



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

ZPRACOVÁNÍ NAPĚŤOVĚ DEFORMAČNÍ ODEZVY
V PRŮBĚHU CYKLICKÉHO ZATĚŽOVÁNÍ
ASSESSMENT OF STRESS STRAIN RESPONSE DURING CYCLIC LOADING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ONDŘEJ LEHNERT

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JANA HORNÍKOVÁ, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Ondřej Lehnert

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

Zpracováním napět'ově deformační odezvy v průběhu cyklického zatěžování

v anglickém jazyce:

Assessment of stress strain response during cyclic loading

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Posouzení napět'ově deformační odezvy v průběhu cyklického zatěžování při různých úrovních namáhání. Identifikace mechanické hystereze a procesů cyklického zpevnování, změkčování a saturace v průběhu cyklického zatěžování.

Cíle bakalářské práce:

Popis hysterezní smyčky a stanovení cyklické křivky “napětí – deformace“ a její srovnání s monotónní charakteristikou.

Seznam odborné literatury:

Ondráček E., Vrbka J., Janíček P., Burša J.: Mechanika těles – Pružnost a pevnost II.

Klesnil M., Lukáš P.: Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání.

Vlk M.: Dynamická pevnost a životnost.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jana Horníková, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 20.11.2013

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

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

Abstrakt:

Tato bakalářská práce je zaměřena na zpracování dat ze zkušebního stroje a na stanovení cyklické křivky napětí-deformace s pomocí vrcholů saturovaných hysterezních smyček. Před samotnou analýzou dat je v této práci rozepsána rešeršní studie zabývající se obecně únavou materiálu, posléze zaměřena na změnu mechanických vlastností, popis hysterezních smyček a cyklické křivky. Poté následuje postup analýzy dat ze zkušebního stroje, jejímž cílem je porovnání cyklické křivky s tahovou křivkou a její matematický popis.

Abstract:

This bachelor's thesis is focused on assessment of data extracted from testing machine and establishment of cyclic stress-strain curve using peaks of saturated hysteresis loops. In this thesis before data analysis itself, is written down research study about general fatigue of material, then the study is focused on change of mechanical attributes, description of hysteresis loops and cyclic curve. After that follows the procedure of data analysis extracted from testing machine aimed to compare cyclic curve with tensile curve and its mathematical description.

Klíčová slova:

Změna mechanických vlastností, hysterezní smyčka, cyklická křivka napětí-deformace.

Key words:

Change of mechanical attributes, hysteresis loop, cyclic stress-strain curve.

Bibliografická citace:

LEHNERT, O. *Zpracování napětově deformační odezvy v průběhu cyklického zatěžování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 42 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jana Horníková, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci na téma Zpracování napěťově deformační odezvy v průběhu cyklického zatěžování vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Jany Horníkové, Ph.D s použitím uvedených pramenů.

V Brně, dne.....

Ondřej Lehnert

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval své vedoucí práce, paní doc. Ing. Janě Horníkové, Ph.D., za odbornou podporu, cenné rady a připomínky během vypracovávání své bakalářské práce.

1	Únava materiálů.....	- 11 -
1.1	Hodnocení cyklického zatěžování.....	- 11 -
2	Zatěžovací stroje.....	- 13 -
3	Křivka životnosti	- 14 -
3.1	Wöhlerova křivka.....	- 14 -
3.2	Křivky životnosti pro nesouměrný cyklus	- 14 -
3.3	Křivky životnosti pro omezený počet cyklů	- 15 -
4	Mechanismus únavového procesu	- 17 -
4.1	Stádia únavového procesu.....	- 17 -
4.2	Stádium změny mechanických vlastností	- 18 -
4.3	Cyklické zpevnění, cyklické změkčení	- 19 -
5	Saturace materiálu	- 21 -
5.1	Saturovaná křivka.....	- 21 -
5.2	Hysterezní smyčky	- 22 -
5.3	Cyklická křivka napětí-deformace	- 23 -
6	Cyklické zatěžování reálného vzorku.....	- 26 -
6.1	Materiál a typ zkušební tyče	- 26 -
6.2	Předpokládané chování materiálu	- 27 -
7	Zpracování dat	- 27 -
7.1	Přepočítání přetvoření a napětí.....	- 29 -
7.2	Vykreslení hysterezních smyček.....	- 30 -
7.3	Odebrání elastické složky deformace.....	- 31 -
7.4	Vykreslení hysterezních smyček v plastické oblasti deformace	- 32 -
7.5	Vrcholy saturovaných hysterezních smyček	- 33 -
8	Cyklická křivka napětí-deformace reálného vzorku.....	- 36 -
9	Závěr.....	- 38 -
	Seznam použitých zdrojů.....	- 39 -
	Seznam použitých symbolů	- 40 -
	Seznam příloh	- 41 -
	Obsah CD.....	- 42 -

Úvod

Téměř každá reálná součást je podrobená namáhání proměnlivého charakteru, jehož konečným důsledkem jsou únavové lomy. Je tedy zřejmé, že k zajištění nejdelší životnosti materiálu je zapotřebí součást vhodně navrhnout, k čemuž slouží různé výpočtové modely. Tyto matematické popisy únavového procesu často vychází z experimentálních zkoušek a některé únavové mechanismy dosud nejsou zcela popsány a vysvětleny.

Takovým případem je i stanovení cyklické křivky napětí-deformace, kterou nelze určit jiným způsobem než právě experimentálním cyklickým zatěžováním. Cyklická křivka popisuje odezvu namáhaného materiálu po saturaci změn jeho mechanických vlastností. Vzhledem k tomu, že materiál těchto saturovaných vlastností vykazuje po značnou dobu své životnosti, stává se cyklická křivka stejně tak významnou materiálovou charakteristikou jako tahový diagram.

1 ÚNAVA MATERIÁLŮ

Společně s prvními konstrukcemi, které obsahovaly součásti podrobené cyklickému působení vnějších sil, např. osy železničních vagónů, parní stroje, je spojen i první výskyt tzv. únavových lomů. Tyto únavové lomy jsou výsledkem mikroskopických procesů probíhajících ve struktuře kovů způsobené opakovaným zatěžováním, přestože během statického namáhání kov nejeví známky porušení, tzn. napětí v materiálu je pod mezí kluzu. Postupné narušování kovu při proměnlivém zatěžování má nevratný kumulativní charakter, který se projevuje růstem makroskopické trhliny a v konečné fázi únavovým lomem. **Únavu materiálů** lze tedy definovat jako proces změn mechanických vlastností a stavu materiálu vyvolaný cyklickým namáháním [1]. První systematické experimenty v souvislosti s popisem tohoto děje prováděl německý inženýr **August Wöhler** v druhé polovině 19. století. Výsledkem jeho práce je jedna ze základních charakteristik únavového hodnocení materiálů, tzv. **Wöhlerova křivka** (obr. 3.1), udávající závislost amplitudy napětí σ_a na počtu cyklů do lomu N_f [1].

1.1 Hodnocení cyklického zatěžování

V rámci snahy o výpočtové hodnocení únavových vlastností materiálů je proces zapotřebí matematicky popsat a výsledky z cyklických zkoušek kvantifikovat. Základní pojmy (obr. 1.1), které charakterizují proces proměnlivého namáhání, jsou:

Doba kmitu je nejmenší časový úsek, v němž se opakuje stejný průběh napjatosti.

Zatěžovací cyklus je průběh napětí za jednu dobu kmitu. Každý cyklus je určen těmito charakteristickými napětími:

Horní napětí σ_h – algebraicky největší hodnota cyklického napětí

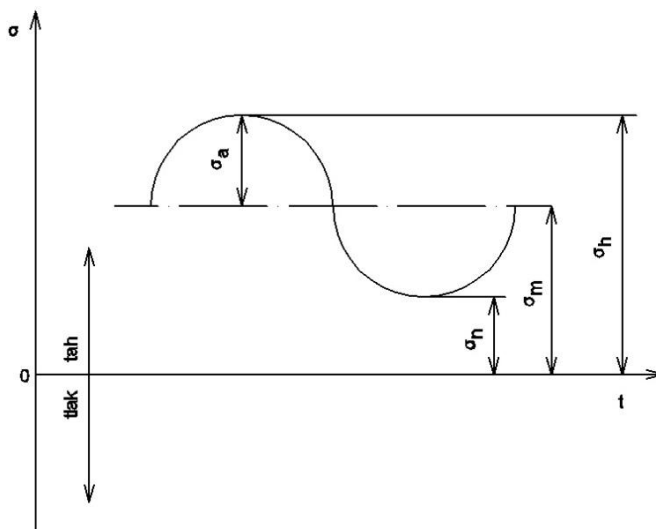
Dolní napětí σ_n – algebraicky nejnižší hodnota cyklického napětí

Střední napětí σ_m – algebraicky střední hodnota horního a dolního napětí

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h + \sigma_n}{2} \quad (1)$$

Amplituda napětí σ_a – největší hodnota proměnlivé složky kmitavého napětí, rovná se polovině rozdílu horního a dolního napětí

$$\sigma_a = \frac{\sigma_h - \sigma_n}{2} \quad (2)$$



Obrázek 1.1 Schéma zatěžovacího cyklu[1]

Vzhledem ke skutečnosti, že zatěžovací cyklus může probíhat jak v tahové, tak v tlakové oblasti, i obou zároveň, používají se k snadnějšímu popisu cyklu tzv. součinitelé nesouměrnosti cyklu:

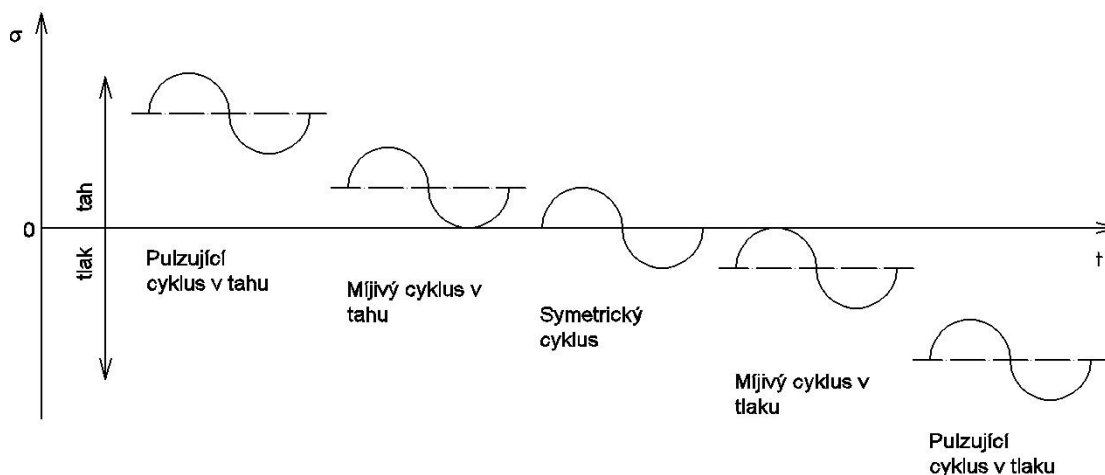
Amplitudový součinitel nesouměrnosti cyklu P – podíl amplitudy napětí a středního napětí

$$P = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \tag{3}$$

Napětový součinitel nesouměrnosti cyklu R – podíl dolního a horní napětí

$$R = \frac{\sigma_n}{\sigma_h} \tag{4}$$

Dle hodnot P a R součinitele lze snadno určit, v které oblasti se zatěžovací cyklus nachází (obr. 2.2), k přesným hodnotám napětí je však vhodnější popis pomocí charakteristických napětí.



Obrázek 1.2: Typy zatěžovacích cyklů[1]

2 ZATĚŽOVACÍ STROJE

Zkušební stroje umožňující testování cyklického namáhání vzorků musí splňovat 4 základní požadavky:

možnost dosáhnout jakéhokoliv druhu cyklického zatěžování

možnost nastavit zvolený režim zatěžování

vysoké frekvence cyklického zatížení

dodržení konstantních amplitud napětí nebo deformace během zkoušky

První a druhý požadavek umožňuje přiblížit podmínky zkoušky skutečné zátěži součásti během její funkce ve stroji. V oblasti vysokocyklické únavy, která dosahuje až 10^7 cyklů, je nutné, aby zkušební stroj dokázal pracovat s vysokými frekvencemi v rámci zkrácení doby zkoušky. Dodržení konstantních amplitud vyplývá z metodických postupů zkoušení únavy a je podstatné pro výpočtové hodnocení [1].

Kmitavého průběhu napětí v tuhém tělese lze dosáhnout:

střídavým účinkem mechanické síly

piezoelektricky

magneticky

střídavým účinkem tepelné dilatace

Cyklické mechanické síly je dosahováno klikovým mechanismem, odstředivou silou pomocí rotace nevyvážených těles, kombinací ohybu a rotace, hydraulicky a rezonancí vyvozenou mechanickým či elektromagnetickým účinkem.

