

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Korelace výsledků zkoušek únavy získaných na klasických a miniaturních vzorcích

Autor: **Josef MACH**  
Vedoucí práce: **Prof. Ing. Václav Mentl, CSc.**

Akademický rok 2016/2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Josef MACH**

Osobní číslo: **S16B0216P**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**

Název tématu: **Korelace výsledků zkoušek únavy získaných na klasických a miniaturních vzorcích**

Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

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

Osnova bakalářské práce:

1. Úvod do problematiky
2. proces únavy a metody zkoušení
3. Návrh experimentálního programu. volba materiálu
4. realizace experimentálního programu. Rozbor výsledků
5. Diskuze výsledků
6. Závěr

Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**HOESCHL, C.** *Únava materiálu při periodickém zatěžování UT ČSTAV, Praha 1981*

**KLESNÍL, M., LUKÁŠ, P.** *Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání Academia, Praha 1975*

**KUČERA, J.** *Stručný návod do mechaniky lomu. II. část. Únava materiálu. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU, 107s. ISBN 80-7078-244-7*

Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Ing. Václav Mentl, CSc.**

Regionální technologický institut

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Josef Volák, Ph.D.**

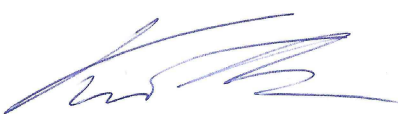
Regionální technologický institut

Datum zadání bakalářské práce: **19. září 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2017**

  
Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž  
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. září 2016

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Mach	Jméno Josef		
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301R016- Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie			
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Prof. Ing. Mentl, CSc.	Jméno Václav		
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KMM			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se škrtněte	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Korelace výsledků zkoušek únavy získaných na klasických a miniaturních vzorcích			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	50	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	50	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	<p>Bakalářská práce obsahuje seznámení s problematikou spjatou s únavovým poškozením materiálu. Je zde popsán charakter únavového poškození a způsob určování únavové charakteristiky. Cílem je určit vzájemný vztah mezi výsledky provedených zkoušek únavy na klasických zkušebních tělesech a miniaturních zkušebních vzorcích určených pro zkoušky únavy.</p>
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>  <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	<p>Zkoušky únavy, Miniaturní zkušební vzorky, Small Punch Test, Small Fatigue Test, Korelace výsledků</p>

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Mach	Name Josef	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301R016- Materials Engineering and Engineering Metallurgy		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Prof. Ing. Mentl, CSc.	Name Václav	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Correlation of fatigue test results obtained on standard and miniature samples		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KMM	<b>SUBMITTED IN</b>	2017
----------------	---------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	50	<b>TEXT PART</b>	50	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The bachelor thesis contains an introduction to problems connected with fatigue damage of the material. It describes the character of fatigue damage and determining of fatigue characteristics. The aim is to determine the correlation between the results of the fatigue tests performed on the classic test samples and the miniature test specimens for fatigue testing.
<b>KEY WORDS</b>	Fatigue Tests, Miniature Test Samples, Small Punch Test, Small Fatigue Test, Correlation of Results

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 2.6.2017

Josef Mach

## **Poděkování**

Tímto způsobem bych rád poděkoval panu prof. Ing. Václavu Mentlovi, CSc. za cenné rady, které mi v průběhu tvorby bakalářské práce poskytl.

Poděkování samozřejmě patří i panu Ing. Josefu Volákovi, PhD. za jeho připomínky a rady při konzultacích bakalářské práce.

## Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	<b>7</b>
<b>1. ÚNAVA MATERIÁLU</b> .....	<b>8</b>
1.1 CHARAKTERISTIKA ÚNAVY MATERIÁLU .....	8
1.2 PODSTATA ÚNAVOVÉHO POŠKOZOVÁNÍ.....	11
1.2.1 <i>Stádium změn mechanických vlastností</i> .....	11
1.2.2 <i>Stádium nukleace trhli</i> .....	15
1.2.3 <i>Stádium šíření trhlin</i> .....	18
1.2.4 <i>Lom</i> .....	21
1.3 HODNOCENÍ ODOLNOSTI PROTI ÚNAVOVÉMU POŠKOZENÍ.....	22
<b>2 METODA SMALL PUNCH TEST (SPT)</b> .....	<b>24</b>
2.1 ODBĚR A PŘÍPRAVA VZORKŮ .....	25
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI</b> .....	<b>29</b>
3.1 ÚVOD DO EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI .....	29
3.2 EXPERIMENTÁLNÍ MATERIÁL.....	29
3.3 ZKUŠEBNÍ TĚLESA PRO ZKOUŠKU ÚNAVY .....	33
3.3.1 <i>Klasické zkušební vzorky</i> .....	33
3.3.2 <i>Miniaturní zkušební vzorky</i> .....	34
3.3.3 <i>Použité typy zkušebních vzorků</i> .....	35
3.4 ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ .....	38
3.5 ZKUŠEBNÍ PODMÍNKY A PRŮBĚH ZKOUŠEK .....	40
3.6 VÝSLEDKY ZKOUŠEK.....	41
3.6.1 <i>Série HB:</i> .....	41
3.6.2 <i>Série SB</i> .....	42
3.6.3 <i>Série PL</i> .....	44
3.7 DISKUSE VÝSLEDKŮ .....	46
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>47</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>1</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>2</b>



## Seznam symbolů a zkratk

### Symbols

$f$	[Hz]	frekvence
$T$	[s]	doba kmitu
$\sigma_m$	[MPa]	střední napětí
$\sigma_h$	[MPa]	horní napětí
$\sigma_n$	[MPa]	spodní napětí
$\sigma_c$	[MPa]	napětí na mezi únavy
$\sigma_a$	[MPa]	amplituda napětí
$\sigma_{cs}$	[MPa]	skutečná mez únavy
$R$	[-]	asymetrie cyklu
$N$	[-]	počet cyklů
$N_f$	[-]	počet cyklů do lomu
$\varepsilon$	[%]	poměrná deformace
$\eta_p$	[-]	vliv povrchu
$v_\sigma$	[-]	vliv velikosti
$v'_\sigma$	[-]	vliv velikosti
$\beta$	[-]	charakter vrubu
$R_m$	[MPa]	mez pevnosti
$R_e$	[MPa]	smluvní mez kluzu

**Zkratky**

SPT

Small Punch Test

SFT

Small Fatigue Test

## Úvod

Kovy jsou jedním ze základních a nejvíce používaných materiálů při výrobě strojů a zařízení. Mechanické vlastnosti kovů jsou mnohdy nenahraditelné a dovolují konstrukci součástí, které by při použití jiného materiálu nebylo možné použít. Avšak požadavky na mechanické vlastnosti materiálů a problematiku spojenou s jejich zkoušením se stále zvyšuje.

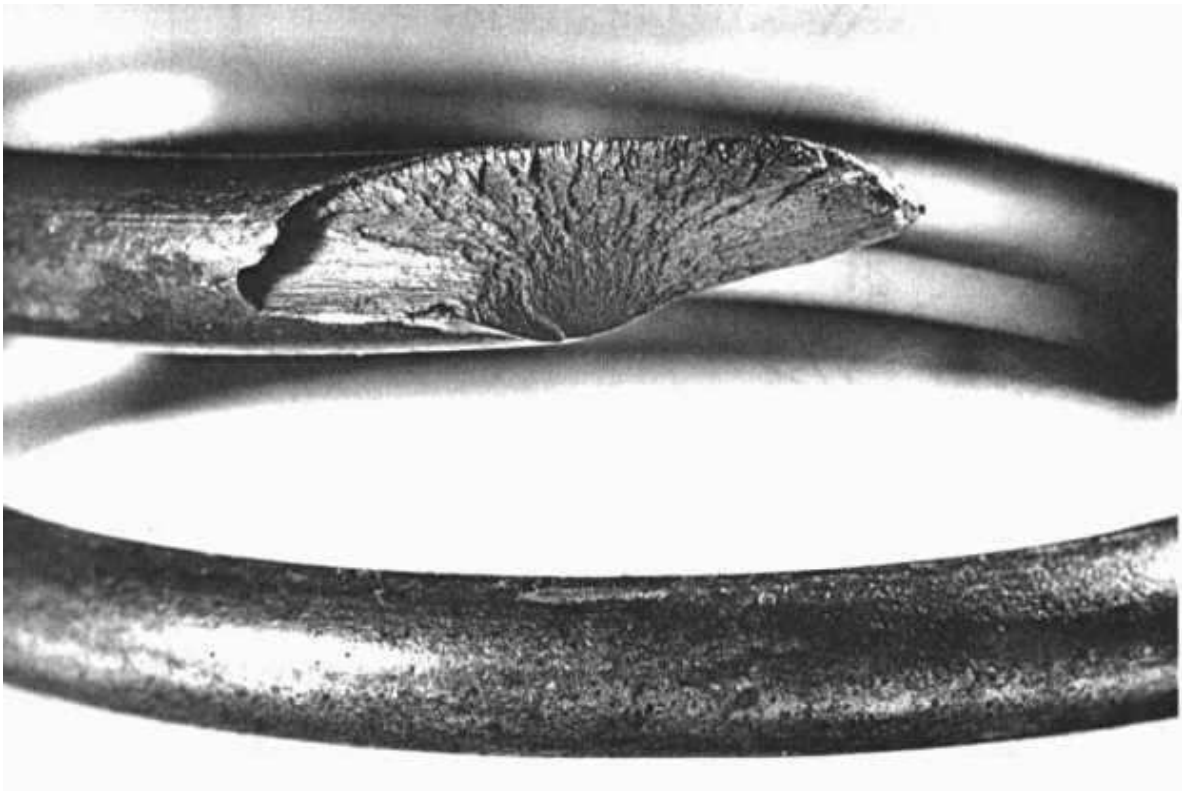
Existuje mnoho součástí, které jsou po dobu svého provozu vystaveny cyklickému zatížení. V historii je známo nespočet případů, kdy došlo k porušení součásti vlivem právě cyklického zatěžování a proto únavová životnost patří do základních mechanických vlastností každého materiálu. Tyto vlastnosti se mohou ovšem po dlouhodobém provozu součásti měnit vlivem degradace materiálu a proto je u těchto součástí, jako např.: tlakové nádoby jaderných reaktorů, třeba kontrolovat tyto vlastnosti i po určité době jejich provozu. To může být problém, protože některé provozní součásti nedovolují odebrat takové množství materiálu na přípravu zkušebních těles, aniž by byla zaručena funkčnost a bezpečnost zařízení.

Mechanické vlastnosti se určují dle platných standardů a norem, které zaručují správnou metodiku zkoušení a porovnatelnost výsledků. Tyto normy stanovují i přesné rozměry a tolerance zkoušených těles, které je občas fyzicky nemožné vyrobit. U těchto součástí lze určit mechanické vlastnosti pouze na miniaturních zkušebních vzorcích, které již ovšem nejsou v souladu s normou a výsledky proto mohou být zavádějící. Určením korelačních vztahů, získaných z charakteristik materiálů by mohlo přinést technologické i ekonomické výhody jak již při návrhu tak i při kontrole provozních součástí.

# 1. Únava materiálu

## 1.1 Charakteristika únavy materiálu

Únava materiálu je degradační proces nevratných změn vlastností a stavu materiálu, který je vyvolán mechanickým, tepelným či tepelně-mechanickým zatěžováním za současného působení dalších faktorů. Proces únavy je kumulativního charakteru a projevuje se růstem makroskopické trhliny s následným lomem. K porušení materiálu dochází při časově proměnném namáhání a při napětích menších než je hodnota meze pevnosti a často i meze kluzu daného materiálu. Důsledek a příklad lomu vzniklého proměnným namáháním je vidět na obr. 1. [1,2]

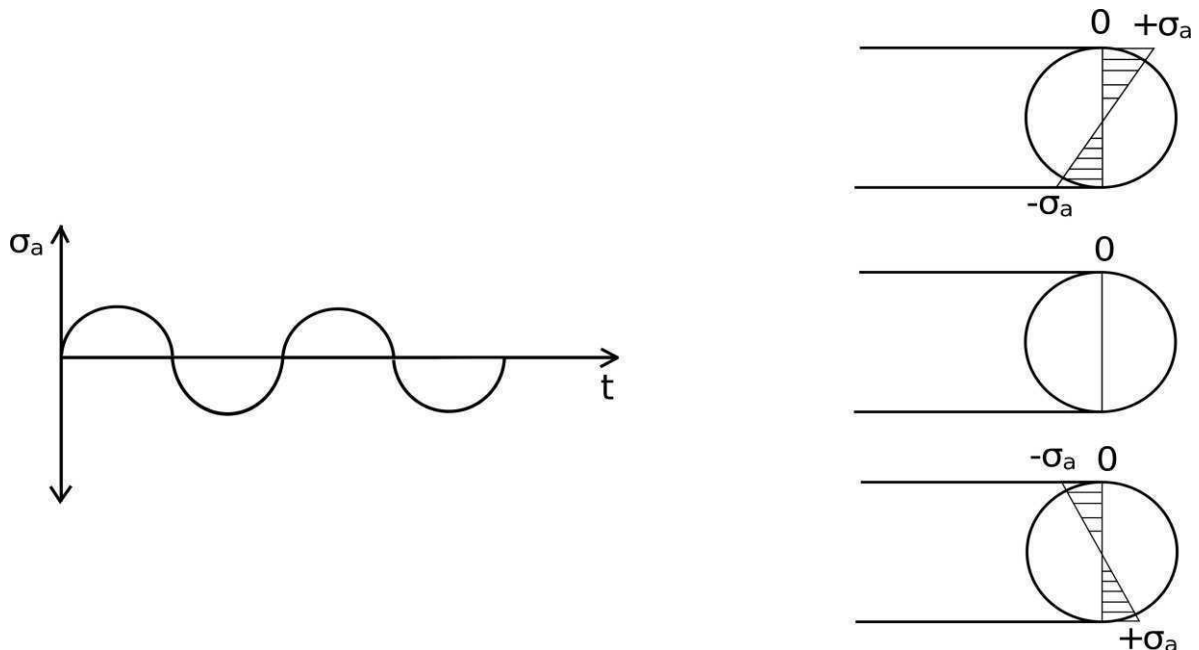


**Obr. 1 Lom pružiny vzniklý cyklickým namáháním [10]**

Podobně jako jiné mechanické charakteristiky, také únavové vlastnosti materiálů se určují laboratorními zkouškami. Nejčastěji se jedná o opakované cyklické harmonické zatěžování zkušebních tyčí, kdy je registrován počet cyklů do lomu tyče odpovídající různé velikosti amplitudy napětí působícího zatížení nebo různé velikosti amplitudy deformace.

S rostoucím napětím nebo deformací počet cyklů do lomu klesá a naopak s klesajícím napětím (nebo s klesající deformací) se doby do lomu prodlužují, přičemž u slitin železa a

slitin titanu dochází k situaci, kdy při určitých úrovních namáhání nedojde k lomu tyče ani po teoreticky nekonečném (v praxi po  $10^7$ ) počtu cyklů. Tato hranice se nazývá mez únavy a je definována jako nejvyšší amplituda napětí, při které nedojde k porušení tyče ani po  $10^7$  cyklů, [2,5].



