



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

ÚNAVOVÉ VLASTNOSTI VYBRANÉ PRUŽINOVÉ OCELI

FATIGUE PROPERTIES OF SELECED SPRING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUCIE ZEJDOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

PROF. ING. STANISLAV VĚCHET, CSC.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství
Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Lucie Zejdová

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

obor: **Materiálové inženýrství (3911R011)**

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

Únavové vlastnosti vybrané pružinové oceli

v anglickém jazyce:

Fatigue properties of selected spring steel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na základě provedení a vyhodnocení únavových zkoušek posoudit chování zvoleného materiálu ve vysokocyklové oblasti. Dosažené výsledky porovnat s literárními údaji.

Cíle bakalářské 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 zkoušení kovov, SNTL Praha, 1985

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

akademika) Lucie Zajčová

poskytá se v rámci bakalářského studijního programu

obor: Materiálové inženýrství (3911R011)

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a o studijním a
výzkumném režimu VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Únavové vlastnosti výztužené praxinové oceli

v angličtině: Fatigue

properties of selected spring steel

Ústav materiálového inženýrství

Na základě provedení a vyhodnocení únavových zkoušek posoudit chování zvolené
materiálu ve vysokocyklové oblasti. Dosáhnout výsledky porovnání s literárními údaji.

Cíl bakalářské práce:

1. Literární řešení dané problematiky

2. Analýza literárních údajů

3. Provedení mechanických zkoušek

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 3.12.2010

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na studium struktury a vlastností pružinové oceli 54SiCr6 po aplikaci únavového zatěžování. Jejím cílem je dokumentovat strukturu a určit statické a zejména únavové charakteristiky materiálu.

ABSTRAKT

This bachelor thesis is concentrate on studium structure and properties of spring steel 54SiCr6 after using fatigue straining. Its purpose is to document the structure and determine the static and fatigue characteristics of the particular material.

Klíčová slova

Pružinová ocel 54SiCr6, metalografie, únava materiálu

Key words

Spring steel 54SiCr6, metallography, material fatigue

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZEJDOVÁ, Lucie. *Únavové vlastnosti vybrané pružinové oceli: Bakalářská práce.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 43 s., Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Stanislav Věchet, CSc.

PROHLÁŠENÍ

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

Podpis bakaláře

.....
Dne

.....
Lucie Zejdová

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat svému školiteli prof. Ing. Stanislavu Věchetovi, CSc. za rady a připomínky k mé práci. Dále Ing. Karlu Němcovi, Ph.D. za konzultace a Ing. Drahomíře Janové za odborné rady při řešení experimentů.

OBSAH

1. ÚVOD	8
2. LITERÁRNÍ PŘEHLED PROBLEMATIKY	9
2.1. Pružinové oceli a jejich rozdělení dle legujících prvků	9
2.2. Tepelné zpracování a struktura	9
2.3. Mechanické vlastnosti	13
2.4. Označování podle ČSN a EN	13
3. ÚNAVOVÉ VLASTNOSTI	17
3.1. Definice únavy	17
3.2. Tři stádia únavového procesu	18
3.3. Křivky životnosti	25
3.3.1. Oblast vysokocyklové únavy	25
3.3.1.1. Wöhlerova křivka a mez únavy	25
3.3.1.2. Faktory ovlivňující únavové charakteristiky	26
3.3.2. Oblast nízkocyklové únavy	29
4. CÍL PRÁCE	31
5. EXPERIMENTÁLNÍ METODIKA, ROZBOR A DISKUZE VÝSLEDKŮ	32
5.1. Experimentální materiál	32
5.2. Metalografie	32
5.3. Mechanické vlastnosti	32
5.4. Měření tvrdosti podle Rockwella	32
5.5. Měření tvrdosti podle Vickerse	33
5.6. Únavové vlastnosti	33
6. ZÁVĚR	36
7. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	37
8. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	38
9. SEZNAM PŘÍLOH	39

1. ÚVOD

Mezi důležité konstrukční materiály v současné době patří pružinové oceli. Výroba pružinových ocelí má v České republice dlouhodobou tradici. Mezi nejznámější výrobce pružinové oceli v České republice patří 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. viz tab. 1.

Posledních deset let se většina výroby pružinových ocelí realizovala odléváním na blokovém kontilitě, odléváním do ingotů na kyslíkové konvertorové ocelárně (BOF - basic oxygen furnaces) a na elektroocelárně (EAF - electric arc furnaces) s následným válcováním do sochorů na blokovnách. V dalším výrobním toku jsou sochory převálcovány na moderních válcovacích tratích na drát a tyče. Mezníkem ve výrobě pružinové oceli se stal rok 2000, kdy se postupně začala zavádět a navyšovat výroba pružinových ocelí přes sochorové kontilitě.

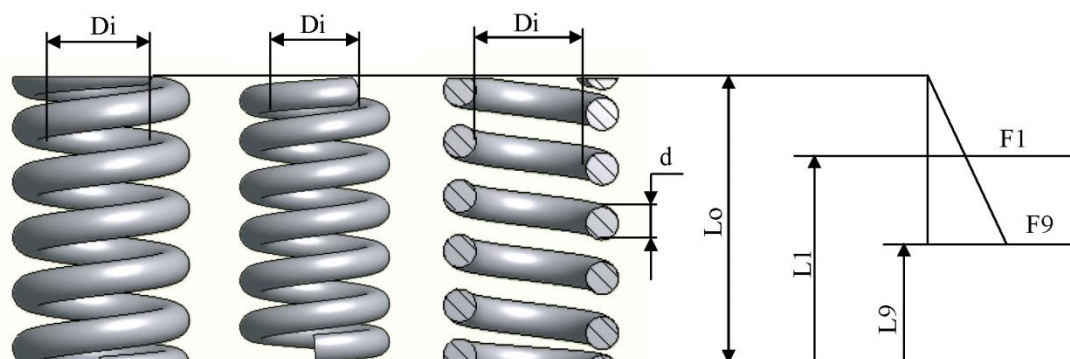
V současné době touto cestou vyráběná pružinová ocel představuje cca 50 % z celkové výroby pružinové oceli na ocelárnách [4].

Tab. 1 Použití pružinových ocelí v jednotlivých segmentech [4]

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

Pružinová ocel musí vykazovat dobré statické a dynamické vlastnosti a musí mít vysokou únavovou životnost [5]. Pružiny (obr. 1), jsou dynamicky namáhané strojní součásti, a proto jsou na materiály pro výrobu pružin kladeny zvláštní požadavky [1]:

- nízký obsah nekovových vměstků,
- vysoká mez pružnosti,
- odolnost proti únavě.





Rozsah rozměrů vybraných šroubových pružin	
d [mm]	8–50
Di [mm]	20–290
L (rozvinutá délka) [mm]	300–7000
Lo [mm]	40–800

Obr. 1 Rozsahy vyráběných šroubových pružin [2]

2.1. Pružinové oceli a jejich rozdělení dle legujících prvků

Podle hlavních legujících prvků se pružinové oceli dělí do následujících skupin [1]:

1. Legované Cr - chrom silně zvyšuje prokalitelnost a tvrdost.
2. Legované Si - křemík silně zvyšuje elasticitu, odolnost proti popouštění, zvyšuje sklon k oduhličení oceli, snižuje plastické vlastnosti feritu.
3. Legované Mn - mangan příznivě ovlivňuje pevnostní vlastnosti, snižuje tažnost a zvyšuje prokalitelnost, rozpouští se ve feritu a působí také na zjemnění lamel cementitu a perlitu.
4. Legované Cr + V - vanad zjemňuje zrna.
5. Legované Si Cr,
6. Legované Si Cr + V.

Další využívanou legurou je molybden, který zvyšuje prokalitelnost.

2.2. Tepelné zpracování a struktura

Správným využitím vlastností kovů a slitin lze např. snížit hmotnost stroje nebo strojního zařízení, anebo použít materiály levnější. Obojí vede ke zvýšení ekonomie výroby. Tepelným zpracováním rozumíme všechny postupy, při nichž je předmět nebo materiál v tuhém stavu záměrně ohříván a ochlazován určitým způsobem tak, aby získal požadované vlastnosti. Tepelným zpracováním ovlivňujeme mechanické vlastnosti (pevnost, tvrdost, tažnost, vrubovou houževnatost, odolnost proti opotřebení...).

Způsoby tepelného zpracování:

1. *Normalizační žihání* se provádí za účelem zjemnění austenitického zrna a ke zrovnoměrnění struktury, slouží též k odstranění často se vyskytující Widmannstättenovy struktury. Normalizační žihání se provádí při teplotě 850-890°C s postupným ochlazením na vzduchu sekundární struktury.

2. *Žihání na měkko* snižuje tvrdost a zlepšuje obrobiteľnosť oceli díky sferoidizaci perlitického, příp. sekundárního cementitu. Žihání na měkko se provádí při teplotě 710-750°C s postupným ochlazením v peci.

3. *Kalení* se skládá z ohřevu na kalící teplotu, krátké výdrže na této teplotě a ochlazování rychlostí vyšší než je rychlost kritická. Kalením získáváme částečně nebo zcela nerovnovážné struktury, obvykle je cílem dosažení martenzitické struktury. Pásmo kalících teplot se pohybuje v rozmezí cca 50°C nad teplotami A3 a A1. Pružinové oceli se kalí při teplotě 840-880°C. Nejčastěji používanější ochlazovací prostředí je voda, olej, vzduch, solná lázeň.

4. *Popouštění* se skládá z ohřevu na teplotu nižší než je A_1 , následné výdrže na této teplotě a ochlazení vhodnou rychlostí. Účelem popouštění je snížení vnitřního pnutí po kalení. Pružinové oceli se popouští při teplotě 380-580°C s postupným ochlazením na vzduchu.

Pozn.: teploty přeměn A_{C1} - 765 °C, A_{C3} - 815 °C, M_s - 310 °C.

Tvarování pružinových listů se většinou v Hanáckých železárnách provádí v kalícím bubnu upnutím listů v šablonách nebo v tvarovacím automatu. Po tvarování listů pomocí šablon jsou tyto listy zakaleny v upnutém stavu. Je zřejmé, že náročnost práce ovlivňuje hlavně hmotnost listů a počet manipulací s nimi. Další faktory ovlivňující výkon pracovníků jsou teploty na pracovišti. Protože pracovní prostor ovlivňuje kromě teplého listu pružiny i sálání tepla z krokové pece (obr. 2) jsou teploty na pracovišti vyšší a pracovníci mají příplatky za ztížené pracovní prostředí [1].



Obr. 2 Kroková pec [1]

Linka tepelného zpracování se v Hanáckých železárnách skládá z následujících zařízení [2]:

- *Kroková pec* s regeneračním ohřevem, se stavitelnou rychlostí podávání a s rovnačkou šavlovitosti.
- *Výstředníkový lis* pro děrování a pupkování středících otvorů.
- *Tvarovací automat* s nastavitelnými prsty, který slouží pro tvarování listů před usazením do šablony nebo zcela zastupuje funkci tvarovací šablony.
- *Kalící buben* (obr. 3) s osmi vyměnitelnými tvarovými šablonami pro tvarování a kalení listů parabolických a listových pružin v upnutém stavu.
- *Kalící olejová kád'* s vynášecím dopravníkem.
- *Popouštěcí elektrická pec* (obr. 4).



Obr. 3 Kalící automat [1]



Obr. 4 Popouštěcí pec[1]

Velikost austenitického zrna:

Velikost zrn výsledné struktury odráží velikost původních zrn austenitu. Struktura získaná z hrubého zrna má výrazně horší vlastnosti než struktura získaná z jemného austenitického zrna. Velikost tohoto austenitického zrna je dána chemickým složením, jakostí, velikostí zrn vstupního materiálu a dále pak způsobem a průběhem tepelného zpracování. Obecně se oceli rozdělují na dědičně hrubozrnné a dědičně jemnozrnné. Křemíkové materiály patří mezi dědičně hrubozrnné, což znamená, že při nedodržení optimálních podmínek v průběhu tepelného zpracování (vyšší teplota, delší čas) dochází k prudkému zhrubnutí zrna zvláště v povrchové vrstvě. Tuto negativní vlastnost křemíkových pružinových ocelí lze snížit mikrolegováním vanadem, který zabraňuje růstu austenitického zrna [1].

