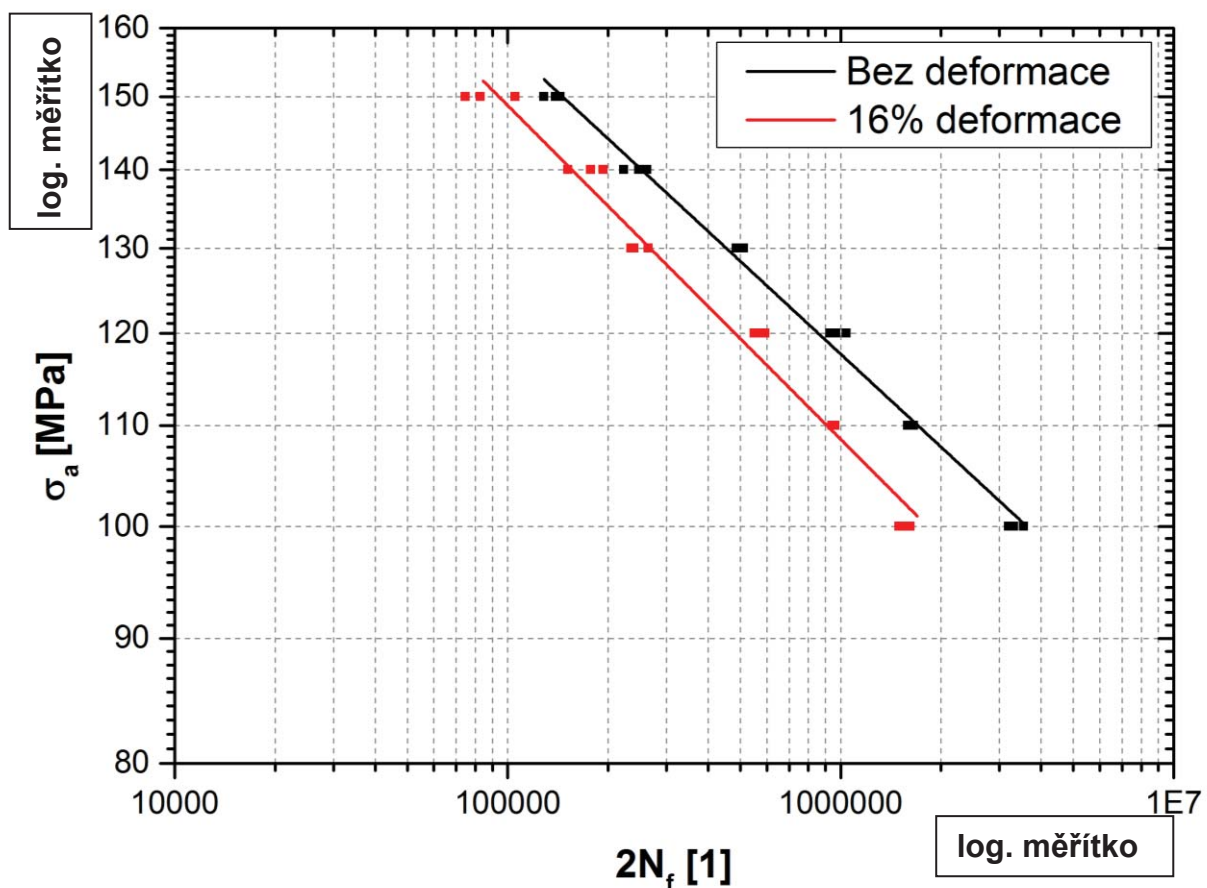
$$A = 671,4$$

Tab. 7 Výsledné hodnoty únavových konstant z rovnice (18)

	0% deformace	16% deformace
σ_f [MPa]	671,4	651,6
b [1]	-0,12	-0,13

Na obr. 2.20 je graf, který zobrazuje výsledné hodnoty pro vzorky bez předchozí deformace a pro vzorky s 16% předdeformace.

Před provedením experimentu byly zvažovány dva základní vlivy na křivku únavy - zpevnění materiálu a vyčerpání plasticity vlivem předdeformace. Z výsledných numerických hodnot (viz. tab. 7) a grafu (viz. obr. 2.20) lze určit, že zpevnění materiálu nemělo na únavové vlastnosti velký vliv. Vlivem předdeformace byla nejspíše vyčerpána část plasticity materiálu a z toho důvodu předdeformované vzorky vydržely méně zatěžovacích cyklů.

**Obr. 2.20** Graf výsledných hodnot

4. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo provést zkoušku cyklického zatěžování u skupiny vzorků bez deformace a s 16% předdeformace a zjistit charakteristické hodnoty σ_f a b pro popis šikmé větve Wöhlerovy křivky. Jako testovaný materiál byl zvolen hliníkový plech ze slitiny AW 5182, která obsahuje 4,5% Mg a 0,4% Mn.