**Obr. 2 Průběh tahového a tlakového napětí**

Cyklické zatížení mění svou hodnotu od maxima do minima. Tato změna může být vždy stejná (symetrické zatěžování), či se může měnit (asymetrické). Nejmenší časový úsek, za který se opakuje stejný průběh napětí, se nazývá doba kmitu  $T$ . Frekvence  $f$  je počet změn za jednotku času, platí [2,5]:

$$f = \frac{1}{T}$$

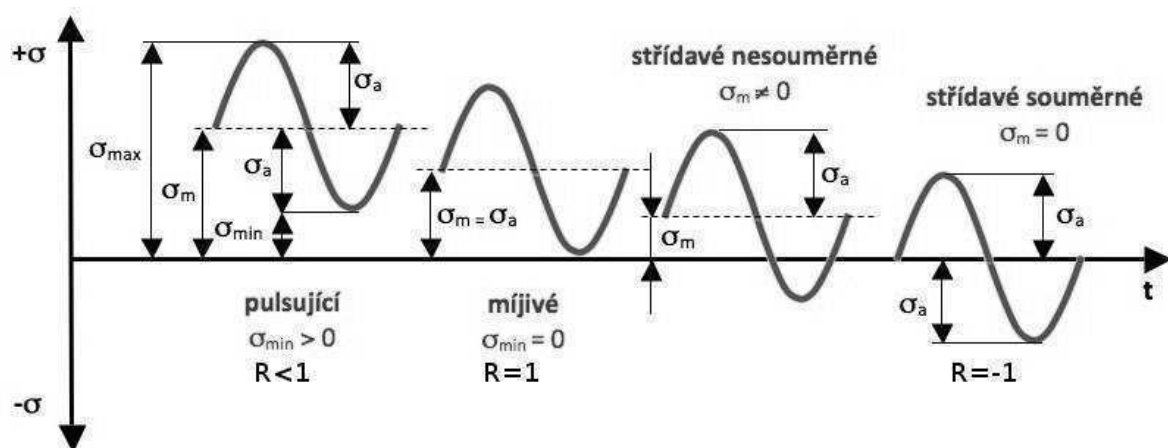
Horní napětí je algebraicky největší hodnota cyklického napětí, dolní napětí je algebraicky nejmenší hodnota cyklického napětí, střední napětí neboli statická složka zátěžného cyklu je průměrná hodnota z horního a dolního napětí [2,5]:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h - \sigma_n}{2}$$

Amplituda (výkmit) napětí je největší hodnota proměnlivé složky kmitavého napětí, je rovna polovině rozdílu horního a dolního napětí [2,5]:

Z obr. 3 je vidět, že zatížení může probíhat v tahové i tlakové oblasti. Pokud se střední napětí cyklu rovná nule, jedná se o cyklus symetrický. Pokud střední napětí nabývá nenulové hodnoty, jedná se o cyklus asymetrický. Pro posouzení asymetrie je definovaný součinitel asymetrie cyklu  $R$ . Velikost  $R$  se pohybuje v intervalu od -1 při souměrném namáhání, do +1 u mívivého namáhání. Pro  $R$  platí [2,5]:

$$R = \frac{\sigma_h}{\sigma_n}$$



Obr. 3 Typy zatěžovacích cyklů a jejich charakteristiky [1]

Ke třem základním mechanickým charakteristikám únavového namáhání konstrukčních materiálů patří

- křivka závislosti *působícího* napětí na počtu cyklů do lomu ( tzv. S – N křivka ) S- napětí (stress); N- počet cyklů (number of cycles),
- křivka závislosti působící deformace na počtu cyklů do lomu ( tzv.  $\epsilon$  – N křivka),
- závislost rychlosti růstu únavové makrotrhliny na úrovni cyklického zatížení (vyjádřené prostřednictvím parametrů lomové mechaniky, např. velikostí rozkmitu součinitele intenzity napětí )

Všechny tři uvedené experimentální metodiky jsou využívány v inženýrské praxi, první dvě uvažují materiál/součást jako kontinuum a výsledná křivka, resp. počet cyklů nebo doba do lomu, zahrnuje všechna stádia únavového procesu, třetí metoda charakterizuje část únavového procesu odpovídající šíření makrotrhliny v součásti, [1].

## 1.2 Podstata únavového poškození

Únava materiálu je podmíněna cyklickou plastickou deformací. Elastická deformace ani po nekonečném počtu cyklů nevede k nevratným změnám ve struktuře a tudíž se nemohou změnit vlastnosti materiálu. Naproti tomu sebemenší, ale mnohokrát opakovaná plastická deformace vede ke kumulativnímu poškození, jež zpravidla končí lomem. V případě, že je těleso zatěžováno relativně vysokou úrovní namáhání, jsou v průběhu cyklu přítomné jak elastické, tak i plastické deformace. V tomto případě je počet cyklů do lomu relativně nízký. Jedná se o oblast tzv. nízkocyklové únavy a obvykle se pohybuje v rozmezí od  $10^4$  do  $10^5$  cyklů. Při nižší úrovni namáhání jsou přítomny pouze mikroplastické deformace, a to vede k delším dobám do lomu. Tato oblast se nazývá oblast vysokocyklové únavy. Počet cyklů je obvykle  $N > 10^5$ . Únavový proces lze rozdělit na čtyři po sobě následující, někdy i překrývající se stádia:

- a) stádium změn mechanických vlastností
- b) stádium nukleace trhlin
- c) stádium šíření trhlin
- d) lom

Všeobecně jsou pro vznik únavového poškození nutné tři současně působící podmínky:

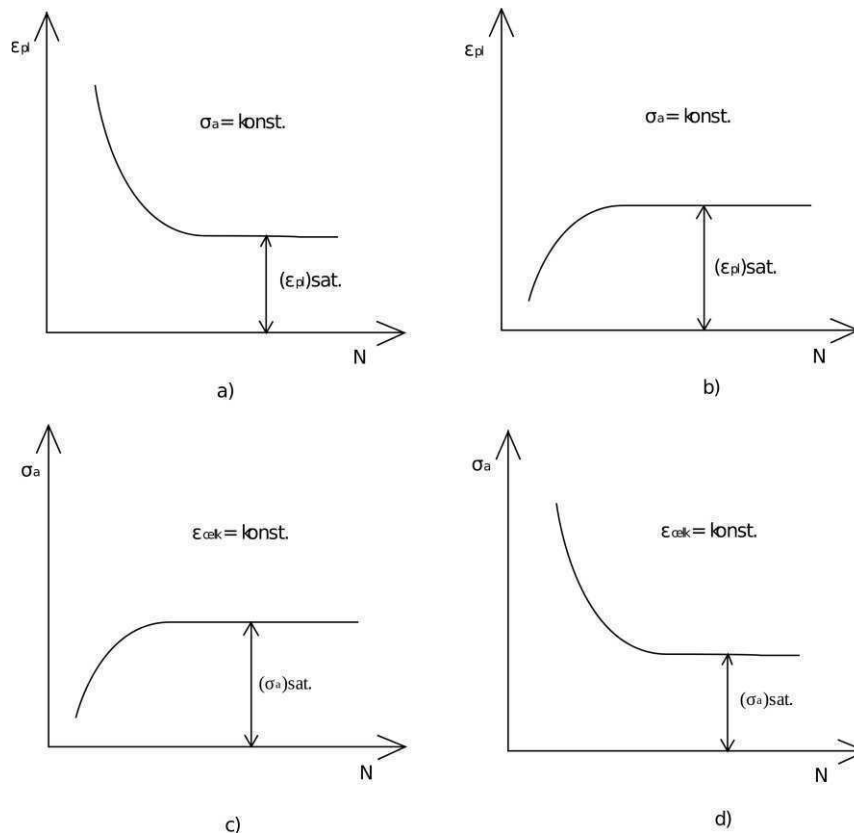
- a) cyklické namáhání
- b) tahové napětí
- c) plastická deformace

Mezi jednotlivými stádii neexistují přesné hranice: iniciace trhlin zpravidla probíhá již ve stádiu měřitelných změn mechanických vlastností, podobně délka trhliny oddělující stádia iniciace a šíření trhliny je záležitostí konvence, [1].

### 1.2.1 Stádium změn mechanických vlastností

Ke změnám mechanických vlastností dochází v počáteční fázi cyklického zatěžování v celém objemu daného materiálu. Děje se tak v důsledku mikrostrukturních změn, především vlivem měnící se hustoty a konfigurace mřížkových poruch. Tyto změny jsou nejvýraznější na začátku a s rostoucím počtem cyklů intenzita změn mechanických vlastností klesá, až nakonec zcela ustanou nebo jsou nevýrazné. Odpor materiálu proti

cyklické plastické deformaci může v průběhu cyklického zatěžování stoupat nebo klesat. To záleží především na typu materiálu, podmínkách zatěžování a teplotě. Stádium změn mechanických vlastností zpravidla končí saturovanou hysterezní smyčkou.

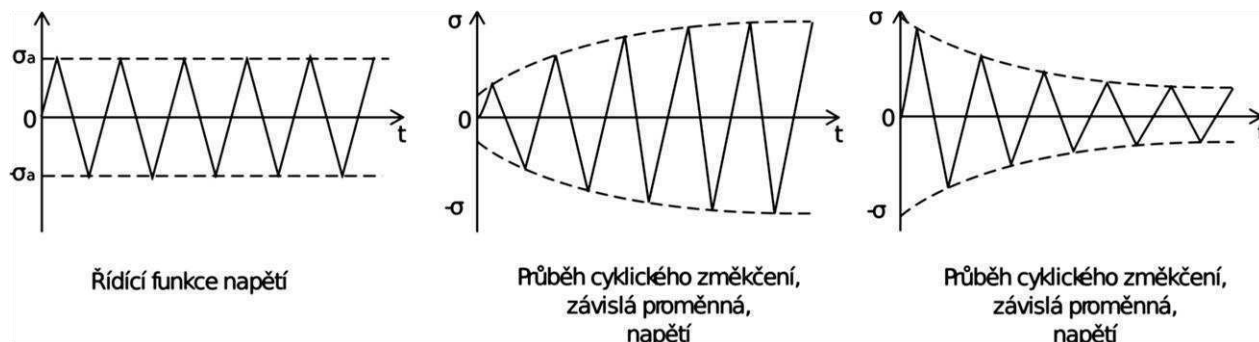


**Obr. 4 Průběh cyklického zpevnění či změkčení v závislostech  $\sigma_a - N$ ,  $\epsilon_{pl} - N$**

Během cyklického zatěžování může docházet k tzv. cyklickému zpevnění či změkčení. U cyklického zatěžování s konstantní amplitudou napětí se může měnit jen amplituda deformace. Pokud amplituda deformace v závislosti na čase klesá, jedná se o případ cyklického zpevnění (obr. 4a). Pokud je tomu naopak a amplituda deformace v závislosti na čase klesá, jedná se o cyklické změkčení (obr. 4b). U cyklického zatěžování s konstantní amplitudou deformace se cyklické zpevnění projeví jako nárůst amplitudy napětí (obr. 4c), cyklické změkčení pak jejím poklesem (obr. 4d). Z praktického hlediska je cyklické změkčení považováno za stav nežádoucí, [1,2,8].

Průběh cyklického zpevnění a změkčení v souřadnicovém systému napětí-čas je znázorněn na obr.5





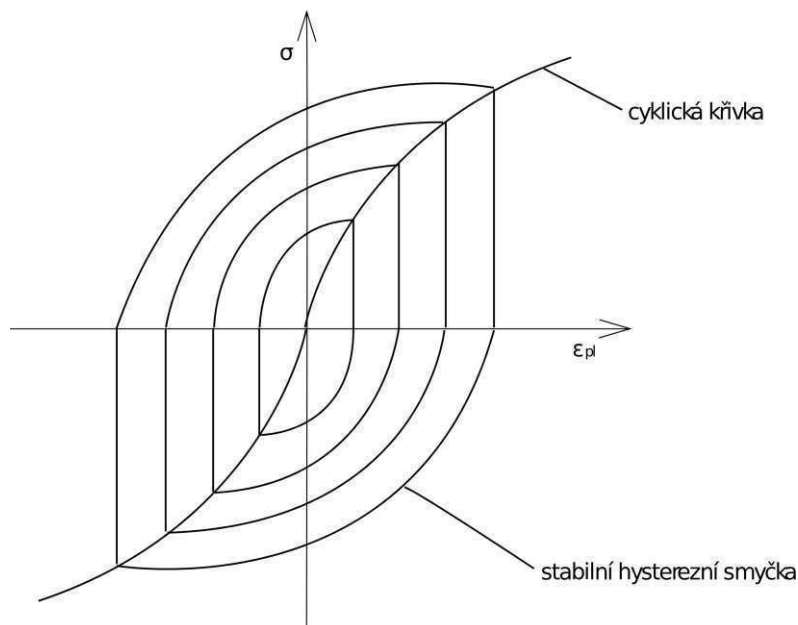
**Obr. 5 Průběh cyklického zpevnění a změkčení v souřadnicovém systému  $\sigma$ - $t$**

Experimentálně bylo zjištěno, že cyklické zpevnění je standardním jevem u vyžíhaných materiálů, naopak k cyklickému změkčení dochází u materiálů, které byly dříve nějak zpevněny (ať už plastickou deformací, či tepelným zpracováním). Zda dojde u daného materiálu k cyklickému zpevnění či změkčení lze zjistit pomocí poměru  $R_m/R_e$ , viz Tab. 1

**Tab. 1 Cyklický jev pro poměr  $R_m/R_e$**

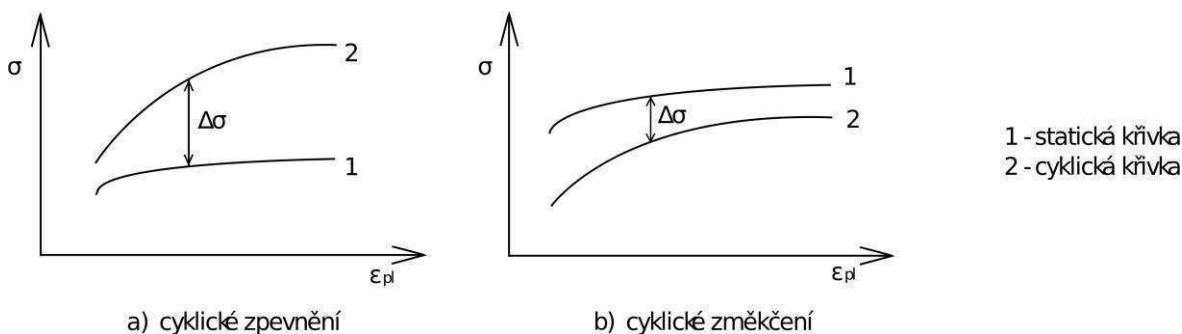
$R_m/R_e$	cyklický jev
<1,2	změkčování
1,2-1,4	stabilní/nejisté
>1,4	zpevnňování

V průběhu cyklického zpevnňování či změkčování vzniká zároveň hysterezní smyčka. Různým amplitudám přísluší různé stabilizované hysterezní smyčky. Poté, co dosáhne amplituda napětí nebo amplituda deformace svých satureovaných hodnot, se vytvoří satureovaná hysterezní smyčka. Spojením vrcholových bodů těchto smyček se získá cyklická křivka závislosti napětí na deformaci (obr. 6). [2]



**Obr. 6 Příklad hysterese smyčky a vznik cyklické křivky**

Z únavových vlastností je tato křivka jednou z nejdůležitějších charakteristik materiálu, stejně tak jako je pro tah tahový diagram. Jak je velké vzniklé cyklické zpevnění či změkčení je možné určit rozdílem statické a cyklické křivky deformace/napětí. Je-li pro danou amplitudu deformace cyklické napětí větší než pro statické, jedná se o zpevnění (obr. 7a), v opačném případě se jedná o změkčení (obr. 7b). Překrývají-li se tyto dvě křivky, nedošlo ani k zpevnění ani k změkčení.