Pro pružiny vyráběné v Hanáckých železárnách je nejpoužívanější a také normativně předepsána struktura ve formě popuštěného martenzitu. Výsledné mechanické vlastnosti materiálu a především životnost pružin výrazně ovlivňují i případné strukturální anomálie, jako jsou podkalené útvary, chemická heterogenita (pruhovitost) a povrchové oduhličení (obr. 5). Povrchové oduhličení, které se projeví ať už ve formě feritických zrn, případně feritického síťoví nebo ve formě nízkouhlíkového martenzitu je pro dynamicky zatěžované součásti značně nepříznivé. Tato struktura má výrazně nižší pevnost než je pevnost základní struktury tvořené popuštěným martenzitem, neboť popuštěný martenzit má mez pevnosti až 2000 MPa, zatímco ferit má mez pevnosti cca 300 MPa [1].



Obr. 5 Oduhličení povrchu [1]

2.3. Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti zušlechtěného materiálu na pružiny jsou obecně ovlivněny jakostí, strukturou materiálu po tepelném zpracování, povrchovými i strukturálními vadami, chemickou heterogenitou, mikročistotou a jemnozrnností struktury [13, 14].

Podmínky pro provedení tepelného zpracování jsou uváděny v příslušných materiálových normách a odborné literatuře.

Pro stanovení výsledných mechanických vlastností materiálu je důležitá znalost:

- teplot kalení,
- kritické rychlosti ochlazování,
- prokalitelnosti,
- závislosti R_m , R_e , A , Z na popouštěcí teplotě.

Zlepšení daných vlastností pružiny se dosahuje dodatečnou povrchovou úpravou.

Dle přání zákazníka je možno zajistit:

- pozinkování,
- poniklování,
- pochromování,
- potažení umělou hmotou a jiné.

2.4. Označování podle ČSN a EN

Pružinové křemíkové oceli řadíme do třídy 13, které jsou určeny pro výrobu velmi namáhaných pružin s vysokou pružností, dostatečnou houževnatostí a meze únavy. Obsah křemíku je více jak 0,5%. Typickými představiteli této skupiny jsou následující materiály [3]:

13141 - obsah prvků v %: max. 0,3 C, 1,5 Mn - 1.1165

Ocel je dobře tvařitelná za tepla, v zušlechtěném stavu dobře obrobitelná. Užívá se ve stavu zušlechtěném na menší hřídele, různé strojní součásti (páky, táhla, ojnice, šrouby), velké výkovky. $R_m = 650 - 800$ MPa, $R_{emin} = 450$ MPa.

Údaje pro technologické zpracování:

- kování 1100 až 750°C
- normalizační žihání 860 až 890°C
- žihání na měkko 720 až 760°C
- kalení do vody 790 až 820°C
- kalení do oleje 820 až 850°C
- popouštění 150 až 220°C

13151 - obsah prvků v %: max. 0,5 C, 0,8 Mn - 1.0902

Ocel je vhodná na ozubená kola, šneky a hřebenové válce do max. čistého průměru 750 mm ve stavu zušlechťeném, do max. čistého průměru 1000 mm ve stavu normalizačně žíhaném a popouštěném. Na věnce ozubených kol, výkovky. Ozubená kola, šneky, hřebenové válce do průměru 750 mm. $R_m = 635 - 735$ MPa, $R_{emin} = 390$ MPa.

Údaje pro technologické zpracování:

- kování 1100 až 750°C
- normalizační žíhání 860 až 890°C
- žíhání na měkko 720 až 760°C
- kalení do vody 790 až 820°C
- kalení do oleje 820 až 850°C
- popouštění 150 až 220°C

13180 - obsah prvků v %: 0,75 C, 1 Mn - 1.1259

Ocel k zušlechťování, má dobrou odolnost proti otěru a je vhodná na pružiny, jeřábové kolejnice.

Údaje pro technologické zpracování:

- kování 1050 až 850°C
- žíhání na měkko 720 až 780°C
- kalení do vody 790 až 820°C
- kalení do oleje 820 až 840°C
- popouštění 120 až 170°C

13240 - obsah prvků v %: 0,37 C, 1,25 Mn, 1,25 Si - 1.5122

Ocel je dobře tvařitelná a dobře obrobitelná. Je náchylná na popouštěcí křehkost. Optimální průměr nebo tloušťka pro zušlechťení 50 mm. Používá se na středně namáhané strojní součásti.

Údaje pro technologické zpracování:

- kování 1100 až 800°C
- normalizační žíhání 870 až 890°C
- žíhání na měkko 630 až 680°C
- cementování 850 až 880°C
- 1. kalení do vody (oleje) 870 až 900°C
- mezižíhání 650 až 680 °C
- 2. kalení do vody (oleje) 770 až 800°C
- jednoduché kalení do vody (oleje) 820 až 840°C
- popouštění 150 až 180°C

13 242 - obsah prvků v %: 0,4 C, 1,75 Mn, 0,1 V - 1.5223

Ocel manganová, dobře tvárná za tepla a v žíhaném stavu dobře obrobitelná. Používá se na značně namáhané strojní součásti, jako hřídele, nápravy, čepy k automobilům a traktorům.

Údaje pro technologické zpracování:

- kování 1150 až 800°C
- normalizační žíhání 850 až 870°C
- žíhání na měkko 740 až 760°C
- kalení do vody 800 až 860°C
- kalení do oleje 840 až 880°C
- popouštění 500 až 640°C
- nitrocementování 820 až 860°C
- popouštění 160 až 180°C

13251 - obsah prvků v %: 0,47 C, 1,7 Si - 1.0902

Ocel vhodná k zušlechťování. Ocel má dobrou odolnost proti otěru. Isotermickým kalením lze dosáhnout při stejné pevnosti v tahu vyšší vrubové houževnatosti a odolnosti proti otěru než při zušlechťování. Ocel je vhodná na méně namáhané pružiny, např. hospodářských strojů, vinuté pružiny a pružnice kolejových vozidel a zemědělských strojů, kuželové, šroubovitě a ploché pružiny, listy k pružinovým bucharům. $R_m = 780 - 1030$ MPa, $R_{emin} = 440$ MPa.

Údaje pro technologické zpracování:

- kování 1150 až 800°C
- normalizační žíhání 840 až 880°C
- žíhání na měkko 650 až 700°C
- kalení do oleje 840 až 880°C
- popouštění 570 až 680°C

13270 - obsah prvků v %: 0,65 C, 1,7 Si - 1.0906

Ocel je vhodná k zušlechťování a pro pružiny. Izotermickým kalením této oceli lze dosáhnout při stejné pevnosti v tahu vyšší vrubové houževnatosti než při zušlechťování. Ocel je vhodná na spojkové lamely. $R_m = 730$ MPa, R_{emin} není uvedeno.

Údaje pro technologické zpracování:

- kování 1100 až 800°C
- normalizační žíhání 820 až 840°C
- žíhání na měkko 700 až 740°C
- kalení do oleje 800 až 820°C
- popouštění 420 až 510°C

13320 - obsah prvků v %: 0,2 C, 2 Mn

Ocel manganová, nízkolegovaná, ušlechtilá, odolná proti opotřebení. Ocel je vhodná na svařované součásti při středním namáhání, např. potrubí, sběrače a výsyvky prašných a kalových hmot, svařitelná ocel na součásti se zvýšenou odolností proti opotřebení, např. na potrubí, sběrače a výsyvky prašných a kalových hmot.

Údaje pro technologické zpracování:

- kování 1050 až 850°C
- žhání na měkko 720 až 780°C
- kalení do vody 790 až 820°C
- kalení do oleje 810 až 830°C
- popouštění vzduch 150 až 170°C

3. ÚNAVOVÉ VLASTNOSTI

3.1. Definice únavy

Únavové chování materiálu, zkráceně únava materiálu, je proces změn strukturního stavu materiálu a jeho vlastností vyvolaný kmitavým neboli cyklickým zatěžováním, v důsledku něhož dochází v materiálu k hromadění poškození, které se v závěru procesu projeví růstem makroskopické trhliny a únavovým lomem [9].

Prvé systematické únavové zkoušky při zatěžování ohybem za rotace provedl v letech 1852 - 1870 železniční inženýr August Wöhler [9]. Podle něj je pojmenována únavová křivka, obecně známá jako Wöhlerova. Udává závislost amplitudy napětí při její dané střední hodnotě na počtu cyklů do lomu. Amplituda napětí, při níž ani po vysokém počtu cyklů (řádově 10^7) nenastává lom, se nazývá mezí únavy [11].

Základní charakteristiky zátěžného cyklu:

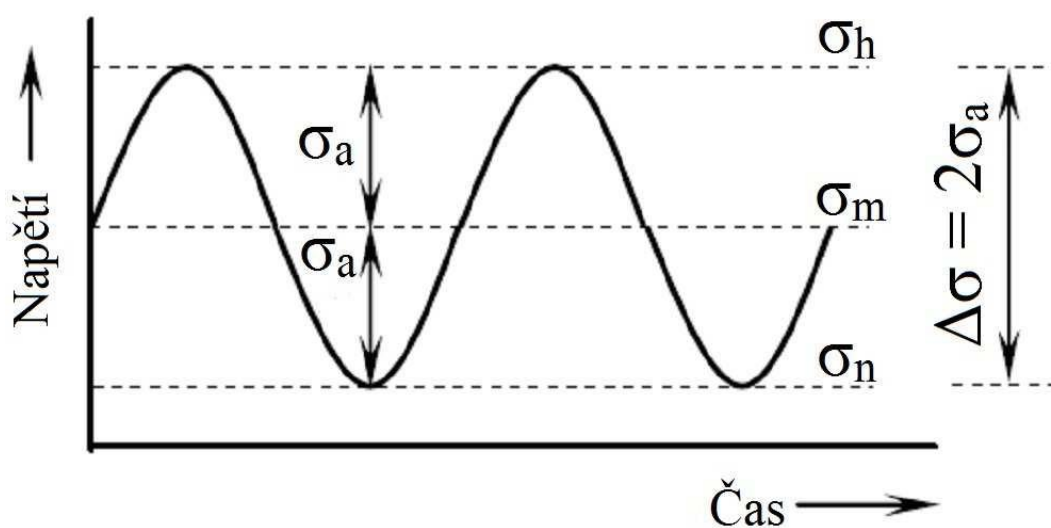
Pro popis asymetrie zátěžného cyklu se nejčastěji využívá dvou parametrů. Jedná se o parametr R , což je napěťový poměr, a novější parametr P . Tyto parametry jsou určeny [9]:

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

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

Hodnoty těchto parametrů pro symetrický zátěžný cyklus jsou $R = -1$ a $P = 1$.

Závislost průběhu a označování jednotlivých napětí, používaných při měkkém únavovém zatěžování, je naznačeno na obr. 6 a jsou to amplituda napětí (σ_a), střední napětí (σ_m), horní napětí (σ_h) a dolní napětí (σ_n) a rozkmit $\Delta\sigma$ [6].



