



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

# HAIGHŮV DIAGRAM VYBRANÉ PRUŽINOVÉ OCELI

HAIGH DIAGRAM OF SELECTED SPRING STEEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc.LUCIE ZEJDOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

PROF. ING. STANISLAV VĚCHET, CSC.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství  
Akademický rok: 2012/13

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Lucie Zejdová

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Materiálové inženýrství (3911T011)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Haighův diagram vybrané pružinové oceli**

v anglickém jazyce:

### **Haigh diagram of selected spring steel**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na základě provedení a vyhodnocení únnavových zkoušek při různé asymetrii zátěžného cyklu posoudit chování zvoleného materiálu ve vysokocyklové oblasti. Dosažené výsledky porovnat s literárními údaji.

Cíle diplomové práce:

1. Literární rešerše dané problematiky
2. Analýza literárních údajů
3. Provedení mechanických zkoušek
4. Diskuze
5. Závěry



Seznam odborné literatury:


1. Pluhař,J., Koritta,J.: Strojírenské materiály, SNTL/ALFA Praha, 1977
2. Ptáček,L. a kol.: Nauka o materiálu I, CERM, s.r.o., Brno, 2001
3. Veles,P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov, SNTL Praha, 1985

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Stanislav Věchet, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 9.10.2012



  
prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.  
Ředitel ústavu

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

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zaměřuje na únavové vlastnosti pružinové oceli 54SiCrV6. V teoretické části se zabývá vlastnostmi a použitím pružinové oceli a odezvou kovů na cyklické zatěžování. V rámci této diplomové práce byly získány základní mechanické charakteristiky a získaná vysokocyklová únavová data. Dále bylo provedeno metalografické hodnocení struktury.

## **ABSTRAKT**

This master's thesis focuses on the fatigue properties of spring steel 54SiCrV6. The theoretical part deals with the properties and use of spring steel and metal response to cyclic loading. The main aim of this work was to obtain the basic mechanical properties as well as the high cycle fatigue data. Additional metallographical evaluation of microstructure.

### **Klíčová slova**

Pružinová ocel 54SiCrV6, metalografie, únava materiálu.

### **Key words**

Spring steel 54SiCrV6, metallography, material fatigue.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ZEJDOVÁ, L. *Haighův diagram vybrané pružinové oceli*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 57 s., Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Stanislav Věchet, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Haighův diagram vybrané pružinové oceli* vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 23. 5. 2013

Bc. Lucie Zejdová

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěla poděkovat svému vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Stanislavu Věchetovi, CSc. za jeho cenné rady a připomínky. Dále chci poděkovat prof. RNDr. Janu Kohoutovi, CSc. za pomoc při vyhodnocování experimentálních údajů a paní Ivě Davidové za pomoc při přípravě metalografických vzorků.

## Obsah

1. Úvod .....	9
2. Pružinové oceli .....	10
2.1. Legované pružinové oceli .....	13
2.2. Nelegované oceli ušlechtilé .....	13
2.3. Použití pružinových ocelí .....	13
2.4. Tepelné zpracování pružinových ocelí.....	14
2.4.1. Patentování pružinových ocelí .....	14
2.4.2. Zušlechťování pružinových ocelí.....	15
3. Únava materiálu.....	17
3.1. Základní charakteristiky únavového procesu.....	17
3.2. Rozdělení únavy.....	19
3.3. Etapy únavového života .....	20
3.3.1. Stádium změn mechanických vlastností.....	21
3.3.1.1 Cyklická křivka napětí - deformace.....	23
3.3.2. Stádium vzniku únavových trhlin .....	25
3.3.2.1. Mechanismy nukleace mikrotrhlin .....	26
3.3.3. Stádium šíření únavových trhlin .....	27
3.4. Únavová životnost .....	29
3.4.1. Oblast vysokocyklové únavy .....	30
3.4.1.1. Wöhlerova křivka a mez únavy.....	31
3.4.1.2. Nejdůležitější faktory ovlivňující únavu .....	32
3.4.2. Oblast nízkocyklové únavy .....	35
4. Cíle práce .....	38
5. Experimentální metodika .....	39
5.1. Použitý materiál a jeho struktura .....	39
5.2. Mechanické vlastnosti.....	39
5.3. Únavové vlastnosti.....	41
5.3.1. Měření ve vysokocyklové oblasti.....	41
6. Diskuze výsledků .....	47
7. Závěry.....	49
8. Seznam použité literatury .....	50

9. Seznam použitých značek a symbolů .....	53
10. Seznam příloh .....	54

## 1. Úvod

Mezi důležité konstrukční materiály patří v současné době pružinové oceli. Výroba pružinových ocelí má v České republice dlouhodobou tradici. Nejznámějšími výrobci pružinových ocelí v České republice jsou Třinecké a Hanácké ocelárny. V začátcích byla pružinová ocel vyráběna v ocelárnách pouze technologií odlévání do ingotů. Tímto způsobem vyráběná pružinová ocel našla uplatnění zejména při výrobě pružných komponentů pro osobní a nákladní automobily, železniční vozy, atd. Využití pružinové oceli v různých odvětvích průmyslu je uvedené v Tab. 1.1 [1].

V posledních deseti letech se většina výroby pružinových ocelí realizovala odléváním na blokovém kontilití, odléváním do ingotů v kyslíkové konvertorové ocelárně (BOF - basic oxygen furnace) anebo v elektroocelárně (EAF - electric arc furnace) s následným válcováním do sochorů na blokovnách. V dalším výrobním toku jsou sochory převálcovány na moderních válcovacích tratích do polotovarů ve formě drátů a tyčí. Mezníkem ve výrobě pružinové oceli se stal rok 2000, kdy se postupně začala zavádět a navyšovat výroba pružinových ocelí přes sochorové kontilití [1].

V současné době touto cestou vyráběná pružinová ocel představuje přibližně 50 % z celkové výroby pružinové oceli v ocelárnách [1].

*Tab. 1.1 Použití pružinových ocelí v jednotlivých segmentech [1].*

<b>Spotřební segmenty</b>	<b>[%]</b>
osobní automobily	75
železniční vagóny a nákladní automobily	11
pružné svěrky	9
ostatní pružiny	5

## 2. Pružinové oceli

Pružinové oceli jsou známy jako oceli třídy ČSN EN 13 [2], které jsou určeny pro výrobu velmi namáhaných pružin s vysokou hodnotou pružnosti, dostatečnou houževnatostí a vysokou mezí únavy. V praxi se ale také používají pružinové oceli dalších jakostních tříd, jejichž rozdělení je uvedené v Tab. 2.1 [2].

Tyto oceli jsou legovány manganem nebo křemíkem popř. kombinací těchto prvků. Používají se tam, kde svými vlastnostmi nevyhovuje ušlechtilá uhlíková ocel a kde by ocel chromová nebo chromniklová byla zbytečně nákladná. Mangan jako legující prvek je často levnou a dobrou náhradou jinak velmi drahého niklu [3].

Oceli třídy 13 lze zušlechťovat, avšak k cementování se tyto oceli nehodí, neboť z důvodu dlouhé výdrže na cementační teplotě hrubnou jejich zrna a při kalení hrozí nebezpečí vzniku trhlin [2].

Pružina je součástí sloužící k zachycení a akumulaci sil, tlumení rázů a chvění. Charakteristikou pružiny je obecně křivka vyjadřující závislost mezi silou působící na pružinu a její pružnou deformací. U mnoha reálných pružin, především u často užívaných torzních tyčí, je tato závislost téměř lineární. V grafickém vyjádření (viz Obr. 2.1) je to tedy přímka (směrnice této přímky udává tuhost pružiny), což je konstanta vyjadřující sílu potřebnou k jednotkové deformaci pružiny [4].

### **Základní požadavky kladené na vlastnosti pružinových materiálů jsou [5]:**

- statické mechanické vlastnosti, zejména modul pružnosti, mez kluzu, pevnost v tahu a tvrdost,
- odolnost vůči creepu, tedy proti časově závislé trvalé plastické deformaci nebo proti relaxaci napětí,
- dynamické vlastnosti, zejména únavová pevnost a houževnatost,
- odolnost proti korozi,
- pro aplikace v elektrotechnice může být požadovaná elektrická vodivost nebo magnetické vlastnosti.

### **Pružiny lze rozdělit podle několika kritérií:**

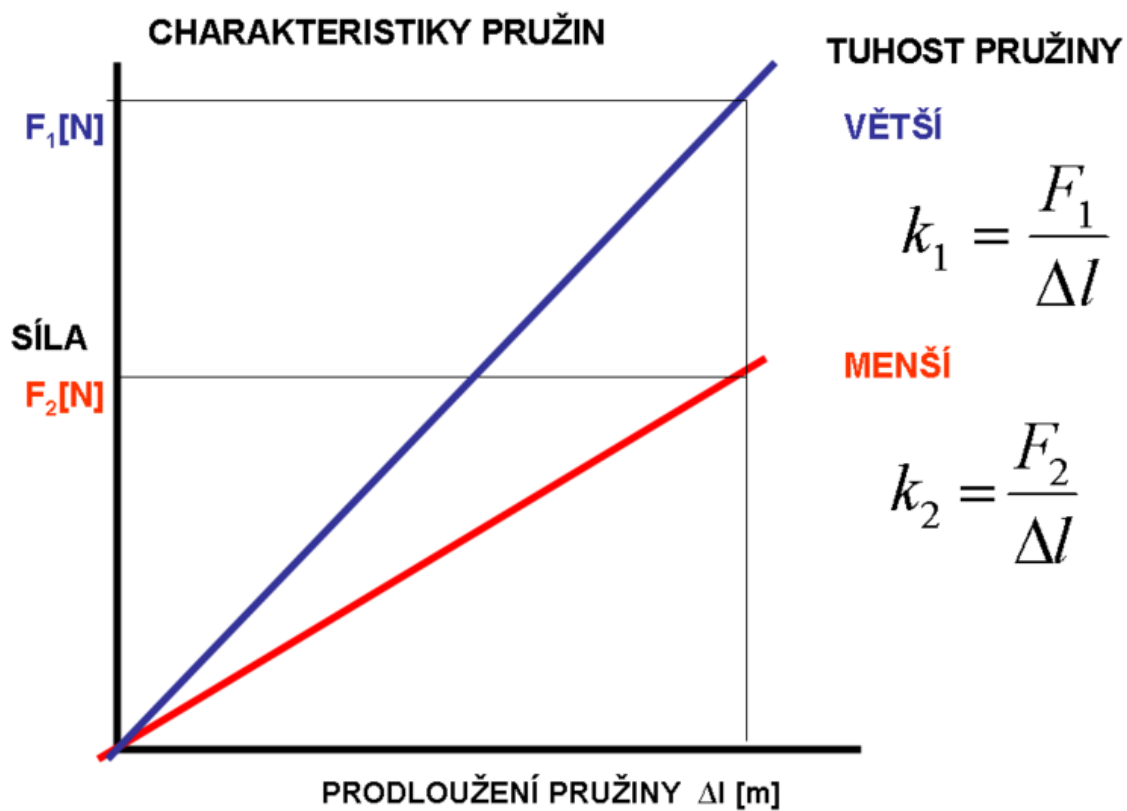
a) dle materiálu, ze kterého jsou vyrobeny:

- kovové,
- nekovové.

b) dle charakteristiky:

- lineární,
- degresivní,
- progresivní.

- c) dle typu namáhání:
- ohybem,
  - krutem,
  - kombinované.
- d) dle technického provedení:
- vinuté,
  - listové,
  - spirálové atd.



Obr. 2.1 Charakteristiky dvou pružin. Modrá přímka představuje pružinu, která při stejném roztažení klade vyšší odpor [4].

Tab. 2.1 Přehled pružinových ocelí [6].

Značka	Chemické složení [hm. %]								
	C	Mn	Si	Cr	Ni max.	Cu max.	V	P max.	S max
12 041	0,37- 0,45	0,50- 0,80	0,17- 0,37	max. 0,25	0,30	0,30		0,035	0,035
12 060	0,52- 0,60	0,50 - 0,80	0,17- 0,37	max. 0,25	0,30	0,30		0,040	0,040
12 061	0,57- 0,65	0,50- 0,80	0,17- 0,37	max. 0,25	0,30	0,30		0,040	0,040
12 071	0,60- 0,70	0,60- 0,80	max. 0,35					0,035	0,035
12 081	0,70- 0,80	0,40- 0,65	max. 0,35					0,035	0,035
12 090	0,80- 0,90	0,20- 0,60	0,10- 0,30					0,030	0,035
13 180	0,70- 0,80	0,90- 1,20	0,15- 0,35	max. 0,30	0,40	0,30		0,035	0,040
13 251	0,42- 0,52	0,50- 0,80	1,50- 1,90	max. 0,30	0,40	0,30		0,035	0,035
13 270	0,58- 0,68	0,65- 0,90	1,50- 1,90	max. 0,30	0,40	0,30		0,040	0,040
14 160	0,50- 0,80	0,70- 1,00	0,30- 0,50	0,30- 0,50	0,40	0,30		0,040	0,040
14 182	0,70- 0,80	0,55- 0,75	1,30- 1,50	0,25- 0,45				0,030	0,030
14 260	0,50- 0,60	0,50- 0,80	1,30- 1,60	0,50- 0,70	0,50	0,30		0,035	0,035
14 262	0,55- 0,65	0,70- 1,00	0,20- 0,50	0,70- 1,00	0,35	0,25		0,035	0,035
15 260	0,47- 0,55	0,70- 1,00	0,17- 0,37	0,90- 1,20			0,10- 0,20	0,035	0,035
17 023	0,26- 0,35	max. 0,80	max. 0,70	12,0- 14,0				0,040	0,030
17 024	0,36- 0,45	max. 0,80	max. 0,70	12,0- 14,0				0,040	0,030
65 V	0,60- 0,70	0,50- 0,80	0,12- 0,30	max. 0,10	0,10	0,08	0,07- 0,17	0,025	0,025
53 CrV	0,47- 0,55	0,30- 0,60	0,15- 0,30	0,75- 1,10			0,15- 0,25	0,030	0,030

## 2.1. Legované pružinové oceli

Legovaná ocel vzniká přidáním jiných kovů (prvků) do oceli. Pro více namáhané pružiny a pružiny větších průřezů, jsou voleny oceli legované molybdenem, manganem, niklem, chromem a křemíkem [4].

Oceli legované manganem se vyznačují malými rozměrovými změnami po kalení a zvýšenou hodnotou meze kluzu. Obsah manganu se pohybuje v rozmezí od 0,9 do 1,2 hm. %. Křemík se jako legura používá méně často a to především u ocelí s vyšší mezí pružnosti, které jsou vystavovány střídavému namáhání. Křemík zvyšuje odolnost proti únavě a popouštění, zvyšuje však sklon k oduhličování. Obsah křemíku se pohybuje od 1,5 do 1,9 hm. %. Do této skupiny ocelí se dle ČSN EN řadí oceli 13 180 a 13 251 [2, 4].

Přídavek chromu ovlivňuje odolnost proti opotřebením z důvodu jeho schopnosti vytvářet speciální tvrdé karbidy. Chrom zvyšuje prokalitelnost a odolnost proti popouštění. Kombinuje se také s manganem (oceli 14160 a 14 262) anebo křemíkem (oceli 14 182 a 14 260). Přidáním vanadu do manganchromové oceli vzniká ocel 15 230, u které lze mez únavy a odolnost proti opotřebením zvýšit nitridací. Pro nejvíce namáhané pružiny byla vyvinuta ocel 53CrV. Pro práci za vyšších teplot je možno použít nástrojové oceli 19 720 a 19 721. Martenzitické oceli s 13 hm. % Cr a obsahem uhlíku v rozmezí 0,25 a 0,45 hm. % (oceli 17 023 a 17 024) jsou vhodné pro práci v korozním prostředí. Dále je také možné pro tažení za studena použít austenitickou ocel 17 242 s obsahem uhlíku v rozmezí 0,15 až 0,25 hm. % a obsahem niklu minimálně 10 hm. % [2, 4].

## 2.2. Nelegované oceli ušlechtilé

Používají se oceli třídy 12, u kterých je množství vměstků ve struktuře sníženo vhodnou technologií tavení. Jsou vhodné pro méně namáhané pružiny a pro použití za normální teploty kvůli malé prokalitelnosti a nízkým hodnotám mechanických vlastností. Pružinové oceli ve formě drátů se obvykle patentují a táhnou za studena, pro větší průřezy je možno použít i zušlechťování po stočení. Obsah uhlíku je od 0,07 do 0,9 hm. % [2].

## 2.3. Použití pružinových ocelí

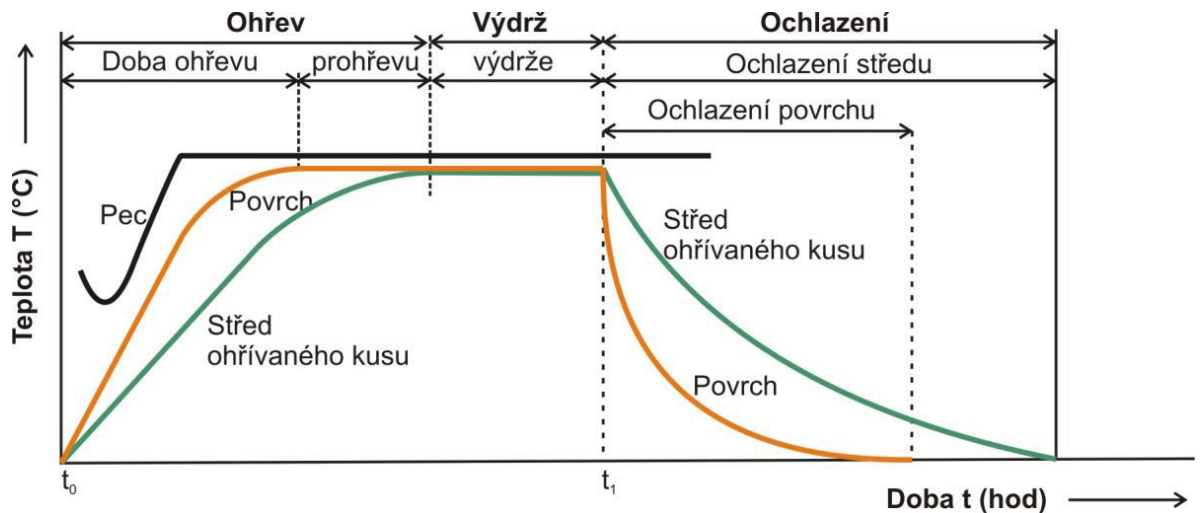
Pružinové oceli mohou být použity k výrobě široké škály produktů, které záměrně absorbují energii anebo tuto absorbovanou energii následně přemění na mechanickou práci. Tyto typy výrobků zahrnují obrovskou škálu spirál, cívek a plochých pružin. Součásti, jako jsou měřicí pásky a rýsovací pomůcky jsou také vyrobeny z různých tříd pružinových ocelí. Výrobky z pružinové oceli mohou být také nalezeny v předmětech denní potřeby, jako jsou zámky, kroužky na klíče, dveřní uzavírací mechanismy [1, 7].