Příprava materiálu i samotná zkouška byly provedeny v laboratořích Katedry strojírenské technologie na TU v Liberci. Nejdříve bylo potřeba vystříhnout 3 vzorky pro normalizovanou statickou zkoušku tahem ve směru válcování 0° . Následovala příprava vzorků pro zkoušku cyklickým zatěžováním, která měla několik kroků. Nejdříve bylo z plechu vystřiženo 60 kusů ve směru válcování 0° , které byly rozděleny do dvou skupin. První skupina zůstala v původním stavu a druhá byla předdeformována na 16% celkové deformace. Poté se u druhé skupiny vzorků musely odstříhnout natažené rohy. Poslední fází bylo vyfrézování krčku a jejich obroušení.

Vlastní experiment probíhal na únavovém stroji od firmy INOVA, s označením FU-O-160-1600-V2. U každého vzorku byla změřena jeho šířka a následně byla spočítána příslušná silová hladina, jenž byla zadána do programu TESTCONTROL v kN. Poté byl vzorek upnut do čelistí stroje a spuštěn test. Na monitoru bylo vidět, že amplituda síly nabíhala na svou hodnotu postupně. Napětí bylo souměrně střídavé. Test vzorků byl časově velmi náročný, jelikož v některých případech se jednalo řádově o dny. Po porušení vzorků byl test zastaven a program ukázal konečný počet cyklů do porušení. Tyto hodnoty (resp. počty půlkmitů) byly zaznamenány do příslušné tabulky.

Základním výstupem této bakalářské práce bylo zjištění, zda-li má předdeformace vliv na cyklickou mez únavy. Předdeformované vzorky vydržely v některých případech téměř o 50% méně cyklů než vzorky nedeformované. V průměru to však bylo přibližně o 30%. Z toho lze určit, že zpevnění vlivem předdeformace nemá u této slitiny hliníku takový vliv na únavové vlastnosti, jaký by se očekával. V porovnání numerických výsledků (viz. tab.7) je vidět, že součinitel únavové pevnosti je vyšší u nedeformovaných vzorků a exponent únavové pevnosti je téměř stejný. Z výsledného grafu (viz. obr. 2.20) je také zřejmé, že směrnice obou dílčích grafů je přibližně stejná. Ovšem graf u vzorku s předdeformací je posunut blíže k ose Y, tedy k nižším hodnotám počtu cyklů.

V rámci zpřesnění závěru bych doporučil podrobit vzorky testování s ještě menší napěťovou hladinou, což by však trvalo i několik dní. Dále bych doporučil provést test na více vzorcích a s různými velikostmi předdeformace. Zajímavé by bylo i porovnání s jinými slitinami hliníku nebo jinými materiály (vysokopevnostní, hlubokotažný atd.,).



5. Seznam použité literatury

- [1] <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/>
- [2] ZEDNÍČEK, Jan. Deformační a lomové chování materiálu. Brno, 2007. Bakalářská práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.
- [3] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Pru%C5%BEnost#Deformace>
- [4] HLUCHÝ, Miroslav, Rudolf PAŇÁK a Jan Kolouch. Strojírenská technologie 2 - 1. díl. Polotovary a jejich technologičnost. Praha: Scientia, 2001, ISBN 80-7183-244-8.
- [5] http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
- [6] HLUCHÝ, Miroslav, Jan Kolouch. Strojírenská technologie 1 - 1. díl. Nauka o materiálu. Praha: Scientia, 2002, ISBN 80-7183-262-6.
- [7] http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/mec_uceb/mec2_txt.pdf
- [8] PEŠÍK, Lubomír. Části strojů - 1. díl. Liberec: TU v Liberci 2015. ISBN 978-80-7494-183-2
- [9] http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a_pruznost_pevnost.php
- [10] https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=55045
- [11] <http://www.mtfdca.szm.com/subory/unava.pdf>
- [12] www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt.../HLINIK_a_jeho_slitiny_podklady.ppt
- [13] RŮŽIČKA, M., HANKE, M. a ROST, M. Dynamická pevnost a životnost. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1989. s. 212.
- [14] HERTZBERG, R.W. Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 1996. s. 786. ISBN 0-471-01214-9.
- [15] ASM HANDBOOK. Volume 8 - Mechanical Testing and Evaluation. 10th ed. Materials Park: ASM International, 2000. s. 998. ISBN 0-87170-389,0.
- [16] ČSN ISO 12106. Kovové materiály - Zkoušení únavy - Metoda řízení osově deformace. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. 40 s. Třídící znak 420372.