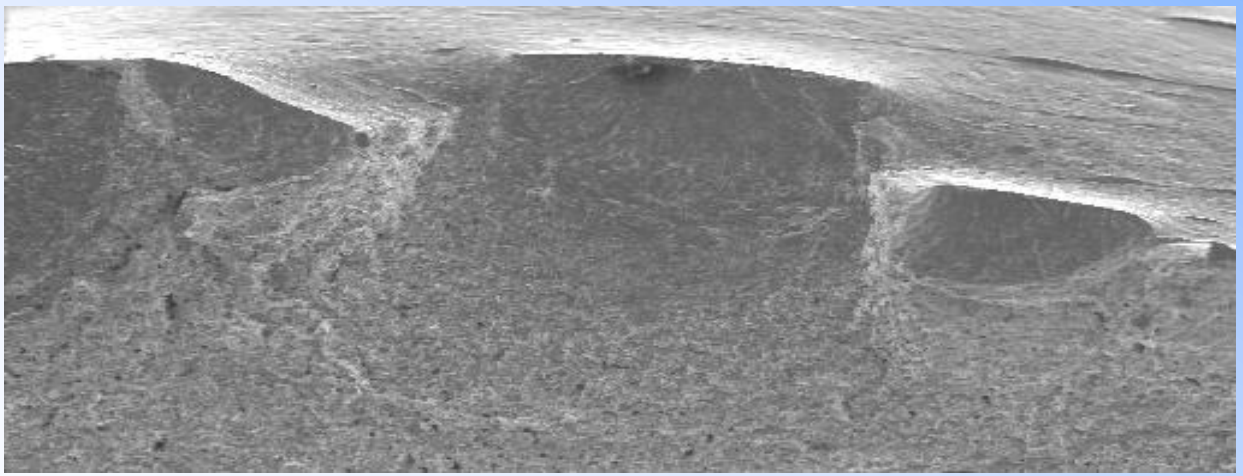
VZŤAH ÚNAVA A POVRCH KOVOVÝCH MATERIÁLOV



Katedra materiálového inžinierstva, Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita v Žiline

Únava

Čo je to únava vo všeobecnosti ?

Čo je to napätie ?

Napätie = stres !

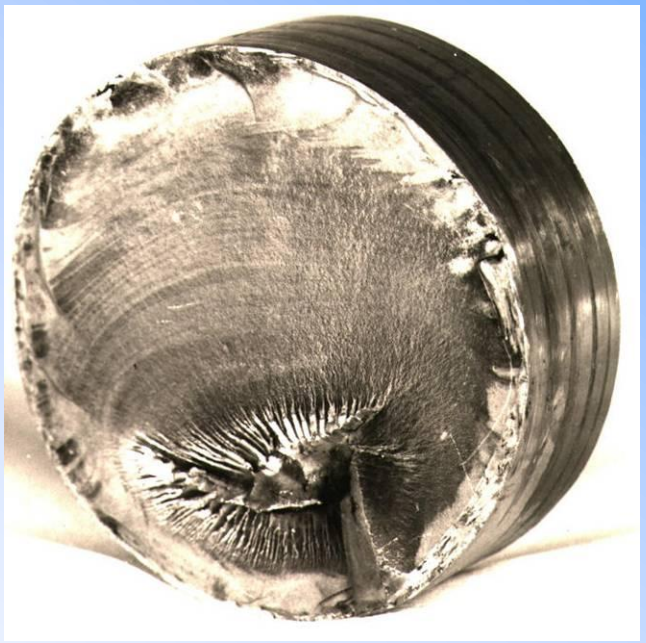
A čo robí stres s človekom alebo s materiálom ?

Pomaly ho postupne ale isto ničí !

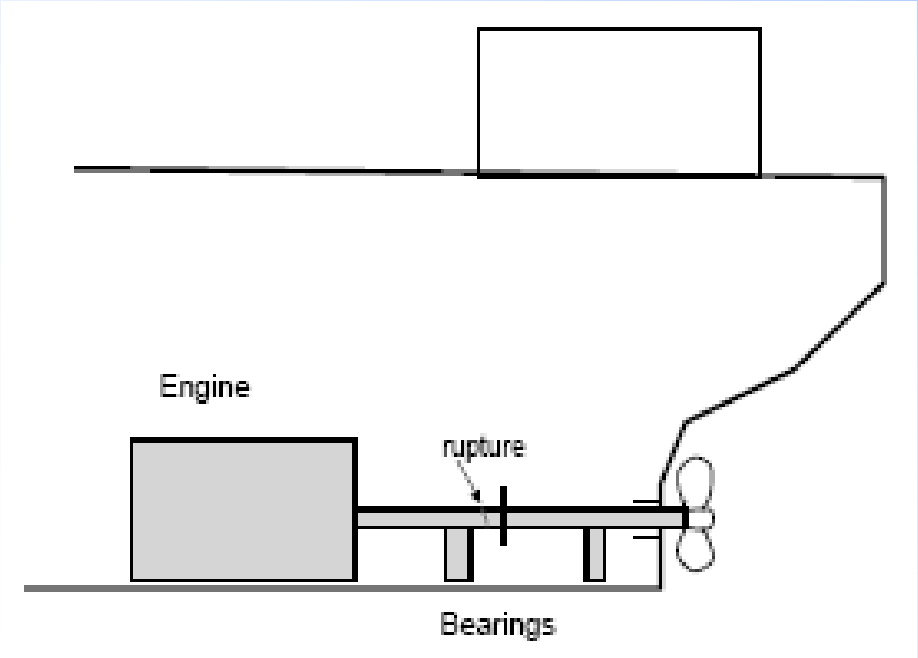
Aký je rozdiel medzi účinkom veľkého stresu a malého stresu ?

Výsledok býva síce rovnaký, ale ...

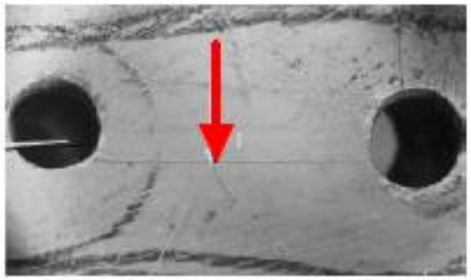
... veľký stres je predsa len veľký stres !

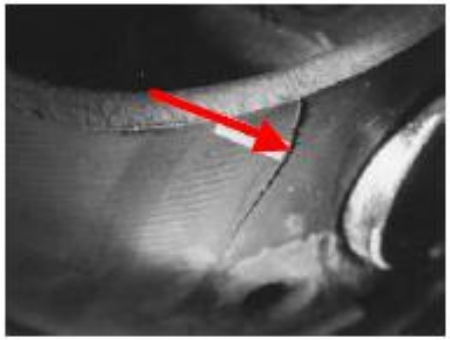


... a podobne je tomu aj pri únave materiálu !

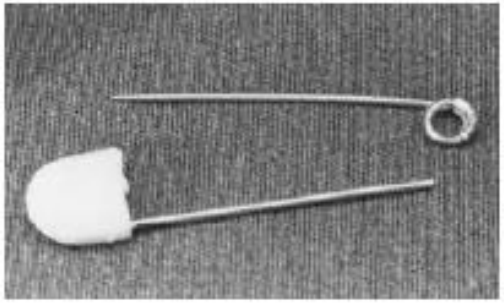
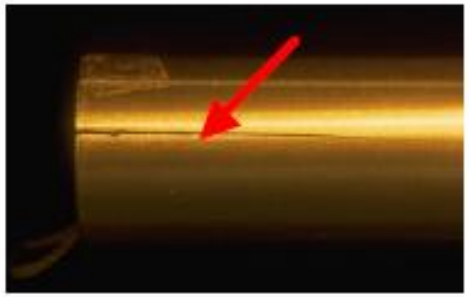


Únava materiálu

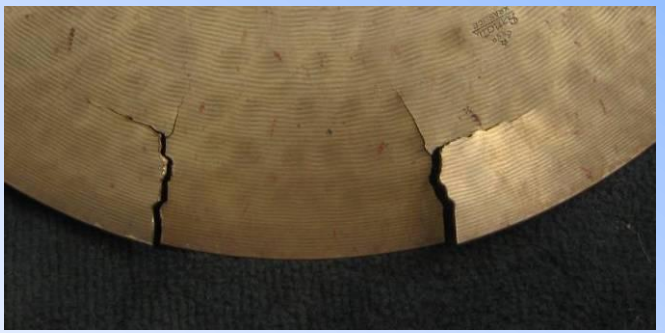




Únava materiálu je problémom takmer všetkých konštrukcií.

Únava materiálu je problém, ktorý je na každom kroku.



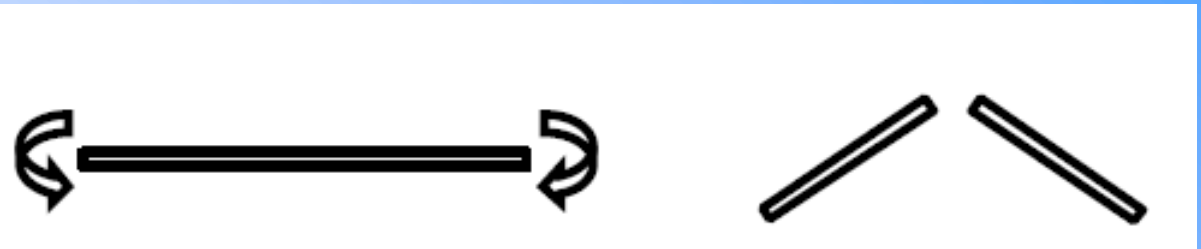
Čo je to teda únava materiálu?

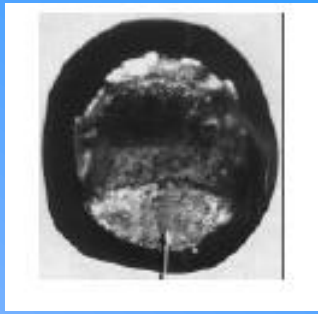
Únava materiálu

K únavovému porušeniu dochádza pri opakovanom zaťažovaní súčiastok strojov a konštrukcií časovo premenlivými vonkajšími silami, ktoré v nich vyvolávajú napätia neprevyšujúce hodnoty prípustné pri ich statickom zaťažovaní.

Proces únavy materiálov predstavuje postupné nevratné hromadenie (kumuláciu) poškodenia pri opakovanom (cyklickom) mechanickom, tepelnom alebo mechanicko - tepelnom namáhaní súčiastok a konštrukcií.

Experiment s drôtom





Závery z experimentu:

1. Životnosť (počet aplikovaných cyklov) závisí od:

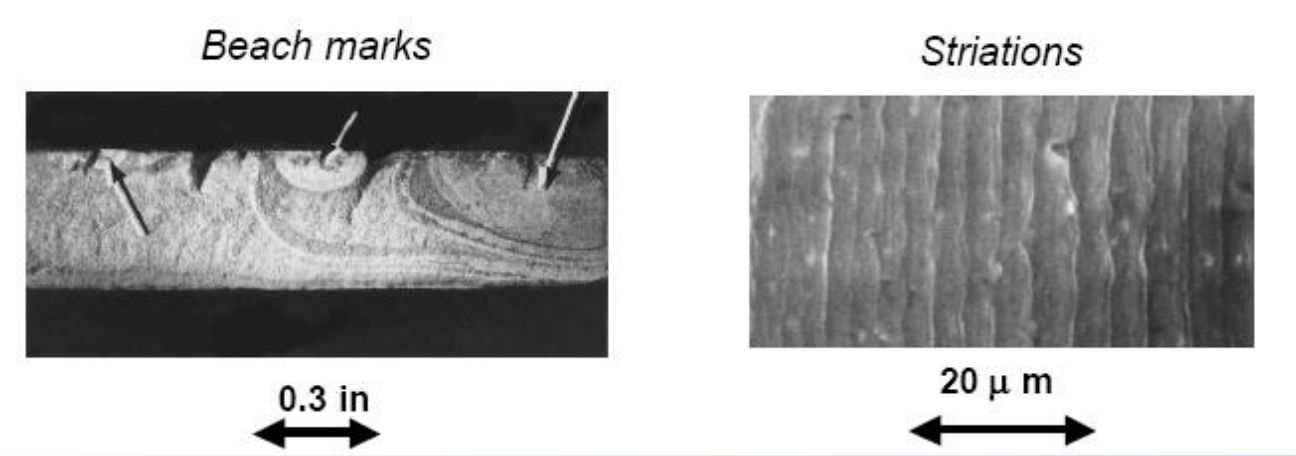
- aplikovanej amplitúdy napätia, zaťaženia alebo deformácie

-kvality drôtu (vruby, škrabance, ...)

2. Vzniká značné množstvo tepla, čo svedčí o prebiehajúcej plastickej deformácii.

Charakteristické znaky únavy.

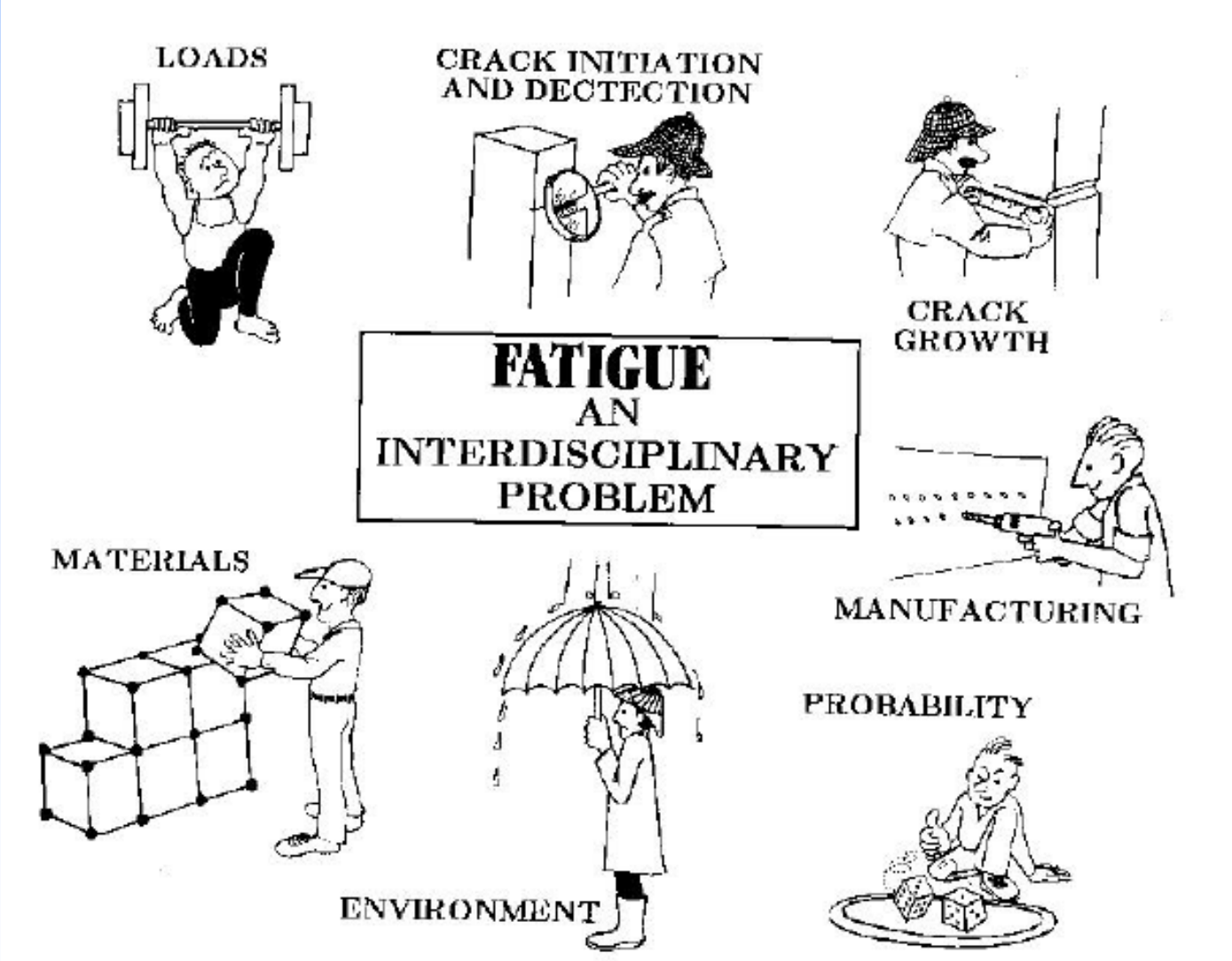
- Na pohľad „krehký“ vzhľad lomovej plochy.
- Trhliny sa začínajú inicializovať väčšinou z povrchu materiálu.
- Na lomových plochách je možné častokrát už voľným okom pozorovať lesklé alebo „zamatové“ plôšky pripomínajúce pláž v morskej zátoke (Beach marks).
- Pri väčších zväčšeniach je možné na lomových plochách pozorovať charakteristické únavové žliabkovanie „striacie“ (striations).



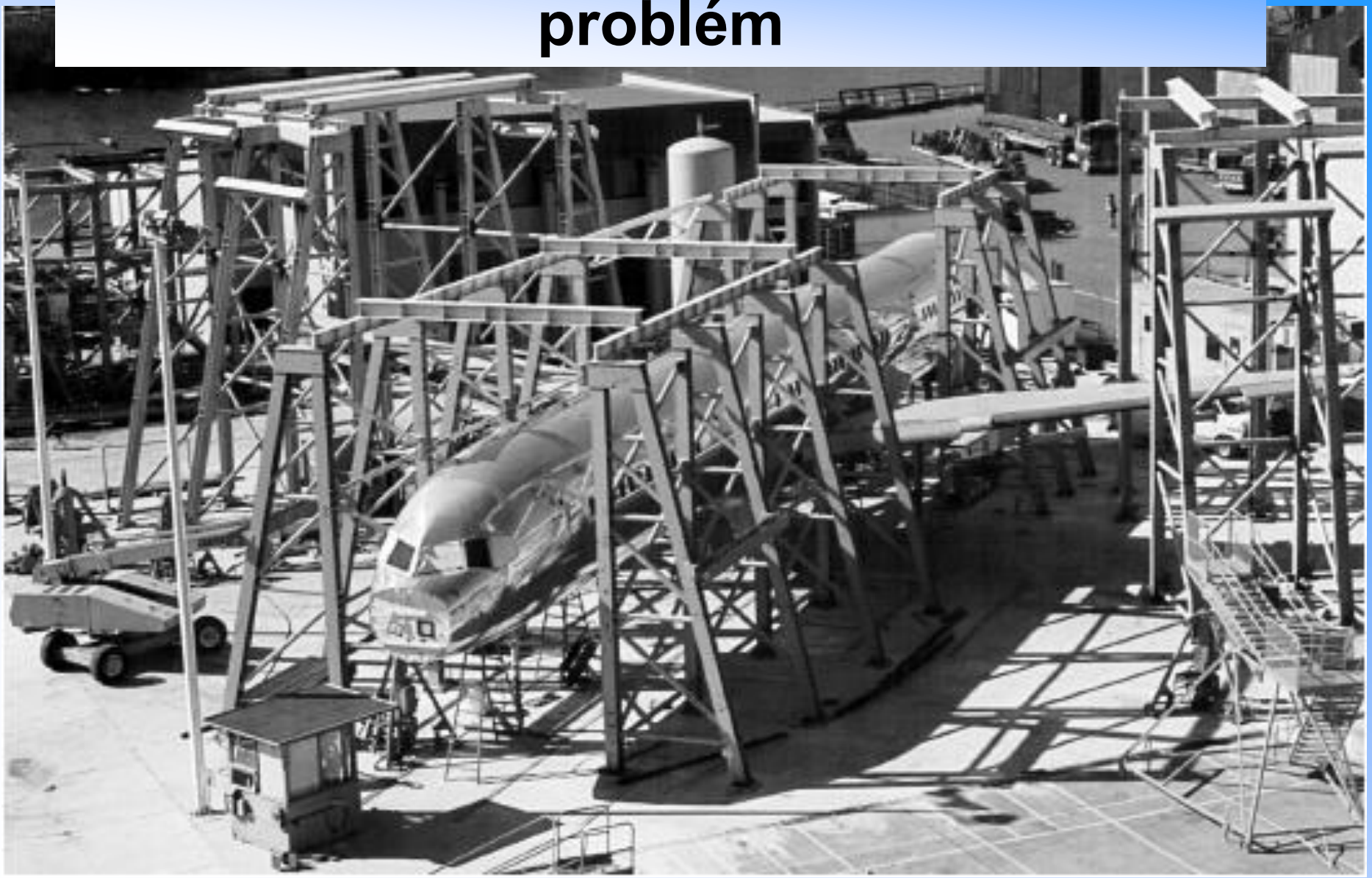
Únava materiálu

- Únava je komplexný problém, ktorý zahŕňa veľa disciplín.
- Únava ovplyvňuje konštrukčné riešenia a prevádzku takmer všetkých typov konštrukcií.
- Pri skúmaní únavy môže byť použitých viacero prístupov a skúšobných metód.

Únava materiálu je interdisciplinárny problém



Únava materiálu je interdisciplinárny problém



História ....

1829 – Wilhelm Albert – diskutuje porušenie banských reťazí po cyklickom zaťažovaní;

1839 – Jean Victor Poncelet – uvádza pojem „únava“ pri popise porušenia materiálov vo vojenskej akadémii v Metz;

1843 – William John Macquorn Rankie – diskutuje koncentráciu napätia (ohyb za rotácie) pri vyšetrovaní havárie dvojkolesia vo Versailles;

1849 – Eaton Hodgkinson – získava prvý finančne nízky grant od UK parlamentu súvisiaci s cyklickým zaťažovaním súčiastok;

1860 – William Fairbairn a August Wöhler vykonávajú prvé systematické štúdium únavy, žel. dvojkolesia, prvé info o možnej medzi únavy, navrhujú σ_a - N (S-N) krivky;

1903 – James Alfred Ewing – diskutuje únavové porušenie vs. mikroskopické trhliny;

1910 – D. H. Basquin – preukázateľne demonštruje tvar σ_a - N (S-N) krivky;

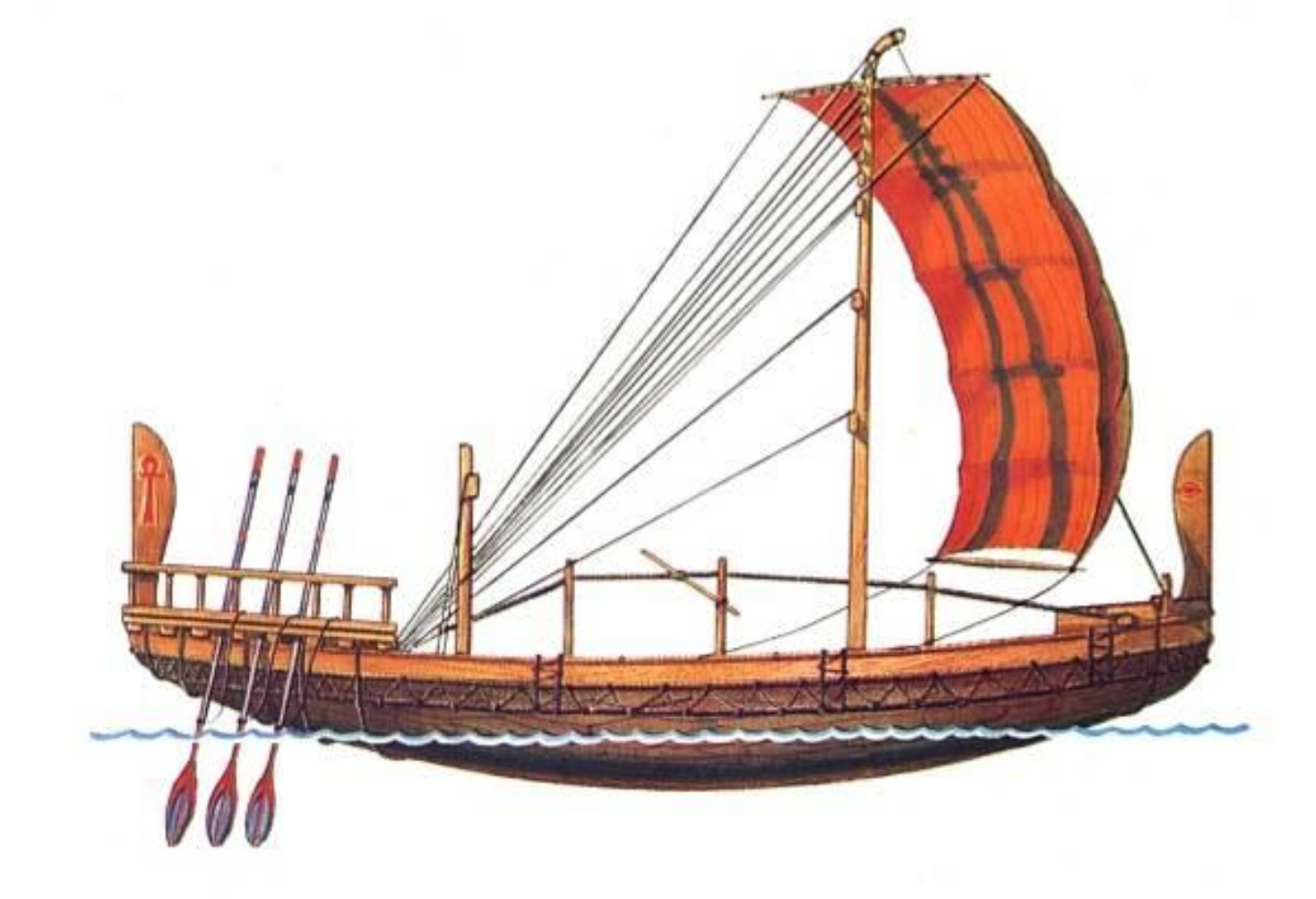
...

...

...

1999 – Sakai, Masuda, Naito, Bathias, Bonis, Asami, Hironaga, Kanazawa, Murakami, ... preukazujú pokles σ_a - N (S-N) kriviek v oblasti ďaleko za hranicou N > 10^7 cyklov; začína sa éra výskumu gigacyklovej únavy.

História ....



Fenická loď (15.-7.stor.pred Kr.), dĺžka 30 m

História ....

História ....

Obrovská mongolská Kublaichánova armáda bola v roku 1284 na veľkej výprave do Japonska zničená tajfúnom, v japonskej histórii oslavovanom ako „božský vietor“ (kamikaze).

Archeologické výskumy ukázali, že aj keby celú obrovskú mongolskú armádu v roku 1284 nezničil tajfún, v japonskej histórii oslavovaný ako „božský vietor“ (kamikaze), zničila by ju sabotážna práca čínskych otrokov, ktorí im stavali lode.

Ako je to teda s históriou únavy?

1.) Doba kamenná

2.) Doba bronzová

3.) Doba železná

4.) Doba drevená

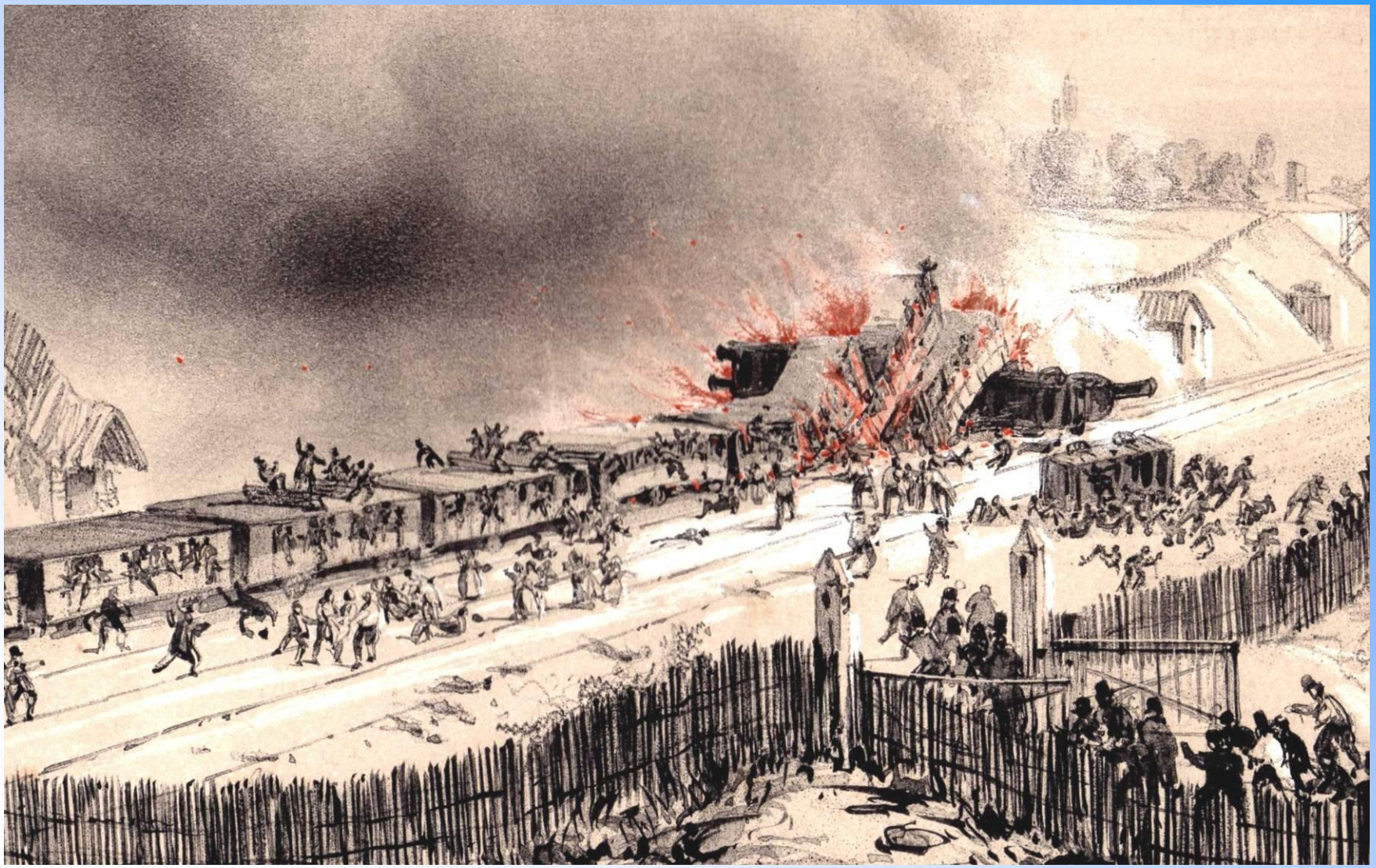
5.) Doba oceľová – priemyselná revolúcia, 18 storočie.

„Prvý motor feudálnej epochy“ = vodné koleso, už nepostačoval a nastal vek pary.

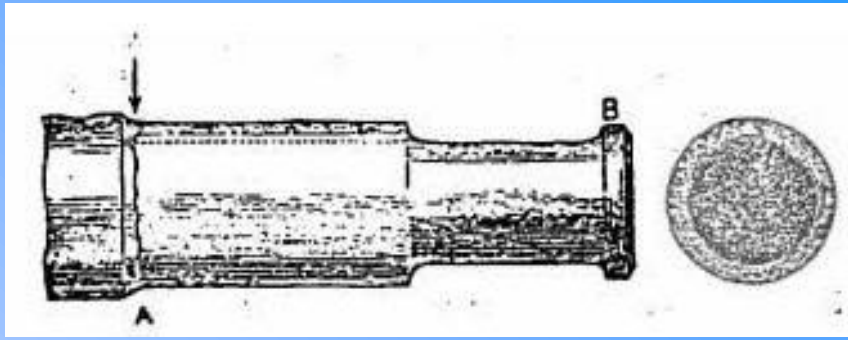
6.) Doba povrchových úprav – 21 storočie.

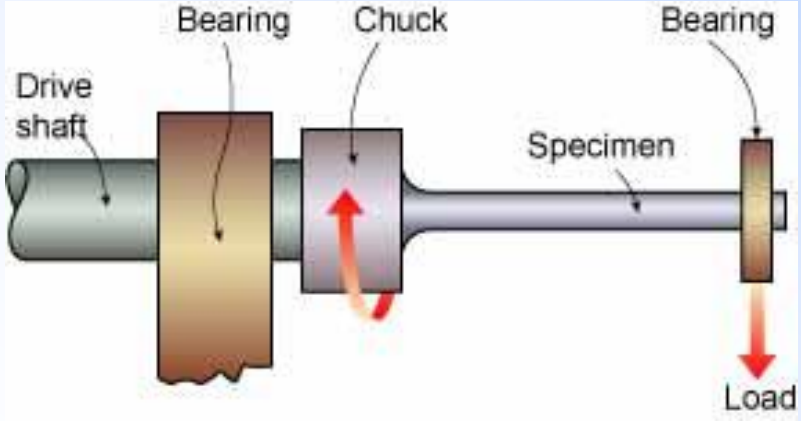
História ....

Nehoda na železničnej trati Paríž - Versailles pri prejazde cez stanicu Meudon pred zastávkou Bellevue 18. mája 1842



História ....





Základné rozdelenie únavy

Prvý spôsob: **- rozdelenie hodnotenia únavovej životnosti podľa historicky daných koncepčných prístupov**

1.) Prístup z hľadiska únavy telies bez trhliny - tzv. **koncepcia lokálneho napätia a deformácie.**

a) stress - life approach, **prístup z hľadiska riadeného napätia** (vysokocyklová oblasť), σ_a **= f (N)**, Wőhler.
RIADIME SILU.

b) strain - life approach, **prístup z hľadiska riadenej deformácie** (nízkocyklová oblasť), ε_{eap} **= f (N)**, Manson-Coffin,
RIADIME DEFORMÁCIU.

Je to hodnotenie z hľadiska celkovej únavovej životnosti.

Hodnotenie z hľadiska celkovej únavovej životnosti.

Celková únavová životnosť (N)	=	počet cyklov potrebných na iniciáciu únavovej trhliny (N_i)	+	počet cyklov potrebných na šírenie únavovej trhliny ($N_š$)

2.) Prístup z hľadiska únavy telies s trhlinou – **koncepcia simulácie vrubovaného telesa**.

c) defect tolerant approach, **prístup z hľadiska prítomnosti defektov nadkritických veľkostí** s využitím poznatkov z lomovej mechaniky, **$da/dN = f(K_a)$**, Paris-Erdogan.

Hodnotenie z hľadiska šírenia únavových trhlín.