## 2.4. Tepelné zpracování pružinových ocelí

Tepelným zpracováním ocelí se rozumí postup, při kterém se řízeně mění teploty. Účelem tepelného zpracování je zejména dosažení požadovaných mechanických a technologických vlastností kovových materiálů. V některých případech dochází při tepelném zpracování k dalším pozitivním efektům [8].

Průběh tepelného zpracování, Obr. 2.2, je u všech způsobů a u všech kovových materiálů v podstatě stejný. Skládá se z ohřevu na vhodnou teplotu, setrvání na této teplotě (dokonalé prohřátí součásti) a následného ochlazení, přičemž se tento postup může i vícekrát opakovat [8].

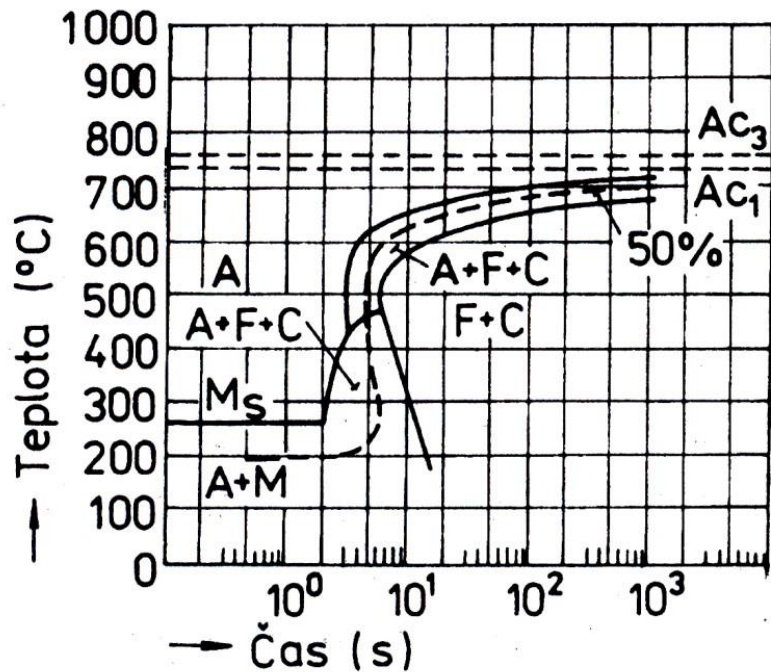
Ochlazování stejně jako ohřev může probíhat stupňovitě, přičemž materiál postupně prochází několika různými prostředími [8].



Obr. 2.2 Obecný diagram tepelného zpracování [8].

### 2.4.1. Patentování pružinových ocelí

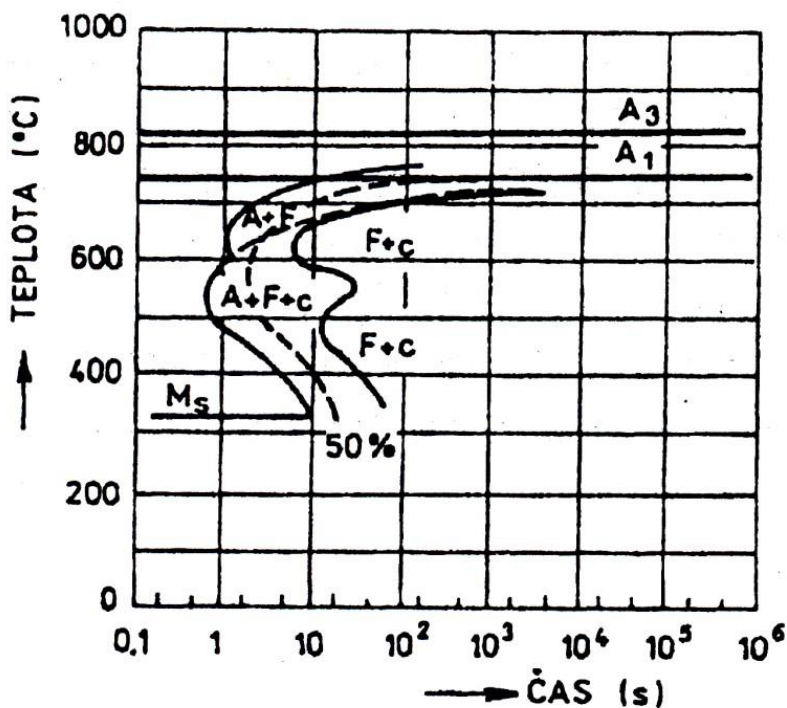
Patentování ocelí je postup užívaný při výrobě ocelových drátů tažením. Ocel se při tažení průvlakem zpevňuje, tvrdne. U oceli s malým obsahem uhlíku se pro odstranění zpevnění mezi jednotlivými technologickými etapami zařazuje normalizační nebo rekrytalizační žíhání. U pevnějších ocelí s vyšším obsahem uhlíku (např. 12 081, ARA diagram na Obr. 2.3) vyžíhání nepostačuje. Proto se volí postup obdobný izotermickému kalení na bainit, prováděný kontinuálně při teplotách lázně asi 500 °C, spojený s opakovaným tažením. Takto zpracované oceli se nazývají patentované. Patentované dráty mají vysokou pevnost (1500 až 3000 MPa) při dobré hodnotě houževnatosti. Používají se na struny, pružiny a lana [9].



Obr. 2.3 ARA diagram oceli 12 081 [6].

### 2.4.2. Zušlechťování pružinových ocelí

U pružin z legovaných ocelí je možno zařadit zušlechťování. Proces zušlechťování se skládá z kalení a popouštění. Například pro ocel 13 251 je určeno izotermické kalení do oleje z teplot 840 až 880 °C a následné popouštění při teplotě 570 až 680 °C [2]. Výslednou strukturu lze vyčíst v IRA diagramu na Obr. 2.4.



Obr. 2.4 IRA diagram oceli 13 251 [6].

Kalení se provádí tak, že se ocel ohřeje na teplotu nad  $A_3$ , následuje výdrž na této teplotě a rychlé ochlazení na pokojovou teplotu. Z hlediska struktury je tento proces založen na vzniku a řízeném rozpadu austenitu [10].

Po kalení následuje popouštění, tj. ohřev na teplotu pod  $A_1$ , výdrž a ochlazení. První operací při zušlechťování je ohřev oceli nad teplotu  $A_3$ , nad níž probíhá přeměna feriticko-perlitické struktury na austenit - austenitizace. Jednotlivá stádia austenitizace jsou: přeměna feritu na austenit, rozpouštění cementitu v austenitu a homogenizace austenitu. Na austenitizaci má vliv jak výchozí stav struktury, tak složení oceli. Jemná struktura urychluje proces austenitizace, zatímco hrubá struktura jej zpomaluje. Následuje ochlazení z austenitizační teploty na pokojovou teplotu [8, 10].

Při ochlazování dochází k rozpadu austenitu. Podle rychlosti ochlazování mohou vznikat různé produkty. Při nejmenší rychlosti ochlazování austenitu je produktem přeměny perlit, lamelární směs feritu a cementitu. Probíhá při teplotách, které dovolují vysokou rychlost difúze uhlíku i legujících prvků. Při vyšší ochlazovací rychlosti a nižší teplotě, než je teplota perlitické přeměny, vzniká bainit, nelamelární směs perlitu a cementitu. Bainit vzniklý za vyšších teplot se nazývá horní bainit a vlastnostmi a strukturou se blíží perlitu, zatímco za nižších teplot vzniká dolní bainit podobný martenzitu. Bainitická transformace neprobíhá úplně, část austenitu zůstává nepřeměněna ve formě zbytkového austenitu [8, 10].

Při rychlostech ochlazování vyšších než je kritická rychlost kalení a zároveň při nižších teplotách, než je teplota bainitické přeměny, dochází ke vzniku martenzitu. Martenzit je přesycený tuhý roztok uhlíku v  $\alpha$ -Fe s krystalografickou mřížkou tetragonální prostorově centrovanou. Martenzit vzniká bezdifúzním stříhovým mechanismem, uspořádanými přesuny skupin atomů z uzlových bodů tak, že relativní změny poloh sousedních atomů jsou menší než meziatomové vzdálenosti. Vznik martenzitu je doprovázen deformací mřížky a vznikem mřížkových poruch, které způsobují značná vnitřní pnutí [36].

Martenzitická přeměna probíhá atermálně, k transformaci nemůže dojít izotermicky při výdrži na teplotě, ale pouze při klesající teplotě. Vznik martenzitu ovlivňuje obsah uhlíku a legujících prvků, velikost zrna, teplota austenitizace a velikost vnitřních pnutí před začátkem tepelného zpracování. Martenzitická transformace, podobně jako bainitická, nikdy neprobíhá úplně, zbytkový austenit snižuje výslednou tvrdost struktury po zakalení. Podíl zbytkového austenitu roste především s obsahem uhlíku a některých legujících prvků [36].

Rozpad austenitu za různých podmínek ukazují transformační diagramy, ve kterých jsou uvedeny teploty a časy potřebné k dané přeměně podle chemického složení a stavu výchozí oceli. Diagramy izotermického rozpadu austenitu (IRA) ukazují průběh přeměny austenitu za konstantní teploty, zatímco diagramy anizotermického rozpadu austenitu (ARA) znázorňují průběh přeměn austenitu při různých rychlostech ochlazování, Obr. 2.3 [10, 11].

### 3. Únava materiálu

#### 3.1. Základní charakteristiky únavového procesu

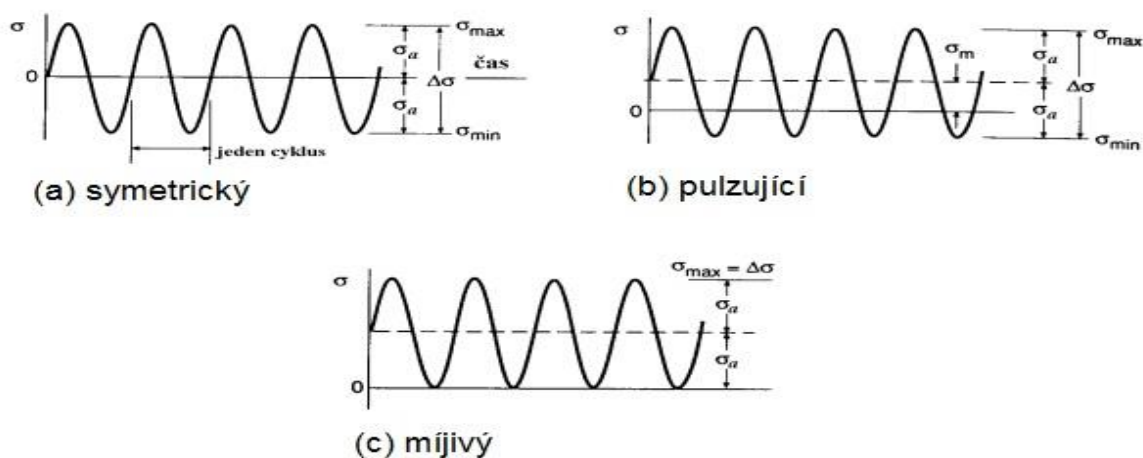
Pojem únava je běžně známý ve sféře biologické jako proces, který vyplývá z nějaké činnosti. Únava neživé hmoty, např. v kovu, se projevuje při jeho cyklickém namáhání, Obr. 3.1.

Únavové chování materiálu, zkráceně únava materiálu, je proces změny strukturního stavu materiálu a jeho vlastností vyvolané kmitavým neboli cyklickým zatěžováním, v důsledku něhož dochází v materiálu k hromadění napětí, které se v závěru procesu projeví růstem makroskopické trhliny a únavovým lomem [7].

Při zatěžování statickým napětím nižším, než je napětí potřebné pro deformaci krystalické mřížky, je proces únavy minimální a těžko detekovatelný. Energetická bilance takto zatěžovaného materiálu je prakticky nulová, protože se do materiálu další energie nepřivádí, ani se z něj neodvádí [14].

V případě, že napětí střídavě mění svoji hodnotu od minimálního po maximální, mění se střídavě velikost elastické deformace a též souběžně vznikající mikroplastické deformace. Z energetického hlediska je takový proces aktivní, tzn., že při každém zatěžovacím cyklu materiál pohlcuje, resp. uvolňuje mechanickou energii. Při takovém namáhání materiálu dochází postupně k nevratným vnitřním procesům a k změnám ve formě malých plastických deformací, které po určitém množství napěťových změn (zatěžovacích cyklů) způsobují porušení kovů při napětí menším než je jeho mez pevnosti [14].

#### Základní charakteristiky únavového zatěžování:



Obr. 3.1 Zatěžování konstantní amplitudou napětí [12].

Rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou napětí se nazývá rozkmit  $\Delta\sigma$  a definován rovnicí:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}, \quad (1)$$

kde polovina hodnoty rozkmitu se nazývá amplituda napětí  $\sigma_a$ , která je definována vztahem:

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2}. \quad (2)$$

Střední hodnota součtu maximálního a minimálního napětí je vyjádřena vztahem a nazývá se střední hodnota napětí  $\sigma_m$ :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \quad (3)$$

ze vztahů (1, 2 a 3) dále vyplývá, že:

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a, \quad (4)$$

$$\sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a. \quad (5)$$

Z Obr. 3.2 je zřejmé, že se zátěžný cyklus může nalézat jak v tahové oblasti, tak v tlakové oblasti. Jestliže je střední napětí cyklu  $\sigma_m$  rovno nule, jde o cyklus symetrický. V případech, kdy je střední napětí  $\sigma_m$  odlišné od nuly, jsou cykly asymetrické. Pro posouzení asymetrie cyklu byl zaveden parametr asymetrie R, případně parametr asymetrie P, které jsou definovány takto:

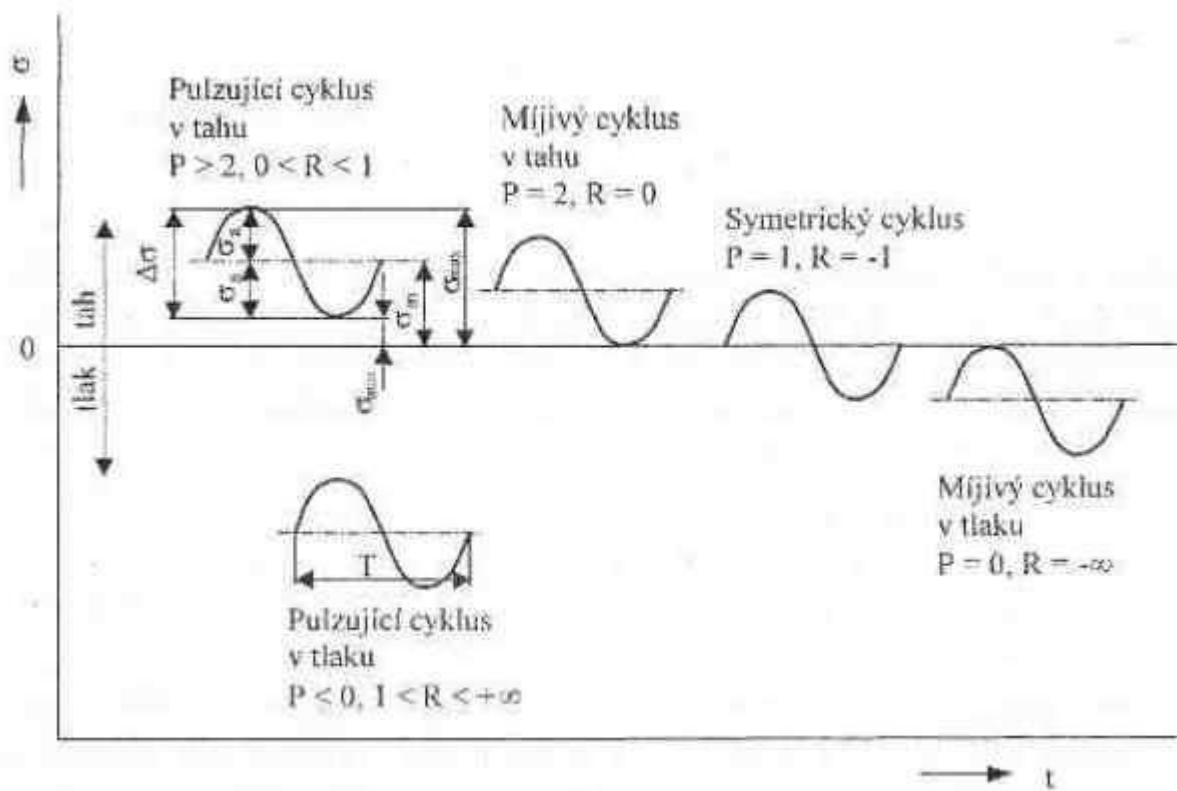
$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}, \quad (6)$$

$$P = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}. \quad (7)$$

Ze základních vztahů lze dále odvodit následující vztah:

$$P = \frac{1-R}{1+R}. \quad (8)$$

Hodnoty obou parametrů pro dané cykly jsou uvedené na Obr. 3.2.



Obr. 3.2 Typy zátěžných cyklů [18].

### 3.2. Rozdělení únavy

Existence únavy kovů a slitin kovů je podmíněna cyklickou plastickou deformací. Modul pružnosti  $E$  se mění s plastickou deformací. Vícenásobné opakování plastické deformace, byť tak malé, že z hlediska běžného pojetí jde o elastické zatěžování, vede ke kumulativnímu poškození, končícího únavovým lomením. Elastická deformace k nevratným změnám materiálu nevede, naopak plastická deformace k nevratným změnám ve struktuře ano [13].