Klikový mechanismus umožňuje zatěžování střídavým tahem-tlakem. Rotující klikou se vyvozuje přímočará střídavá síla působící na zkušební tyč. Velikost kmitavé síly je možno nastavit změnou excentricity kliky.

Mechanický systém střídavého ohybu a rotace je založen na rotaci zkušební tyče, která je zatížena konstantním ohybovým momentem vyvolaným pákovým mechanismem působením závaží. Napětí v jednotlivých místech průřezu se střídavě mění v každé otáčce tyče z tahové na tlakovou hodnotu, tzn., v průběhu jedné otáčky se uskuteční jeden napěťový cyklus.

Hydraulickým systémem lze dosáhnout všech typů zátěžných cyklů od pulzujícího v tlaku až po pulzující cyklus v tahu. Zkušební stroj pracuje s hydraulickým tlakem vyvinutým dvěma hydraulickými válci s pevně spojenými písty, tvořící pohyblivý rám. Tento systém je omezen pro nízké frekvence.

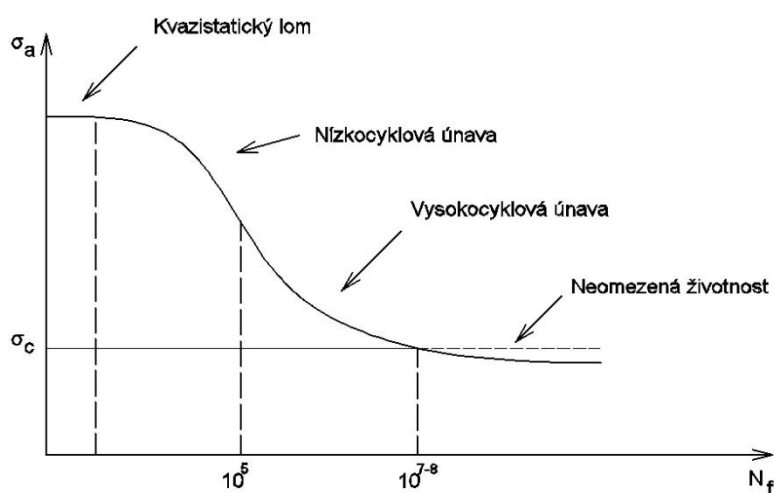
Servohydraulický systém umožňuje zatěžování všemi typy zátěžných cyklů, avšak oproti hydraulickým zkušebním strojům lze jím testovat i ve vysokofrekvenčních oblastech, a to až 250 Hz při síle 50kN. Pracuje na principu regulace průtoku oleje pomocí elektromagnetického servoventilu [1].

3 KŘIVKA ŽIVOTNOSTI

Je zřejmé, že součásti podrobené opakovanému zatěžování nevydrží po neomezeně dlouhou dobu, resp. po neomezený počet cyklů. Každý materiál má svoji vlastní křivku životnosti, po jejíž překročení dochází k únavovému porušení. Tato křivka je závislá na amplitudě a střední hodnotě zatěžování.

3.1 Wöhlerova křivka

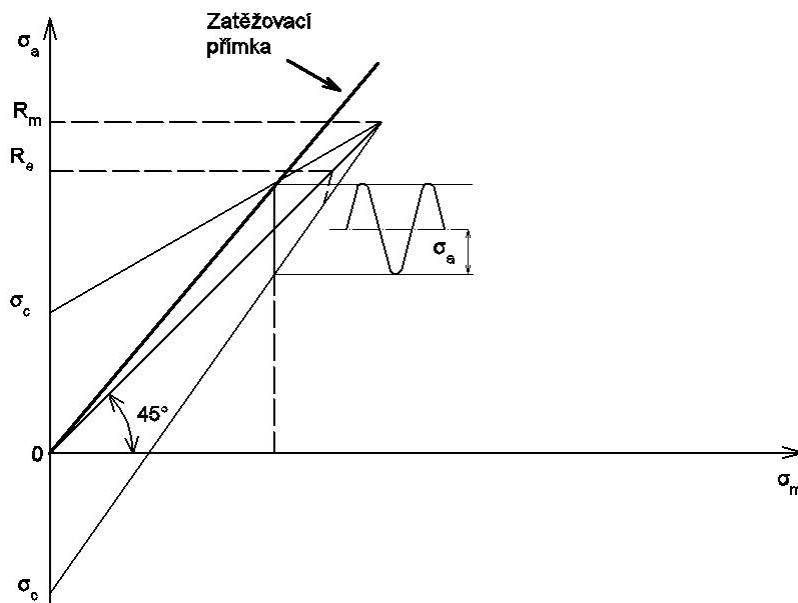
Základním typem křivky životnosti je **Wöhlerova křivka** (obr. 3.1), která rozděluje typ únavy podle počtu cyklů do lomu N_f a z níž se odvozuje hlavní únavový parametr **mez únavy** σ_c . Dosahuje-li amplituda napětí σ_a na součásti, anebo má-li menší hodnotu než mez únavy, je smluvně stanoveno, že vydrží po neomezený počet cyklů, než dojde k meznímu stavu únavového lomu [2].



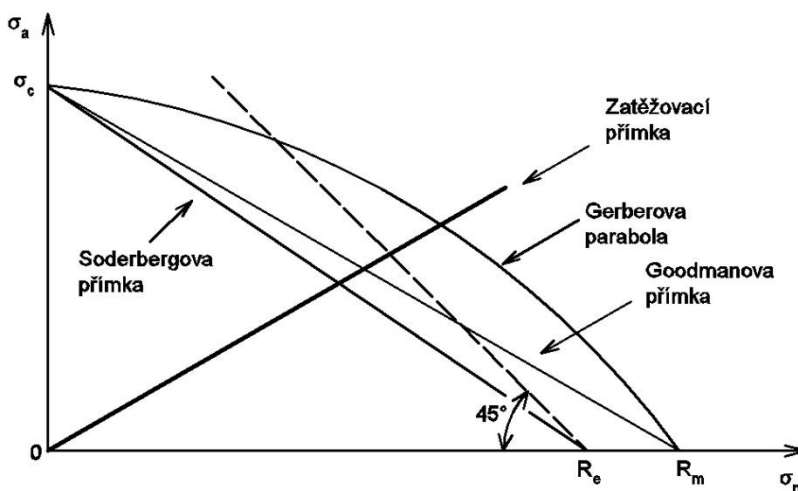
Obrázek 3.1: Úplná Wöhlerova křivka[3]

3.2 Křivky životnosti pro nesouměrný cyklus

Wöhlerova křivka a s ní spojená mez únavy je však empiricky stanovena pouze pro souměrné zatěžovací cykly, proto nelze z ní určovat amplitudu napětí nebo počet cyklů do lomu pro cykly s nenulovou střední hodnotou napětí. V technické praxi se užívá k tomuto účelu Smithův (obr. 3.2) či Haighův diagram (obr. 3.3), z nichž se podle různých, méně nebo více konzervativních, kritérií (např. Goodmanova přímka, Gerberova parabola, Soderbergova přímka) přepočítává hodnota středního napětí a amplitudy napětí ze souměrného cyklu Wöhlerovy křivky v oblasti neomezené životnosti [3].



Obrázek 3.2: Konstrukce Smithova diagramu[3]



Obrázek 3.3: Konstrukce Haighova diagramu[3]

Goodmanovo kritérium pro neomezenou životnost

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_c} + \frac{\sigma_m}{R_m} = 1 \tag{5}$$

3.3 Křivky životnosti pro omezený počet cyklů

Není však vždy potřeba konstruovat součásti pro neomezený počet cyklů. S ohledem na hospodárnější výrobu mnohdy postačí, když nám součást vydrží omezenou dobu. V této oblasti tzv. časové meze únavy je křivka životnosti definována podle samotného Wöhlera nebo O.H. Basquina.

Oblast vysokocyklové únavy dle Wöhlera

$$\sigma_{ar} = A(N_f)^B \tag{6}$$

Oblast vysokocyklové únavy dle Basquina

$$\sigma_{ar} = \sigma_f'(2N_f)^b \tag{7}$$

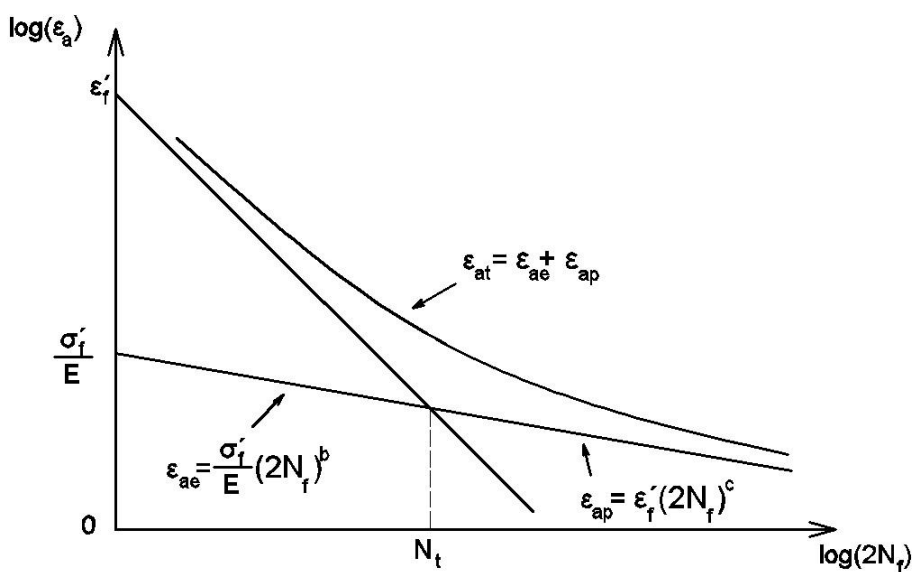
kde σ_f' je součinitel únavové pevnosti, b je exponent únavové životnosti. Manson-Coffinův vztah popisuje závislost amplitudy plastického poměrného přetvoření ϵ_{ap} na počtu cyklů do lomu N_f v oblasti nízkocyklové únavy.

$$\epsilon_{ap} = \epsilon_f'(2N_f)^c \tag{8}$$

kde ϵ_f' je součinitel únavové tažnosti, c je součinitel únavové životnosti. Při únavovém zatěžování v nízkocyklové oblasti je výhodnější aplikovat amplitudu celkového poměrného přetvoření ϵ_{at} , která se skládá z elastické a plastické složky (obr. 3.4).

$$\epsilon_{at} = \epsilon_{ae} + \epsilon_{ap} = \frac{\sigma_f'}{E}(2N_f)^b + \epsilon_f'(2N_f)^c \tag{9}$$

Je zřejmé, že při malých počtech cyklů převládá plastická složka, zatímco u velkých počtů cyklů bude materiál převážně pružně deformován. Stejnému rozsahu plastické a elastické deformace odpovídá tranzitní počet cyklů N_t [3,4].



Obrázek 3.4: Manson-Coffinovy křivky životnosti[3]

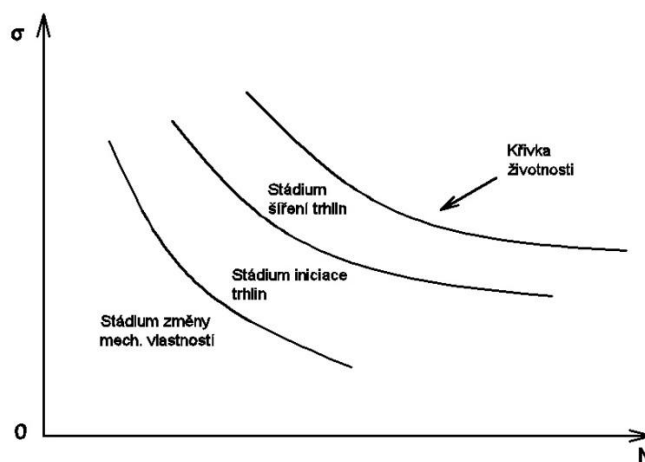
4 MECHANISMUS ÚNAVOVÉHO PROCESU

Během cyklického zatěžování je napětí z makroskopického hlediska často hluboko pod mezí kluzu. Deformace je přímo úměrná zátěži, vzdálenosti mezi atomy v krystalové mřížce se lineárně mění a chování pod napětím lze popsat pomocí Hookova zákona $\varepsilon=f(\sigma)$. Tento mechanický model chování materiálu odpovídá pouze statickému, kvazistatickému či nízkocyklovému zatěžování.

Homogenita reálných součástí však neodpovídá ideálnímu matematickému modelu, naopak, vyskytují se v jejich struktuře vměstky, precipitáty, oxidy, karbidy, na povrchu otěry, škrábance a další mechanické nebo chemické druhy opotřebení. Tyto defekty vyvolávají mikroskopickou koncentraci napětí na jejich rozhraní se základním materiálem, což má za následek překonání meze kluzu a tedy plastickou deformaci, která je obecně dána pohybem dislokací. Tyto malé deformace jsou z hlediska statického zatížení zcela zanedbatelné, avšak při opakovaném zatěžování dochází k postupné degradaci materiálu, změně jeho vlastností, iniciaci a šíření trhliny [1].