**Obr. 7 Porovnání Wöhlerových diagramů u cyklického zpevnění a změkčení**

Počet dislokací v průběhu cyklického zpevnění stoupá do doby, kdy dosáhne nasyceného stavu. Tento stav nastává na konci cyklického zpevnění. Po tomto počtu cyklů ustávají i změny v uspořádání dislokací. Nejpodstatnějším parametrem, který ovlivňuje dobu, po kterou bude cyklické zpevnění a změkčení probíhat, je dáno charakterem skluzu daného materiálu. [1]

### 1.2.2 Stádium nukleace trhliny

V naprosté většině případů vzniká zárodek trhliny na volném povrchu vzorku, to je důvod, proč je celková únavová životnost výrazně ovlivněna povrchovým zpracováním daného tělesa. Únavové lomy se objevují i na tělesech bez makroskopických koncentrátorů napětí jako jsou například vruby, svary, zvýšená hladina napětí na povrchu tělesa (při excentrickém zatěžování) a na tělesech s hladkým a vyleštěným povrchem. Uplatňují se zde mikroskopické koncentrátory, které jsou přítomné i při homogenním zatěžování, kde nedochází k excentricitě zátěžné síly. Ve speciálních případech se zárodek trhliny může objevit uvnitř tělesa. Stává se tak v případech, kde dochází ke kontaktní únavě materiálu či u materiálů se značně zpevněnou povrchovou vrstvou. V takovém případě pak trhlina vzniká mezi zpevněnou povrchovou vrstvou a základní maticí materiálu, [1,4,6].

Plastická deformace způsobuje v materiálu pohyb dislokací. Dislokace postupují dále na volný povrch, kde vytvoří povrchový reliéf. Tento reliéf je tvořen extruzemi a intruzemi ve skluzových páslech (obr. 9), které jsou důvodem vzniku lokalizovaných koncentrátorů napětí. Koncentrátory napětí mají za následek nukleaci únavových trhlin. Fraktografickým pozorováním byly zjištěny nejčastější místa nukleace únavových trhlin:

- a) únavová skluzová pásma (nejběžnější)
- b) hranice zrn (U vysokoamplitudové únavy se vyskytuje především za zvýšených teplot)
- c) rozhraní mezi inkluzemi a maticí
- d) řediny u litých materiálů

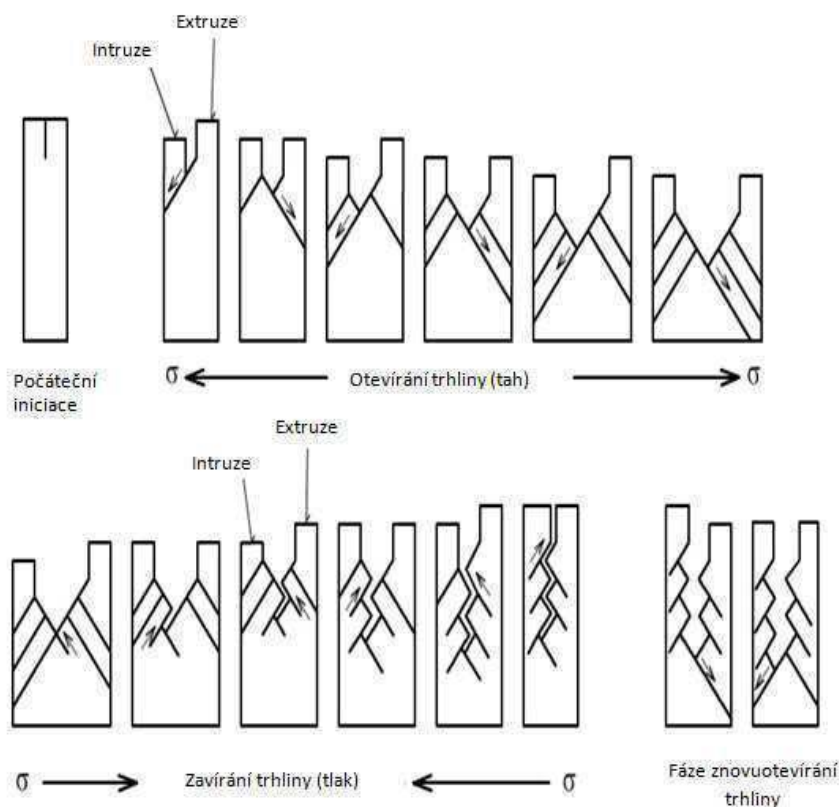
Pro vznik únavových mikrotrhlin bylo navrženo několik modelů. Tyto modely však nemají obecnou platnost a využití mechanismy se mohou uplatňovat pouze v místech nukleace trhlin. Těmito místy se rozumí kořeny intruzí v únavových skluzových pásmech nebo v jejich blízkosti, či okolí hranice zrna. Žádný z těchto mechanismů popisujících nukleaci únavových trhlin však není dostačující, neboť není jasné, zda je reálný rozdíl mezi intruzí a mikrotrhlinou, přičemž experimentální ověření není možné v plném rozsahu provést. Pro nukleaci únavových typů můžeme rozdělit čtyři mechanismy:

- 1) Mechanismus nerozlišující mezi intruzí a mikrotrhlinou
- 2) Nukleace křehkým prasknutím v kořeni intruze
- 3) Vznik trhlin kondenzací vakancí
- 4) Nukleace na hranicích zrn

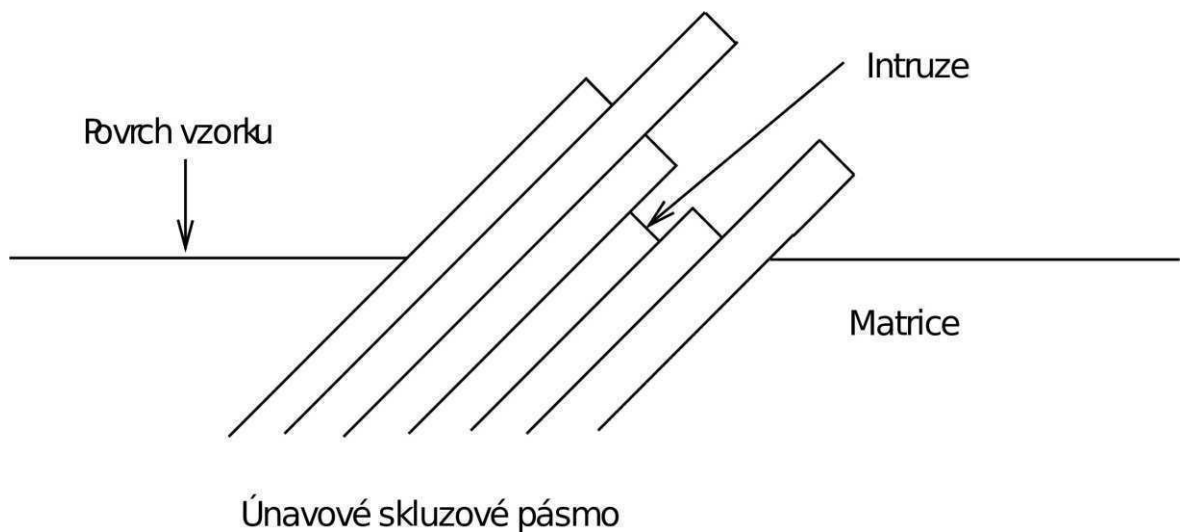
### 1.2.2.1 Mechanismus nerozlišující mezi intruzí a mikrotrhlinou

Mechanismus nerozlišující mezi intruzí a mikrotrhlinou je nejčastěji používaným modelem a vznik mikrotrhlin je chápán jako opakovaný skluz na jednom nebo dvou skluzových systémech, kde intruze prorůstá do hloubky. Vytvořená intruze působí na materiál jako koncentrátor napětí, který vyvolává další skluzy v kořeni intruze. Oblast skluzových rovin okolo této intruze může být postupně vtlačována nebo vytlačována, přičemž, když je oblast vtlačována, tak zde vzniká spojitě rostoucí intruze, která zde může být chápána jako mikrotrhlina.

Pro případ, že je oblast vytlačována, navrhl Neumann v roce 1974 model tvorby mikrotrhlin postupným přesunem z povrchové intruze, [1,2,4].



Obr. 8 Neumannův model tvorby mikrotrhlin [4]



**Obr. 9 Skluz extruzí a intruzí v perzistentním pásmu**

### 1.2.2.2 Nukleace křehkým prasknutím v kořeni intruze

Tento mechanismus nukleace trhlin nerozlišuje mezi trhlinou a intruzí. Typy struktur a povrchového reliéfu, v místě nukleace trhlin, jsou závislé především na snadnosti příčného skluzu a amplitudě zatěžování. Mikrotrhliny vznikají v ostrých intruzích bez ohledu na typ okolních dislokačních struktur. V podstatě se jedná o počáteční mikrotrhliny křehkého typu, [1,2,4].

### 1.2.2.3 Vznik trhlin kondenzací vakancí

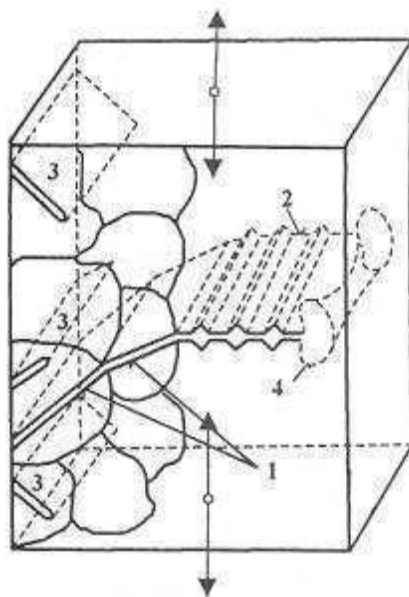
Dislokační interakce mohou někdy vést ke vzniku vakancí. Experimentálně bylo zjištěno, že v průběhu plastických deformací vyvolaných cyklickým zatěžováním se v celém zatěžovaném objemu objevuje vysoká koncentrace vakancí. Důsledkem četných dislokačních aktivit ve skluzových pásmech mají právě tyto oblasti největší koncentraci vakancí. Takto vzniklé vakance mohou dále vytvářet dutiny a shluky. Dutina dostatečné velikosti již může být považována za trhlinu. Tento mechanismus je založen na difuzi vakancí, která je velmi závislá na teplotě. Experimentálně bylo potvrzeno, že nukleace a šíření trhlin při únavovém procesu může probíhat i za teploty 1,7 K. Při této teplotě již ovšem difuze neprobíhá. Difuze vakancí tedy není nutnou podmínkou pro vznik trhlin. To je také největší problém vakančního mechanismu nukleace trhlin. Ovšem za zvýšených teplot v oblasti creepu se tento mechanismus může na nukleaci trhlin podílet, [1,2,4].

### 1.2.2.4 Nukleace na hranicích zrn

V tomto mechanismu dochází k tvorbě intruze přímo na hranici zrn, ze které se následně může vyvinout mikrotrhlina. Tento experimentálně dobře doložený mechanismus je aplikovatelný jen pro velmi vysoké amplitudy zatěžování, které odpovídá počtu cyklů do lomu řádu max.  $10^3$ . V místě takto vysokých amplitud dochází k intenzivní cyklické plastické deformaci prakticky celé povrchové vrstvy jednotlivých zrn. V místě hranice zrn nemůže však deformace proběhnout - cyklické posunutí kolmé k povrchu je v místě hranice téměř nulové. Z tohoto důvodu, se může intruze vytvářet v místě hranice zrna. Tato geometrická představa popisuje jen tvorbu intruzí na hranicích zrna a předpokládá, že není rozdíl mezi intruzí a mikrotrhlinou, [1,2,4].

### 1.2.3 Stádium šíření trhlin

Nukleační stádium je zakončeno vytvořením povrchových mikrotrhlin. Tyto mikrotrhliny leží podél aktivních skluzových rovin, kterými jsou roviny s největším smykovým napětím, přičemž při jednoosém zatěžování je největší smykové napětí v rovinách svírající úhel  $45^\circ$  s vektorem vnějšího napětí. V dalším průběhu cyklického zatěžování se trhliny prohlubují a rostou do hloubky. Velká většina se však brzy zastavuje a jen malá část proniká do hloubek větších než několik desítek mikronů. S narůstající délkou se trhliny vychylují z aktivních skluzových rovin a stáčí se do směru kolmého na vektor hlavního napětí.



**Obr. 10** Schéma postupu šíření únavových trhlin 1 - první etapa šíření, 2 - druhá etapa šíření, 3 - neefektivní trhliny; 4 - plastická zóna na čele trhliny [4]

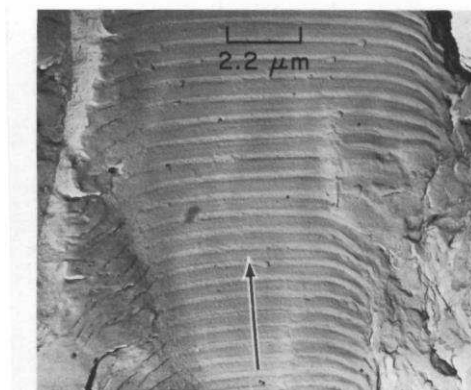
Na jejich čele lze identifikovat plastickou zónu vznikající účinkem vysoké koncentrace napětí. V této etapě se šíří zpravidla již jen jedna trhlinka označovaná jako magistrální. Pro šíření podél aktivních skluzových rovin se používá označení první etapa šíření a pro šíření kolmo na vektor hlavního napětí druhá etapa šíření únavové trhliny (obr. 10), [1,2,4].

### 1.2.3.1 I. etapa- šíření podél aktivních skluzových rovin

V tomto stádiu se trhliny šíří podél aktivních skluzových rovin krystalografické mřížky v rovině maximálního smykového napětí (tj. přibližně pod úhlem  $45^\circ$  od vektoru působení cyklického tahového napětí). Postupně se vychylují z aktivních skluzových rovin a trhliny se postupně stáčí do směru kolmého k vektoru hlavního napětí (II. etapa). I. etapa šíření se vykytuje pouze v několika prvních desetínách mm lomové plochy, avšak doba šíření může tvořit až 90% z celkového počtu cyklů. Příčinou je velmi malá rychlost šíření trhlín, která je transkrystalického charakteru, [1,2].

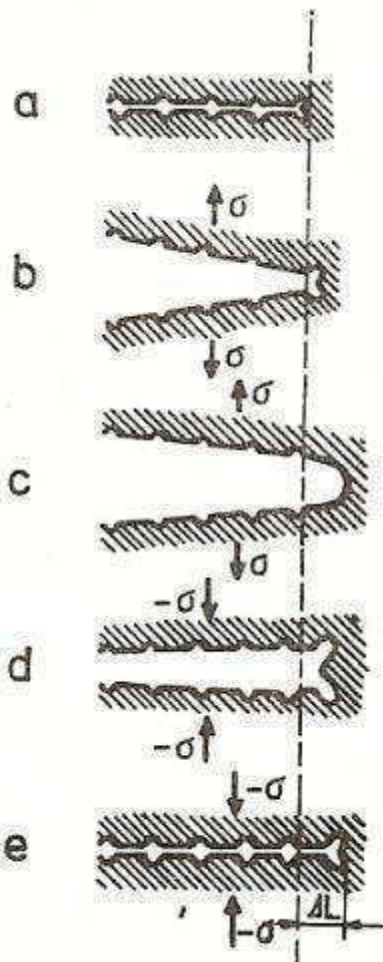
### 1.2.3.2 II. etapa- šíření únavové trhliny

V této etapě už dochází k šíření pouze jedné trhliny, růst ostatních trhlín v první etapě se zastavuje. Trhlinka se šíří především transkrystalicky a její růst zajišťuje normálové napětí, které působí kolmo ke směru šíření trhliny. Růstem trhliny vznikají únavové striace (obr. 11), jejichž žlábkový reliéf je typický pro oblast lomové plochy této etapy. Tyto žlábků se ve vytvořeném reliéfu pravidelně opakují, vždy s přibližně stejnou vzdáleností od sebe. Jsou tvořeny podle pravidla: „jeden žlábek je vytvořený jedním zatěžovacím kmitem, ale ne každý kmit zatížení vytvoří žlábek.“ Vzdálenost dvou sousedních žlábků je rovna velikosti přírůstku za jeden cyklus, z čehož lze odvodit rychlost šíření trhliny, [1,2].