Podle počtu cyklů do lomu se únavové procesy obvykle rozdělují na vysokocyklové (počet cyklů do lomu  $N_f$  je  $10^5$  a vyšší) a nízkocyklové (počet cyklů do lomu  $N_f$  je  $10^4$  a méně). U vysokocyklové únavy převládají deformace elastické, u nízkocyklové naopak deformace plastické. Oblast gigacyklové únavy se definuje od počtu cyklů do lomu  $N_f$  vyšších než  $10^8$  ( $10^9$ ) [15, 16].

### 3.3. Etapy únavového života

Únavové porušování materiálu probíhá postupně. Na základě typu nevratných změn, které jsou způsobeny cyklickou plastickou deformací, lze celý únavový proces rozdělit na tři časově následující a do jisté míry se překrývající stádia. Tato stádia jsou znázorněna na Obr. 3.3 [17]:

1) *Stádium změn mechanických vlastností.*

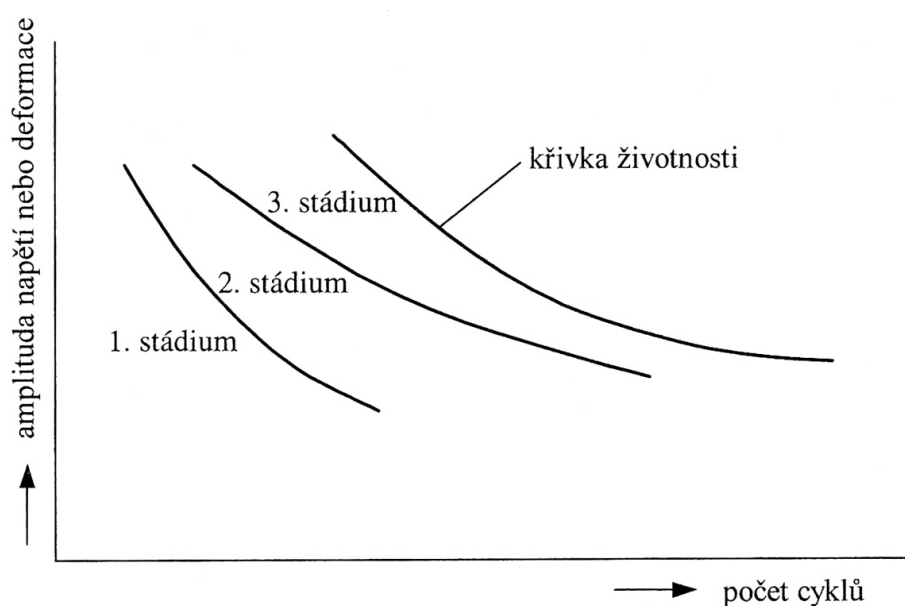
Toto stádium únavového procesu je charakteristické změnami v celém objemu materiálu. V průběhu cyklického zatěžování se mění rozložení mřížkových poruch v materiálu a hustota materiálu. Materiál mění svoje mechanické a fyzikální vlastnosti, cyklicky změkčuje nebo zpevňuje a jeho chování za určitých podmínek je možno popsat cyklickou deformační křivkou [7].

2) *Stádium vzniku únavových trhlin.*

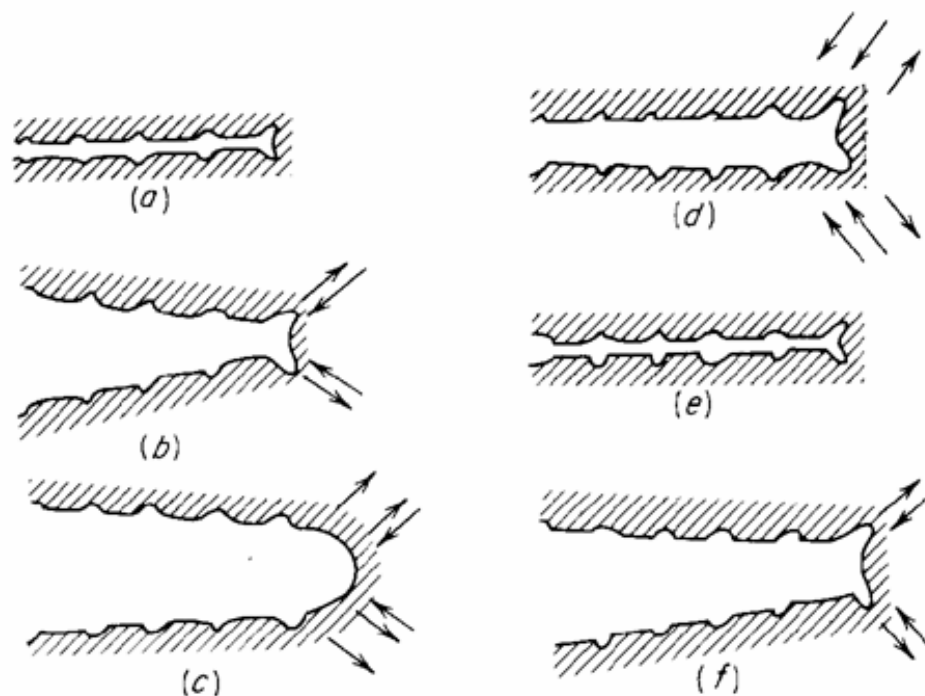
V důsledku pokračující kumulace cyklické plastické deformace dochází na povrchu materiálu ke koncentraci napětí a deformaci v okolí koncentrátorů napětí a ke vzniku prvních mikrotrhlin v těchto místech. Tento proces je omezen jen na malou část objemu vzorku [7].

3) *Stádium šíření únavových trhlin.*

V předchozím stádiu vzniklé mikrotrhliny rostou neustále, z důvodu nerovnoměrně rozloženého napětí a deformace se z některé z nich stane trhlina řídicí. Tato trhlina pak proroste značnou část vzorku, na úkor ostatních trhlin, u kterých je růst potlačen, Obr. 3.4. Při překročení hodnoty kritického napětí ve zbylé části vzorku dojde k závěrečnému dolomení. Lze tedy říci, že třetí stádium je ukončeno únavovým lomem součásti [7].



Obr. 3.3 Stádia únavového procesu [17].



Obr. 3.4 Stádium šíření únavových trhlin [12].

Jednotlivá stádia plynule přecházejí z jednoho do druhého a neexistuje mezi nimi žádná zřetelná hranice.

### 3.3.1. Stádium změn mechanických vlastností

Elastická deformace ani při neomezeném počtu cyklů nezpůsobí porušení materiálu, nevede k žádným nevratným změnám ve struktuře materiálu, tedy ani v jeho vlastnostech. Na rozdíl od toho opakovaná plastická deformace způsobí změny v hustotě a uspořádání mřížkových poruch, tedy i změny mechanických vlastností. Tyto změny vedou po určité době ke vzniku trhlin, které se dále mohou šířit a způsobit tak lom [15].

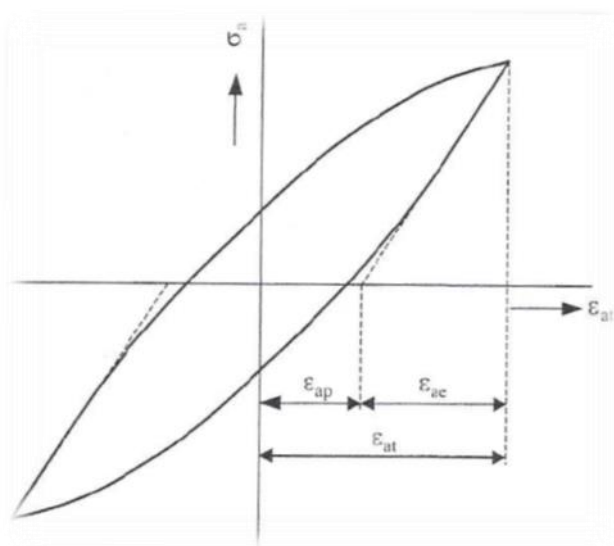
Při cyklickém zatěžování se zpočátku mechanické i fyzikální vlastnosti mění velmi rychle až do určité hodnoty, v závislosti na velikosti amplitudy zatěžování a plastické deformace [15]. Tyto vlastnosti charakterizují odpor materiálu proti deformaci vyvolané vnějšími silami [13].

Odpor vůči plastické deformaci se během procesu může zvětšovat, nebo zmenšovat v závislosti na charakteru strukturních změn, podmínek pole napětí a charakteru zatěžování [18].

Zvyšování odporu proti cyklické únavě tedy zpevnění materiálu, je typické pro vyžíhané materiály a charakterizováno zvyšováním hustoty dislokací. Naopak změkčení materiálu nastává u dříve zpevněných i nezpevněných materiálů. Podle charakteru zpevnění probíhají různé změny mechanických vlastností materiálu [15].

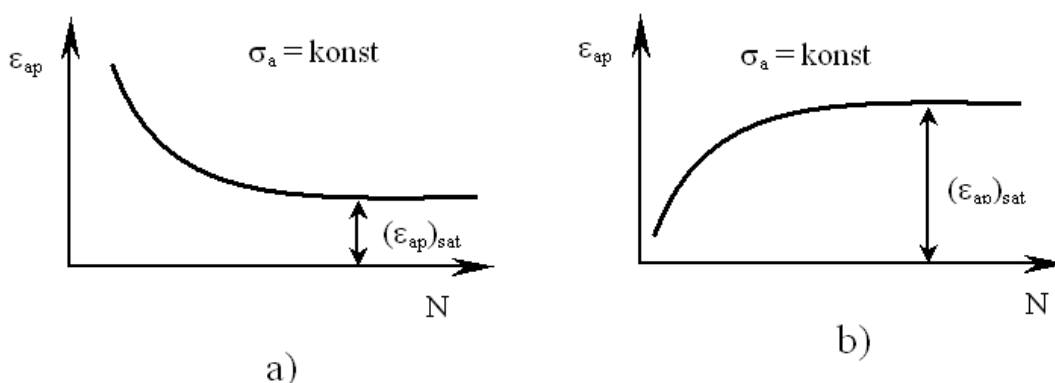
Kritériem pro určení zpevňování nebo změkčování materiálu je poměr meze pevnosti k mezi kluzu ( $R_m/R_{p0,2}$ ). Je-li tento poměr větší než 1,4 – materiál se zpevňuje. Při poměru menším než 1,2 – materiál změkčuje [15].

Změny mechanických vlastností je možné detekovat přímým měřením parametrů hysterezních smyček, Obr. 3.5. Tyto parametry jsou odečteny za chodu zkušebního stroje. Elektronicky řízené únavové stroje umožňují v průběhu zatěžování udržovat buď konstantní amplitudu napětí, nebo amplitudu plastické či celkové deformace. Jestliže používáme jiný způsob zatížení než prostý tah – tlak, lze dodržovat konstantní hodnoty příslušných momentů a výchylek [13, 18].

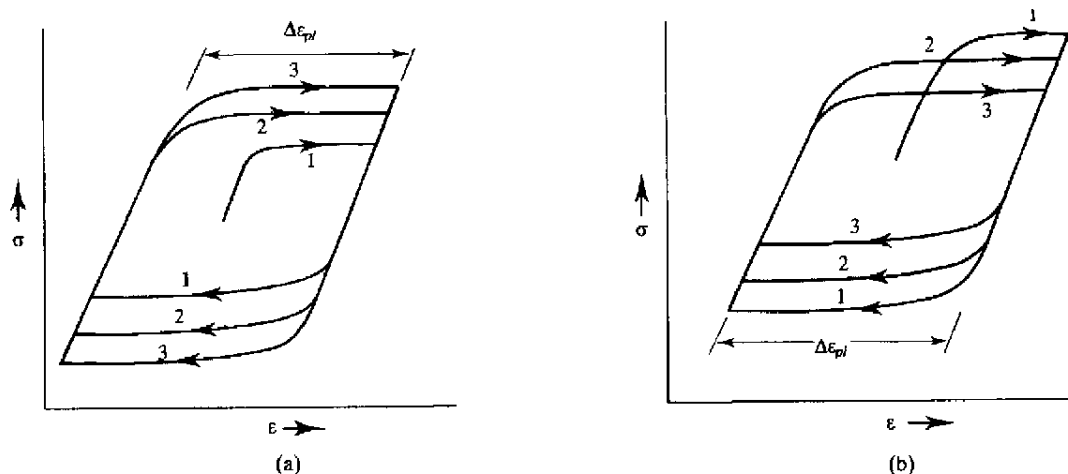


Obr. 3.5 Schéma hysterezní smyčky [17].

Při cyklickém zatěžování s konstantní hodnotou amplitudy napětí se mění jen amplituda deformace. Pokud s počtem cyklů amplituda deformace klesá – materiál cyklicky zpevňuje, v opačném případě materiál změkčuje, viz Obr. 3.6 [13, 18].



Obr. 3.6 Závislost deformace na počtu cyklů do lomu: (a) materiál cyklicky zpevňuje, (b) materiál cyklicky změkčuje [17]



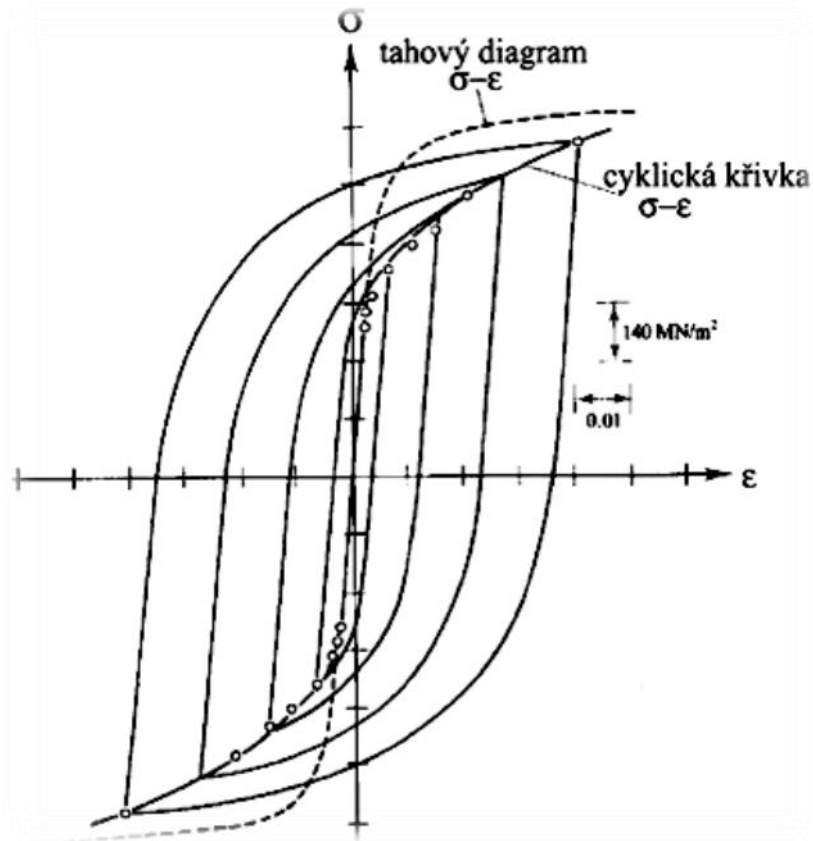
Obr. 3.7 Závislost napětí na deformaci: (a) materiál cyklicky zpevňuje, (b) materiál cyklicky změkčuje [12]

Cyklické plastické chování materiálu je velmi často nemonotónní, cyklické změkčení může přecházet k cyklickému zpevnění a naopak. Také tvar a plocha hysterézí smyčky se velmi často v průběhu zatěžování mění, viz Obr 3.7 [13, 18].

### 3.3.1.1 Cyklická křivka napětí - deformace

U některých materiálů (neželezné kovy, Ni slitiny, nízkouhlíkové oceli) dochází na začátku zatěžování k velkým změnám mechanických vlastností. Tyto změny jsou však zanedbatelné po dosažení určitého počtu cyklů  $N_f$ . Tento stav se nazývá saturace (saturující materiály). Dalším typem materiálů jsou materiály, u kterých ke změnám mechanických vlastností dochází v průběhu celého únavového života. Tyto materiály označujeme jako nesaturující. U nesaturujících materiálů se někdy určují hodnoty saturace podle konvence – hodnoty amplitud napětí při počtu cyklů v 50 % živostnosti [18].

Po skončení procesu cyklického změkčení nebo zpevnění se mechanické vlastnosti zatěžovaného materiálu dále nemění. Amplituda napětí i deformace dosáhne saturevaných hodnot a vytvoří se takto saturevaná (stabilní) hysterézní smyčka. Proložíme-li vrcholovými body hysterézní smyčky křivku, získáme relaci mezi amplitudou napětí a amplitudou plastické deformace v saturevaném, ustáleném stavu. Tato křivka je v literatuře nazývána jako cyklická křivka napětí – deformace, Obr. 3.6. Tato křivka je velmi významnou materiálovou charakteristikou a lze jí porovnávat s klasickým tahovým diagramem [13, 18].



Obr. 3.6 Cyklická deformační křivka [12].

Cyklickou deformační křivku polykrystalů lze ve většině případů popsat v oblasti velkých a středních amplitud plastické deformace mocninnou funkcí [17]:

$$\sigma_a = K \cdot \varepsilon_{apn}, \quad (9)$$

kde:

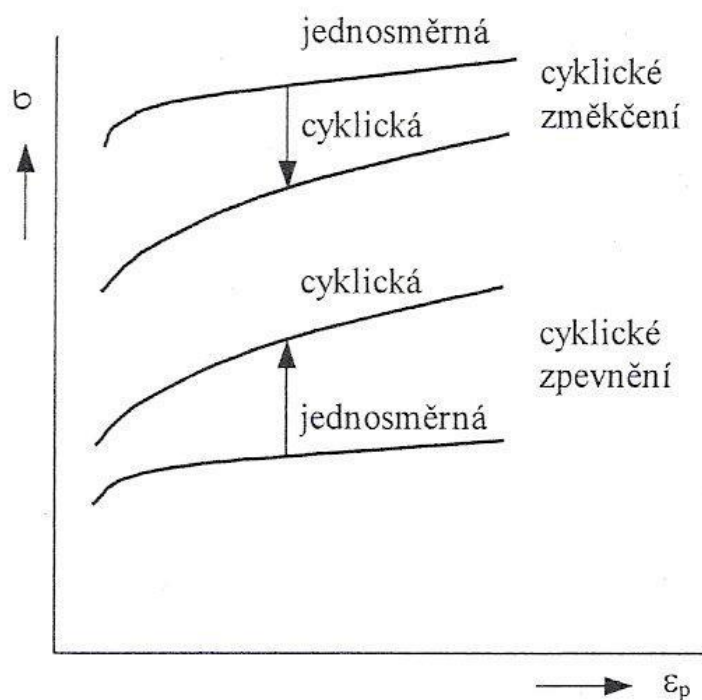
$\sigma_a$  – amplituda napětí,

$K$  – parametr cyklické deformační křivky,

$\varepsilon_{ap}$  – amplituda plastické deformace,

$n$  – exponent cyklické deformační křivky.