4.1 Stádia únavového procesu

Konečným důsledkem cyklického zatěžování je charakteristický únavový lom, typický svými lasturovými růstovými liniemi. Než však dojde k dolomení součásti, předchází tomu další strukturní změny materiálu, které vzhledem k tomu, že se odehrávají uvnitř materiálu, jsou pouhým okem neviditelné. Únavový proces se rozděluje na 3 stádia (obr. 4.1) [1,3]:



Obrázek 4.1: Stádia únavového procesu[2]

I. stádium – změny mechanických vlastností

V 1. stádiu se mění konfigurace mřížkových poruch, což má za následek změny mechanických a fyzikálních vlastností v celém objemu materiálu. Dochází k cyklickému zpevnění, či cyklickému změkčení, záleží na předchozím tepelně mechanickém zpracování daného materiálu.

II. stádium – iniciace trhlin

Po ukončení procesu změn mechanických vlastností (cca po 50 zatěžovacích cyklech) nastává stádium nukleace (vzniku) trhlin. Opotřebení společně s určitou drsností povrchu má za následek, že mikrotrhliny vznikají právě na povrchové oblasti součásti, mohou se však vyskytnout i uvnitř v místech, kde dochází ke koncentraci napětí.

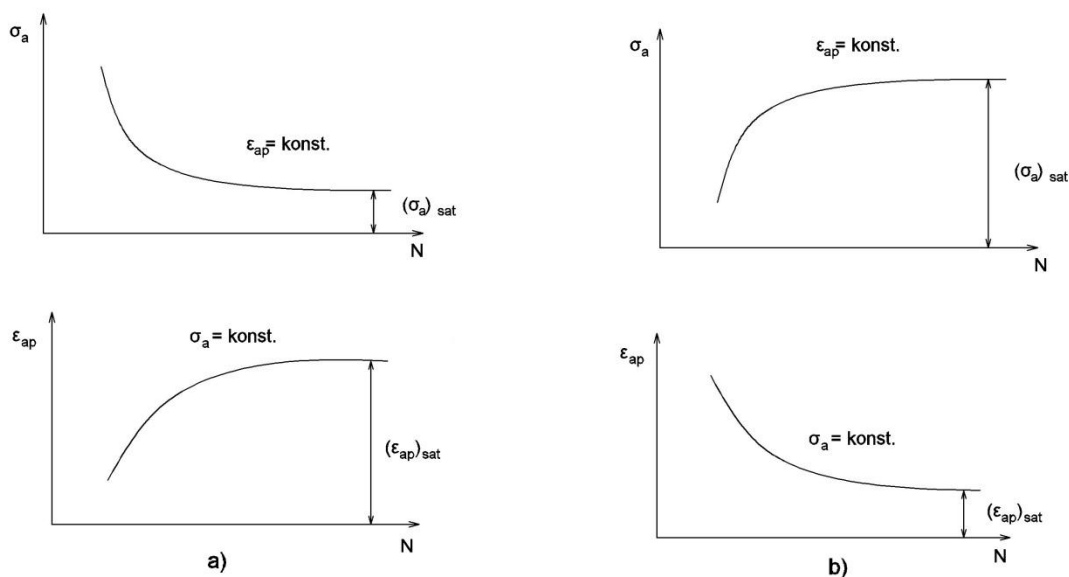
III. stádium – šíření trhlin

Jak trhliny vzniklé důsledkem únavového procesu, tak trhliny, které již v materiálu existovaly, se v tomto stádiu šíří podle zákonitostí lomové mechaniky. Horní hranici oblasti šíření trhlin představuje křivka únavy, resp. křivka životnosti, při jejímž dosažení dochází právě k únavovému lomu.

4.2 Stádium změny mechanických vlastností

Během cyklického zatěžování kovů se mění mikrostruktura materiálu, což má za následek změny v mechanických, elektrických, magnetických a jiných fyzikálních vlastnostech. Tyto změny jsou nevratné a mají sytící charakter, přičemž nejvýrazněji se projevují na počátku únavového procesu. V průběhu dalšího zatěžování změny ustanou nebo již je nejsme schopni přístroji zaznamenat [1,2,5].

Nejdůležitější materiálovou charakteristikou je odpor materiálu proti deformaci, resp. elastické deformaci. Tato vlastnost je vyjádřena **modulem pružnosti E** empiricky získaná z tahového diagramu. Důsledkem opakované zátěže je změna hodnoty modulu pružnosti oproti jednoosé tahové zkoušce, a to v kladném, nebo i záporném směru. U kovů, které byly vyžehány, je typické **cyklické zpevnění** (obr. 4.2a), tzn., odpor vůči deformaci se zvětšuje. **Cyklické změkčení** (obr. 4.2b) je charakteristické pro materiály, jež podstoupily dřívější mechanicko-tepelné zpevnění, např. martenzitickou přeměnou, precipitační či deformační zpevnění. Z praktického hlediska je jev cyklického změkčení nežádoucí [2,5,6].



Obrázek 4.2: Cyklické zpevnění a změkčení při tvrdém a měkkém zatěžování[2]

Experimentálně bylo dokázáno pravidlo umožňující s určitou pravděpodobností předpovědět, zda dojde v materiálu k cyklickému zpevnění či změkčení. Toto pravidlo se řídí hodnotami konvenčních tahových parametrů, mezi pevností R_m a mezi kluzu R_e .

Je-li $\frac{R_m}{R_e} > 1,4$, dochází k cyklickému zpevnění.

Je-li $\frac{R_m}{R_e} < 1,2$, dojde k cyklickému změkčení.

Leží-li hodnota podílu meze pevnosti a meze kluzu mezi hodnotami 1,2 – 1,4, nelze předpovědět budoucí chování během zatěžování. Materiál by však měl být stabilní, bez výrazného zpevnění či změkčení. Toto pravidlo bylo empiricky stanoveno pouze pro nízkocyklovou únavu [2,3].

Doba změny mechanických vlastností je výrazně ovlivněna charakterem skluzu daného materiálu. Kovy je možno rozdělit na dvě skupiny:

I. kovy s vlnitým charakterem skluzu (např. Cu, Al, Ni, Fe, uhlíkové oceli)

II. kovy s planárním charakterem skluzu (např. austenitické oceli, α -mosaz)

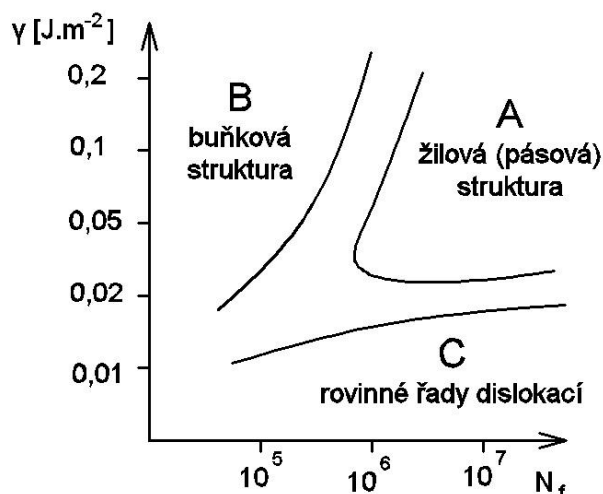
Vlnitý charakter skluzu je díky kubicky centrované krystalové mřížce (bcc mřížka) typický svým nízkým odporem příčného skluzu dislokací, což má za následek ustálení změn mechanických vlastností již po několika procentech z celkové životnosti. Naopak plošně centrovaná mřížka (fcc mřížka) s planárním charakterem skluzu vykazuje vysoký odpor skluzu dislokací a může způsobovat ustálení změn až v 40% z celkového počtu cyklů do lomu [2].

Výsledné vlastnosti v saturovaném stavu jsou určeny pohybem, vznikem a interakcemi dislokací jak s vzájemnými, tak s jinými typy poruch krystalové mřížky. Pohyb dislokací je výrazně ovlivněn přítomností cizích částic, precipitátů i hranicemi zrn. V průběhu cyklické deformace tedy dochází k změnám konfigurace a hustoty dislokací a zároveň ke změnám morfologie precipitátů difúzními nebo jinými procesy [2,6].

4.3 Cyklické zpevnění, cyklické změkčení

Je zřejmé, že pokud dochází k trvalým změnám mechanických vlastností, musí i docházet k trvalé plastické deformaci. Z této myšlenky vyplývá fakt, že v důsledku cyklického zatěžování budou dislokační struktury měnit svoji hustotu a rozložení. Žíhané materiály jsou typické malou hustotou dislokací (zpravidla 10^6 až 10^8 cm^{-2}), naopak dislokační struktura v tvářeném stavu vykazuje vysokou hustotu dislokací (10^9 až 10^{10} cm^{-2} pro vysoké stupně tváření). V saturovaném stavu závisí výsledné dislokační struktury jak na amplitudě zatěžování, tak i na charakteru skluzu daného materiálu, tedy stupni obtížnosti příčného skluzu [2,3].

Na základě experimentálních dat je možné typy dislokačních struktur vyjádřit ve schématickém diagramu (obr. 4.3), jenž propojuje typy struktur s energií vrstevné chyby γ , která přímo souvisí s obtížností příčného skluzu, s celkovým počtem cyklů do lomu, jež závisí na amplitudě napětí [2,3].



Obrázek 4.3: Typy dislokačních struktur[2]

V oblasti A, tedy oblasti vyšších energií vrstevné chyby a vyšších životností, jsou výslednou strukturou shluky, páry dislokací nebo tzv. perzistentní skluzové pásy.

Tyto saturované oblasti však nejsou navzájem propojeny, ale vyskytují se, a to zejména u kovů s velmi vysokými energiemi vrstevné chyby, v oblastech mezi shluky tzv. dislokační dipóly a smyčky (o průměru řádově stovek Å).

Oblast B je typická buňkovou strukturou, jejíž stěny jsou utvořeny vysokou hustotou dislokací. I v této oblasti se vyskytují dislokační dipóly a smyčky.

Oblast C, nízkých energií vrstevné chyby, obsahuje celý rozsah životností a je charakterizována rovinnými řadami dislokací, které se díky téměř nemožnému příčnému skluzu nacházejí u svých skluzových rovin. Dislokační smyčky se v této oblasti vyskytují pouze výjimečně.

„Tento základní diagram typů struktur platí, striktně vzato, jen pro případy homogenní napjatosti a pro jednofázové kovy s FCC mřížkou. Lze jej však jako základního schématu používat i pro nehomogenní napjatost a pro jiné typy kovů [2].“

Podstatou metod zpevňujících materiály je vytvoření struktury, která obsahuje účinné překážky pro pohybující se dislokace. Deformační zpevnění blokuje pohyb dislokací vlastní dislokační strukturou, precipitační zpevnění je dáno přítomností precipitátů, které omezují pohyb dislokací, martenzitické zpevnění je založeno na bezdifúzní transformaci s výslednou jemnozrnnou strukturou o vysoké hustotě dislokací, což velice znesnadňuje pohyb dislokací. K **cyklickému změkčení** dochází tehdy, když jsou v průběhu cyklického zatěžování odstraněny nebo alespoň oslabeny tyto překážky. Aby mohlo dojít k cyklickému, je nutnou podmínkou střídavá plastická deformace v tahu i tlaku. Je-li splněna tato podmínka, oboustranný pohyb dislokací vede k redistribuci dislokační struktury, která klade menší odpor pohybu jednotlivých dislokací[2]. Cyklické zpevnění nebo změkčení se projeví na velikosti mezních hodnot tahového diagramu. Opakovaná zátěž vyvolává zkracování délky Lüdersovy-Černovovy deformace na tahovém diagramu nízkouhlíkové oceli. S počtem cyklů se mění i tvrdost materiálu, obzvláště výrazně na povrchu vzorků, a může se i měnit lomová houževnatost při statickém zatížení. Velikost těchto změn je zároveň funkcí napěťové amplitudy. Cyklické zatěžování způsobuje změny elektrické vodivosti, vnitřního tlumení, magnetických vlastností, modulu pružnosti apod. [5]

