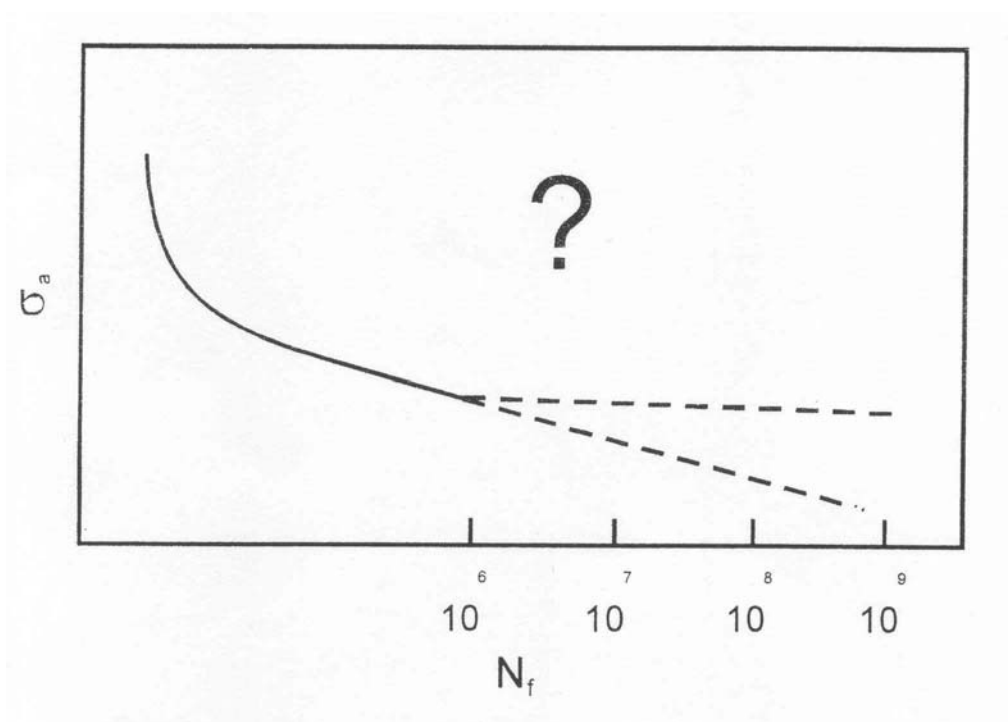


Gigacyklová únava kovových materiálů



Libor Pantělejev

Pozn.: Tato studijní opora navazuje a rozšiřuje oporu „Únava kovových materiálů“
Některé hypertextové odkazy mohou vyžadovat pro správnou funkci sadu Microsoft Office 2003.

OBSAH

1. ÚVOD	3
T2. EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ A ZKUŠEBNÍ VZORKY	3
3. SPECIFIKA VYSOKOCYKLOVÉ A GIGACYKLOVÉ ÚNAVY	3
3.1 ROLE PERSISTENTNÍCH SKLUZOVÝCH PÁSŮ A INICIACE MIKROTRHLIN	4
4. KŘIVKY ŽIVOTNOSTI	5
4.1 KŘIVKY ŽIVOTNOSTI MATERIÁLŮ TYPU I – ČISTÉ JEDNOFÁZOVÉ MATERIÁLY BEZ VNITŘNÍCH DEFEKTŮ	6
4.2 KŘIVKY ŽIVOTNOSTI MATERIÁLŮ TYPU II – MATERIÁLY OBSAHUJÍCÍ VNITŘNÍ DEFEKTY	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	15
Použitá literatura :	16

Seznam obrázků

- obr. 1.** Schématické znázornění zkušebního zařízení KAUP-ZU
- obr. 2.** Příklady tvarů zkušebních vzorků
- obr. 3.** Únavový lom (iniciace na povrchu).
- obr. 4.** Napětové podmínky potřebné pro vytvoření PSP u kovů s vlnitým charakterem skluzu
- obr. 5.** Schématické znázornění tvaru „multi-stage“ S-N křivek
- obr. 6.** Schématická multi-stage Manson-Coffinova křivka pro žíhané houževnaté kovy a slitiny
- obr. 7.** S-N křivka vysokouhlíkové chromové oceli SUJ2 (1,01%C, 1,45%Cr)
- obr. 8.** Fish Eye
- obr. 9.** Vliv podmínek zatěžování a TZ na tvar S-N křivek.
- obr. 10.** Vliv přípravy povrchové vrstvy vzorků na tvar S-N křivek.

1. Úvod

První popsané únavové lomy byly spojeny s vývojem konstrukcí, které obsahovaly součásti podrobené cyklickému namáhání (např. osy železničních vagónů, součásti parních strojů atd.) S ohledem na tyto provozní lomy byla snaha stanovit mechanické charakteristiky, které by umožnily výpočet cyklicky zatěžovaných součástí. První experimenty prováděl August Wöhler v letech 1852 – 1870. Dodnes je jednou ze základních únavových charakteristik Wöhlerova křivka, označovaná také často jako S-N křivka, udávající závislost počtu cyklů do lomu N_f na amplitudě napětí σ_a (při daném středním napětí). Pro určení meze únavy ocelí a litin se do současnosti používá $N_c \approx 10^7$ cyklů. Ve skutečnosti však dochází k únavovému porušování i po 10^9 a více zátěžných cyklech. Sakai, T. et al [1]. Furuya, Y. et al [2] a další zjistili, pokles únavových charakteristik závislosti $\sigma_a = f(N_f)$ za konvenční hranicí $N_c = 10^7$ cyklů u vysocepevných ocelí a ocelí povrchově zpevněných.

Ověřování únavových vlastností v gigacyklových režimech zatěžování však představuje velmi časově náročný proces. Nová zkušební zařízení jsou vyvíjena s cílem získat experimentální data i při velmi vysokých počtech cyklů $N \geq 10^9$ cyklů [1].

Významnost dané problematiky potvrzuje fakt, že už v roce 1998 se v Paříži konala první mezinárodní konference „Fatigue Life in the Gigacycle Regime“, jejíž logo je použito v úvodu [3].

2. Experimentální zařízení a zkušební vzorky

Pro vlastní experimenty lze používat různé typy zařízení („high – speed“ servohydraulický zkušební stroj, ultrazvukový zkušební stroj, zařízení pro ohyb za rotace a další). Jedním ze zařízení, které se používá pro tento typ experimentů je KAUP-ZU Žilina [obr. 1](#). Zkušební vzorek pro toto zařízení je uveden na [obr. 2. a](#).

3. Specifika vysokocyklové a gigacyklové únavy

Únavový proces je podmíněn cyklickou plastickou deformací. Bez opakované plastické deformace by nedocházelo k únavě. Toto konstatování se zdá zřejmé pro nízkocyklovou a také pro vysokocyklovou únavu. Např., amplituda plastické deformace na mezi únavy (nedochází k porušení po $10^6 - 10^7$ cyklů) je pro čisté kovy a slitiny tato řádově 10^{-5} . V oblasti gigacyklové únavy, kde počet cyklů do porušení může dosahovat řádu 10^{10} cyklů, či více může amplituda plastické deformace nabývat řádu 10^{-7} a méně; takto malou cyklickou plastickou deformaci však není možné experimentálně naměřit a pro její velikost lze tedy pouze odhadovat z extrapolace Manson-Coffinových křivek. Takto malé amplitudy plastické deformace aplikované pouze jednou nezpůsobí detekovatelnou změnu v substruktuře materiálu, ale jejich mnohonásobné opakování vede ke kumulativnímu poškození končícímu lomem [obr. 3](#). Elastická deformace je plně reverzibilní a nemůže tedy způsobit poškození, toto je vyhrazeno plastické

deformaci (v některých případech v kombinaci s vlivem prostředí), která způsobuje ireverzibilní změny v substruktuře materiálu, hlavně v substruktuře dislokační. Obecně může být únavový proces rozdělen na tři následné a částečně se překrývající etapy lišící se druhem a lokací ireverzibilní změny: (i) Cyklické zpevnění a/nebo změkčení, tato etapa se týká celého cyklicky zatíženého objemu materiálu. (ii) Inicie mikrotřlin, postihující malou část z celkového objemu, typicky je lokalizována do povrchové vrstvy. (iii) Šíření únavové trhliny končící finálním lomem. Rozhodujícím faktorem pro šíření trhliny je cyklická plastická deformace v rámci plastické zóny na špičce trhliny. Detaily akumulace únavového poškození závisí na amplitudě deformace nebo amplitudě napětí. Není pochyb, že cyklické deformační procesy charakteristické pro všechna tři stádia únavy se uplatňují také v oblasti gigacyklové únavy [7].