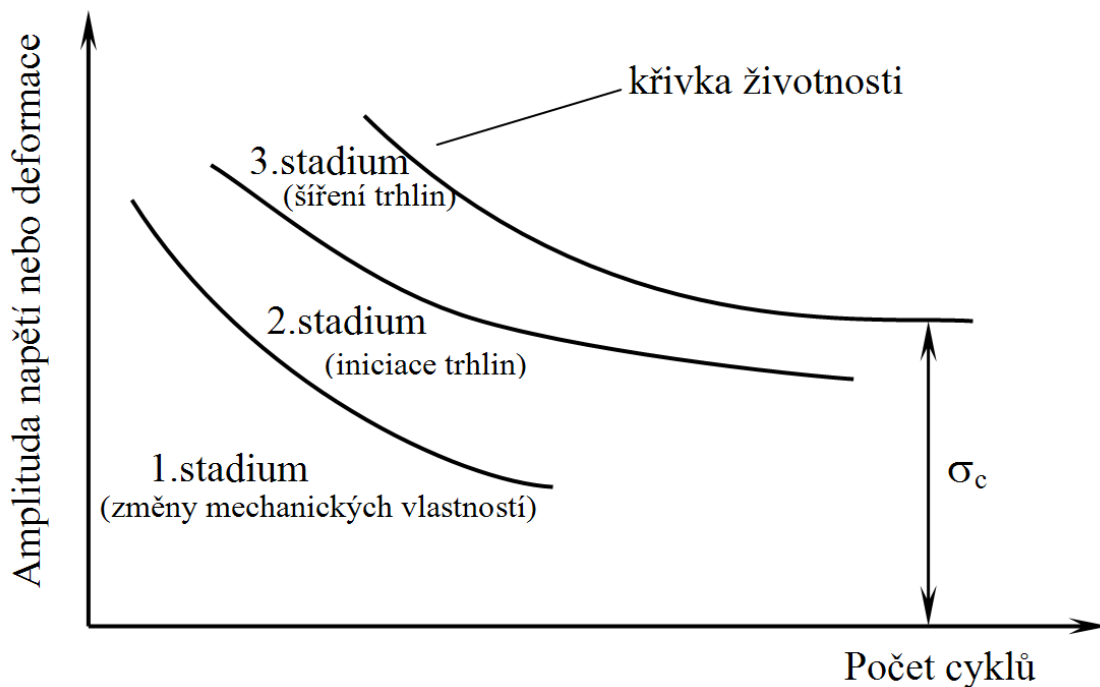
Obr. 6 Napětí při zatěžování [8]

3.2. Tři stádia únavového procesu

Únavové chování materiálu je určeno kumulací cyklické plastické deformace, tedy typem nevratných změn, ke kterým v materiálu dochází v průběhu cyklického zatěžování. Celý únavový proces lze rozdělit na tři stádia viz obr. 7 [9]:

1. Stádium změn mechanických vlastností,
2. Stádium iniciace trhliny,
3. Stádium šíření trhliny.

Jednotlivá stádia plynule přechází jedno do druhého a neexistuje mezi nimi žádná zřetelná hranice.

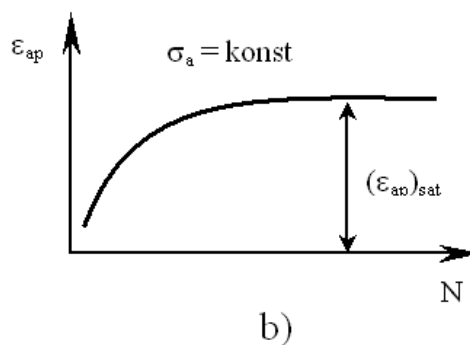
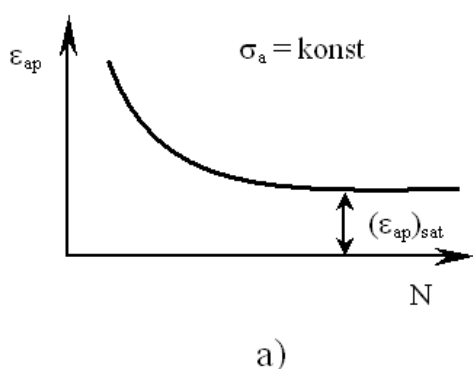


Obr. 7 Stadia únavového procesu [8]

1. Stádium změn mechanických vlastností

V prvním stádiu dochází ke *změnám mechanických vlastností*. Charakteristickým rysem tohoto stádia je změna vlastností v celém objemu zatěžovaného kovu. Při tom se mění hodnota a konfigurace mřížkových poruch a v důsledku toho dochází ke změně mechanických a fyzikálních vlastností. Změny mechanických vlastností mohou být dvojího druhu:

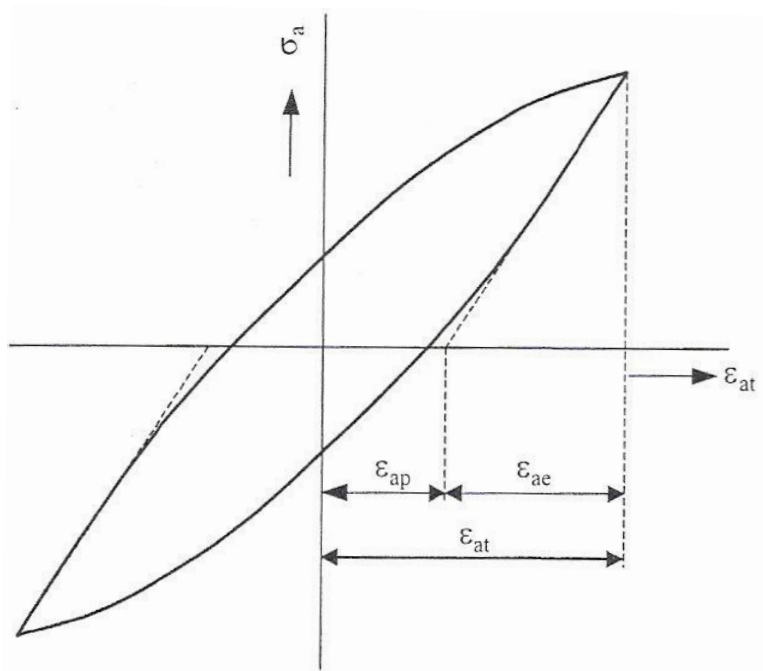
- **Cyklické zpevnění**, které je typické pro vyžíhané materiály s poměrem $R_m / R_e > 1,4$ (obr. 8).
- **Cyklické změkčení**, které vzniká v materiálech předtím zpevněných některým ze známých způsobů. Mezi tyto způsoby patří zejména deformační zpevnění, precipitační zpevnění, zpevnění martenzitickou transformací, disperzní zpevnění dané cizími částicemi v matici a zpevnění příměsovými atomy. Z hlediska praktického použití je cyklické změkčení zpravidla jev nežádoucí. K cyklickému změkčení dochází v materiálech s poměrem $R_m / R_e < 1,2$ (obr. 9).



Obr. 8 Materiál cyklicky zpevňuje

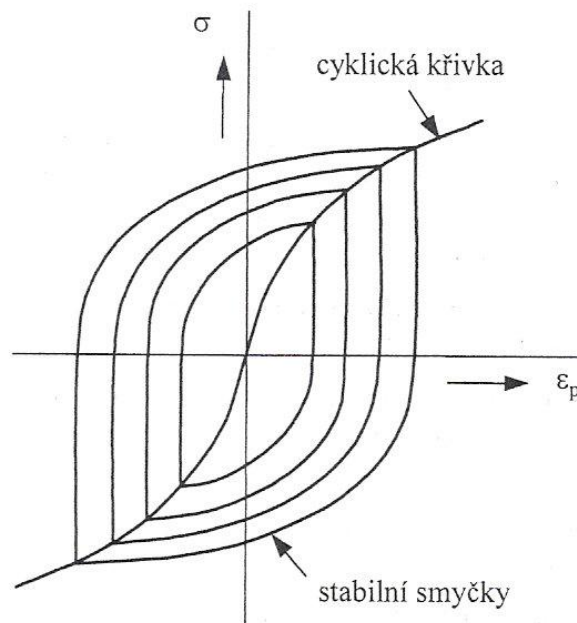
Obr. 9 Materiál cyklicky změkčuje [14]

Dosažení saturovaného stavu nejlépe charakterizuje hysterezní smyčka (obr. 10), která po ukončení změkčovacích nebo zpevňovacích procesů stabilizuje svůj tvar a velikost. Plocha hysterezní smyčky se rovná energii přeměněné za jeden cyklus na tepelnou energii. Celková energie do lomu je rovna součtu ploch smyček v jednotlivých cyklech. Protože se plocha hysterezní smyčky mění pouze v průběhu změkčení nebo zpevnění, lze celkovou energii do lomu určit jako součin počtu cyklů do lomu a plochy saturované hysterezní smyčky [9].



Obr. 10 Schéma hysterezní smyčky[9]

Spojení vrcholů několika saturovaných hysterezních smyček pro různé výchozí hodnoty amplitudy napětí nebo amplitudy plastické deformace získáme závislost, která se nazývá cyklická deformační křivka (obr. 11). Tato křivka, která vyjadřuje vztah mezi napětím a plastickou deformací v ustáleném stavu, je důležitou materiálovou charakteristikou pro popis únavového chování daného materiálu [9].



Obr. 11 Definice cyklické deformační křivky napětí – deformace [9]

Cyklickou deformační křivku polykrystalů lze ve většině případů popsat v oblasti velkých a středních amplitud plastické deformace mocninovou funkcí [9]:

$$\sigma_a = K \cdot \varepsilon_{ap}^n, \quad (3)$$

kde

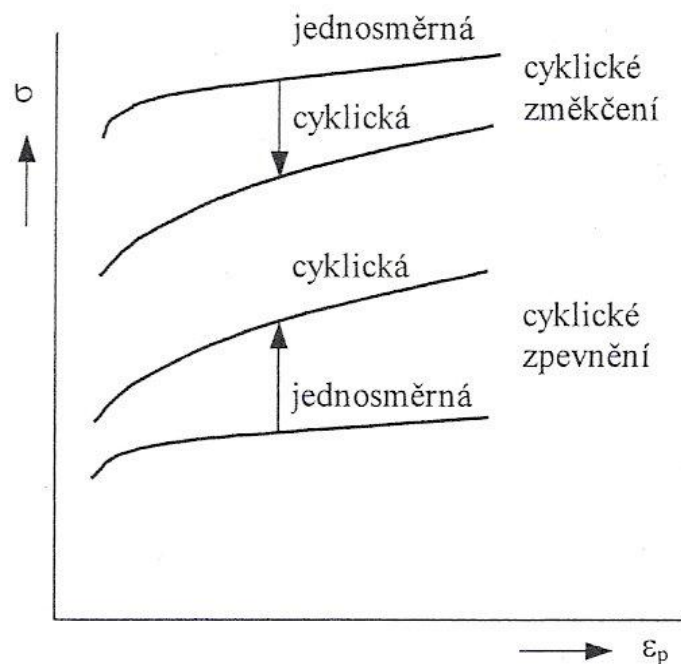
σ_a – amplituda napětí,

K – parametr cyklické deformační křivky,

ε_{ap} – amplituda plastické deformace,

n – exponent cyklické deformační křivky.

Srovnání cyklické deformační křivky s tahovým diagramem je možno odhadnout cyklickou deformační odezvu materiálu. Leží-li cyklická křivka nad tahovou (obr. 12) materiál cyklicky zpevňuje, jeho odpor proti plastické deformaci roste. Leží-li naopak cyklická křivka pod tahovou, materiál cyklicky změkčuje, jeho odpor proti plastické deformaci klesá. Je-li cyklická křivka přibližně totožná s tahovým diagramem, materiál je cyklicky stabilní [9].