Obr. 11 Striace vzniklé únavovým poškozením [4]

Na obr. 12 je zobrazen tzv. Lairdův mechanismus šíření trhliny. Výchozí stav (a) zobrazuje trhlínu rozšířenou na délku. Při zatížení v tahu ( $\sigma$ ) (b) dochází v kořeni trhliny k výrazné plastické deformaci na rovinách max. smykového napětí. Kořen se tím otupuje a při dalším růstu tahového napětí se kořen více zaobljuje (c). Při změně směru zatížení na tlakové se stěny trhliny k sobě přibližují, ale nový tvar kořene trhliny se úplně nevrátí do původní polohy (d). Rohy kořene trhliny jsou ve směru maximálního smykového napětí trvale zdeformované a vznikne tak nový žlábek. Při růstu tlakového napětí na konečnou hodnotu se stěny trhliny vrátí do původní polohy, ale trhlina se prodlouží o vzdálenost  $\Delta L$  (e). Tento proces se periodicky opakuje v dalším cyklu.



**Obr. 12 Lairdův mechanismus vytváření žlábků v II. etapě šíření únavové trhliny [2]**

Stádium šíření trhliny je také jediné stadium, kdy lze definovat stupeň únavového poškození, které je přímo úměrné délce trhliny. Délka trhliny, při které dochází k přechodu z první do druhé etapy šíření, závisí především na druhu materiálu a na amplitudě zatěžování. Čím menší je pro daný materiál amplituda zatěžování, tím delší trhlina

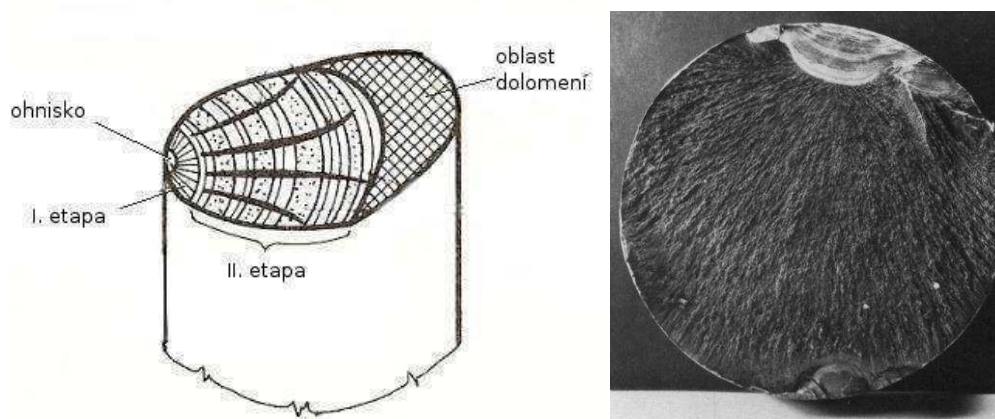


odpovídá první etapě. Šíření v druhé etapě končí náhlým lomem zbývající části nosného průřezu, [2].

#### 1.2.4 Lom

Únavový lom je konečným stádiem celého únavového procesu. Vzniklý lom je zcela odlišného charakteru než lom statický. Lom nastává v okamžiku, když horní napětí zátěžného cyklu překročí hodnotu kritického napětí zbylé části nosného průřezu. Toto napětí leží hluboko pod statickou pevností materiálu, [2].

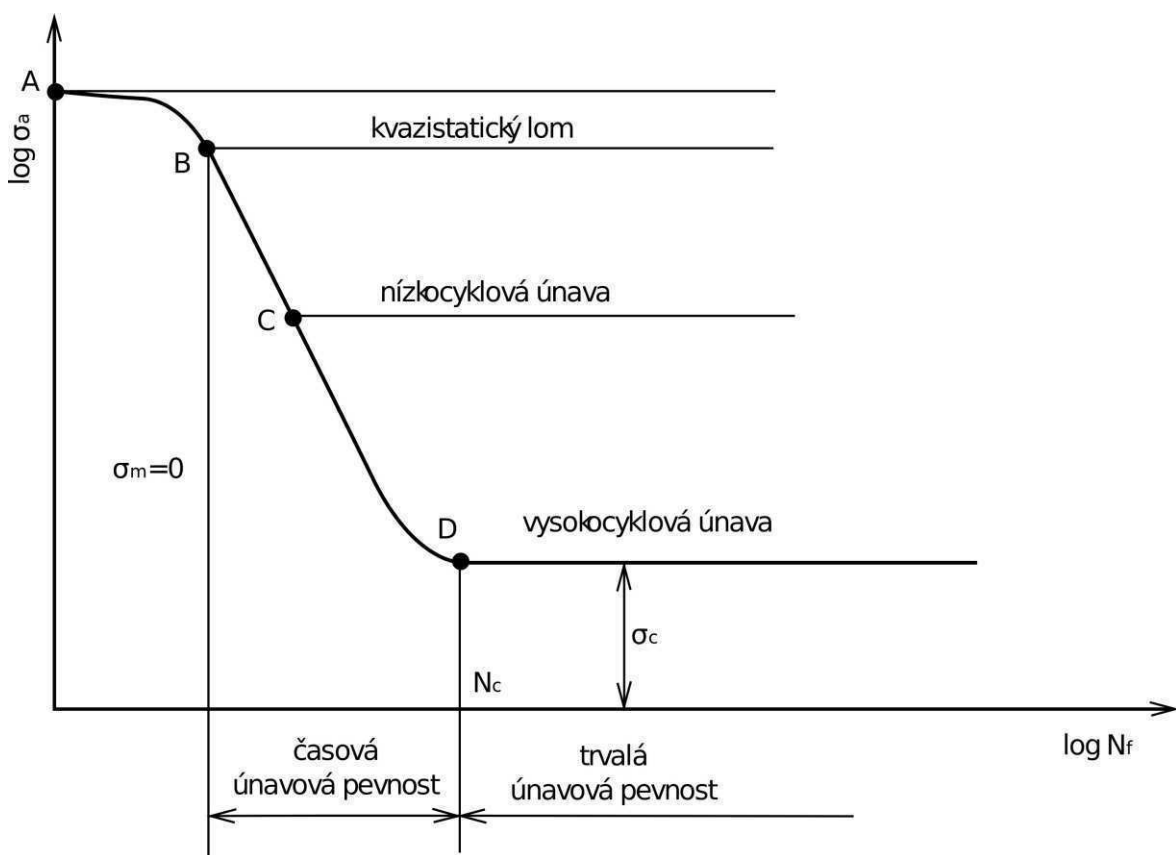
Lomovou plochu můžeme rozdělit na dvě části- oblast únavového poškození a oblast dolomení. Oblast únavového poškození, ve které probíhá růst trhliny do hloubky průřezu má velmi hladký povrch (důvodem je opakované rozevírání a zavírání) a je zde patrné ohnisko lomu a postupové čáry. V druhé oblasti lomu probíhá dolomení zbylé části nosného průřezu rychlostí přibližující se rychlosti zvuku v kovech (cca 5000 m/s).



**Obr. 13 Únavový lom schematicky a z reálného prostředí [2,3]**

### 1.3 Hodnocení odolnosti proti únavovému poškození

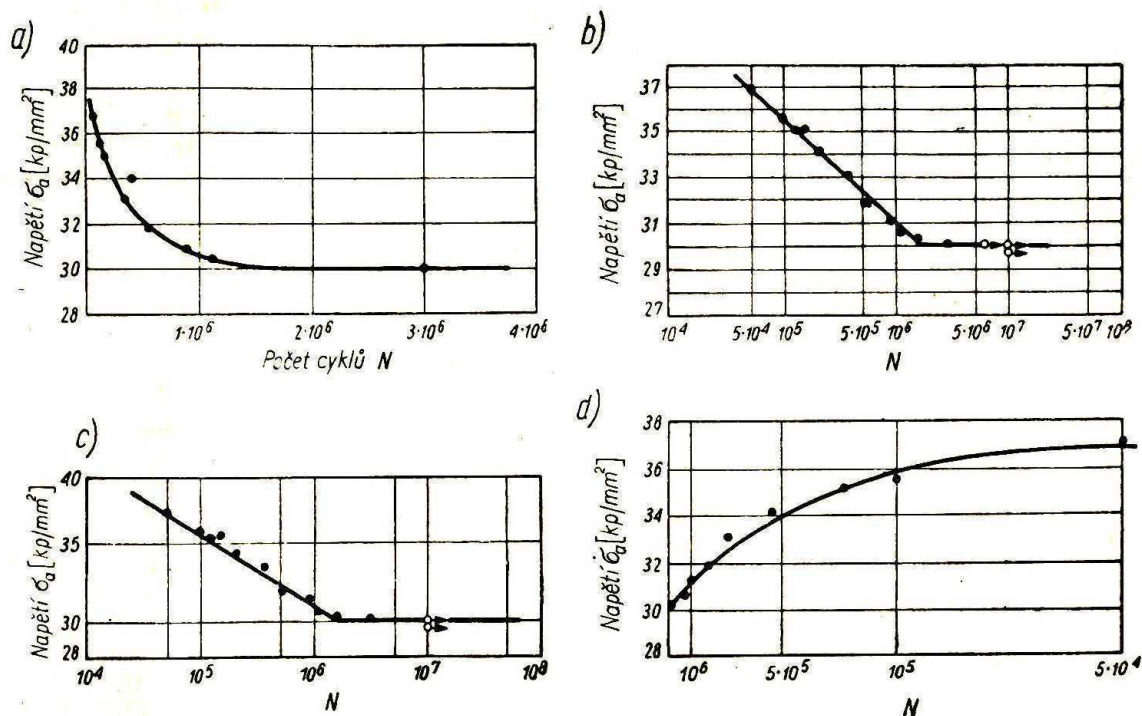
První pokusy v oblasti únavového poškození materiálu provedl německý inženýr August Wöhler (1819-1914) na nápravách železničních vagonů, které ve 40. letech 19. století často praskaly. Při zkouškách se zatěžovalo ohybem za rotace a stanovil se počet cyklů do lomu v závislosti na působícím napětí. V současné době jde o nejpoužívanější hodnocení únavových vlastností a vzniklá křivka se nazývá S-N křivka, únavová křivka nebo také Wöhlerova křivka (obr. 14).



Obr. 14 Schématický průběh křivky životnosti

Z hlediska praktických aplikací ve strojírenství jsou podstatné zejména oblasti nízko cyklové a vysoko cyklové únavy této křivky, neboť zde dochází k únavovému poškození po mnoha cyklech. V kvazistatické oblasti dochází k lomu po  $2-5 \times 10^3$  cyklech za současného vzniku velké plastické deformace (tvorba krčku v analogii se statickými zkouškami).

Pokud je součást konstrukce nebo zkušební tyč zatížena dostatečně velkým cyklickým napětím, pak za určitou dobu dojde ke vzniku únavové trhliny a následně k lomu součásti. V případě, že je zkouška opakována při vyšší úrovni napětí, pak počet cyklů do porušení bude menší. Výsledkem takovýchto zkoušek provedených při různých úrovních napětí je křivka napětí-počet cyklů, také nazývaná S-N křivka. Amplituda napětí nebo nominálního napětí,  $\sigma_a$  nebo  $S_a$ , se obecně vynáší na počtu cyklů do porušení  $N_f$  jak je uvedeno na obr. 15.



Obr. 15 Způsob znázornění vztahu mezi napětím  $\sigma_a$  nebo  $S_a$  a počtu cyklů do porušení  $N_f$  [3]

Skupina takovýchto únavových zkoušek pro vyjádření S-N křivky se zpravidla provádí při nulovém středním napětí, nebo pro některé specifické případy s nenulovým středním napětím  $\sigma_m$ . Též se někdy měří křivky S-N při konstantní hodnotě součinitele asymetrie cyklu,  $R$ . Přestože napětí je obvykle vynášeno jako amplituda, můžeme se setkat i s veličinami  $\Delta\sigma$  nebo  $\sigma_{max}$ . Počet cyklů do porušení  $N_f$  se mění v rozmezí několika řádů s úrovní působícího napětí. Logaritmické měřítko se někdy používá i v případě osy napětí. Některé konstrukční materiály, zvláště nízkouhlíkové a nízkolegované oceli, mají závislost S-N charakteristickou tím, že prakticky od hodnoty  $N_f$  řádově  $10^7$  amplituda napětí  $S$  již prakticky neklesá – tj. existuje jistá úroveň napětí, pod kterou nedochází k únavovému porušení. Tato limitní amplituda napětí, jak již bylo zmíněno v odstavci 1.1, se nazývá mez únavy. Pro zkušební tělesa bez vrubu s hladkým povrchem se pro mez únavy používá

symbol  $\sigma_c$  ( $\sigma_e$ ) a zpravidla se hovoří o materiálové charakteristice. Pro materiály, u nichž S-N křivka nemá zmíněný asymptotický tvar, jako jsou např. slitiny hliníku i mědi, se mez únavy uvažuje jako amplituda napětí odpovídající určité smluvní době života  $10^7$  nebo  $10^8$  cyklů, [1].

## 2 Metoda Small Punch Test (SPT)

Na MIT v roce 1981 za účelem studia radiačního zkřehnutí byla poprvé použita metoda SP ke zjištění materiálových charakteristik. Velkou pozornost této metodě dále věnovali na japonské univerzitě Tohoku v Sedai. Již v roce 1988 byli provedeny první pokusy o standardizaci Small Punch testů v Japonském Institutu pro výzkum atomové energie (JAERI), nicméně v Evropě je tato metoda známa až od roku 1992, kdy ji představila Swansea University ve Walesu, dále pak CISE (v současnosti CESI) v Itálii, [1].

Mezi hlavní výhody testování miniaturních vzorků patří:

- Minimální odběr materiálu, což je výhodou především při hodnocení nových materiálů a slitin, kterého je k dispozici pouze omezené množství.
- U svařenců lze hodnotit lokální mechanické vlastnosti svaru i tepelně ovlivněné oblasti základního materiálu.
- Keramické materiály je možné hodnotit v širokém spektru teplot.
- Hodnocení povlaků a povlakovaných materiálů.
- Analyzování příčin lomů, při omezeném množství materiálu, [1].

Tato metoda má však i řadu nezanedbatelných nevýhod, kterými jsou:

- Touto metodou se zabývá pouze několik laboratoří na univerzitách a výzkumných ústavech.
- V současné době nelze spolehlivě vysvětlit, jaké mají konkrétní zkušební podmínky vliv na výsledky testů.
- Problematika konkrétních korelací výsledků, které nemají obecnou platnost a vždy je možné je aplikovat pouze na daný materiál.
- Je třeba vývoje univerzálně platné zkušební metodiky.
- Testovací standardy existují pouze v japonském kódu “Code of Practice“ pro speciální testy a speciální materiály.

- Všechny aplikace SPT metody prováděné v minulosti byly prováděny na feritických a martensitických ocelích. O aplikaci svarových spojů toho víme velmi málo a austenitické oceli nebyly ještě touto metodou zkoušeny.
- Studie zaměřené na povlaky jsou většinou ve stadiu výzkumu, [1].

## 2.1 Odběr a příprava vzorků

Při odběru vzorku je snaha o co nejmenší ovlivnění těchto součástí i odebraného vzorku. Firma Rolls Royce vyvinula zařízení na odběr malých vzorků s označením Ssam-2 (obr. 16).