3.1 Role persistentních skluzových pásů a iniciace mikrotřlin

Nejvýznamnějším znakem cyklické plasticity je formování persistentních skluzových pásů (PSP) v některých materiálech při vhodných podmínkách v oblasti vysokocyklové únavy a částečně také v oblasti únavy nízkocyklové. PSP reprezentují zóny lokalizace cyklické deformace a tedy pre-iniciaci únavového poškození. Jejich hlavní charakteristiky jsou (i) podstatně vyšší amplituda plastické deformace ve srovnání s okolní maticí, což vede ke (ii) vzniku dislokační struktury odlišné od okolní matrice a k (iii) formování povrchového reliéfu (extruze a intruze). K iniciaci mikrotřlin dojde na místě kde se PSP stýkají s povrchem, konkrétně v intruzi. Nezbytnými podmínkami pro nukleaci mikrotřlin jsou (i') významná vrubová topografie, (ii') vysoce lokalizovaná plastická deformace v kořeni intruze, a (iii') vhodné dislokační uspořádání podél povrchových intruzí. Tyto tři podmínky jsou neoddělitelně spolu spjaté.

Vrubová topografie zapříčiňuje geometrickou koncentraci napětí, toto však nepostačuje, intenzita nevratné cyklické plastické deformace, tj. nevratná část dislokačního skluzu, musí být v kořeni intruze vyšší než v ostatních místech. Toto vyžaduje dislokační strukturu k zabránění lokální relaxace napětí, ke kterému by došlo vlivem skluzu dislokací mimo kritický objem, a současně příspěvek k zvýšení „ostrosti“ kořene intruze. Z tohoto důvodu je nezbytná existence vhodného dislokačního uspořádání. Např. ostrý vryp vytvořený na povrchu monokrystalu Cu nemusí být místem iniciace trhliny při následném cyklování, přestože jde o koncentrátor napětí. Důvodem je vhodné lokální uspořádání dislokací garantující nesplnění zbývajících dvou podmínek [10].

U materiálů se snadným příčným skluzem je reliéf skluzového povrchu vztažen ke skluzové aktivitě PSP pro odpovídající oblast zátěžných parametrů [obr. 4.](#)

Výše uvedená tvrzení potvrzuje velké množství experimentů, kdy bylo prováděno pozorování prostřednictvím optické a elektronové mikroskopie, replikačních technik, prokázalo, že k nukleaci trhlín homogenního materiálu dochází vždy na volném povrchu. U součástí makroskopicky strukturně nehomogenních není nukleace vždy vázána na povrch. Např. u materiálů s výrazně zpevněnou povrchovou vrstvou, k jejíž plastické deformaci je zapotřebí podstatně vyšších napětí než k deformaci základní matrice, dochází k nukleaci na rozhraní této tvrdé povrchové vrstvy a základní matrice.



U součástí s vnitřními geometrickými defekty nukleace rovněž nemusí být záležitostí povrchové vrstvy. Pokud jde o vnitřní defekty typu trhlin, je zřejmé, že stadium nukleace zcela chybí.

Bylo zjištěno, že hustota PSP (ve smyslu zón se specifickou dislokační strukturou) klesá s klesající amplitudou deformace v oblasti vysokocyklové únavy. Extrapolací do oblasti gigacyklové únavy (UHCF) v souladu s předchozím tvrzením předpokládáme, že v této oblasti nejsou PSP [obr. 4.](#) Nicméně konečný důkaz o neexistenci PSP v této oblasti neexistuje, protože takovýto důkaz by vyžadoval pozorování dislokační struktury v celém cyklicky zatíženém objemu.

Dislokační struktura ve šrafované oblasti na [obr. 4.](#) je složena ze dvou typů (žebříkovité, nebo buňkové PSP vestavěné v žilové dislokační struktuře), struktura mimo šrafovanou oblast je jednoho typu a to dislokační strukturou žilovou pod šrafovanou oblastí, a všude jinde strukturou buňkovou. Ve šrafované oblasti jsou povrchové skluzové pásy jasně vztaženy k PSP. Mimo šrafovanou oblast vznikají povrchové skluzové pásy vzájemným skluzem vrstev buněk pro amplitudy napětí napětí a/nebo amplitudy deformace nad konvenční mezí únavy. V oblasti UHCF (pod konvenční mezí únavy), se PSP nevytváří a mechanismus porušení je vztažen k ireverzibilitě cyklického skluzu. Tato malá ireverzibilita opakovaná 10^8 až 10^{10} krát může také vést k formování dostatečně intenzivního povrchu „valley and hill topography“ a tedy přípravě podmínek pro iniciaci mikrotrhliny

4. Křivky životnosti

V předcházející kapitole bylo řečeno, že zatímco únavové porušení v oblasti konvenční vysokocyklové únavy vzniká na povrchu, únavové porušení v oblasti UHCF obecně vzniká z vnitřních defektů. Toto téma bylo ústředním bodem Euromech Colloquium 382 [\[3\]](#). Hlavním otázkou byla adresována tvaru S-N křivek (Wöhlerova křivka) v oblasti $N_f > 10^6$ cyklů a vyjasnění původu únavového porušení a odpovídající meze únavy v různých oblastech. V současnosti existují dva názory na tvar S-N křivek. První tvar je na [obr. 5. a](#), jde o křivku na které se vyskytují dvě meze únavy, první v oblasti vysokocyklové únavy, kterou můžeme nazvat mezí únavy (porušení „z povrchu“) a druhou v oblasti únavy gigacyklové (porušení z vnitřních defektů). U některých ocelí je únavové poškození v UHCF oblasti způsobeno vnitřními defekty (inkluzí, póry) vedoucí k tzv. „fish-eye“ porušení [obr. 8.](#) Stále však není vysvětlena otázka, proč v oblasti UHCF při velmi nízkých napětích a extrémně dlouhé únavové životnosti může únavové porušení vznikat uvnitř materiálu a ovlivňovat tak životnost, zatímco povrchové trhliny hrají vedlejší úlohu. Na [obr. 7.](#) je uveden tvar S-N křivky pro vysokouhlíkovou chromovou ocel SUJ2. Na typ S-N křivky mají vliv také podmínky provedení vlastních experimentů, ať už se jedná o typ zatěžování, či velikost, tvar případně příprava povrchu vzorku (tepelné zpracování, elektrolytické leštění apod.) [obr. 9.](#) a [obr. 10.](#)



4.1 Křivky životnosti materiálů typu I – čisté jednofázové materiály bez vnitřních defektů

Nezbytným předpokladem pro iniciaci trhlin na povrchu je částečná ireverzibilita cyklického skluzu v tom smyslu, že jednoduché skluzové přemístění v jednom půlcyklu není plně reverzováno v následném půlcyklu. Tím dochází ke kumulaci nevratných mikrostrukturních změn v objemu materiálu a také k akumulaci nevratného skluzu na povrchu. Při dané amplitudě zatěžování je nezbytný určitý kritický počet cyklů N_{crit} pro vytvoření povrchového lokálního kritického reliéfu, kde dochází k iniciaci trhlin. Kritické podmínky pro iniciaci trhlin jsou závislé na kumulativní ireverzibilní plastické deformaci. Kritický počet cyklů N_{crit} bude větší, čím menší je amplituda zatěžování. S klesající amplitudou napětí, či deformace se ireverzibilita postupně snižuje. Tedy jakýsi „práh ireverzibility“ může být definován ve vztahu k jisté prahové hodnotě amplitudy napětí nebo deformace, pod kterým je cyklický skluz kvazi-reverzibilní a tedy nepoškozujícím pro jakýkoliv počet cyklů.