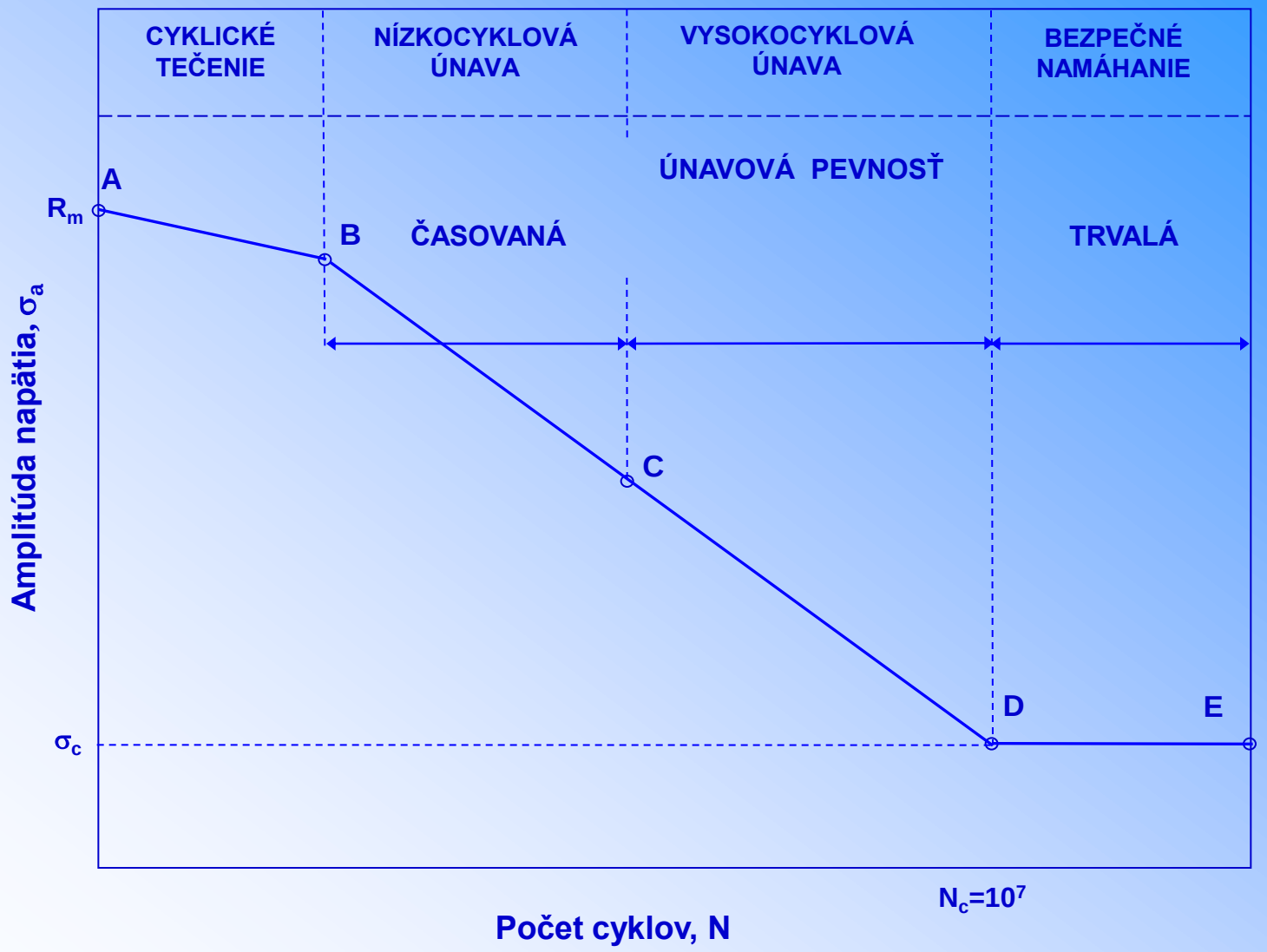
Základné rozdelenie únavy

Druhý spôsob:

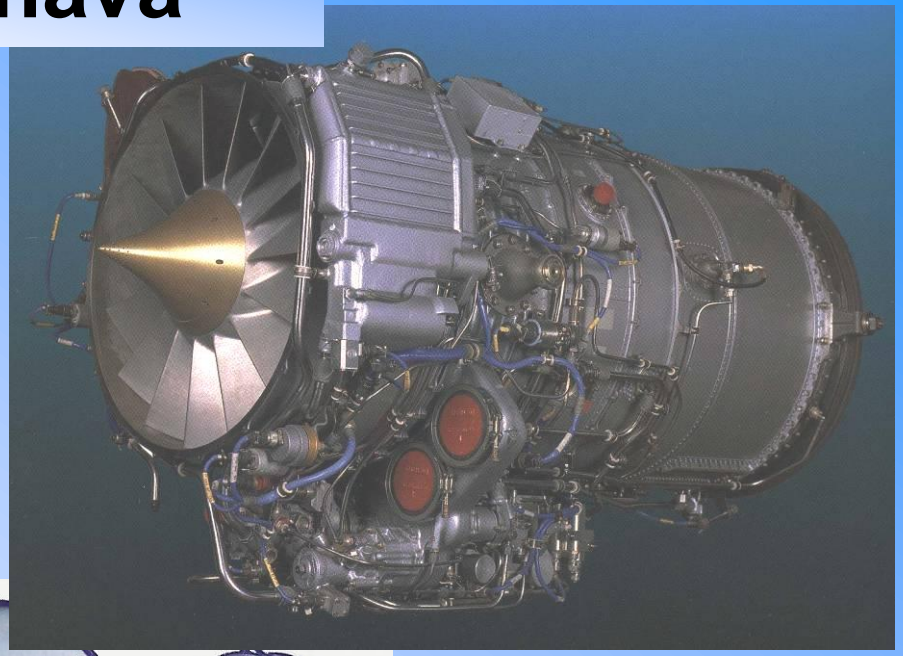
- rozdelenie hodnotenia únavovej životnosti podľa počtu cyklov do lomu

- **Nízkocyklová**
- **Vysokocyklová**
- **Ultravysokocyklová - gigacyklová**

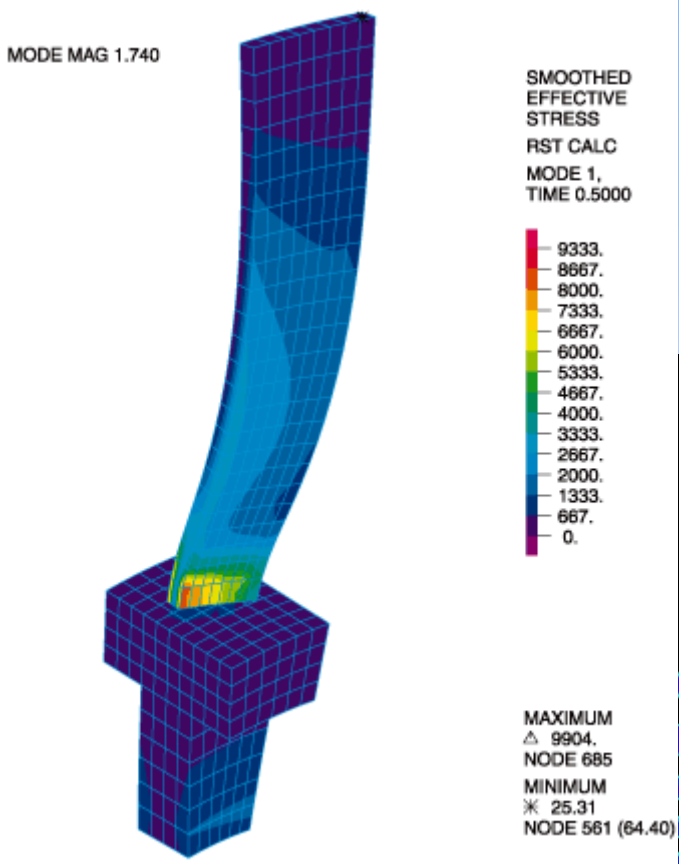
Základné rozdelenie únavy

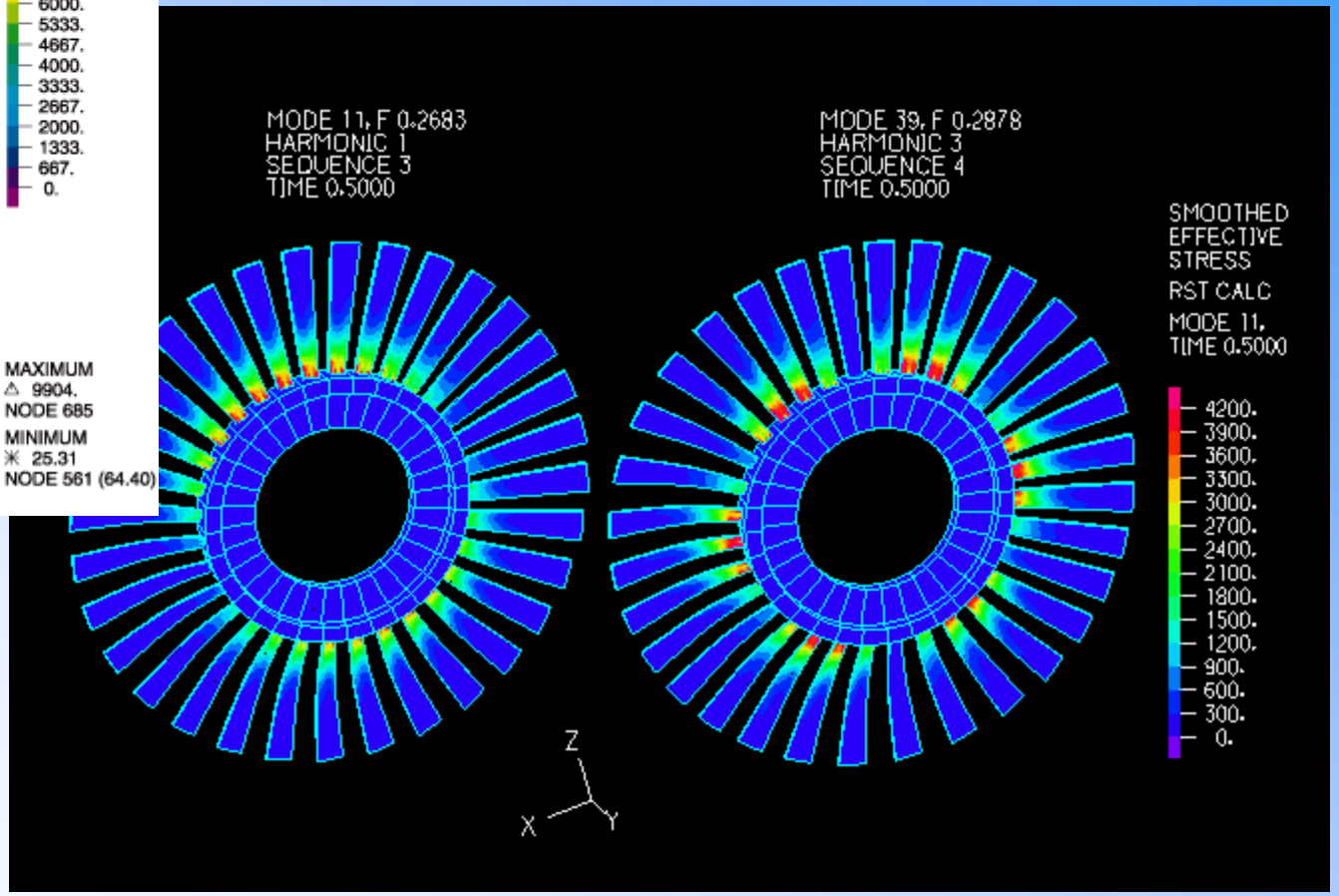


Nízko, vysoko a giga - cyklová únava

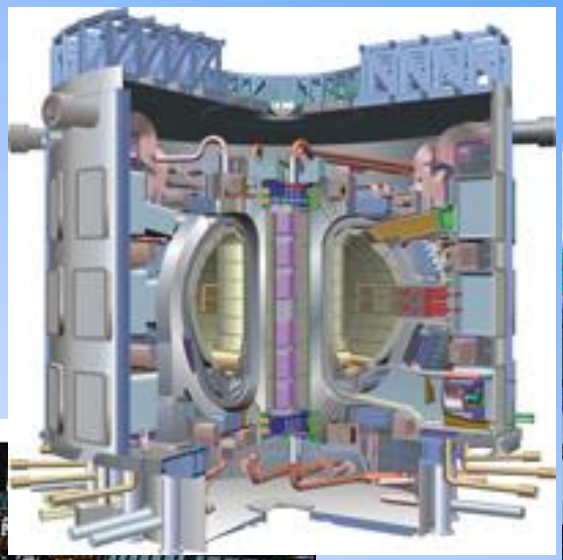


Nízko, vysoko a giga - cyklová únava

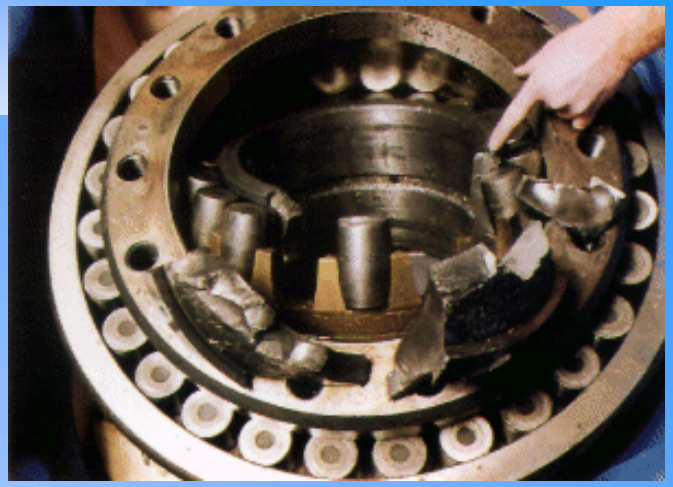


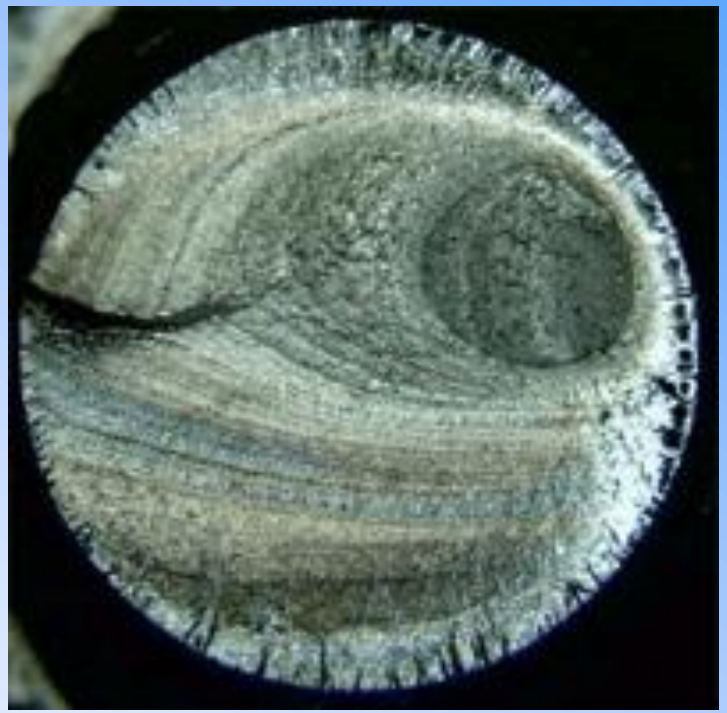


Nízkocyklová únava

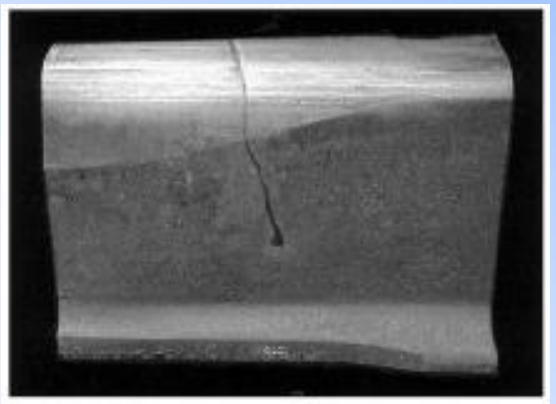


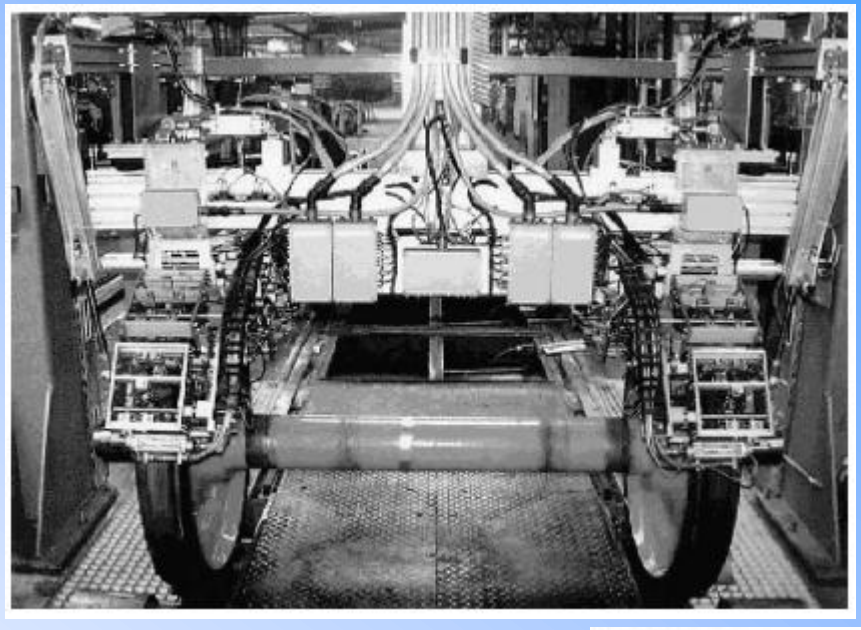
Vysokocyklová únava

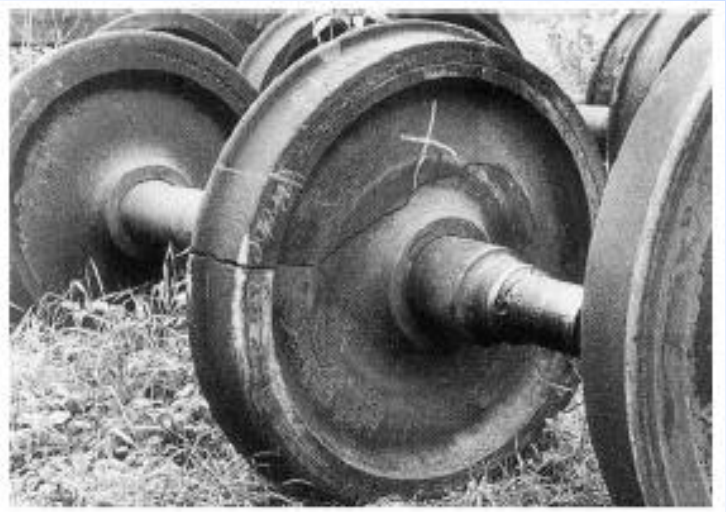


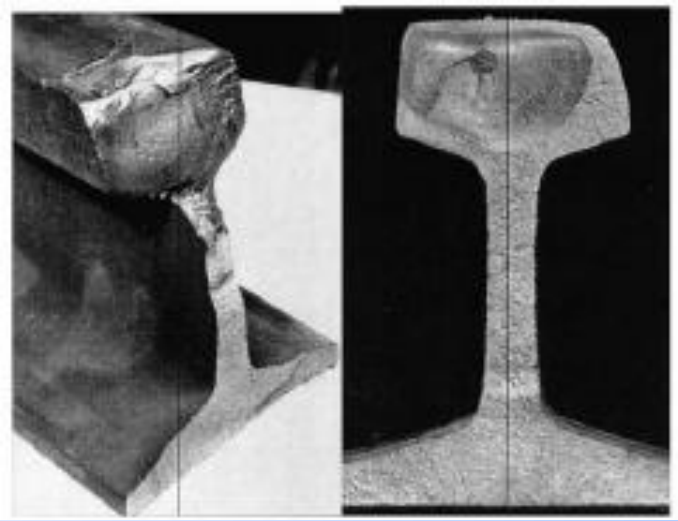


Gigacyklová únava



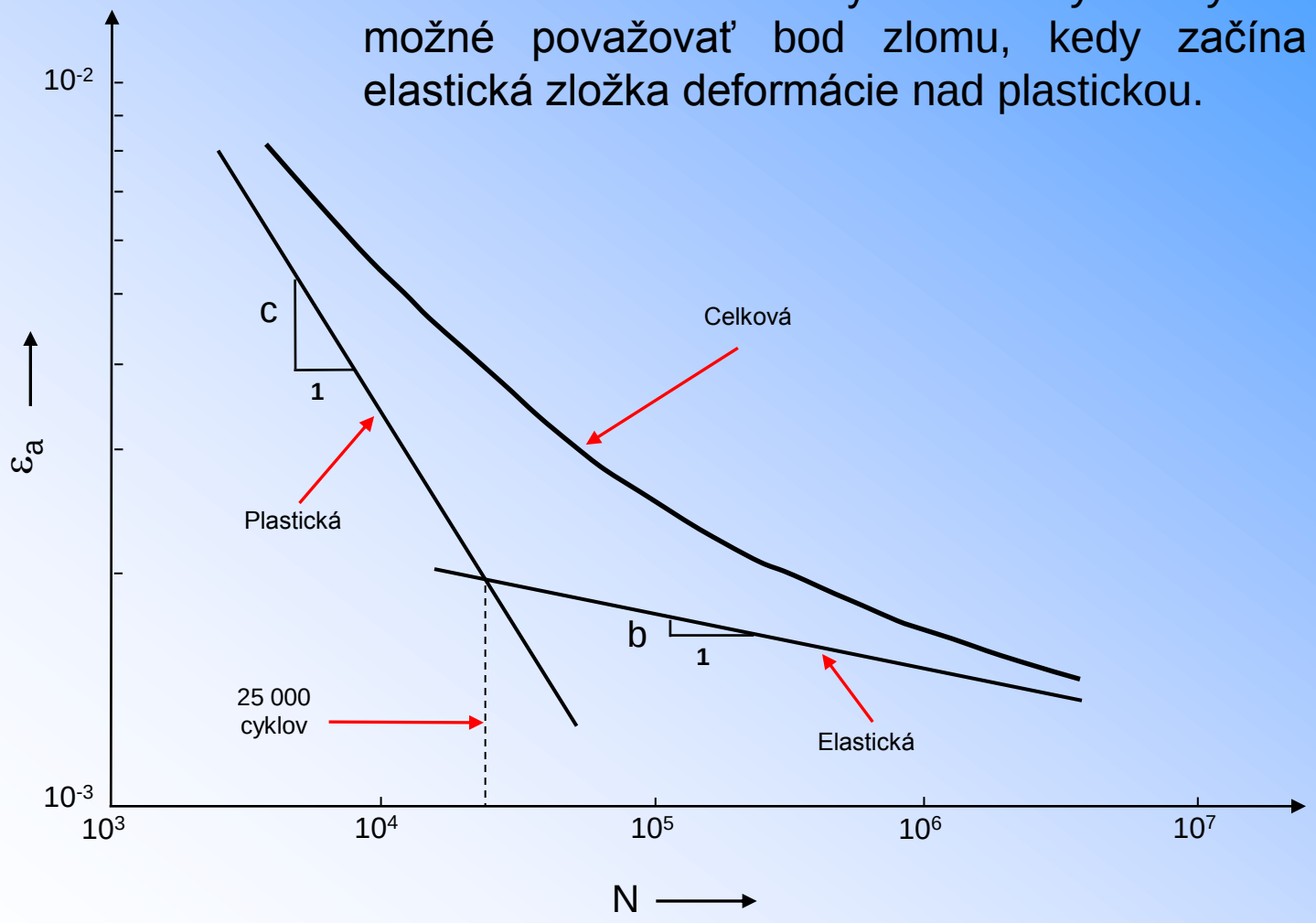




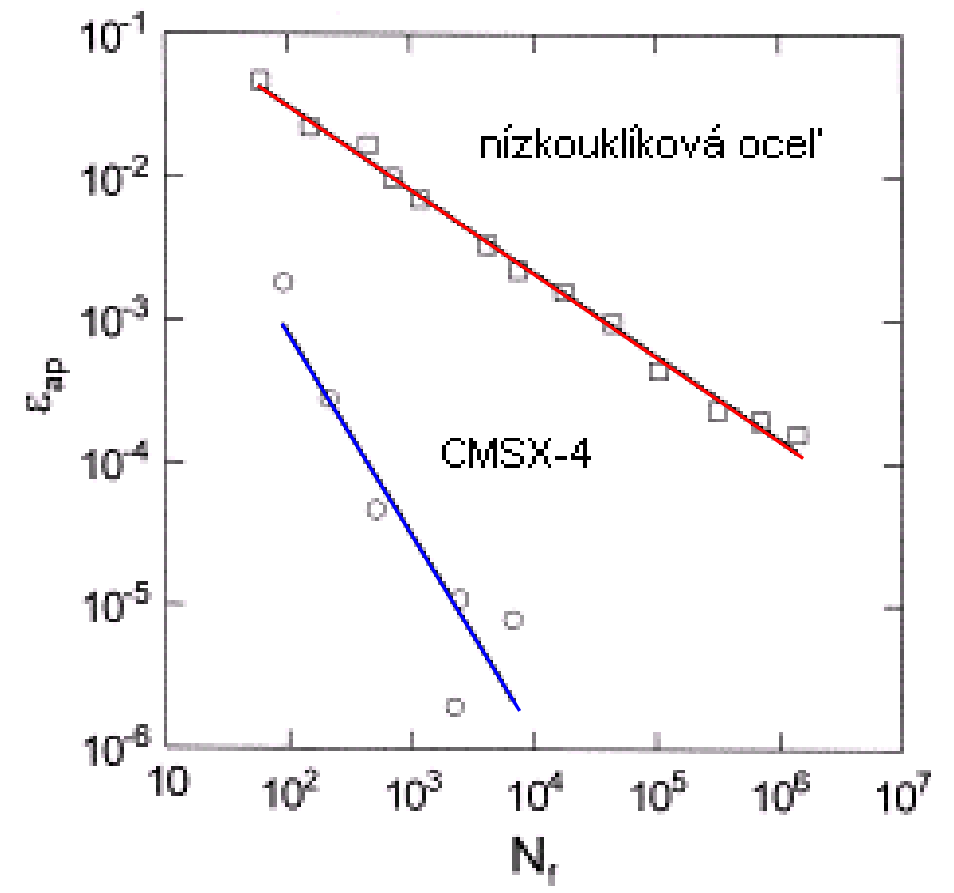


Základné rozdelenie únavy

Za hranicu medzi nízkocyklovou a vysokocyklovou únavou je možné považovať bod zlomu, kedy začína prevažovať elastická zložka deformácie nad plastickou.



Základné rozdelenie únavy

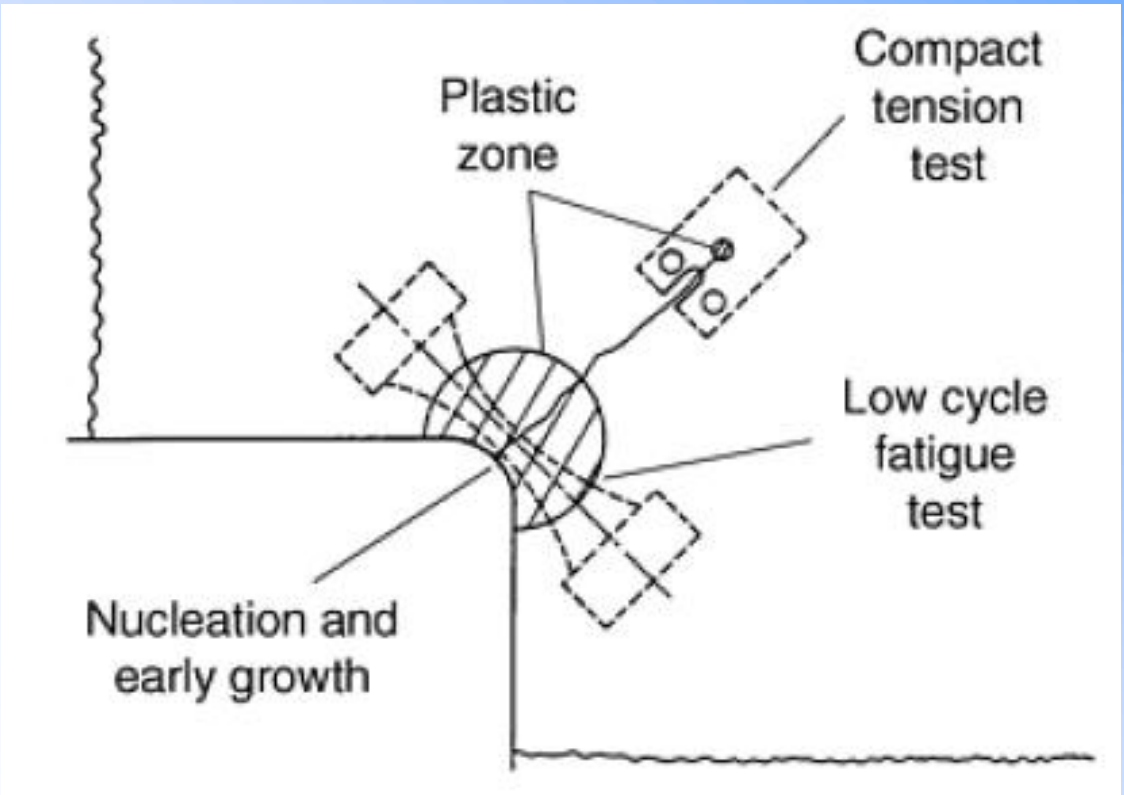


Manson-Coffinová závislosť pre nízkouhlíkovú oceľ (0,1 % C), T=20 °C a pre monokryštal superzliatiny CMSX-4, T=700 °C

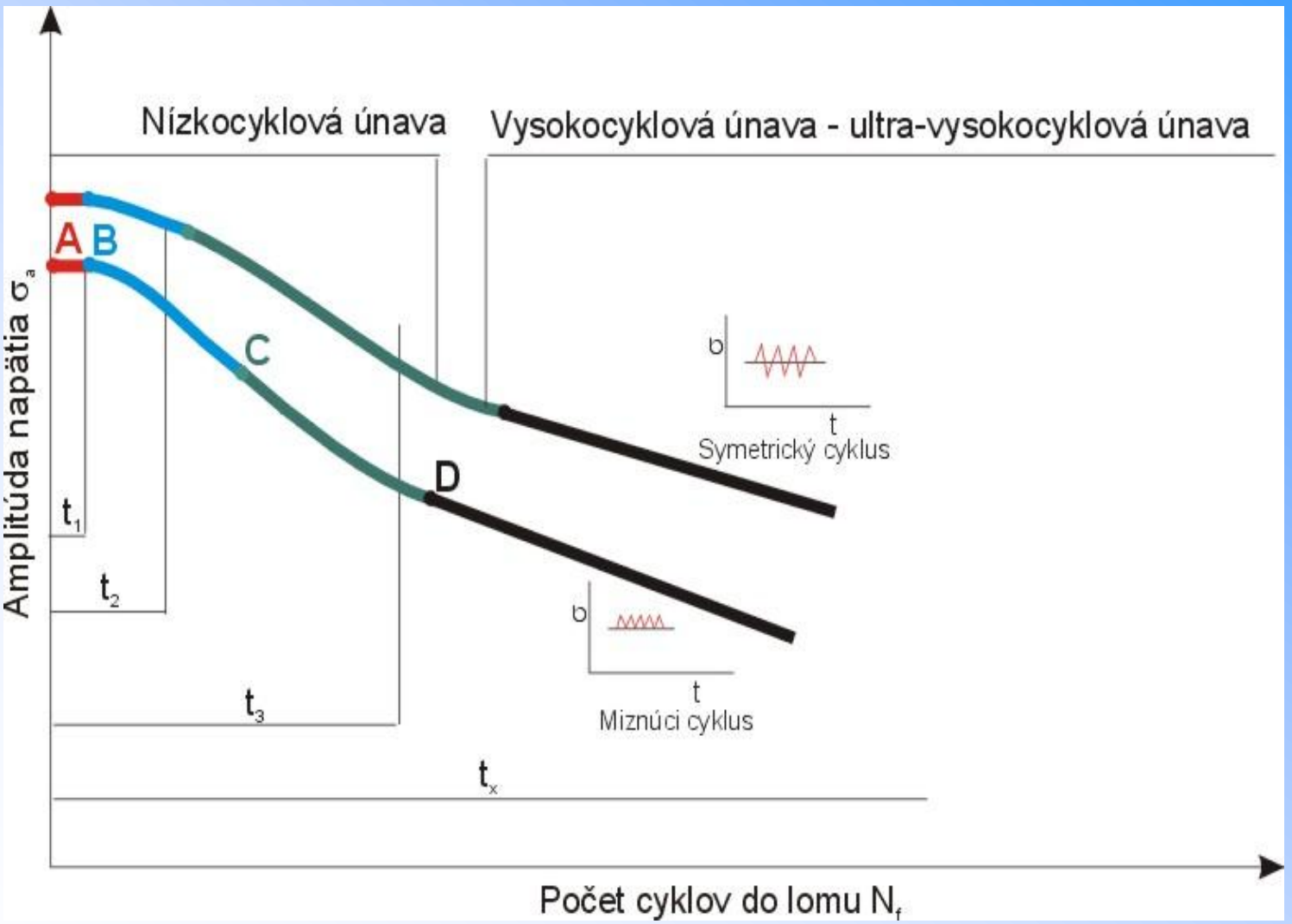
Z hľadiska všeobecnosti je možné za nízkocyklovú únavu považovať prípady kedy plastická deformácia zasahuje celý prierez skúšaného telesa (tak ako to vychádza z jej koncepčného prístupu) a za vysokocyklovú únavu považovať prípady kedy plastická deformácia zasahuje len niekoľko vhodne orientovaných zŕn s aktívnymi sklzovými systémami.

Základné rozdelenie únavy

<u>Koncepcie lokálneho napätia a deformácie</u> - sú založené na tom, že nahrádzame kritické miesto súčiastky alebo konštrukcie vzorkou materiálu (skúšaným telesom) a zisťujeme počet cyklov potrebných na vznik makroskopickej trhliny pri simulácii skutočného napätia a deformácie v oblasti vrubu.

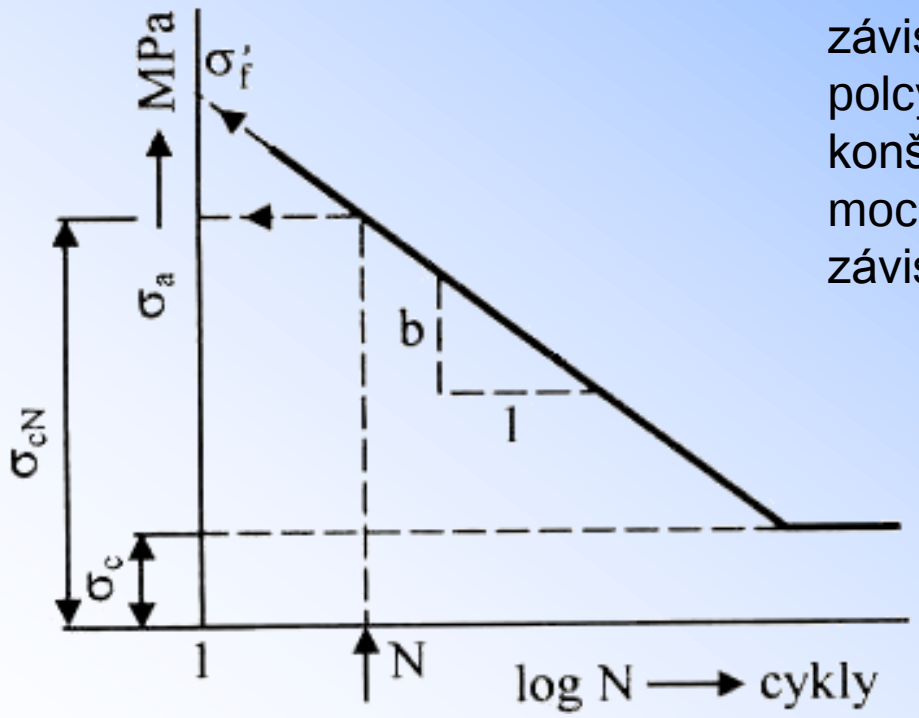


Koncepcia lokálneho napätia – Wőhlerova krivka únavovej životnosti



Wöhlerova krivka únavovej životnosti.

Wőhlerova krivka je najstarším a najznámejším najpoužívanejším a najuniverzálnejším diagramom pre posudzovanie únavovej životnosti materiálov. Charakterizuje oblasť nízkocyklovej, vysokocyklovej aj ultravysokocyklovej únavy.