**Obr. 16 Zařízení pro odběr vzorků Rolls Royce Ssam-2 a princip odběru vzorku [1]**

Pomocí 0,7 mm tenkého, polokulovitého kotouče o průměru 50 mm, který rotuje okolo dvou os současně, se odebere vzorek materiálu o tvaru malého „tlačítka“, které má typicky 25 mm v průměru a největší tloušťku 4 mm. Z důvodu snahy o co nejmenší tepelné ovlivnění je po celý proces kotouč chlazený vodou. Tento proces trvá asi jednu až tři hodiny. Ze vzorku je posléze možné vyrobit až 4 miniaturní SFT vzorky. Na obr. 17 Je vidět praktický příklad odběru vzorku.



**Obr. 17 Praktická ukázka odběru vzorku [1]**

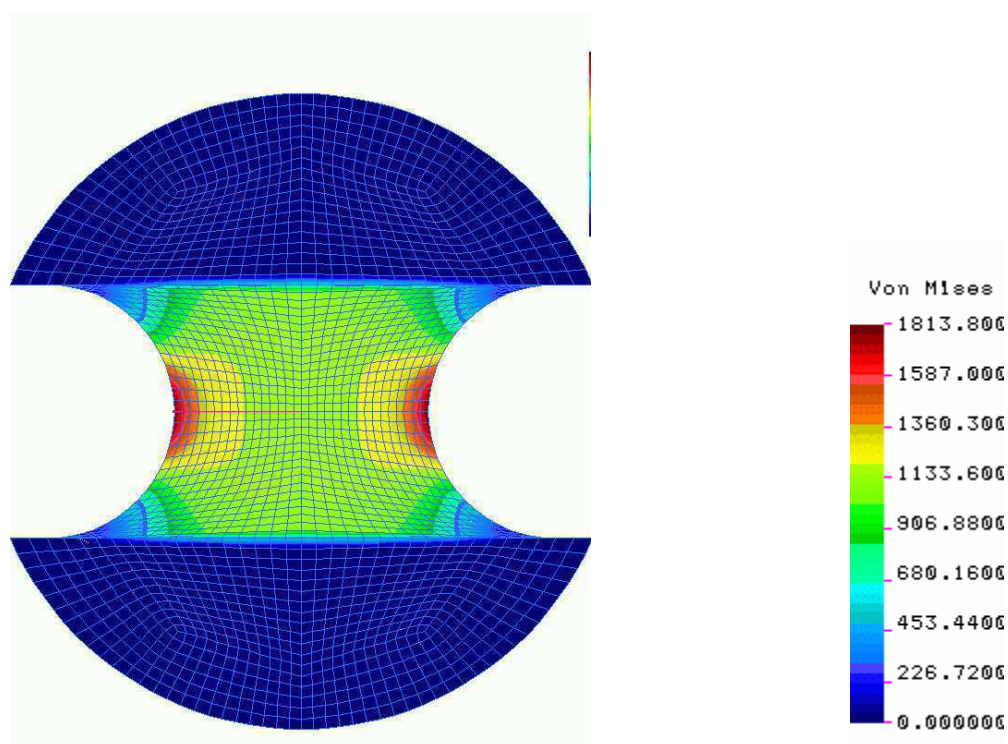
Další přístroj na odběr vzorků založený na elektrojiskrovém obrábění byl vyvinut v Itálii v institutu CISE (nyní CESI). Během řezu se přístroj otáčí okolo své osy, takže odebíraným materiálem je odřezek kulovitěho tvaru. Dobrými vlastnostmi elektrojiskrového obrábění jsou:

- minimální zbytkové pnutí vzniklé v důsledku odběru,
- nízké náklady a snadná nahraditelnost materiálu spotřebovaného při řezání,
- tvar vzorku (tzn. hloubka x plocha povrchu) je možné měnit a volit podle potřeby.

Použitím jednoduchých přídavných zařízení, umožňujících změnu teplotních, resp. deformačních podmínek, lze pomocí malých vzorků ověřovat pevnostní vlastnosti jak za vyšších teplot (do cca 650 °C), tak při nižších teplotách (do -196 o °C). Zkušební vzorek Small Fatigue Test (SFT) má tvar kruhu s dvěma polokruhovými výřezy na krajích. Tyto výřezy slouží ke koncentraci napětí ve středu vzorku. Příklad rozložení napětí v SFT vzorku je na obr. 19. Rozdíl mezi standardními vzorky a miniaturními SFT vzorky lze vidět na obr. 18, [1].



Obr. 18 Porovnání zkušebních vzorků [1]



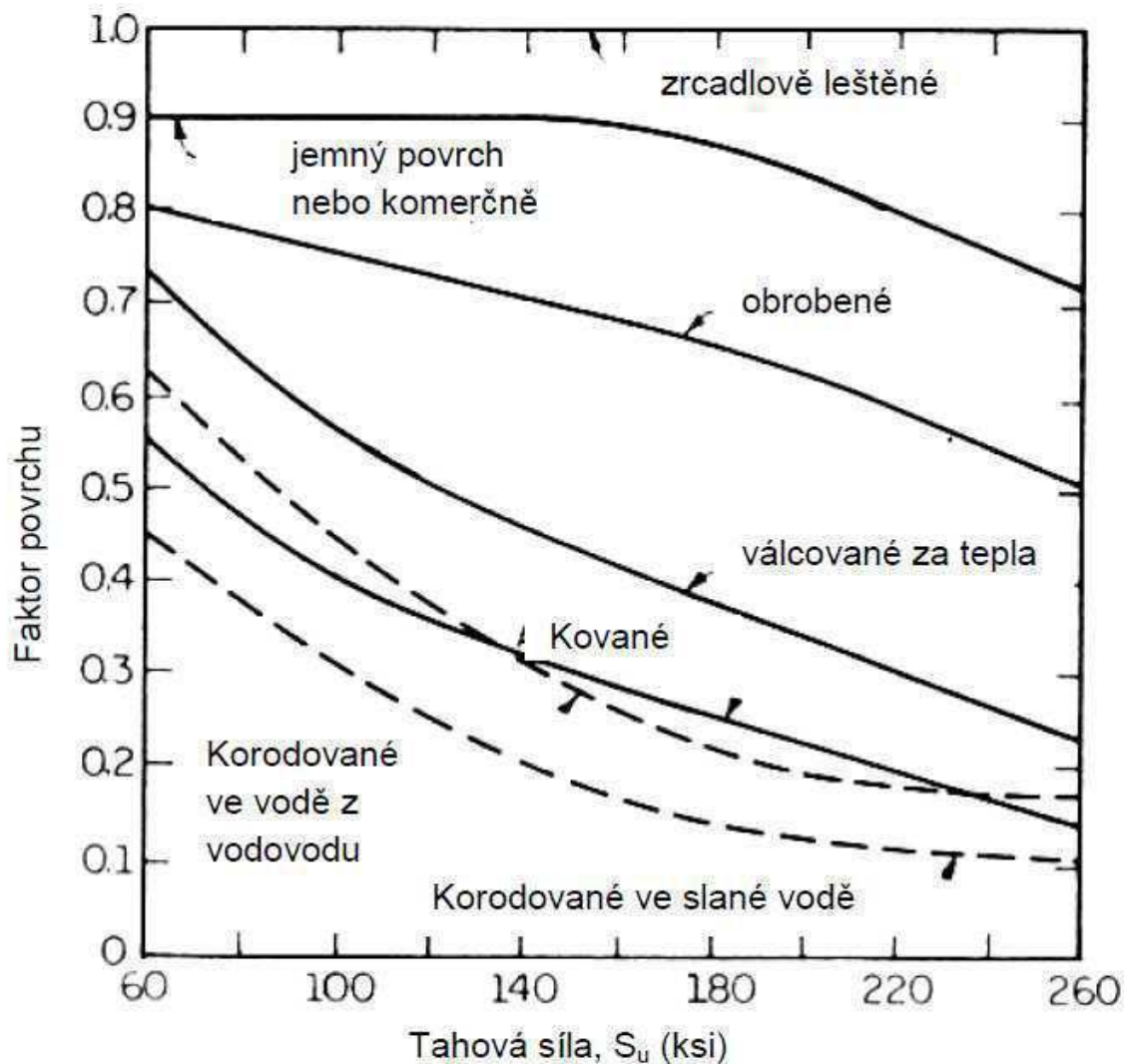
Obr. 19 Ukázka rozložení napětí v SFT vzorku [1]

Pro porovnání výsledků při hodnocení únavy se používá Wöhlerova křivka. U SFT vzorků tomu není jinak, proto se při zkouškách využívá režimu řízeného silou, které je z hlediska použitých vzorků jednodušší pro porovnávání než režim, kde řídicím parametrem je deformace. Pokud je to možné, provádí se srovnání takto vzniklých Wöhlerových křivek v celém rozsahu (pro nízkocyklovou i vysokocyklovou oblast).

Životnost reálného tělesa se liší od životnosti laboratorního vzorku v důsledku působení řady faktorů. Skutečná mez únavy  $\sigma_{cs}$  se určí podle vztahu:

$$\sigma_{cs} = \frac{v_{\sigma} \cdot v'_{\sigma} \cdot \eta_p}{\beta} \sigma_c$$

kde korekční členy  $v_{\sigma}$ ,  $v'_{\sigma}$  vyjadřují vliv faktoru velikosti,  $\eta_p$  vliv povrchu (obr. 20) a  $\beta$  charakterizuje vrub. Obdobným způsobem lze přistoupit i ke vzájemnému porovnání laboratorních vzorků [1].



Obr. 20 Vliv opracování povrchu materiálu na mez únavy reálného tělesa [1]



## 3 Experimentální části

### 3.1 Úvod do experimentální části

Experimentální část práce se zabývá určením únavových charakteristik na miniaturních zkušebních tělesech a jejich porovnáním s klasickými zkušebními tělesy určenými pro zkoušky únavy dle normy ČSN EN ISO 42 0363. Následnou korelací těchto výsledků lze potom určit mez únavy i z těchto miniaturních vzorků, což přináší celou řadu výhod. Oproti klasickým zkušebním tělesům je zde relativně malý objem odebraného materiálu na výrobu zkušebních těles, díky čemuž je možné provádět častěji a levněji kontrolu provozního zařízení jako jsou tlakové nádoby typu VVER 1000, vyrobené z materiálu 15CH2NMFA, který byl v této práci testován.

Mezi značné výhody patří i to, že odebírání materiálu na zkušební tělesa je možné provádět na spuštěném zařízení a to z míst, určených pro odběr zkušebních vzorků. V případě odběru materiálu ze zařízení, které je možné po odběru materiálu opravit, je možné odebírat materiál prakticky z jakéhokoliv místa. Tím lze provádět kontrolu kritických míst součástí, kde dochází k největšímu mechanickému či chemickému namáhání a tím ovlivnění vlastností daného materiálu.

Při odběru klasických těles se zařízení musí často odstavit, což přináší velké finanční i časové ztráty.

### 3.2 Experimentální materiál

Zkušební vzorky byly vyrobeny z oceli 15CH2NMFA, která byla použita pro výrobu tlakových nádob v jaderné elektrárně JETE v Temelíně a je základním typem materiálu pro výrobu bloků VVER 1000 (obr. 21). Její tabulkové chemické složení je uvedeno v tab. 1.

**Tab. 2 Předepsané chemické složení materiálu 15CH2NMFA**

C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	V %	Cu %
0,13- 0,18	0,3- 0,6	0,17- 0,37	Max 0,02	Max 0,02	1,70- 2,40	1,0- 1,5	0,5- 0,7	Max 0,12	Max 0,15



**Obr. 21 Reaktor VVER 1000 vyrobený ve Škoda JS [9]**

V rámci toho experimentu byl použit materiál, který byl odebrán z míst, kde nedošlo k ovlivnění mechanických vlastností. Díky tomu je možno získat reálné mechanické vlastnosti daného materiálu, které by mohly být zkresleny provozním namáháním.

Z důvodu co nejobsáhlejšího pochopení únavových charakteristik tohoto materiálu byly pro účely testování použity zkušební vzorky ze tří různých taveb (označeny HB, SB, PL). V tabulce 3 je uvedeno chemické složení oceli. Chemický rozbor byl proveden metodou optické emisní spektrometrie zařízením Spectrolab LAX X7.

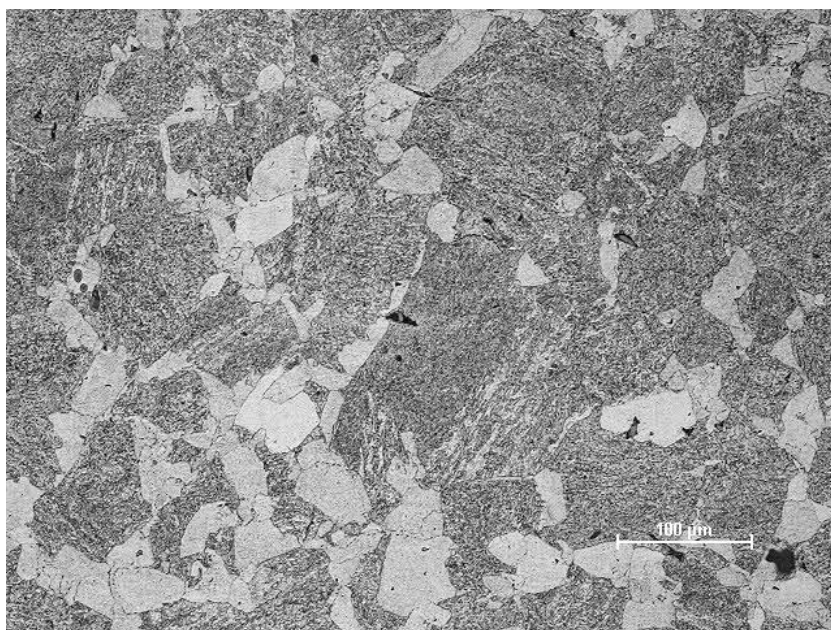
**Tab. 3 Chemické složení tří různých taveb materiálu 15CH2NMFA**

Označení	C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cr %	Ni %	Cu %	Mo %	V %
HB	0,18	0,44	0,27	0,007	0,007	2,16	1,26	0,05	0,57	0,10
SB	0,15	0,37	0,25	0,006	0,006	2,06	1,23	0,05	0,57	0,10
PL	0,15	0,46	0,33	0,007	0,009	2,14	1,23	0,05	0,57	0,11

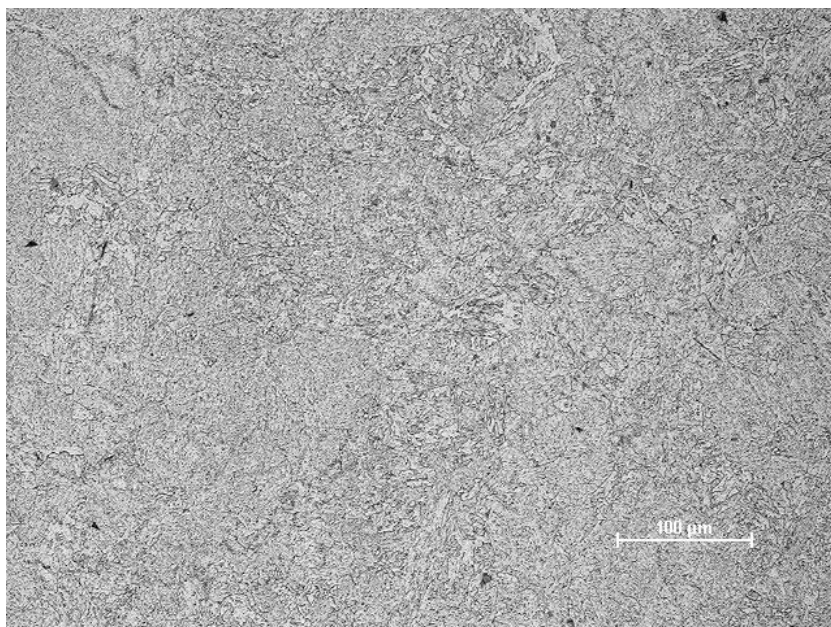
Pro zkoušku mikrostruktury vzorků HB, SB, PL byl použit metalografický mikroskop Nikon Epiphot 300 při zvětšení 200x. Vzorky byly leptány ve směsi Nital.