Pro posouzení diagramu únavové životnosti s ohledem na výše uvedené je vhodné vymežit následující oblasti dle velikosti zátěžné amplitudy:

- (I) Oblast vysokocyklové únavy na prahem lokalizace deformace (PSP), v této oblasti je únavová životnost konečná a řídí se Manson-Coffinovým zákonem.
- (II) Práh lokalizace cyklické deformace; tato amplituda odpovídá amplitudě napětí, či deformace na mezi únavy v oblasti vysokocyklové únavy.
- (III) Oblast pod PSP-prahem, ale nad prahem ireverzibility, v této vysokocyklové oblasti je únavová životnost dlouhá, nicméně konečná, a to proto, že cyklický skluz je více méně homogenní a není lokalizován, ale stále částečně ireverzibilní.
- (IV) Oblast pod prahem ireverzibility; je to oblast vysokocyklové únavy, kde skluz je nepoškozující případně skluzová ireverzibilita je zanedbatelná a únavová životnost je neomezená.

Výše uvedené rozdělení oblastí je vyznačeno na [obr. 5. a](#). Na [obr. 6.](#) je v interpretaci Manson-Coffinovy ukázán diagram únavové životnosti. Pokud bychom tuto křivku přetransformovali na S-N křivku pomocí cyklické křivky napětí-deformace (CKND) získali bychom podobnou závislost. Oblast I odpovídá klasické oblasti Manson-Coffinovy přecházející od nízkocyklové oblasti únavy do vysokocyklové. Oblast II je mez únavy (v interpretaci amplitudy plastické deformace), odpovídající prahu lokalizace cyklické deformace, která bude PSP-prahem pro většinu houževnatých materiálů. Počátek oblasti III se objevuje hned pod PSP-prahem a je významně posunut k oblastem s vyšší únavovou životností. Důvodem je, že pod PSP-prahem nedochází k lokalizaci deformace. Proto lokální amplituda smykové deformace $\gamma_{pl,loc}$ bude významně menší než lokální hodnota $\gamma_{pl,PSP}$ v PSP a bude odpovídat spíše lokální hodnotě $\gamma_{pl,M}$ v struktuře matrice. Takže např. u mědi $\gamma_{pl,loc} \approx \gamma_{pl,M} \approx 10^{-2} \gamma_{pl,PSP}$. Z tohoto důvodu a protože ireverzibilita skluzu „p“ bude významně nižší a $\gamma_{pl,loc}$ je snížena, počet cyklů nezbytných k vytvoření kritického povrchového reliéfu pro iniciaci trhliny bude mnohem větší než nad PSP-prahem.



Proto je začátek oblasti III posunut k vyšším hodnotám N_f o více než dva řády od počátku oblasti II.

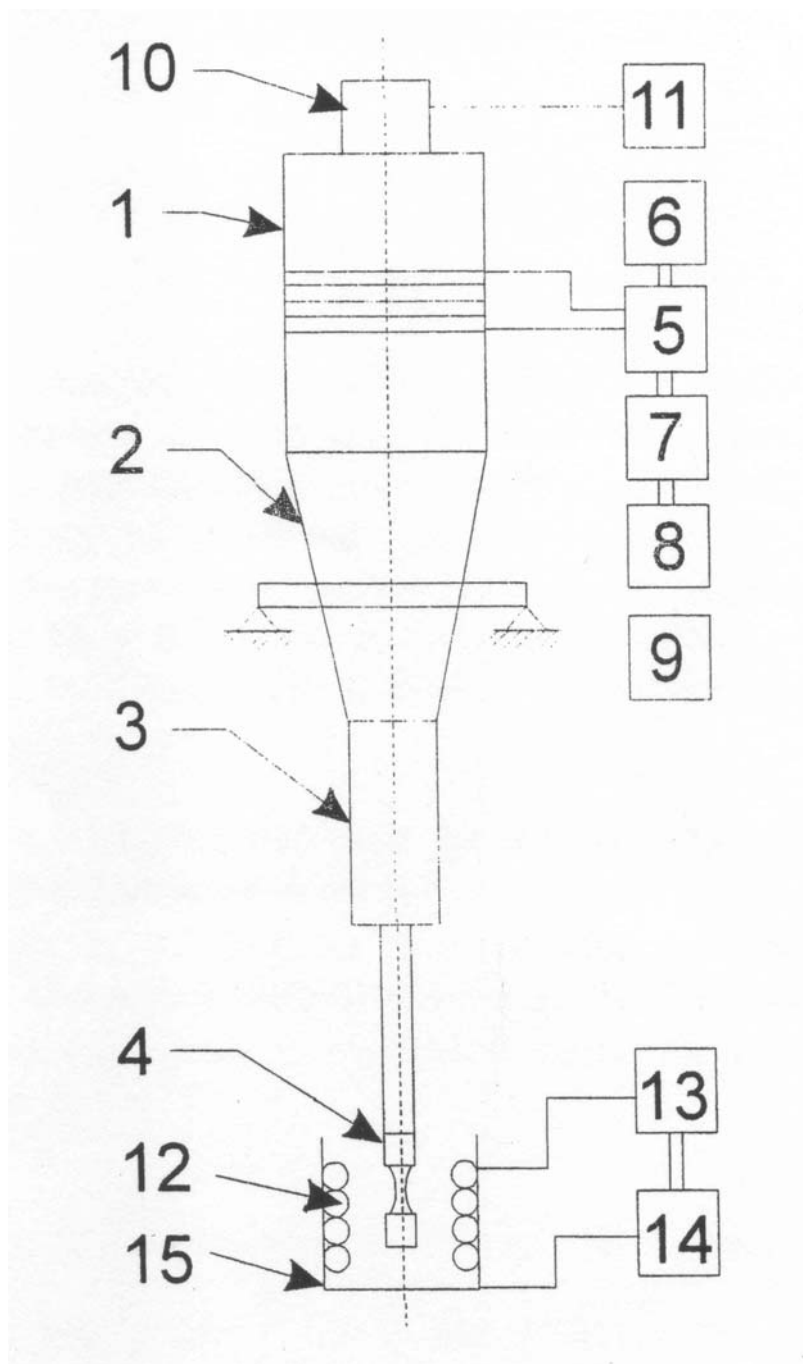
Jestliže amplituda bude klesat dále pod PSP-práh, bude se paralelně snižovat i ireverzibilita skluzu a únavová životnost bude stále větší. Případně může být dosaženo bodu, kdy ireverzibilita cyklického skluzu „p“ bude nevýznamná pro jakékoliv praktické účely. Takže jestliže amplituda bude nižší než tento „práh ireverzibility“ bude únavová životnost nekonečně velká. Proto může být oblast IV interpretována jako skutečná mez únavy gigacyklové únavy.