Při srovnání cyklické deformační křivky s tahovým diagramem je možné odhadnout cyklickou deformační odezvu materiálu. Leží-li cyklická křivka nad tahovou křivkou materiál cyklicky zpevňuje a jeho odpor proti plastické deformaci roste. Leží-li naopak cyklická křivka pod tahovou křivkou, materiál cyklicky změkčuje a jeho odpor proti plastické deformaci klesá. Je-li cyklická křivka přibližně totožná s tahovým diagramem, materiál je cyklicky stabilní, Obr. 3.7 [7].



Obr. 3.7 Srovnání jednosměrných (tahových diagramů) a cyklických křivek napětí – deformace [17].

### 3.3.2. Stádium vzniku únavových trhlin

Experimentálně bylo zjištěno, že k nukleaci únavových trhlin v homogenním materiálu dochází zpravidla na volném povrchu materiálu. Důvodem je větší koncentrace napětí v těchto místech. Doba nukleace trhlin závisí na amplitudě zatěžování, typu materiálu, geometrii součásti, stavu povrchu a prostředí, ve kterém se cyklické namáhání uskutečňuje. Při kontaktní únavě, u materiálu s nehomogenní strukturou nebo s vnitřními geometrickými defekty výjimečně vznikají trhliny uvnitř materiálu [15].

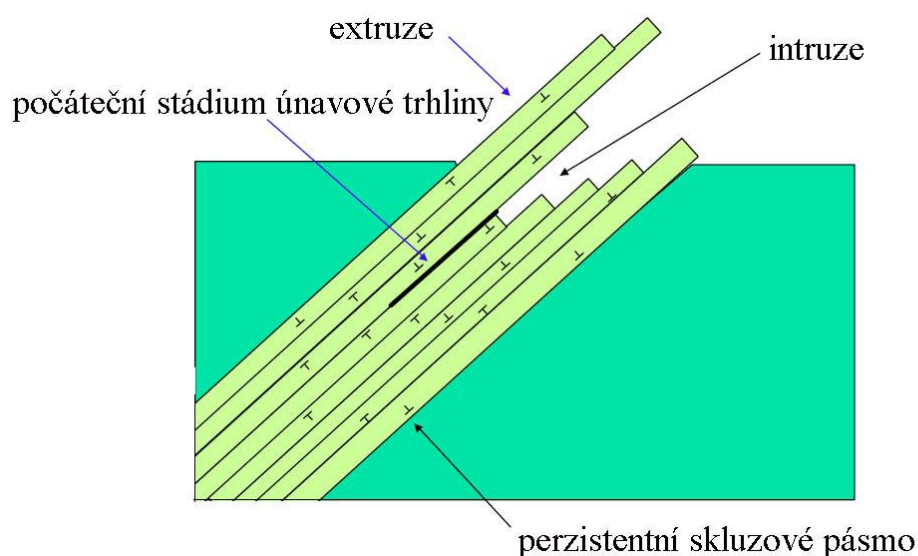
Mezi příčiny podílející se na vzniku trhlin patří únavová skluzová pásma, hranice zrn, rozhraní mezi inkluzemi a matricí základního kovu nebo slitiny. Skluzová pásma se liší s typem materiálu (podle energie vrstvené chyby) a podmínkami zatěžování v souvislosti s podmínkami uspořádání dislokací [15, 19].

Nukleační stádium je charakterizováno poměrem počtu cyklů potřebných k nukleaci k celkovému počtu cyklů do lomu za určitých podmínek zatěžování. Koncentrátory napětí (zejména vruby) výrazně zkracují nukleační stádium, v případech trhlin je doba tohoto stadia zanedbatelně krátká [15].

### 3.3.2.1. Mechanismy nukleace mikrotrhlin

Pro popis stádia nukleace mikrotrhlin bylo navrženo a vytvořeno velké množství modelů, žádný však nepopisuje průběh v celém rozsahu zcela přesně. Mechanismy nukleace je možné rozdělit do následujících pěti skupin:

1. *Modely nerozlišující mezi mikrotrhlinou a intruzí.* Vznik a růst mikrotrhliny je v tomto případě chápán jako spojitě prorůstání intruze do hloubky a to pomocí opakovaného skluzu na jednom nebo dvou skluzových systémech. V případě skluzu na jednom skluzovém systému je podstatou relativní pohyb více rovnoběžných „karet“, Obr. 3.8. Intruze zde působí jako koncentrátor napětí a podporuje další skluz [13].



Obr. 3.8 Skluz v perzistentním skluzovém pásmu [12].

2. *Nukleace křehkým prasknutím v kořeni intruze* [17]. Tato hypotéza jasně rozlišuje intruzi a mikrotrhlinu. Tento mechanismus vychází z přímého pozorování povrchových vrstev pomocí elektronového mikroskopu. Mikrotrhliny vždy vznikají na ostrých intruzích bez ohledu typu okolní struktury dislokací. Lze předpokládat, že v případě kdy, koncentrace napětí kolem intruzí (závisející na geometrii intruze) nemůže být odrelaxována skluzovými procesy (následkem zpevnění materiálu), vytvoří se mikrotrhlina a maximální napětí přesáhne hodnoty meziatomové vazebné síly. Tato představa předpokládá extrémně vysokou a silně lokalizovanou koncentraci napětí u kořene intruze. Existenci takto vysoké koncentrace napětí není možno vyvrátit či experimentálně doložit [13].

3. *Vznik trhliny kondenzací vakancí.* Ke vzniku vakancí vedou některé dislokační interakce. Experimentálně byla zjištěna relativně vysoká koncentrace vakancí během cyklické deformace v celém zatěžovaném objemu. Únavová skluzová pásma jsou oblasti se stálou a největší dislokační aktivitou a je možné, že právě v těchto pásmech je koncentrace vakancí největší. Vakance vzniklé tímto způsobem mohou

vytváret dutiny o dostatečné velikosti a shluky, které lze pak považovat za trhliny. Tato představa implicitně předpokládá silnou závislost difúzi vakancí na teplotě [13].

V několika experimentálních pracích bylo ukázáno, že nukleace a šíření trhlin probíhá i za extrémně nízkých teplot 1,7 K (teplota, při které difúze neprobíhá). Difúze vakancí tedy není nutnou podmínkou pro nukleaci trhlin. Je to také nejvýznamnější námitka proti vakančnímu mechanismu. Při cyklickém zatěžování v oblasti vyšších teplot (kdy se uplatňuje creep), se na nukleaci může podílet mechanismus kondenzace vakancí [13].

4. *Dekoheze krystalu podél skluzové roviny způsobená akumulací dislokací.* Základem je vytvoření takové konfigurace dislokací v kritických místech, které vede ke zvýšení napětí nebo energie, dostačující ke ztrátě koheze v oblasti několika desetin až jednotek nanometrů [13]. Teoreticky bylo dokázáno, že dislokační dipól s velmi malou vzdáleností mezi dislokacemi může prostřednictvím anihilace zapříčinit vznik trhliny.

5. *Nukleace na hranicích zrn.* Tento mechanismus předpokládá tvorbu intruze přímo na hranici zrn, z níž se může vyvinout mikrotrhlina. Tento mechanismus je aplikovatelný pro vysoké amplitudy zatěžování, které odpovídají počtu cyklů do lomu  $N_f = 10^3$ . V případě takto vysokých hodnot amplitud zatěžování dochází k intenzivní cyklické plastické deformaci celé povrchové vrstvy jednotlivých zrn. Deformace však nemůže proběhnout v místě hranice zrna, protože je cyklické posunutí kolmé k povrchu v místě hranice téměř nulové. V místě hranice se tedy může vytvářet intruze [31]. Tato ryze geometrická představa popisuje jen tvorbu intruzí na hranicích a předpokládá, že rozdíl mezi intruzí a mikrotrhlinou není [13].

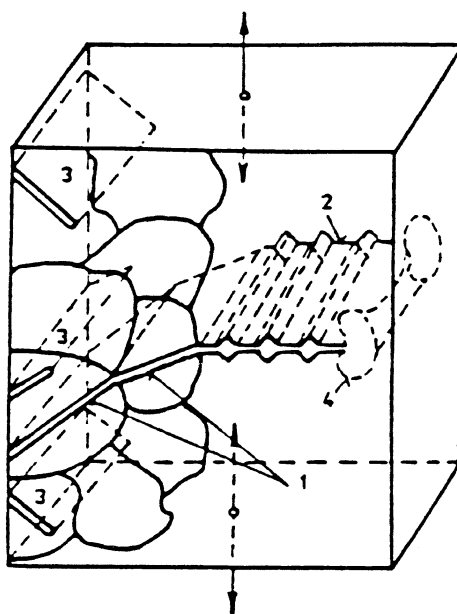
Existuje ještě celá řada variací a obměn. Žádný z modelů uvedených v bodech (1) až (5) není plně uspokojivý a rozpracován natolik, aby umožnil vyjádření vztahu materiálových parametrů na rychlosti nukleace [15, 18].

Je nejasné do jaké délky mikrotrhlin a hloubky je možno hovořit o nukleaci a od kterých hodnot lze hovořit o šíření mikrotrhlin. K dispozici není žádné kritérium vyplývající z podstaty procesů, které by umožňovalo toto rozhodnutí učinit. Jsme odkázáni jen na konvenci volby délky trhliny, kterou budeme považovat za konec nukleačního stádia protože nukleace a šíření mikrotrhliny je zcela spojený proces bez možnosti vymezení hranic [18].

### 3.3.3. Stádium šíření únavových trhlin

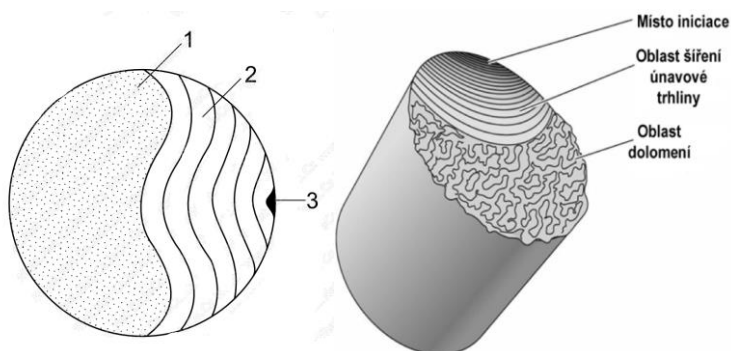
Stadium šíření únavových trhlin se skládá ze dvou etap. Tyto etapy jsou zaznačeny na Obr. 3.9, kde v první etapě dochází k šíření trhlin, vlivem dalšího cyklického zatěžování se nukleované trhliny dále propojují. Tyto trhliny rostou do hloubky materiálu podle aktivních skluzových rovin (pod úhlem  $45^\circ$  ke směru působení hlavního napětí). Tento tzv. krystalografický způsob šíření trhlin postupně přechází v tzv. nekystalografický, kdy se trhliny začnou stáčet do směru kolmého k hlavnímu napětí. Tato etapa je považována za druhou. Ve druhé etapě se zpravidla šíří pouze tzv. magistrální trhlina, která vede k lomu, protože zeslabuje průřez. Délka trhliny, při které dochází k přechodu mezi první a druhou etapou šíření trhlin závisí na

druhu materiálu a amplitudě zatěžování. Platí, že čím větší je amplituda zatěžování, tím menší je délka trhliny, která odpovídá první etapě [18].



Obr. 3.9 Šíření trhliny [12].

Poslední etapou ve stádiu šíření trhlin a zároveň celého únavového procesu, je únavový lom. Únavový lom vzniká v důsledku snížení nosného průřezu součásti, který už není schopen snést působící napětí. Lom zbylé části nosného průřezu je rychlý a má blíže ke statickému než k únavovému způsobu porušování. Ve většině případů se jedná o křehké porušení, avšak u některých materiálů může nastat i lom houževnatého charakteru. Na Obrázku 3.10 a 3.11 je schematicky znázorněna únavová lomová plocha. Místo iniciace únavové trhliny je označeno číslem 3. Oblast označena číslem 2 je oblast šíření magistrální trhliny. Číslo 1 pak označuje oblast statického dolomení [20].

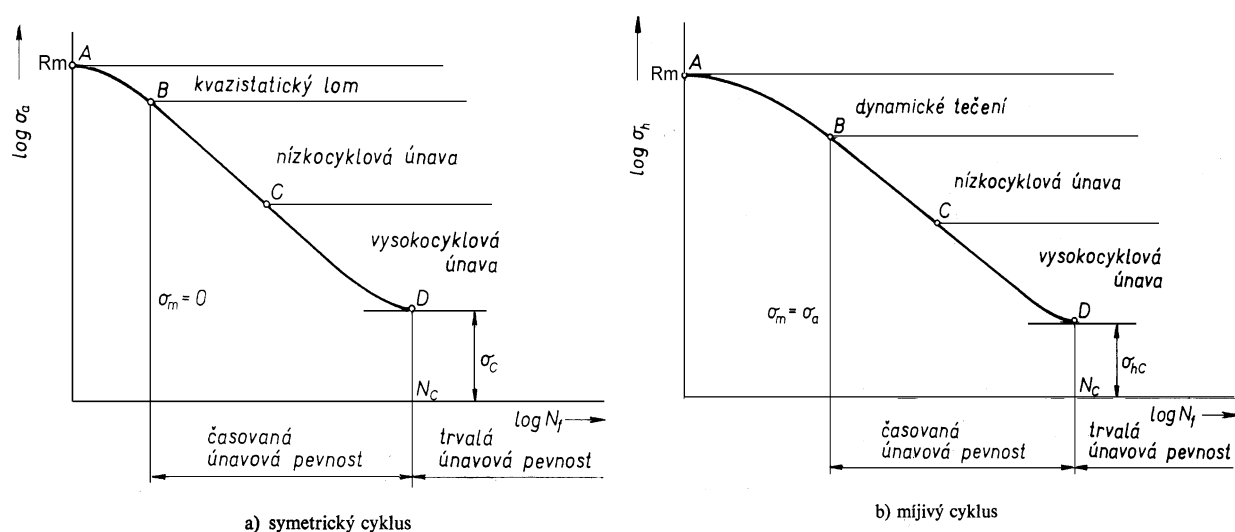


Obr. 3.10 Lomová plocha [20].

Obr. 3.11 Vzhled lomové plochy [30].

### 3.4. Únavová životnost

Kromě znalosti vnitřní napjatosti a deformace namáhaných součástí, či konstrukcí je v provozu nutné předpovídat také životnost součástí. K tomu slouží tzv. křivky životnosti, což jsou v nejjednodušším případě křivky závislosti počtu cyklů do porušení součásti na amplitudě působícího střídavého (tah-tlak) napětí (Wöhlerova křivka). Na Obrázku 3.12 je schematicky znázorněn průběh křivek životnosti pro dva různé typy cyklického namáhání. V obou případech je průběh rozdělen počtem cyklů  $N_C$  na oblast časované únavové pevnosti ( $N < N_C$ ) a trvalé únavové pevnosti ( $N > N_C$ ). Dále se průběh těchto křivek rozděluje na oblasti kvazistatického lomu, dynamického tečení, nízkocyklové únavy a vysokocyklové únavy. Oblastmi kvazistatického lomu a dynamického tečení se tato práce nebude podrobněji zabývat a více se zaměří na oblasti nízkocyklové a vysokocyklové únavy [14, 17].



Obr. 3.12 Schématický průběh křivky životnosti  $\sigma_a - N_f$  [14].

V minulosti se Wöhlerova křivka stanovovala výhradně v tzv. vysokocyklové oblasti. Tato oblast reprezentuje časovanou mez únavy a trvalou pevnost (mez únavy) a za její spodní hranici lze přibližně považovat  $10^5$  cyklů. V současné době se její stadium rozšiřuje i na oblast nízkocyklové únavy, v rozmezí cyklů  $10^2 - 10^4$  (případně  $10^5$  cyklů), a oblast kvazistatické pevnosti (v případě působení statického tahového předpětí se jedná o oblast cyklického creepu), jež zahrnuje životnost přibližně do 100 cyklů a v níž se napětí blíží mezi pevnosti, viz Obr. 3.12. Jednotlivé oblasti se navzájem liší různými typy lomů a různými typy řídicích mechanismů poškození [7].

Z hlediska zkoumání únavového poškození materiál jsou důležité zejména oblasti nízkocyklové a vysokocyklové únavy, neboť zde dochází k únavovému lomu po mnoha cyklech. V kvazistatické oblasti dochází k lomu po několika desítkách cyklů za současného vzniku velké plastické deformace (v místě lomu se vytvoří krček), obdobně jako při statické zkoušce tahem [7].

Oblast kvazistatického lomu je na Obr. 3.12a oblast A-B. Hodnotě meze pevnosti  $R_m$  odpovídá amplituda napětí v bodě A. V prvním, případně po několika následujících cyklech dojde k lomu. Označení kvazistatický lom se používá proto, že nemá charakter únavového lomu, ale tvárného lomu. Mezní stav na křivce  $\sigma_a - N_f$  představuje bod A [6, 7].

Oblast dynamického tečení je na Obr. 3.12b oblast A-B. Tato oblast je charakteristická pouze pro asymetrické zatěžování s kladnou hodnotou středního napětí (tzn. mijivý cyklus). Dynamické tečení se projevuje růstem celkové deformace a probíhá pouze s konstantní amplitudou napětí [17].

Křivka dynamického tečení se odlišuje od vysokoteplotního tečení (tzn. creepu) tím, že první a třetí stádium je zcela nevýrazné [17].

Deformace tečením pokračuje i při přechodu do pásma nízkocyklové únavy s tím rozdílem, že s narůstajícím počtem cyklů klesá rychlost tečení k nule, hysterezní smyčka se uzavírá a již se nemění. Přestože jednosměrná deformace způsobená tečením může být značná, je vždy menší než hodnota, při které vznikne plastická nestabilita a lom v krčku. Příčinou porušení je v tomto případě střídavá plastická deformace vedoucí k únavovému lomu procesem nukleace a šířením únavových trhlin [17].