Wöhlerov diagram, ktorý vyjadruje závislosť amplitúdy napätia od počtu polcyklov do lomu je možné pre väčšinu konštrukčných materiálov aproximovať mocninovou funkciou (Basquinovou závislosťou):

$$\sigma_a = \sigma'_f \cdot (2N)^b$$

kde σ_f' je súčiniteľ únavovej pevnosti, *b* exponent únavovej pevnosti.

σ_{max} = maximálne napätie cyklu

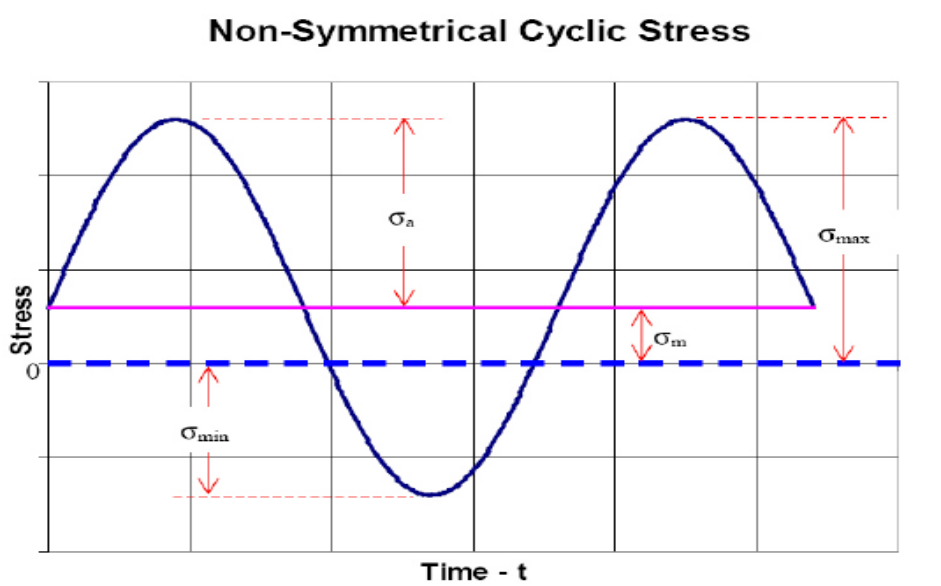
σ_{min} = minimálne napätie cyklu

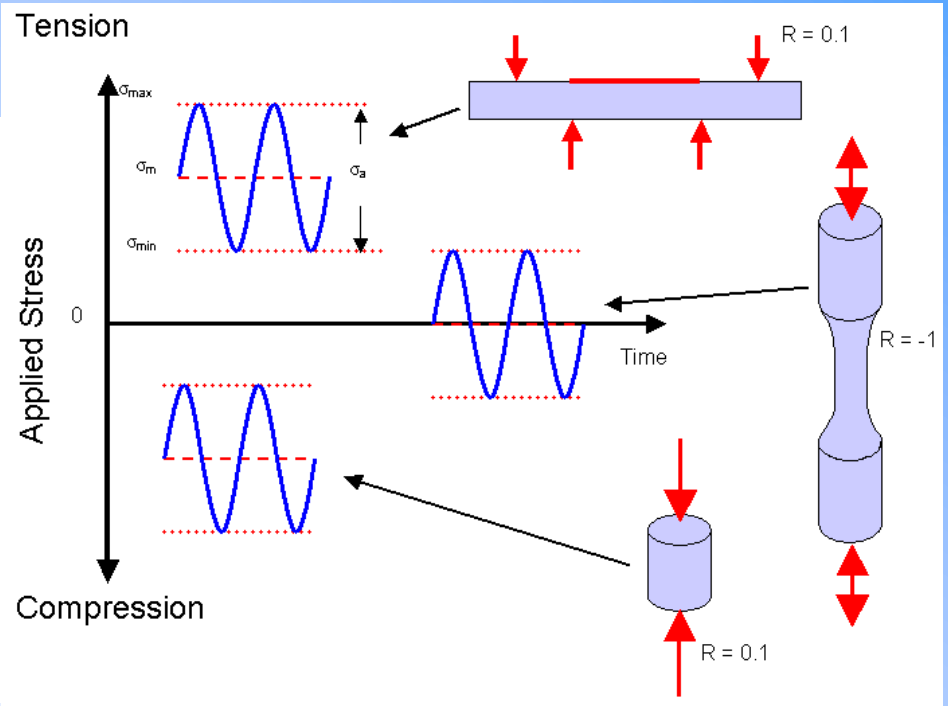
σ_{mean} = stredné napätie cyklu = $\dfrac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$

$\Delta\sigma$ = interval výkmitu napätia = $\sigma_{max} - \sigma_{min}$

σ_a = amplitúda napätia = $\dfrac{\Delta\sigma}{2} = (\sigma_{max} - \sigma_{mean}) = (\sigma_{mean} - \sigma_{min})$

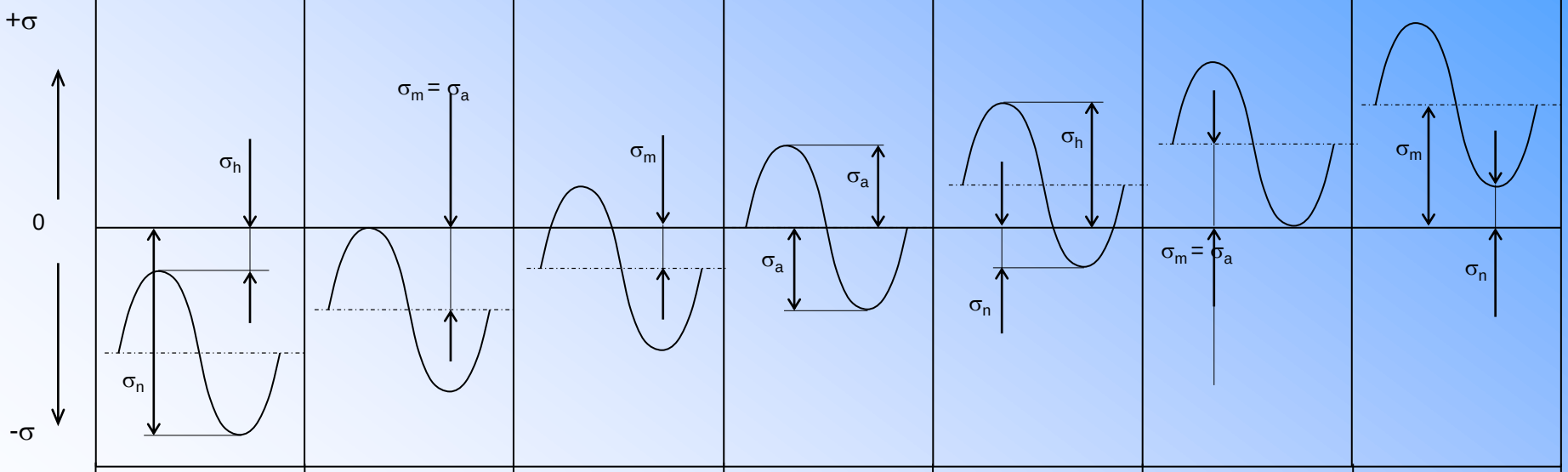
R = parameter asymetrie cyklu = $\dfrac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$

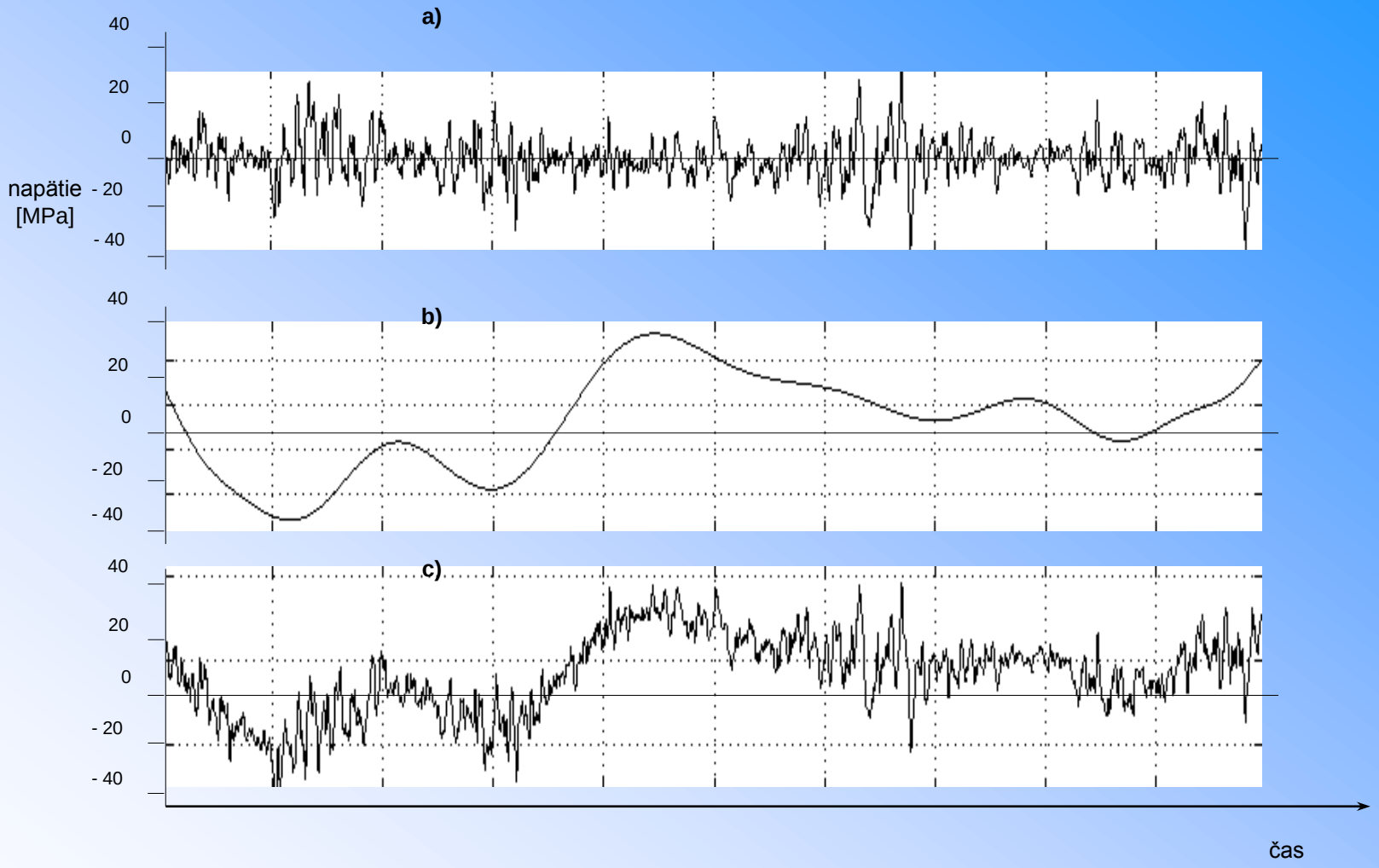




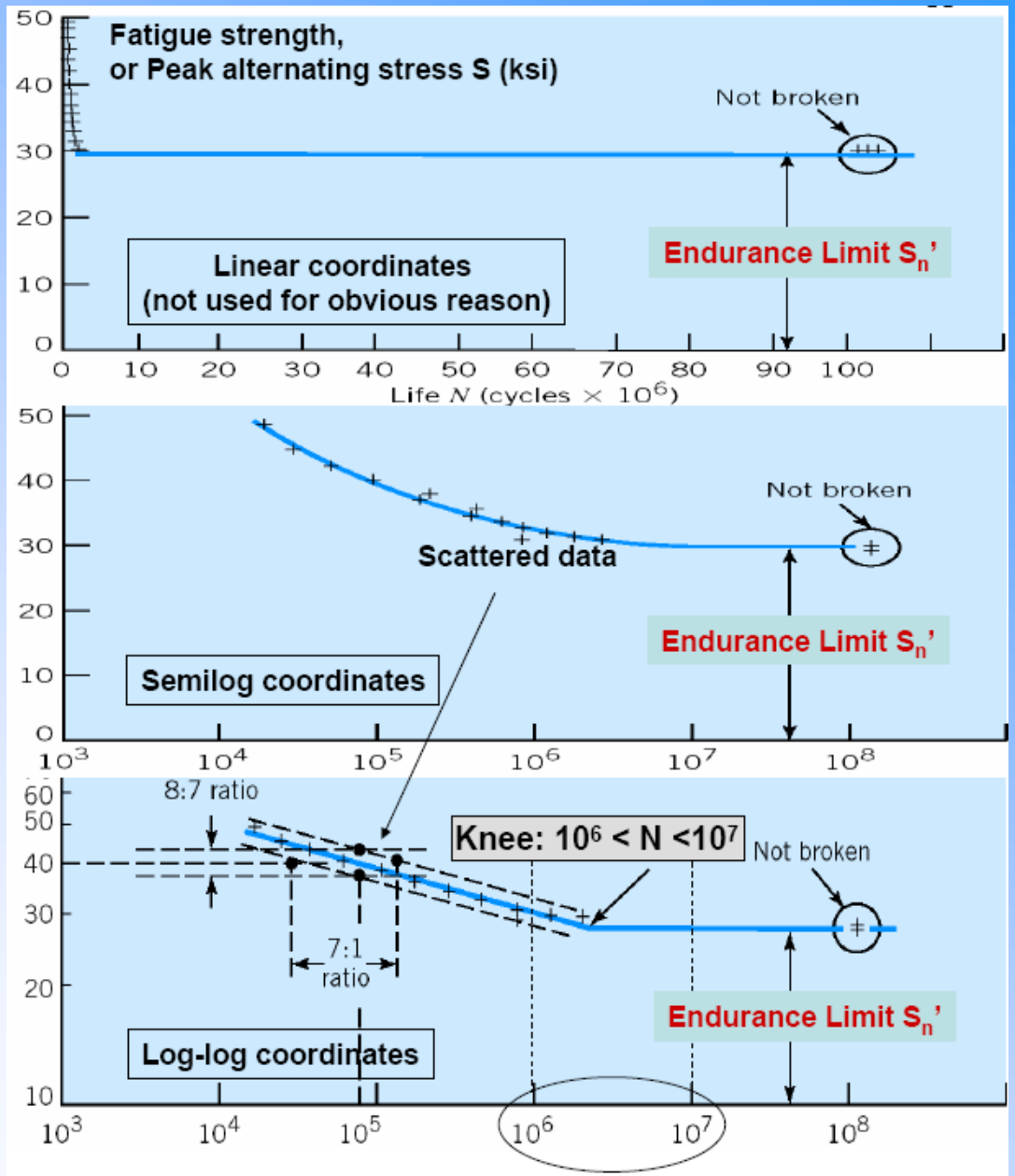
Cyklické napätie

pulzujúce		striedavé			pulzujúce	
záporné pulzujúce	záporné miznúce	záporné nesúmerné	súmerné	kladné nesúmerné	kladné miznúce	kladné pulzujúce
$1 < R < \infty$	$R = \infty$	$-\infty < R < -1$	$R = -1$	$-1 < R < 0$	$R = 0$	$0 < R < 1$
$\lvert\sigma_m\rvert > \lvert\sigma_a\rvert$	$\lvert\sigma_m\rvert = \lvert\sigma_a\rvert$	$\lvert\sigma_m\rvert < \lvert\sigma_a\rvert$	$\sigma_m = 0$	$\lvert\sigma_m\rvert < \lvert\sigma_a\rvert$	$\lvert\sigma_m\rvert = \lvert\sigma_a\rvert$	$\lvert\sigma_m\rvert > \lvert\sigma_a\rvert$





Vzorka záznamu napätia pôsobiaceho v čape riadenia motorového vozidla:
a) v zázname je iba zaťažovanie vyvolané nerovnosťami vozovky, b) v zázname je iba zaťažovanie spôsobené riadením vozidla, c) úplný záznam napätie - čas

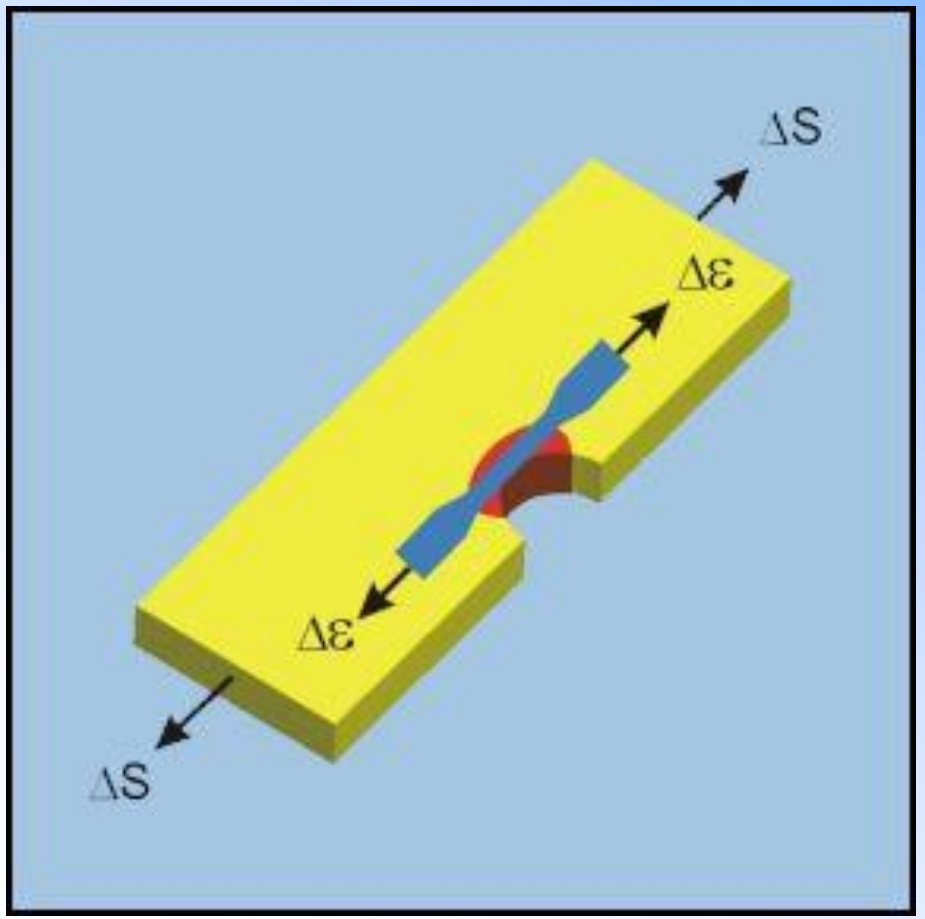


Ferrous materials: for life cycle $N > 10^6 \rightarrow \sigma < S_n'$

Koncepcia lokálnej deformácie – Manson-Coffinova krivka únavovej životnosti

Koncepcia lokálnej deformácie bola vyvinutá v 60-tych rokoch 20-teho storočia. Je založená na predpoklade, že lokálne napätia a deformácie v okolí koncentrátorov napätia riadia únavovú životnosť. Napriek tomu, že väčšina konštrukcií a strojov je v praxi navrhnutá tak, aby nominálne napätia v ich jednotlivých častiach nepresahovali hranicu elastickej deformácie, občasné vysoké zaťaženia spôsobujú plastickú deformáciu v okolí konštrukčných vrubov, ktorým sa nedá vyhnúť. Únavové poškodenie je potom závislé od veľkosti lokálnej plastickej deformácie v okolí koncentrátorov napätia.

Riadiacim faktorom únavového porušenia je amplitúda plastickej deformácie.



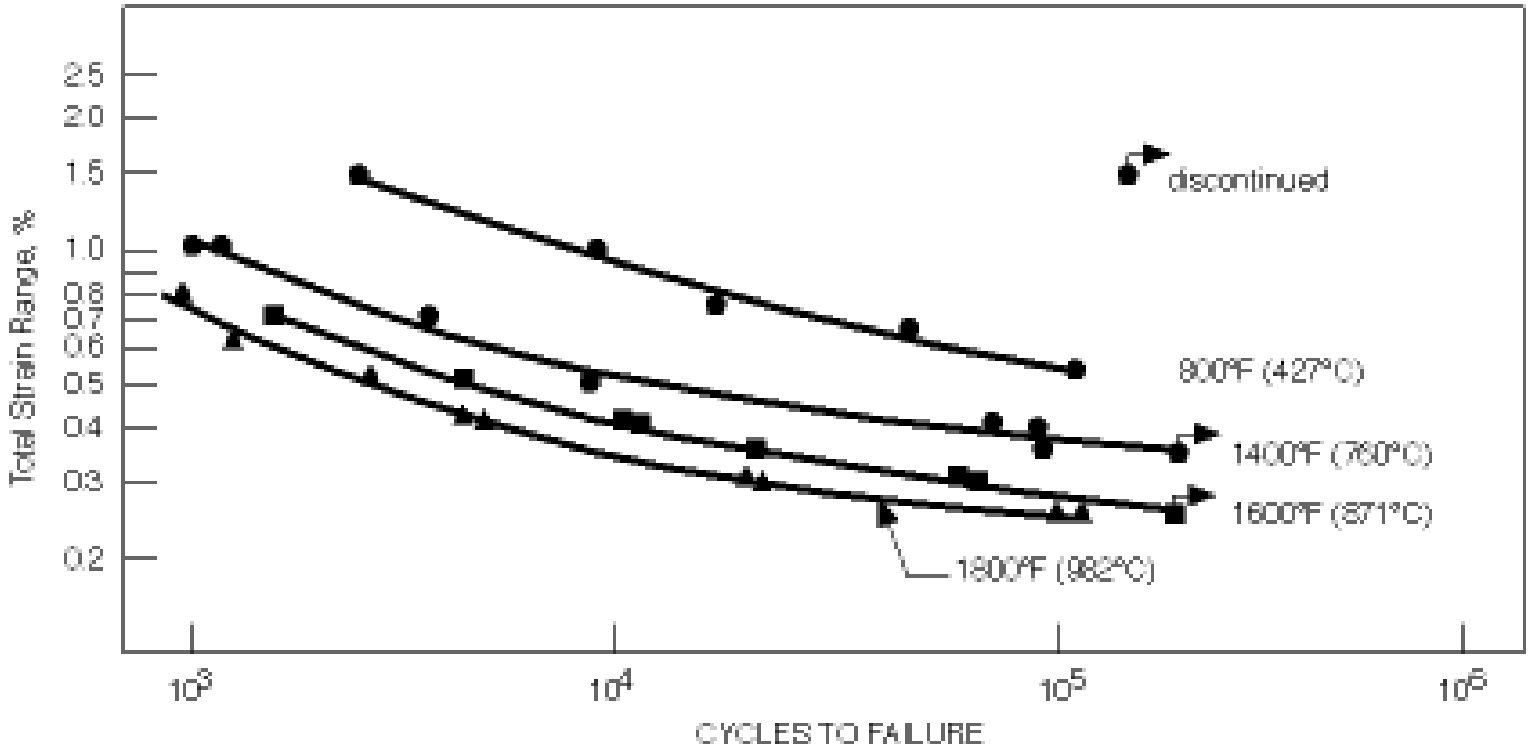
V oblasti nízkocyklovej únavy únavové správanie sa materiálu lepšie charakterizujú skúšky s riadenou deformáciou, lebo v mieste konštrukčného vrubu dochádza k významnej lokalizácii plastickej deformácie.

Preto sa lokálna napäťová a deformačná história vo vrube pri makroskopicky elastickom zaťažovaní veľkého telesa najviac podobá zaťažovaniu s riadenou deformáciou.

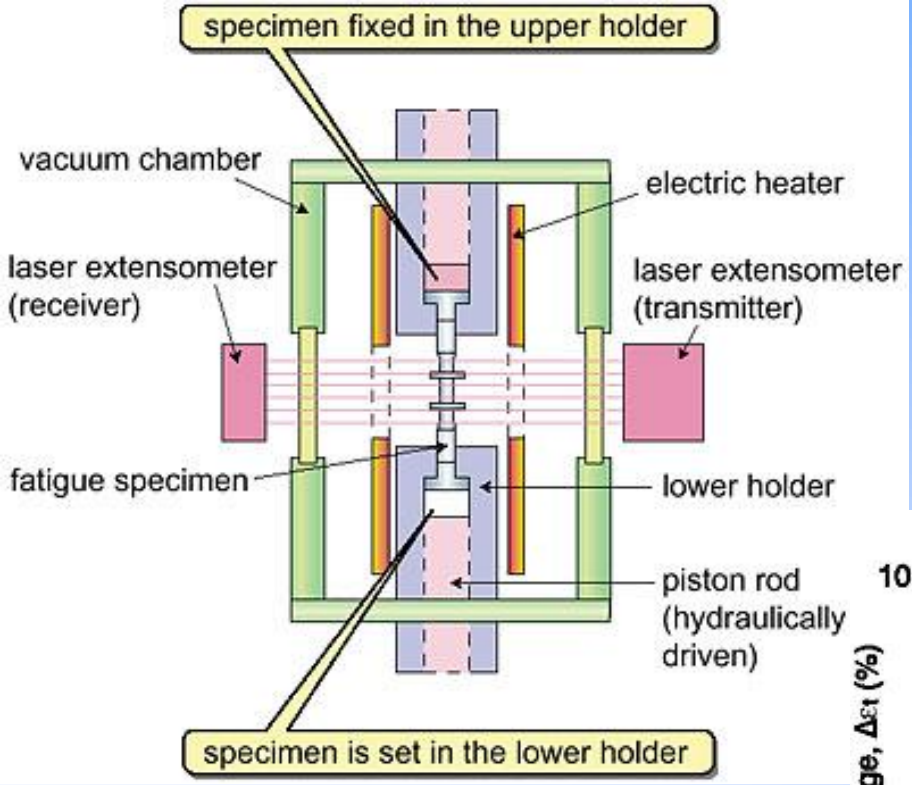
Nízkocyklová únava

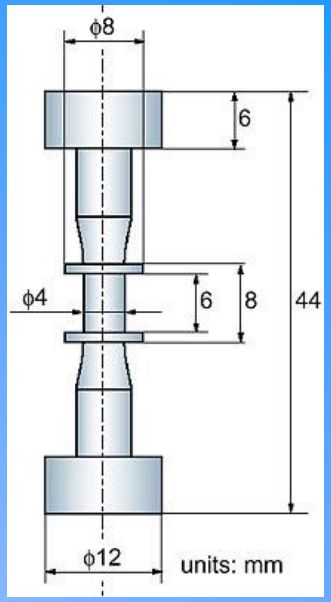
Veľké deformácie (rádovo percentá) a nízky počet cyklov do lomu !

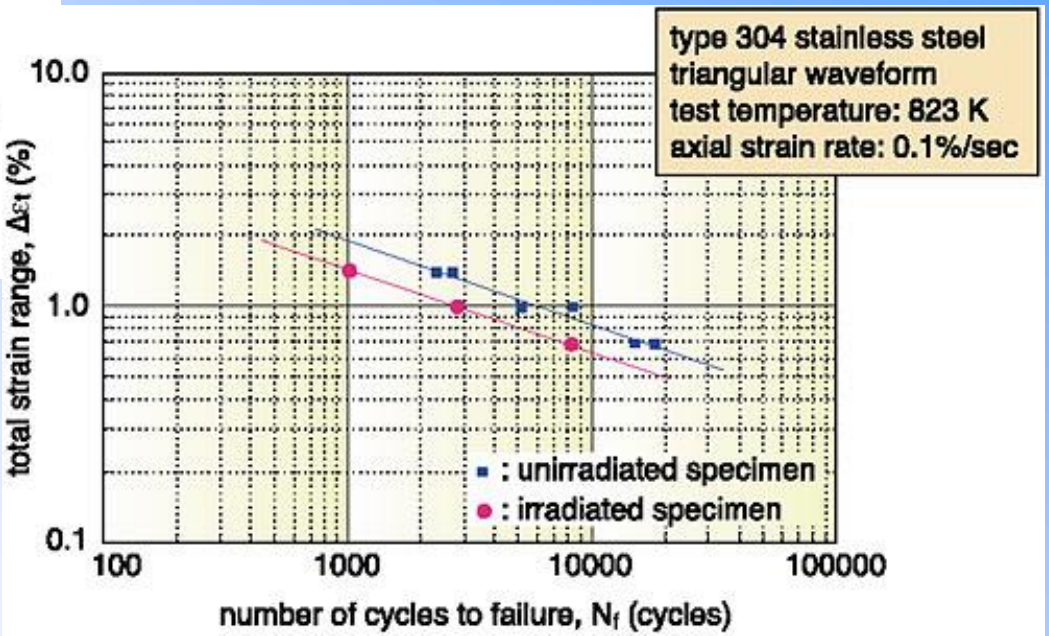
HAYNES® 230® (R=-1, f = 20 cyklov za minútu = 0,33 Hz).



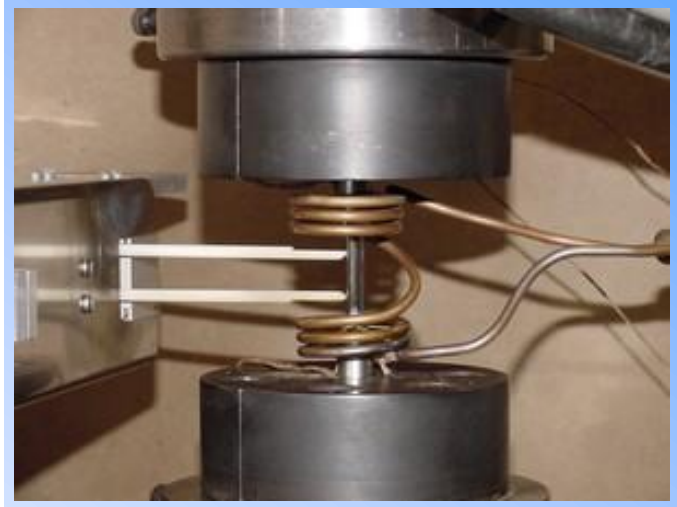
Nízkocyklová únava

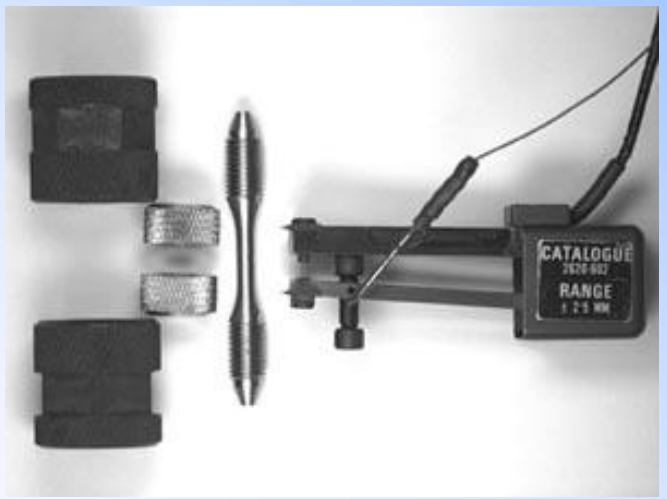






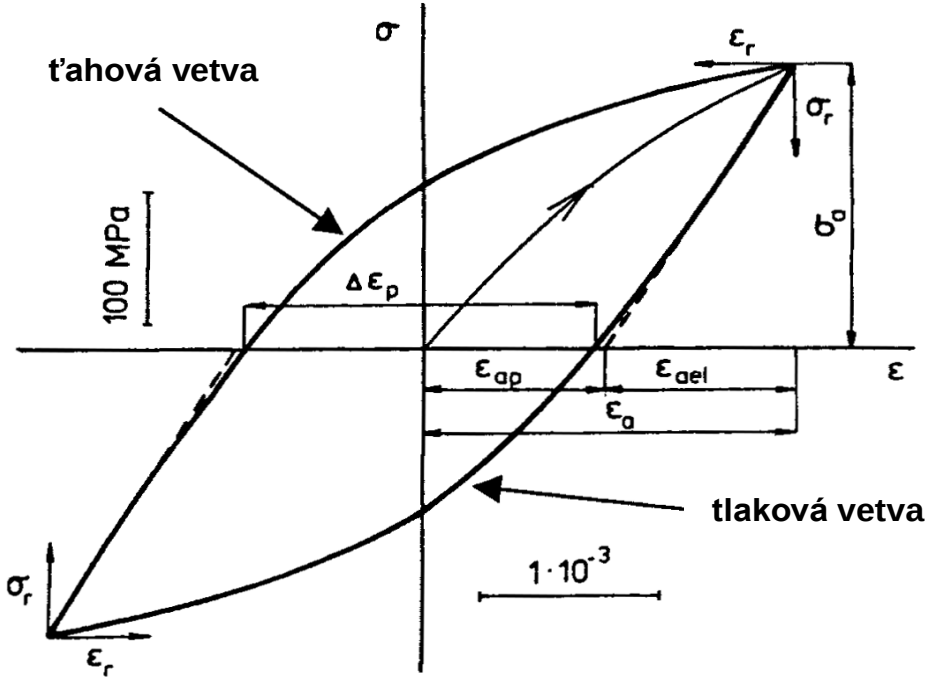
Nízkocyklová únava



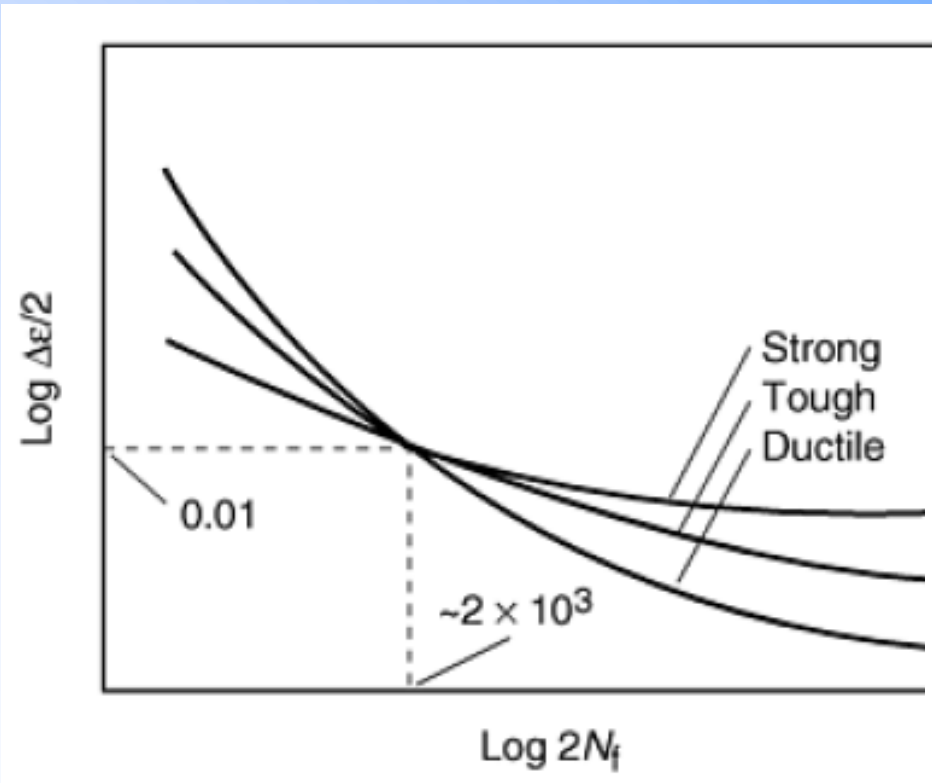


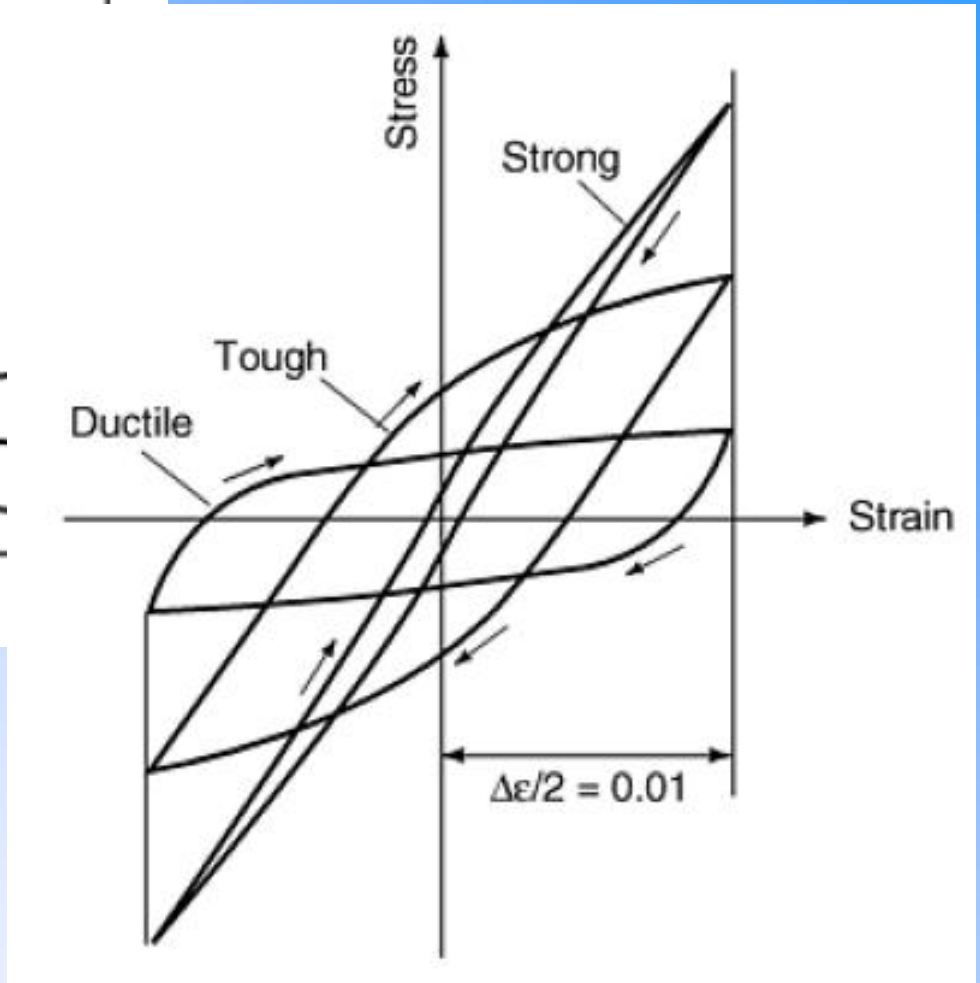
Hysterézna slučka

Závislosť medzi napätím a deformáciou pri skúške ťahom sa zobrazuje pomocou ťahového diagramu. Závislosť medzi cyklickým napätím a cyklickou deformáciou sa zobrazuje hysteréznymi slučkami. Táto závislosť v ideálne pružnej oblasti namáhania predstavuje priamku, ktorá je pri striedavo súmernom cykle symetrická so začiatkom súradníc a má smernicu $tg\alpha = E$. V skutočnosti zaťažovací a odľahčovací úsek cyklu neprebieha po tej istej čiare, ale v dôsledku vzniku mikroplastických deformácií a ostatných nevratných procesov, ktoré zahŕňame do javu anelasticity, sa vytvára hysterézna slučka. Plocha, ktorú uzatvára hysterézna slučka, je úmerná veľkosti nevratnej energie, pohltenej materiálom v jednom zaťažovacom cykle.