4.2 Křivky životnosti materiálů typu II – materiály obsahující vnitřní defekty

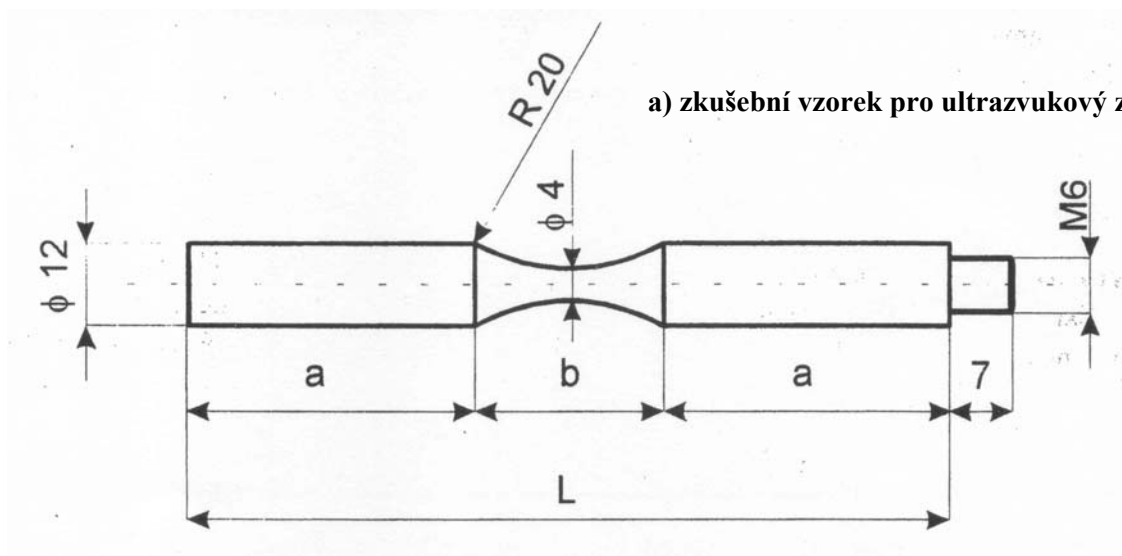
Materiály tohoto typu jsou materiály obsahující vnitřní defekty jako jsou nekovové inkluze či staženiny. Diagram životnosti takovýchto materiálů v interpretaci S-N diagramu bude stejného typu jako je na [obr. 5. a](#). Za určitých okolností mohou být materiály obsahující póry, či kavity považovány za materiály typu II. Stejně jako pro materiály I typu v analogii s výše popsaným diagramem životnosti Manson-Coffin můžeme také očekávat víceúrovňovou křivku. V interpretaci S-N křivky mohou být 4 oblasti napětí charakterizovat jako:

- (I) Oblast konečné únavové životnosti sahající od oblasti nízkocyklové únavy až do oblasti únavy vysokocyklové, poškozuující trhliny jsou iniciovány zpravidla na povrchu.
- (II) Oblast vysokocyklové únavy s konvenční mezí únavy, charakterizovaná jistou formou prahu lokalizace cyklické deformace.
- (III) Oblast gigacyklové únavy s konečnou životností, porušení vznikající z vnitřních defektů ovlivňuje ve většině případů životnost.
- (IV) Mez gigacyklové únavy, pod prahem ireverzibility a pod prahem iniciace a/nebo šíření z vnitřních defektů.

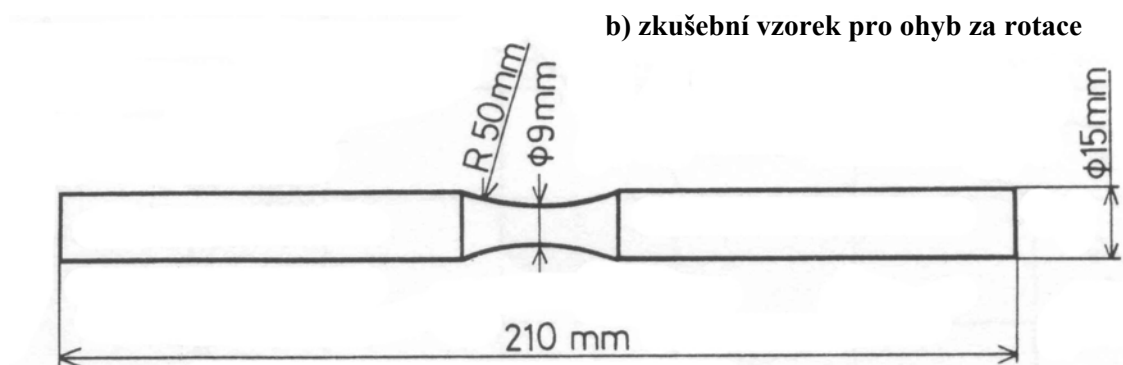
Předpokládá se, že pro poškození z vnitřních defektů u materiálu typu II musí být splněny tyto podmínky: 1) Přítomnost vnitřních defektů z nichž mohou vznikat poškozuující trhliny, a 2) objemová hustota těchto defektů musí být taková, že je téměř jistě vyloučeno, že by některé z těchto defektů byly lokalizovány u povrchu. Na druhou stranu, není jasné proč by měly poškozuující trhliny vznikat přednostně z vnitřních defektů a ne z povrchových defektů. Kromě nekovových inkluzí, mohou být za možné vnitřní defekty považovány také póry a staženiny (u litých materiálů) [9].



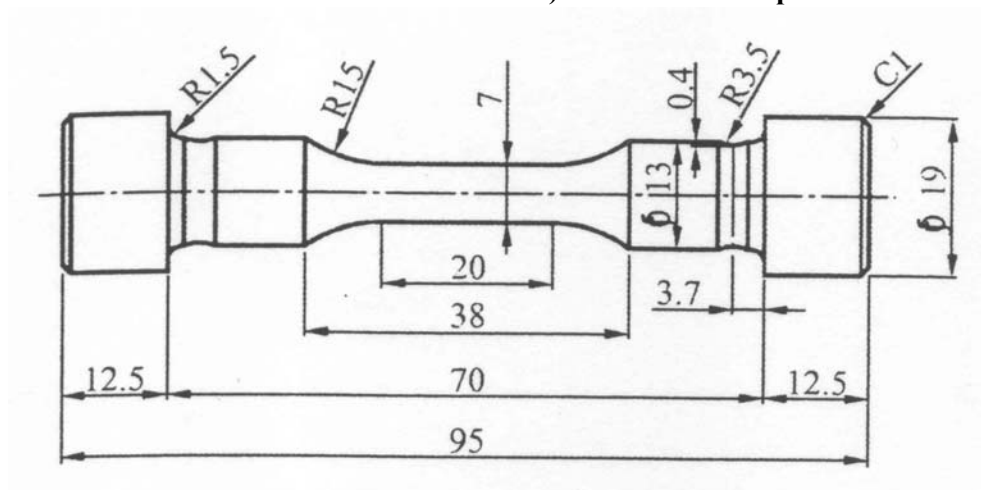
obr. 1. Schématické znázornění zkušebního zařízení KAUP-ZU, (1) – piezoelektrický měnič, (2) – kuželový koncentrátor, (3) – stupňovitý koncentrátor, (4) – zkušební vzorek, (5) – ultrazvukový generátor, (6) – automatický vyrovnávač frekvence, (7) – měřič frekvence, (8) tiskárna, (9) – digitální časoměr, (10) – snímač amplitudy výchylky, (11) – milivoltmetr, (12) – chladicí trysky, (13) – termostat, (14) – vodní čerpadlo, (15) – sběrná nádoba. [4] .