Prakticky se vyskytuje pouze úsek kvazistatického lomu nebo úsek dynamického tečení. Podle asymetrie cyklu a rezistenci struktury proti dynamickému tečení se uplatňují různé typy procesů [17].

Oblast nízkocyklové a vysokocyklové únavy na Obr. 3.12a popisuje oblast B-D. Bývá zvykem členit zbývající oblast časované únavové pevnosti v diagramu  $\sigma_a - N_f$  na úseky nízkocyklové a vysokocyklové únavy. Přitom se používá různých ne však vždy dostatečně zdůvodněných kritérií [13].

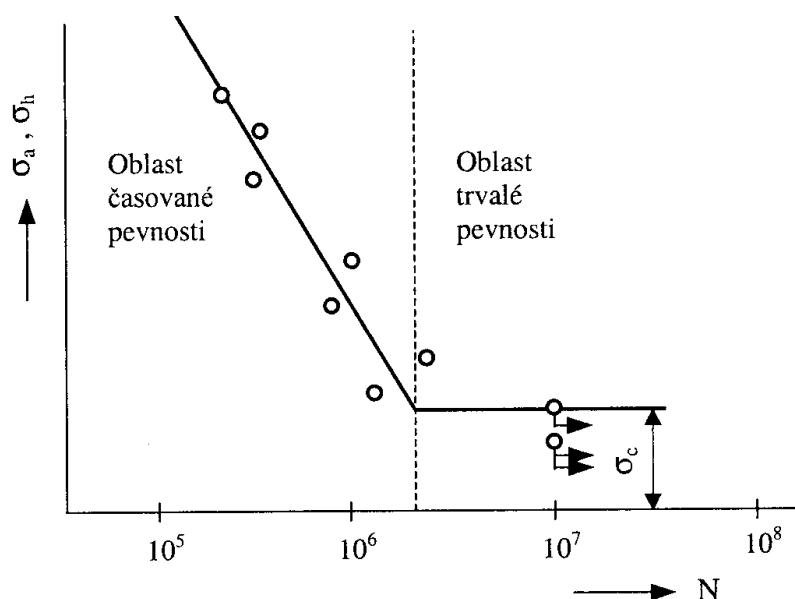
### 3.4.1. Oblast vysokocyklové únavy

Při vysokocyklové únavě ( $N_f = 10^5$  a více cyklů) je velikost působícího napětí vždy pod mezí kluzu a opakované namáhání lze definovat časovým průběhem napětí. Pro životnost součástí je rozhodující dlouhý úsek, potřebný k vzniku zárodku únavové trhliny, kdy fáze jejího šíření je méně významná [20].

Únavové chování materiálu při zatěžování ve vysokocyklové oblasti vyjadřuje Wöhlerova křivka a zní plynoucí hodnota meze únavy  $\sigma_c$  [20].

### 3.4.1.1. Wöhlerova křivka a mez únavy

Wöhlerova křivka (tzv. S-N křivka) slouží k určení materiálových charakteristik ve vysokocyklové únavě. Z Wöhlerovy křivky lze určit tu nejzákladnější únavovou charakteristiku materiálu - mez únavy  $\sigma_c$  (viz. Obr. 3.13). Pro každou amplitudu zatížení  $\sigma_a$  (stejná frekvence, teplota, rozměry tělesa) existuje určitý počet cyklů  $N_f$  do porušení [7].



Obr. 3.13 Wöhlerova křivka [7].

Křivka  $\sigma_a - N_f$  může být zkonstruována pro různá střední napětí  $\sigma_m$ , která ovlivňují její průběh. Experimentálně se většinou zjišťují pouze dvě  $\sigma_a - N_f$  křivky, při symetrickém zátěžném cyklu ( $\sigma_m = 0$ ), a při míjivém cyklu ( $\sigma_m = \sigma_a$ ). Pokles počtu cyklů do lomu s rostoucím napětím je společný pro oba diagramy. Tuto oblast nazýváme časovanou únavovou pevností a je ohraničena zprava počtem cyklů  $N_c$  (počet cyklů, nad nímž již nedojde k únavovému porušení). Oblast s vyšším počtem cyklů  $N > N_c$  nazýváme oblastí trvalé únavové pevnosti [13].

Křivku životnosti  $\sigma_a - N_f$  lze popsat mocninnou závislostí navrženou Basquinem v roce 1910:

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b, \quad (10)$$

kde:

$\sigma'_f$  - je součinitel únavové pevnosti a je dán extrapolací amplitudy napětí na první půlcyklus zatížení,

$b$  - je elastický exponent křivky životnosti a je dán sklonem křivky životnosti  $\epsilon_{ae} - N_f$  zobrazené v log-log souřadnicích.

Obě konstanty charakterizují odpor materiálu proti únavovému poškozování při silovém zatěžování [18].

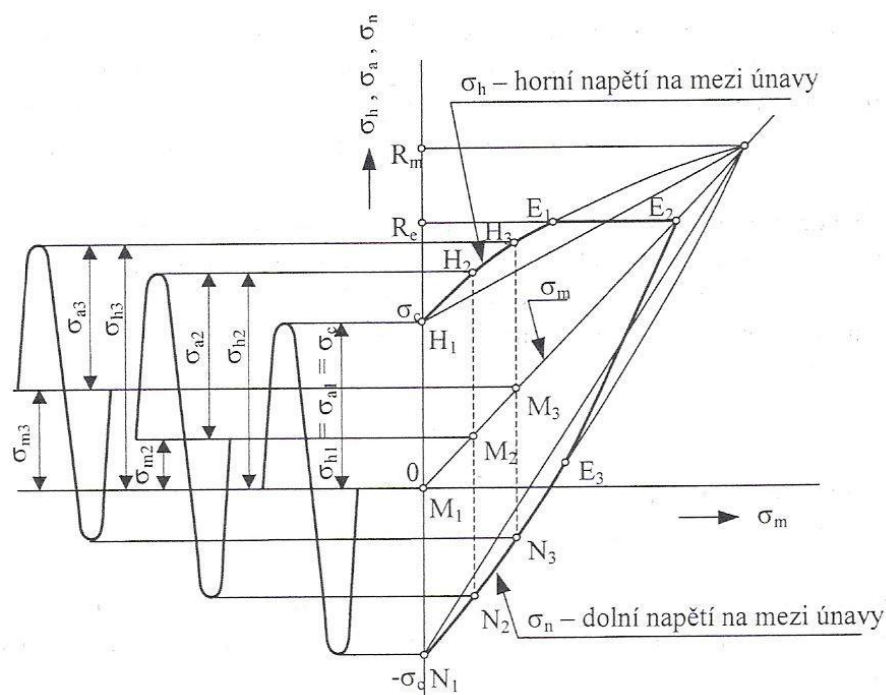
Wöhlerova křivka se ve vysokocyklové oblasti nejčastěji znázorňuje v semilogaritmickém systému  $\sigma - \log N$ , jak je naznačeno na Obr. 3.13. Jestliže se ze souboru naměřených bodů přibližně stanoví pomocí jednoduché metody grafické aproximace, je v tomto systému znázorněna dvěma přímkami, šikmou a vodorovnou. Zlom na Wöhlerově křivce, který se zpravidla nalézá mezi  $10^6 - 5 \cdot 10^6$  cyklů, rozděluje vysokocyklovou oblast na oblast časované únavové pevnosti a oblast trvalé únavové pevnosti. Vodorovná část Wöhlerovy křivky určuje hodnotu nejdůležitější únavové charakteristiky – hodnotu meze únavy  $\sigma_c$  [7].

Pro pevnostní výpočty většiny součástí pracujících v oblasti vysokocyklové únavy je mez únavy základní charakteristikou vyjadřující odolnost materiálu proti únavovému poškození. Mez únavy lze definovat jako napětí, při kterém se vytvoří únavové mikrotrhliny kritické délky, které se však nemohou dále šířit [18].

### 3.4.1.2. Nejdůležitější faktory ovlivňující únavu

Proces únavy je citlivý na velký počet externích a interních faktorů, které samostatně, a především v superpozici, mohou významně měnit odolnost materiálu proti únavovému porušení [18].

**Vliv asymetrie zátěžného cyklu.** Hodnota meze únavy je funkcí asymetrie zátěžného cyklu, a pro různé druhy zátěžných cyklů vzrůstá nebo klesá podle velikosti a znaménka statického předpětí. Grafickým zpracováním této závislosti je Smithův, Obr. 3.14 nebo Haigův diagram, Obr. 3.15 [7, 18].



Obr. 3.14 Smithův únavový diagram [7]

Spojnice jednotlivých amplitud pro různé zátěžové cykly (body H1, H2, H3 a N1, N2, N3) vytváří mezní závislost horního a dolního napětí cyklu  $\sigma_h$ ,  $\sigma_n$ . V bodě M se tyto křivky protnou. Bod M je určen z meze pevnosti  $R_m$  [16].

Smithův únavový diagram se z praktických důvodů omezí tak, aby nemohly v materiálu vzniknout velké plastické deformace, tedy napětí rovné mezi kluzu  $R_e$  nebo  $R_{p0,2}$  (body E1, E2, E3). Silně vytažená část diagramu představuje oblast mezních cyklů napětí, při kterých únavový lom nevznikne [16].

Z diagramu je patrné, že hodnota meze únavy  $\sigma_{hc}$  roste se zvyšujícím se středním napětím. V praxi se pro značnou časovou náročnost nesestavuje Smithův diagram na základě celé řady Wöhlerových křivek při různých asymetriích cyklů, ale zjednodušeně. A to ze známé hodnoty meze únavy  $\sigma_c$  při symetrickém zatěžování a za předpokladu, že závislost horního  $\sigma_h$  a dolního napětí cyklu  $\sigma_n$  je na statickém předpětí  $\sigma_m$  lineární. Tuto skutečnost vyjadřuje Goodmanův vztah:

$$\sigma_a = \sigma_c (1 + \sigma_m / R_m), \quad (11)$$

kde:

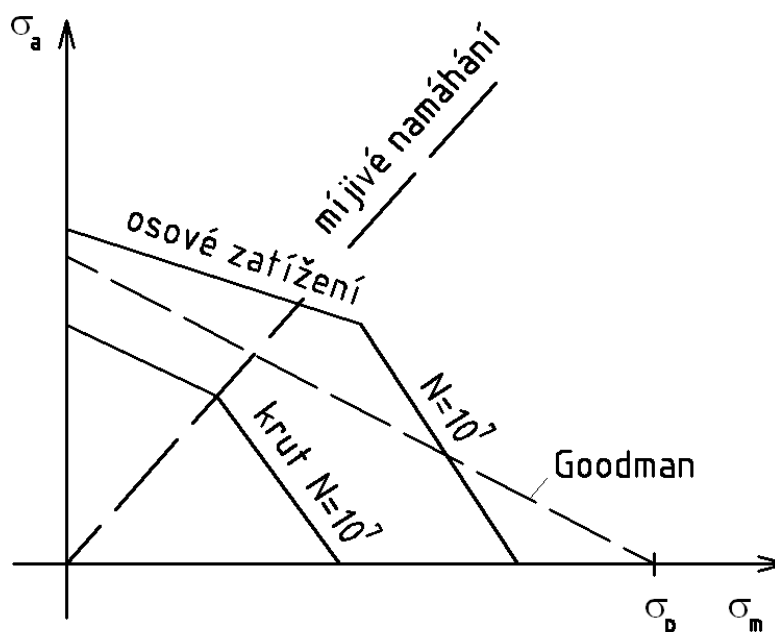
$\sigma_a$  – amplituda napětí,

$\sigma_m$  – střední napětí,

$\sigma_c$  – mez únavy při symetrickém zátěžném cyklu,

$R_m$  – mez pevnosti.

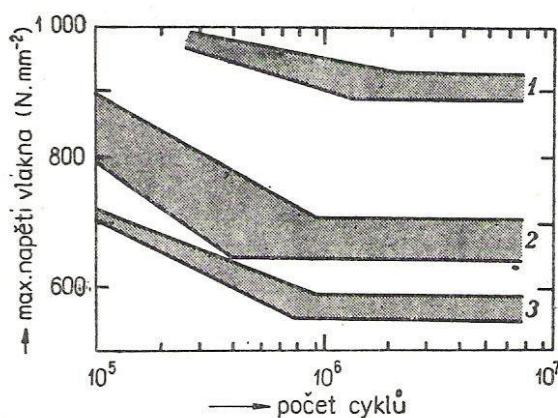
Velikost a tvar Smithova diagramu se mění podle druhu materiálu a také podle způsobu zatěžování [21].



Obr. 3.15 Haighův diagram [21].

Z Haighova diagramu jsou patrné závislosti křivek  $\sigma_a = f(\sigma_m)$  při konstantním počtu cyklů  $N$ . Výhodou tohoto diagramu je, přehledné znázornění křivek pro různé hodnoty počtu cyklů  $N$ . Obvykle se vynášejí pro  $N = 10^7, 10^6, 10^5, 10^4$ . Pro vyjádření životnosti součásti je možné použít několik kritérií, např. Goodmanovo, Langerovo, Soderbergovo, Gerberovo a ASME-elliptic. Pouze Soderbergovo kritérium zajišťuje, že nedojde ke vzniku plastických deformací [21].

**Vliv velikosti strojní součásti.** Mez únavy, zjištěná na zkušebních tělesech plně neodpovídá hodnotám meze únavy zjištěné na prvotních strojních součástech. Z tohoto důvodu se musí dlouhodobě zkoušet celé strojní součásti a svařované prvky zařízení. Mez únavy klikového hřídele leteckého motoru po různých povrchových úpravách je znázorněna na Obr. 3.16 [20].



Obr. 3.16 Vliv různého zpracování na mez únavy klikového hřídele [20].  
1 – nitridováno, 2 – kuličkováno, 3 – zušlechtěno.

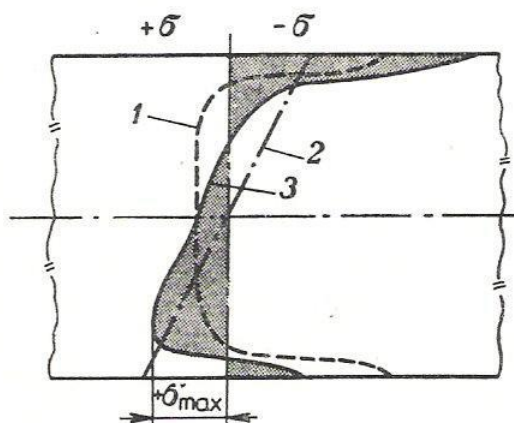
**Vliv vrubu.** Vrubem může být ostrý zářez, otvor, náhlá změna průřezu součástí (vruby konstrukční), stopy po obrábění, okujený povrch, některé povrchové úpravy (vruby technologické), výrazná heterogenita struktury, nebo vměstky (vruby strukturní). Mez únavy se vrubem výrazně snižuje. V okolí vrubu dochází při zatěžování k nerovnoměrnému rozdělení napětí a tím k vytvoření plastické zóny. Nejvyšší koncentrace napětí a deformace (elastické i plastické) vzniká na vrcholu vrubu, který se tak stává místem iniciace trhliny [7].

**Vliv teploty.** Teplota při zkoušení vzorků má významný vliv na únavové vlastnosti materiálu. Při snižování okolní teploty pod pokojovou teplotu mez únavy hladkých vzorků vzrůstá, zatímco u vzorků s vrubem není toto zvýšení příliš výrazné. V případě, že dojde ke snížení teploty pod tranzitní teplotu, mez únavy naopak výrazně klesá, neboť dominujícím faktorem se stane zkřehnutí materiálu. S rostoucí teplotou mez únavy klesá [7].

**Vliv okolního prostředí.** Agresivní prostředí, např. kapalné korozní prostředí ovlivňuje etapu nukleace a etapu šíření únavových trhlin. V inertních prostředích jako je vakuum či suchý argon je rychlost šíření nejnižší [7].

**Vliv stavu povrchu.** Stav povrchu ovlivňuje únavu výrazně při takovém způsobu namáhání, kde se maximálního tahového nebo smykového napětí dosahuje v povrchových vláknech součásti (tzn. ohyb, krut). Mez únavy zřetelně snižuje hrubě opracovaný povrch, oduhlíčení a vměstky zasahující k povrchu. Výrazně klesá mez únavy i za současného působení koroze (v tomto případě nemá únavová křivka vodorovnou finální část křivky životnosti a jde vlastně o časovanou mez únavy). Výrazně mohou ovlivnit mez únavy i vnitřní pnutí, soustředěná v povrchových vrstvách, která se superponují na napětí od vnějších sil, Obr. 3.17. Příznivá jsou tlaková pnutí, která sníží nebezpečná maximální tahová napětí v povrchu součásti od vnějších sil a přenesou maximální hodnoty tahového napětí pod povrch (zvětšení tlakových napětí nevede k lomu, a tedy nevede) [20].

U ocelí lze vyvodit žádoucí tlaková povrchová pnutí, která zvýší mez únav, např. nitridováním, cementováním nebo povrchovým kalením (využívá se např. u ozubených kol zároveň se zvýšením jejich odolnosti proti opotřebení). Rovněž tváření povrchu za studena, zejména kuličkováním a válečkováním, kterými se vyvodí v povrchových vrstvách součásti tlaková napětí, se mez únavy zvýší. Běžně se kuličkují např. pružiny válečkují se čepy vagónových náprav. Ve vrstvách vytvořených galvanickým pokovováním vznikají naopak nepříznivá tahová pnutí, která mez únavy snižují [20].



Obr. 3.17 Průběh napětí v kuličkované tyči namáhané ohybem [20].  
1- pnutí po kuličkování, 2 - napětí způsobené ohybem, 3 - výsledné napětí.

### 3.4.2. Oblast nízkocyklové únavy

Při nízkocyklové únavě (obvykle pod  $10^4$  cyklů) jde o opakované namáhání většinou nad hodnotou meze kluzu [17].

Rozlišujeme dva módy zatěžování: tvrdý a měkký. Při měkkém módu je řízenou veličinou síla, případně smluvní nebo skutečné napětí. Pokud probíhá zatěžovací proces tak, že řízenou veličinou je deformace, mluvíme o tvrdém módu zatěžování. Časový průběh řízené veličiny je v tomto případě pilovitý (u měkkého módu je sinusový) [7, 22, 23].