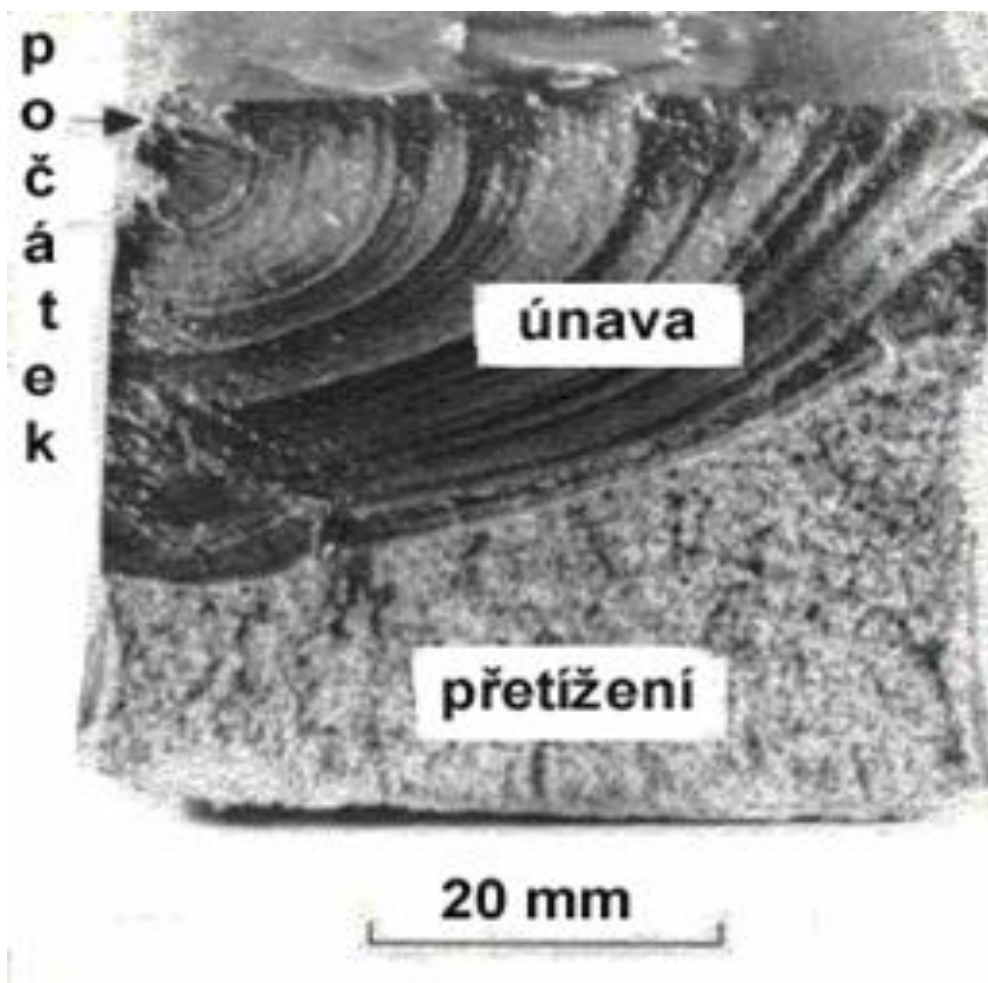
Obr. 12 Srovnání jednosměrných (tahových diagramů) a cyklických křivek napětí – deformace [9]

2. Stádium iniciace trhlin

Druhé stádium je charakterizováno *nukleací (vznikem) trhlin* (obr. 13). Ve většině případů je vznik trhlin vázán k povrchu materiálu, následkem zvýšení napětí vlivem koncentrace napětí, která byla vyvolána vruby nebo heterogenními částicemi. Méně často vznikají trhliny uvnitř materiálu, a to zejména u materiálů strukturně nehomogenních.

Trhliny na povrchu nejčastěji vznikají ve skluzových pásech, na hranicích zrn nebo na rozhraní mezi inkluzemi a matricí základního kovu nebo slitiny. Charakter skluzových pásů se liší podle typu materiálu (konkrétně podle jeho energie vrstevné chyby) a podmínek zatěžování v souvislosti s podmínkami uspořádání dislokací [11].

Nukleační stádium se vyjadřuje poměrem počtu cyklů potřebných k nukleaci k celkovému počtu cyklů do lomu za určitých zatěžovacích podmínek. Celkové stádium může být různě dlouhé a závisí na amplitudě zatěžování, na geometrii vzorku i součásti, na materiálových parametrech, na stavu zpracování povrchové vrstvy a na prostředí, v němž únavový proces probíhá. Koncentrátory napětí (zejména vruby) podstatně zkracují nukleační stádium a v případech ostrých koncentrátorů (trhlin) je toto stádium zanedbatelně krátké [11].

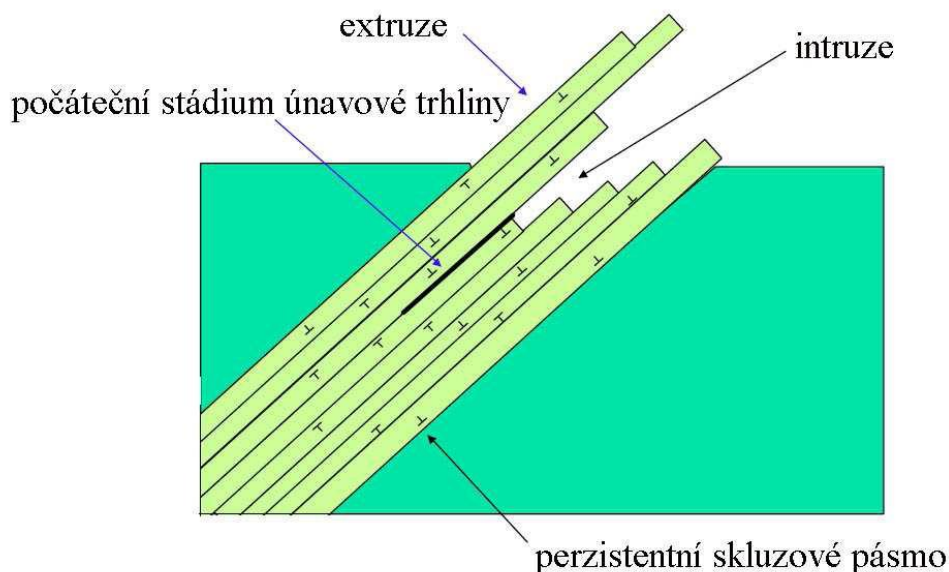


Obr. 13 Stádium iniciace únavové trhliny [10]

Mechanismy nukleace lze v hrubých rysech rozdělit do pěti skupin:

1. *Modely nerozlišující mezi intruzí a mikrotrhlinou.*

V tomto případě je vznik mikrotrhliny chápán jako spojité prorůstání intruze do hloubky, a to pomocí opakovaného skluzu buď v jednom, nebo ve dvou skluzových systémech. V případě skluzu v jednom skluzovém systému je základem představy relativní pohyb více rovnoběžných „karet“ (obr. 14) [12].



Obr. 14. Skluz v perzistentním skluzovém pásmu [10]

2. *Nukleace křehkým prasknutím v kořeni intruze.*

Tato představa, která jasně rozlišuje mezi intruzí a trhlinou, vychází z přímého pozorování povrchových vrstev elektronovým mikroskopem. Mikrotrhliny začínají vždy na ostrých intruzích bez ohledu na typ okolní dislokační struktury. Lze se domnívat, že mikrotrhlina se vytvoří tehdy, když koncentrace napětí kolem intruzí (závisející na geometrii intruze) nemůže být odrelaxována skluzovými procesy (následkem zpevnění), dosáhne takového stupně, že maximální napětí přesáhne meziatomové vazebné síly. Tato představa je opět značně rámcová, předpokládá extrémně vysokou, i když silně lokalizovanou koncentraci napětí u kořene intruze. Existenci takto vysoké koncentrace napětí není možno experimentálně ani doložit ani vyvrátit [12].

3. *Vznik trhliny kondenzací vakancí.*

Některé dislokační interakce vedou ke vzniku vakancí. V průběhu cyklické deformace byla experimentálně zjištěna relativně vysoká koncentrace vakancí v celém zatěžovaném objemu. Protože únavová skluzová pásma jsou oblastí se stálou a největší dislokační aktivitou, je možné, že právě v těchto pásmech je v důsledku dislokačních interakcí koncentrace vakancí největší.

ší. Vzniklé vakance mohou vytvářet shluky a dutiny. Dutinu o dostatečné velikosti je již možno považovat za trhlinu. Tato představa implicitně předpokládá difúzi vakancí, která je silně závislá na teplotě [12].

4. *Dekoheze krystalu podél skluzové roviny způsobená akumulací dislokací.*

Základní představa je taková, že v kritických místech se vytváří taková konfigurace dislokací, která vede k lokálnímu zvýšení napětí nebo energie dostačující ke ztrátě koheze v oblasti několika Å až několika desítek Å. Fujita teoreticky dokázal, že dislokační dipól s velmi malou vzdáleností mezi dislokacemi může prostřednictvím anihilace vést až ke vzniku trhliny [12].

5. *Nukleace na hranicích zrn.*

Model je založen na plastické nestabilitě a předpokládá velmi vysoký stupeň cyklické plastické deformace napříč celou povrchovou vrstvou zrn. Protože hranice zrn tvoří překážku plastické deformaci, dochází v mikroměřítku ke vzniku plastické nestability a „hloubka rýhy“ se na hranici zrna se zvyšujícím se počtem cyklů prohlubuje, dokud deformační koncentrace u „rýhy“ není tak velká, že vytvoří mikrotrhlinu [8].

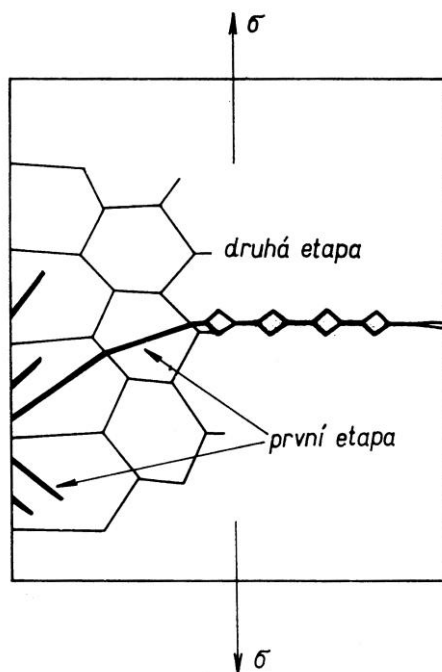
Kromě těchto modelů však existuje ještě celá řada dalších variací. Žádný z modelů není plně uspokojivý a žádný z nich není rozpracován natolik v kvantitativní podobě, aby umožnil vyjádření vlivu strukturních a materiálových parametrů na rychlost nukleace [12, 8]. Do jaké hloubky a délky mikrotrhlin je možno hovořit o nukleaci a od kterých hodnot již o šíření mikrotrhlin je nejasné. Není k dispozici žádné kritérium vyplývající z podstaty procesů, které by toto rozdělení umožňovalo. Je nutné také připustit to, že nukleace i šíření mikrotrhliny je zcela spojitý proces bez možnosti vymezení hranice. Z tohoto důvodu jsme odkázáni vždy jen na konvenci volby délky trhliny, kterou budeme považovat za konec nukleačního stádia [8].

3. **Stádium šíření trhlin**

Třetí stádium je charakterizováno *šířením trhlin*. Nukleační stádium končí vytvořením povrchových mikrotrhlin, které leží podél aktivních skluzových rovin. Při jednoosém namáhání to jsou většinou roviny, které s vektorem vnějšího napětí svírají úhel 45° . Během dalšího cyklického zatěžování se trhliny jednak propojují, jednak rostou do hloubky. Nejprve se šíří podél aktivních skluzových rovin a později se stáčí do směru kolmého k vektoru hlavního napětí. V této etapě se šíří zpravidla jen jediná trhlina, tzv. magistrální.

Délka trhliny, při níž se mění směr trhliny (což se označuje jako přechod z první etapy (krystalografické šíření trhliny) do druhé etapy (nekrystalografické šíření trhliny) [8]), závisí především na druhu materiálu a na amplitudě zatěžování. Délka není zpravidla větší, než několik desetin milimetru. Čím menší je pro daný materiál amplituda zatěžování, tím větší je délka trhlin odpovídající první etapě. Protože rychlost šíření trhlin v první etapě je malá, může být počet cyklů potřebný pro její rozvoj vysoký ve srovnání s počtem cyklů v druhé etapě šíření. Toto platí pro nevrubovaná tělesa.

U vrubovaných těles je počet cyklů pro první etapu nepodstatný, v těchto případech je celé šíření záležitostí druhé etapy [11]. Šíření v druhé etapě končí náhlým lomem zbývajících částí nosného průřezu (obr. 15) [12].