a) zkušební vzorek pro ultrazvukový zk. stroj



b) zkušební vzorek pro ohyb za rotace

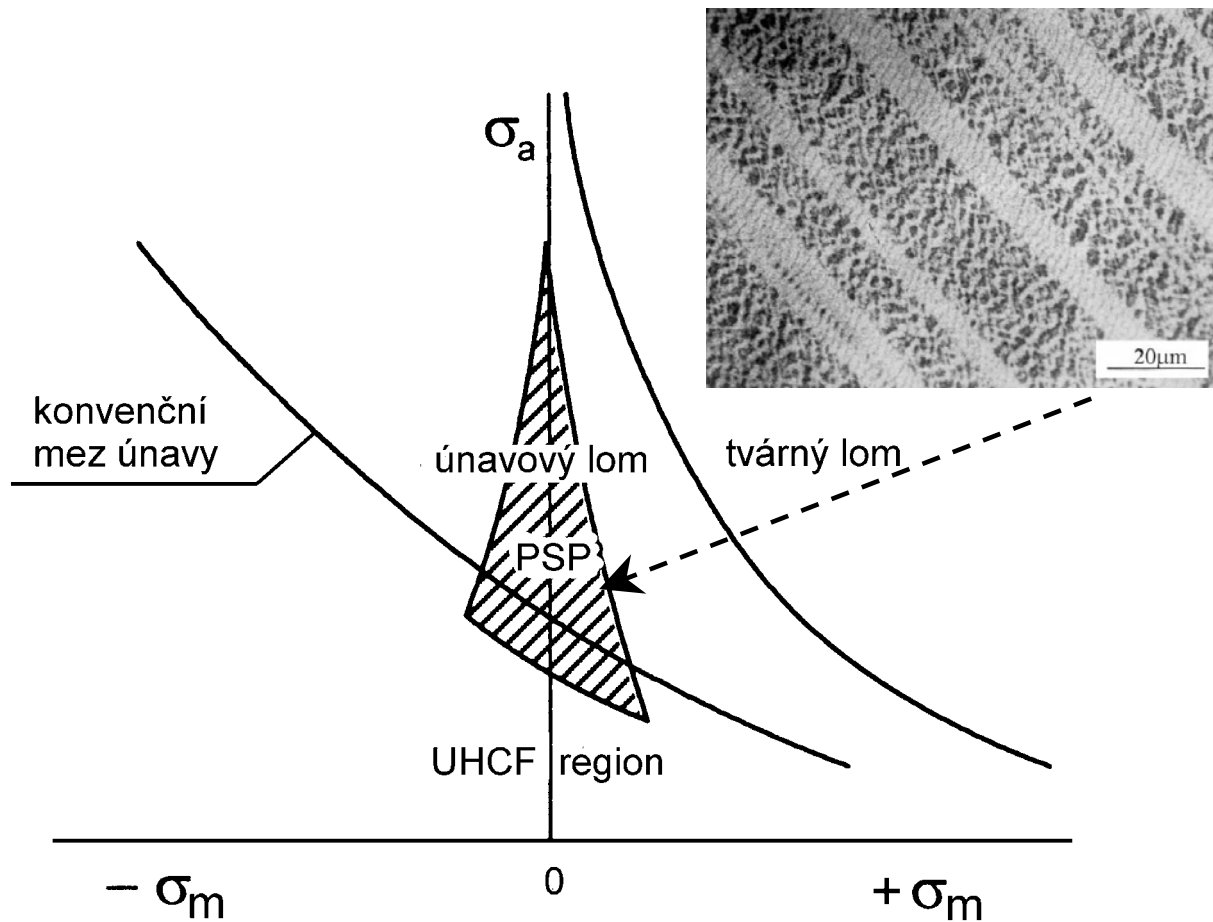


c) zkušební vzorek pro režim tah-tlak

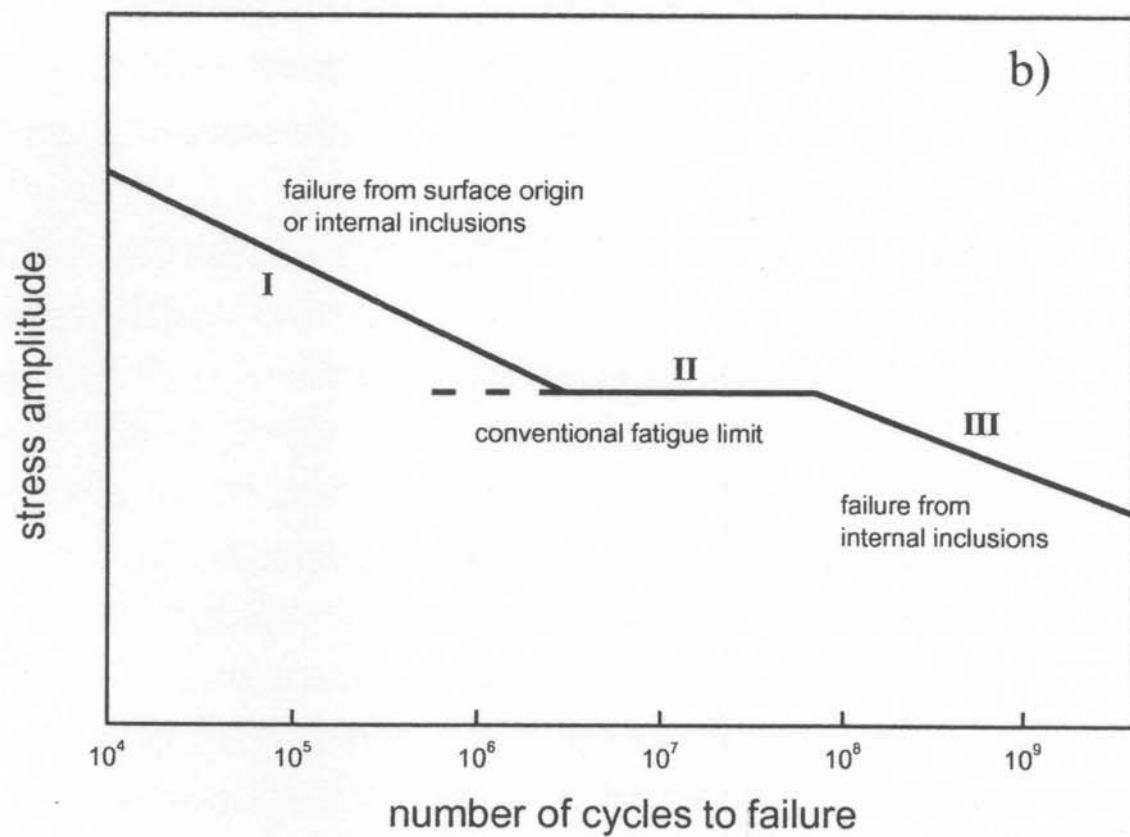
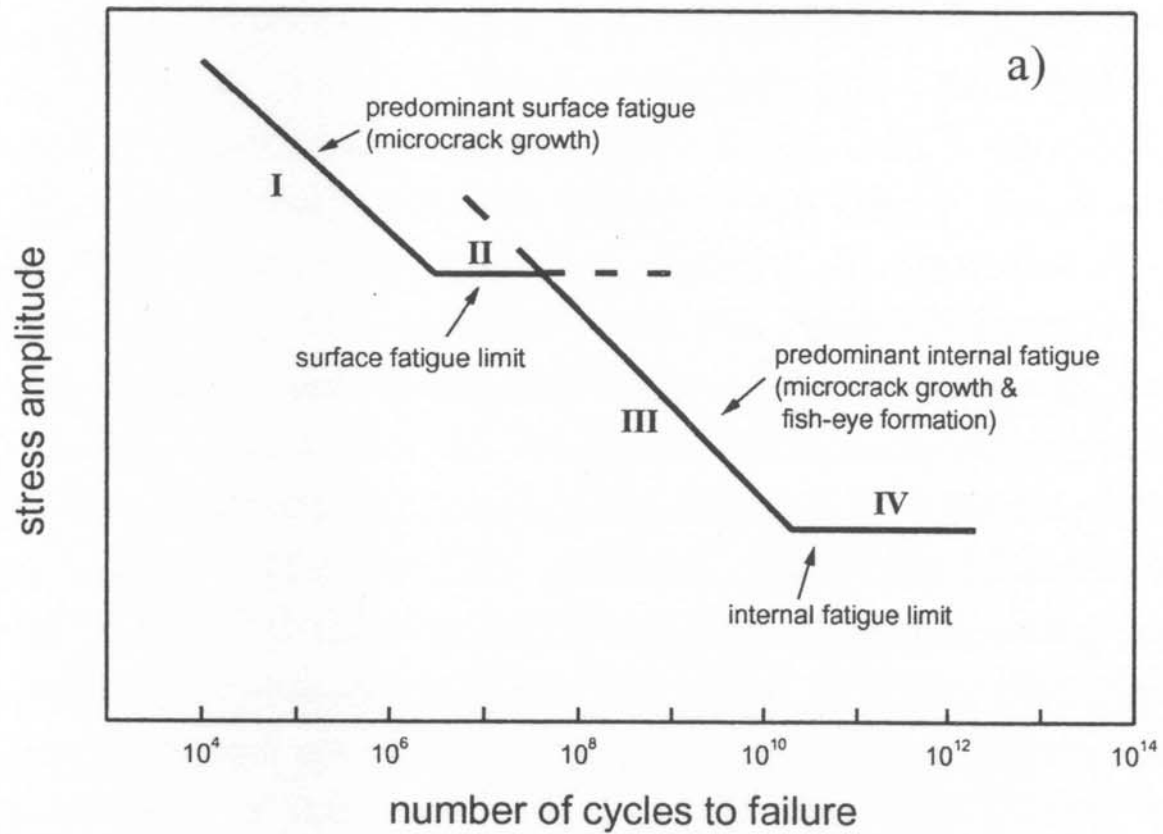
obr. 2. Příklady tvarů zkušebních vzorků [4] [5] , [6] .