V nízkocyklové oblasti lze únavové chování materiálu popsat Wöhlerovou - Basquinovou a Mansonovou-Coffinovou funkcí [7]:

1. **Wöhlerova-Basquinova funkce**, popisuje závislost počtu cyklů do lomu  $N_f$  na amplitudě  $\sigma_a$  [7]:

$$\sigma_a = \sigma_f' (2N_f)^b, \quad (12)$$

kde:

$\sigma_a$  - amplituda napětí,

$\sigma_f'$  - součinitel únavové pevnosti,

$N_f$  - počet cyklů do lomu,

$b$  - je elastický exponent křivky životnosti.

2. **Mansonova-Coffinova funkce**, popisuje závislost počtu cyklů do lomu  $N_f$  na amplitudě plastické deformace  $\varepsilon_{ap}$  [7]:

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon_f' (2N_f)^c, \quad (13)$$

kde:

$\varepsilon_{ap}$  - amplituda plastické deformace,

$\varepsilon_f'$  - součinitel únavové tažnosti (je dán extrapolací  $\varepsilon_{ap}$  na prvním půlcyklu zatížení),

$N_f$  - počet cyklů do lomu,

$c$  - plastický exponent křivky životnosti.

Z experimentálních i praktických důvodů je třeba znát závislost celkové deformace  $\varepsilon_a$ , jež sestává z elastické a plastické složky, na počtu cyklů do lomu. Dle Mansona je křivka životnosti  $\varepsilon_a$ -  $N_f$  dána součtem křivek životnosti  $\varepsilon_{ae}$ -  $N_f$  a  $\varepsilon_{ap}$ -  $N_f$  [18]:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap}, \quad (14)$$

Vzhledem k platnosti Hookova zákona v makroskopicky izotropních materiálech, vztah:

$$\sigma_a = E \cdot \varepsilon_a, \quad (15)$$

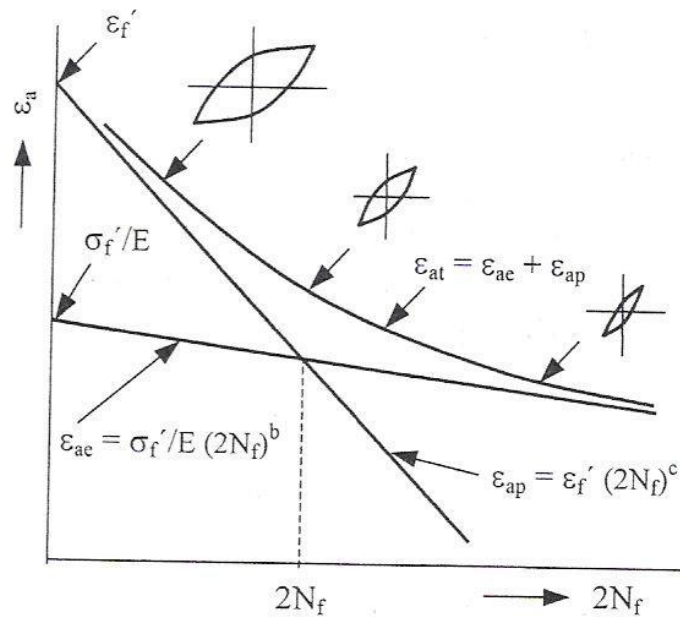
po dosazení obdržíme vztah:

$$\varepsilon_a = \sigma_f' / E \cdot (2N_f)^b + \varepsilon_f' \cdot (2N_f)^c, \quad (16)$$

kde:

$E$  - modul pružnosti v tahu.

Uvedené vztahy platí pro symetrické zatěžování hladkých vzorků homogenní napjatosti tah-tlak. Grafické znázornění je na Obr. 3.18.



Obr. 3.18 Schematický průběh křivek životnosti [20].

## 4. Cíle práce

Cílem této diplomové práce bylo stanovit statické a zejména vysokocyklové únavové charakteristiky vybrané pružinové oceli 54SiCrV6. Mezi hlavní cíle práce se řadí tyto následující:

1. Provedení statické zkoušky tahem a vyhodnocení základních napěťových charakteristik zkoušeného materiálu.
2. Zhotovení metalografických vzorků zkoumaného materiálu a vyhodnocení struktury.
3. Stanovení Wöhlerových křivek a určení meze únavy  $\sigma_c$ .
4. Sestrojení Haighova diagramu a určení hodnoty exponentu  $\alpha$ .
5. Porovnání výsledků zkoušek s literárními údaji.

## 5. Experimentální metodika

### 5.1. Použitý materiál a jeho struktura

Pro stanovení mechanických a únavových vlastností byla zvolena pružinová ocel 54SiCrV6. Chemické složení zkoušeného materiálu je uvedeno v Tabulce 5.1.

Zkoušený materiál byl kalen při teplotě 920°C, celková doba ohřevu byla 15 min. Pec byla vybavena ochrannou atmosférou proti oduhlíčení povrchu vzorku. Vzorek byl kalen do oleje (ihned po ohřevu), teplota oleje byla 50°C. Po kalení následovalo popouštění. Popouštěcí teplota byla 375°C, celková doba popouštění 75 min. Po popouštění následovalo ochlazení na vzduchu.

Struktura vybrané pružinové oceli byla pozorována pomocí světelné mikroskopie (Olympus GX71). Příprava metalografických vzorků se skládala ze zalisování vzorku za tepla do termoplastické pryskyřice, následovalo broušení brusnými papíry o drsnosti 600, 1200 a 4000. Dále leštění 3 μm, 1 μm a 0,25 μm diamantovou pastou. Následovalo leptání pro zviditelnění mikrostruktury. Snímky struktur se nacházejí v příloze této diplomové práce.

Tab. 5.1 Chemické složení zkoušeného materiálu.

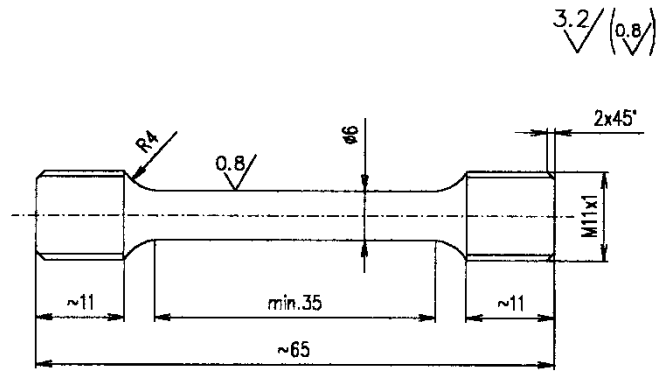
Prvek	C	Si	Mn	Cr	P	S	V
hm. %	0,51- 0,59	1,20- 1,60	0,50- 0,80	0,50- 0,80	0,030	0,030	0,05- 0,15

### 5.2. Mechanické vlastnosti

Základní napěťové a deformační charakteristiky pružinové oceli 54SiCrV6 byly stanoveny na základě provedené statické zkoušky tahem na univerzálním trhacím stroji TIRA TEST 2003 (rychlost pohybu příčnicku byla 1mm/min). Výsledky jsou uvedeny v Tabulce 5.2. Zkušební těleso je znázorněno na Obr. 5.1.

Principem zkoušky v tahu je jednoosé zatěžování zkušební tyče o kruhovém nebo obdélníkovém průřezu. Při zkoušce tahem je zkušební tyč zatěžována až do jejího porušení. Během zkoušky se sleduje vztah mezi působící silou a jí odpovídající deformací. Z naměřených hodnot se pak určí mechanické hodnoty. Za základní mechanické hodnoty se považují:

- $R_e$  [MPa] – mez kluzu,
- $R_{p0,2}$  [MPa] – smluvní mez kluzu,
- $R_m$  [MPa] - pevnost v tahu,
- $A$  [%] – tažnost,
- $Z$  [%] – kontrakce.

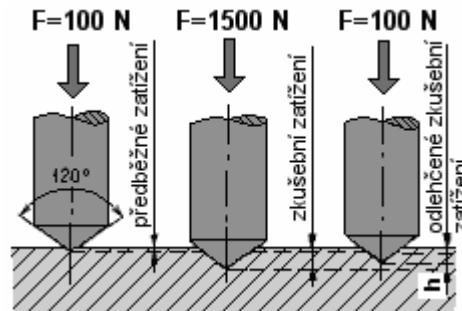


Obr. 5.1 Zkušební těleso pro statickou zkoušku tahem.

Tab. 5.2 Výsledky statické zkoušky tahem.

Průměrné hodnoty	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	A [%]	Z [%]
	1957	1799	11,1	41,2

Dále byly provedeny zkoušky tvrdosti dle normy ČSN EN ISO 10109. Princip zvolené metody měření tvrdosti dle Rockwella spočívá ve vlačování diamantového kužele s vrcholovým úhlem 120° a poloměrem kulové části 0,2 mm do zkoušeného materiálu, viz Obr. 5.2 [24].



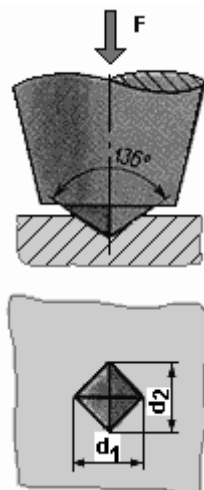
Obr. 5.2 Zkouška dle Rockwella [24].

Pro měření pružinové oceli 54SiCrV6 bylo použito zatížení 1471 N. Měření bylo provedeno opakovaně kvůli možné heterogenitě struktury a tím i vlastností. Naměřené hodnoty tvrdosti dle Rockwella jsou uvedené v Tabulce 5.3.

Tab. 5.3 Hodnoty tvrdosti pružinové oceli 54SiCrV6.

Měření	Vz.1	vz.2
1.	51 HRC	50 HRC
2.	52 HRC	50 HRC
3.	50 HRC	51 HRC

Dle normy ČSN EN ISO 6507, byla zvolena metoda měření tvrdosti dle Vickerse, přičemž se do materiálu vtláče diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem  $136^\circ$  (viz Obr. 5.3) a měří se střední délka u obou úhlopříček vtisku [25]. Doba zatěžování byla 10 sekund. Měření bylo provedeno několikrát kvůli možné heterogenitě struktury a tím i vlastností. Naměřené hodnoty tvrdosti dle Vickerse jsou uvedeny v Tabulce 5.4.



Obr. 5.3 Zkouška tvrdosti dle Vickerse [26]

Tab. 5.4 Hodnoty tvrdosti pružinové oceli 54SiCrV6.

Měření	vz.1	vz.2
1.	579 HV30	534 HV30
2.	565 HV30	540 HV30
3.	582 HV30	529 HV30

### 5.3. Únavové vlastnosti

#### 5.3.1. Měření ve vysokocyklové oblasti

Zkoušení pružinové oceli 54SiCrV6 ve vysokocyklové oblasti bylo uskutečněno na vysokofrekvenčním pulsátoru AMSLER 100 kN HFP 1478, při pokojové teplotě. Frekvence zátěžného cyklu je u rezonančních přístrojů funkcí tuhosti vzorku. V tomto případě byla udržována frekvence na hodnotě 142 Hz. Testování se uskutečnilo při míjivém zátěžném cyklu v tahu ( $P = 2$ ), a při zatěžování pulsujícím ohybem s parametrem asymetrie  $P = 2,2, 2,5$  a  $5$ . Zkušební těleso je znázorněno na Obr. 5.4.

Únavové vlastnosti byly vyhodnoceny na základě Wöhlerových únavových křivek životnosti a hodnot meze únavy, Obr. 5.5 až 5.9. Tyto křivky životnosti byly vyhodnoceny metodou nejmenších čtverců.

Na Obrázcích 5.9 a 5.10 jsou tyto body proloženy regresními funkcemi dle Stromejera:

$$\log(\sigma - \sigma_\infty) = \log a + b \cdot \log N, \quad (1)$$

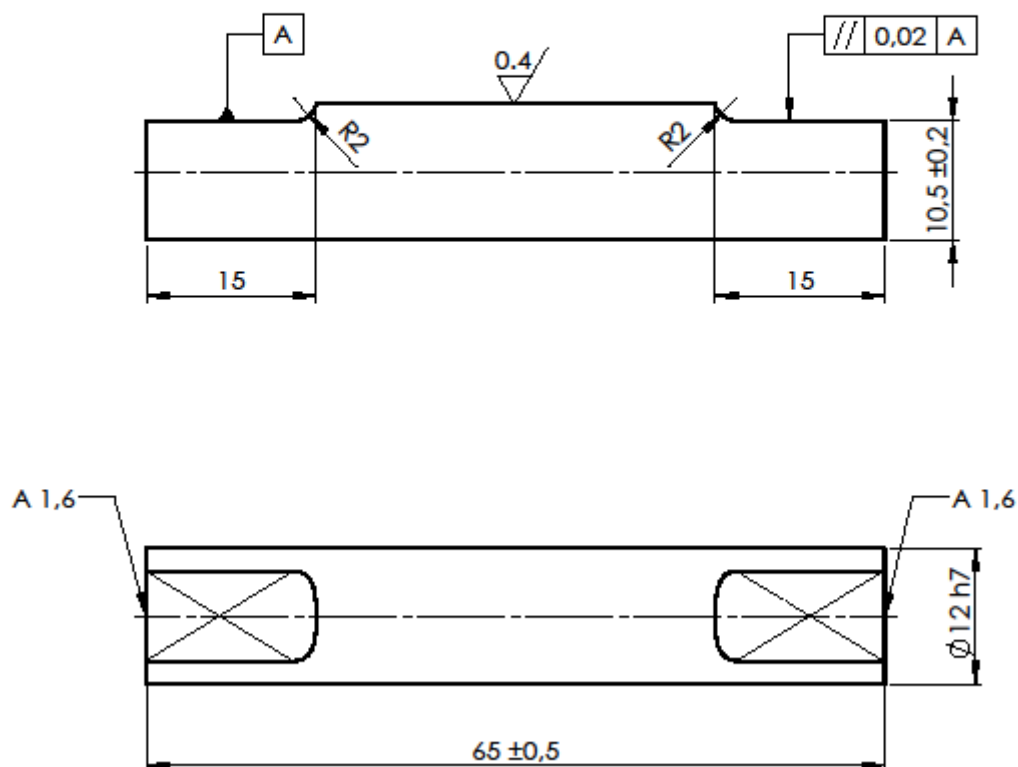
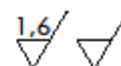
kde:

$\sigma$  – amplituda napětí  $\sigma_a$ , nebo horní napětí  $\sigma_h$  (dle typu zatěžování),

$\sigma_\infty$  - mez trvalé únavy, pro kterou platí  $\sigma(N \rightarrow \infty) = \sigma_\infty$ ,

a, b – konstanty regresní křivky,

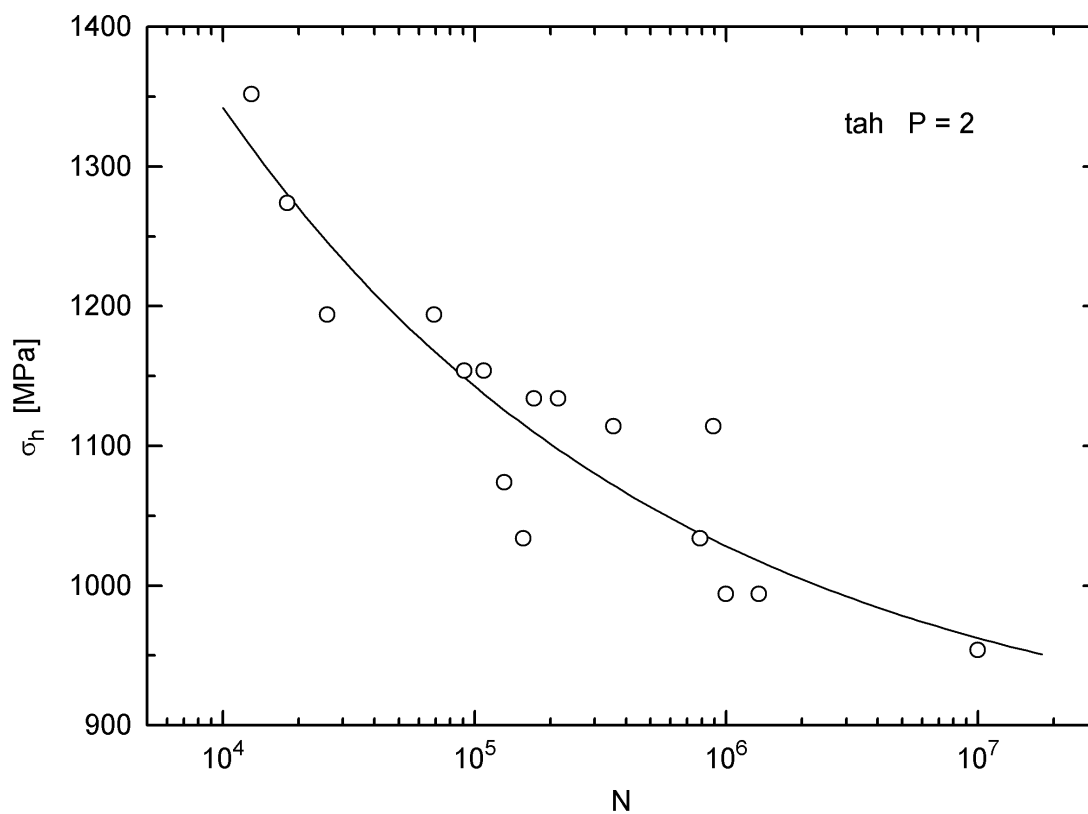
N – počet cyklů do lomu.