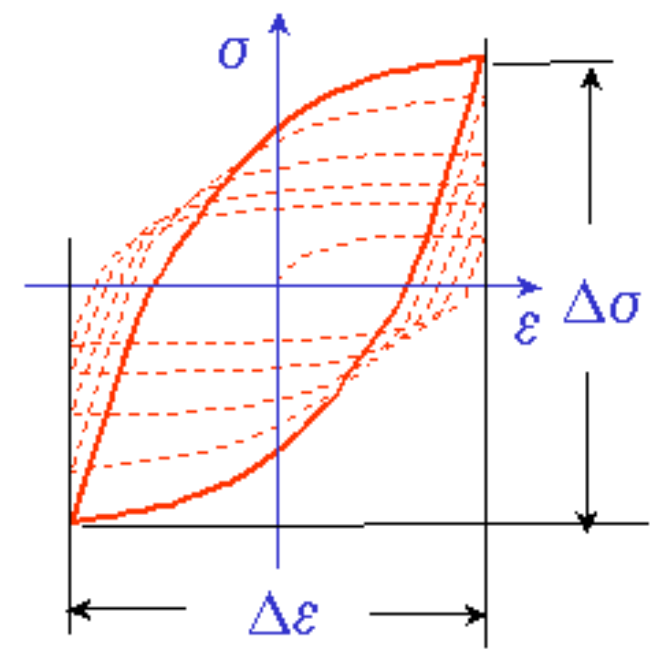


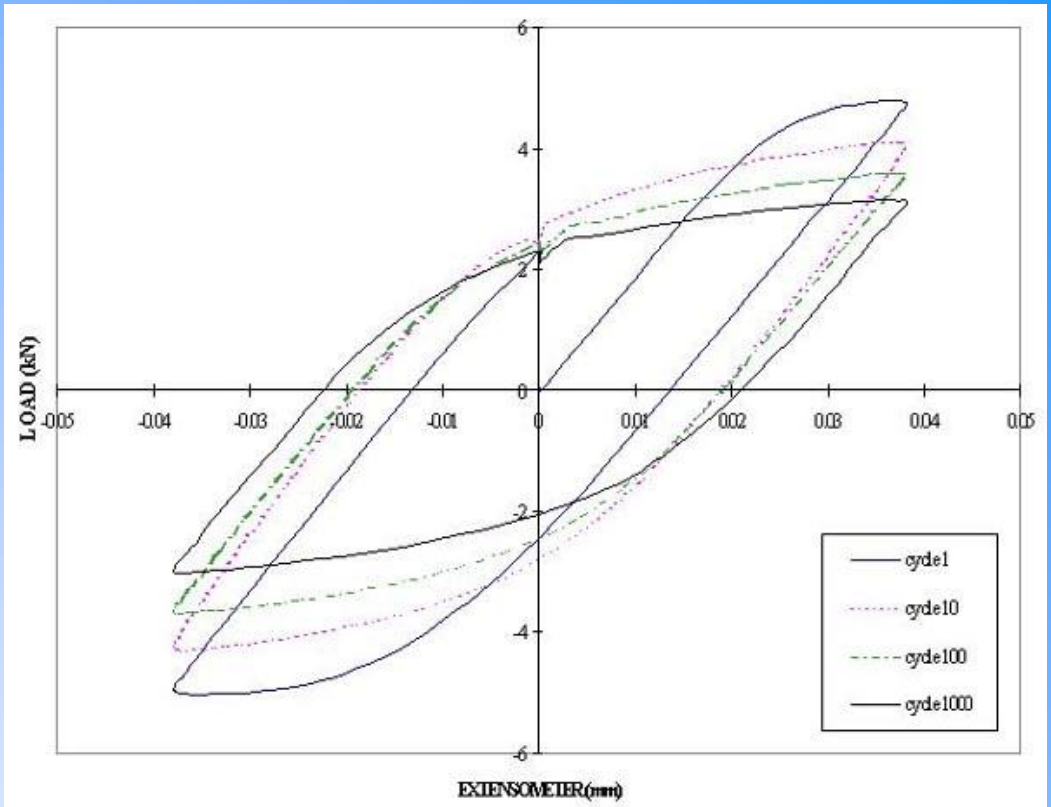
Hysterézna slučka



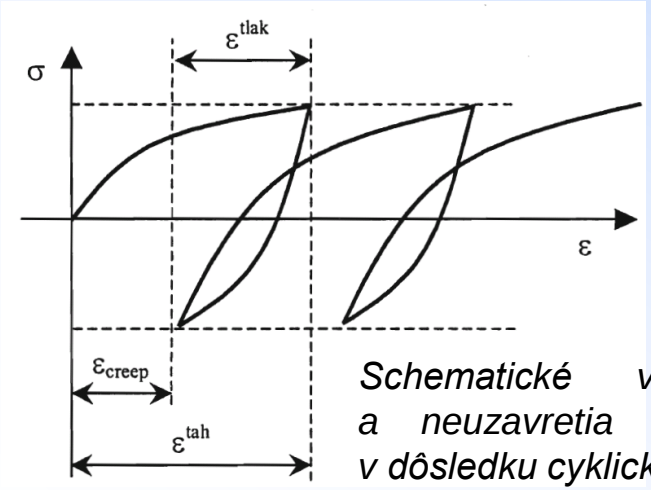


Hysterézna slučka



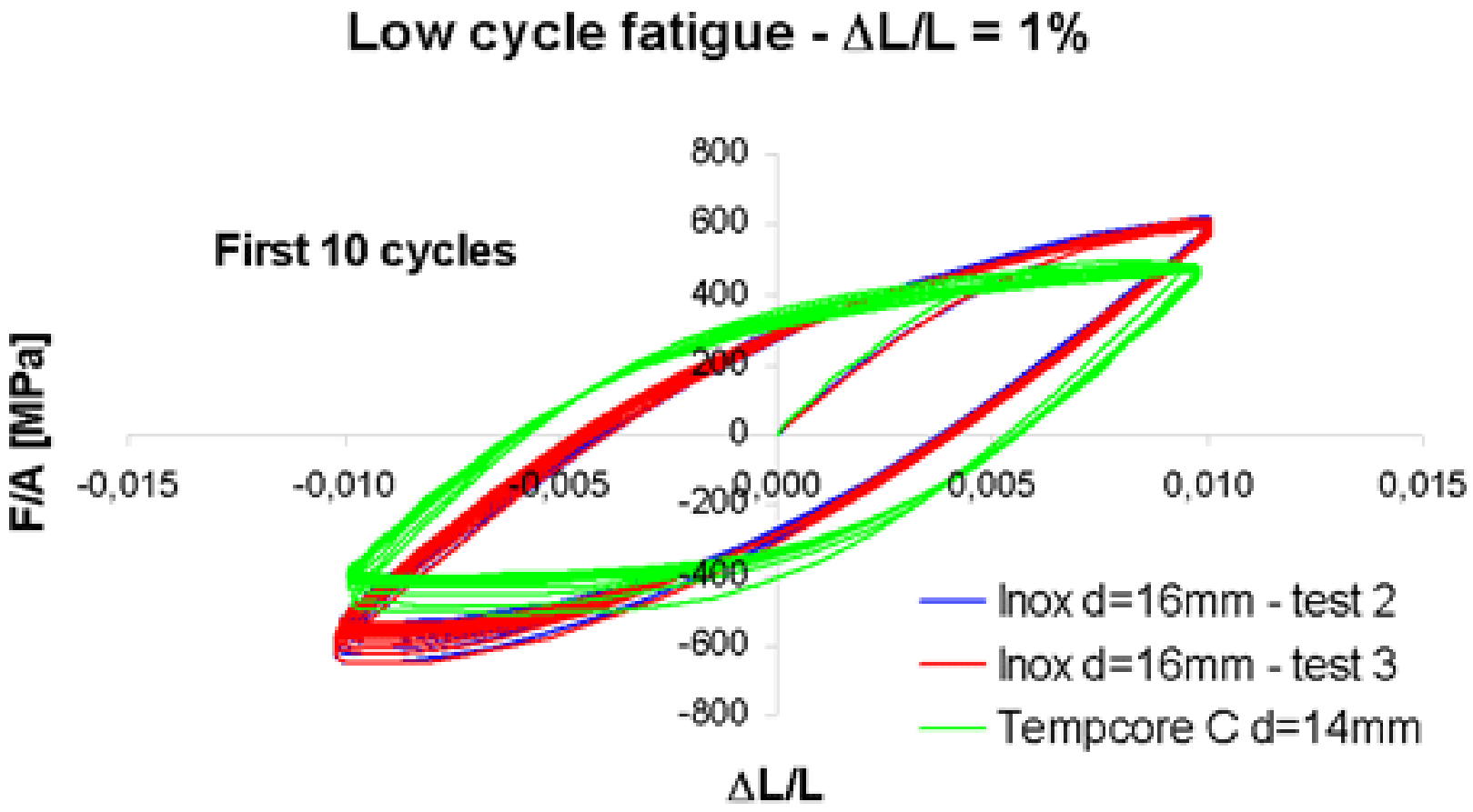


Vývoj hysteréznych slučiek zaznamenaných počas skúšok nízkocyklovej únavy v austenitickej antikoróznej oceli pri teplote 20 °C a 1 % - tnej cyklickej deformácii (ε_a = 0,038 mm)

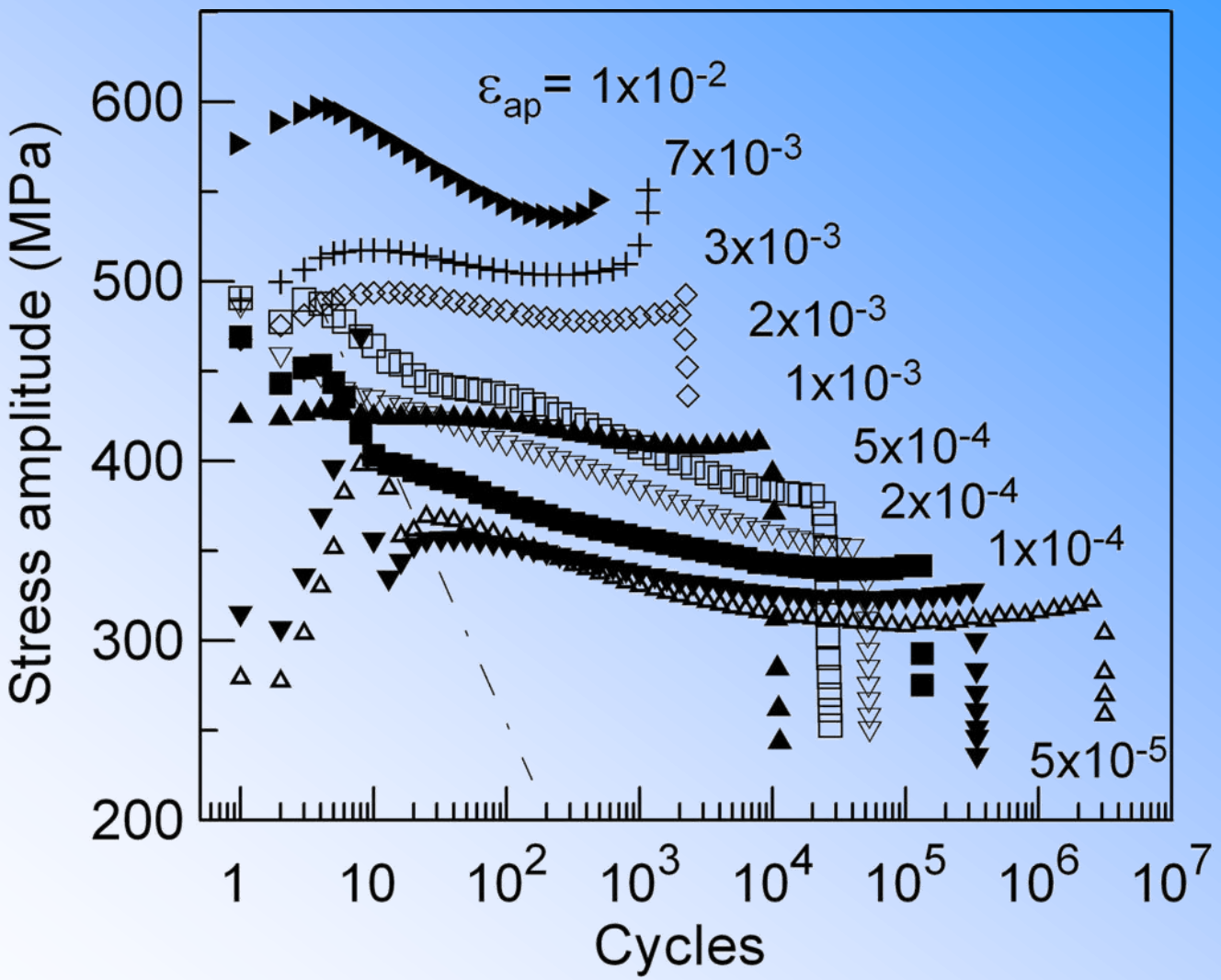


Schematické vyjadrenie posuvu a neuzavretia hysteréznej slučky v dôsledku cyklického tečenia

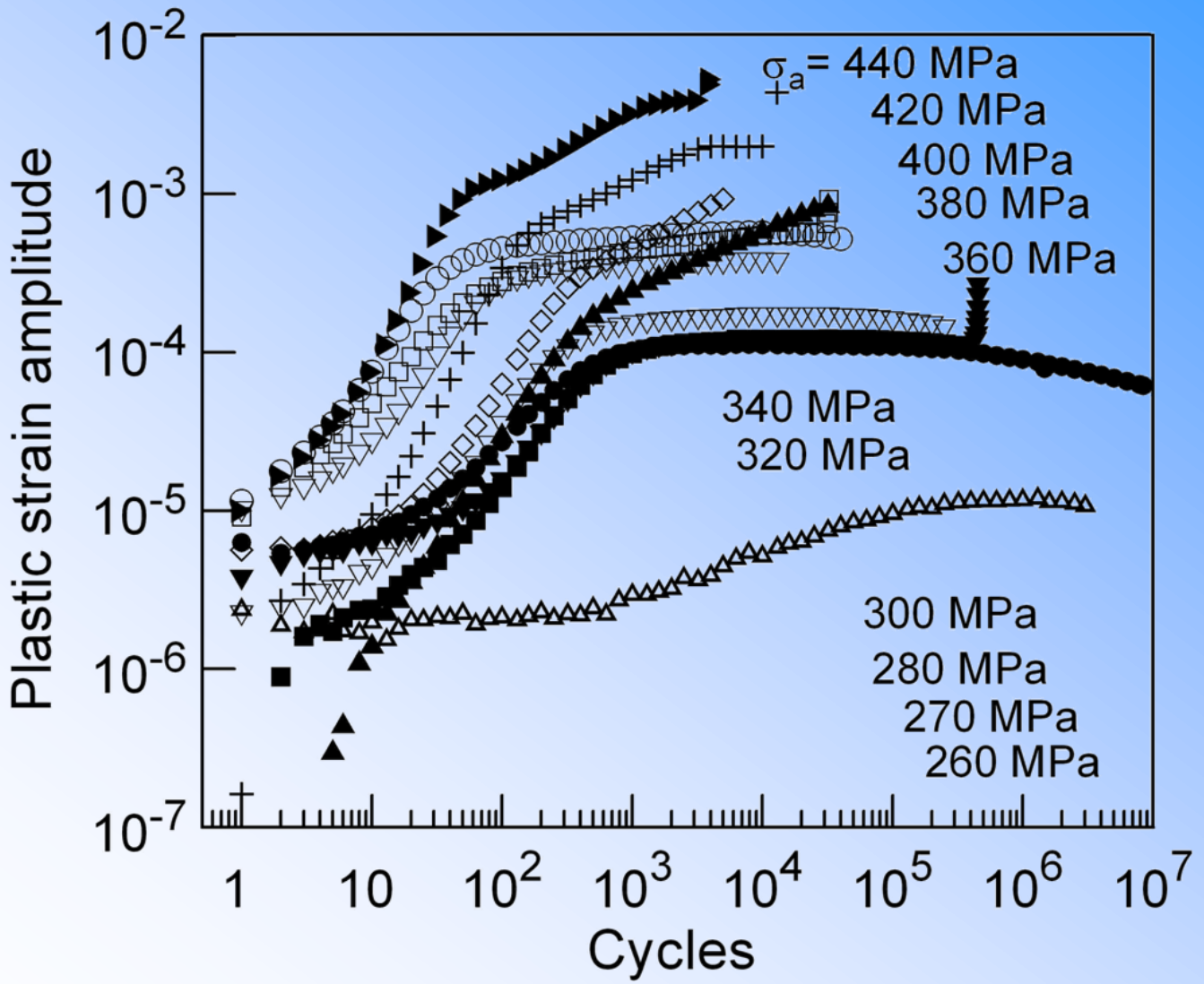
Hysterézna slučka



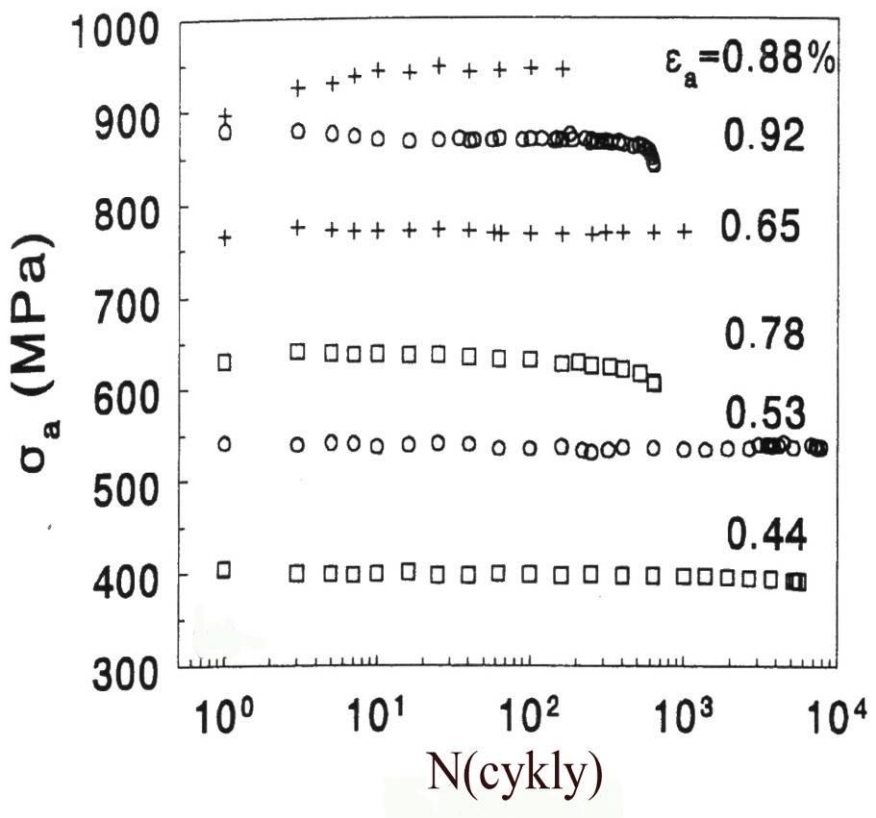
Krivky únavového zpevnenia/zmäkčenia ε_{ap} = konšt.

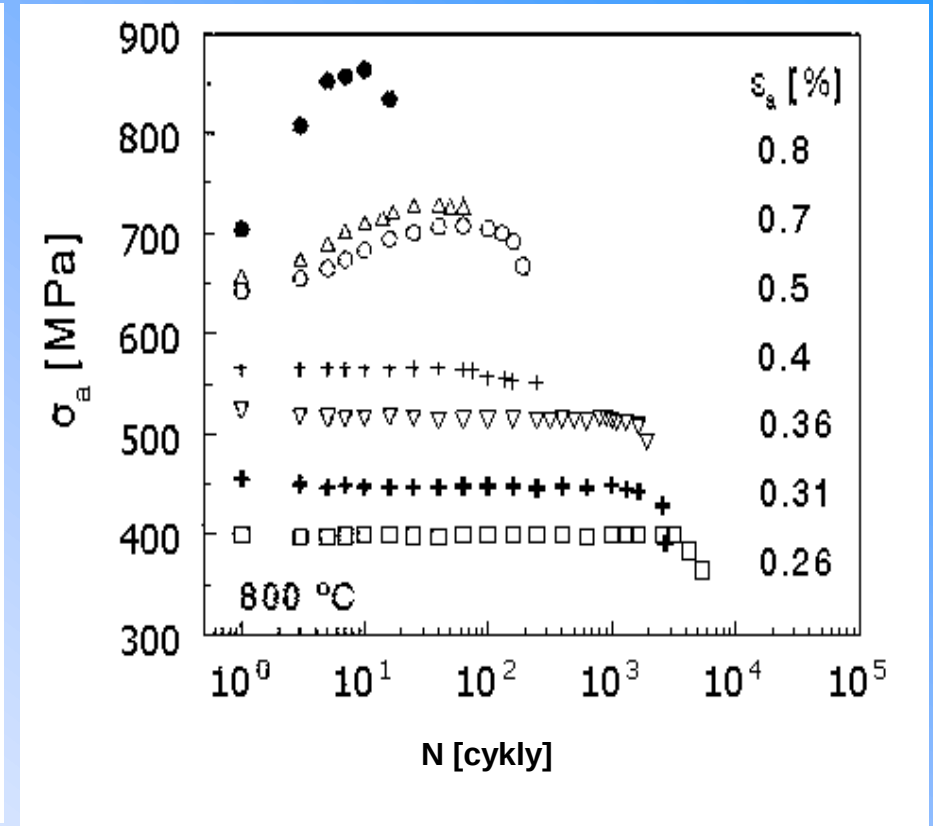


Krivky únavového zpevnenia/zmäkčenia σ_a = konšt.



Krivky únavového zpevnenia/zmäkčenia ε_a = konšt.





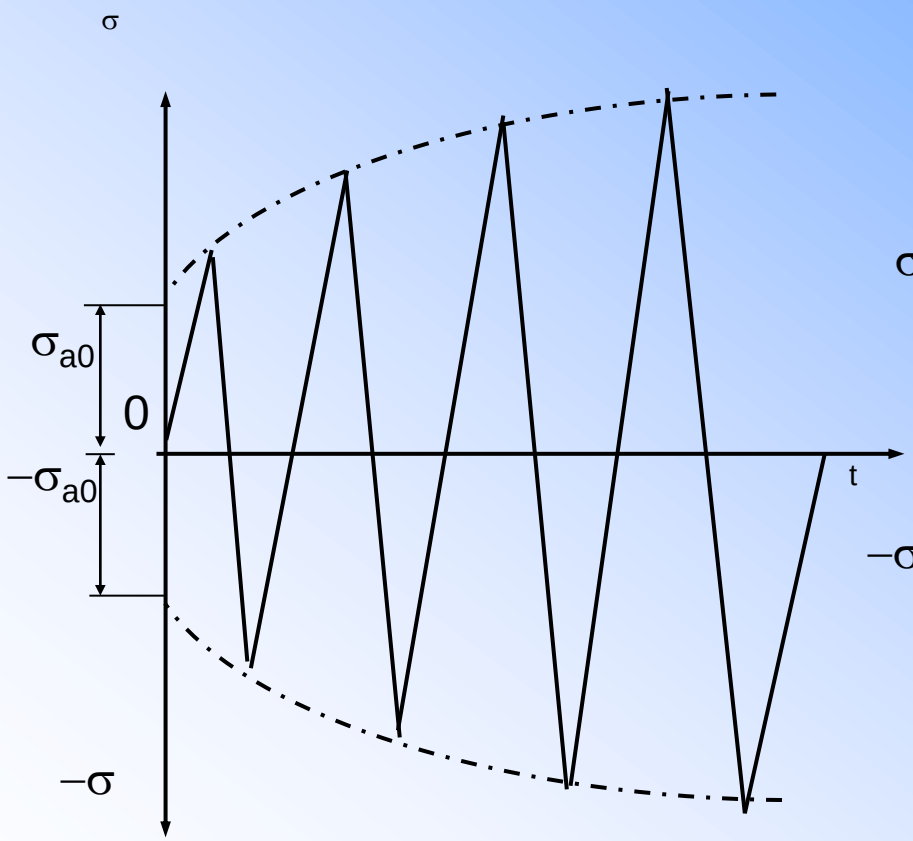
Krivky cyklického spevnenia/zmäkčenia materiálu CMSX-4 s ⟨001⟩ orientáciou, R_ε=0,05, R_ε = ε_{min} /ε_{max} – súčiniteľ asymetrie kmitu deformácie, + 700 °C, ○ 850 °C, □ 950 °C

Krivky cyklického spevnenia/zmäkčenia materiálu IN713LC, T = 800 °C

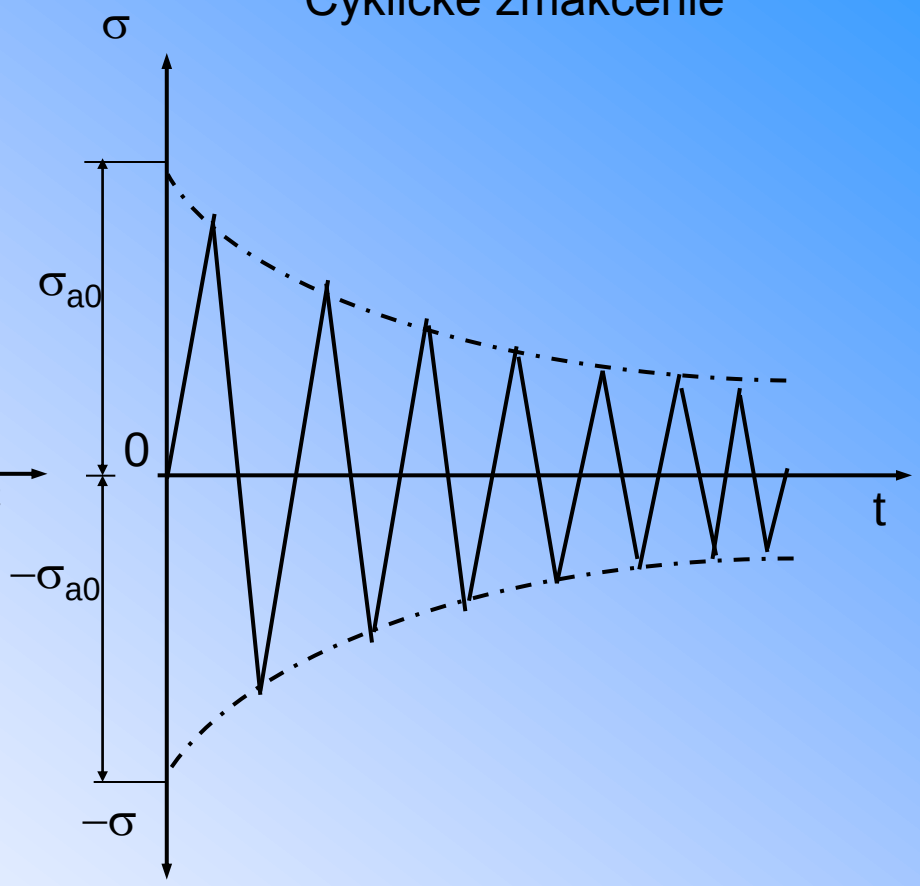
Krivky únavového zpevnenia/zmäkčenia

ε_{ap} = konšt., σ_a = konšt.

Cyklické spevnenie

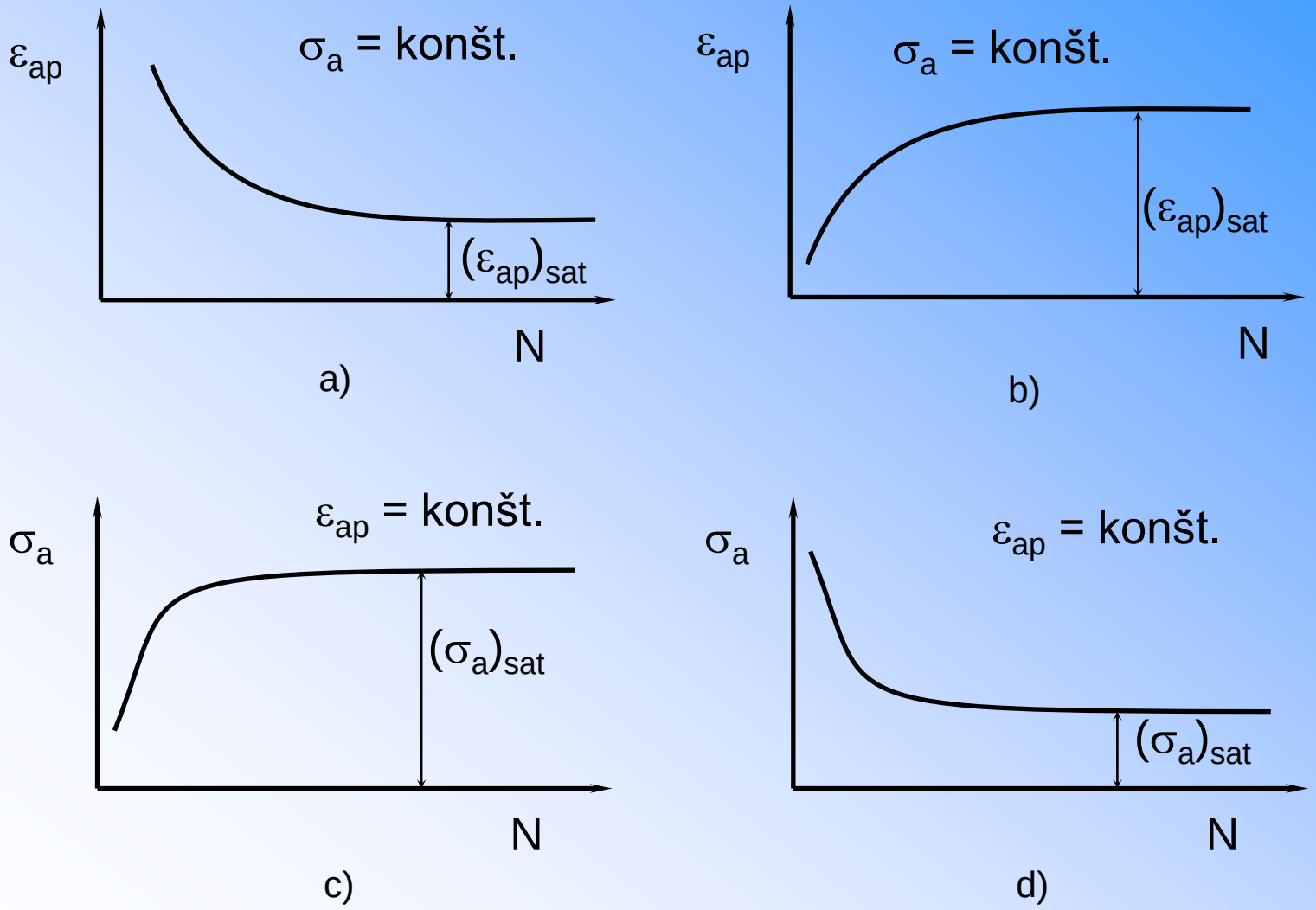


Cyklické zmäkčenie

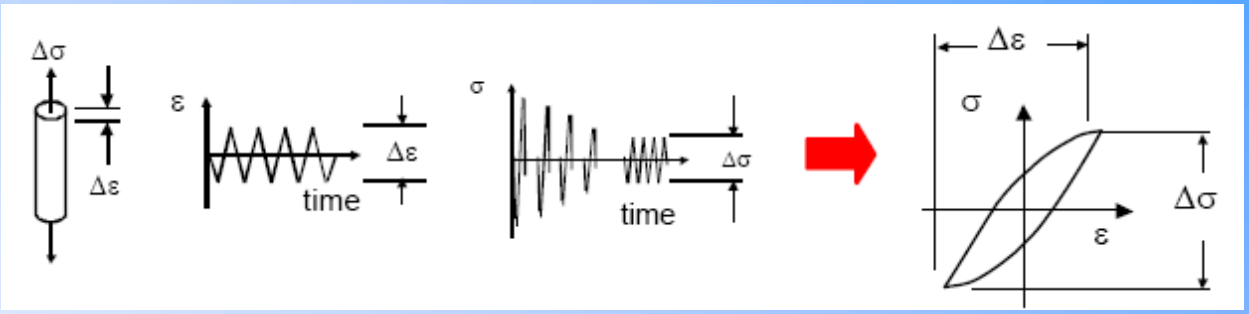


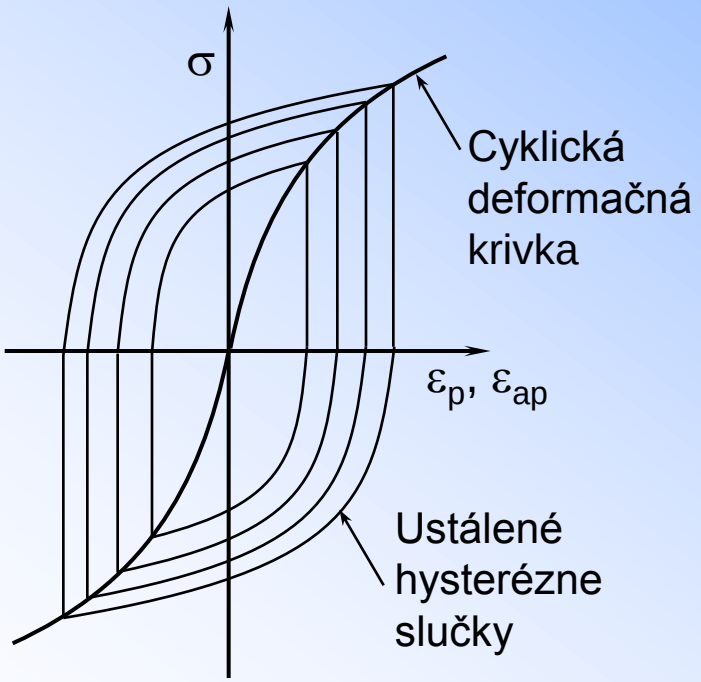
Krivky únavového zpevnenia/zmäkčenia

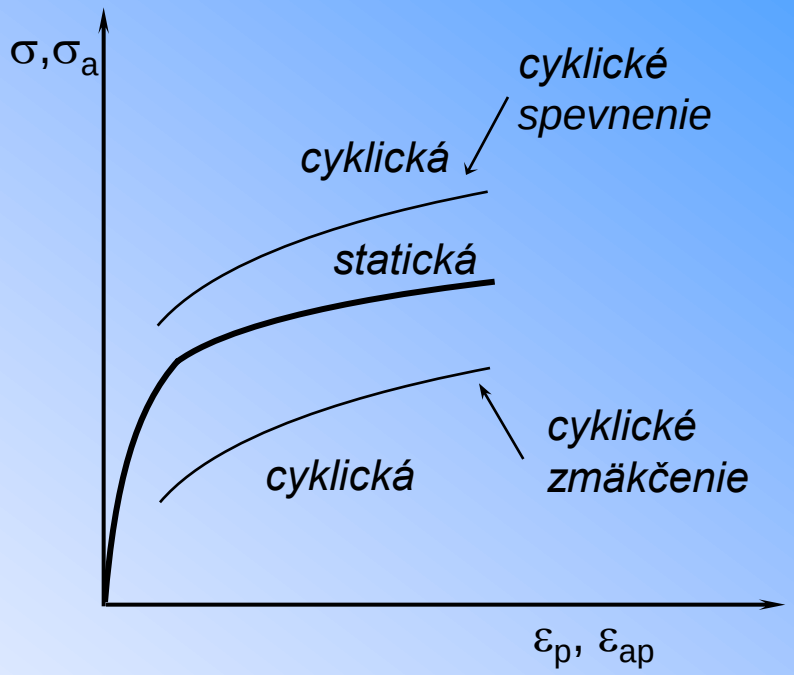
ε_{ap} = konšt., σ_a = konšt.