**Tab. 4 Výsledky zkoušek mikrostruktury**

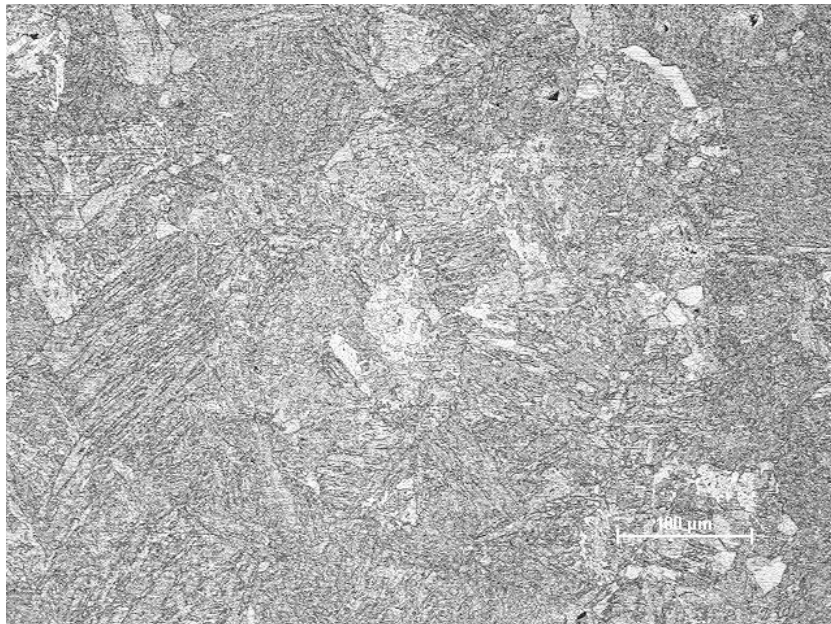
Označení	č. obr	Základní materiál (ZM)
HB	22	Ferit-bainit
SB	23	bainit
PL	24	bainit



**Obr. 22 Mikrostruktura tavby HB**



**Obr. 23 Mikrostruktura tavby SB**



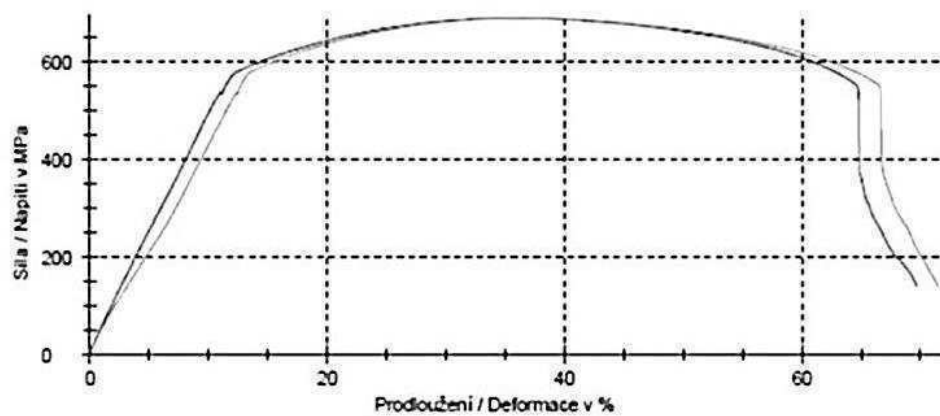
Obr. 24 Mikrostruktura tavby PL

Zkouška mikrostruktury i chemický rozbor byly provedeny ve VZÚ Plzeň a bylo potvrzeno, že vzorky HB, SB a PL odpovídají danému materiálu.

**Výsledky zkoušek:**

Nr	Vzorek ozn.	a <sub>0</sub> mm	b <sub>0</sub> mm	S <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	R <sub>eH</sub> MPa	R <sub>p0.2</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	A %	Poznámky
1	1	2,95	19,8	58,41	538	535	691	67,1	
2	2	3,00	19,85	59,55	536	534	691	67,7	

**Grafické záznamy série:**



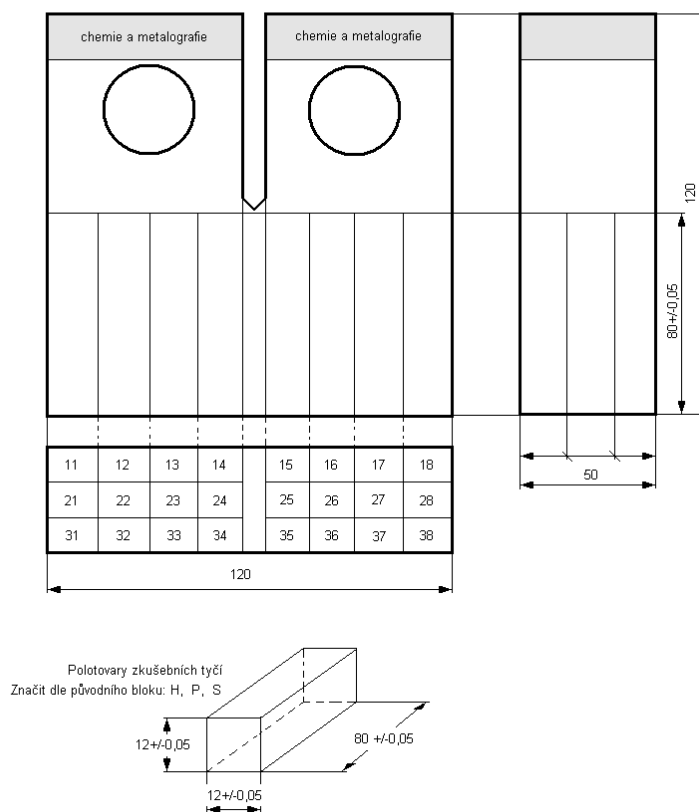
Obr. 25 Zkouška tahem [1]

### 3.3 Zkušební tělesa pro zkoušku únavy

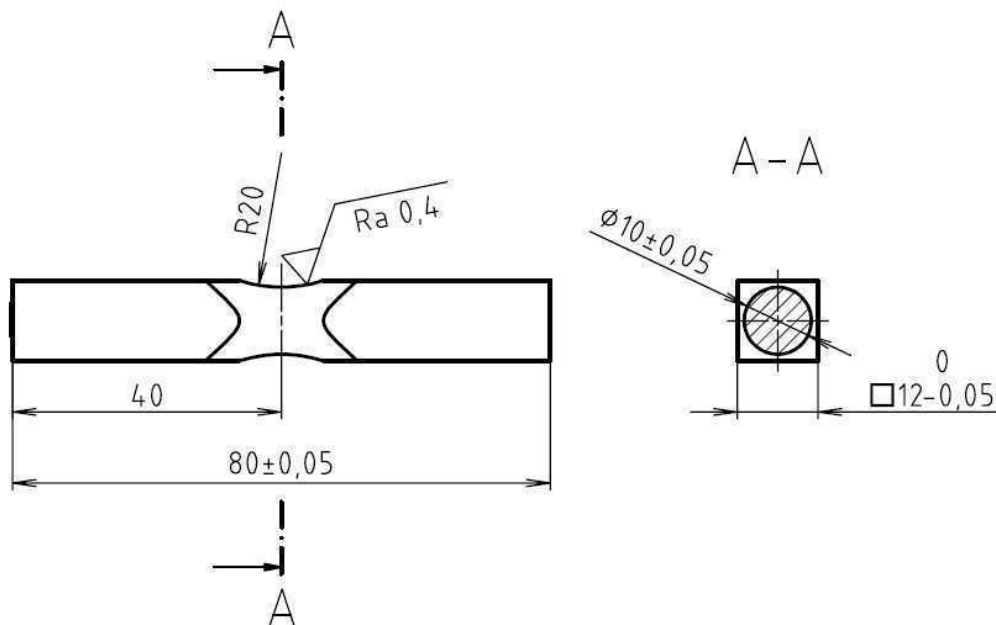
#### 3.3.1 Klasické zkušební vzorky

Zkoušky na klasických zkušebních vzorcích proběhly ve dvou variantách. První z nich je v podstatě klasická zkušební tyč (obr. 28) vyrobená v souladu s normou ČSN EN ISO 42 0363, zatěžovaná míjivým tahem při asymetrii cyklu  $R=0,1$ . Tyto zkoušky byly provedeny ve VZÚ Plzeň. Druhé z nich (obr. 27) bylo zatěžováno cyklickým ohybem a zkoušky byly provedeny v laboratořích VÚT Brno.

Výsledky zkoušek provedených ve VZÚ Plzeň byly použity pro porovnávání s miniaturními zkušebními vzorky. Zkušební tyče byly vyhotoveny rozřezem zkušebních těles B/50 (obr. 26) pro zkoušky lomové houževnatosti, která byla získána z VZÚ Plzeň.



**Obr. 26 Rozřez zkušebního tělesa CT/50 pro výrobu klasických zkušebních těles pro zkoušku únavy**



Obr. 27 Klasické zkušební těleso zatěžované cyklickým ohybem



Obr. 28 Klasické zkušební těleso zatěžované jednoosým míjivým tahem

### 3.3.2 Miniaturní zkušební vzorky

Zkušební vzorky byly vyrobeny ze zkušebních těles CT/50, kde z každé strany byly odříznuty a následně broušeny plechy. V těch byly poté za pomoci vodního paprsku vyřezány zkušební vzorky. Tloušťka plechů je v rozmezí 1,22-1,67 mm a byly z nich vyřezány různé typy zkušebních těles (obr. 33). Vzhledem k relativně malému vzájemnému rozložení vzorků na odříznutém plechu se předpokládá značná homogenita materiálu a tím velká podobnost zkušebních vzorků. Největší vliv na počet kmitů do lomu by mohl mít povrch materiálu, kde dochází k nukleaci trhlin. Z tohoto důvodu byly strany vzorků a hrany přebroušeny brusným papírem o zrnitosti 400 a následně 1000 (obr. 34 a 35).



**Obr. 29 Ukázka vyrobených vzorků odebraných ze zkušebních těles CT/50**

### **3.3.3 Použité typy zkušebních vzorků**

Typ I a II jsou miniaturní zkušební vzorky používané pro zkoušku tahem. Rozdíl mezi těmito typy vzorků je pouze v rádiusu, který je v přechodu zkušební části do hlavy vzorku. Ten byl zmenšen z R10 na R3,3, z důvodu lepšího využití místa na plechu, ze kterého byly vzorky vyráběny, a kde bylo touto úpravou možno vyrobít více zkušebních vzorků při zachování velikosti hlavy a zkušební části vzorku.

U vzorků typu I docházelo ve většině případů k lomu již na začátku zkoušek (při napětích, která by měla být pod mezí únavy), a to v upínacích hlavách zkušebních vzorků (obr. 30). Důvodem je pravděpodobně koncentrace napětí v místě dotyku drážkování upínacích vložek se vzorkem. Tento problém by bylo možné odstranit zvětšením šířky upínací hlavy zkušebních vzorků.

U vzorků typu II docházelo k lomu v rádiusu (obr. 31) na každém zkoušeném vzorku, což značí značnou koncentraci napětí v těchto rádiusech.

Typ III se ukázal jako nejméně vhodný, vzhledem k tomu, že průřez tohoto tělesa je velmi malý a již síly, které vznikají při upínání tohoto tělesa ve zkušebním zařízení, způsobují velké pnutí vedoucí k deformaci zkoušeného vzorku.

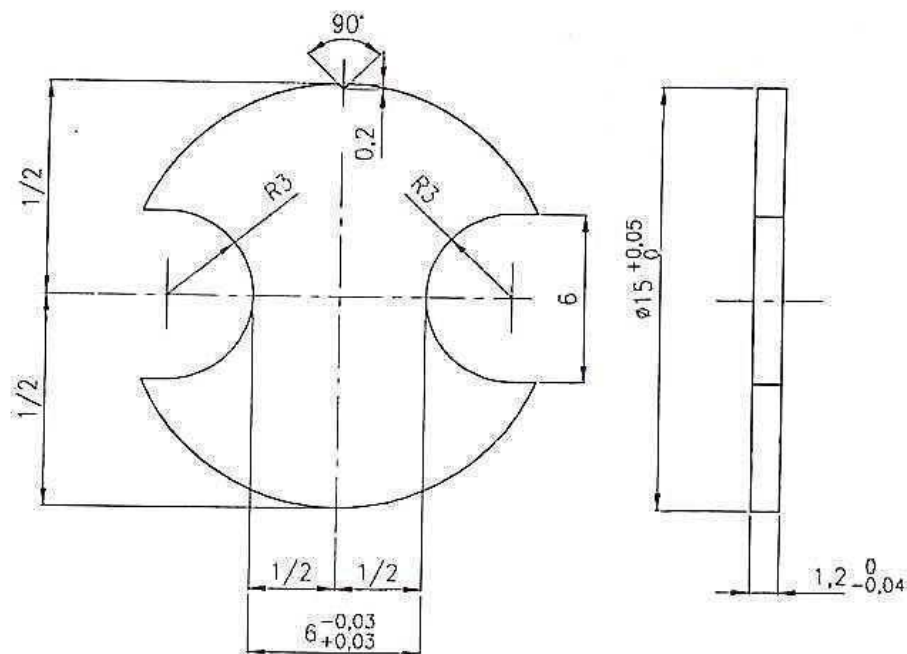


Obr. 30 Ukázka porušení vzorku typu I



Obr. 31 Ukázka porušení vzorku typu II

Typ IV (SFT- “Small Fatigue Test“) byl vyhodnocen jako nejvhodnější i přes koncentraci napětí, jejíž hodnota je 1,33 v nejužším místě. Vzorky jsou zároveň nejmenší ze všech zkoušených typů a mají nejmenší množství odpadního materiálu z řezaného plechu, což znamená, že využití odebraného materiálu z původního tělesa je největší. Rozměry zkušební vzorku SFT jsou uvedeny na obr. 32.



Obr. 32 Rozměry miniaturního zkušební vzorku SFT [1]



Porovnáním výsledků zkoušek všech těchto vzorků vyplynulo, že pro korelaci výsledků s klasickými zkušebními tyčemi byly použity vzorky typu IV (SFT), které se i přes koncentraci napětí v nejužším místě jeví jako nejvhodnější. Výsledky ostatních vzorků jsou prakticky nepoužitelné a pro možnost porovnávání by muselo dojít ke značné změně geometrie vzorků, zvětšení upínacích hlav a úpravě upínacích čelistí zkušebního stroje.



**Obr. 33** Typy miniaturních zkušebních těles, zleva: a) Typ I, b) Typ II, c) Typ III, d) Typ IV (SFT)



**Obr. 34** Porovnání vzorků typu IV (SFT) před a po úpravě boků



**Obr. 35** Porovnání vzorků typu IV (SFT) před a po úpravě boků (pohled z boku)

### 3.4 Zkušební zařízení

Zkoušky jak miniaturních tak klasických vzorků byly provedeny na vysokofrekvenčním magneticko-rezonančním pulzátoru Zwick Roell HFP5100 s maximální silovou kapacitou 50kN (obr. 36). Výhodou magneticko-rezonančního pulzátoru oproti servo-hydraulickému je určitě frekvence, při které jsou prováděny zkoušky únavy. U servo-hydraulických systémů se frekvence pohybuje cca kolem 20 Hz, kdežto u druhého zmíněného zařízení je testování prováděno až při 180 Hz v závislosti na druhu materiálu a typu zkušební vzorku, což značně zkracuje dobu samotného zkoušení. Vliv velikosti frekvence je zanedbán a jeho určení přesahuje rámec této práce.