5 SATURACE MATERIÁLU

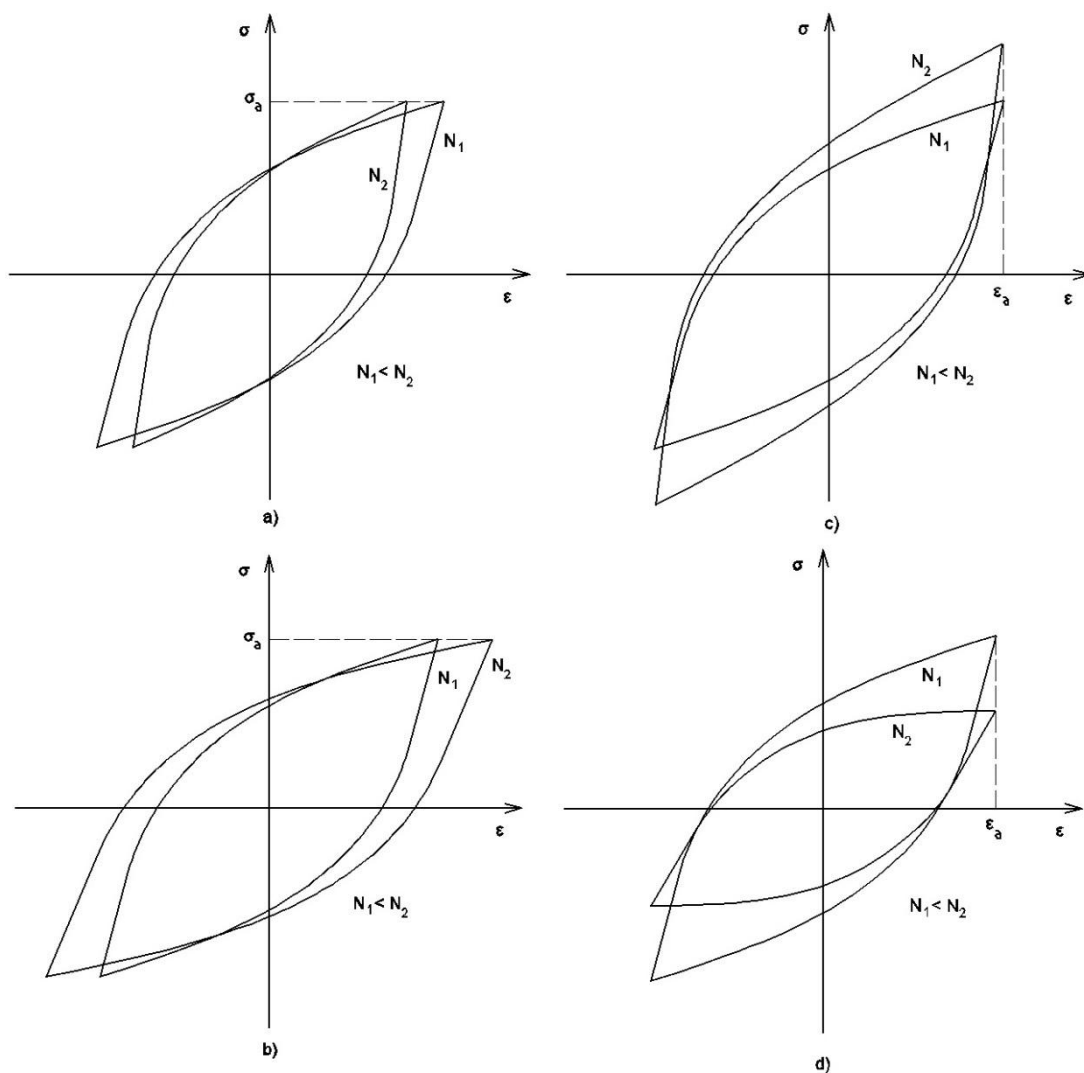
Během cyklického zatěžování se změny mechanických, i jiných, vlastností materiálu snižují, až dochází k saturaci, tzn. ustálení. O tom, kdy dojde k ukončení procesu saturace, rozhoduje v největší míře struktura materiálu, ale také velikost vnějšího zatížení.

5.1 Saturovaná křivka

Odpor materiálů proti cyklické deformaci se může v průběhu zatěžování měnit, růst nebo klesat, a to v závislosti na typu materiálu, podmínkách zatěžování a teplotě. U značného množství typů kovů tyto změny po jistém počtu cyklů končí, resp. jsou zanedbatelné, avšak u další skupiny kovů k této „saturaci“ nedochází a mění se mechanické vlastnosti v průběhu celé životnosti. Lze tedy rozdělit kovové materiály podle tohoto hlediska na dva základní typy:

Saturující – na začátku zatěžování jsou změny výrazné, avšak v určité části své životnosti jsou změny tak malé, že je lze zanedbat. Typickým příkladem je vyžíhaná Cu, Ni, nízkouhlíková ocel.

Nesaturující – změny mechanických vlastností probíhají po celou životnost materiálu. Nesaturující kovy se vyznačují planárním skluzem, např. α -mosaz, která po celou životnost zpevňuje, nebo 9%Cr ocel, která změkčuje [2,3]. Nejadekvátnější způsob detekce změn mechanických vlastností je měření parametrů hysterezních smyček přímo za chodu zkušebního stroje. Moderní elektronicky řízené stroje umožňují udržovat konstantní amplitudu síly, tzv. **měkké zatěžování**, nebo konstantní amplitudu celkové, či dokonce plastické deformace, tzv. **tvrdé zatěžování**. V případě cyklického zatěžování konstantní amplitudou síly, tedy konstantní amplitudou napětí, se může měnit pouze amplituda deformace. Pokud amplituda deformace s počtem cyklů roste, dochází k cyklickému změkčení (obr. 5.1a). Cyklické zpevnění je dáno snížením amplitudy deformace (obr.5.1b). Během zatěžování konstantní amplitudou deformace, jak celkové, tak plastické, může amplituda napětí růst, odpovídá cyklickému zpevnění (obr. 5.1c), nebo klesat, odpovídá cyklickému změkčení (obr. 5.1d). Často je cyklické plastické chování typické svým nemonotónním průběhem. Cyklické zpevnění může být vystřídáno cyklickým změkčením, v závislosti právě na amplitudě deformace. Stádium zpevňování či změkčování je ukončeno saturací [3,5].

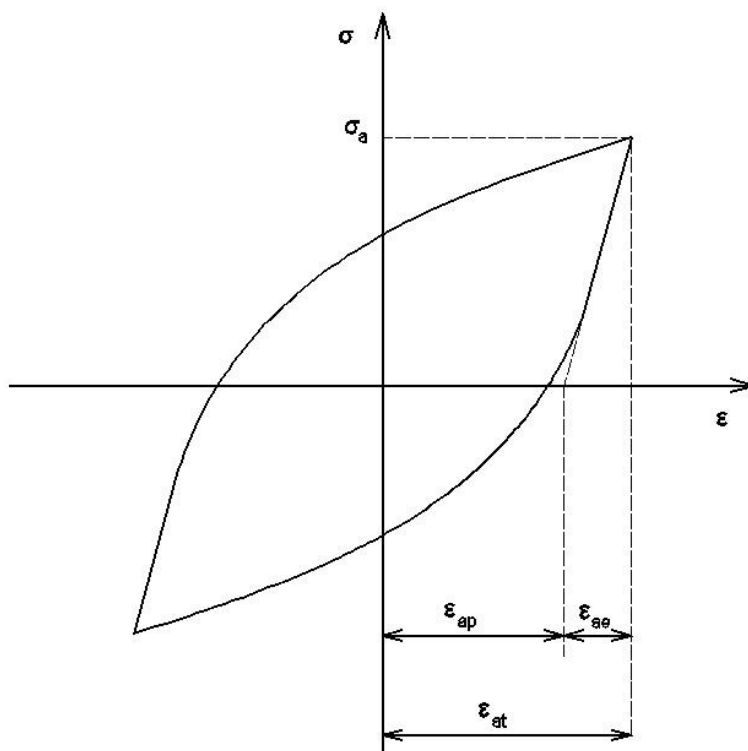


Obrázek 5.1: Schéma cyklického zpevnění a změkčení při měkkém a tvrdém zatěžování[6]

5.2 Hysterezní smyčky

Plocha a tvar hysterezních smyček (obr. 5.2) se mění v závislosti právě na tom, jestli dochází k cyklickému změkčování či zpevnování během tvrdého nebo měkkého zatěžování, a je rovna deformační práci přeměněné za jeden cyklus na tepelnou energii. Celkovou energii do lomu lze brát jako součin počtu cyklů do lomu a plochy saturované hysterezní smyčky, jelikož dochází k saturaci již v malé části životnosti. Na tomto principu jsou založeny energetické teorie únavového procesu, díky čemuž se plocha saturované smyčky stává významnou veličinou. Plocha hysterezní smyčky je obecně dána vztahem [3]:

$$\Delta W = \iint d\sigma d\varepsilon_p = \oint \sigma(\varepsilon_p) d\varepsilon_p \quad (10)$$



Obrázek 5.2: Hysterezní smyčka[2]

Obloukovitý tvar hysterezních smyček je způsoben anelastickým chováním materiálu. Během pružné deformace tuhého tělesa dochází k změně jeho objemu. Lze tedy předpokládat při dostatečně rychlých deformacích adiabatický charakter děje. Při prodlužování se objem zvětšuje a teplota klesá, naopak při stlačování roste. Tyto teplotní změny způsobují opožděné chování za Hookovým zákonem. Další příčinou anelastického chování je tzv. Snoekův jev, který způsobuje přemísťování intersticiálních atomů do deformací zvýhodněných poloh. Tento jev je časově závislého difúzního charakteru. Celková amplituda poměrného přetvoření ε_{at} hysterezních smyček se skládá z plastické a elastické složky.

$$\varepsilon_{at} = \varepsilon_{ap} + \varepsilon_{ae} \quad (11)$$

Vyjádřením pružné složky za pomoci Hookova zákona dostaneme rovnici ve tvaru[7]:

$$\varepsilon_{at} = \varepsilon_{ap} + \frac{\sigma_a}{E} \quad (12)$$

5.3 Cyklická křivka napětí-deformace

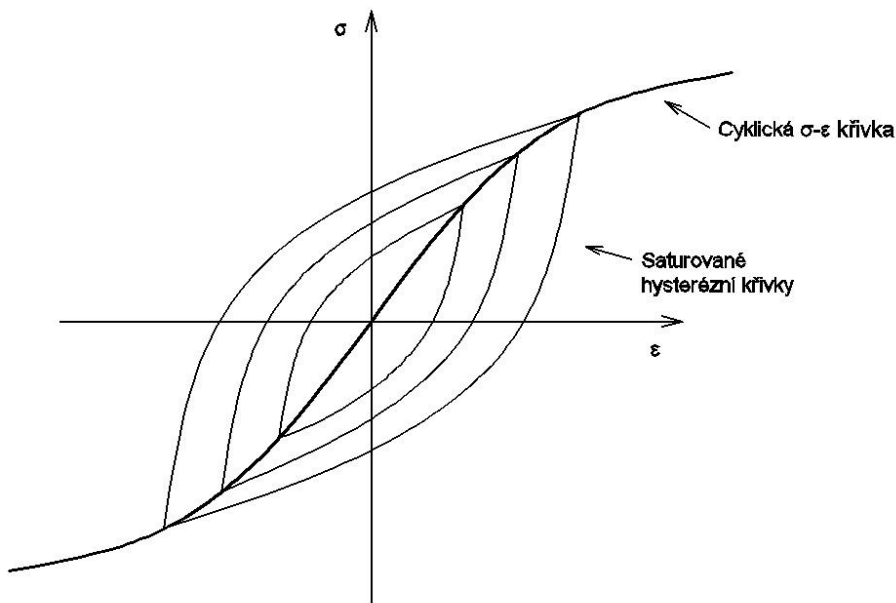
Po ukončení procesu cyklického změkčení nebo zpevnění se mechanické vlastnosti dále nemění, amplituda napětí a deformace dosáhne konstantních hodnot a vytvoří se saturovaná hysterezní smyčka, přičemž určitým hodnotám amplitudy odpovídají určité hysterezní smyčky. Proložení křivky body zvratu těchto stabilních křivek, zobrazených v jednom diagramu, dostaneme závislost mezi amplitudou napětí a amplitudou plastické deformace (obr. 5.3) [3,7].