Cyklická deformačná krivka zo zkúšok σ_a = konšt., ε_a = konšt., ε_{ap} = konšt.

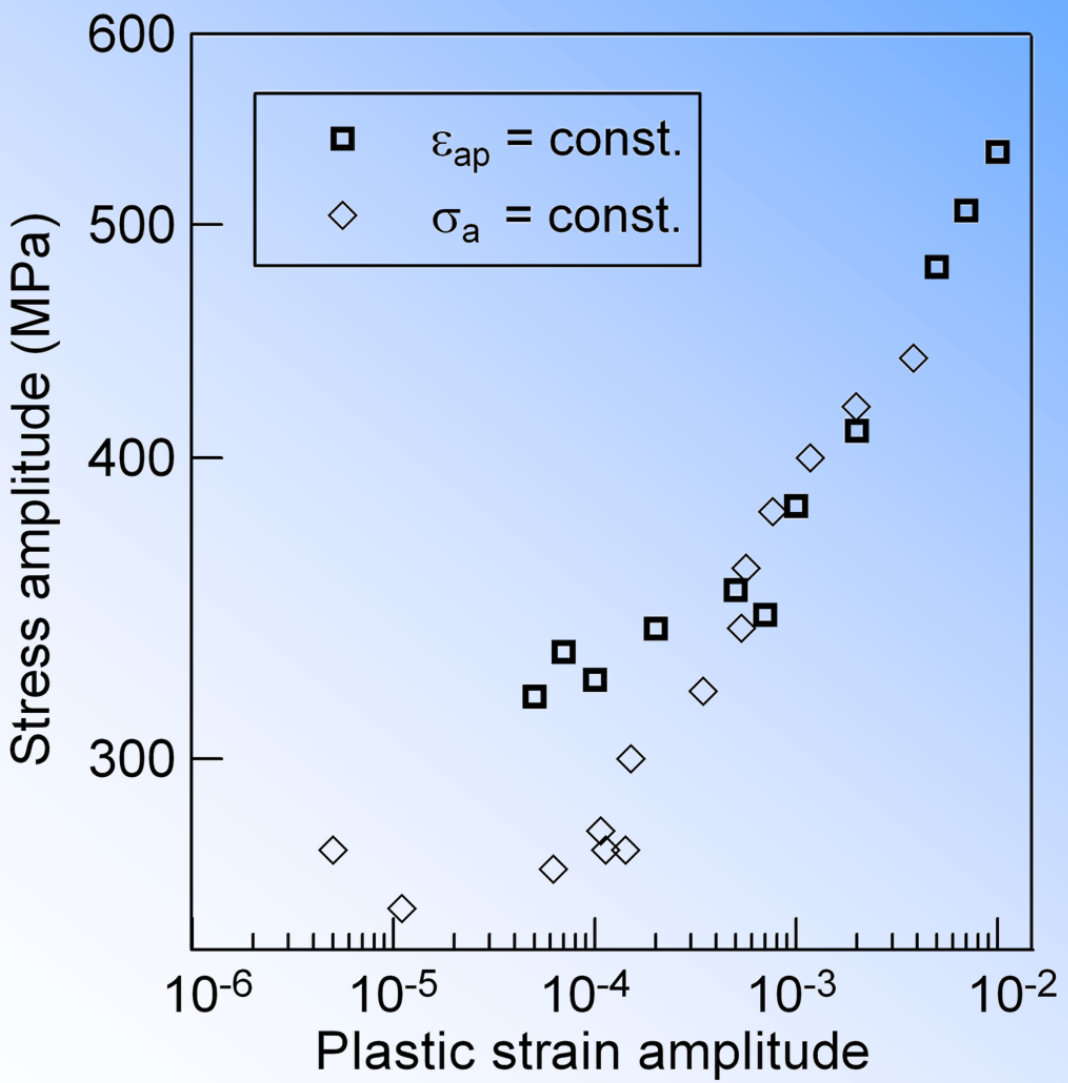






Cyklická deformačná krivka charakterizuje závislosť amplitúdy napätia od amplitúdy deformácie (celkovej alebo plastickej) v oblasti ustáleného správania sa materiálu pri cyklickom zaťažovaní.

Cyklická deformačná krivka zo zkúšok σ_a = konšt., ε_{ap} = konšt.

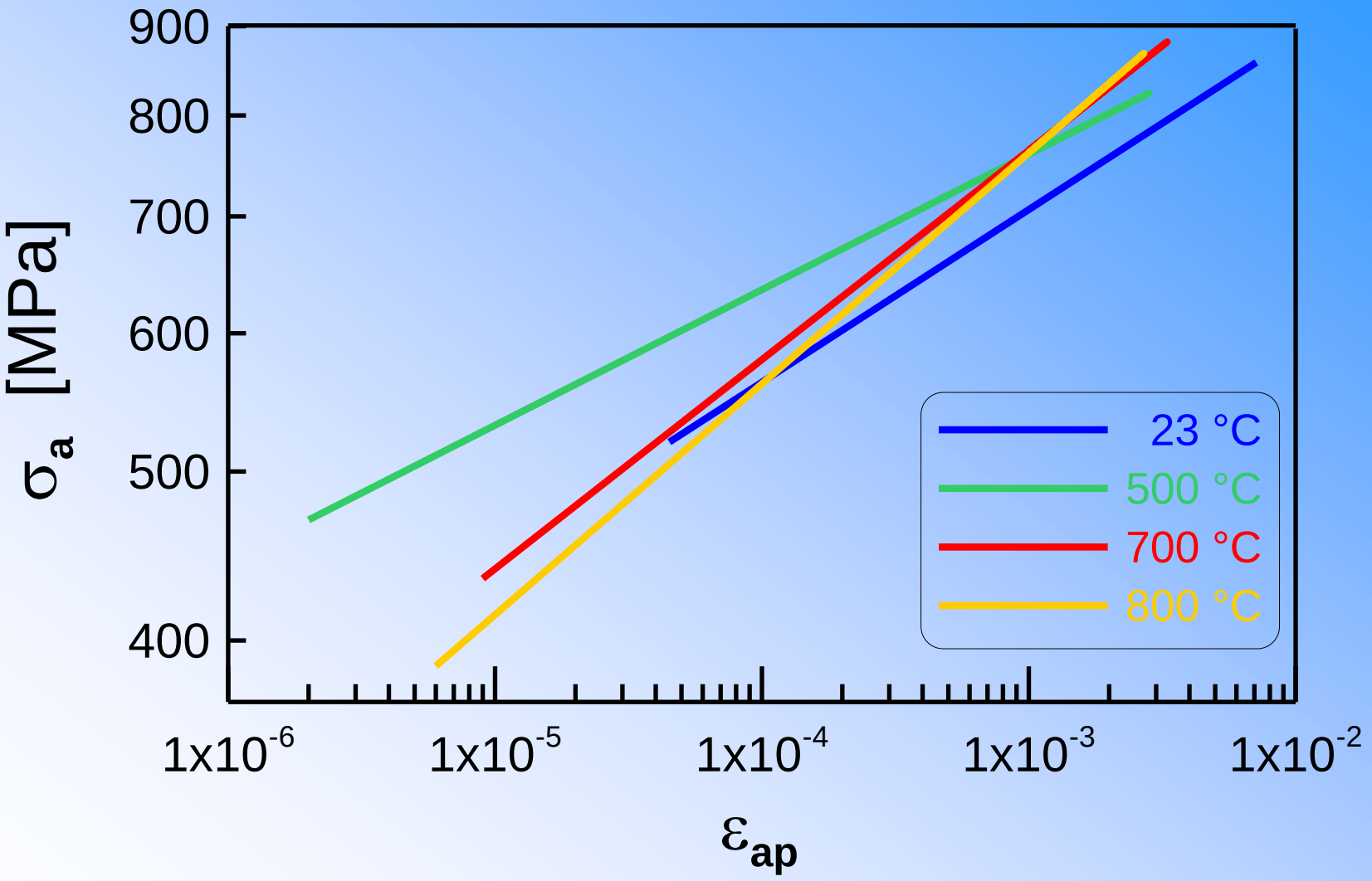


$$\sigma_a = K\varepsilon_{ap}^n$$

kde n´ je súčiniteľ cyklického deformačného spevnenia,
k súčiniteľ cyklickej pevnosti

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K}\right)^{1/n}$$

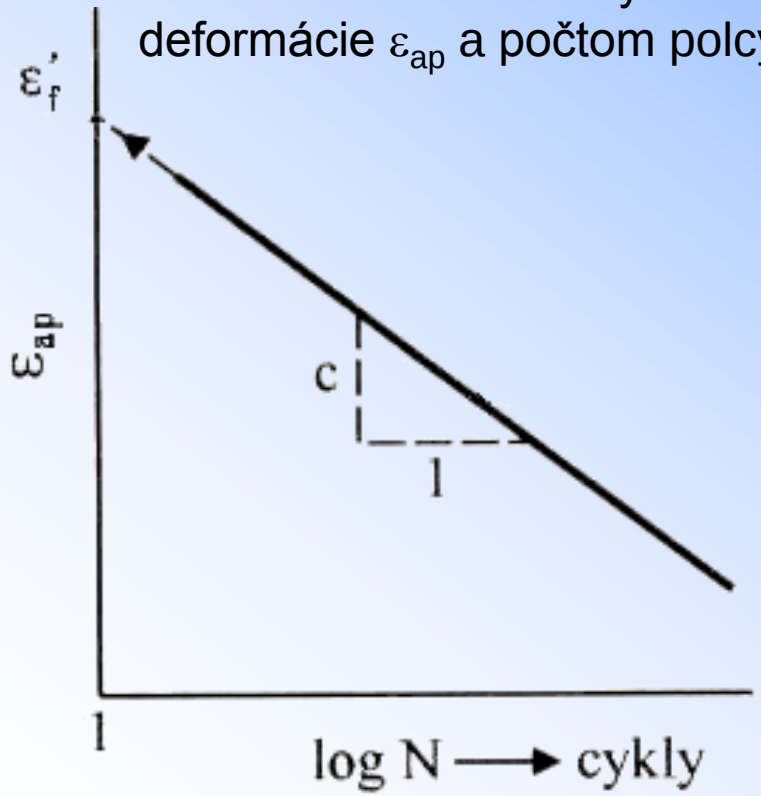
Cyklická deformačná krivka zo zkúšok σ_a = konšt., ε_{ap} = konšt.



Cyklická deformačná krivka materiálu IN713LC pre štyri teploty

Mansonova-Coffinova krivka únavovej životnosti.

Základné zistenie, že rozhodujúcou fyzikálnou veličinou riadiacou únavový proces je amplitúda plastickej deformácie viedlo v polovici 20-teho storočia k snahe získať funkčnú závislosť medzi amplitúdou plastickej deformácie a počtom cyklov do lomu. V roku 1954 bol nezávisle do seba Mansonom a Coffinom navrhnutý medzi ustálenou amplitúdou plastickej zložky deformácie ε_{ap} a počtom polcyklov do lomu $2N_f$ mocninový vzťah:



$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon_f^{\prime} \left(2N_f\right)^c$$

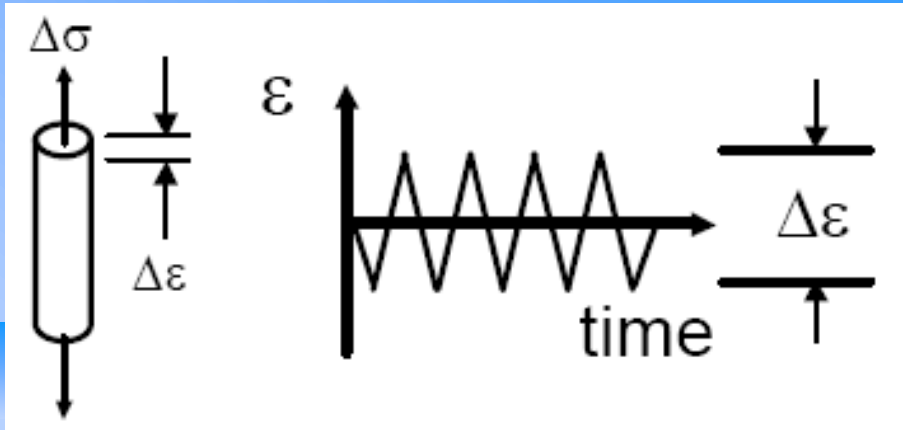
kde $\varepsilon_f^{\prime}$ je súčiniteľ únavovej ťažnosti určený extrapoláciou ε_{ap} na prvý polcyklus zaťaženia (2N=1), *c* exponent únavovej ťažnosti.

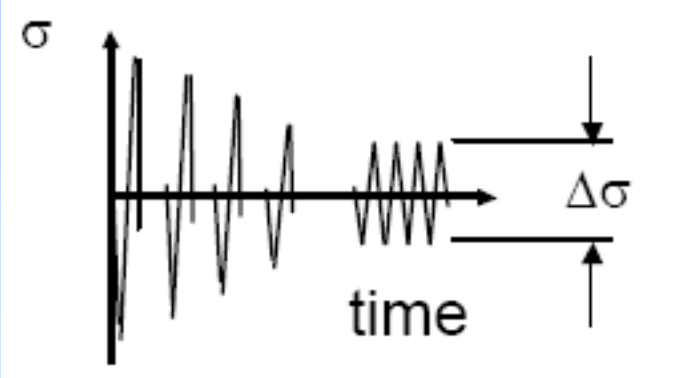
Prístup z hľadiska riadenej deformácie (ε – N)

Riadime Δε

Meriame:

- počet cyklov do lomu
- silu potrebnú na deformáciu
- zo sily vypočítavame napätie σ:





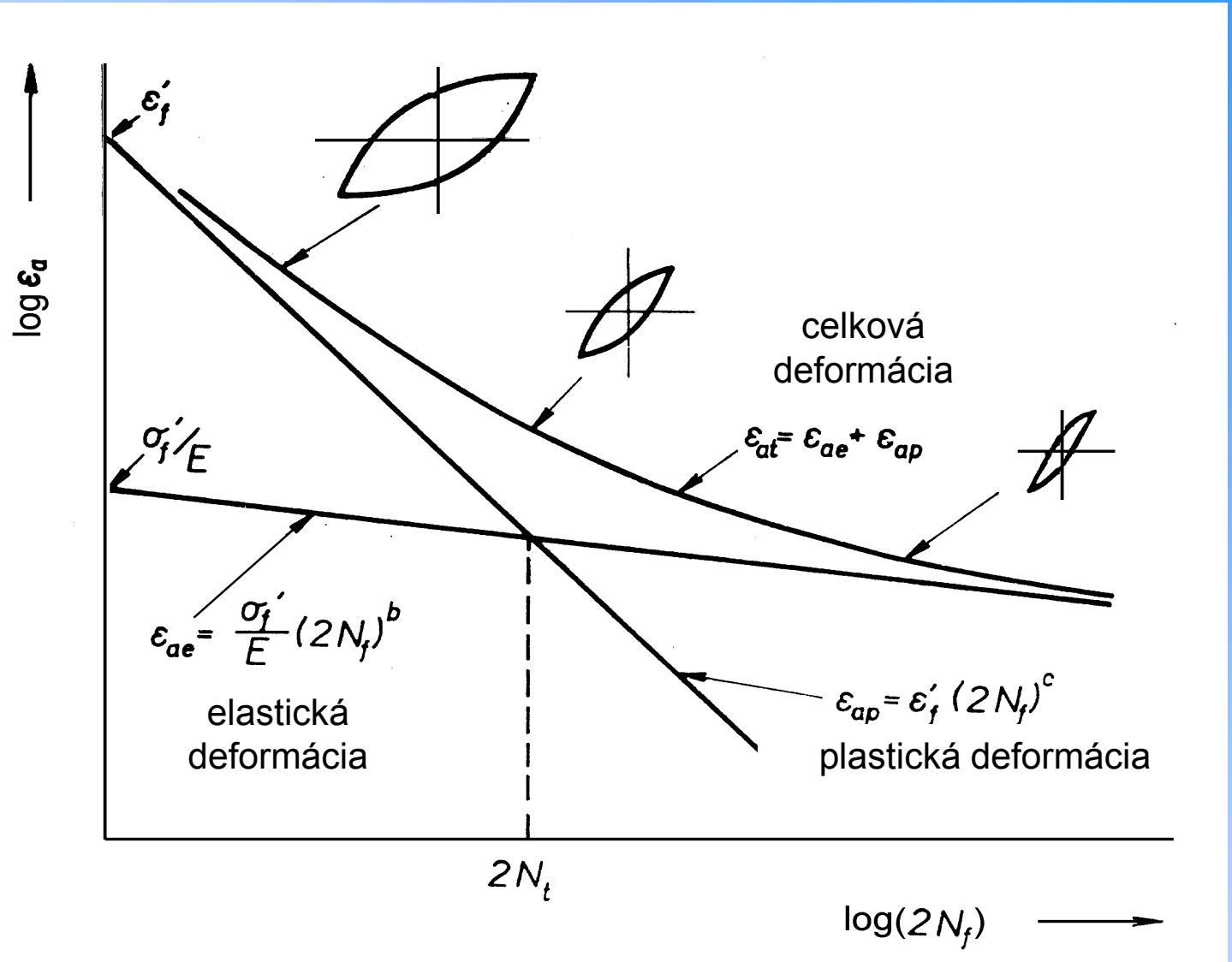
Skúšky:

ε_a = konšt.,

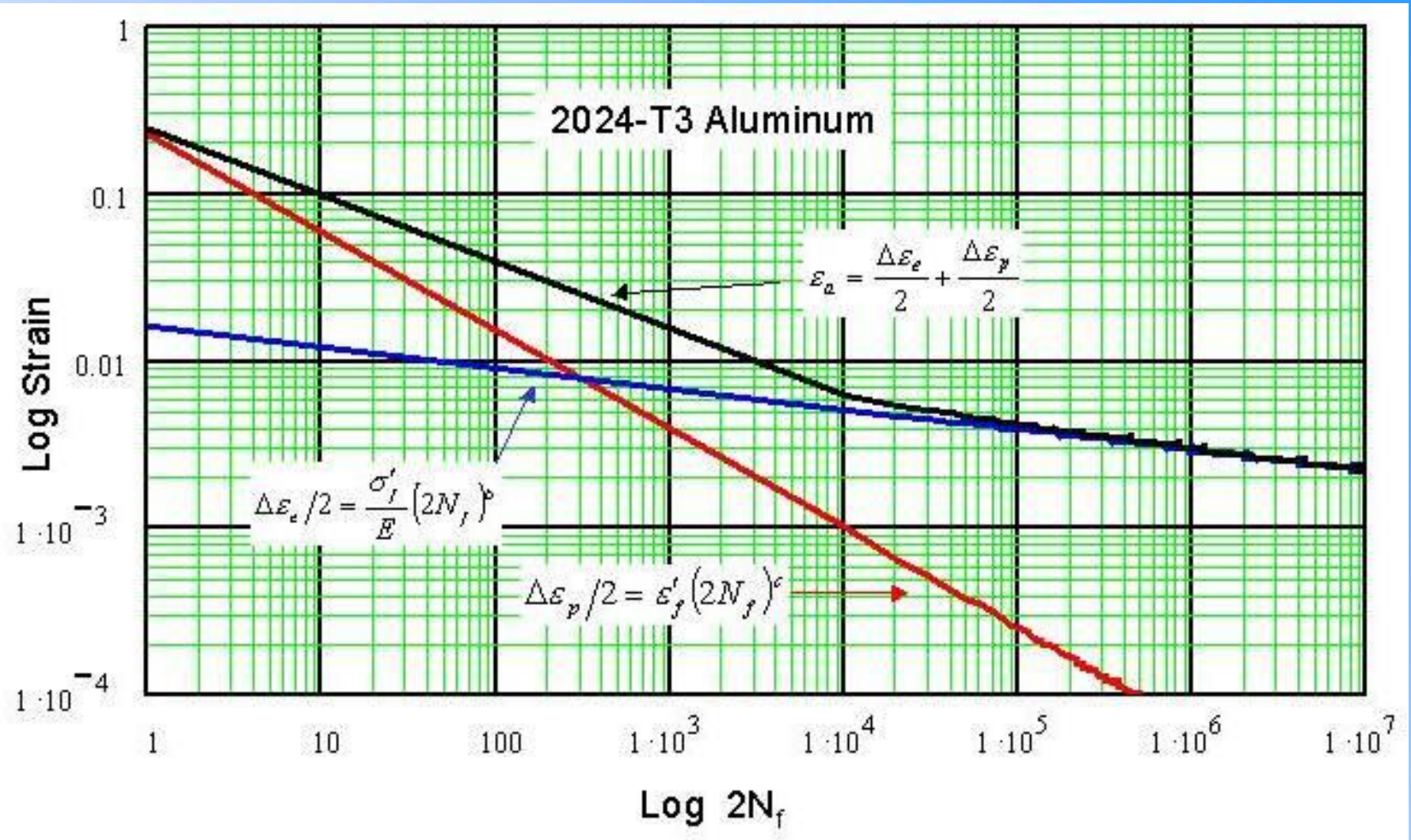
ε_{ap} = konšt.

K saturácii Δ σ zvyčajne dochádza približne v polovici únavovej životnosti ($2N_f/2$)

Mansonova-Coffinova krivka únavovej životnosti.



Mansonova-Coffinova krivka únavovej životnosti.



Z porovnania vzťahov popisujúcich cyklickú deformačnú krivku, Manson-Coffinovu krivku a odvodenú Wőhlerovu krivku je vidieť vzájomná závislosť, ktorá umožňuje pomocou cyklickej deformačnej krivky navzájom prevádzať Manson-Coffinovu krivku a odvodenú Wőhlerovu krivku.

$$\varepsilon_{\mathrm{a}} = \varepsilon_{\mathrm{ae}} + \varepsilon_{\mathrm{ap}} = \frac{\sigma_{\mathrm{a}}}{E} + \varepsilon_{\mathrm{ap}}$$

$$\sigma_{\mathrm{a}} = \sigma_{\mathrm{f}}^{'} (2N_{\mathrm{f}})^{b}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{ap}} = \varepsilon_{\mathrm{f}}^{'} (2N_{\mathrm{f}})^{c}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{a}} = \frac{\sigma_{\mathrm{f}}^{'}}{E} (2N_{\mathrm{f}})^{b} + \varepsilon_{\mathrm{f}}^{'} (2N_{\mathrm{f}})^{c}$$

Medzi konštantami platia vzťahy: $\mathrm{b} = n_{\mathrm{b}}^{'} c$ $\quad \sigma_{\mathrm{f}}^{'} = K_b (\varepsilon_f^{'})^{n_b}$

Ak sú známe všetky potrebné parametre (ε_f', c, σ_f', b) a modul pružnosti E je možné určiť dovolenú amplitúdu celkovej deformácie pre požadovanú životnosť, prípadne z inverznej závislosti pre zadanú amplitúdu celkovej deformácie určiť počet cyklov do lomu.

Štádiá únavového procesu

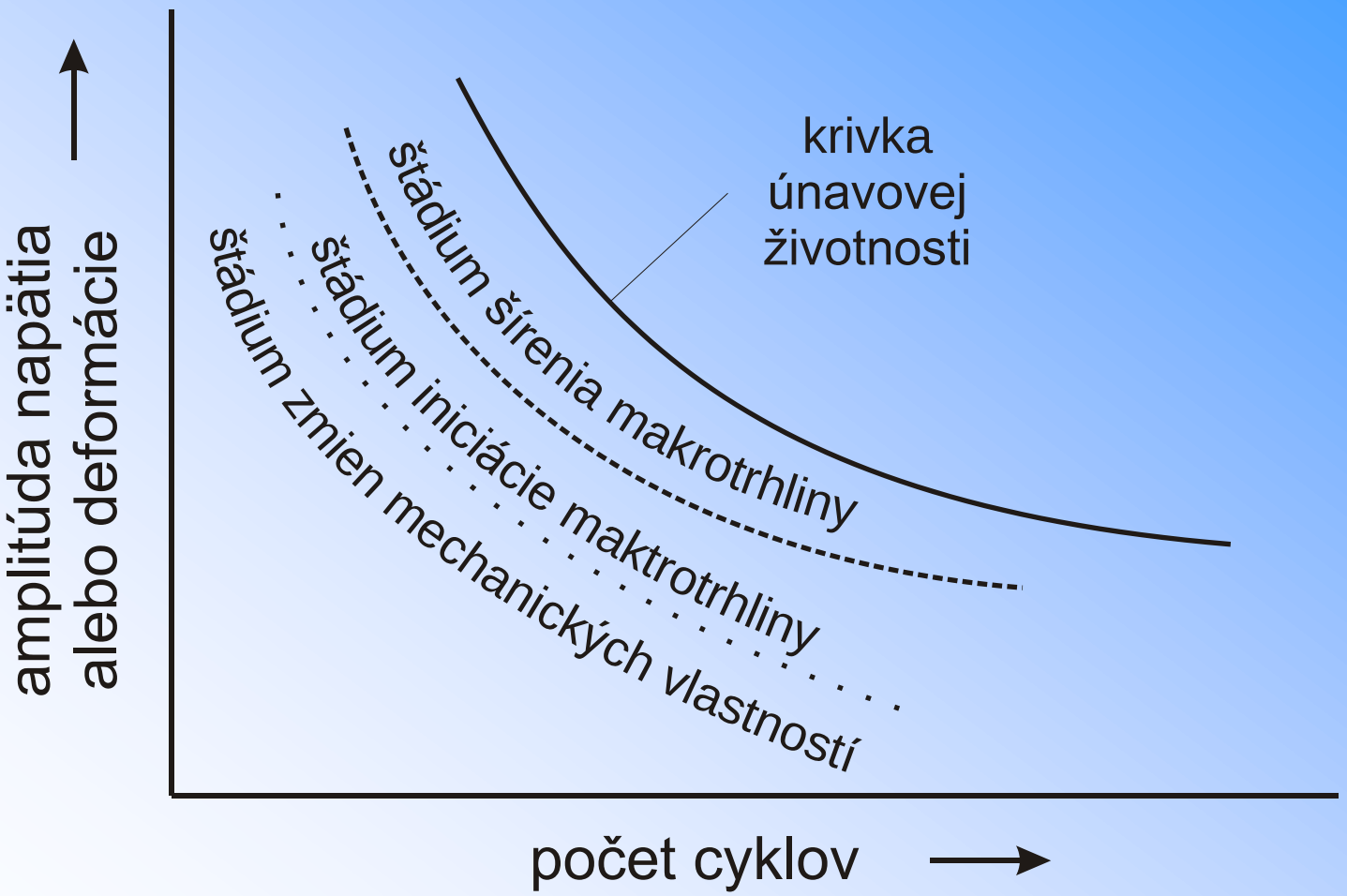
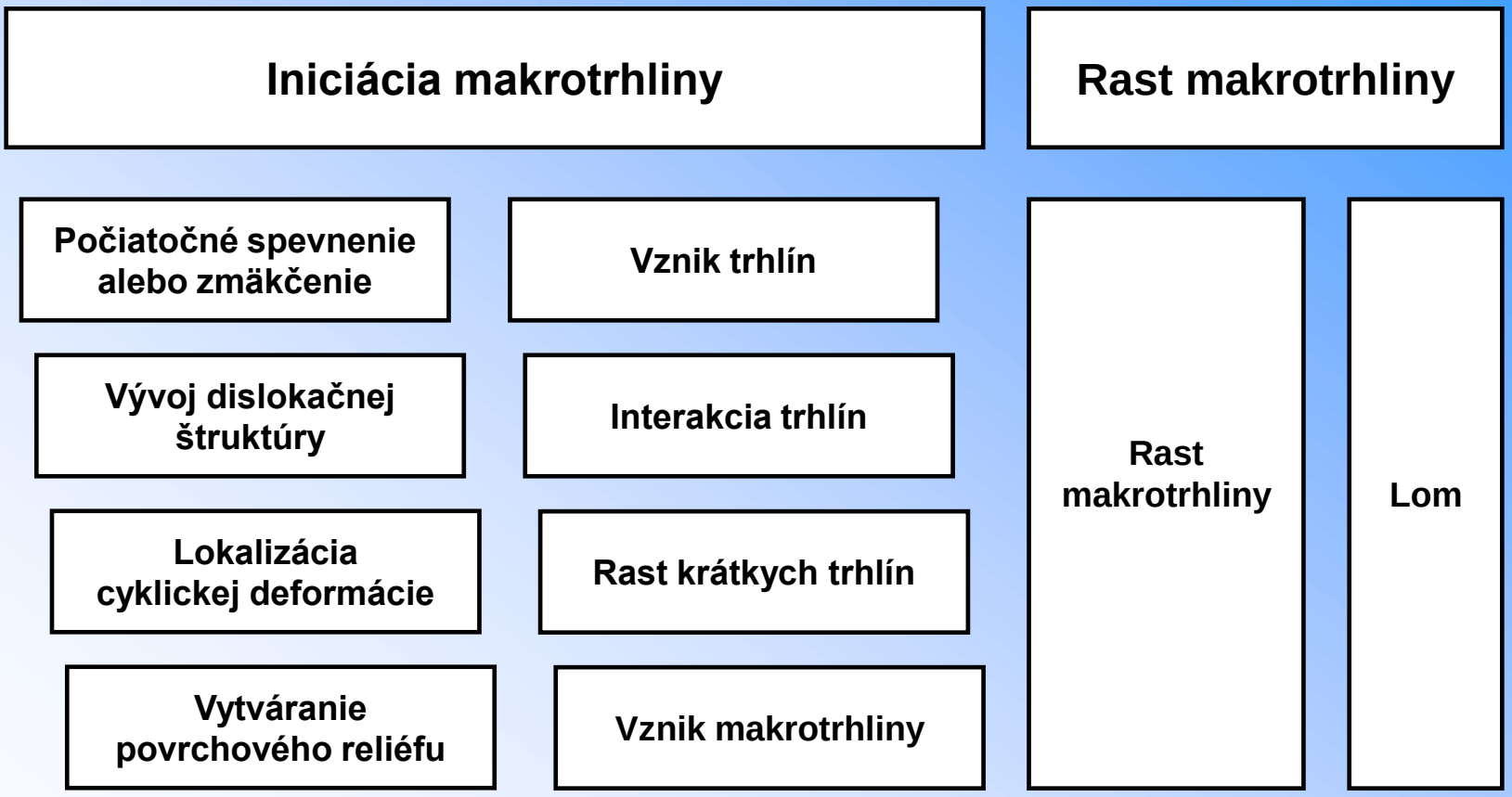
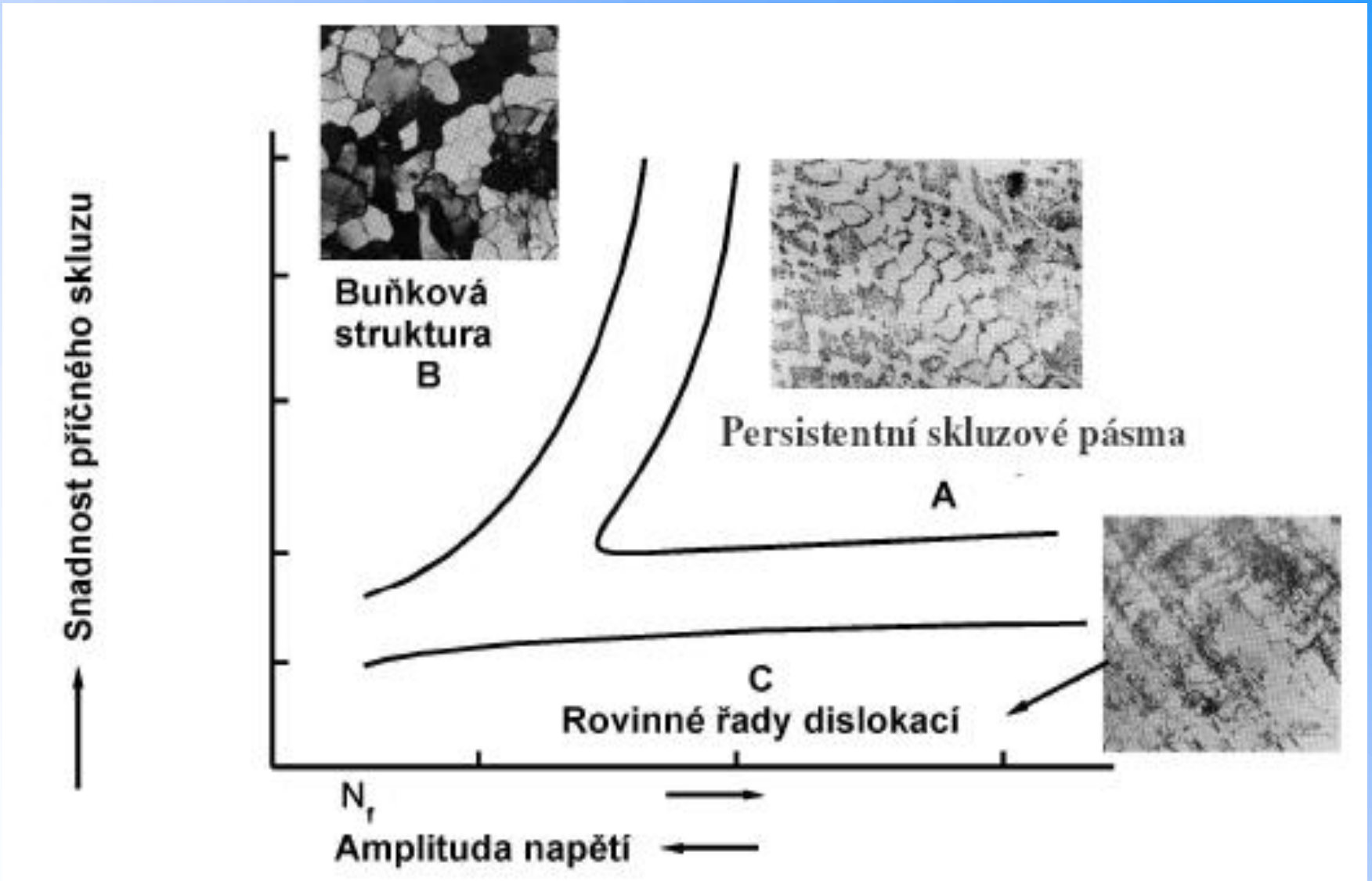