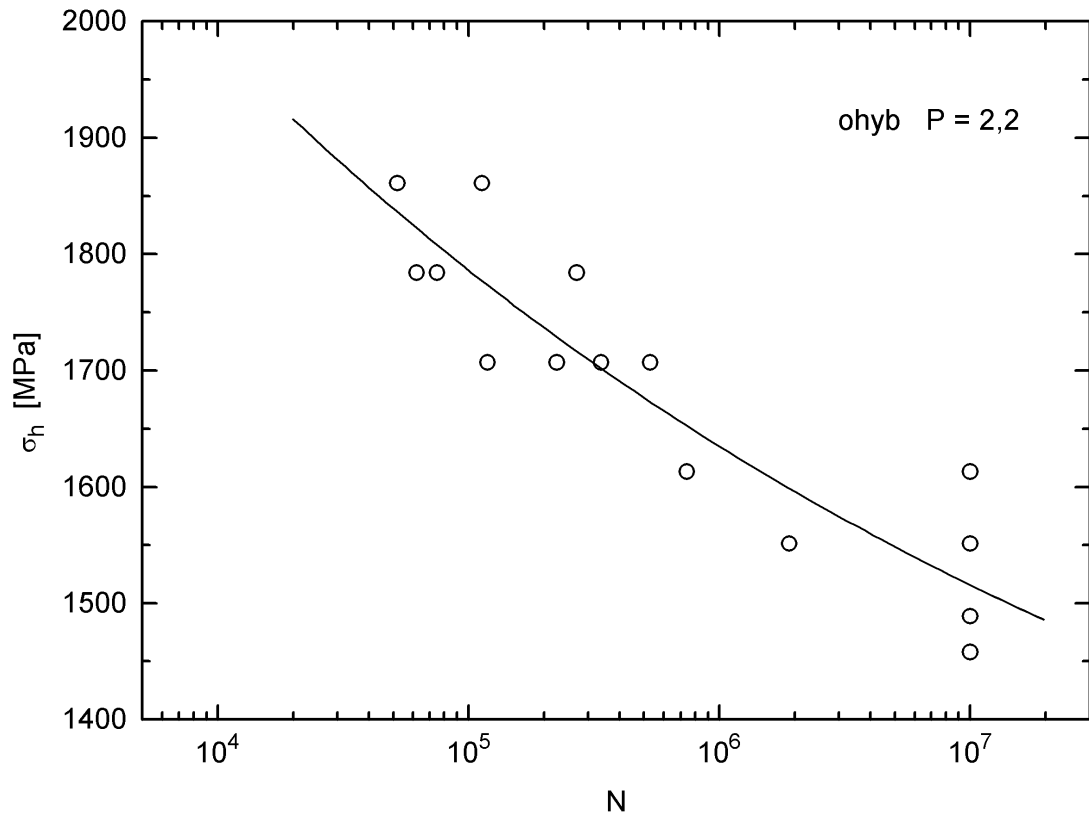
Obr. 5.4 Zkušební těleso pro vysokocyklovou únavu.

Tab. 5.5 Hodnoty meze únavy pro tah a ohyb.

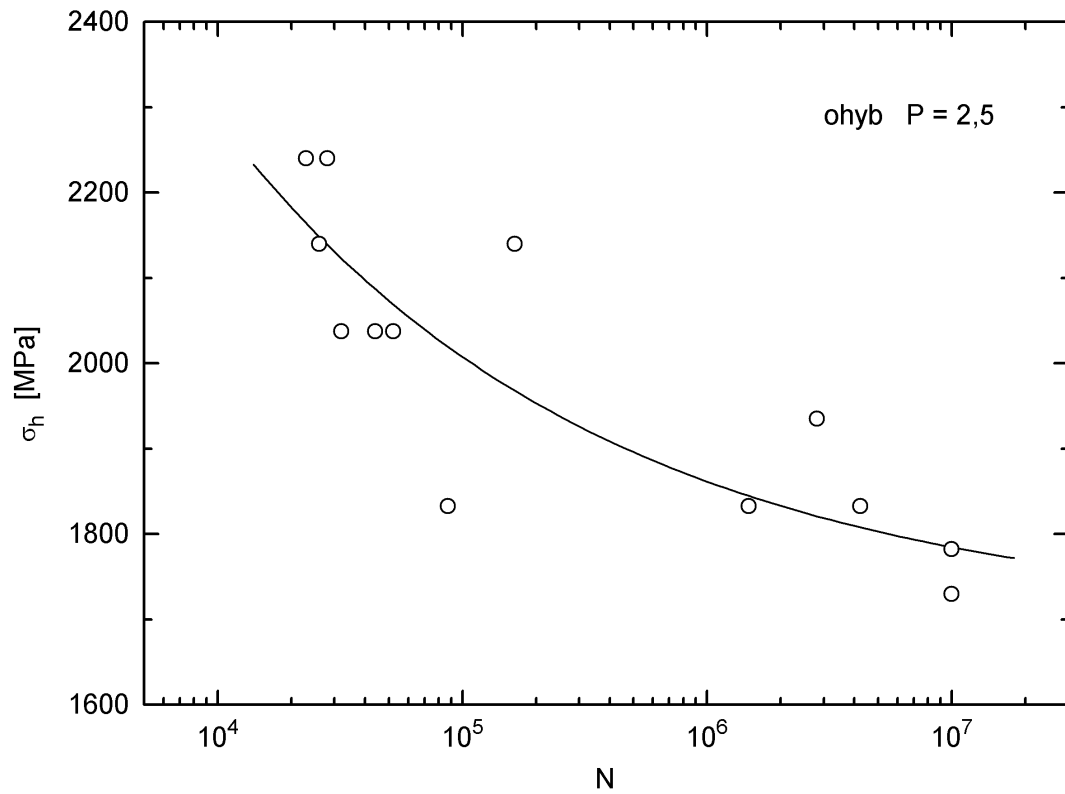
Mez únavy	Parametr zatěžování	Hodnota meze únavy [MPa]
$\sigma_{hC}$	P = 2	962
$\sigma_{ohC}$	P = 2,2	1515
$\sigma_{ohC}$	P = 2,5	1785
$\sigma_{ohC}$	P = 5	2446



Obr. 5.5 Wöhlerova křivka (tah, P = 2).

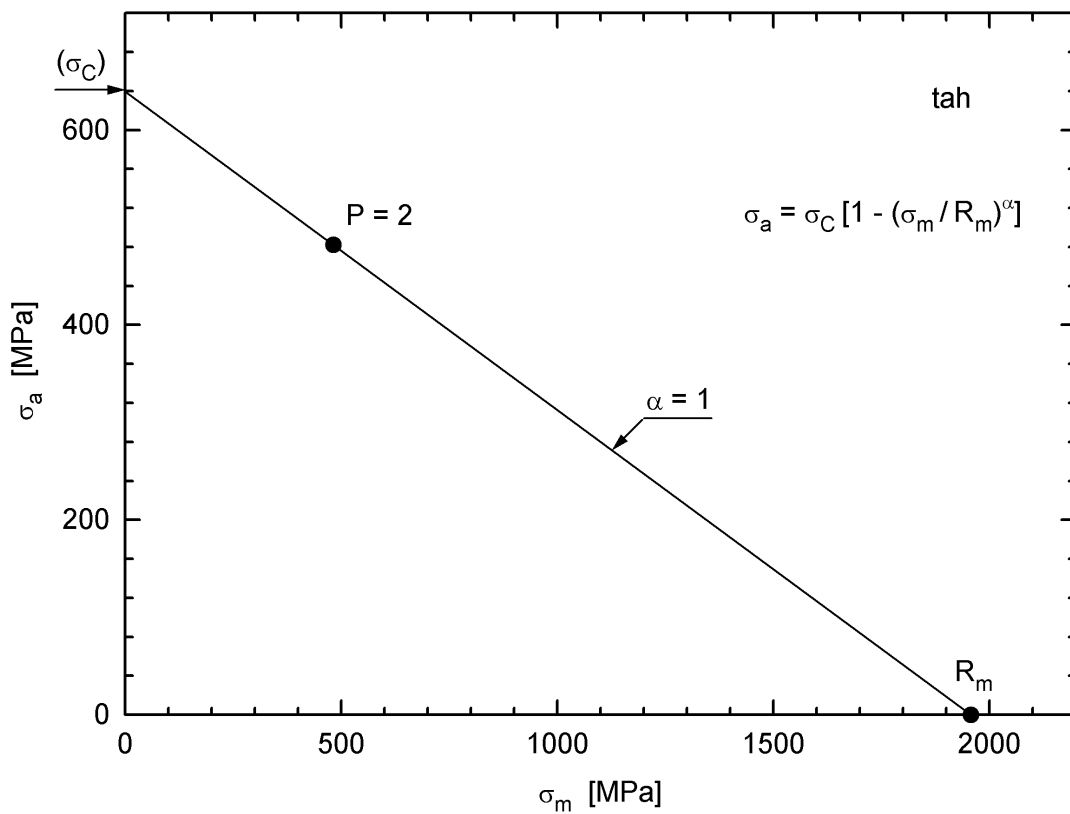


Obr. 5.6 Wöhlerova křivka (ohyb,  $P = 2,2$ ).

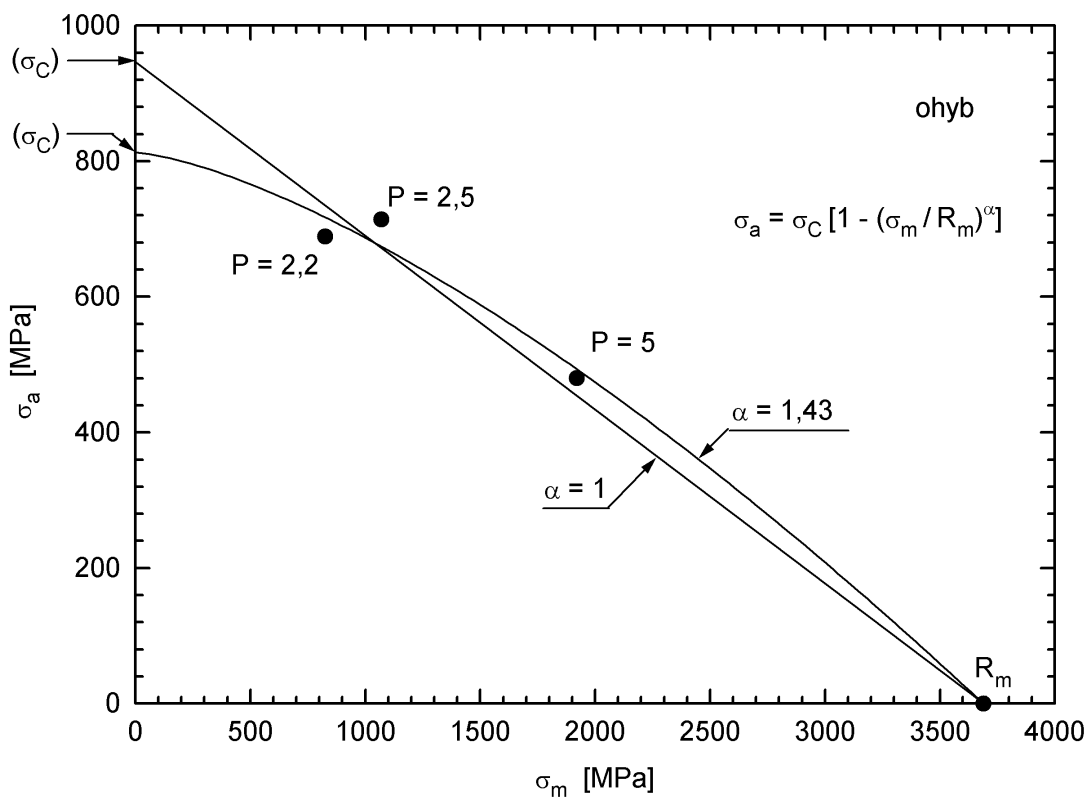


Obr. 5.7 Wöhlerova křivka (ohyb,  $P = 2,5$ ).





Obr. 5.10 Haighův diagram pro namáhání v tahu.



Obr. 5.11 Haighův diagram pro namáhání v ohybu.

## 6. Diskuze výsledků

Chemické složení vybrané pružinové oceli 54SiCrV6 odpovídá normě [27]. Mikrostruktura studovaného experimentálního materiálu odpovídá sorbitické struktuře

Pevnostní charakteristiky pružinové oceli dosahují v porovnání s běžnými kovovými materiály vysokých hodnot. Hodnoty meze pevnosti ( $R_m = 1957$  MPa) a meze kluzu ( $R_{p0,2} = 1799$  MPa) jsou v souladu s normou [27]. Kontrakce Z dosahuje hodnoty 41 % a tažnost A je rovna hodnotě 11 %. Tyto naměřené hodnoty jsou vyšší než minimální udávané normou [27]. Naměřené průměrné hodnoty tvrdosti dle Rockwella 51 HRC a dle Vickerse 555 HV30 jsou v souladu s normou [27].

Zkoušení únavových vlastností bylo uskutečněno ve vysokocyklové oblasti. Hodnota meze únavy zkoumaného materiálu 54SiCrV6 při míjivém zátěžném cyklu v tahu ( $P = 2$ ) je rovna hodnotě  $\sigma_{hC} = 962$  MPa. Naměřené hodnoty meze únavy při pulzujícím cyklu v ohybu s parametry asymetrie  $P = 2,2, 2,5$  a  $5$  jsou následující:  $^{2,2}\sigma_{ohC} = 1515$  MPa,  $^{2,5}\sigma_{ohC} = 1785$  MPa,  $^5\sigma_{ohC} = 2446$  MPa. I přesto, že všechny naměřené hodnoty meze únavy (a tedy v míjivém i pulzujícím cyklu) vykazují relativně vysoké hodnoty, jsou stále v souladu s údaji, které uvádí Linhart [28] pro obdobnou pružinovou ocel ČSN 14 260.

Na základě výše uvedených výsledků byly zkonstruovány Haighovy diagramy. Při zatěžování tahem byla k dispozici pouze jedna hodnota meze únavy. K aproximaci lze tedy použít lineární Goodmanův vztah, viz rovnice (11) a Obr. 5.10. Z takto zkonstruovaného Haighova diagramu je možno stanovit hodnotu meze únavy  $\sigma_{hC} = 962$  MPa.

Při zatěžování ohybem byly k dispozici celkem tři hodnoty meze únavy, a proto byl pro konstrukci Haighova diagramu použit lineární Goodmanův vztah (11) stejně jako obecný parabolický vztah:

$$\sigma_a = \sigma_c \cdot [ 1 - (\sigma_m / R_m)^\alpha ], \quad (1)$$

kde:

$\sigma_a$  – amplituda napětí,

$\sigma_m$  – střední napětí,

$\sigma_c$  – mez únavy při symetrickém zátěžném cyklu,

$R_m$  – mez pevnosti

$\alpha$  – exponent.

Oba vztahy byly určeny pomocí regresní analýzy, viz Haighův diagram na Obr. 5.11, kde byla určena hodnota exponentu  $\alpha = 1$  pro lineární závislost a  $\alpha = 1,43$  pro parabolickou závislost. Z takto stanoveného tvaru Haighova diagramu je možno odhadnout, že hodnota meze únavy při symetrickém zátěžném cyklu v ohybu se pohybuje v rozmezí 813 – 947 MPa. Tyto hodnoty jsou v dobrém souladu s údaji, které udává Linhart pro ocel 14 260.

Na základě Haighova diagramu byla dále stanovena hodnota meze únavy při zatěžování míjivým ohybem  ${}^2\sigma_{oC} = 1510$  MPa.

Poměr meze únavy při míjivém zátěžném cyklu a pulsujícím zátěžném cyklu je  ${}^2\sigma_{oC} / \sigma_{hC} = 1510 / 962 = 1,57$ . Tato hodnota je mírně vyšší než teoretická hodnota 1,5.

## 7. Závěry

Na základě analýzy strukturních, mechanických a únavových vlastností vybrané pružinové oceli 54SiCrV6 mohou být řečeny následující závěry:

1. Při srovnání chemického složení s normou, lze dojít k závěru, že získaná data jsou považována za platná.
2. Pružinová ocel 54SiCrV6 má strukturu tvořenou sorbitem.
3. Studovaná pružinová ocel 54SiCrV6 vykazuje vysoké pevnostní charakteristiky. Hodnota meze pevnosti ( $R_m = 1957$  MPa) a meze kluzu ( $R_{p0,2} = 1799$  MPa) dosahuje vysokých hodnot. Tyto hodnoty jsou v dobrém souladu s údaji, které udává norma [27].
4. Deformační charakteristiky studovaného materiálu, jako je hodnota kontrakce ( $Z = 41\%$ ) a hodnota tažnosti ( $A = 11\%$ ) vykazují vyšší hodnoty než minimální udávané normou [27].
5. Naměřené průměrné hodnoty tvrdosti dle Rockwella 51 HRC a dle Vickerse 555 HV30 jsou v souladu s normou [27].
6. Hodnota meze únavy zkoumaného materiálu při míjivém zátěžném cyklu v tahu ( $P = 2$ ) je rovna hodnotě  $\sigma_{hC} = 962$  MPa. Naměřené hodnoty meze únavy při pulsujícím cyklu v ohybu s parametry asymetrie  $P = 2,2, 2,5$  a  $5$  jsou následující:  ${}^{2,2}\sigma_{ohC} = 1515$  MPa,  ${}^{2,5}\sigma_{ohC} = 1785$  MPa,  ${}^5\sigma_{ohC} = 2446$  MPa. Tyto hodnoty jsou stále v souladu s údaji, které uvádí Linhart [28] pro obdobnou pružinovou ocel ČSN 14 260.
7. Na základě experimentálních údajů byly zkonstruovány Haighovy diagramy. Při zatěžování tahem je možno z Haighova diagramu stanovit hodnotu meze únavy  $\sigma_{hC} = 962$  MPa. Při zatěžování ohybem byla určena hodnota exponentu  $\alpha = 1$  pro lineární závislost a  $\alpha = 1,43$  pro parabolitickou závislost.
8. Ze stanoveného tvaru Haighova diagramu je možno odhadnout, hodnotu meze únavy při symetrickém zátěžném cyklu v ohybu v rozmezí 813 – 947 MPa. Tyto hodnoty jsou v dobrém souladu s údaji, které udává Linhart pro obdobnou pružinovou ocel ČSN 14 260.
9. Na základě Haighova diagramu byla stanovena hodnota meze únavy při zatěžování míjivým ohybem  ${}^2\sigma_{oC} = 1510$  MPa.