Tato křivka se nazývá **cyklická křivka napětí-deformace**. Jedná se o velmi významnou materiálovou charakteristiku, jelikož popisuje odezvu napětí v materiálu na

plastickou deformaci po značnou část jeho životnosti. „Je možno konstatovat, že *cyklická křivka napětí – deformace je z hlediska únavových vlastností jednou z nejdůležitějších charakteristik materiálu, a to charakteristikou stejně významnou, jako je tahový diagram (jednosměrná křivka napětí – deformace) pro jednosměrnou deformaci* [2].“ Tuto materiálovou charakteristiku je možno experimentálně určit na sérii vzorků nebo zkouškami s jediným vzorkem a vyjádřit rovnicí [5]:

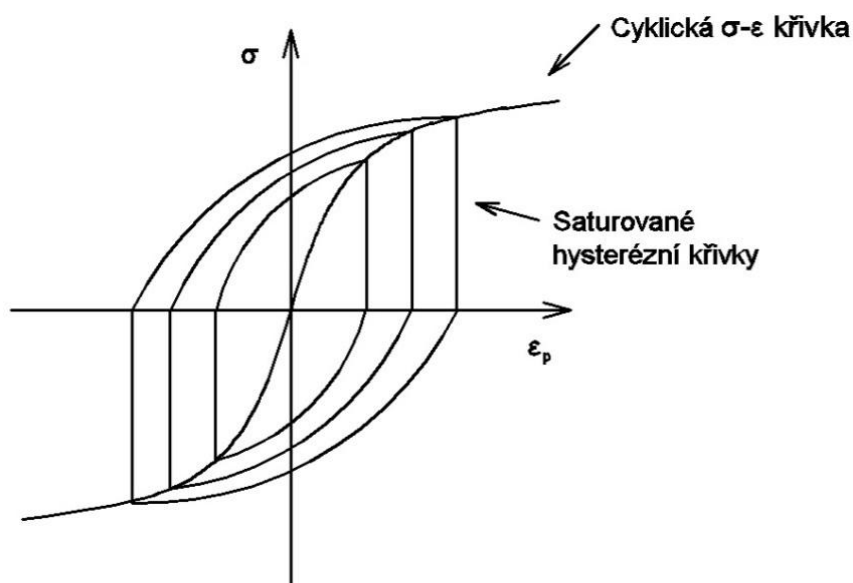
$$\sigma_a = \kappa(\varepsilon_{ap})^{n'} \tag{13}$$

kde κ je materiálová charakteristika vyjádřená jako podíl součinitele únavové pevnosti σ_f' a únavové tažnosti ε_f' , a n' je součinitel cyklického deformačního zpevnění.



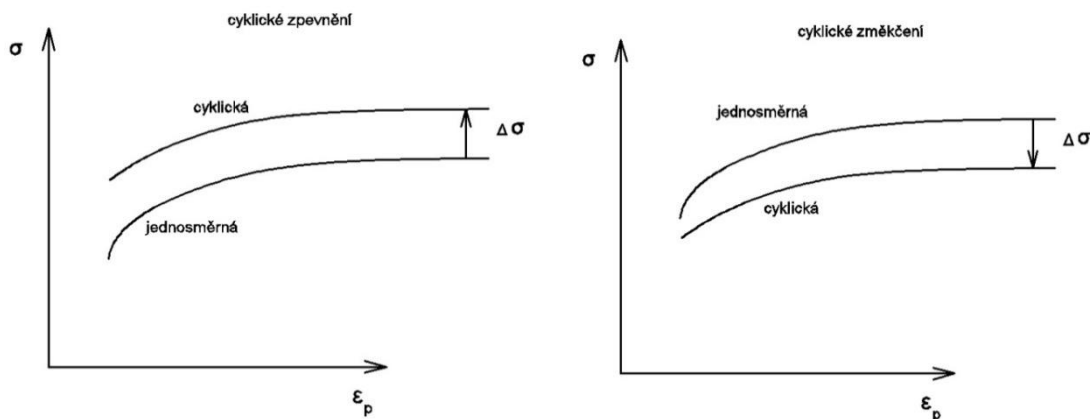
Obrázek 5.3: Cyklická křivka napětí-deformace[5]

Odebráním elastické složky deformace získá cyklická křivka tvar vhodný pro popis pomocí rovnice (12).



Obrázek 5.4: Cyklická křivka v závislosti na plastické deformaci[2]

Podobně jako cyklická křivka vyjadřuje závislost napětí na deformaci po saturaci, popisuje tahový diagram tutéž závislost v prvním čtvrtcyklu. Je tedy zřejmé, že poloha těchto křivek jednoznačně určuje, dojde-li v materiálu k cyklickému změkčení, anebo zpevnění. Leží-li tahová křivka pod cyklickou, napětí se v průběhu saturace zvyšuje a materiál zpevňuje. V opačném případě se jedná o cyklické změkčení. Celková velikost zpevnění nebo změkčení $\Delta\sigma$ je určena rozdílem mezi tahovou a cyklickou křivkou (obr. 5.4) [2,3,7].



Obrázek 5.5: Srovnání tahové křivky a cyklické křivky napětí-deformace

K experimentálnímu stanovení cyklické křivky napětí – deformace se lze dopracovat dvojím způsobem:

Z definice: Pro režim tvrdého zatěžování se na sérii vzorků stanoví saturované křivky a odečtou ustálené hodnoty amplitudy napětí. Každý vzorek je tedy zatěžován jinou konstantní amplitudou deformace. Pro režim měkkého zatěžování se naopak zjišťují ustálené hodnoty amplitudy plastické deformace. Předpokladem je nezávislost cyklické křivky na režimu zatěžování.

Zkráceně: Tato metoda užívá pouze jediný vzorek ke stanovení cyklické křivky pouze v oblasti nízkocyklové únavy. Důvodem je časová náročnost a experimentální náročnost. Podstatou je postupné snižování či zvyšování amplitudy zatěžování, přičemž pokaždé musí dojít k saturaci [2,3].

6 CYKLICKÉ ZATĚŽOVÁNÍ REÁLNÉHO VZORKU

Zkušební tyč byla testována servo-hydraulickým zatěžovacím strojem značky BISS (obr. 6.1), umožňující provádět únavové zkoušky řízením konstantní síly až do 50kN a 400Nm, i řízením konstantní amplitudy deformace. Cyklické zkoušení bylo prováděno na více vzorcích, každý testován jinou hodnotou amplitudy napětí.

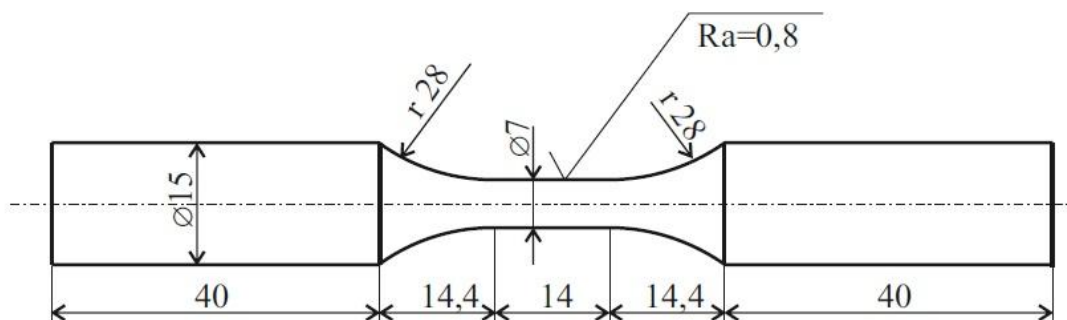


Obrázek 6.1: Servo-hydraulický zkušební stroj

6.1 Materiál a typ zkušební tyče

Vzorek je označen dle mezinárodní normy EN 10277-2 **S235JRC+C**. Z tohoto označení lze vyčíst, že se jedná o ocel pro ocelové konstrukce s nárazovou prací 27J při 20°C, tvářená za studena. Hodnota smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ je 355MPa. Minimální hodnota meze pevnosti R_m je 470MPa.

Zkušebním vzorkem je tyč kruhového průřezu (obr. 6.2). Měřící extenzometr se vzdáleností čidel 12,5mm je upnut do místa nejmenšího průměru zkušební tyče.



Obrázek 6.2: Zkušební tyč

6.2 Předpokládané chování materiálu

Jedná se o ocel třídy 11, nelegovaná s krystalovou mřížkou kubicky centrovanou, která umožňuje snadný příčný skluz dislokací. K saturaci mechanických vlastností by tedy mělo dojít již po několika procentech životnosti. Zkušební tyč byla tvářena za studena, což může způsobit vytvoření určité dislokační struktury. Poměr meze pevnosti a meze kluzu je 1,32. Nelze tedy předpovědět chování vzorku v průběhu zatěžování.

7 ZPRACOVÁNÍ DAT

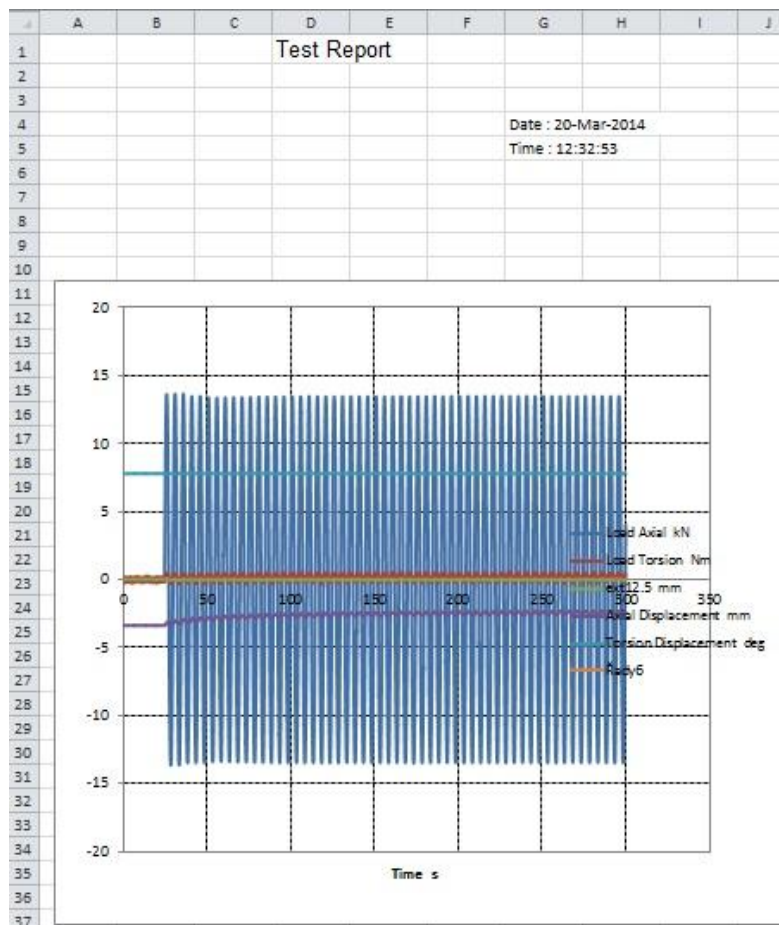
Zkušební stroj exportoval záznam zkoušení (viz příloha) do formátu aplikace Microsoft EXCEL. První šestičíslí označuje datum experimentu dle předlohy Rok:Měsíc:Den, za velkým písmenem „F“ je označení pořadí zkoušení, poté následuje označení únavové zkoušky „fat“ (zkrácenina angl. slova fatigue – únava) a číslo počátečního cyklu daného souboru. Za pomlčkou se nachází opět výpis data zkoušky dle předlohy Den:Měsíc:Rok a nakonec je čas výpisu dat dle předlohy Hod:Min:Sek. Z jednotlivých záznamů lze vyčíst podrobnosti o průběhu únavové zkoušky.

Jako vzorový příklad zpracování jednotlivých zkoušení byl zvolen experiment s pořadovým číslem 11 ze dne 20. 3. 2014 (označení souboru tedy „140320F11fat-20032014_155447“ apod.).

Otevřením tohoto EXCEL souboru se lze dovědět v záložce „TestDescription“ podrobnosti o zkoušení (obr. 7.1), čas zahájení, rozsahy zatížení, rozsahy měření čidel extenzometru a osového posuvu čelistí zkušebního stroje, amplitudu zatížení a frekvenci zatěžování. V případě této zkoušky byl zkušební vzorek zatěžován amplitudou 13,5kN (odpovídá cca 350,8MPa) s frekvencí 0,2 Hz. Záložka „Report1“ zobrazuje grafické znázornění osové síly, krouticího momentu, posuvu čidel extenzometru a osového posuvu čelistí v závislosti na časovém průběhu experimentu (obr. 7.2). Poslední záložky s názvem „Sheet1,Sheet2“ atd. zahrnují samotná data z průběhu zkoušky (obr. 7.3). Tyto soubory pocházející přímo ze zatěžovacího stroje zůstaly nepozměněny.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Test Description							
2								
3								
4	Date :	20-Mar-2014						
5	Time :	12:32:53						
6	Number of Actuators :	2						
7	Number of LOG Channels :	11						
8	Load Axial Range	70.25468 kN						
9	Load Tor: Range	2006.277 Nm						
10	Ext 25 Range	12.54405 mm						
11	ext12.5 Range	2.502233 mm						
12	Axial Dis Range	85 mm						
13	Torsion [Range	55 deg						
14	Torsion S Range	55 deg						
15	SP-Axial Range	70.25468						
16	SP-Torsic Range	55						
17	CY-Axial Range	0						
18	CY-Torsic Range	0						
19								
20								
21								
22	140320F11fat							
23		140320F11at						
24								
25	load							
26		+13.5kN						
27								
28	frequency							
29		f = 0.2 Hz						
30								