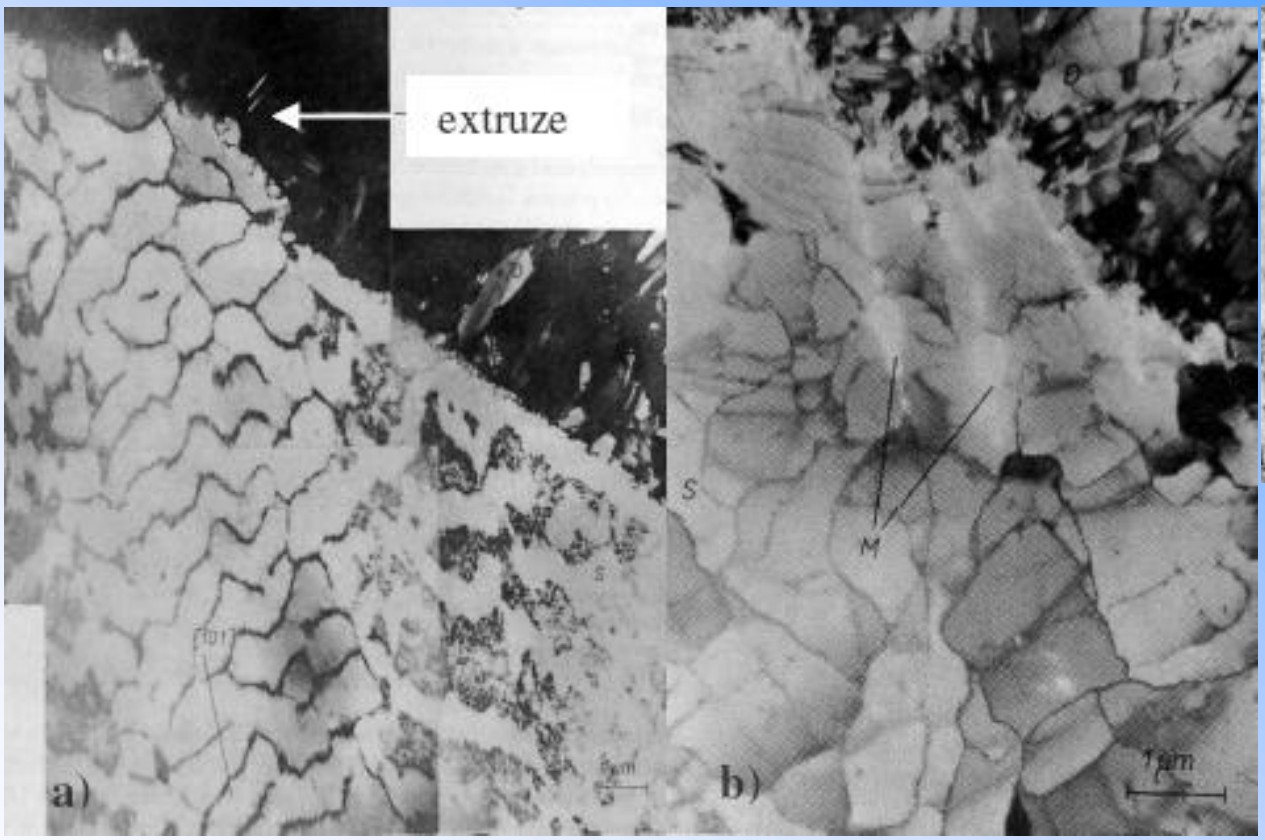
Schéma kumulácie únavového poškodenia

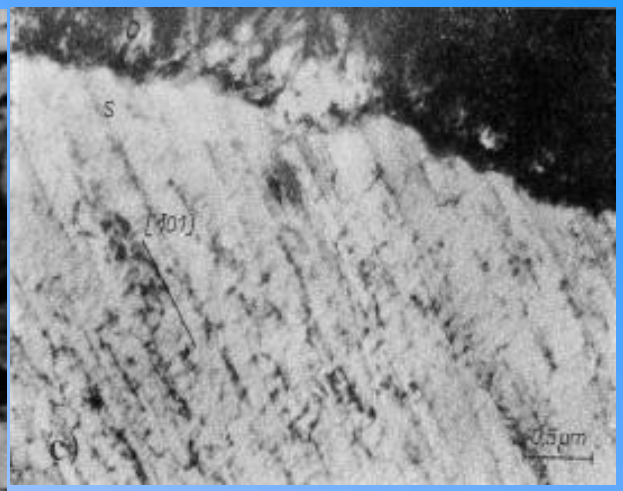


Vývoj dislokačnej štruktúry



Vývoj dislokačnej štruktúry



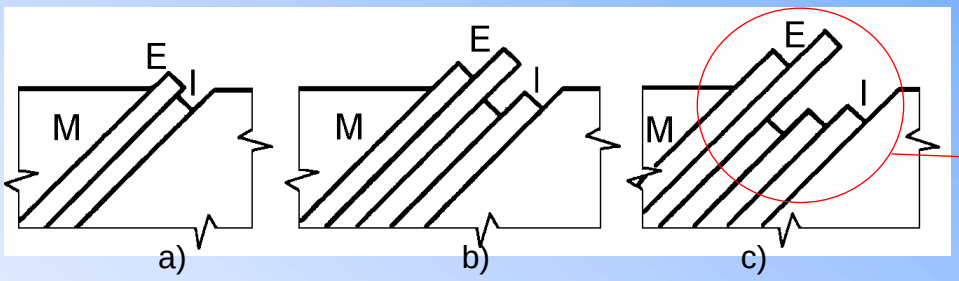


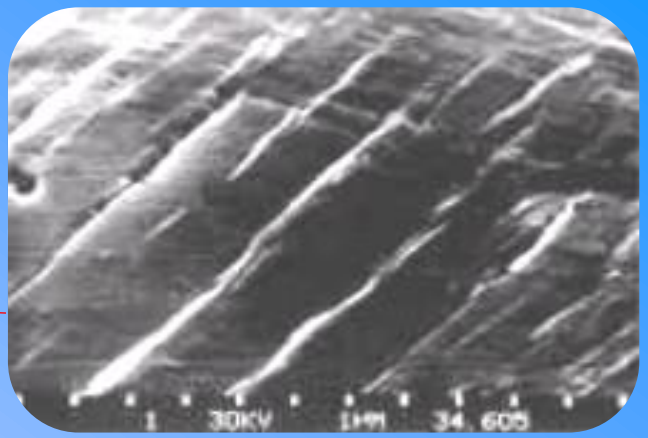
c) Rovinné radi dislokácií

a) Perzistentné sklzové pásy b) Bunková štruktúra

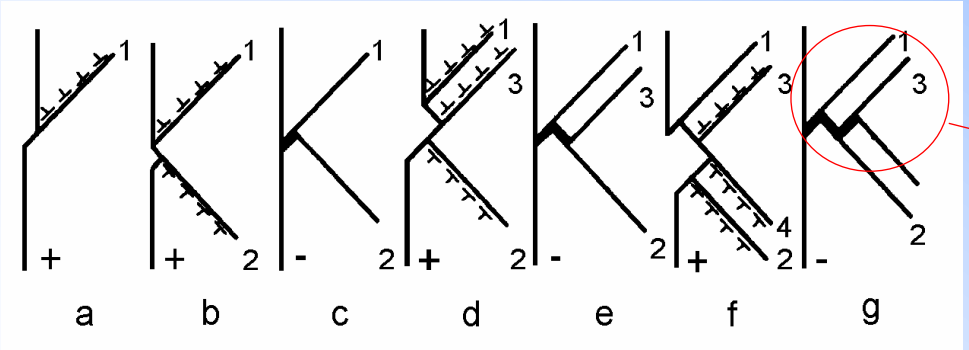
Dislokačná štruktúra pri povrchu vzorky

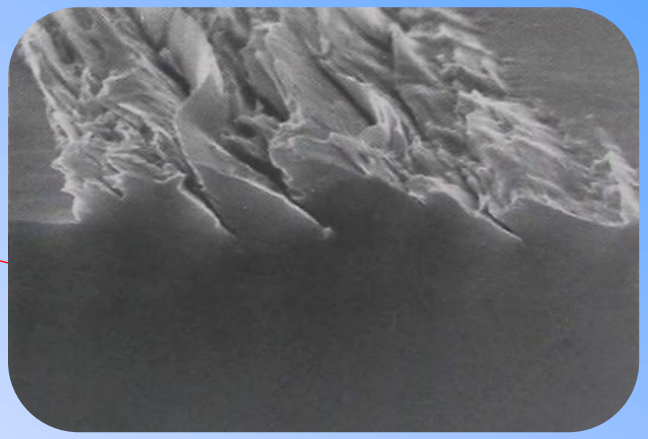
Iniciácia únavovej trhliny





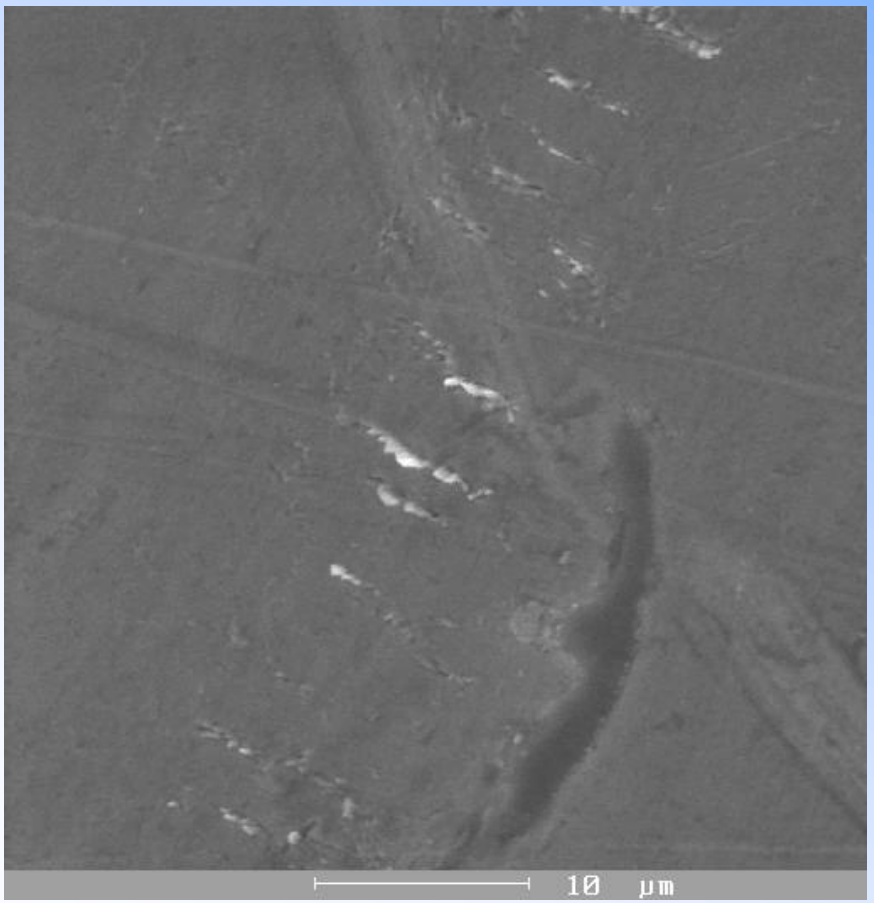
Vznik mikrotrhliny v matrici (M) vznikom intrúzii (I) a extrúzii (E) v jednom sklzovom systéme

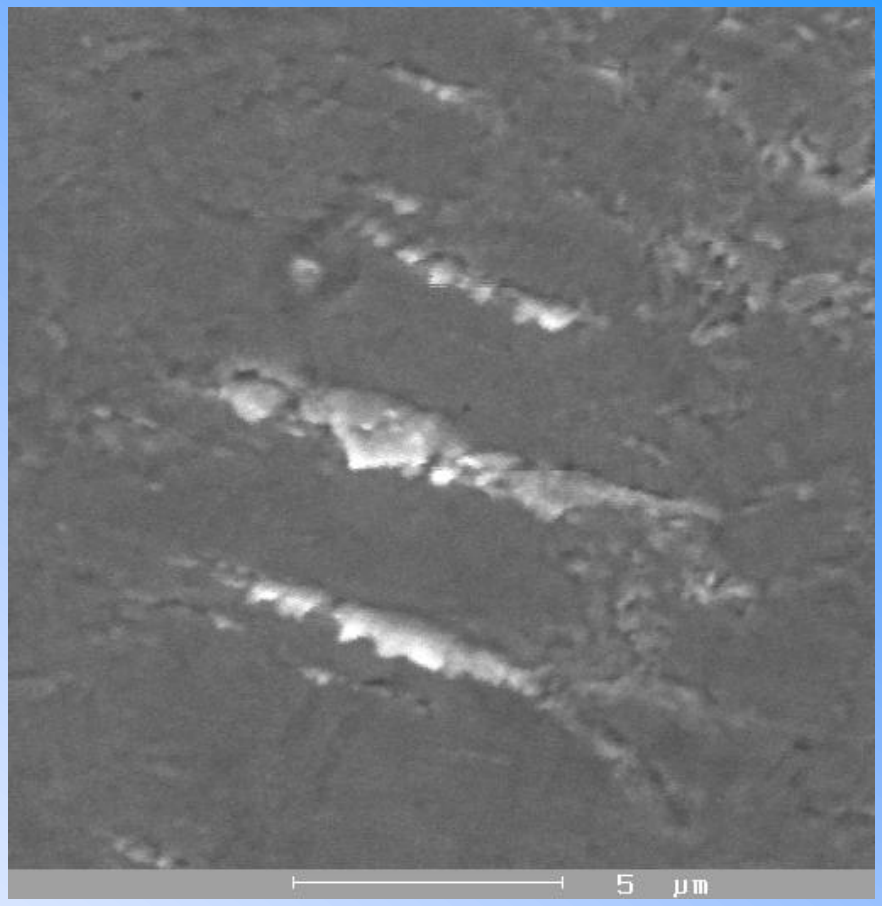




Neumanov model vzniku mikrotrhliny sklzom v dvoch sklzových systémoch

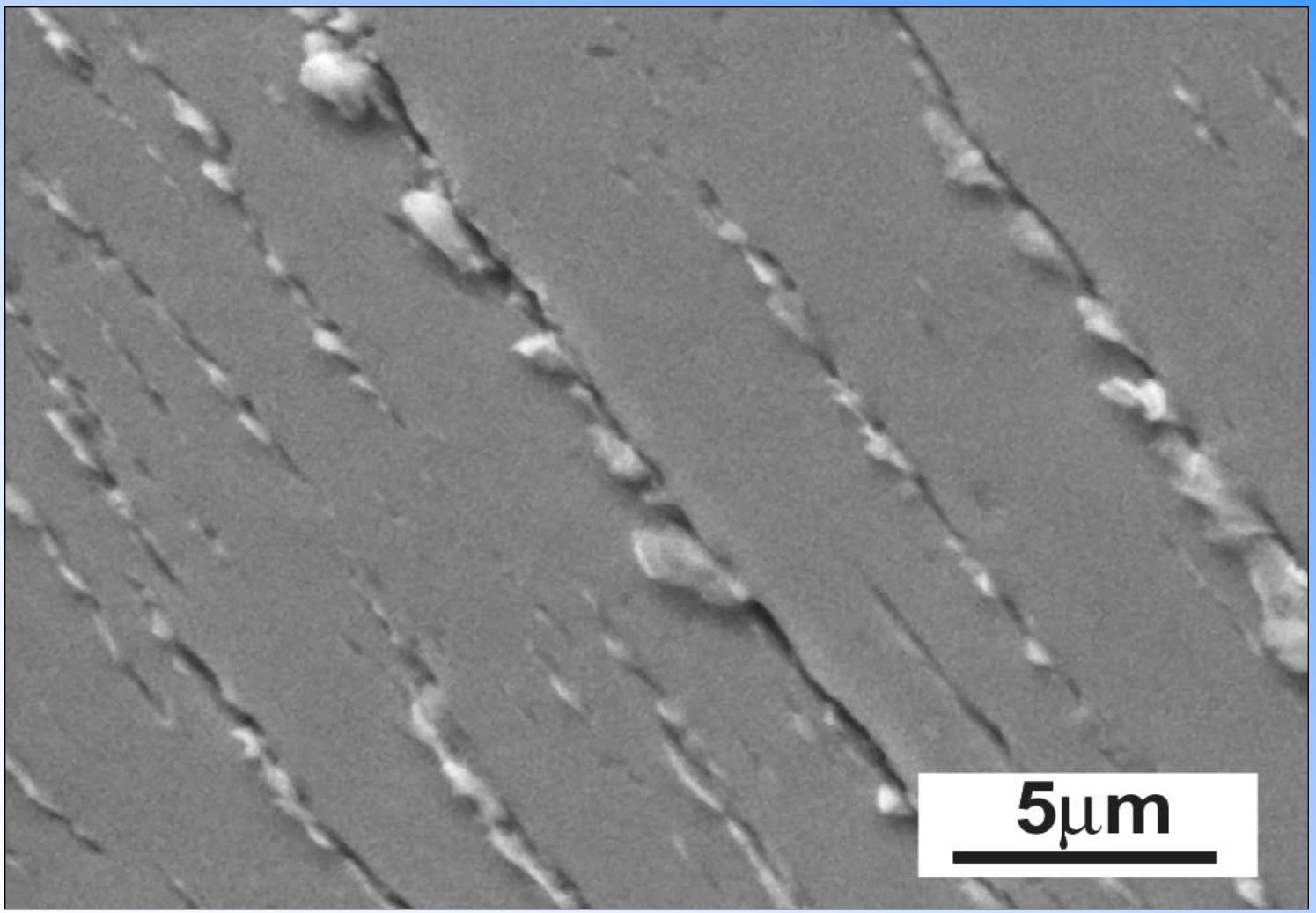
Iniciácia únavovej trhliny





Vývoj povrchového reliéfu v závislosti od počtu cyklov

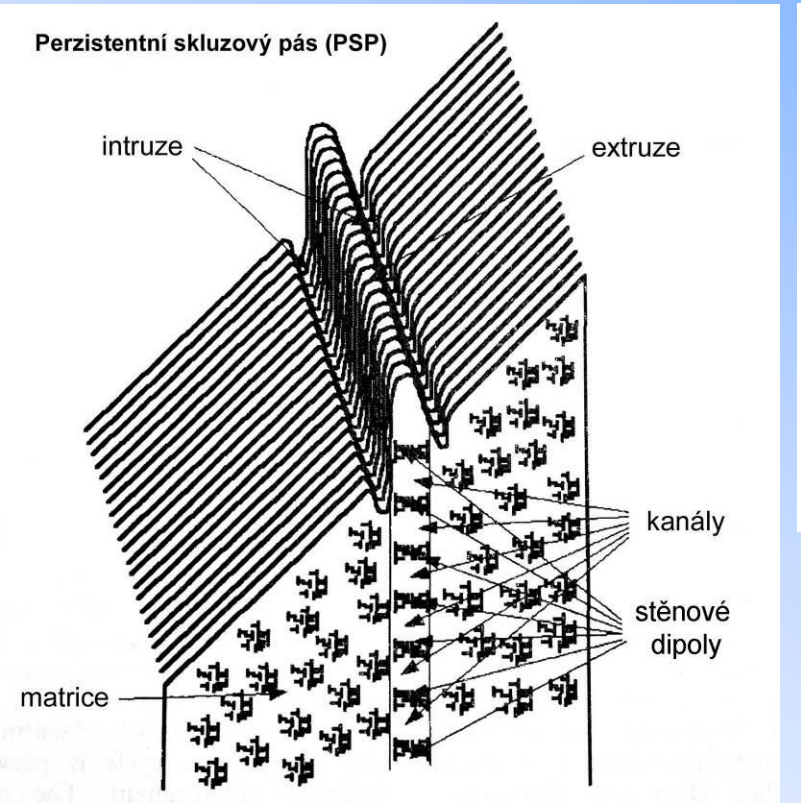
Iniciácia únavovej trhliny

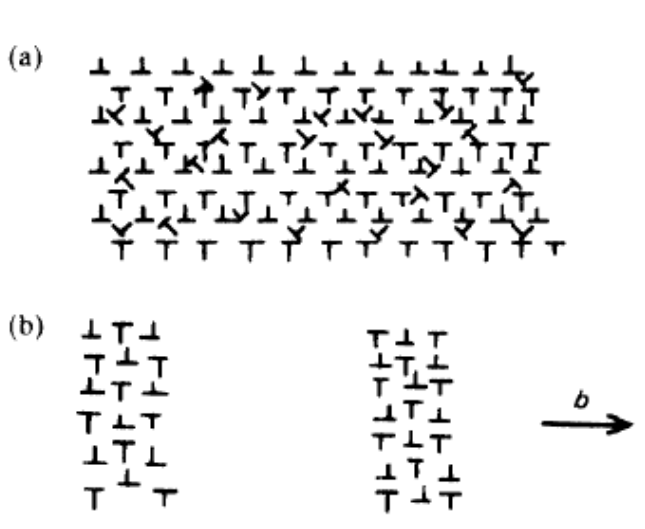


Iniciácia únavovej trhliny

Vývoj povrchového reliéfu v závislosti od počtu cyklov, AFM

Iniciácia únavovej trhliny





Schematické znázornenie:
a) Žilová štruktúra
b) Rebríková štruktúra

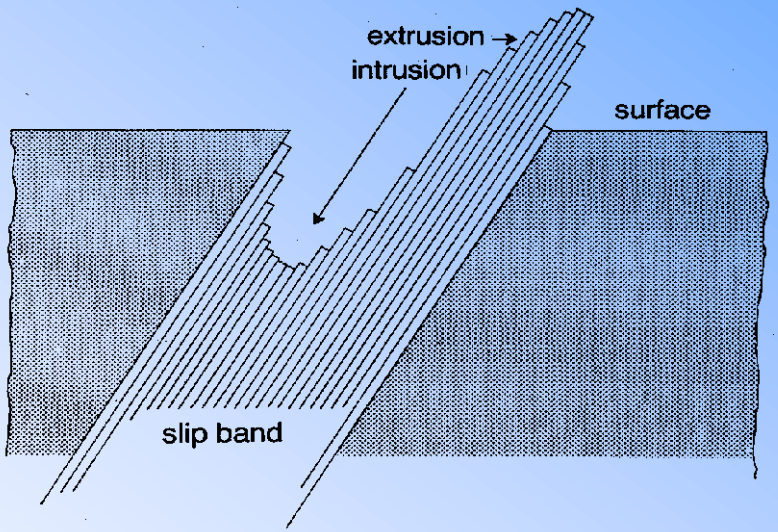
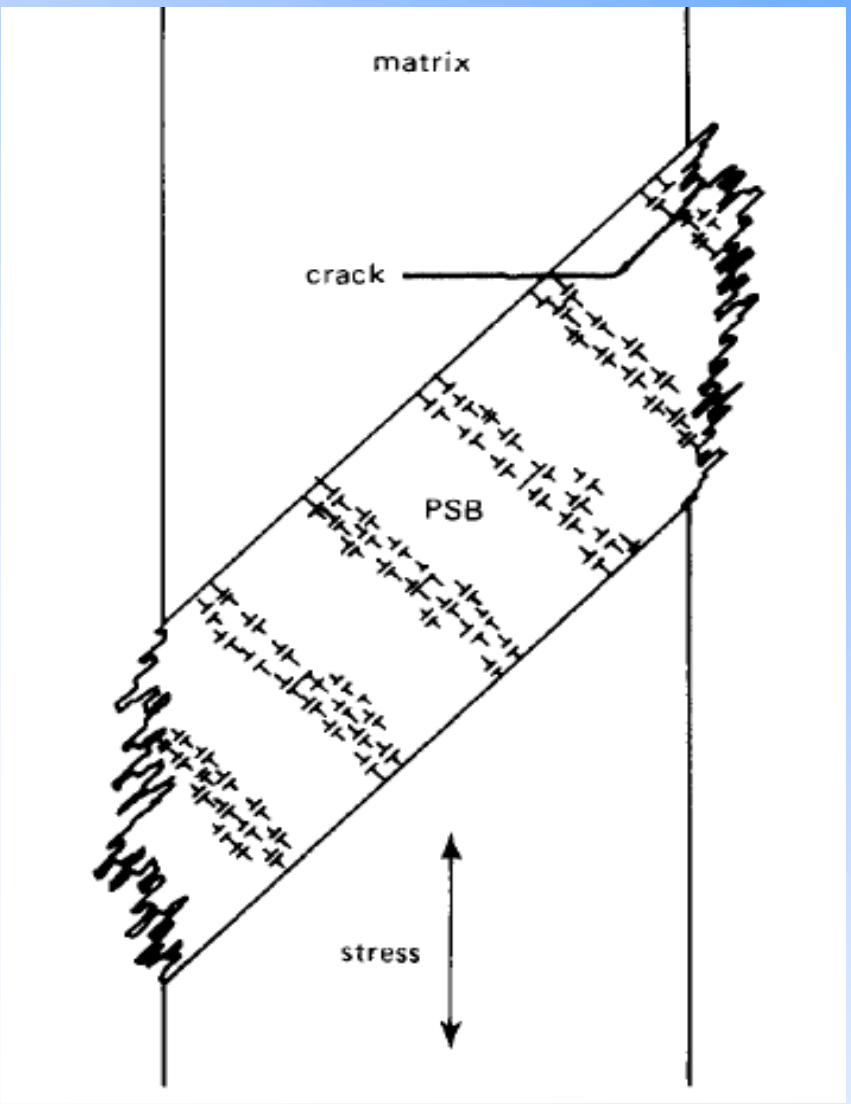
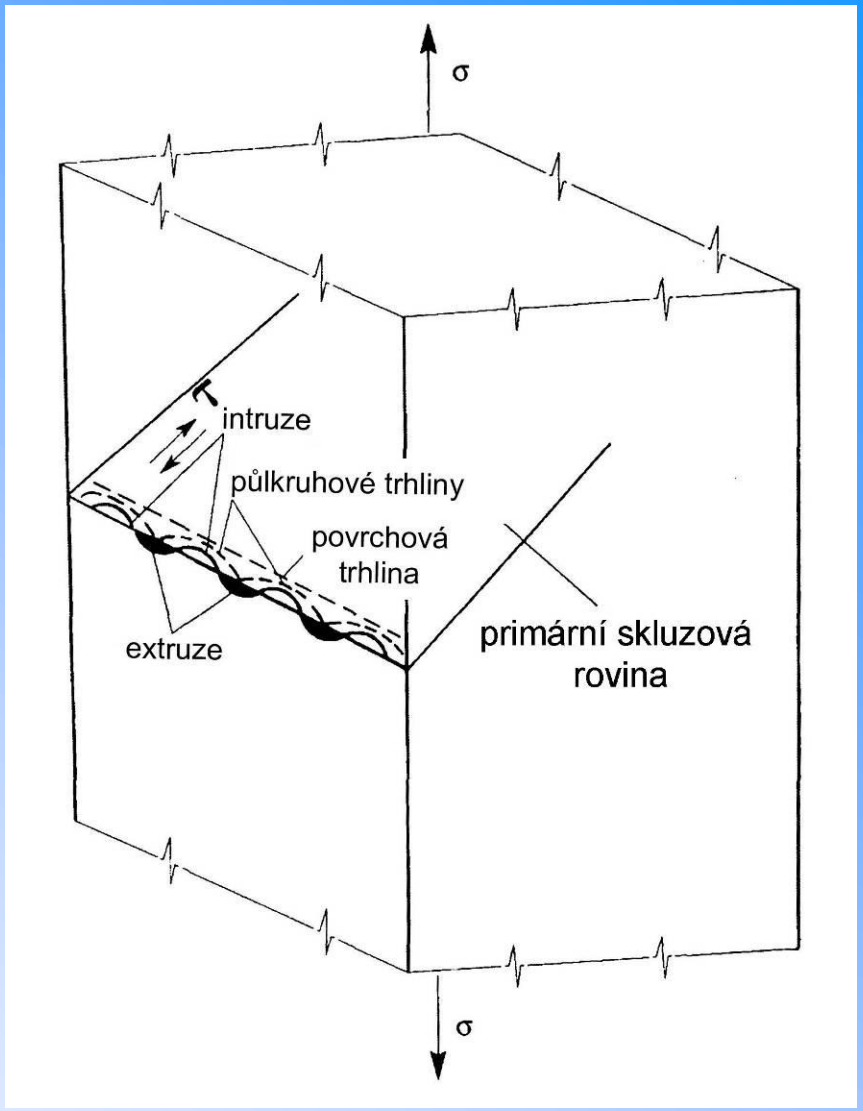


Schéma intrúzií a extrúzií v oblasti PSP

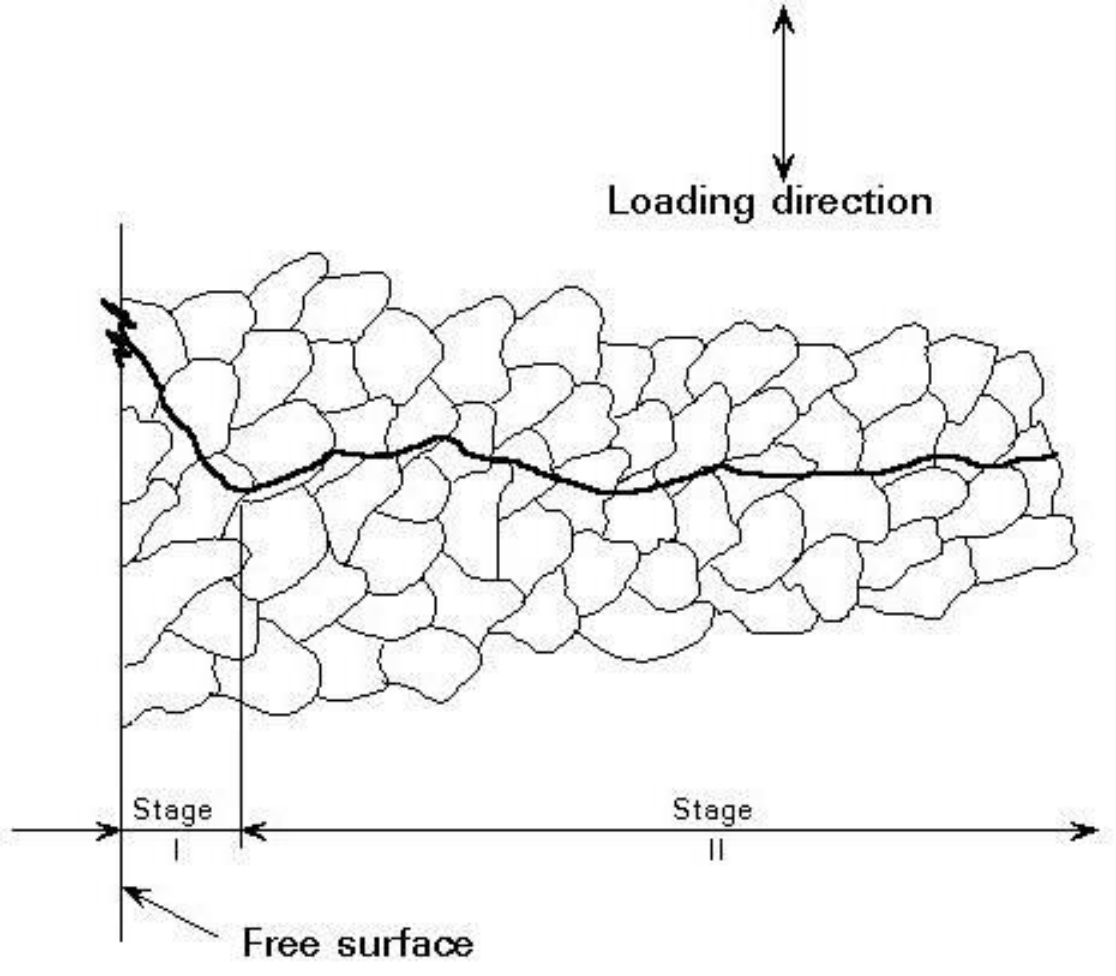


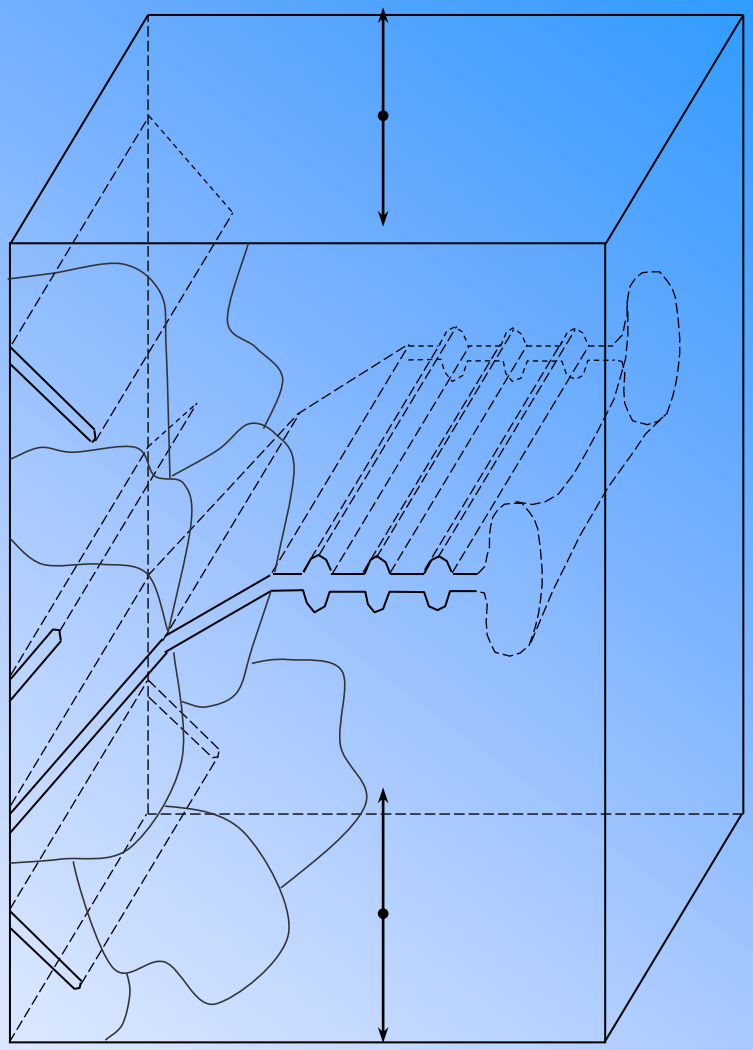
Tvorba PSB pri cyklickom zaťažovaní



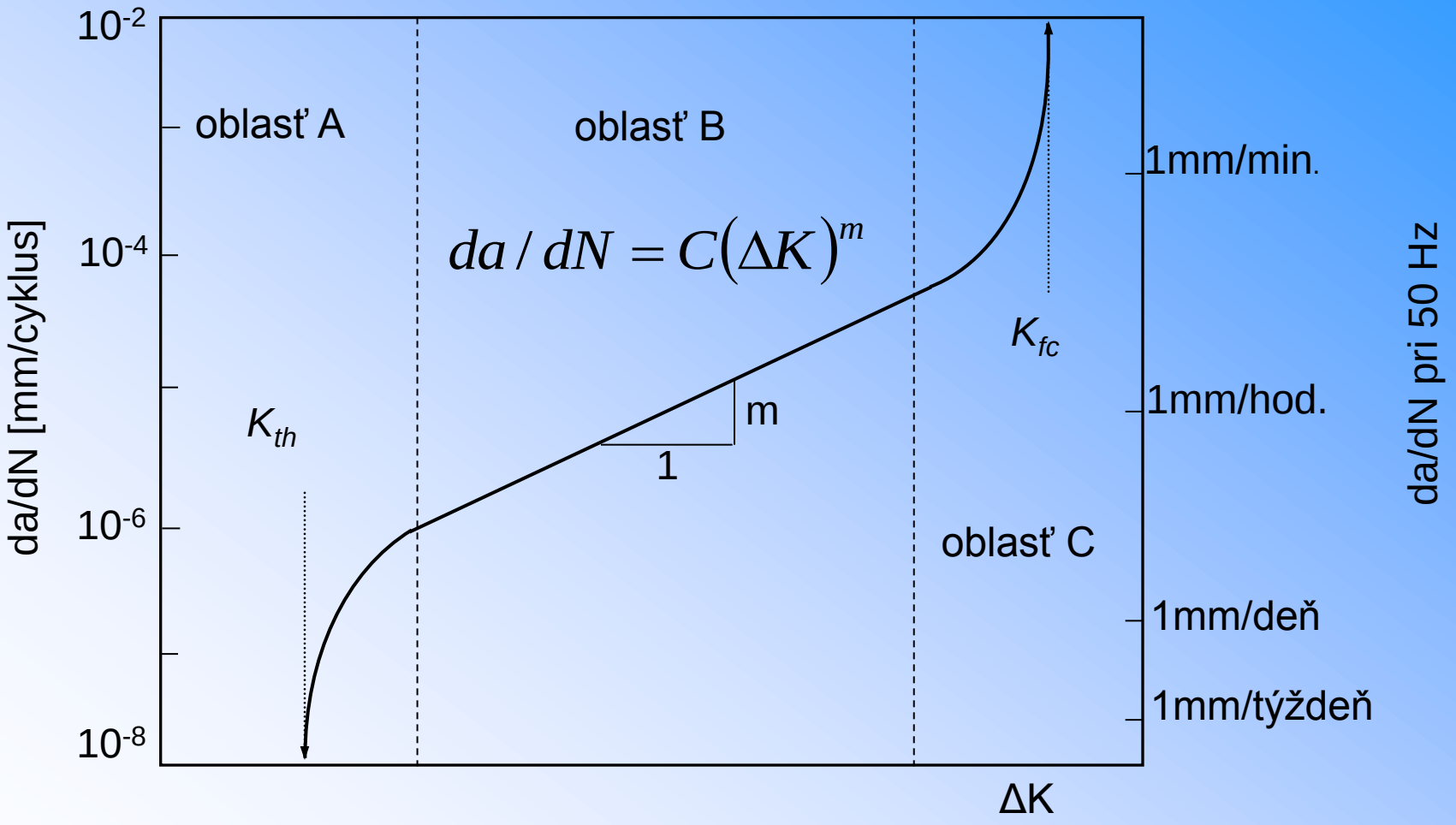
Mechanismus nukleácie povrchových mikrotrhlín