Obr. 15 Etapy šíření trhlin [9]

3.3. Křivky životnosti

3.3.1. Oblast vysokocyklové únavy

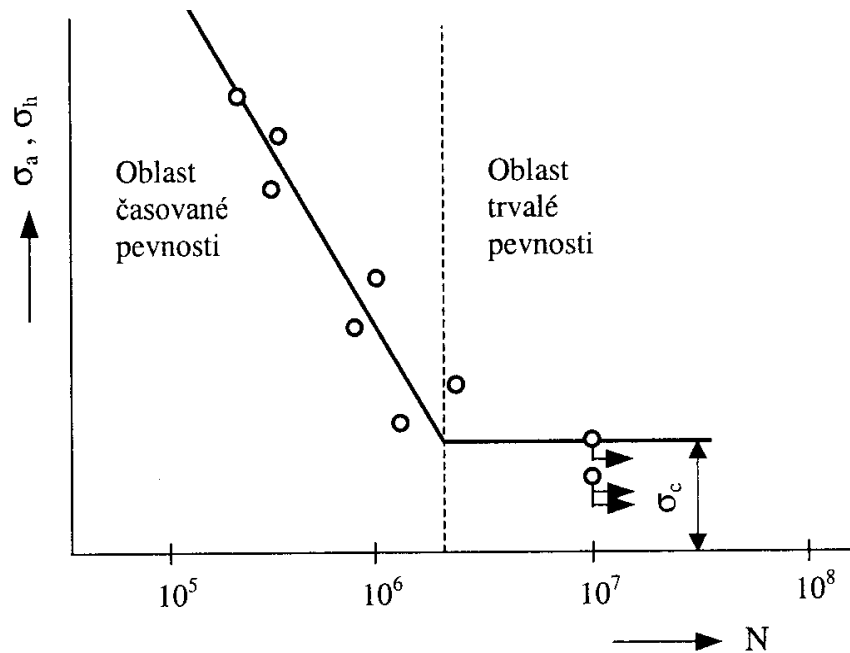
Při vysokocyklové únavě (10^5 a více cyklů) je napětí vždy pod mezí kluzu a opakované namáhání lze definovat časovým průběhem napětí. Pro životnost součástí je rozhodující dlouhý úsek, potřebný k vzniku zárodku únavové trhliny, kdežto fáze jejího šíření je méně významná [7].

Únavové chování materiálu při zatěžování ve vysokocyklové oblasti vyjadřuje Wöhlerova křivka a níž plynoucí hodnota meze únavy σ_c [9].

3.3.1.1. Wöhlerova křivka a mez únavy

Wöhlerova křivka se ve vysokocyklové oblasti nejčastěji znázorňuje v semilogaritmickém systému $\sigma - \log N$, jak je naznačeno na obr. 16. 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 σ_c [8].



Obr. 16 Wöhlerova křivka [9]

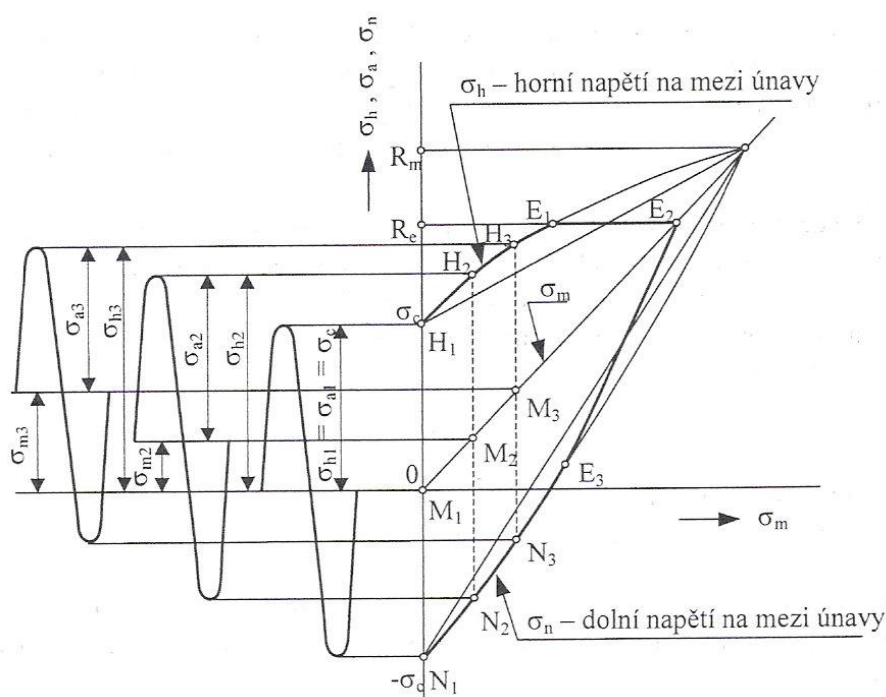
Pro pevnostní výpočty většiny součástí pracujících v oblasti vysokocyklové únavy je mez únavy základní charakteristikou vyjadřující odolnost materiálu proti únavovému poškození. Mez únavy lze definovat jako napětí, při kterém se vytvoří únavové mikrotrhliny kritické délky, které se však nemohou dále šířit [9].

3.3.1.2. Nejdůležitější faktory ovlivňující únavu

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

Vliv asymetrie zátěžného cyklu. Vliv asymetrie zátěžného cyklu má vliv na mez únavy. Mez únavy pro různé druhy zátěžných cyklů vzrůstá nebo klesá podle velikosti a znaménka statického předpětí. Grafické zpracování této závislosti je Smithův diagram. Tento diagram vyjadřuje vztah mezi hodnotami meze únavy pro různé druhy asymetrie cyklu. Jeho konstrukce je patrná z obr. 17 (pro $\sigma_m > 0$). Na osu x se vynáší statické předpětí σ_m , ve směru osy y amplituda cyklu σ_a a horní a dolní napětí cyklu σ_h, σ_n . Počátkem souřadnic je vedena přímka pod úhlem 45° , takže platí, že souřadnice libovolného bodu na této přímce odpovídají velikosti

středního napětí σ_m , okolo něhož kmitá napětí s amplitudou σ_a .



Obr. 17 Smithův únavový diagram [9]

Spojnice jednotlivých amplitud pro různé zátěžové cykly (body H_1, H_2, H_3 a N_1, N_2, N_3) vytváří mezní závislost horního a dolního napětí cyklu σ_h, σ_n . Tyto křivky se protnou v bodě M , který je určen z meze pevnosti R_m , neboť tuto je možno chápat jako mez únavy jejíž amplituda se blíží nule.

Pro praktické účely se Smithův diagram omezí tak, aby v materiálu nemohly vzniknout velké plastické deformace, tedy napětím rovným mezi kluzu R_e nebo $R_{p0,2}$ (body E_1, E_2, E_3). Silně vytažená část diagramu pak představuje oblast mezních cyklů napětí, při kterých nevznikne únavový lom.

Z diagramu je patrné, že hodnota meze únavy σ_{HC} vzrůstá se zvětšujícím se středním napětím. V praxi se pro značnou časovou náročnost nesestrojuje Smithův diagram na základě stanovení celé řady Wöhlerových křivek při různých asymetriích cyklů, ale zjednodušeně, pouze ze známé hodnoty meze únavy σ_C při symetrickém zatěžování a za předpokladu, že závislost horního σ_h a dolního napětí cyklu σ_n je na statickém předpětí σ_m lineární. Tuto skutečnost vyjadřuje Goodmanův vztah:

$$\sigma_a = \sigma_C (1 + \sigma_m / R_m), \quad (4)$$

kde

σ_a – amplituda napětí,

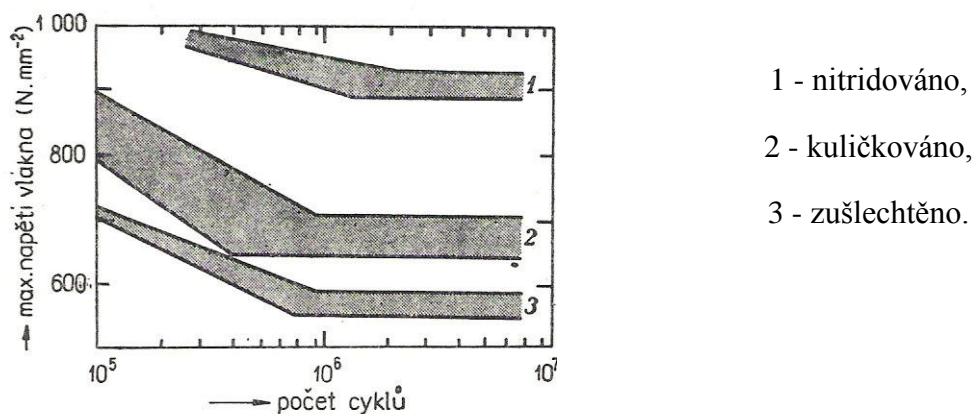
σ_m – střední napětí,

σ_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.

Vliv velikosti strojní součásti. Mez únavy, zjištěná na zkušebních tělesech plně neodpovídá hodnotám meze únavy zjištěná 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 na obr. 18 [7].



Obr. 18 Vliv různého zpracování na mez únavy klikového hřídele [7]

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, vměstky (vruby strukturní). Vrubem se mez únavy výrazně snižuje [2]. V okolí vrubu dochází při zatěžování k nerovnoměrnému rozdělení napětí a jeho účinkem k vytvoření plastické zóny. Nejvyšší koncentrace napětí a deformace (elastické i plastické) vzniká na vrcholu vrubu, který se tak stává místem iniciace trhliny, jež se dále šíří i do oblasti namáhané pouze elasticky [9].

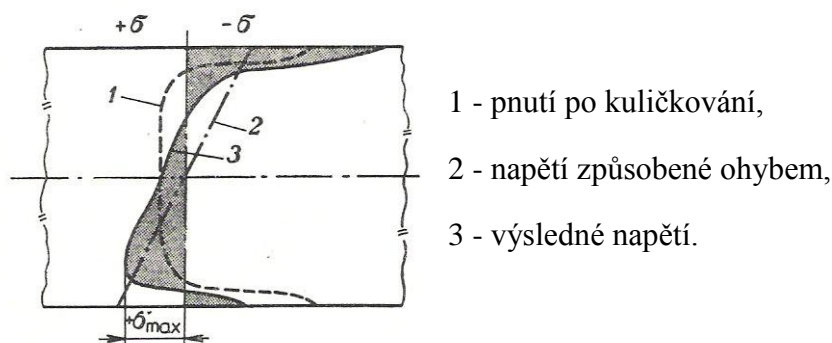
Vliv teploty. Teplota zkoušení má významný vliv na únavové vlastnosti materiálu. Při snižování teploty pod pokojovou teplotu mez únavy hladkých vzorků vzrůstá, zatímco u vzorků s vrubem není toto zvýšení příliš výrazné. V případě, že dojde ke snížení teploty pod tranzitní teplotu, mez únavy naopak výrazně klesá, neboť dominujícím faktorem se stane zkřehnutí materiálu. S rostoucí teplotou mez únavy klesá [9].

Vliv okolního prostředí. Agresivní prostředí (kapalně korozní prostředí) ovlivňuje etapu nukleace a etapu šíření únavových trhlin. V inertních prostředích (vakuum, suchý argon) je rychlost šíření nejnižší [9].

Vliv stavu povrchu. Ovlivňuje únavu výrazně při takovém způsobu namáhání, kde se maximálního tahového nebo smykového napětí dosahuje v povrchových vláknech součásti (ohyb, krut). Mez únavy zřetelně snižuje hrubě opracovaný povrch, oduhličení, vměstky, zasahující k povrchu. Výrazně klesá mez únavy i za současného působení koroze (v tomto případě nemá únavová křivka vodorovnou větev 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. 19). Příznivá jsou tlaková pnutí, která sníží nebezpečná maximální

tahová napětí v povrchu součásti od vnějších sil a přenesou špičku tahového napětí pod povrch (zvětšení tlakových napětí nevede k lomu, a tedy nevadí) [7].

U ocelí lze vyvodit žádoucí tlaková povrchová pnutí, která zvýší mez únav, např. nitridováním, cementováním, povrchovým kalením (využívá se např. u ozubených kol zároveň se zvýšením jejich odolnosti proti opotřebení). Rovněž tvářením povrchu za studena, zejména kuličkováním a válečkováním, kterými se vyvodí v povrchových vrstvách součásti tlakové napětí, se mez únavy (běžně se kuličkují např. pružiny válečkují se čepy vagónových náprav). Ve vrstvách vytvořených galvanickým pokovováním vznikají naopak nepříznivá tahová pnutí, která mez únavy snižují [7].