Obrázek 7.1: Záznam cyklického zkoušení - popis zkoušky



Obrázek 7.2: Záznam cyklického zkoušení - grafické vyjádření

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Time	Load Axial	Load Torsi	Ext 25	ext12.5	Axial Disp	Torsion Di	Torsion St	SP-Axial	SP-Torsion	CY-Axial	CY-Torsion
2	sec	kN	Nm	mm	mm	mm	deg	deg				
7467	74,6573	-0,3501	0,2888	-12,8325	-0,0029	-2,7745	7,794	21,658	-0,4809	7,794	10	0
7468	74,6673	-0,1992	0,2455	-12,8325	-0,0026	-2,7728	7,794	21,658	-0,3112	7,794	10	0
7469	74,6773	-0,0182	0,1889	-12,8325	-0,0024	-2,7713	7,794	21,658	-0,1417	7,794	10	0
7470	74,6873	0,1471	0,2015	-12,8325	-0,0021	-2,7697	7,794	21,658	0,0225	7,794	10	0
7471	74,6973	0,32	0,1582	-12,8325	-0,0018	-2,768	7,794	21,658	0,1922	7,794	10	0
7472	74,7073	0,4784	0,1821	-12,8325	-0,0015	-2,7666	7,794	21,658	0,3617	7,794	10	0
7473	74,7173	0,6581	0,2353	-12,8325	-0,0012	-2,7646	7,794	21,658	0,5313	7,794	10	0
7474	74,7273	0,8303	0,2696	-12,8324	-0,0011	-2,7632	7,794	21,658	0,7009	7,794	10	0
7475	74,7373	0,988	0,1551	-12,8325	-0,0007	-2,7614	7,794	21,658	0,8701	7,794	10	0
7476	74,7473	1,153	0,2127	-12,8325	-0,0004	-2,7599	7,794	21,658	1,0394	7,794	10	0
7477	74,7573	1,3204	0,1433	-12,8324	-0,0002	-2,7582	7,794	21,658	1,2084	7,794	10	0
7478	74,7673	1,48	0,3087	-12,8325	0,0001	-2,7567	7,794	21,658	1,3773	7,794	10	0
7479	74,7773	1,6452	0,2735	-12,8325	0,0004	-2,755	7,794	21,658	1,5459	7,794	10	0
7480	74,7873	1,7894	0,2054	-12,8324	0,0007	-2,7536	7,794	21,658	1,7144	7,794	10	0
7481	74,7973	1,9495	0,1653	-12,8325	0,0011	-2,7519	7,794	21,658	1,8824	7,794	10	0
7482	74,8073	2,1273	0,313	-12,8325	0,0011	-2,7504	7,794	21,658	2,0503	7,794	10	0
7483	74,8173	2,2871	0,2696	-12,8324	0,0014	-2,7489	7,794	21,658	2,2179	7,794	10	0
7484	74,8273	2,4357	0,2746	-12,8324	0,0017	-2,7475	7,794	21,658	2,385	7,794	10	0
7485	74,8373	2,6102	0,2537	-12,8324	0,0019	-2,7458	7,794	21,658	2,5518	7,794	10	0
7486	74,8473	2,7547	0,274	-12,8324	0,0023	-2,7446	7,794	21,658	2,7181	7,794	10	0
7487	74,8573	2,9175	0,2344	-12,8324	0,0025	-2,743	7,794	21,658	2,8841	7,794	10	0

Obrázek 7.3: Záznam cyklického zkoušení – podrobnosti

7.1 Přepoččet přetvoření a napětí

Potřebná data byla zkopírována do jediného souboru aplikace Microsoft EXCEL s názvem „Data_zpracovani“ (viz příloha). Samotné zkoušení nezačíná už od začátku zaznamenávání dat, ale obvykle přibližně po 20-40 vteřinách. Tento časový úsek byl rovněž odebrán, za účelem hodnocení dat až při skutečném zahájení cyklického zkoušení.

Ke grafickému znázornění průběhu zkoušky byla data z extenzometru (sloupec C) přepočtena na veličinu celkového poměrného přetvoření ϵ_t (sloupec F) dle vzorce:

$$\epsilon_t = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{[\text{hodnota ext12.5}]}{12,5} * 100 \text{ [%]} \quad (14)$$

Zatížení vzorku (sloupec B) bylo přepočteno na hodnoty napětí σ (sloupec G) dle vzorce:

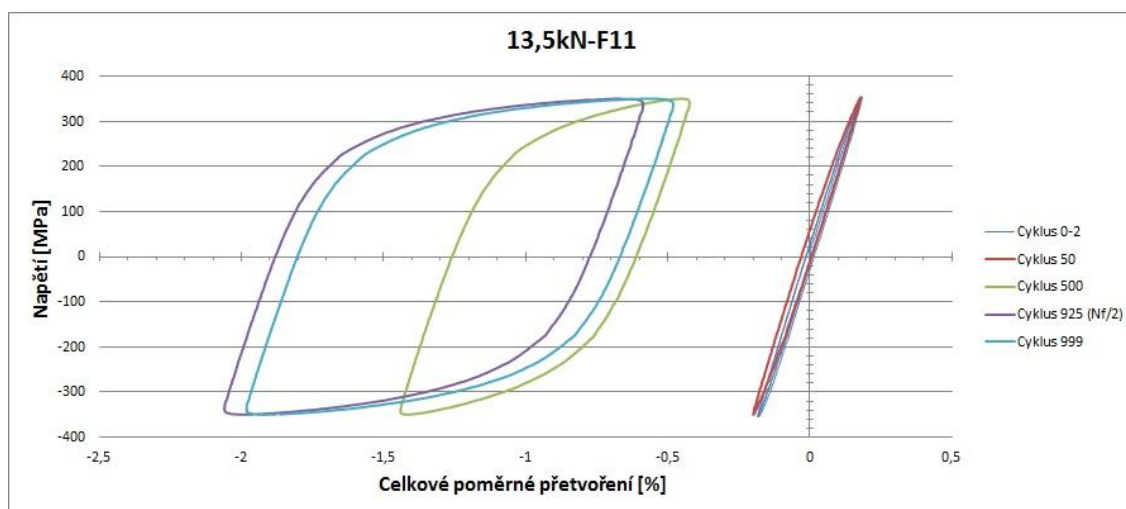
$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{[\text{hodnota Load Axial}] * 1000 * 4}{\pi * 7^2} \text{ [MPa]} \quad (15)$$

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2	Time	Load Axial	ext12.5	CY-Axial		Celkové poměrné přetvoření	Napětí
3							
4	[sec]	[kN]	[mm]			[%]	[MPa]
5	24,6802	0,0105	0,0003	0		0,0024	0,272837
6	24,6902	0,0647	0,0003	0		0,0024	1,6811959
7	24,7002	0,1287	0,0003	0		0,0024	3,3442026
8	24,7102	0,335	0,0003	0		0,0024	8,704801
9	24,7202	0,6154	0,0003	0		0,0024	15,990849
10	24,7302	0,8824	0,0005	0		0,004	22,928706
11	24,7402	1,0539	0,0008	0		0,0064	27,385044
12	24,7502	1,2382	0,0013	0		0,0104	32,173984
13	24,7602	1,3964	0,0016	0		0,0128	36,284729
14	24,7702	1,5557	0,002	0		0,016	40,424056
15	24,7802	1,7155	0,0023	0		0,0184	44,576376
16	24,7902	1,8683	0,0025	0		0,02	48,546805
17	24,8002	2,041	0,0028	0		0,0224	53,034325
18	24,8102	2,2092	0,003	0		0,024	57,404914
19	24,8202	2,3762	0,0033	0		0,0264	61,744323
20	24,8302	2,5499	0,0035	0		0,028	66,257827
21	24,8402	2,7025	0,0038	0		0,0304	70,223059
22	24,8502	2,8582	0,0041	0		0,0328	74,268842
23	24,8602	3,0141	0,0043	0		0,0344	78,319823
24	24,8702	3,1978	0,0046	0		0,0368	83,093172
25	24,8802	3,3568	0,0049	0		0,0392	87,224704
26	24,8902	3,5246	0,0052	0		0,0416	91,5849
27	24,9002	3,6785	0,0055	0		0,044	95,583912
28	24,9102	3,8308	0,0058	0		0,0464	99,541348

Obrázek 7.4: Přepočtení dat na deformaci a napětí

7.2 Vykreslení hysterezních smyček

Za pomoci přepočtených hodnot lze graficky znázornit průběh cyklické zkoušky jako závislost napětí na celkovém poměrném přetvoření a vykreslit hysterezní smyčky pro různý počet cyklů (obr. 7.5).



Obrázek 7.5: Vykreslení hysterezních smyček

Z grafického vyjádření vychází najevo, že hysterezní smyčky se rozšiřují, dochází k cyklickému změkčení, a jejich středy se posouvají směrem doleva. Během válcování zkušebních tyčí za studena vzniká stabilní dislokační struktura, která vytváří vnitřní napětí proti deformaci, materiál je tedy deformačně zpevněn. Cyklické zatěžování způsobuje změny této dislokační struktury, což má za následek cyklické změkčení. Přestože zkušební stroj zatěžuje symetrickým cyklem s řízením konstantního napětí, ve skutečnosti jde o nesymetrický cyklus se středním tlakovým napětím. K vnějšímu napětí se přičte záporné interní napětí způsobené válcováním, napětí v tlakovém půlcyklu je větší než v tahovém a dochází tedy k rozšiřování hysterezních smyček v tlakových půlcyklech – cyklickému creepu do tlakového směru.

7.3 Odebrání elastické složky deformace

K vhodnému popisu cyklické křivky napětí-deformace bylo zapotřebí eliminovat elastickou složku poměrného přetvoření ϵ_e . Celková deformace ϵ_t se řídí rovnicí (11), je tedy dána součtem pružné a plastické složky. Za pomoci Hookova zákona lze vyjádřit elastickou část jako podíl napětí σ a modulu pružnosti E . Přepočtení zatěžovací síly na napětí již byl proveden v kap. 7.1. Do souboru Data_final byl přidán sloupec H (obr. 7.7), který provádí odebrání elastické složky z celkového poměrného přetvoření v závislosti na modulu pružnosti E dle vzorce:

$$\epsilon_p = \epsilon_t - \frac{\sigma}{E} = [\text{hodnota celk. pom. přetv.}] - \frac{[\text{hodnota Napětí}] * 100}{E} \quad [\%] \quad (16)$$

	A	B	C	D	E	F	G	H
1						Celkové poměrné přetvoření	Napětí	Plastické poměrné přetvoření
2	Time	Load Axial	ext12.5	CY-Axial				
3								
4	[sec]	[kN]	[mm]			[%]	[MPa]	[%]
5	24,6802	0,0105	0,0003	0		0,0024	0,272837	0,002253313
6	24,6902	0,0647	0,0003	0		0,0024	1,6811959	0,001496131
7	24,7002	0,1287	0,0003	0		0,0024	3,3442026	0,000602042
8	24,7102	0,335	0,0003	0		0,0024	8,704801	-0,002280001
9	24,7202	0,6154	0,0003	0		0,0024	15,990849	-0,006197231
10	24,7302	0,8824	0,0005	0		0,004	22,928706	-0,008327261
11	24,7402	1,0539	0,0008	0		0,0064	27,385044	-0,008323142
12	24,7502	1,2382	0,0013	0		0,0104	32,173984	-0,006897841
13	24,7602	1,3964	0,0016	0		0,0128	36,284729	-0,006707919
14	24,7702	1,5557	0,002	0		0,016	40,424056	-0,005733364
15	24,7802	1,7155	0,0023	0		0,0184	44,576376	-0,005565794

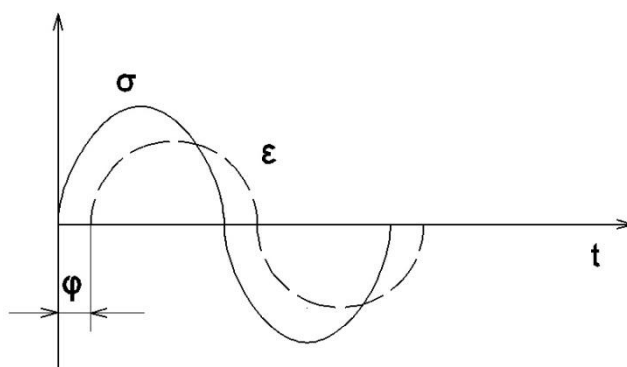
Obrázek 7.6: Odebrání elastické složky deformace