Šírenie únavovej trhliny

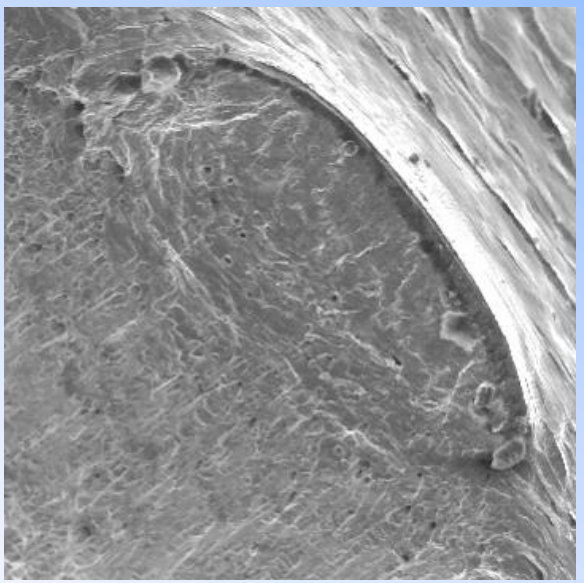


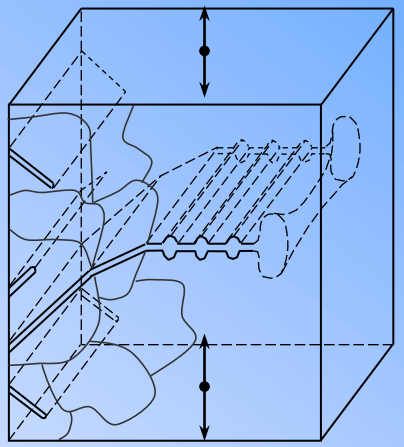


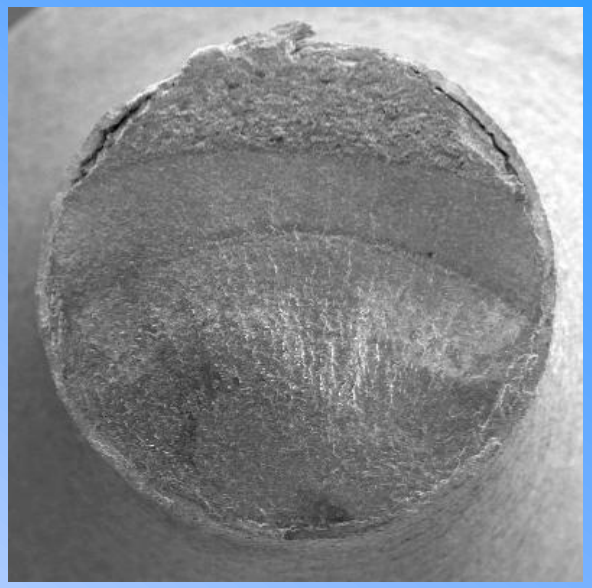
Šírenie únavovej trhliny

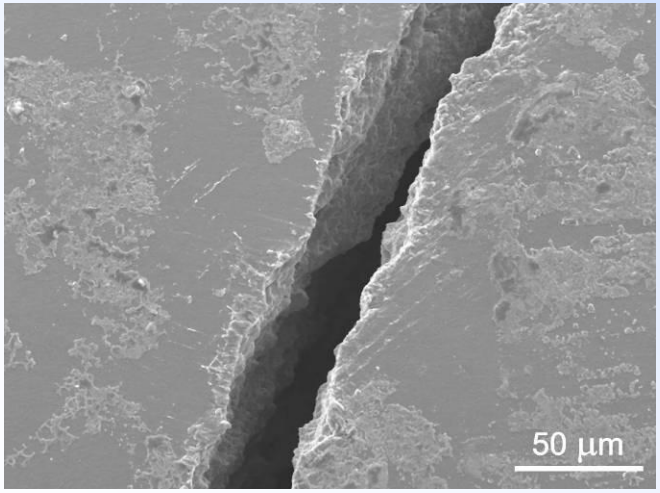


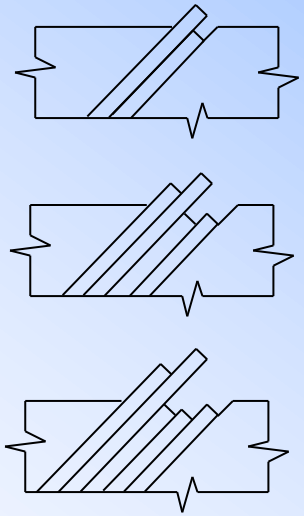
Povrchová iniciácia a šírenie únavovej trhliny

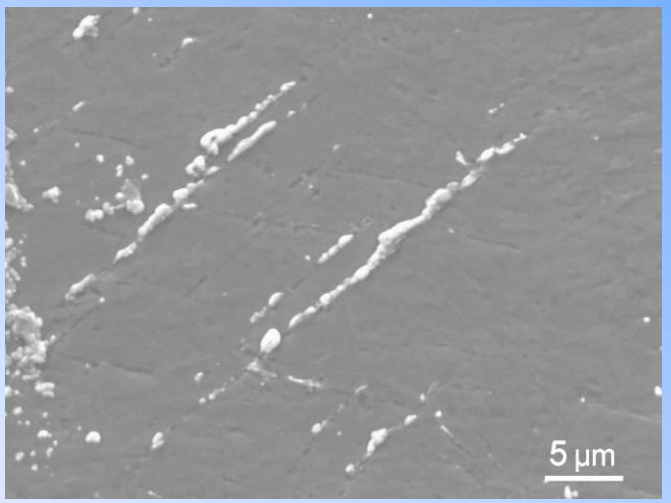




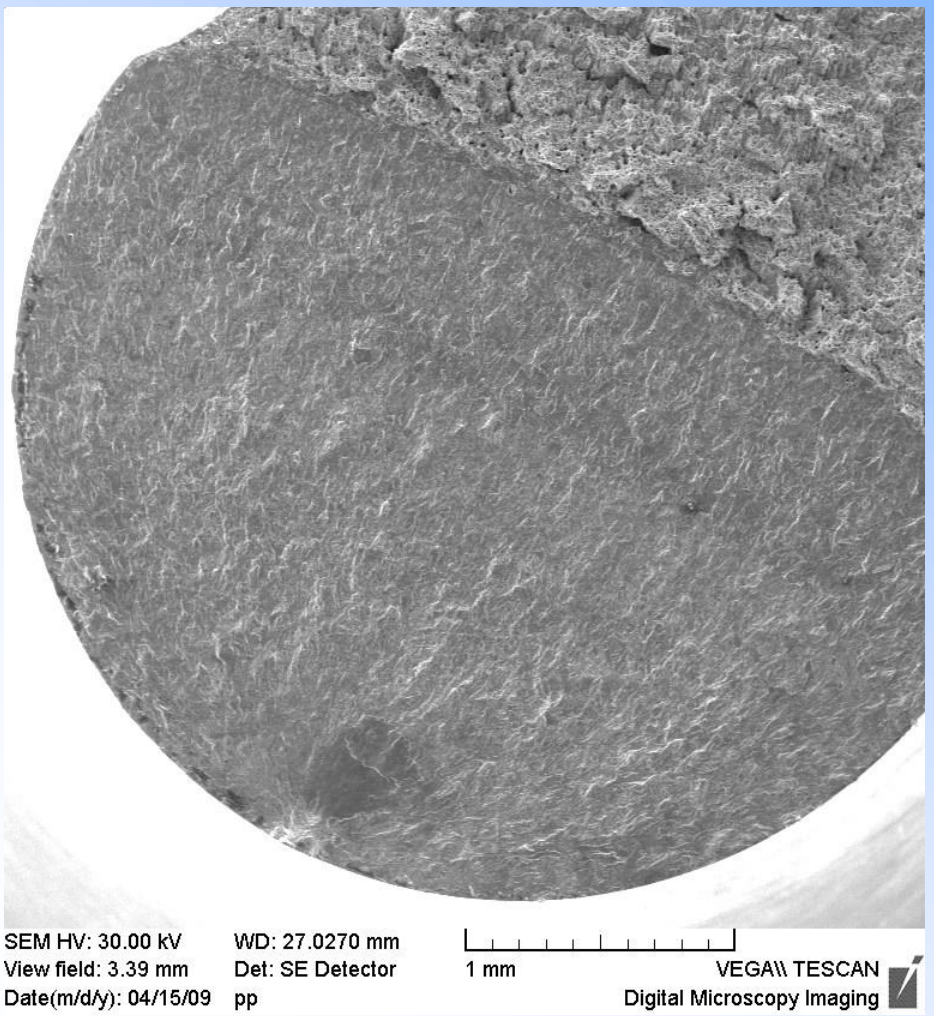


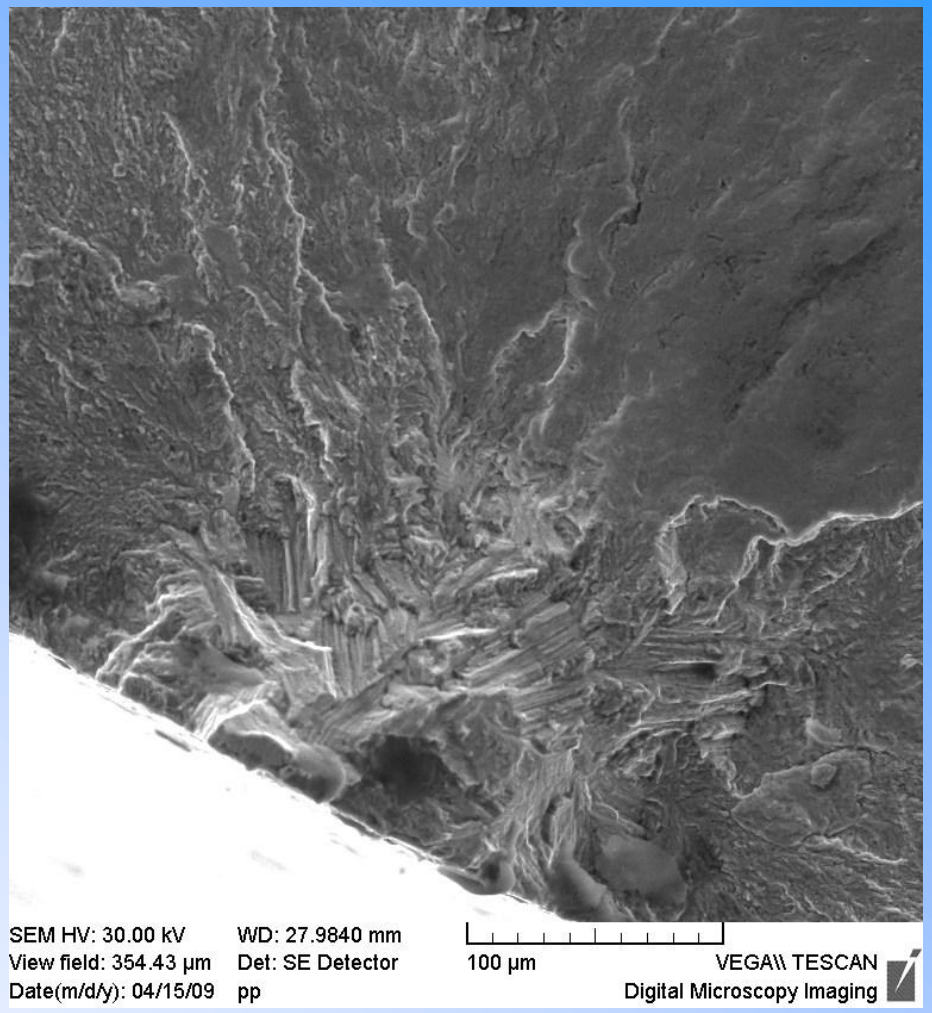




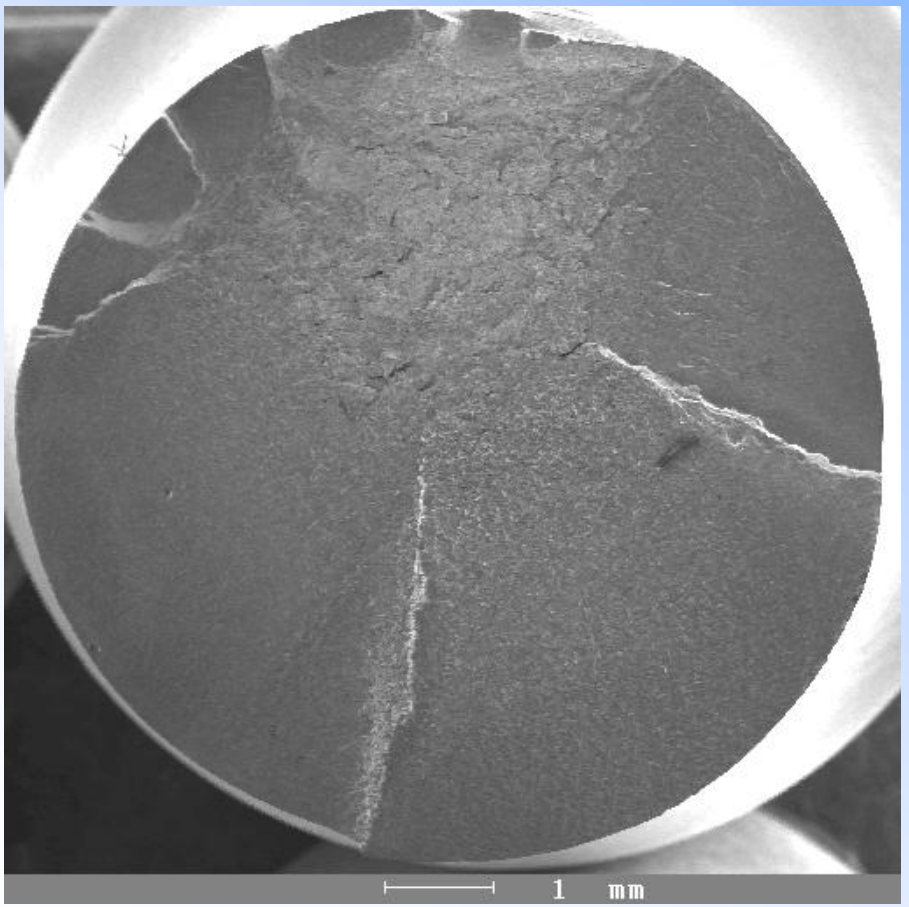


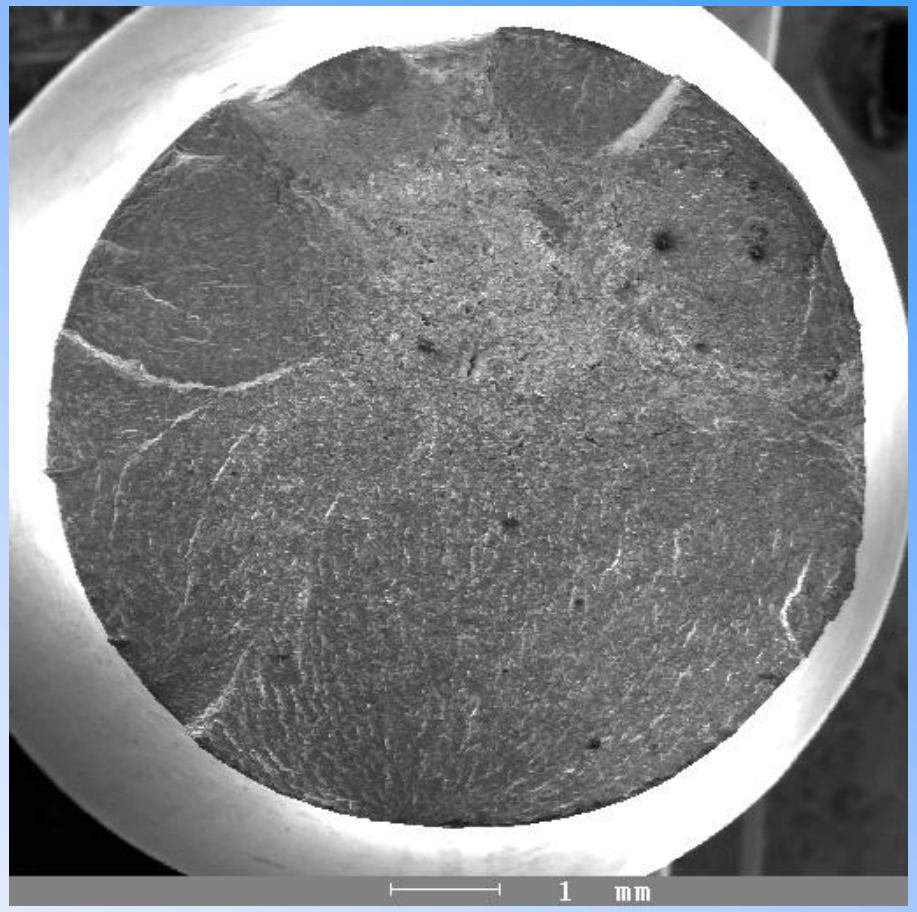
Iniciácia a šírenie únavovej trhliny z jedného miesta na povrchu



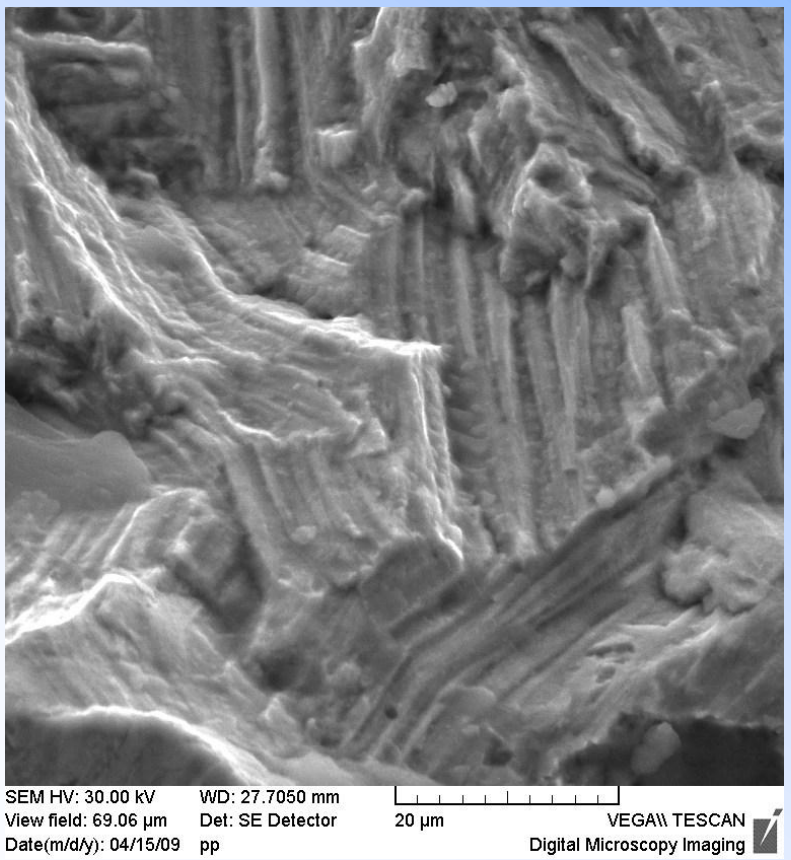


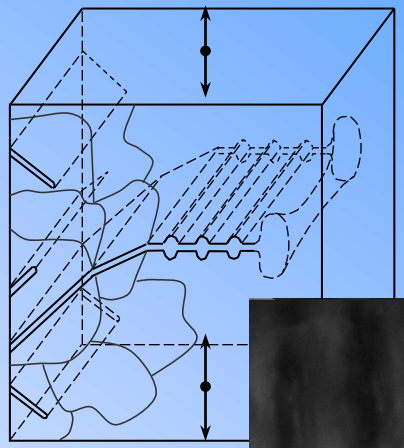
Mnohopočetná iniciácia a šírenie únavovej trhliny z povrchu