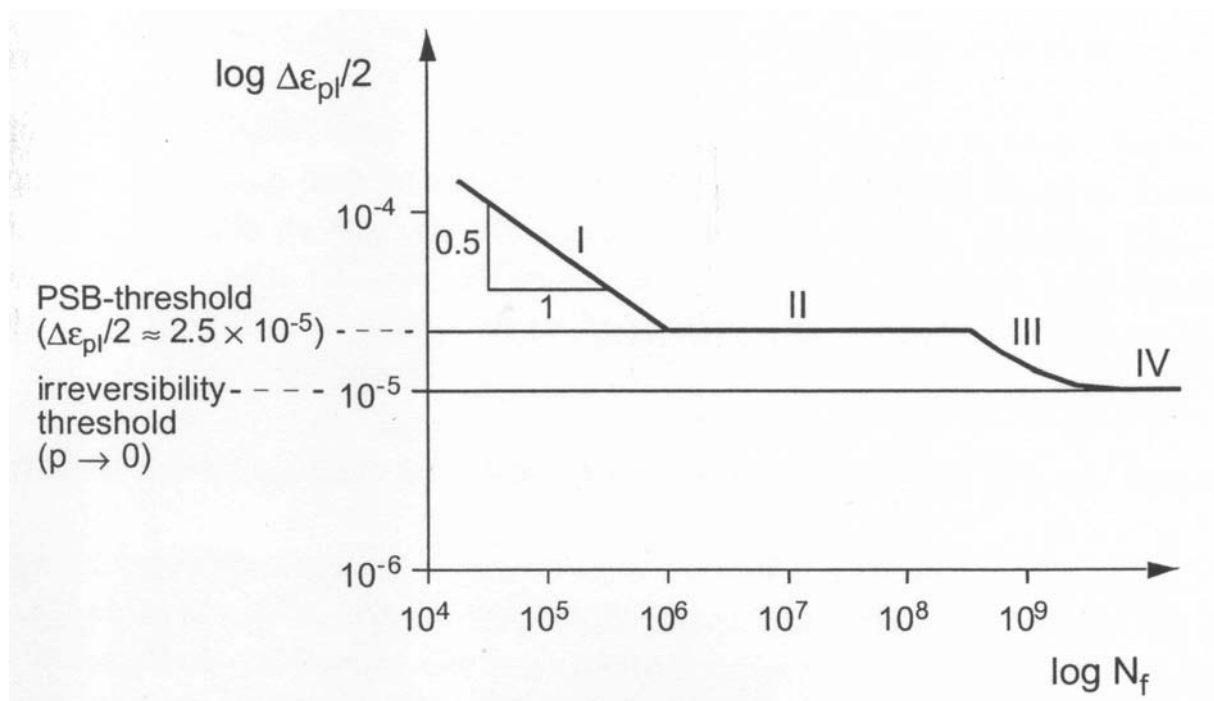
obr. 3. Únavový lom (iniciace na povrchu).



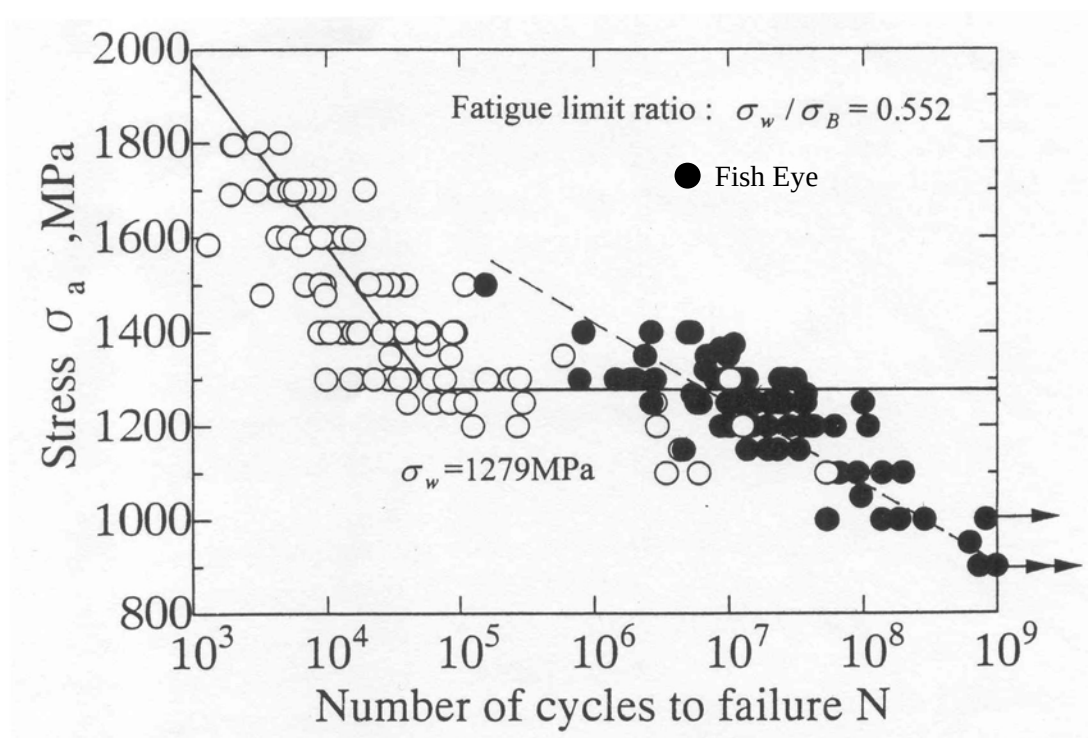
obr. 4. Napěťové podmínky potřebné pro vytvoření PSP u kovů s vlnitým charakterem skluzu (UHCF – ultra high cycle fatigue) [10] .