7.4 Vykreslení hysterezních smyček v plastické oblasti deformace

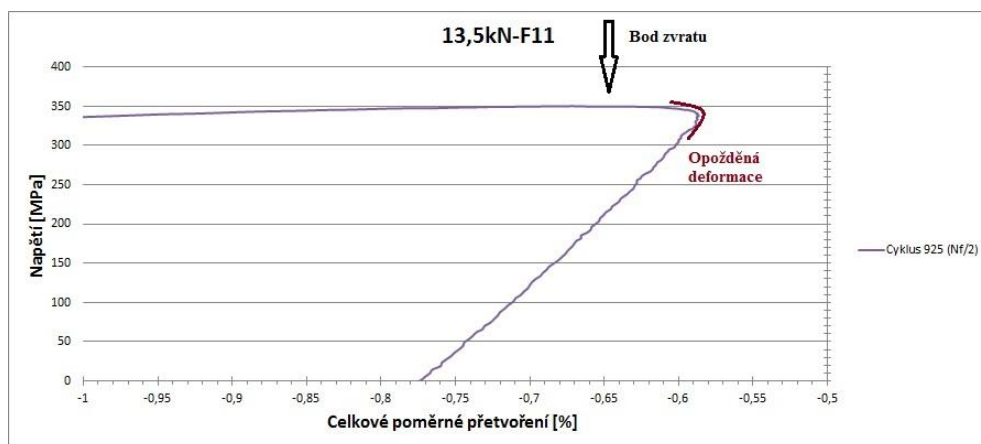
V průběhu cyklického zatěžování dochází ke změnám mechanických vlastností materiálu a modul pružnosti E je přesně touto mechanickou charakteristikou, která je závislá na úrovni zatěžování, a která se v případě saturace ustálí na určité hodnotě, v druhém případě se mění s nabývajícím počty cyklů. Z grafického znázornění hysterezních smyček (obr. 7.5) je patrné, že ani po dosažení poloviny životnosti zkušební vzorku nedošlo k saturaci. Smyčky se nadále rozšiřovaly. Je dáno normou, že se v tomto případě jako saturované hysterezní smyčky považují smyčky vykreslené v polovině životnosti daného vzorku (označeno $N_f/2$ v obr. 7.5). Modul pružnosti lze tedy vyhodnotit v cyklu 925 pro zkušební vzorek F11. Z grafického popisu hysterezní smyčky (obr. 5.2) je zřejmé, že vzorek se chová elasticky ihned po překročení bodu zvratu. Modul pružnosti lze v elastické oblasti vyjádřit pomocí Hookova zákona:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_e} \quad (17)$$

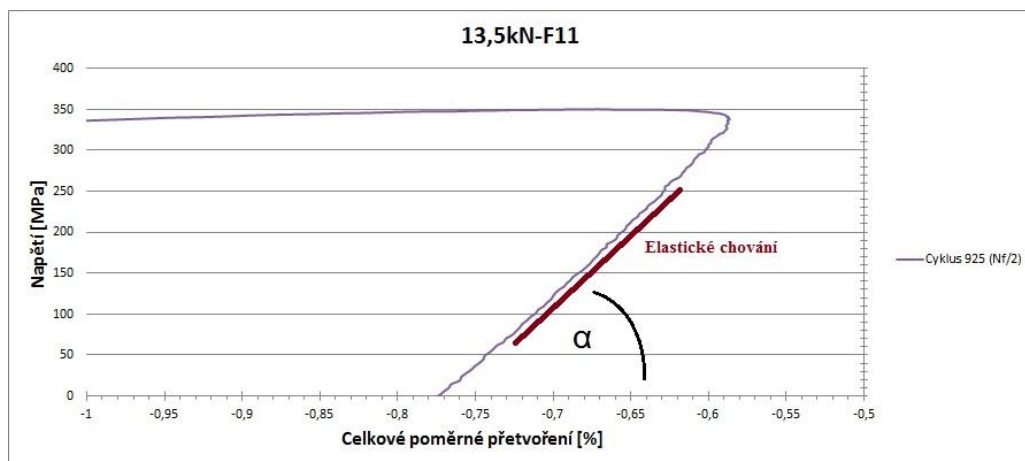
Při opakovaném zatěžování však dochází k opoždění deformace za přivedeným napětím o fázový posuv φ (obr. 7.7) [5]. Tohoto děje si lze všimnout při detailnějším prozkoumání horní, popř. spodní úvratí hysterezní smyčky (obr. 7.8). Z tohoto důvodu byl vypočten modul pružnosti až po ukončení obloukovitého tvaru těchto oblastí a vyrovnání křivky (obr. 7.9).



Obrázek 7.7: Opoždění deformace za napětím[5]



Obrázek 7.8: Opoždění deformace na hysterezní smyčce

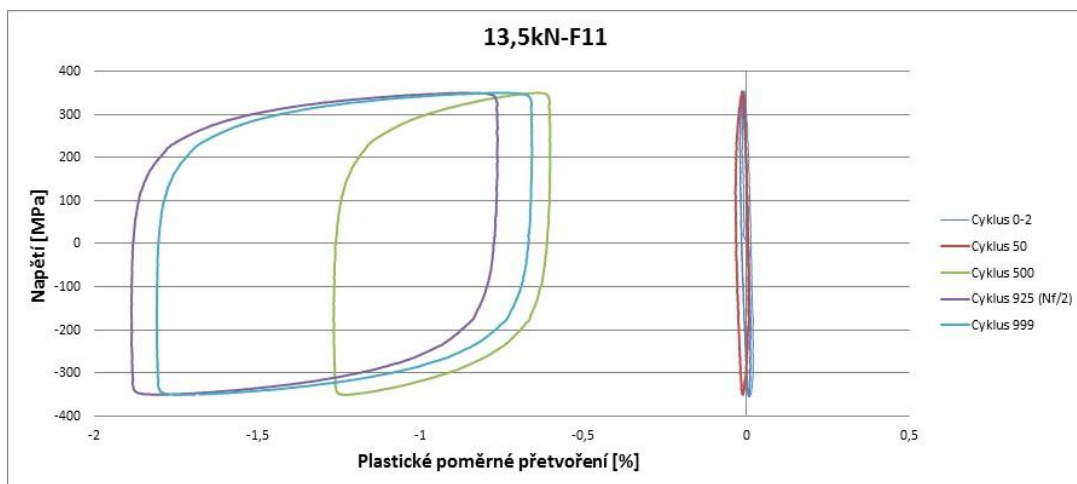


Obrázek 7.9: Oblast elastického chování hysterezní smyčky

Modul pružnosti lze matematicky definovat jako tangens úhlu, který svírá elastická složka s vodorovnou osou deformace. Jednoduše lze tedy v tomto úseku vypočítat modul pružnosti E jako:

$$E = \tan(\alpha) = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (18)$$

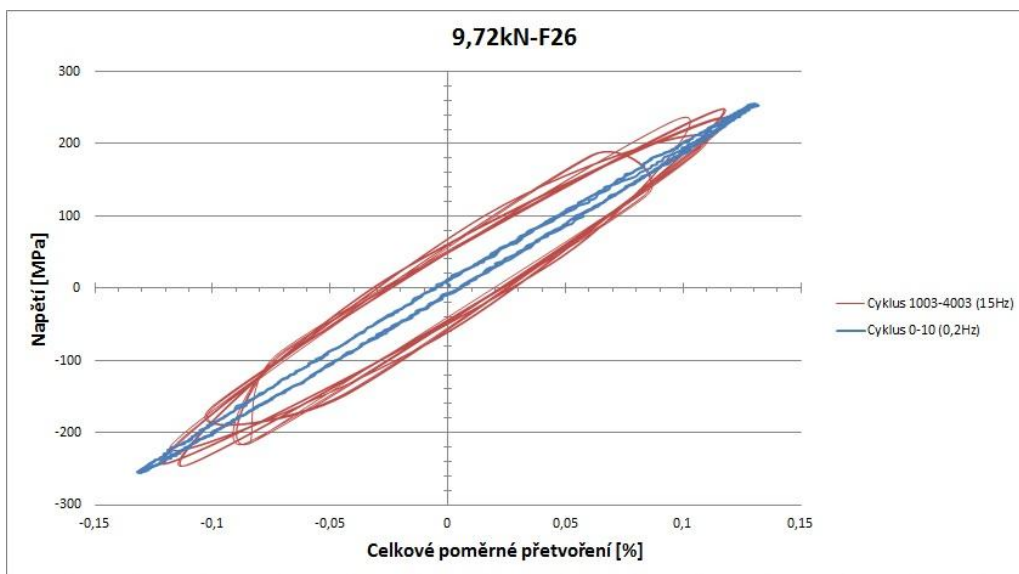
V polovině životnosti vzorku F11 byl určen modul pružnosti 186 GPa. Nyní můžeme vykreslit hysterezní smyčky s odebranou elastickou složkou (obr. 7.10).



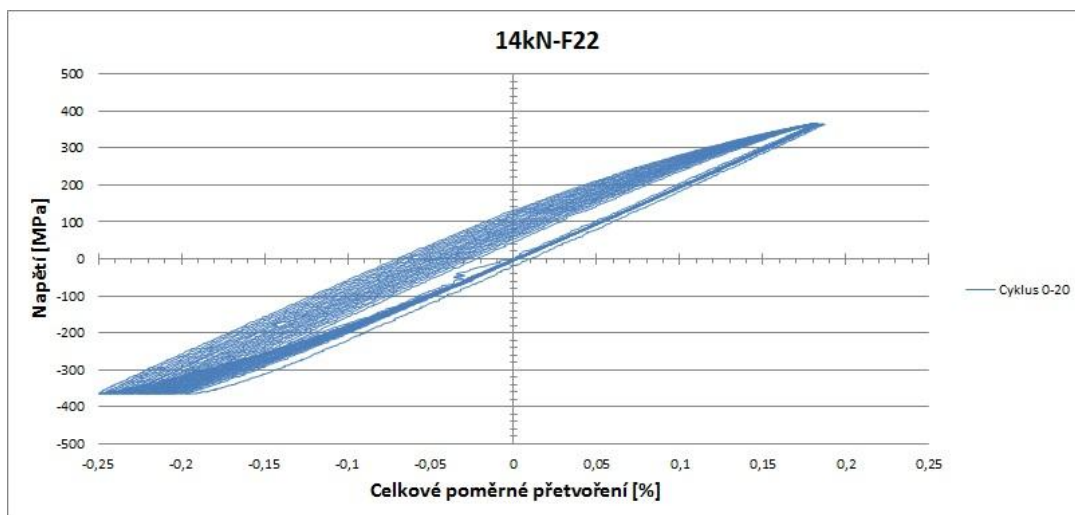
Obrázek 7.10: Hysterezní smyčky po odebrání elastické složky

7.5 Vrcholy saturovaných hysterezních smyček

Cyklické zkoušení v oblastech pod mezi kluzu je časově náročné. Prvních 50 cyklů každého vzorku bylo zaznamenáno s frekvencí zatěžování 0,1 až 0,5 Hz. Při zatěžování amplitudou síly 9,7kN (odpovídá 252 MPa) některé vzorky dosahovaly počtem cyklů meze únavy, proto byla často po prvních 50 cyklech zvýšená frekvence až na 15Hz. Ve vyšších úrovních zatěžování již docházelo k cyklickému lomu, přesto však byla často navýšena frekvence, což zapříčinilo nezaznamenané body zvratu v polovině životnosti (obr. 7.11). Při zatěžování amplitudou síly 14kN (odpovídá 364MPa) docházelo k cyklickému creepu do tahové oblasti už od počátku zatěžování s každým dalším cyklem (obr.7.12), nelze tedy hodnotit saturaci, cyklická křivka je zde omezena.



Obrázek 7.11: Závislost chování hysteretických smyček na frekvenci zatěžování



Obrázek 7.12: Cyklický creep způsobený vysokou úrovní zatěžování

Kritickou frekvencí, kdy lze ještě odečítat hodnoty vrcholů hysteretických smyček je 2Hz. Vhodná frekvence v polovině životnosti vzorku byla pouze v 5 případech v rozmezí úrovní zatěžování 11,5-13,5kN (tab. 7.1).

Tab. 7.1: Vrcholy saturovaných hysteretických smyček

Vrcholy hysteretických smyček při 50% životnosti				
Vzorek	Zatížení	Celkové poměrné přetvoření	Napětí	Plastické poměrné přetvoření
[-]	[kN]	[%]	[MPa]	[%]
F10	13,5	0,7344	349,8239	0,5321897
F11	13,5	0,6484	349,8654	0,4603003
F18	12	0,2472	310,9173	0,0772998
F19	12	0,232	310,777	0,0804015
F29	11,5	0,1944	295,9892	0,0560873

K popisu větší oblasti cyklické křivky však lze použít ostatní vrcholy hysterezních smyček (tab. 7.2), které se sice vyskytují v jiných oblastech životnosti, avšak k popisu chování materiálu v průběhu cyklického zatěžování jsou vhodné. Počet bodu cyklické křivky byl navýšen tedy na 12. Ostatní zkoušky byly zatěžovány nevhodnou frekvencí, vysokou úrovní zatěžování, anebo při přenosu dat ze zkušebního stroje došlo k jejich poškození.