Elektromagnetický rezonanční pulzátor pracuje na principu nalezení vlastní frekvence soustavy stroj-vzorek a následném průběhu zkoušky při této frekvenci (např.: miniaturní zkušební vzorky typu IV byly zkoušeny při frekvenci cca 87 Hz).

Pro účely testování byly vyrobeny čelisti pro upínání miniaturních zkušebních těles (obr. 37). Hlavními požadavky na čelisti jsou dostatečná tuhost čelistí, schopnost upnutí různých tvarů a rozměrů hlav a nastavitelnost mezery mezi protilehlými čelistmi z důvodu zachování sousostí a rovnoběžnosti (a tím co nejlepšímu rozložení upínací síly) při různých tloušťkách miniaturních zkušebních vzorků.

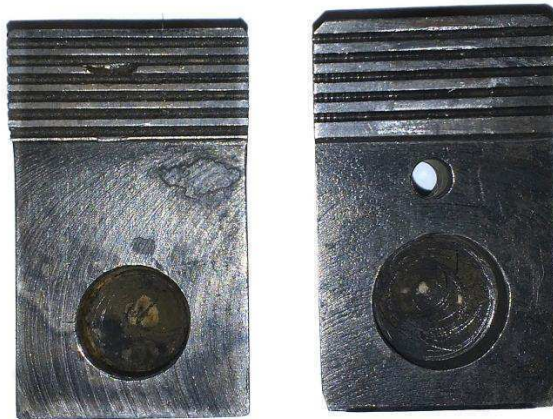
Během zkoušek byly porovnávány i samotné upínací vložky čelistí, kde tvar čelistí zůstal zachován, pouze drážkování, které je v kontaktu se zkušebním vzorkem, bylo u prvních testovaných upínacích vložek čelistí špičaté (obr. 38a) a u druhých otupené (obr. 38b). Z hlediska koncentrace napětí jsou vhodnější čelisti s otupenými zuby, což se potvrdilo i při samotném zkoušení. Některé vzorky upnuté vložkami s ostrými zuby praskaly v hlavách vzorku a lomy jevíly známky stříhových porušení. Vzhledem k tomu, že průřez upínacích hlav je v porovnání se zkoušeným průřezem větší, muselo být toto porušení způsobeno upínacími čelistmi, které způsobily velkou koncentraci napětí v místě lomu, převyšující nominální napětí ve zkušebním průřezu.



**Obr. 36 Zkušební stroj Zwick Roell HFP 5100**



**Obr. 37 Detailní pohled na vzorek SFT ve zkušebních čelistech**



**Obr. 38** Upínací vložky, zleva a) drážkování se špičatými zuby, b) drážkování s otupenými zuby

### **3.5 Zkušební podmínky a průběh zkoušek**

Hodnocení únavy bylo prováděno v režimu řízené síly, který je z hlediska použitých vzorků vhodnější pro porovnávání, než režim s řízením deformace. Všechny zkoušky byly provedeny při asymetrii cyklu  $R=0,1$ , takže namáhání zkušebních vzorků se pohybovalo v tahové oblasti. Porovnání výsledků s odlišnou asymetrií cyklu (např.:  $R=-1$ ), které byly rovněž provedeny ve VÚT Brno, tedy není vhodné. Teplota vzorků byla stejná jako teplota okolního prostředí a to  $24^{\circ}\text{C}$ .

Samotné zkoušení vzorků začalo vyjmutím vzorku z plechu a broušením povrchu ovlivněného vodním paprskem. Po následném přeměření byl takto připravený vzorek upnut do zkušebního zařízení. Následovalo nastavení parametrů v softwaru zkušebního zařízení a start zkoušky. Po spuštění zkoušky došlo k nastavení středního napětí na zkoušeném vzorku, nalezení vlastní frekvence zkušební soustavy a následném udržování této frekvence buď až do lomu nebo do dosažení  $10^7$  cyklů. Porušení bylo vyhodnocováno automaticky a to poklesem zkušební frekvence o 10 Hz.

Počátky testování byly spíše informativní, zkoušely se různé typy vzorků, způsoby uchycení, nastavení stroje atp. Díky těmto poznatkům poté bylo možné začít se samotným testováním únavových vlastností daného materiálu na miniaturních zkušebních vzorcích.

Zkoušeno bylo vždy několik vzorků z každé série a výsledky byly zpracovány do tabulek a grafů (Wöhlerových křivek).

### 3.6 Výsledky zkoušek

Výsledky únavových zkoušek materiálu 15CH2NMFA

#### 3.6.1 Série HB:

Miniaturní zkušební tělesa SFT:

**Tab. 5 Výsledky zkoušek miniaturních zkušebních těles SFT tavby HB**

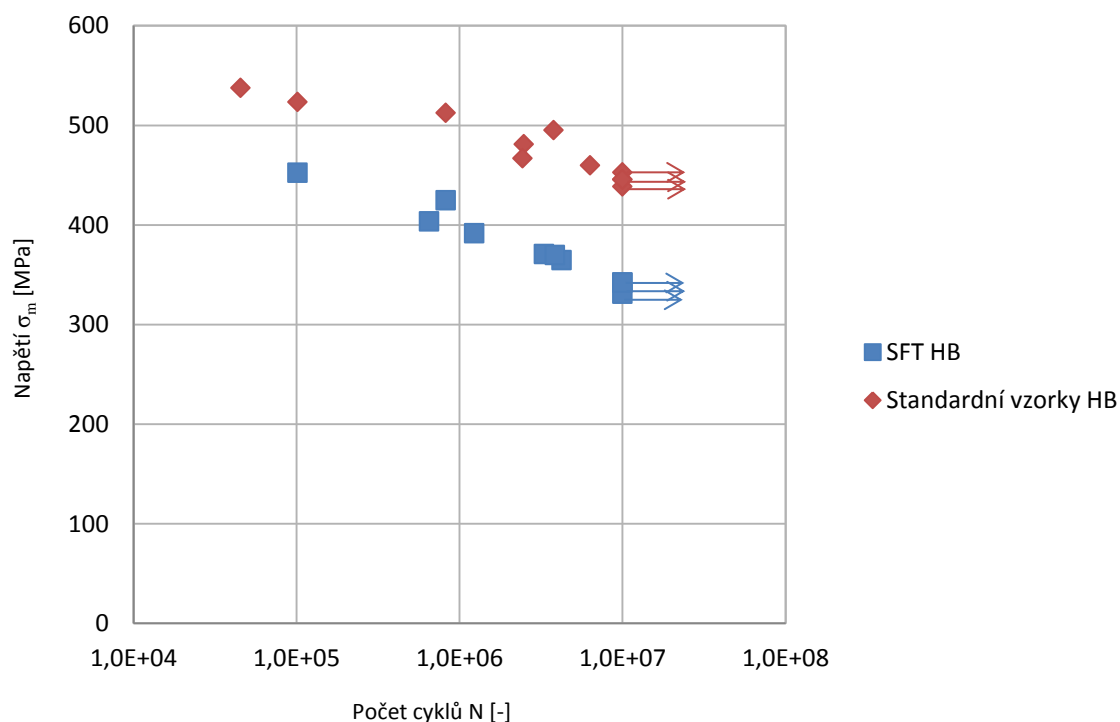
č.vz.	$\sigma_m$ [MPa]	a [mm]	b [mm]	s [mm <sup>2</sup> ]	N [-]
H2	452.54	1.51	6	9.06	101667
H3	424.94	1.51	6	9.06	823451
H6	403.54	1.51	5.99	9.0449	652321
H7	391.83	1.51	6	9.06	1234467
H8	370.99	1.51	5.98	9.0298	3298754
H10	364.85	1.51	5.99	9.0449	4235713
H11	342.16	1.51	6	9.06	10000000
H15	331.13	1.51	6	9.06	10000000
H16	342.16	1.51	6	9.06	10000000
H17	369.76	1.51	6	9.06	3845612

Klasická zkušební tělesa:

**Tab. 6 Výsledky zkoušek klasických zkušebních tělesech**

č.vz.	$\sigma_m$ [MPa]	d [mm]	s [mm <sup>2</sup> ]	N [-]
SH1	537.59	3	7.07	45369
SH2	523.44	3	7.07	101457
SH4	512.71	2.99	7.02	824632
SH5	495.15	3	7.07	3786645
SH8	481.00	3	7.07	2487865
SH11	466.85	3	7.07	2435786
SH12	459.78	3	7.07	6324547
SH13	438.56	3	7.07	10000000
SH15	452.71	3	7.07	10000000
SH16	445.63	3	7.07	10000000
SH17	445.63	3	7.07	10000000

Porovnání Wöhlerových křivek tavby HB:



**Obr. 39** Wöhlerova křivka standardních těles a miniaturních zkušebních vzorků SFT tavby HB

### 3.6.2 Série SB

Miniaturní zkušební tělesa SFT

**Tab. 7** Výsledky zkoušek miniaturních zkušebních těles SFT tavby SB

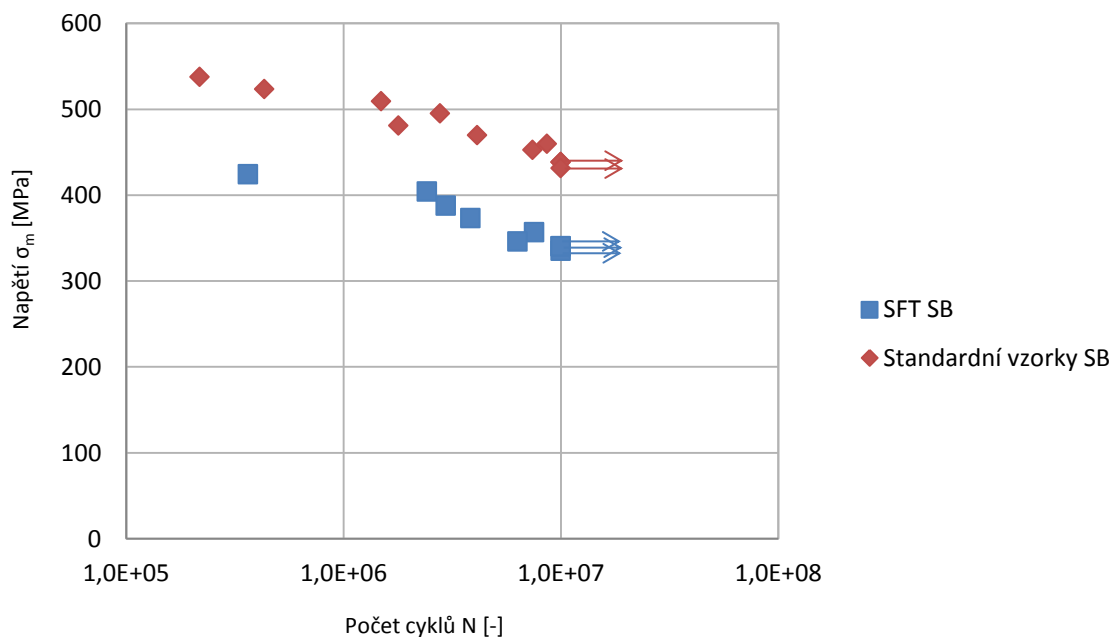
č.vz.	$\sigma_m$ [MPa]	a [mm]	b [mm]	s [mm <sup>2</sup> ]	N [-]
S1	445.49	1.59	6	9.54	78543
S2	424.53	1.59	6	9.54	364213
S4	404.24	1.59	5.99	9.5241	2425125
S5	387.84	1.59	6	9.54	2954135
S6	373.36	1.59	5.98	9.5082	3845621
S8	356.99	1.59	5.99	9.5241	7536428
S10	345.91	1.59	6	9.54	6325415
S11	335.43	1.59	6	9.54	1000000
S12	340.67	1.59	6	9.54	1000000
S14	340.67	1.59	6	9.54	1000000

Klasická zkušební tělesa

**Tab. 8 Výsledky klasických zkušebních těles tavby SB**

č.vz.	$\sigma_m$ [MPa]	d [mm]	s [mm <sup>2</sup> ]	N [-]
SS1	537.59	3	7.07	217958
SS2	523.44	3	7.07	432568
SS3	509.30	3	7.07	1492735
SS4	495.15	3	7.07	2785463
SS5	481.00	3	7.07	1789579
SS7	469.98	2.99	7.02	4125786
SS8	459.78	3	7.07	8645324
SS9	438.56	3	7.07	10000000
SS10	452.71	3	7.07	7425364
SS11	438.56	3	7.07	10000000
SS14	431.49	3	7.07	10000000

Porovnání Wöhlerových křivek tavby SB:



**Obr. 40 Wöhlerova křivka standardních těles a miniaturních zkušebních vzorků SFT tavby SB**

### 3.6.3 Série PL

Miniaturní zkušební tělesa SFT

**Tab. 9 Výsledky zkoušek miniaturních zkušebních těles SFT tavby PL**

č.vz.	$\sigma_m$ [MPa]	a [mm]	b [mm]	s [mm <sup>2</sup> ]	N [-]
PL1	457.18	1.44	6	8.64	21954
PL2	439.81	1.44	6	8.64	734571
PL3	422.45	1.44	6	8.64	2287654
PL6	410.88	1.44	6	8.64	1954752
PL7	393.52	1.44	6	8.64	2547865
PL8	376.16	1.44	6	8.64	5423578
PL11	359.40	1.44	5.99	8.6256	6977642
PL12	329.86	1.44	6	8.64	10000000
PL14	342.01	1.44	5.99	8.6256	10000000
PL15	341.44	1.44	6	8.64	10000000