Obr. 19. Průběh napětí v kuličkové tyči namáhané ohybem [7]

3.3.2. Oblast nízkocyklové únavy

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

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 sinusový).

V nízkocyklové oblasti lze únavové chování materiálu popsat Wöhler Basquinovou a Mansonovou-Coffinovou rovnicí [9]:

1. **Wöhlerova-Basquinova funkce**, popisuje závislost počtu cyklů do lomu N_f na amplitudě σ_a [9]:

$$\sigma_a = \sigma_f' (2N_f)^b, \quad (5)$$

kde

σ_a - amplituda napětí,

σ_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 ε_{ap} [9]:

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon_f' (2N_f)^c, \quad (6)$$

kde

ε_{ap} - amplituda plastické deformace,

ε_f' - součinitel únavové tažnosti (je dán extrapolací ε_{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 ε_a , jež sestává z elastické a plastické složky, na počtu cyklů do lomu. Dle Mansona je křivka životnosti ε_a - N_f dána součtem křivek životnosti ε_{ae} - N_f a ε_{ap} - N_f :

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap}, \quad (7)$$

Vzhledem k platnosti Hookova zákona v makroskopicky izotropních materiálech:

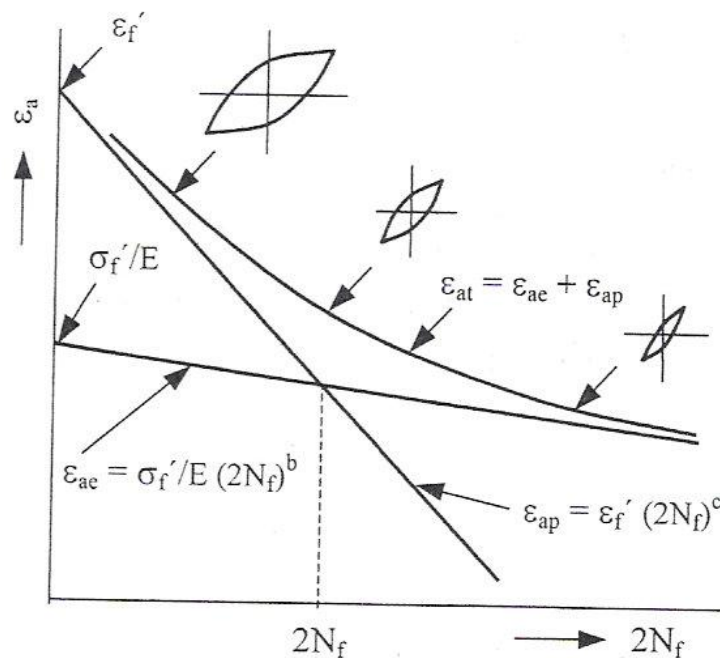
$$\sigma_a = E \cdot \varepsilon_a, \quad (8)$$

po dosazení obdržíme:

$$\varepsilon_a = \sigma_f' / E \cdot (2N_f)^b + \varepsilon_f' \cdot (2N_f)^c, \quad (9)$$

kde E je modul pružnosti v tahu.

Uvedené vztahy platí pro symetrické zatěžování hladkých vzorků homogenní napjatosti tah-tlak. Grafické znázornění je na obr. 20.



Obr. 20 Schematický průběh křivek životnosti [9]

4. CÍL PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je zjistit a porovnat únavové vlastnosti pružinové oceli 54SiCr6 (ČSN 41 4260).

Úkoly bakalářské práce:

1. Zhotovení metalografického vzorku.
2. Určení mechanických charakteristik materiálu.
3. Stanovení únavových charakteristik.
4. Hodnocení struktury materiálu.
5. Porovnání mechanických vlastností s normou.

5. EXPERIMENTÁLNÍ METODIKA, ROZBOR A DISKUZE VÝSLEDKŮ

5.1. Experimentální materiál

Jako experimentální materiál byla použita pružinová ocel 54SiCr6 o chemickém složení v rozsahu:

0,51-0,59 % C, 0,5-0,8 % Mn, 1,2-1,6 % Si, 0,1-0,2 % V, 0,03 % P_{max}S_{max}.

5.2. Metalografie

Pro pozorování struktury experimentálního vzorku byl použit světelný mikroskop Olympus GX71 s digitální kamerou DP11. Jde o metalografický mikroskop v převráceném uspořádání využívající pro pozorování viditelnou část spektra elektromagnetického záření.

Vzorek pro světelnou mikroskopii byl postupně broušen brusnými papíry o drsnosti 600, 1200 a 4000. Dále leštěn 3 μm , 1 μm a 0,25 μm diamantovou pastou. Následovalo leptání leptadlem acetic picral (kyselina octová, kyselina pikrová, voda, ethanol).

Pružinová ocel 54SiCr6 byla ve stavu zakaleném s nízkoteplotním popouštěním. Výsledná struktura je sorbitického typu, viz. příloha 1 - 3.

5.3. Mechanické vlastnosti

Základní mechanické vlastnosti ($R_{p0,2}$, R_m , A_5 , Z) byly stanoveny na univerzálním trhačím zařízení fy ZWICK, při normální teplotě. Rychlost zatěžování byla $v_0 = 1\text{mm/min}$ ($1,66 \cdot 10^{-5}$ m/s). Střední hodnoty výše uvedených charakteristik jsou uvedeny v tab. 2. Tyto hodnoty jsou v souladu s údaji v materiálových listech dané oceli.

Tab. 2 Statistické vlastnosti pružinové oceli 54SiCr6

R_p 0,2 [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	Z [%]
1799	1957	11,1	41,2

5.4. Měření tvrdosti podle Rockwella (ČSN EN 10109, dříve ČSN 42 0360)

Při měření tvrdosti podle Rockwella se do materiálu vtlačuje diamantový kužel. Pro měření pružinové oceli 54SiCr6 bylo použito zatížení 1471 N.

Měření bylo provedeno několikrát kvůli možné heterogenitě vlastností viz. tab. 3.

Tab. 3 výsledky zkoušek tvrdosti podle Rockwella

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

5.5. Měření tvrdosti podle Vickerse (ČSN EN ISO 6507, dříve ČSN 42 0374)

Při měření tvrdosti podle Vickerse se do materiálu vtlačuje diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136°. Doba zatěžování byla 10 sekund.

Měření bylo provedeno několikrát kvůli možné heterogenitě vlastností viz. tab. 4.

Tab. 4 výsledky zkoušek tvrdosti podle Vickerse

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

5.6. Únavové vlastnosti

Únavové vlastnosti byly vyhodnoceny na základě stanovení Wöhlerových křivek a hodnot meze únavy viz. obr. 21, 22. Zkoušky únavy materiálu byly provedeny na vysokofrekvenčním pulsátoru fy AMSLER, při normální teplotě. Wöhlerovy křivky byly stanoveny jednak při míjivém zátěžném cyklu v tahu ($P = 2$), jednak při zatěžování pulzujícím ohybem s parametrem asymetrie cyklu $P = 2,5$ a 5. Parametr P je definován následovně:

$$P = \sigma_h / \sigma_a \quad (10)$$

kde

σ_h – horní napětí zátěžného cyklu ($\sigma_h = \sigma_m + \sigma_a$),

σ_m – střední napětí,

σ_n – dolní napětí zátěžného cyklu,

σ_a – amplituda zátěžného cyklu.

Zkušební vzorky pro zatěžování tahem byly válcové o rozměru funkční části $D = 4$ mm se závitovými hlavami M12x1. Pro zkoušky v ohybu byly zvoleny válcové vzorky o průměru $D = 10$ mm (válcové hlavy měly rovné dosedací plochy). Vzdálenost podpěr pro výpočet ohybového momentu byla $L_o = 80$ mm. Vzorky byly jemně broušeny s drsností povrchu $R_a = 0,4$ μm . Zkušební frekvence, jež je u rezonančních pulsátorů funkcí tuhosti vzorku, byla $f = 142$ Hz při zatěžování tahem a $f = 102$ Hz při zatěžování ohybem.

Wöhlerovy křivky byly matematicky vyhodnoceny metodou nejmenších čtverců pomocí tří-parametrické nelineární funkce navržené Stromejerem a doporučené Weibullem [15]:

$$(\sigma - K) = a + b \cdot \log N, \quad (11)$$

kde

σ – podle způsobu zatěžování amplituda σ_a nebo horní napětí σ_h zátěžného cyklu,

K , a , b – konstanty regresní křivky,

N – počet cyklů do lomu nebo do ukončení zkoušky.

Hodnoty meze únavy, stanovené pro základní počet cyklů $N_C = 10^7$, jsou pro jednotlivé materiály uvedeny v tab. 5.

V této tabulce značí:

σ_{hC} – mez únavy při míjivém zatěžování tahem ($P = 2$),

σ_{ohC} – mez únavy při pulzujícím zatěžování ohybem s parametrem asymetrie $P = 2,5$ nebo $P = 5$.

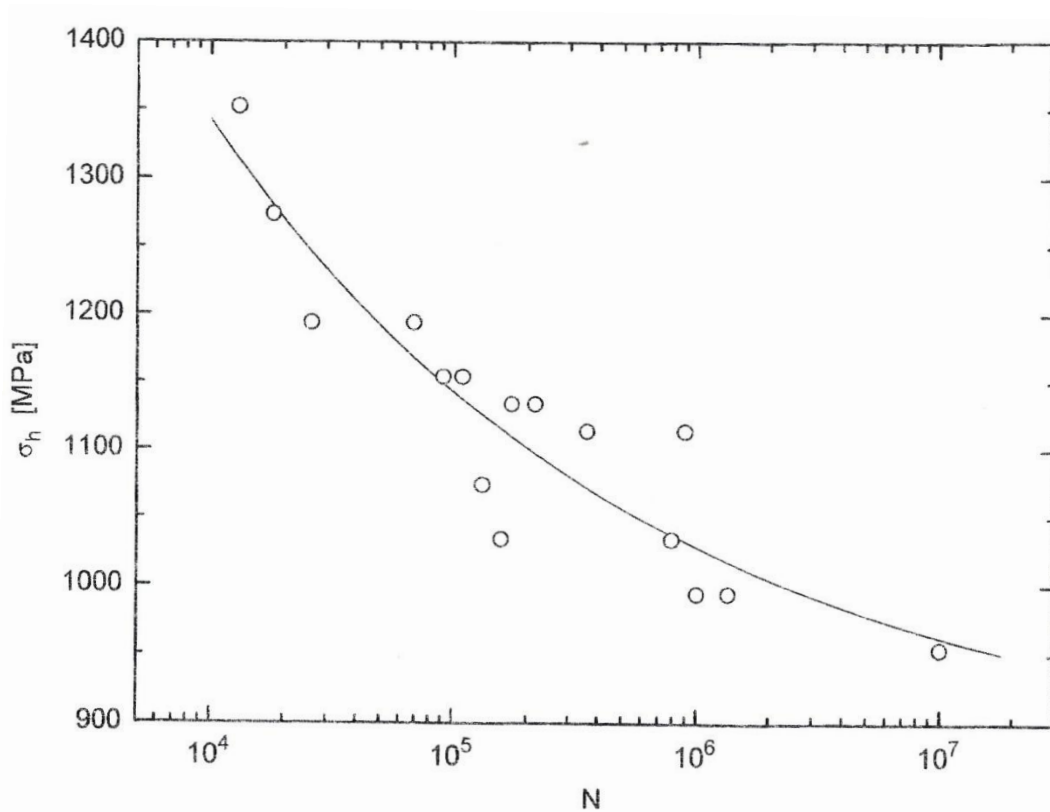
Tab. 5 Meze únavy pružinové oceli 54SiCr6