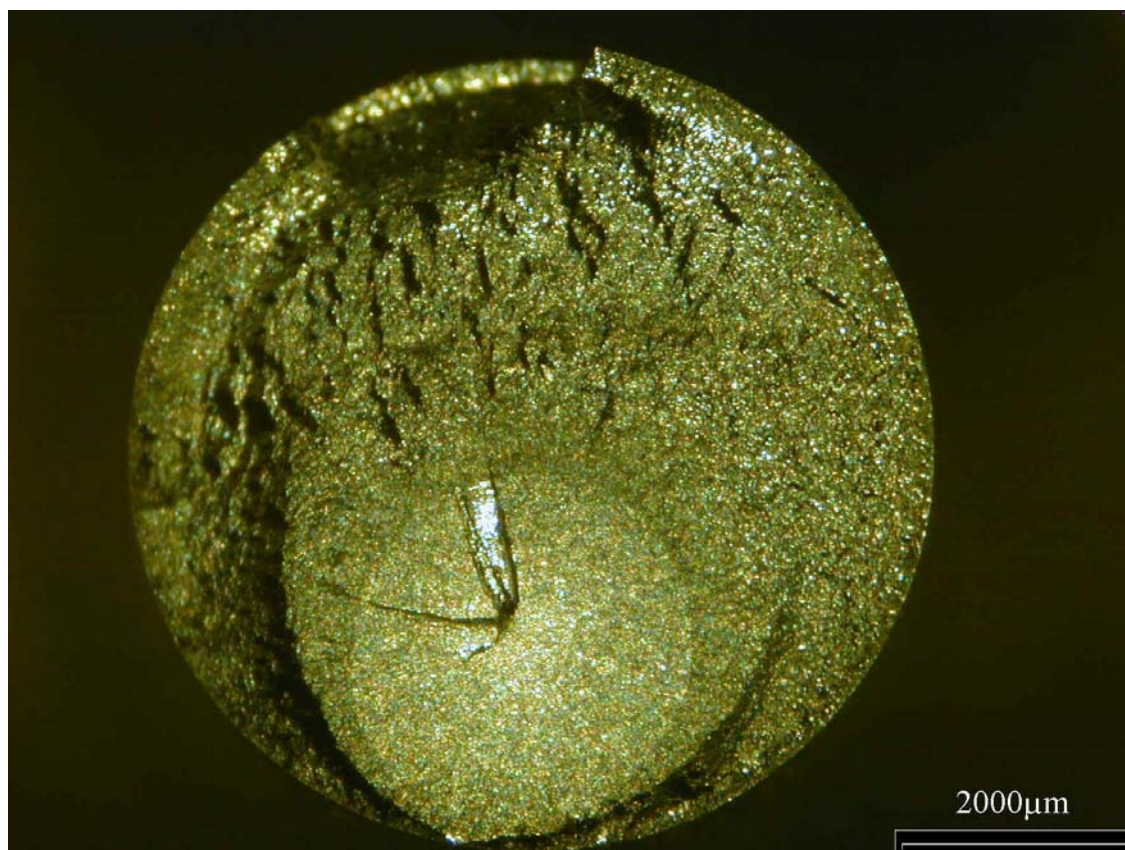
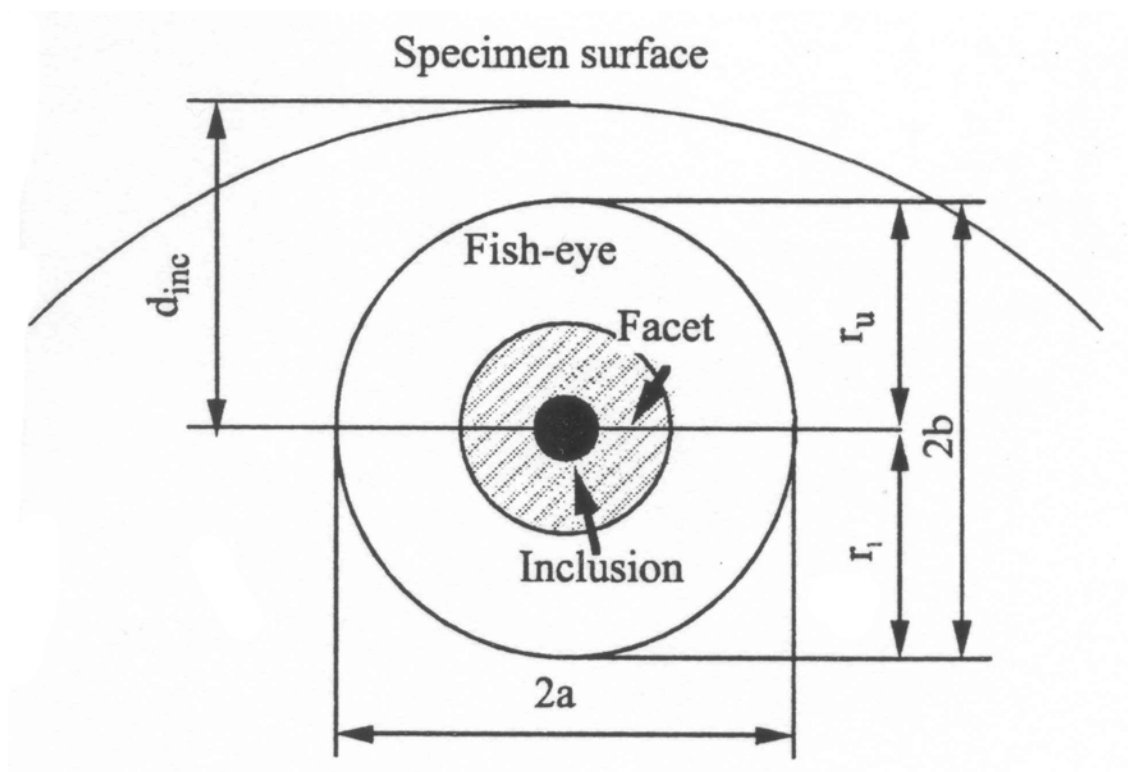
obr. 5. Schematické znázornění tvaru „multi-stage“ S-N křivek [9] .



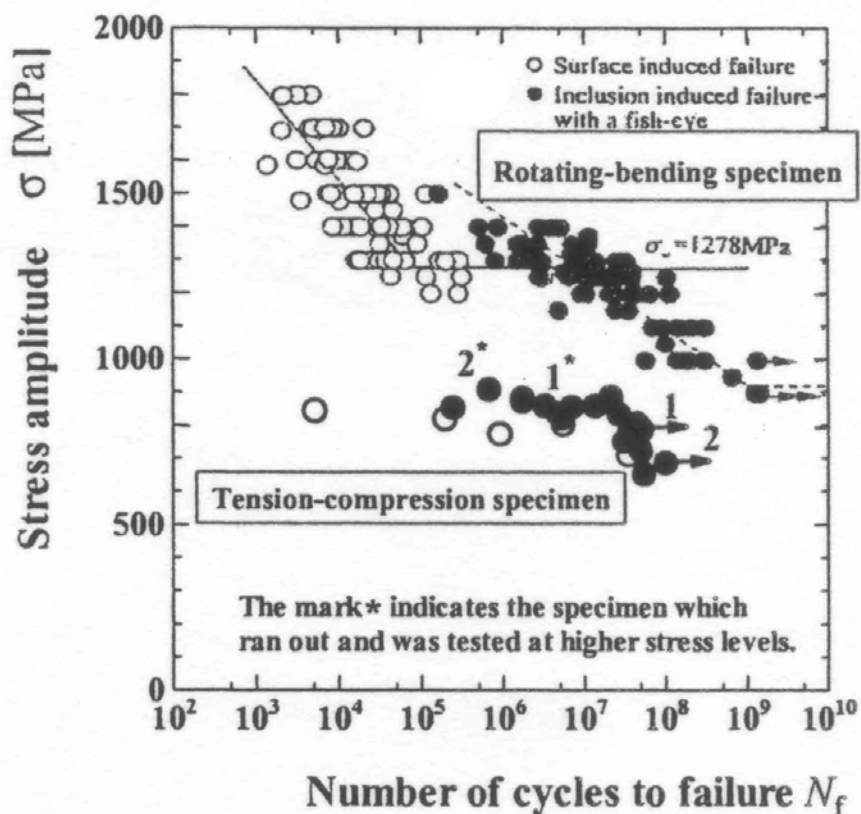
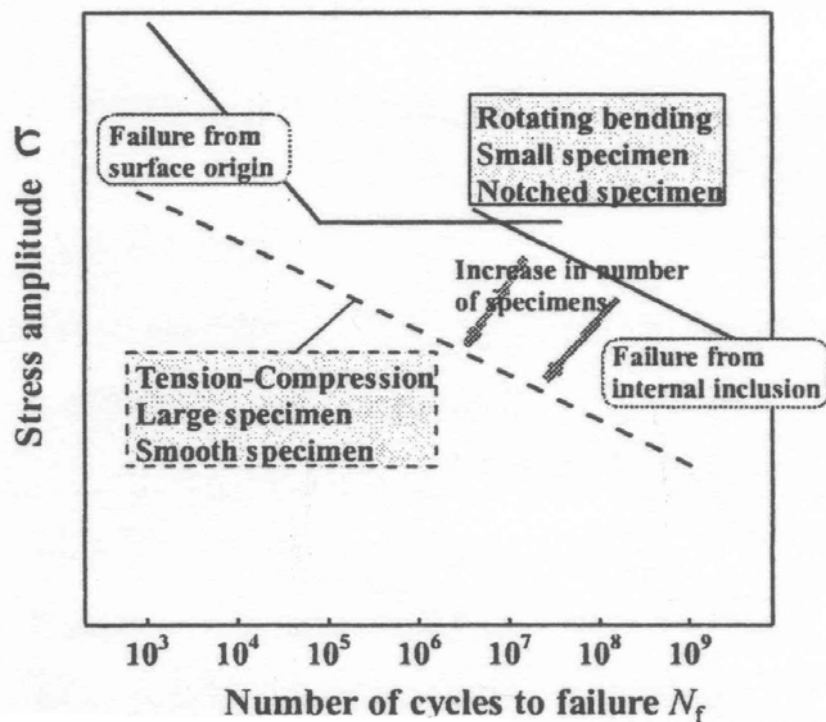
obr. 6. Schematická multi-stage Manson-Coffinova křivka pro žíhané houževnaté kovy a slitiny [9].