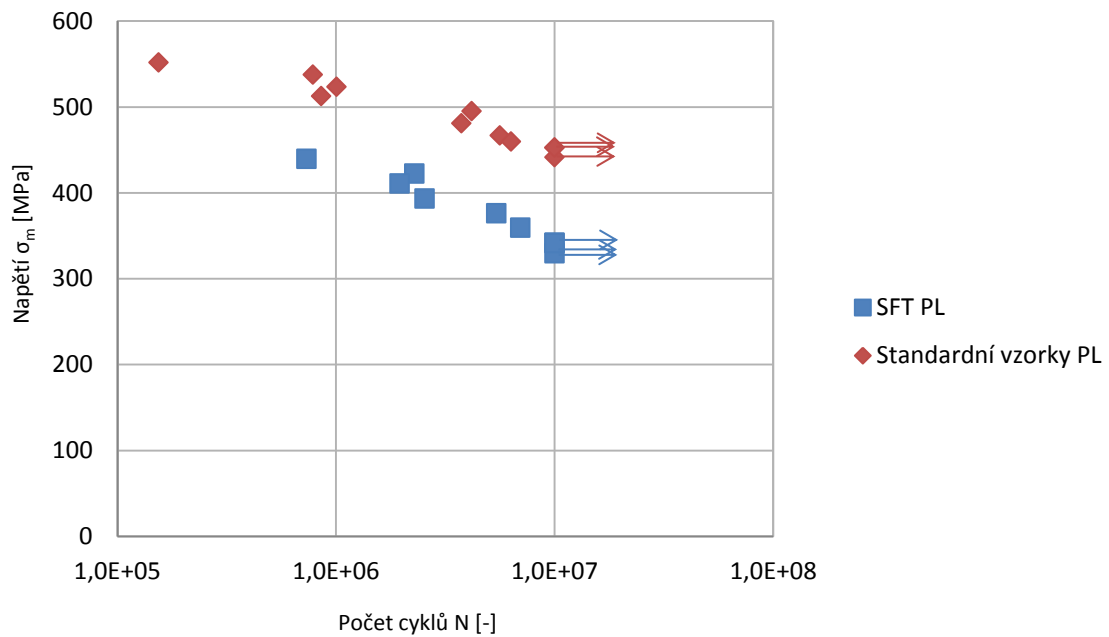
Klasická zkušební tělesa

**Tab. 10 Výsledky klasických zkušebních těles tavby PL**

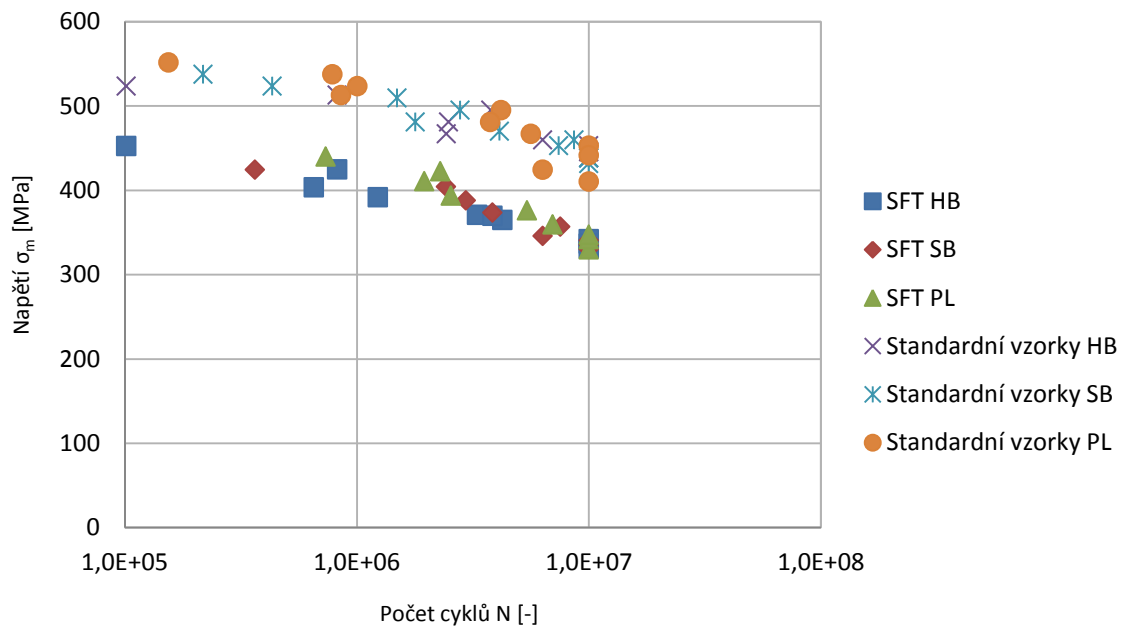
č.vz.	$\sigma_m$ [MPa]	d [mm]	s [mm <sup>2</sup> ]	N [-]
SS1	551.74	3	7.07	154326
SS2	537.59	3	7.07	785230
SS3	523.44	3	7.07	1007453
SS4	512.71	2.99	7.02	856243
SS5	495.15	3	7.07	4183624
SS7	481.00	3	7.07	3756846
SS8	466.85	3	7.07	5632975
SS9	452.71	3	7.07	10000000
SS10	441.50	2.99	7.02	10000000
SS11	459.78	3	7.07	6324864
SS14	452.71	3	7.07	10000000



Porovnání Wöhlerových křivek tavby PL:



**Obr. 41 Wöhlerova křivka standardních těles a miniaturních zkušebních vzorků SFT tavby PL**



**Obr. 42 Porovnání Wöhlerových křivek standardních a miniaturních zkušebních vzorků všech zkoušených taveb**

### 3.7 Diskuse výsledků

Mez únavy u miniaturních zkušebních vzorků byla stanovena aritmetickým průměrem vzorků, u kterých počet kmitů dosáhl hodnoty  $10^7$ . Mez únavy miniaturních zkušebních vzorků SFT byla stanovena na 338 MPa. Mez únavy u klasických zkušebních vzorků vyrobených dle ČSN EN ISO 42 0363 byla stanovena na 443 MPa. Korelační koeficient byl určen ze vztahu

$$k_{kor} = \frac{\sigma_{mst}}{\sigma_{mSFT}}$$

kde  $\sigma_{mst}$  je střední napětí na mezi únavy standardních vzorků,  $\sigma_{mSFT}$  je střední napětí na mezi únavy miniaturních vzorků SFT a  $k_{kor}$  je korelační koeficient. Ten po výpočtu nabývá hodnoty 1,31.

Z výsledků je vidět relativní podobnost výsledků stejných typů vzorků ze tří různých taveb. Proto to lze považovat za věrohodný výsledek únavových charakteristik materiálu 15CH2NMFA.

Výsledky klasických zkušebních těles byly téměř shodné jak pro vzorky zatěžované míjivým tahem, tak pro vzorky zatěžované cyklickým ohybem. Proto lze říci, že korelační vztah lze uplatnit i při jiném druhu namáhání než je jednoosý tah s asymetrií cyklu  $R=0,1$ .

Dle matematického modelu pomocí metody MKP byl stanoven korelační koeficient koncentrace napětí na 1,33. Při uvažování faktorů, ovlivňujících výsledky zkoušek, např.: nepřesnosti měření, homogenita vzorků, která bude mít u menších vzorků větší vliv než u klasických vzorků, atp., lze hodnotu 1,31 považovat za reálnou. Pro bližší určení korelačního koeficientu by bylo třeba upřesnit vliv všech faktorů ovlivňujících porušení.

## Závěr

Byly provedeny zkoušky únavy materiálu 15CH2NMFA na miniaturních zkušebních vzorcích a standardních zkušebních tělesech. Pro tyto účely byly vyrobeny zkušební čelisti s drážkovanými vložkami. Drážkování bylo vyrobeno se špičatými zuby a s otupenými zuby, které se pro zkoušení miniaturních vzorků ukázaly jako vhodnější.

Miniaturní zkušební vzorky byly navrženy a testovány ve 4 různých variantách, z nichž nejvhodnější se ukázal typ "Small Fatigue Test". Výsledky z tohoto typu vzorku byly použity pro korelaci výsledků se standardními zkušebními tělesy, které odpovídají normě ČSN EN ISO 42 0363.

Materiál byl získán z VZÚ Plzeň ve formě zkušebních těles pro zkoušky lomové houževnatosti CT/50, ze kterého byly odříznuty a následně broušeny plechy. Z těch byly posléze vodním paprskem vyřezány miniaturní zkušební vzorky. Aby vliv reliéfu boků vzorků, způsobený vodním paprskem byl na výsledky co nejmenší, byly boky vzorků přebroušeny brusným papírem.

Zkoušky klasických zkušebních těles byly provedeny ve VZÚ Plzeň, stejně jako zkouška tahem, zkouška mikrostruktury a chemický rozbor. Zkoušky miniaturních vzorků proběhly na ZČU v Plzni v laboratoři mechanické zkušebny RTI. Zkušební stroj byl pro klasické i miniaturní vzorky magneticko-rezonanční pulzátor od firmy Zwick Roell typ HFP 5100. Zkoušky proběhly při pokojové teplotě tj. 24°C v režimu řízeném silou s asymetrií cyklu  $R=0,1$ .

Vypočtený korelační koeficient nabývá hodnoty 1,31, což dává relativně dobrou shodu s koeficientem koncentrace napětí na vzorcích SFT, vypočteného pomocí metody MKP, který činil 1,33.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VOLÁK, Josef. *Hodnocení mechanických vlastností pomocí miniaturních zkušebních těles typu „Small Punch“ a včasná lokalizace provozních defektů pomocí akustické emise*. Plzeň 2014. Disertační práce. Západočeská Univerzita v Plzni. Fakulta Strojní.
- [2] PLUHARĚ, Jaroslav. *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu: celostátní vysokoškolská učebnice pro strojní a hutní fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [3] MAŠKOVÁ, Lenka. *Druhy poškozování materiálů-II*. Brno 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [4] MILELLA, Pietro Paolo. Morphological Aspects of Fatigue Crack Formation and Growth. *Fatigue and Corrosion in Metals* [online]. Milano: Springer Milan, 2013, s. 73 [cit. 2017-06-01]. DOI: 10.1007/978-88-470-2336-9\_2. ISBN 978-88-470-2335-2. Dostupné z: [http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-88-470-2336-9\\_2](http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-88-470-2336-9_2)
- [5] KLESNIL, Mirko a Petr LUKÁŠ. *Fatigue of metallic materials*. 2nd rev. ed. New York: Elsevier, 1992. ISBN 0444987231.
- [6] CHVOSTOVÁ, Eva. *Aplikace miniaturizovaných zkušebních těles při hodnocení mechanických vlastností a odolnosti proti křehkému lom*. Plzeň 2016. Disertační práce. Západočeská Univerzita v Plzni. Fakulta Strojní.
- [7] KUDELKA, Martin. *Únavové vlastnosti konstrukční oceli 11 523*. Brno 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
- [8] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-623-1.
- [9] Škoda JS a.s. [online]. 2011 [cit. 2017-06-01]. MODERNIZACE A REKONSTRUKCE PROVOZOVANÝCH BLOKŮ VVER. Dostupné z : <http://www.skoda-js.cz/cs/vyrobky-a-sluzby/investicni-inzenyring/rekonstrukce-provozovanych-bloku-vver.shtml>
- [10] MajalahSains [online]. Duben 2013 [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: <http://www.majalahsains.com/wp-content/uploads/2013/04/Kelesuan-logam.jpg>

..

## Seznam obrázků

OBR. 1 LOM PRUŽINY VZNIKLÝ CYKlickým NAMÁHÁNÍM .....	8
OBR. 2 PRŮBĚH TAHOVÉHO A TLAKOVÉHO NAPĚTÍ.....	9
OBR. 3 TYPY ZATĚŽOVACÍCH CYKLŮ A JEJICH CHARAKTERISTIKY .....	10
OBR. 4 PRŮBĚH CYKlickÉHO ZPEVNĚNÍ ČI ZMĚKČENÍ V ZÁVISLOSTECH $\Sigma$ A -N, EPL -N .....	12
OBR. 5 PRŮBĚH CYKlickÉHO ZPEVNĚNÍ A ZMĚKČENÍ V SOUŘADNICOVÉM SYSTÉMU $\Sigma$ -T ....	13
OBR. 6 PŘÍKLAD HYSTEREZNÍ SMYČKY A VZNIK CYKlickÉ KŘIVKY .....	14
OBR. 7 POROVNÁNÍ WÖHLEROVÝCH DIAGRAMŮ U CYKlickÉHO ZPEVNĚNÍ A ZMĚKČENÍ.....	14
OBR. 8 NEUMANNŮV MODEL TVORBY MIKROTRHLIN [3] .....	16
OBR. 9 SKLUZ EXTRUZÍ A INTRUZÍ V PERZISTENTNÍM PÁSMU.....	17
OBR. 10 SCHÉMA POSTUPU ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÝCH TRHLIN 1 - PRVNÍ ETAPA ŠÍŘENÍ, 2 - DRUHÁ ETAPA ŠÍŘENÍ, 3 - NEEFektivní TRHLINY; 4 - PLASTICKÁ ZÓNA NA ČELE TRHLIN [3].....	18
OBR. 11 SKLUZOVÉ ČÁRY[4] .....	19
OBR. 12 LAIRDŮV MECHANISMUS VYTVÁŘENÍ ŽLÁBKŮ V II. ETAPĚ ŠÍŘENÍ ÚNAVOVÉ TRHLINY [2].....	20
OBR. 13 ÚNAVOVÝ LOM SCHEMATICKY A Z REÁLNÉHO PROSTŘEDÍ [2,5] .....	21
OBR. 14 SCHÉMATICKÝ PRŮBĚH KŘIVKY ŽIVOTNOSTI .....	22
OBR. 15 ZPŮSOB ZNÁZORNĚNÍ VZTAHU MEZI NAPĚTÍM $\Sigma$ A NEBO S A A POČTU CYKLŮ DO PORUŠENÍ Nf [3] .....	23
OBR. 16 ZAŘÍZENÍ PRO ODBĚR VZORKŮ ROLLS ROYCE SSAM-2 A PRINCIP ODBĚRU VZORKU [6].....	25
OBR. 17 PRAKTICKÁ UKÁZKA ODBĚRU VZORKU [3] .....	26
OBR. 18 POROVNÁNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ.....	27
OBR. 19 UKÁZKA ROZLOŽENÍ NAPĚTÍ V SFT VZORKU [3].....	27
OBR. 20 VLIV OPRACOVÁNÍ POVRCHU MATERIÁLU NA MEZ ÚNAVY REÁLNÉHO TĚLESA [3] .	28
OBR. 21 REAKTOR VVER 1000 VYROBENÝ VE ŠKODA JS [1].....	30
OBR. 22 MIKROSTRUKTURA TAVBY HB .....	31
OBR. 23 MIKROSTRUKTURA TAVBY SB .....	31
OBR. 24 MIKROSTRUKTURA TAVBY PL .....	32
OBR. 25 ZKOUŠKA TAHEM [1] .....	32
OBR. 26 ROZŘEZ ZKUŠEBNÍHO TĚLESA CT/50 PRO VÝROBU KLASICKÝCH ZKUŠEBNÍCH TĚLES PRO ZKOUŠKY ÚNAVY .....	33
OBR. 27 KLASICKÉ ZKUŠEBNÍ TĚLESO ZATĚŽOVANÉ CYKlickým OHYBEM.....	34
OBR. 28 KLASICKÉ ZKUŠEBNÍ TĚLESO ZATĚŽOVANÉ JEDNOOSÝM MÍJIVÝM TAHEM .....	34
OBR. 29 UKÁZKA VYROBENÝCH VZORKŮ ODEBRANÝCH ZE ZKUŠEBNÍCH TĚLES CT/50.....	35
OBR. 30 UKÁZKA PORUŠENÍ VZORKU TYPU II	OBR. 31 UKÁZKA PORUŠENÍ VZORKU TYPU I
	36
OBR. 32 ROZMĚRY MINIATURNÍHO ZKUŠEBNÍHO VZORKU SFT [1].....	36
OBR. 33 TYPY MINIATURNÍCH ZKUŠEBNÍCH TĚLES, ZLEVA: A) TYP I, B) TYP II, C) TYP III, D) TYP IV (SFT).....	37
OBR. 34 POROVNÁNÍ VZORKŮ TYPU IV (SFT) PŘED A PO ÚPRAVĚ BOKŮ .....	37
OBR. 35 POROVNÁNÍ VZORKŮ TYPU IV (SFT) PŘED A PO ÚPRAVĚ BOKŮ (POHLED Z BOKU) .	37
OBR. 36 ZKUŠEBNÍ STROJ ZWICK ROELL HFP 5100 .....	39
OBR. 37 DETAILNÍ POHLED NA VZOREK SFT VE ZKUŠEBNÍCH ČELISTECH .....	39
OBR. 38 UPÍNACÍ VLOŽKY, ZLEVA A) DRÁŽKOVÁNÍ SE ŠPIČATÝMI ZUBY, .....	40
OBR. 39 WÖHLEROVA KŘIVKA STANDARDNÍCH TĚLES A MINIATURNÍCH ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ SFT TAVBY HB.....	42
OBR. 40 WÖHLEROVA KŘIVKA STANDARDNÍCH TĚLES A MINIATURNÍCH ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ SFT TAVBY SB .....	43

OBR. 41 WÖHLEROVA KŘIVKA STANDARDNÍCH TĚLES A MINIATURNÍCH ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ SFT TAVBY PL .....	45
OBR. 42 POROVNÁNÍ WÖHLEROVÝCH KŘIVEK STANDARDNÍCH A MINIATURNÍCH ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ VŠECH ZKOUŠENÝCH TAVEB.....	45