σ_{hC} [MPa] P = 2	σ_{ohC} [MPa] P = 2,5	σ_{ohC} [MPa] P = 5
964	1785	2400

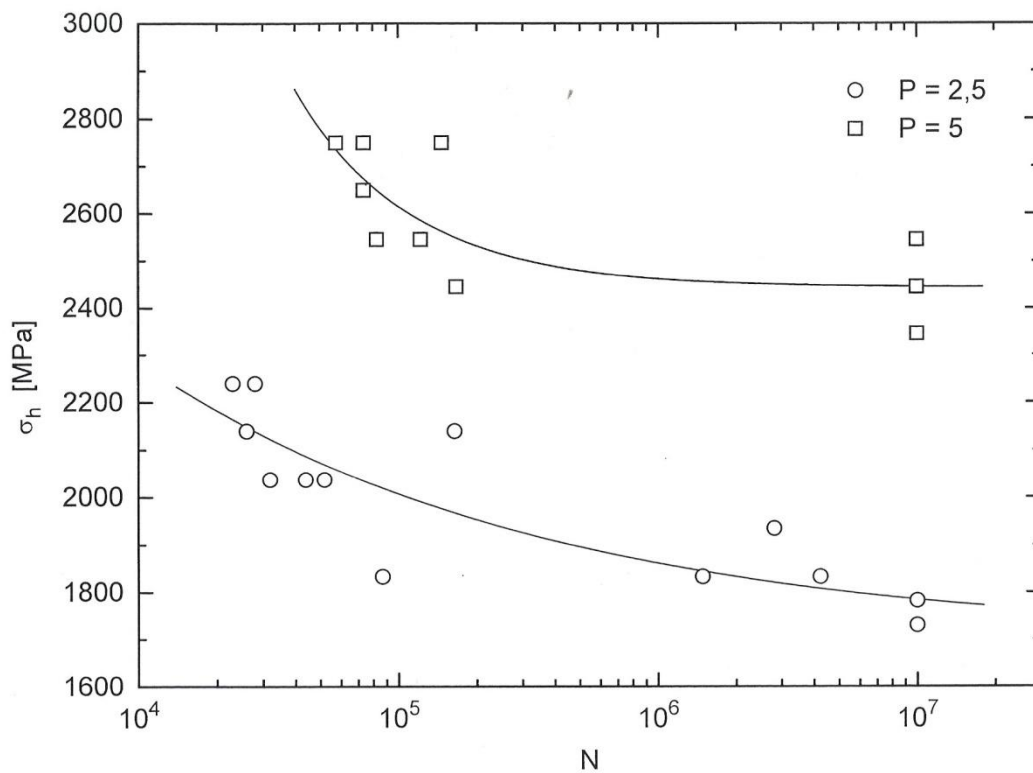
Únavové vlastnosti je možno též hodnotit na základě znalostí únavového poměru (fatigue ratio), který je definován jako poměr meze únavy a meze pevnosti. Hodnoty tohoto poměru jsou uvedeny v tab. 6.

Tab. 6 Únavové poměry pružinové oceli 54SiCr6

σ_{hC} / R_m P = 2	σ_{ohC} / R_m P = 2,5	σ_{ohC} / R_m P = 5
0,49	0,91	1,23



Obr. 21 Wöhlerova křivka stanovená při zatěžování mívivým tahem ($P = 2$)



Obr. 22 Wöhlerovy křivky stanovené při zatěžování pulzujícím ohybem ($P = 2,5$ a 5)

6. ZÁVĚR

Na základě analýzy strukturních, mechanických a únavových vlastností pružinové oceli 54SiCr6 mohou být řečeny následující závěry:

1. Struktura zkoumané oceli je sorbitická viz. příloha 1-3.
2. Při statických mechanických zkouškách byly naměřeny následující hodnoty:
 $R_{p0,2} = 1799$ MPa, $R_m = 1957$ MPa, $Z = 41,2\%$, $A5 = 11,1\%$, tvrdost 555HV30 a 51HRC.
Tyto hodnoty jsou v souladu s údaji v materiálových listech dané oceli.
3. Hodnota meze únavy při míjivém zátěžném cyklu ($P = 2$) je $\sigma_{hC} = 964$ (482 + 482) MPa. Hodnoty meze únavy při pulsujícím cyklu s parametry asymetrie $P = 2,5$ a ${}^2,5\sigma_{ohC} = 964$ (710 + 1070) MPa respektive ${}^5\sigma_{ohC} = 2400$ (1920 + 480) MPa. Tyto údaje ačkoliv jsou relativně vysoké jsou v souladu s údaji, které udává Linhart [16].
4. Na základě výše uvedených údajů byla odhadnuta hodnota meze únavy při zatěžování míjivým ohybem ${}^2\sigma_{ohC} = 1510$ (755 + 755) MPa.
5. Poměr meze únavy při pulsujícími a zátěžnými cykly je $\sigma_{ohC} / \sigma_{hC} = 1510 / 964 = 1,57$ MPa.
6. Hodnoty únavového poměru σ_{hC} / R_m , ${}^2,5\sigma_{ohC} / R_m$, ${}^5\sigma_{ohC} / R_m$ pro ocel 54SiCr6 jsou rovny hodnotám 0,49, 2,5 0,91 a 5 1,23.
7. Z Haighova diagramu, viz. příloha 4, je patrné, že závislost amplitudy zátěžného cyklu na statickém předpětí pak při zatěžování ohybem je lineární. Tvar Haighova i Smithova diagramu tak lze u pružinových ocelí aproximovat Goodmanovým vztahem (vztah 4).

7. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] NAKLÁDAL, L. *Robotizace linky tepelného zpracování HŽ9*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Bradáč, Ph.D.
- [2] Hanácké železářny a pérovny, a.s. *hzap.cz* [online]. 2011 [cit. 20.března 2011]. Dostupné z WWW: <http://hzap.cz/pages/cze/vyrabime/sroubovenbspрузiny.php>
- [3] PTÁČEK, L. a kolektiv. *Nauka o materiálu II*. Brno: vyd. CERM, 2002. 392 s. ISBN 80–7204–248–3.
- [4] Třinecké železářny. *trz.cz* [online]. 2008 [cit. 20.března 2011]. Dostupné z WWW: [http://trz.cz/TRZ/Prilohy.nsf/%28viewPublic%29/KATALOG/\\$FILE/PruzinoveOceli2008.pdf](http://trz.cz/TRZ/Prilohy.nsf/%28viewPublic%29/KATALOG/$FILE/PruzinoveOceli2008.pdf)
- [5] Wikipedia – otevřená encyklopedie. *wikipedia.cz* [online]. 2011 [cit. 3.března 2011]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ocel>
- [6] GEJDOŠ, P. *Studium nízkocyklových únavových vlastností hořčíkové slitiny AZ31 s 0,5 % vápníku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 50 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Tomáš Podrábský, CSc.
- [7] PLUHAŘ, J., KORITTA, J. *Strojírenské materiály*, SNTL/ALFA Praha, 1977. 562 s.
- [8] PANTĚLEJEV, L. *Únava kovových materiálů* [online]. 2010 [cit. 20.dubna 2010]. Dostupné z WWW: <http://ime.fme.vutbr.cz/studijni%20opory.html>
- [9] VĚCHET, S., KOHOUT, J., BORŮVKA, O. *Únavové vlastnosti tvárné litiny*. Žilinská univerzita. Žilina 2002. 157 s. ISBN 80–7100–973–3.
- [10] VLACH, B. *Únava materiálu* [online]. 2011 [cit. 30.4.2011], dostupné z WWW: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GSO/10%20-%20Unava.ppt>
- [11] SEDLÁČEK, V. *Neželezné kovy a slitiny*, SNTL Praha – Nakladatelství technické literatury, 1979. 398 s.
- [12] KLESNIL, M., LUKÁŠ, P. *Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání*, Praha: ACADEMIA, nakladatelství československé akademie věd, 1975, 224 s.
- [13] PTÁČEK, L. a kolektiv. *Nauka o materiálu I*. Brno: vyd. CERM, 2003. 516 s. ISBN 80–7204–283–1.
- [14] VELES, P. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*, SNTL Praha, 1985. 401 s.
- [15] WEIBULL, W. *Fatigue testing and analyzing of results*, Oxford etc. Pergamon Press, 1961.
- [16] LINHART, V. ve sborníku *Materiálový sborník SVÚM* Praha, 1975. 49 s.

8. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratky

BOF	basic oxygen furnaces
EAF	electric arc furnaces

Symboly

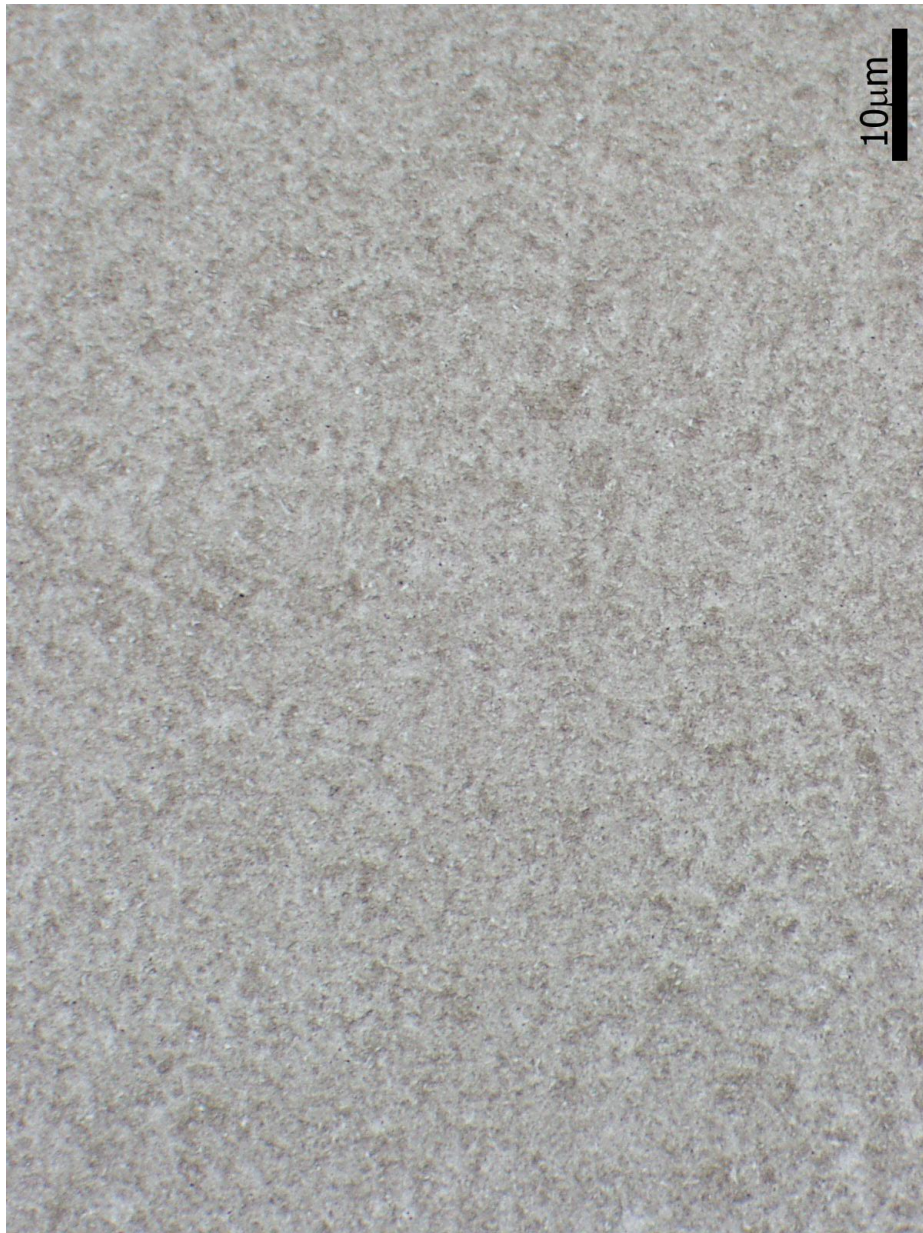
σ_a	amplituda napětí [MPa]
σ_h	horní napětí [MPa]
σ_m	střední napětí [MPa]
σ_C	mez únavy [MPa]
σ_n	dolní napětí [MPa]
$\Delta\sigma$	rozkmít napětí [MPa]
R,P	parametr asymetrie [-]
σ_{hc}	horní napětí pro mez únavy [MPa]
σ_{ohc}	horní napětí pro mez únavy u ohybu [MPa]
σ'_f	součinitel únavové pevnosti [-]
ε_{ap}	amplituda plastické deformace [-]
ε_{ae}	amplituda elastické deformace [-]
ε_a	amplituda celkové deformace [-]
ε'_f	součinitel únavové tažnosti [-]
v_o	rychlost zatěžování [mm]
K	parametr cyklické deformační křivky [-]
R_e	mez kluzu [MPa]
R_a	drsnost povrchu [μm]
R_m	mez pevnosti [MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu [MPa]
N_f	počet cyklů do lomu [-]
D	průměr [mm]
L_o	měřená délka vzorku [mm]
E	modul pružnosti [MPa]
A	tažnost [%]
Z	zužení [%]
b	elastický exponent křivky životnosti [-]
n	exponent cyklické deformační křivky
c	plastický exponent křivky tažnosti [-]
f	frekvence [Hz]