Tab. 7.2: Vrcholy ostatních hysterezních smyček

Přibližné saturované vrcholy hysterezních smyček				
Vzorek	Zatížení	Celkové poměrné přetvoření	Napětí	Plastické poměrné přetvoření
[-]	[kN]	[%]	[MPa]	[%]
F01	5	0,0648	128,1659	0,0007171
F10	13,5	0,7344	349,8239	0,5321897
F11	13,5	0,6484	349,8654	0,4603003
F17	9,7	0,1336	251,6467	0,0114414
F18	12	0,2472	311,4789	0,0772998
F19	12	0,232	310,777	0,0804015
F21	9,7	0,1272	250,4956	0,0019522
F23	11	0,1836	286,9908	0,0349001
F24	12	0,4196	314,4122	0,2532443
F26	9,72	0,1504	251,3635	0,0234488
F27	10	0,1204	258,8106	0,0032911
F29	11,5	0,1944	295,9892	0,0560873

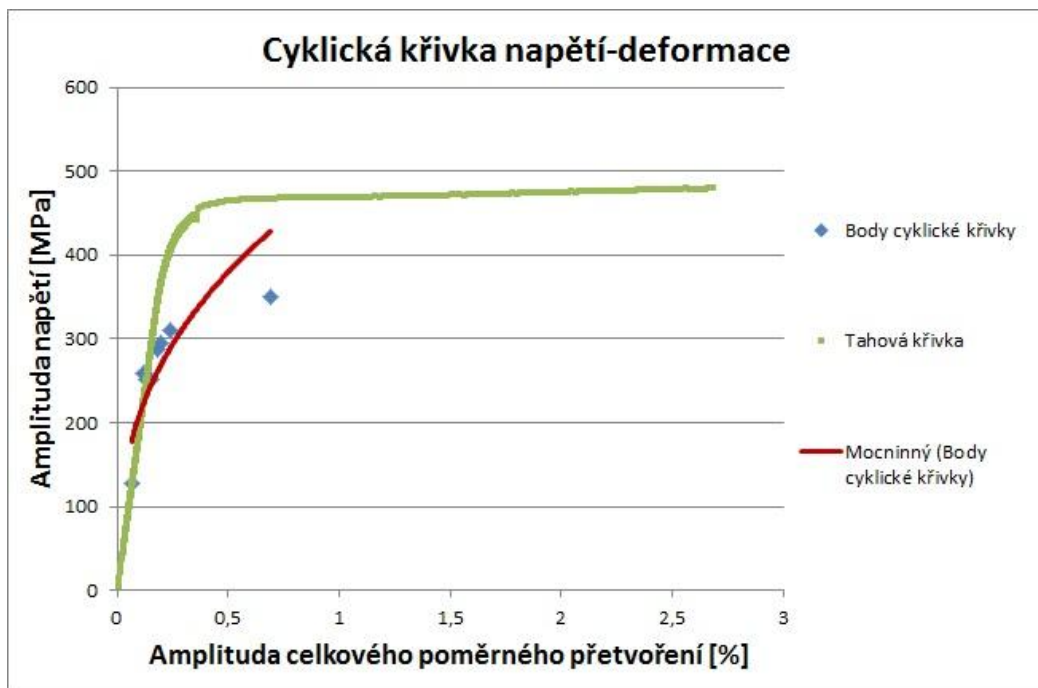
Na určité úrovni zatěžování se nachází více vrcholů hysterezních smyček. Ke stanovení cyklické křivky bylo zapotřebí hodnoty deformace a napětí na těchto úrovních zprůměrovat. Výsledné body cyklické křivky napětí-deformace jsou uvedeny v tab. 7.3.

Tab. 7.3: Body cyklické křivky

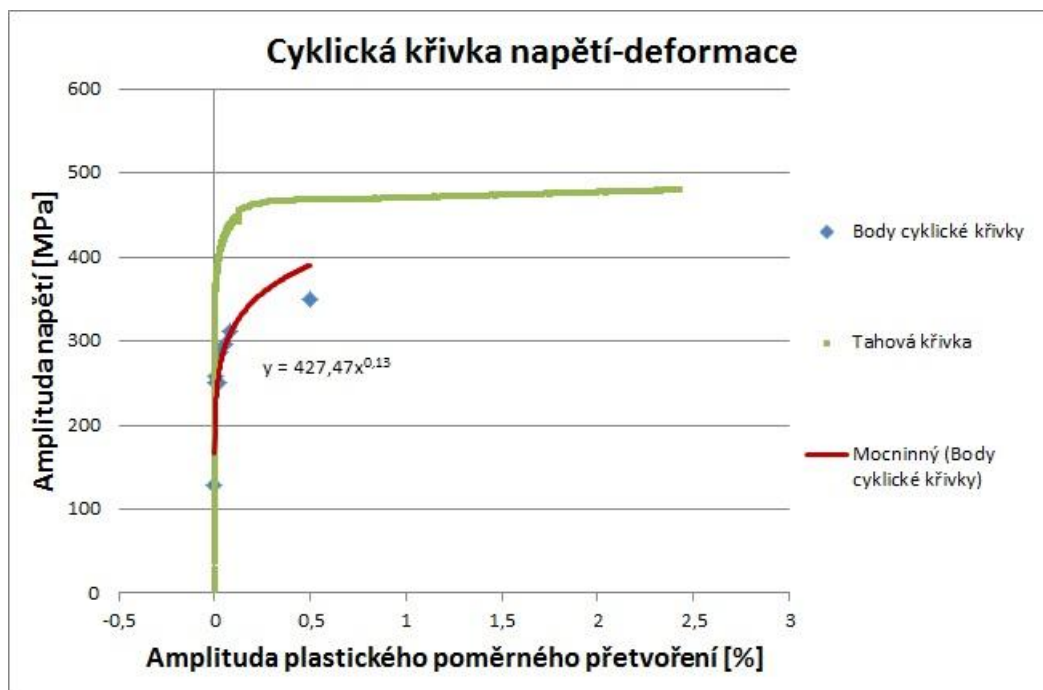
Body cyklické křivky			
Zatížení	Celkové poměrné přetvoření	Napětí	Plastické poměrné přetvoření
[kN]	[%]	[MPa]	[%]
5	0,0648	128,1659	0,0007171
9,7	0,1304	251,0711	0,0066968
9,72	0,1504	251,3635	0,0234488
10	0,1204	258,8106	0,0032911
11	0,1836	286,9908	0,0349001
11,5	0,1944	295,9892	0,0560873
12	0,2396	311,1279	0,0788507
13,5	0,6914	349,8447	0,496245

8 CYKLICKÁ KŘIVKA NAPĚTÍ-DEFORMACE REÁLNÉHO VZORKU

Z tab. 7.3 byly vyneseny body cyklické křivky do grafu závislosti amplitudy napětí σ_a na amplitudě celkového poměrného přetvoření ϵ_{at} (obr. 8.1) a do grafu závislosti amplitudy napětí σ_a na amplitudě plastického poměrného přetvoření ϵ_{ap} (obr. 8.2). Pomocí EXCEL funkce „přidat spojnicí trendu“ byly body proloženy mocninnou křivkou a její rovnice byla zobrazena v grafu. Do obou grafů byly naneseny hodnoty z tahové zkoušky stejného materiálu.



Obrázek 8.1: Cyklická křivka napětí-deformace



Obrázek 8.2: Cyklická křivka napětí-deformace v plastické oblasti

Z výsledného porovnání cyklické křivky s tahovou křivkou je naprosto zřejmé, že došlo k cyklickému změkčení v průběhu cyklického zatěžování. Z dostupných výsledků lze vyhodnotit hodnotu změkčení (dle obr. 5.5) $\Delta\sigma$ na 120MPa, součinitel cyklického deformačního zpevnění n' je dle zobrazené rovnice v grafu 0,15 a materiálová charakteristika κ má pro materiál S235JRC+C hodnotu 427,47 MPa. Chování tohoto materiálu v průběhu cyklického zatěžování lze tedy popsat rovnicí:

$$\sigma_a = 427,47 \varepsilon_{ap}^{0,15} \quad (19)$$

9 ZÁVĚR

Vzhledem k tomu, že téměř jakákoliv strojní součást je namáhána časově proměnným zatížením, je hodnocení materiálu pomocí cyklické křivky napětí-deformace stejně tak podstatné jako hodnocení podle tahového diagramu a jejich vzájemným porovnáním lze tak usuzovat její budoucí chování.

Celkem proběhlo 29 únavových testů zkušebních tyčí, některé vzorky byly při upínání zatíženy osovou silou nebo kroučícím momentem, proto byly ze souboru hodnocených zkoušek vyřazeny. Materiál S235JRC+C byl tvářen za studena (válcován) a nebyl vyžhán za vysokých teplot. Tyto materiály se v průběhu cyklické deformace změkčují a z grafu (obr. 8.1) je jasně vidět, že cyklická křivka leží pod křivkou statickou (rozdíl tahové a cyklické křivky $\Delta\sigma$ je cca 120MPa).

V grafech závislosti napětí na celkovém poměrném přetvoření lze pozorovat, že se hysterezní smyčky rozšiřují a posunují doleva. To je způsobeno tím, že při válcování (prodlužování) kovových těles vznikne poměrně stabilní dislokační struktura, která vytváří vnitřní napětí ve směru proti deformaci (back stress), tj. vzniká deformační zpevnění. Po výrobě, buď v průběhu nízkoteplotního žhání nebo i za pokojových teplot během skladování, nadifundují k dislokacím blízké intersticiální atomy (tzv. atmosféry - např. C, H nebo N) a ukotví je. Když pak vzorky začneme deformovat při vnějším symetrickém napětí pod mezí kluzu, jde ve skutečnosti o nesymetrický cyklus se středním tlakovým napětím. Poněvadž maximální napětí v tlakovém půlcyklu je větší než v tahovém, dislokace se přednostně uvolňují v tlakovém půlcyklu a dochází k rozšiřování hysterezních smyček v tlakových půlcyklech. Jelikož interní napěťové pole vytvořené stabilními dislokačními konfiguracemi je i teplotně stabilní (za pokojových teplot), dochází v průběhu cyklického změkčování k cyklickému creepu do tlakového směru, dojde tedy k posunu smyček doleva, plastická deformace v tahovém půlcyklu je stále menší než v tlakovém půlcyklu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] VELES, Pavol. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1985, 401 s.
- [2] KLESNIL, Mirko a Petr LUKÁŠ. *Únava kovových materiálů při mechanickém namáhání*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1975, 222 s.
- [3] PANĚLEJEV, Libor. *Únava kovových materiálů*. Studijní opora. FSI VUT v Brně.
- [4] VLK, Miloš. *Dynamická pevnost a životnost*. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 1992, 223 s. ISBN 80-214-0427-2.
- [5] PLUHAŘ, Jaroslav, Václav BENEŠ a Karel MACEK. *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu*. Praha: SNTL, 1983, 253 s.
- [6] POKLUDA, Jaroslav, Ladislav OBDRŽÁLEK a František KROUPA. *Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek: kovy, keramika, plasty*. Vyd. 1. Brno: PC-DIR, 1994, 385 s. ISBN 80-214-0575-9.
- [7] POKLUDA, Jaroslav. *Mechanické a strukturní materiálové charakteristiky*. Vyd. 1. Brno: VUT, 1990, 211 s. ISBN 80-214-0078-1.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

σ_h	[MPa]	horní napětí
σ_n	[MPa]	dolní napětí
σ_m	[MPa]	střední napětí
σ_a	[MPa]	amplituda napětí
P	[-]	amplitudový součinitel nesouměrnosti cyklu
R	[-]	napěťový součinitel nesouměrnosti cyklu
σ_c	[MPa]	mez únavy
N_f	[-]	počet cyklů do lomu
R_m	[MPa]	mez pevnosti
σ_{ar}	[MPa]	časová mez únavy
σ_f'	[MPa]	součinitel únavové pevnosti
b	[-]	exponent únavové životnosti
ε_{ap}	[-]	amplituda plastického poměrného přetvoření
ε_f'	[-]	součinitel únavové tažnosti
c	[-]	součinitel únavové životnosti
ε_{at}	[-]	amplituda celkového poměrného přetvoření
ε_{ae}	[-]	amplituda elastického poměrného přetvoření
E	[MPa]	modul pružnosti
N_t	[-]	tranzitní počet cyklů
N	[-]	počet cyklů
R_e	[MPa]	mez kluzu
Y	[J.m ⁻²]	energie vrstevné chyby
ΔW	[J]	deformační energie za jeden cyklus
σ	[MPa]	napětí
ε_p	[-]	plastické poměrné přetvoření
ε	[-]	celkové poměrné přetvoření
κ	[MPa]	modul cyklického zpevnění
n'	[-]	součinitel cyklického deformačního zpevnění
$\Delta\sigma$	[MPa]	velikost cyklického zpevnění, resp. Změkčení
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
ε_t	[-]	celkové poměrné přetvoření
Δl	[mm]	prodloužení
l_0	[mm]	původní délka
F	[N]	zatěžovací síla
S	[mm ²]	plocha průřezu
ε_e	[-]	elastické poměrné přetvoření
φ	[°]	fázový posuv
σ_1, σ_2	[MPa]	hodnota napětí na hysterezní smyčce
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	[-]	hodnota poměrného přetvoření na hysterezní smyčce

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1. Obsah CD

OBSAH CD

- Data vzorku F11 ze zkušebního stroje ve formátu XLS v adresáři /DataF11
- Zpracované data ve formátu XLS v adresáři /Data_zpracovani