obr. 7. S-N křivka vysokouhlíkové chromové oceli SUJ2 (1,01%C, 1,45%Cr) [1].

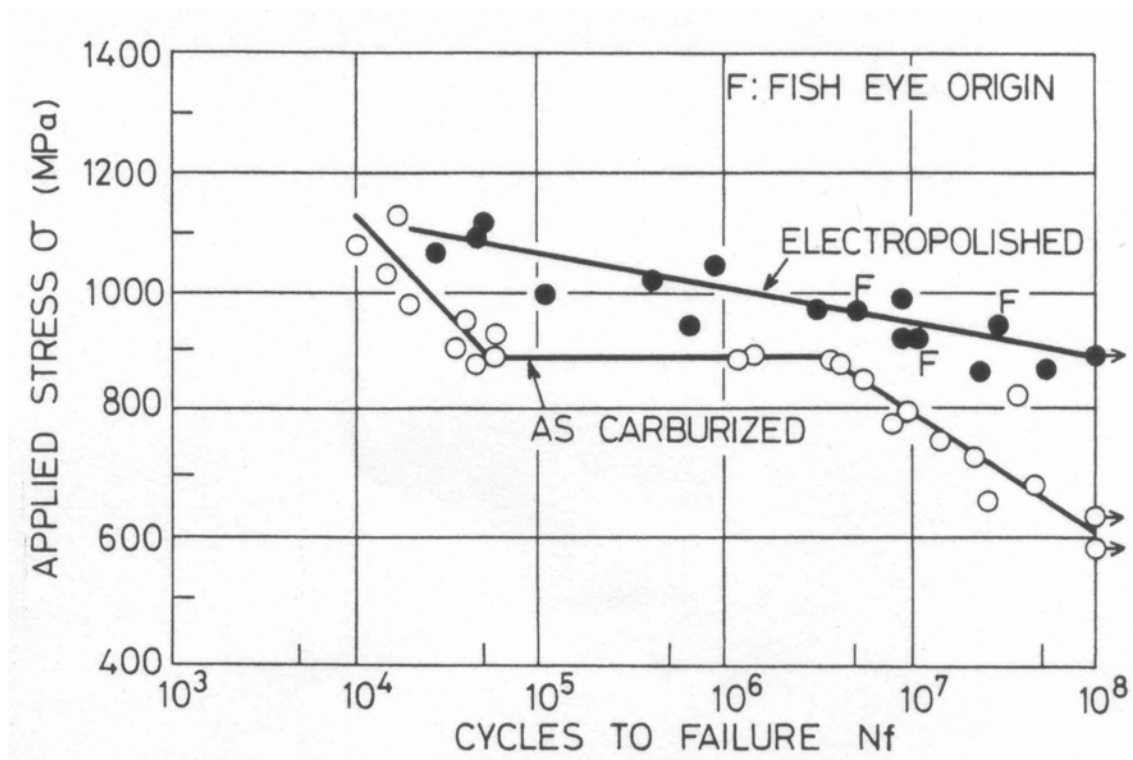


obr. 8. *Fish Eye* [11] .



○: Specimen QT: Quenched and tempered
●: Specimen VQ: Heat treated in a vacuum followed by quenching and tempering

obr. 9. Vliv podmínek zatěžování a TZ na tvar S-N křivek [6].



obr. 10. Vliv přípravy povrchové vrstvy vzorků na tvar S-N křivek [5] .

Seznam symbolů a zkratek

σ_a – amplituda napětí

N_f , N_{crit} , N_c – počet cyklů do lomu, kritický počet cyklů, počet cyklů odpovídající časované mezi únavy

PSP – persistentní skluzový pás

UHFC – ultra high cycle fatigue

$\gamma_{pl,PSP}$ – plastická smykové deformace v PSP

$\gamma_{pl,M}$ – plastická smykové deformace v matrici (mimo PSP)

$\gamma_{pl,loc}$ – plastické smykové deformace lokální

Použitá literatura :

- [1] Sakai, T. et al: Experimental Evidence of Duplex S-N Characteristics in Wide Life Region for High Strength Steels, Int. Proc. of the 7th Int. Fatigue Congress, FATIGUE '99, Beijing, China, June 1999, pp. 573 – 578.
- [2] Furuya, Y. et al: Gigacycle fatigue properties for high-strength low-alloy steel at 100Hz, 600 Hz, and 20kHz, Skripta Materialia 46, Elsevier Science Ltd., 2002, pp 157-162.
- [3] Int. Proc. 1st Int. Conf. Fatigue Life in the Gigacycle Regime, Paris, France, June-July 1998.
- [4] Bokůvka, O. et al: Únavová odolnost konstrukčních materiálů při vysokých frekvencích zatáženosti, Sborník konference „Letná škola únavy materiálů 2000“, 5.ročník, 2000, pp. 131-140.
- [5] Naito, T. et al: Fatigue Behavior of Carburized Steel with Internal Oxides and Nonmartensitic Microstructure near the Surface, Metallurgical Transactions A, Vol.15A, July, 1984, pp.1431-1436.
- [6] Murakami, Y.: Mechanism of Fatigue Failure in Ultralong Regime, Proc. of the International Conference on Fatigue in the Very High Cycle Regime, 2-4 July, 2001, Vienna, Austria, pp. 11-22.
- [7] Lukáš, P., Kunz, L.: Specific features of high-cycle and ultra-high-cycle fatigue, Proc. of the International Conference on Fatigue in the Very High Cycle Regime, 2-4 July, 2001, Vienna, Austria, pp. 23-33.
- [8] Mughrabi, H.: On the life-controlling microstructural fatigue mechanisms in ductile metals and alloys in the gigacycle regime, fatigue Draft. Engng. mater. Struct. 22, 1999, pp. 633-641.
- [9] Mughrabi, H.: On „Multi-Stage“ Fatigue Life Diagrams and Relevant Life-Controlling Mechanisms, Proc. of the International Conference on Fatigue in the Very High Cycle Regime, 2-4 July, 2001, Vienna, Austria, pp. 35-49.
- [10] LUKÁŠ, P. – KUNZ, L.: Fatigue Crack Initiation in FCC Single Crystals, Proc. of the 3rd Int. Conf. on Material Structure & Micromechanics of Fracture, VUT Brno, 2001, CD p. 263 – 271.
- [11] Tanaka, K. et al: Fatigue Crack propagation Behavior Derived from S-N Data in Very High Cycle Regime, Proc. of the International Conference on Fatigue in the Very High Cycle Regime, 2-4 July, 2001, Vienna, Austria.