## 8. Seznam použité literatury

- [1] Hanácké železářny a pérovny, a.s. *hzap.cz* [online], cit. 20. 3. 2013, dostupné z <http://hzap.cz/pages/cze/vyrabime/sroubovenbspruziny.php>
- [2] TUMLIKOVO, Nízkolegované konstrukční oceli třídy 13, jejich složení a tepelné zpracování [online], cit. 20. 5. 2013, dostupné z <http://www.tumlikovo.cz/nizkolegovane-konstrukcni-oceli-tridy-13-jejich-slozeni-a-tepelne-zpracovani/>
- [3] PTÁČEK, L. et. al. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 2003. 520 s. ISBN 80-7204-283-1.
- [4] SERCEL, D. *Materiály pro výrobu pružin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 30 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec.
- [5] YAMADA Y. *Materials for springs*. 1. vyd. Springer, 2007, 377 s. ISBN 3540738118
- [6] FREMUNT P., PODRABSKY T. *Konstrukční oceli*. 1. vyd. Brno, CERM, 1998, 267 s. ISBN 80-85867-95-8.
- [7] VĚCHET, S.; KOHOUT, J.; BOKŮVKA, O. *Únavové vlastnosti tvárné litiny*. Žilina: EDIS, 2002. 157 s. ISBN 80-7100-973-3.
- [8] Vaňová, P., *Základy tepelného zpracování*. Studijní opora na VŠB-TU v Ostravě. Ostrava, 2011. 128s.
- [9] HAMERNÍK, J., *Základy tepelného zpracování kovů*, [online], cit. 13. 3. 2013. Dostupné z [http://jhamernik.sweb.cz/tepelne\\_zpracovani.htm](http://jhamernik.sweb.cz/tepelne_zpracovani.htm)
- [10] PLUHAŘ, J., KORITTA J., *Strojírenské materiály*, SNTL, Praha, 1981.
- [11] VOJTĚCH, D., *Kovové konstrukční materiály II*, VŠCHT, Praha, 1997.
- [12] VLACH, B.: Únava materiálu [online], cit. 30. 3. 2013, dostupné z <http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0/10%20-%20Unava.ppt>
- [13] KLESNIL, M., LUKÁŠ, P.: *Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání*, Praha: ACADEMIA, nakladatelství československé akademie věd, 1975, 224 s.
- [14] VELES, P. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. Bratislava: Alfa, 1985.
- [15] SEDLÁČEK, V., *Neželezné kovy a slitiny*, Praha, SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1979.

- [16] LAUSCHMANN, H., *Mezní stavy I: Únava materiálu*. Praha: Nakladatelství ČVUT. 2007. ISBN 978-80-01-03671-6
- [17] KLESNIL, M., LUKÁŠ, P., POLÁK, J. a kol.: *Cyklická deformácia a únava kovov*, Bratislava: VEDA, 1987.
- [18] PANTĚLEJEV, L., Únava kovových materiálů [online], cit. 4. 2. 2013, dostupné z <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/ukm/Unava%20kovovych%20materialu.doc>.
- [19] JULIŠ, M., *Nízkocyklová únava vybraných niklových superslitin za vysokých teplot*. Disertační práce na ÚMVI, FSI VUT v Brně. Brno, 2008. 107 s.
- [20] Únavový lom, konečná etapa podkritického růstu únavové trhliny [online], cit. 15. 4. 2013, dostupné z [http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id\\_desc=100894&s\\_lang=2](http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id_desc=100894&s_lang=2)
- [21] PIŠTĚK, A., et al. *Pevnost a životnost letadel*. 1. vyd. Brno: Rektorát Vysokého učení technického, 1988. 266 s.
- [22] PUŠKÁR, A.; GOLOVIN, S. *Kumulácia poškodenia v procese únavy*. 1. Vydání. Bratislava: VEDA, 1981. 264 s.
- [23] STEPHEN, R.I. *Fatigue Design Handbook*. Iowa: SAE International, 1977. 496s.
- [24] ConVERTER: Zkouška tvrdosti dle Rockwella [online], cit. 19.5.2013. Dostupné z <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-rockwell.htm>.
- [25] ČSN EN ISO 6507-1. Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda. Praha: Český normalizační institut, 2006. 24 s. 42 0374
- [26] ConVERTER: Zkouška tvrdosti dle Vickersse [online], cit. 19. 5. 2013. Dostupné z <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-vickers.htm>.
- [27] SAARSTAHL, Materials specifications heet [online], cit. 17. 5. 2013. Dostupné z [http://www.saarstahl.com/fileadmin/saarstahl\\_extranet/images/04\\_produkte/walzstahlsorten/english/8152\\_54SiCrV6.pdf](http://www.saarstahl.com/fileadmin/saarstahl_extranet/images/04_produkte/walzstahlsorten/english/8152_54SiCrV6.pdf)
- [28] LINHART, V. ve sborníku Materiálový sborník SVÚM Praha, 1975.49s.
- [29] WEIBULL, W. *Fatigue testing and analyzing of results*, Oxford etc. Pergamon Press

- [30] ASKELAND, D.; PHULÉ, P. *The Science and Engineering of Materials*. 5th edition. Toronto: Thomson, 2006. 863 s. ISBN 0-534-55396-6.
- [31] LUKÁŠ, P., KLESNIL, M., ve sborníku Corrosion Fatigue, Ed. O. F. Devereux aj., NACE 1972, 118 s.
- [32] POLÁK, J., *Cyklická plasticita a nízkocyklová únavová odolnost kovových materiálů*. 1. vyd. Praha: Academia, 1986. 135 s
- [33] POKLUDA, J., KROUPA, F., OBDRŽÁLEK, L. *Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek*. Brno: PC-Dir spol. s r.o., 1994. 385 s. ISBN 80 - 214 - 0575 - 9.
- [34] PLUHAŘ, J., PUŠKÁR, A., KOUTSKÝ, J., et al. *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu*. Praha: SNTL, 1987.
- [35] LAIRD, C., KRAUSE, A. R., *Int. J. Frac. Mech.* 4 (1968) 219.

## 9. Seznam použitých značek a symbolů

### Zkratky

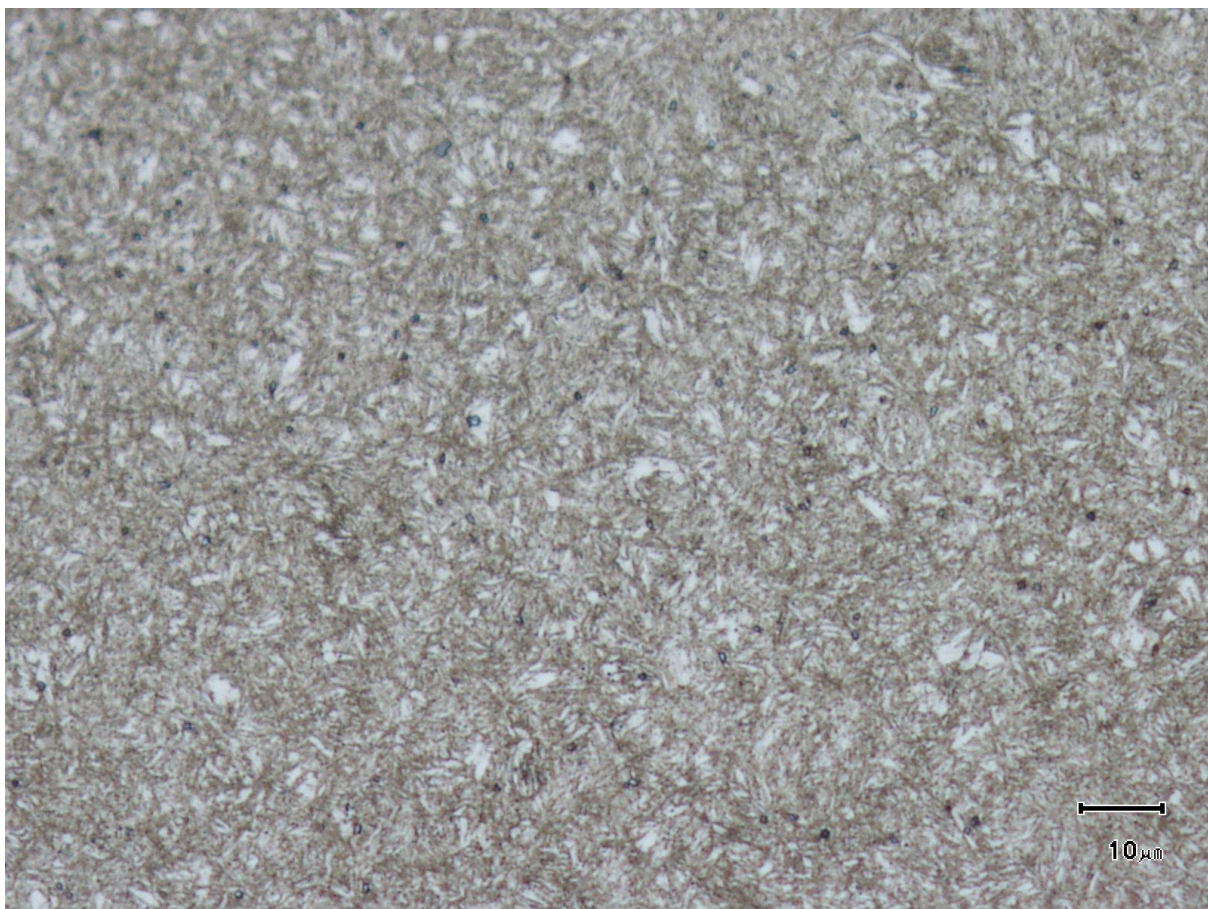
BOF	basic oxygen furnaces
EAF	electric arc furnaces

### Symboly

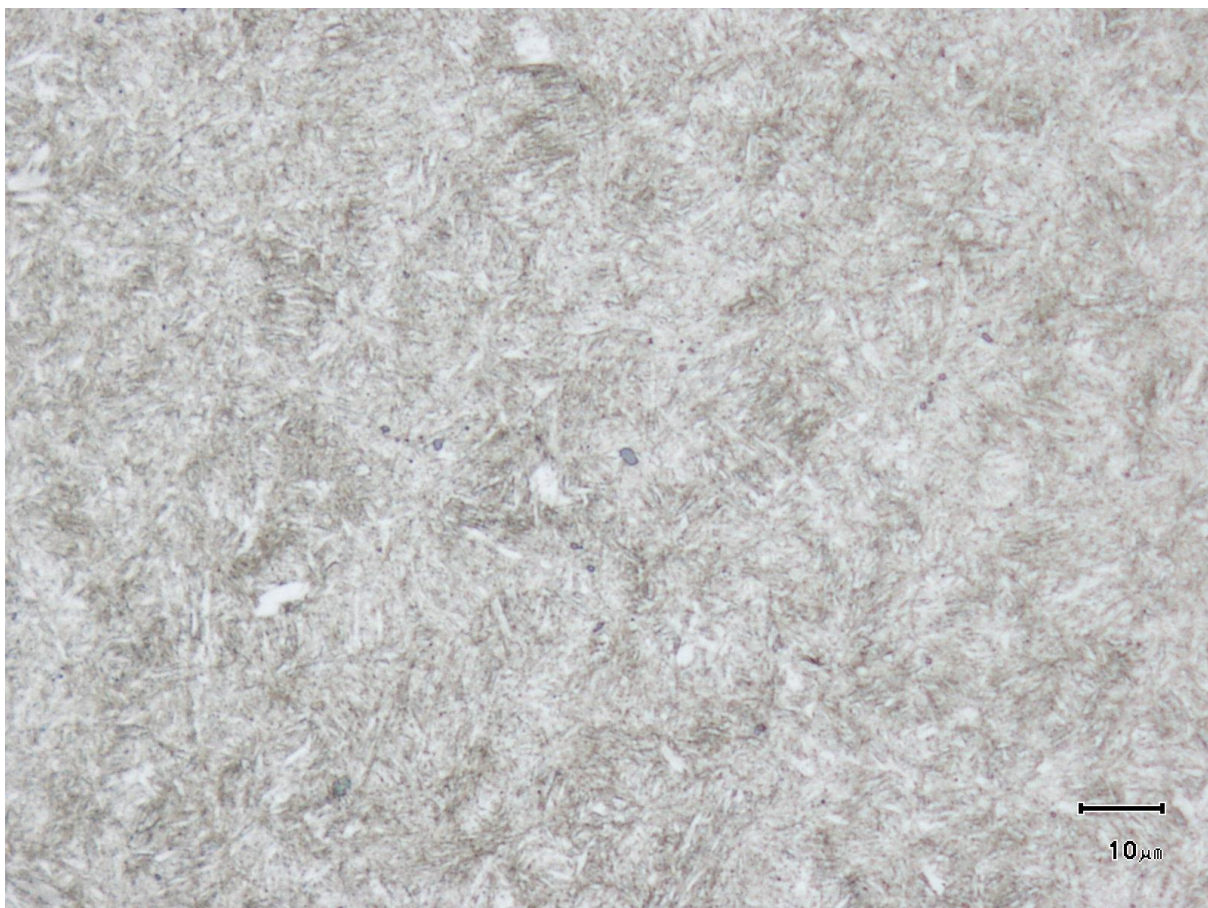
$\sigma_a$	amplituda napětí [MPa]
$\sigma_m$	střední napětí [MPa]
$\sigma_h, \sigma_{max}$	horní napětí [MPa]
$\sigma_n, \sigma_{min}$	dolní napětí [MPa]
$\Delta\sigma$	rozkmit napětí [MPa]
$\sigma_c$	mez únavy [MPa]
$\sigma_f'$	součinitel únavové pevnosti [MPa]
$\sigma_{hc}$	horní napětí pro mez únavy (Smithův diagram) [MPa]
$\sigma_{ac}$	amplituda napětí pro mez únavy (Smithův diagram) [MPa]
$\sigma_{oc}$	mez únavy v ohybu [MPa]
$\sigma_\infty$	mez trvalé únavy, pro kterou platí $\sigma(N \rightarrow \infty) = \sigma_\infty$ [MPa]
$\epsilon_{ap}$	amplituda plastické deformace [-]
$\epsilon_{ae}$	amplituda elastické deformace [-]
$\epsilon_f'$	součinitel únavové tažnosti [-]
$\epsilon_a$	amplituda celkové deformace [-]
$N_f, N_c$	počet cyklů do lomu [-]
$b$	elastický exponent křivky životnosti [-]
$c$	plastický exponent křivky tažnosti [-]
$f$	frekvence [Hz]
$K$	parametr cyklické deformační křivky [-]
$n$	exponent cyklické deformační křivky [-]
$E$	Youngův modul pružnosti [MPa]
$L_0$	měřená délka vzorku [mm]
$D$	průměr [mm]
$A$	tažnost [%]
$Z$	zúžení [%]
$R, P$	parametry asymetrie cyklu [-]
$R_m$	napětí na mezi pevnosti v tahu [MPa]
$R_e$	napětí na mezi kluzu [MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu [MPa]

## 10. Seznam příloh

Struktura pružinové oceli 54SiCrV6. Pozorování pomocí světelné mikroskopie.



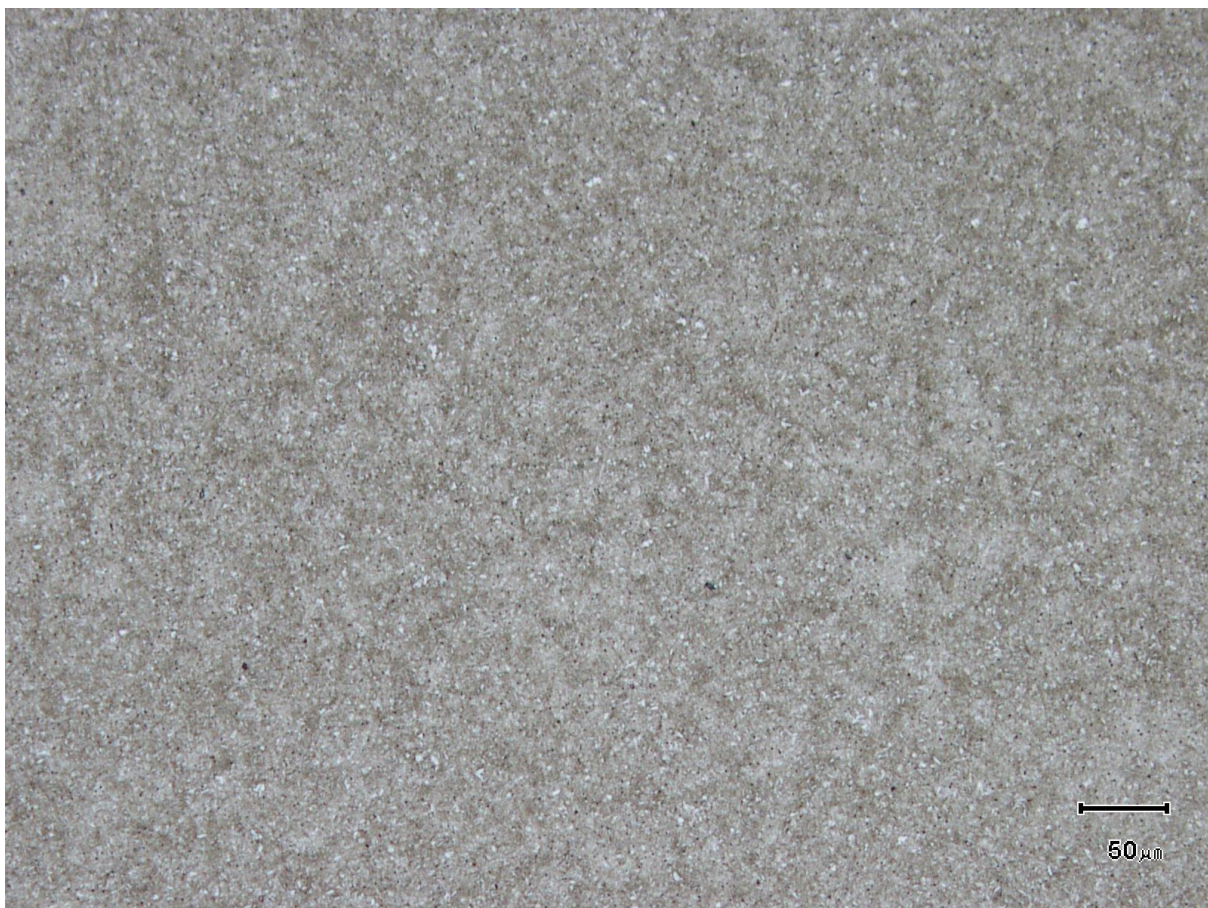
*Obr. 10.1 Struktura pružinové oceli 54SiCrV6.*



*Obr. 10.2 Struktura pružinové oceli 54SiCrV6.*



*Obr. 10.3 Struktura pružinové oceli 54SiCrV6.*



*Obr. 10.4 Struktura pružinové oceli 54SiCrV6.*