9. SEZNAM PŘÍLOH

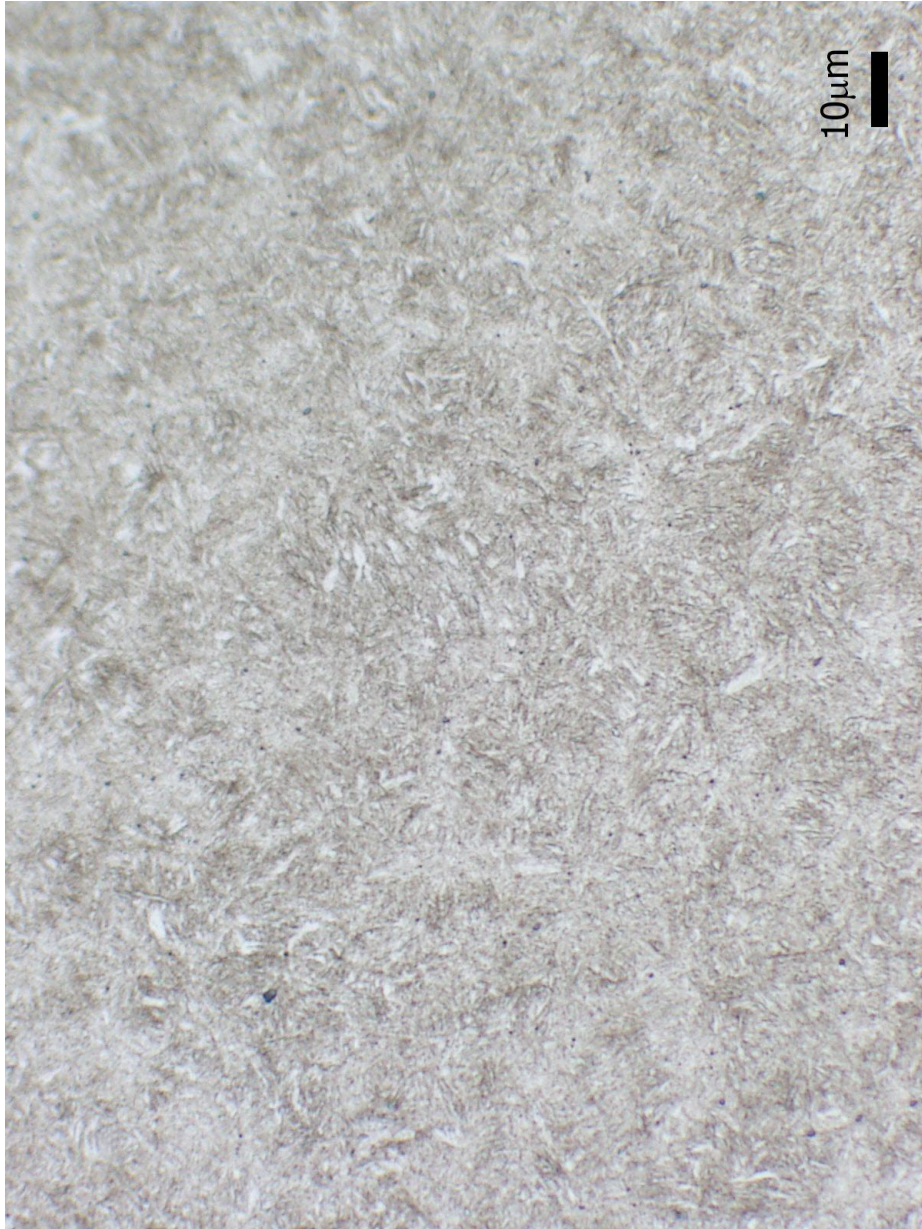
Příloha 1 - Fotografie vybraných vzorků na světelném mikroskopu

Příloha 2 - Haighův diagram pro ocel 54SiCr6

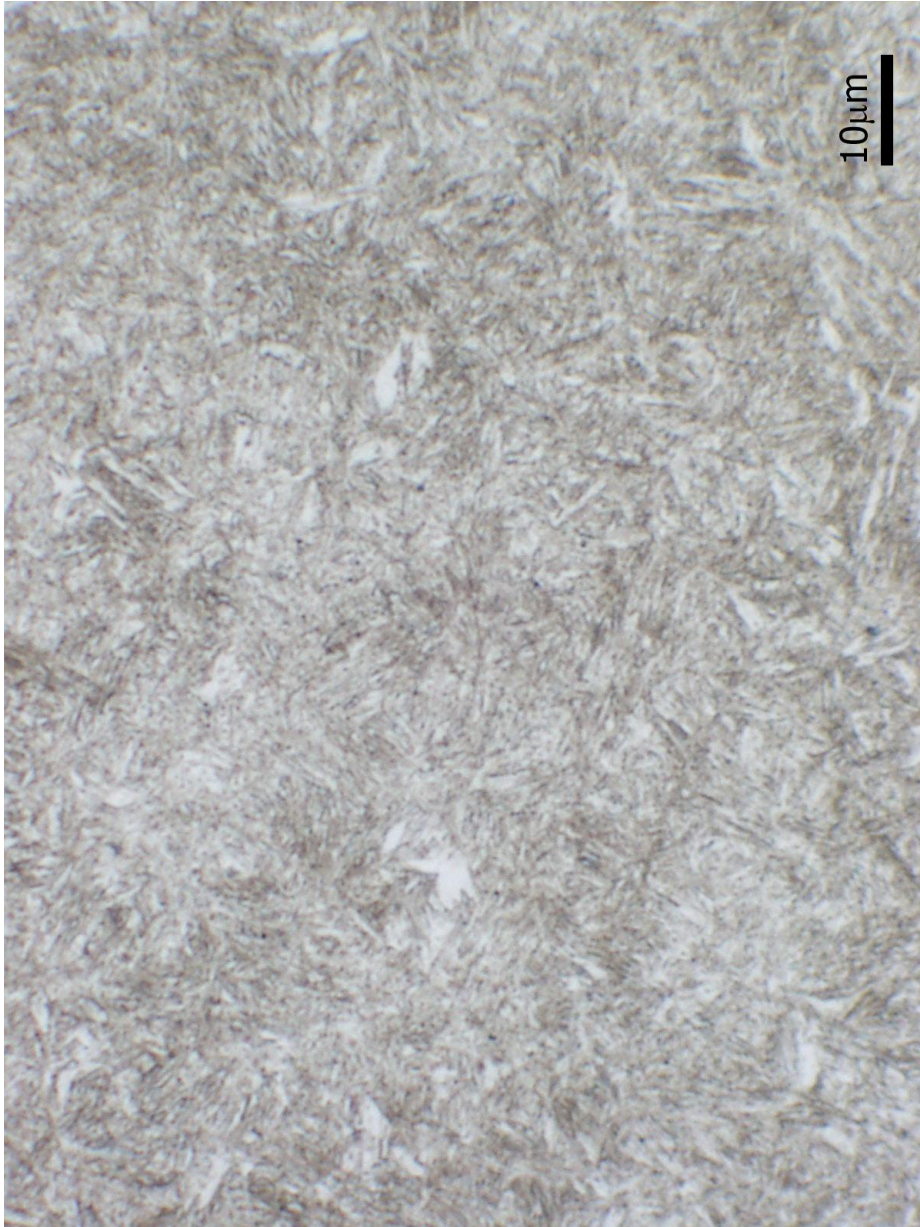
Příloha 1



Struktura pružinové oceli 54SiCr6

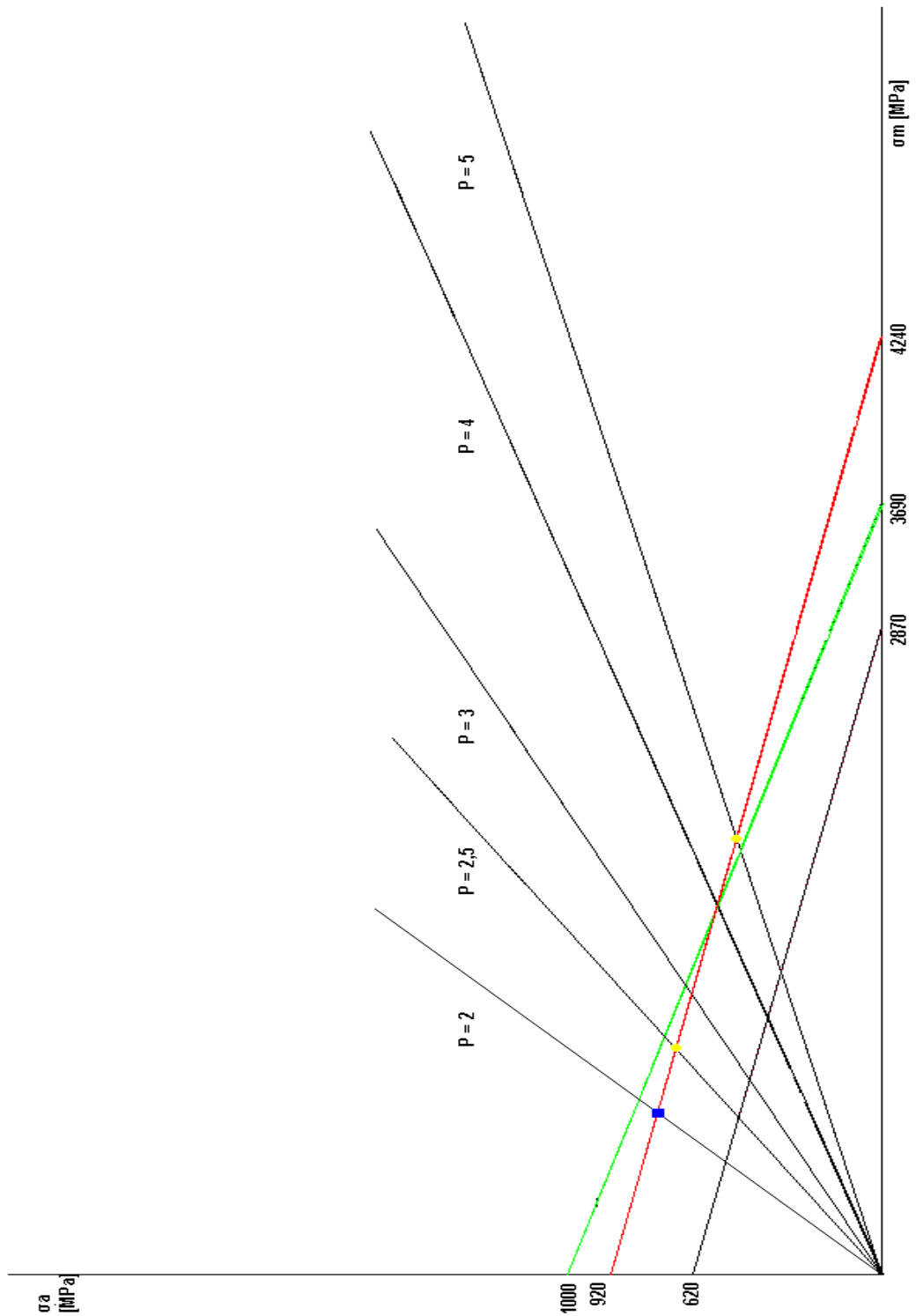


Struktura pružinové oceli 54SiCr6



Struktura pružinové oceli 54SiCr6

Příloha 2



Haighův diagram

Vyznačené body na obrázku (●, ■) odpovídají bodům v tab. 5.