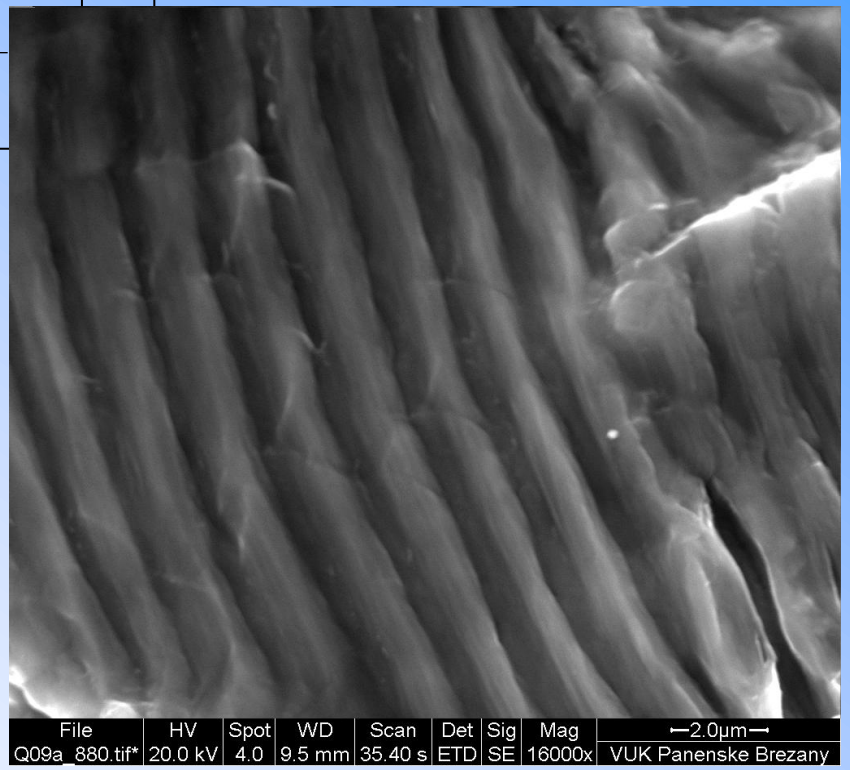




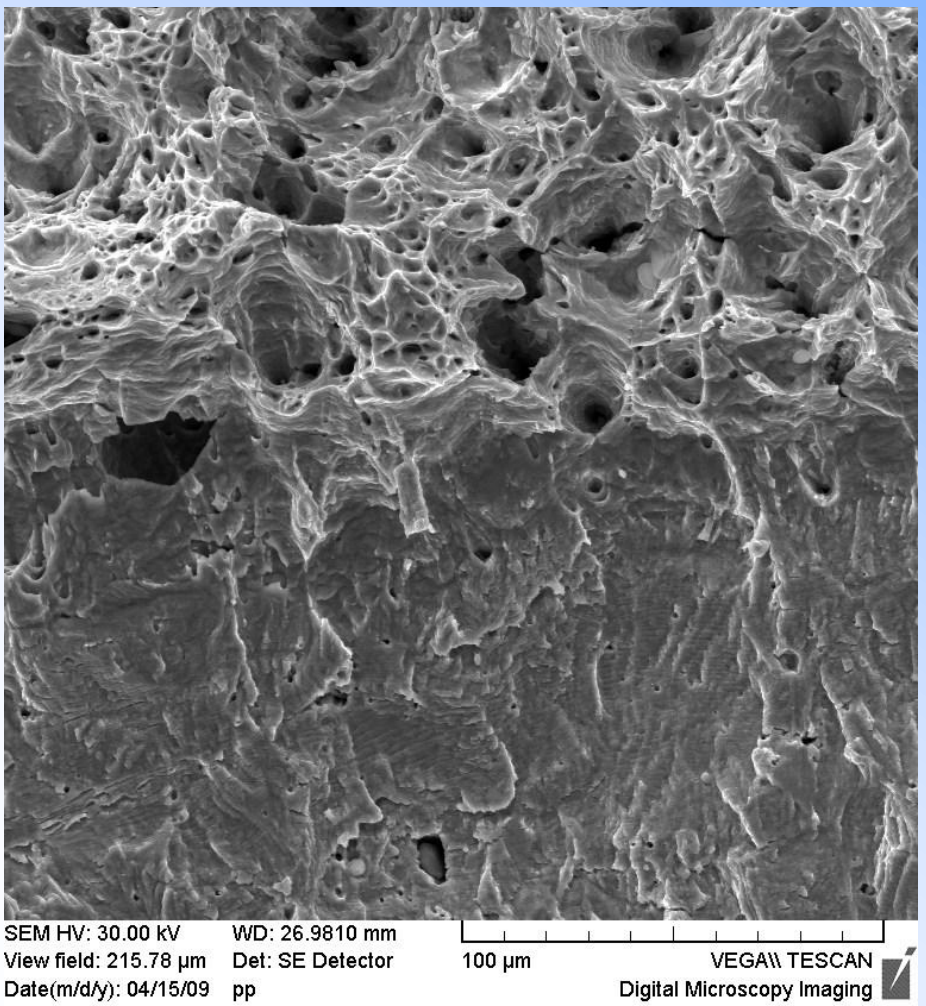
Iniciácia a šírenie únavovej trhliny

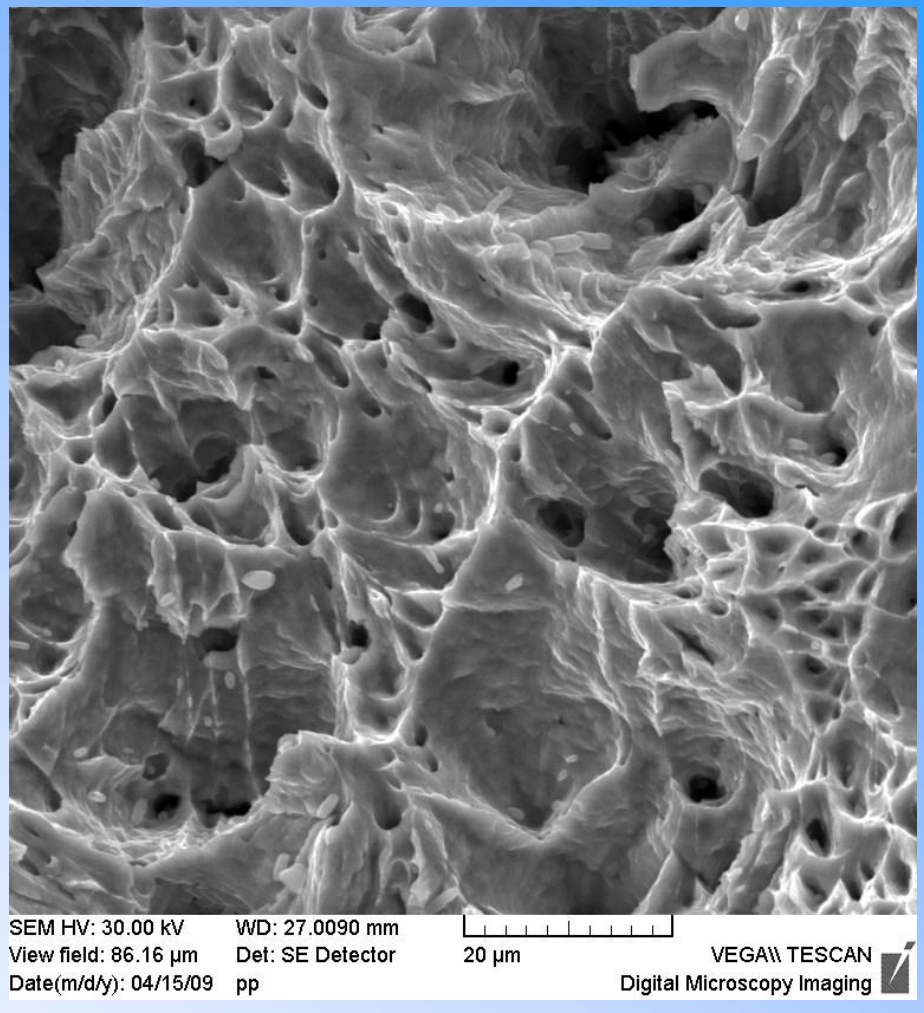






Šírenie únavovej trhliny a záverečné dolomenie





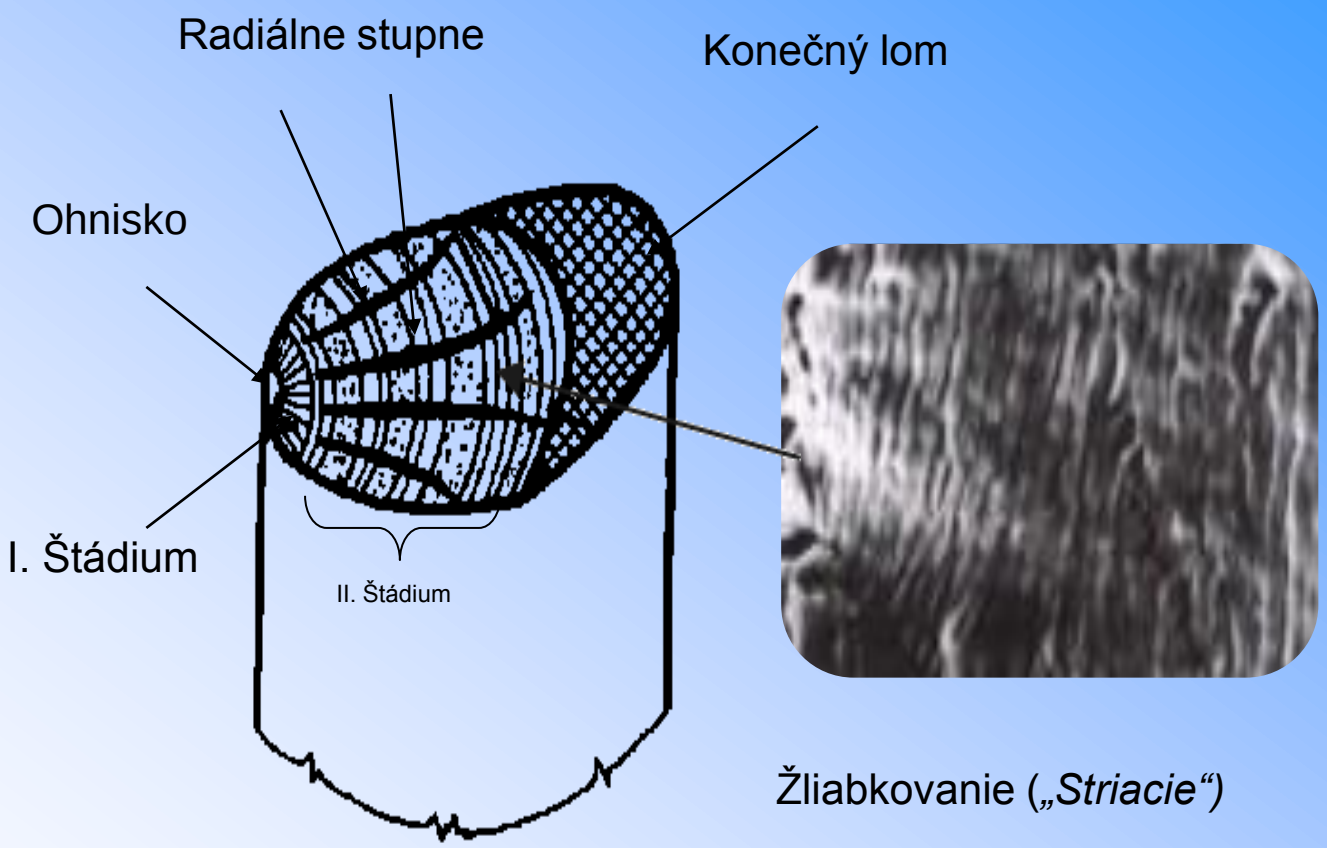
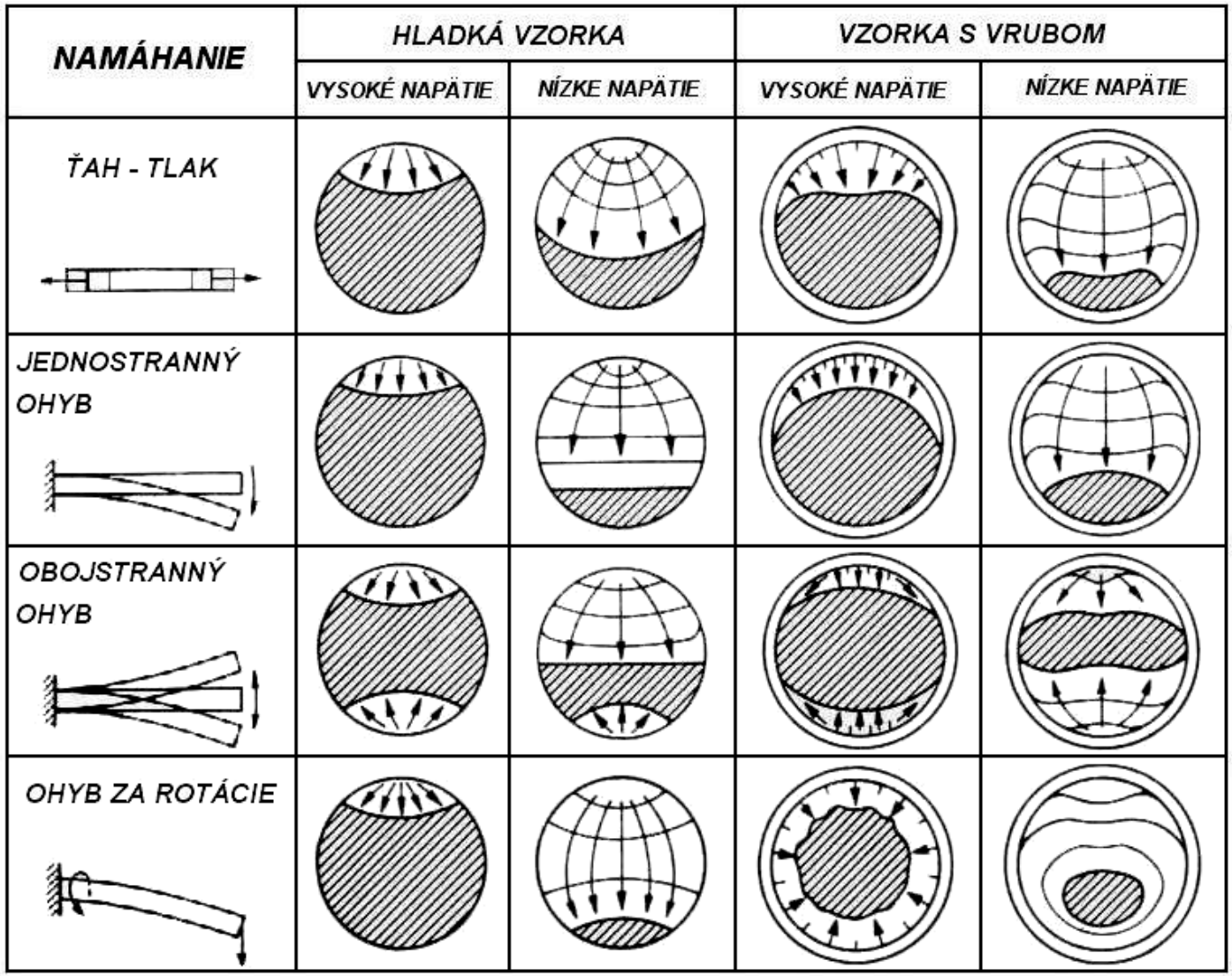
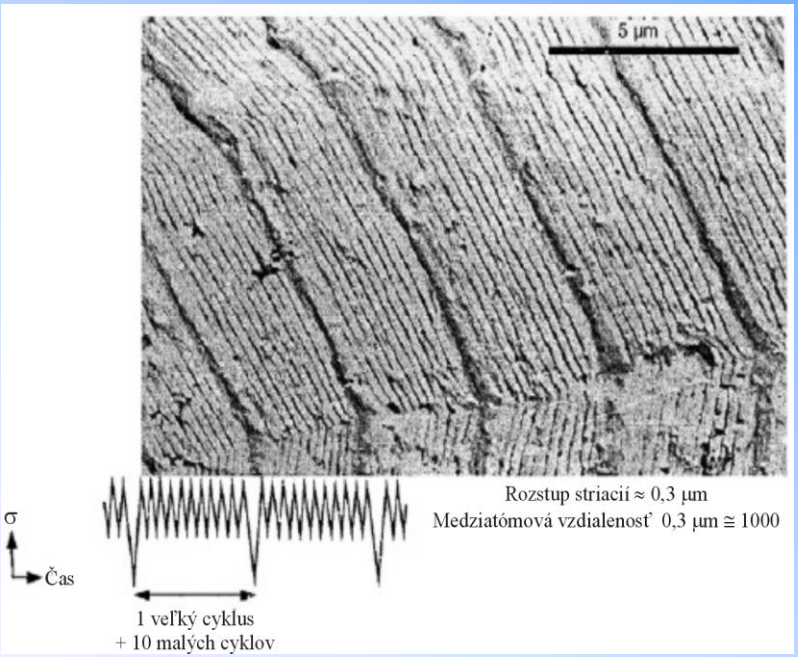


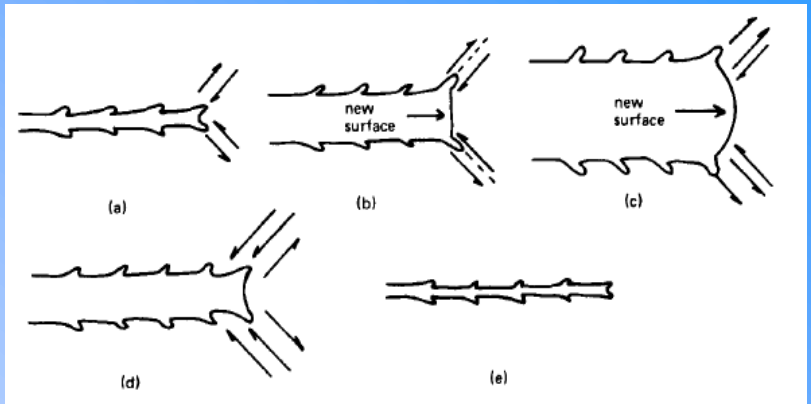
Schéma únavového lomu a jeho štádií

Makroskopický vzhľad únavových lomov pri rôznych spôsoboch zaťažovania

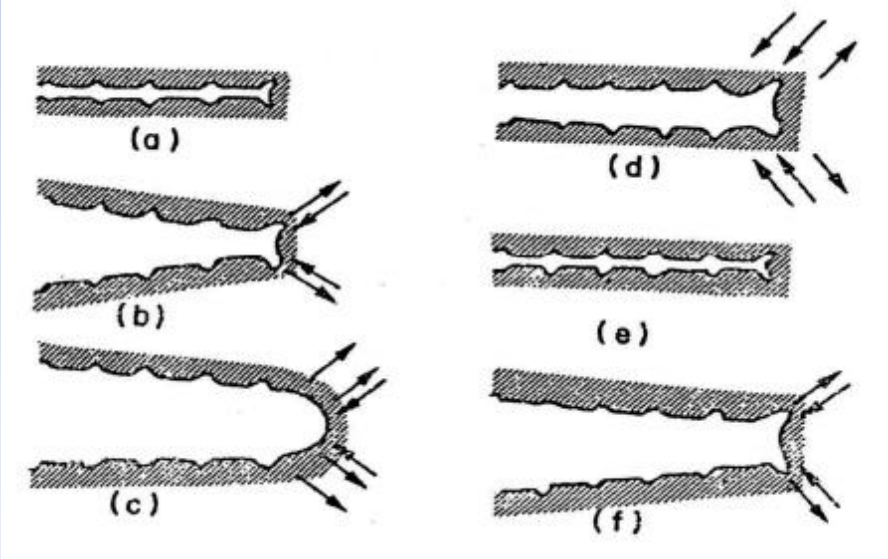


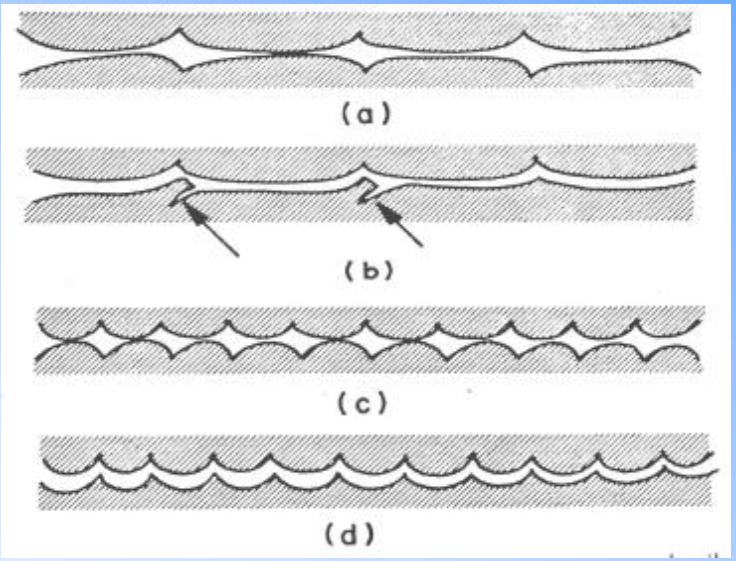


Zhoda medzi striaciami a zaťažovacími cyklami počas šírenia únavovej trhliny v Al–zliatine

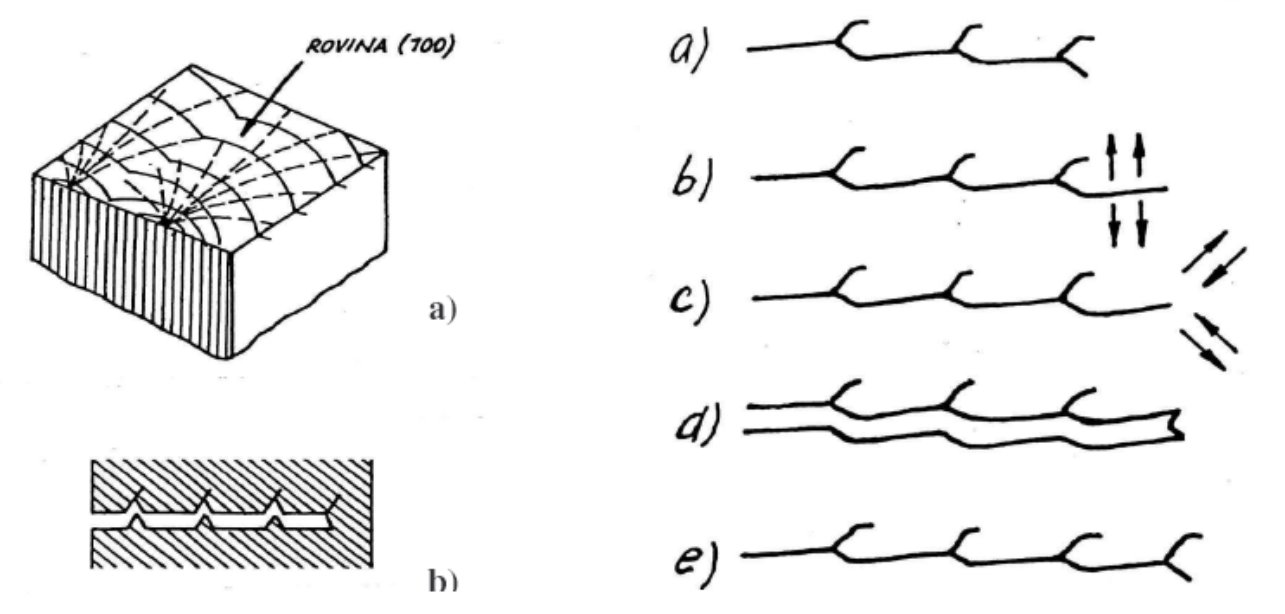


Lairdov striačný model šírenia únavovej trhliny





Príklady rôznych profilov tvárnych únavových striacií podľa Lairda



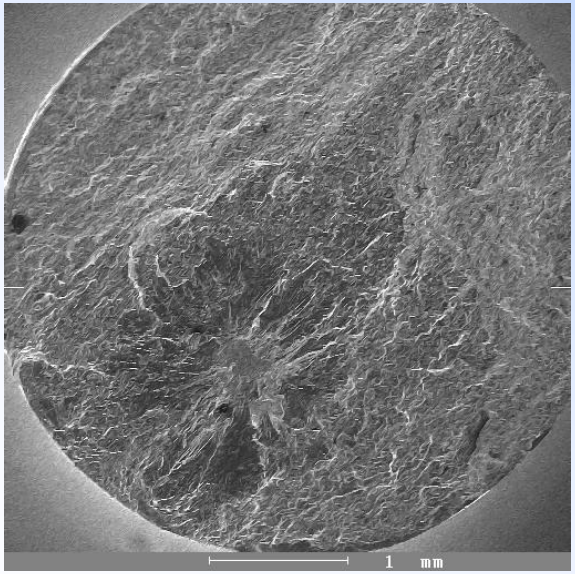
Model vzniku štiepnych únavových striacií podľa Lairda

Schematický vzhľad transkryštalických faziet so štiepnymi striaciami

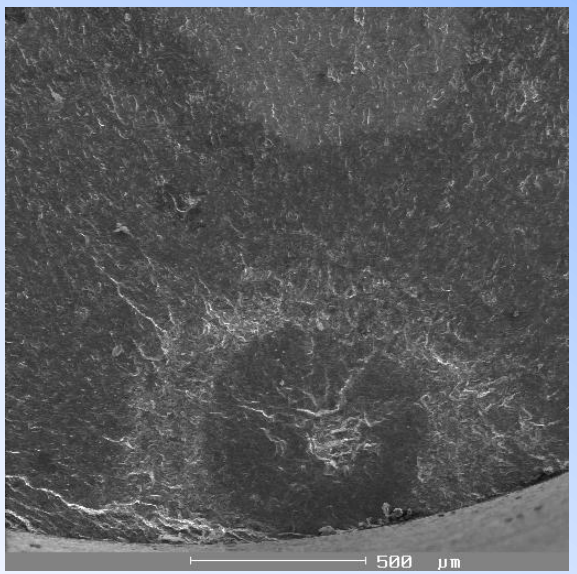
Iniciácia a rast únavových trhlín z defektov vo vnútri materiálu – „podpovrchová iniciácia“.

Okrem mechanizmu iniciácie únavových trhlín z povrchu materiálu existuje aj mechanizmus iniciácie únavových trhlín z defektov vo vnútri materiálu (rybie oká).

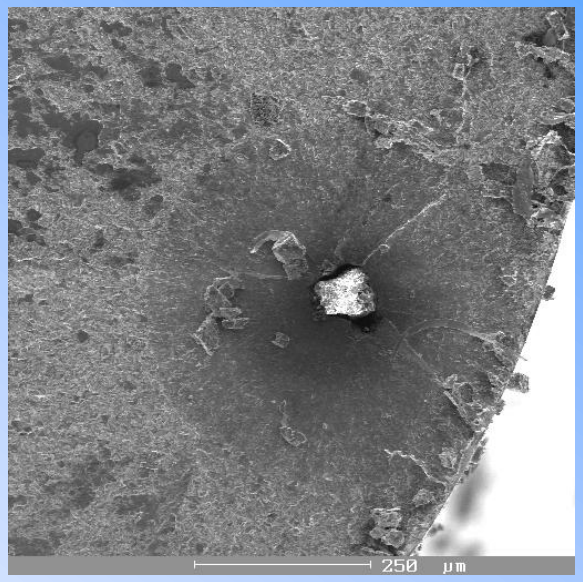
Tento mechanizmus je známy už 50 rokov a stále sa o ňom viac nevie ako vie. Prejavuje sa väčšinou u vysokopevných materiálov, napr. ložiskové a pružinové ocele. V závislosti od podmienok sa však môže niekedy ojedinele vyskytnúť aj v celom rade iných materiálov.



Al-zliatina STN 424218



Mg-zliatina ZK 60

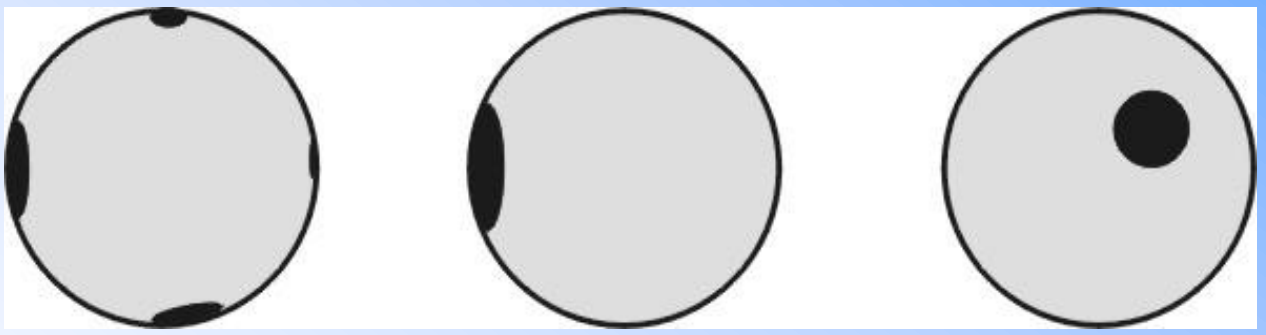


Ložisková oceľ 100Cr6

Momentálny stav vedy: - pokusy o vytvorenie schémy makroskopického vzhľadu únavového lomu v závislosti od počtu cyklov do lomu + parametrický model $\sqrt{area}$ defektu.

C. Bathias: Gigacycle fatigue in mechanical practice:

- ⇒ **pri vysokých amplitúdach cyklického zaťažovania únavové trhliny iniciujú z povrchu materiálu,**
- ⇒ **pri nízkych amplitúdach cyklického zaťažovania únavové trhliny iniciujú z vnútorných defektov (póry, inklúzie, ...).**



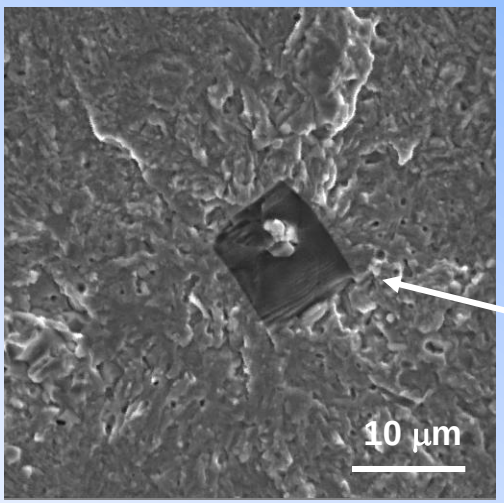
$N_f \approx 10^4$ *cyklov* $N_f \approx 10^6$ *cyklov* $N_f \approx 10^8$ *cyklov*

Y. Murakami: Metal fatigue:

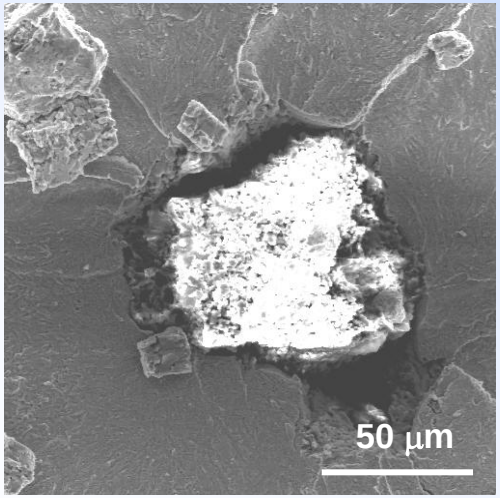
⇒ **parametrický model $\sqrt{area}$ defektu aplikuje na hodnotenie vplyvu konštrukčných vrubov, povrchovej drsnosti, povrchových štruktúrnych defektov, podpovrchových a vnútorných štruktúrnych defektov.**

Príčiny vzniku podpovrchovej iniciácie únavových trhlín

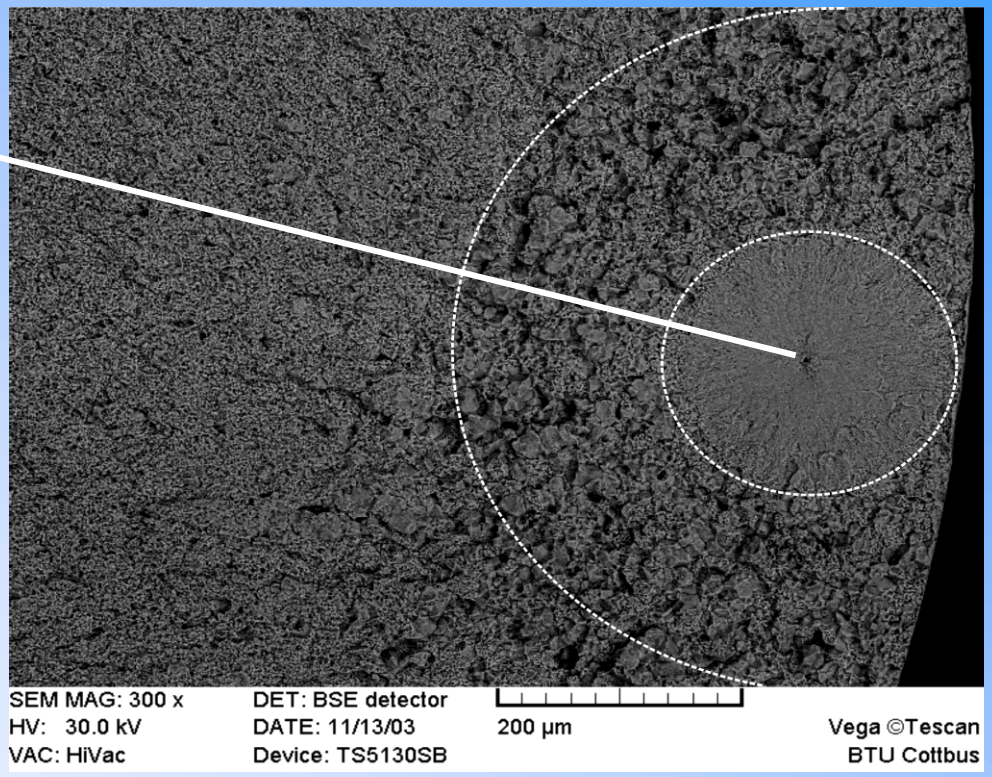
1. Koncentrácia napätí v okolí inklúzií



Inklúzia TiN



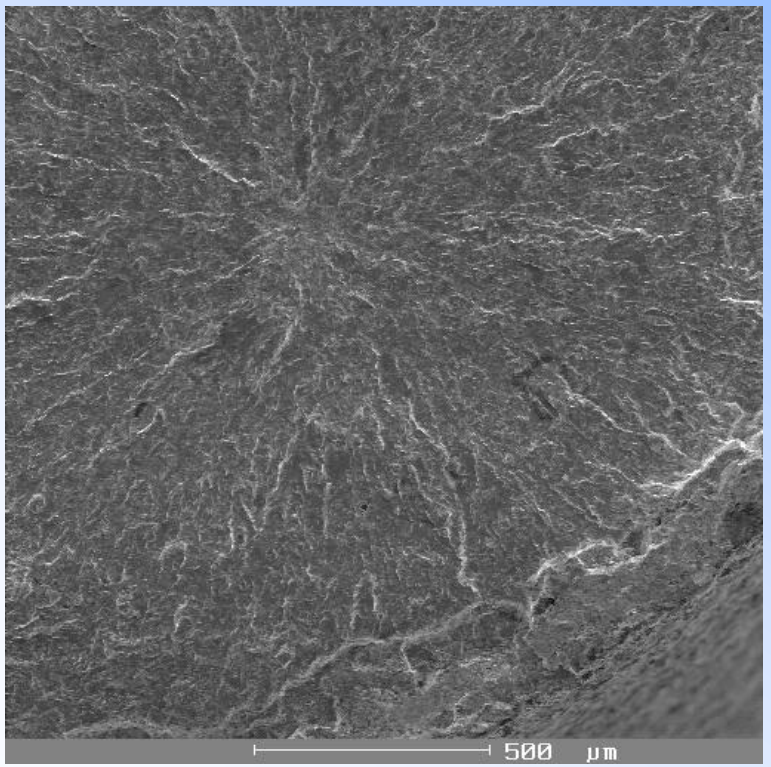
Inklúzia Al_2O_3



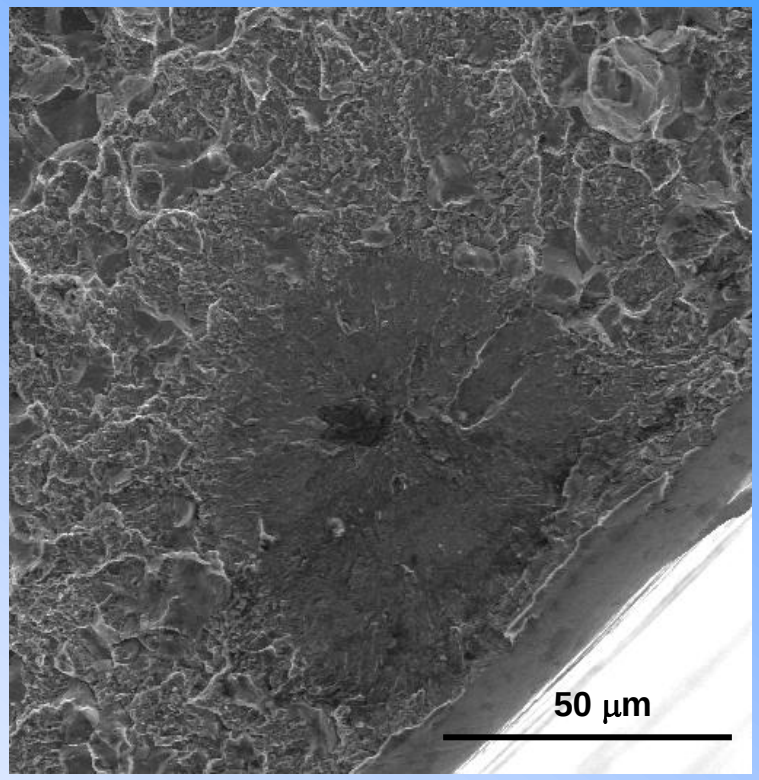
Ložisková oceľ 100Cr6

Príčiny vzniku podpovrchovej iniciácie únavových trhlín

2. Koncentrácia zvyškových napätí v podpovrchových vrstvách



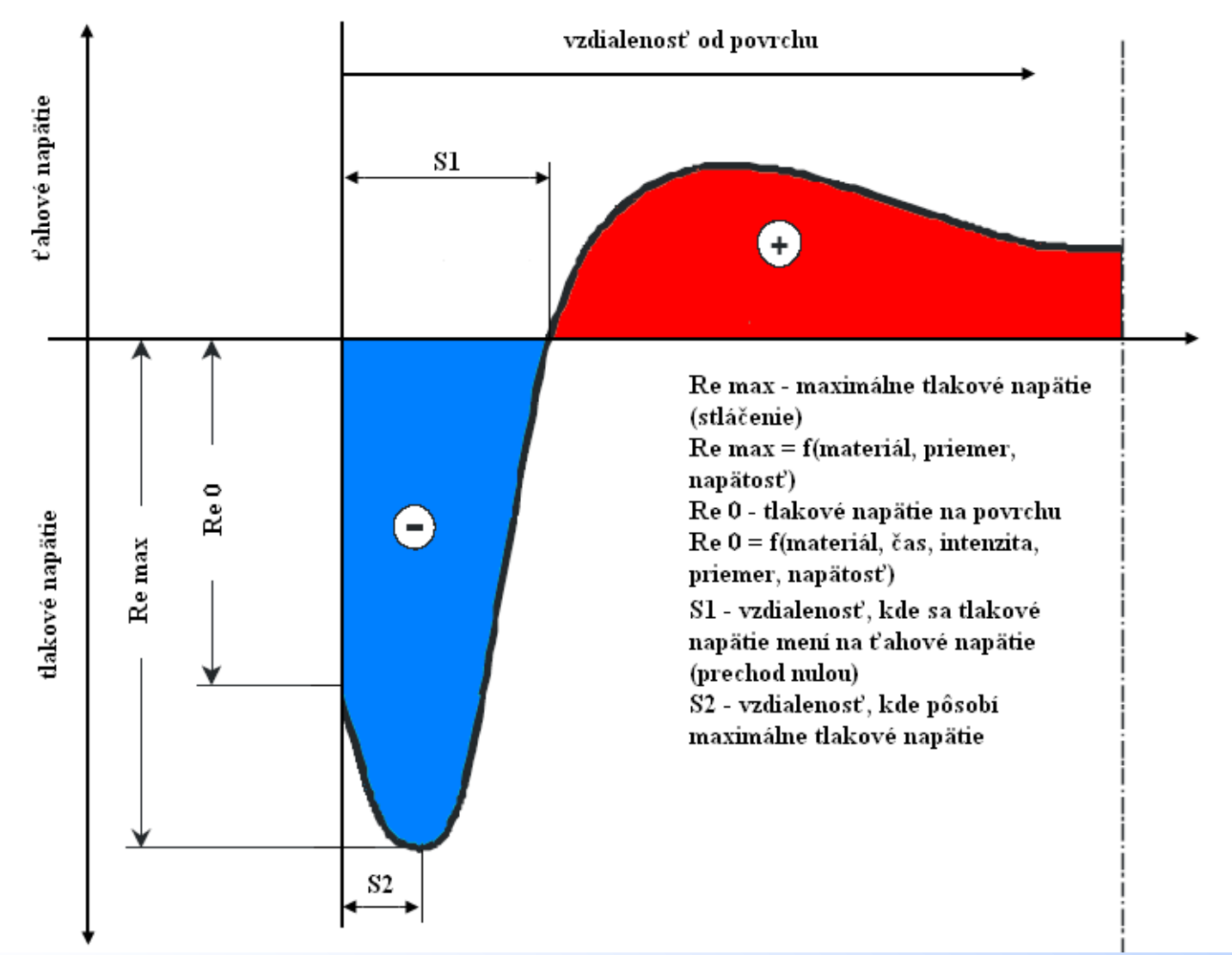
Oceľ 11 373
s povlakom WC



Vysokopevná oceľ s povlakom WC

Priebeh zvyškových napätí po niektorých povrchových úpravách

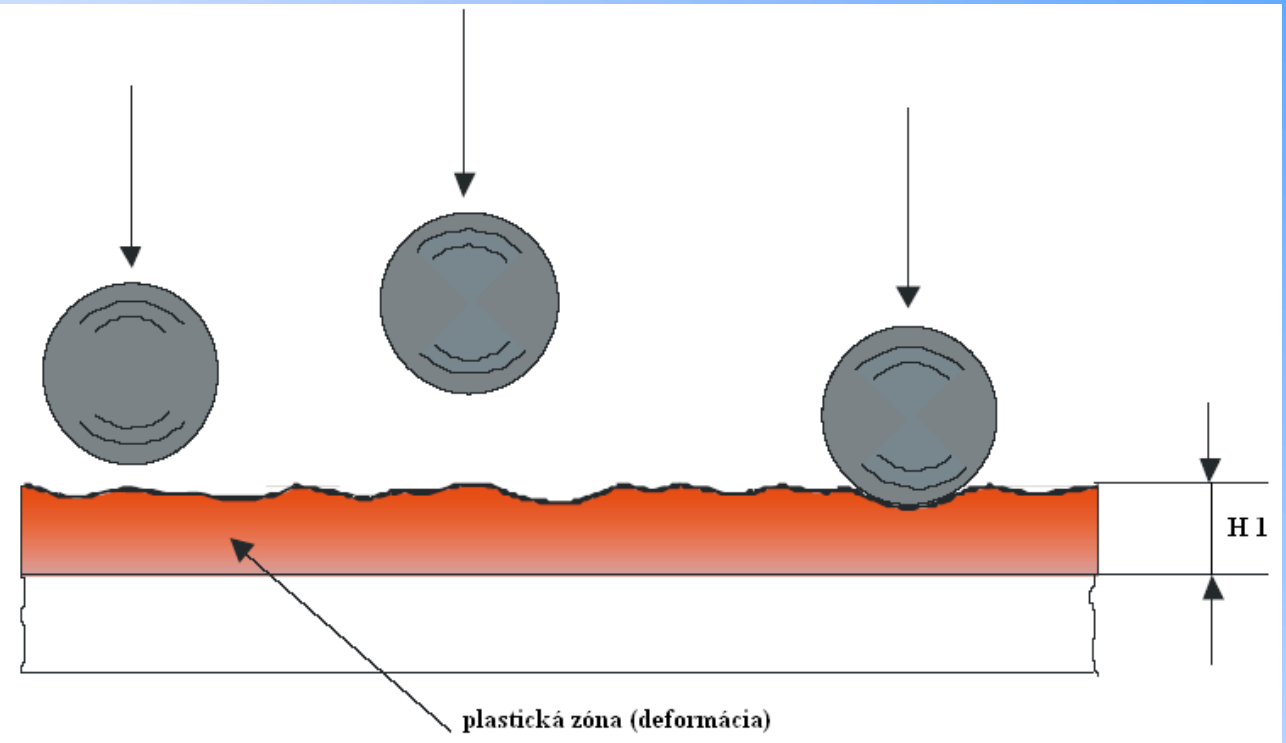
tryskanie, PVD vrstvy, ...



Je v únave ešte čo skúmať?

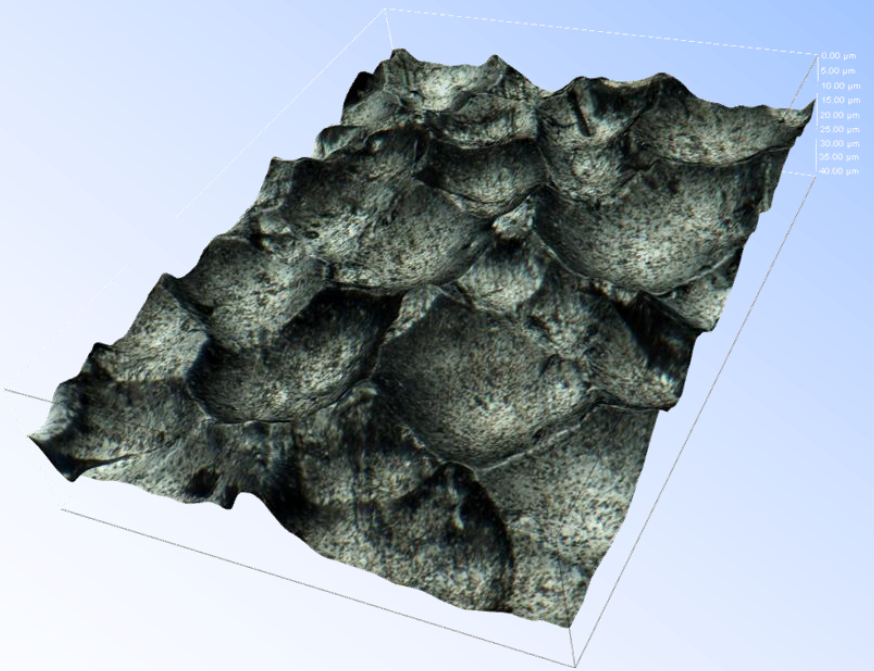
Vplyv povrchových úprav je ešte stále otvorená otázka.

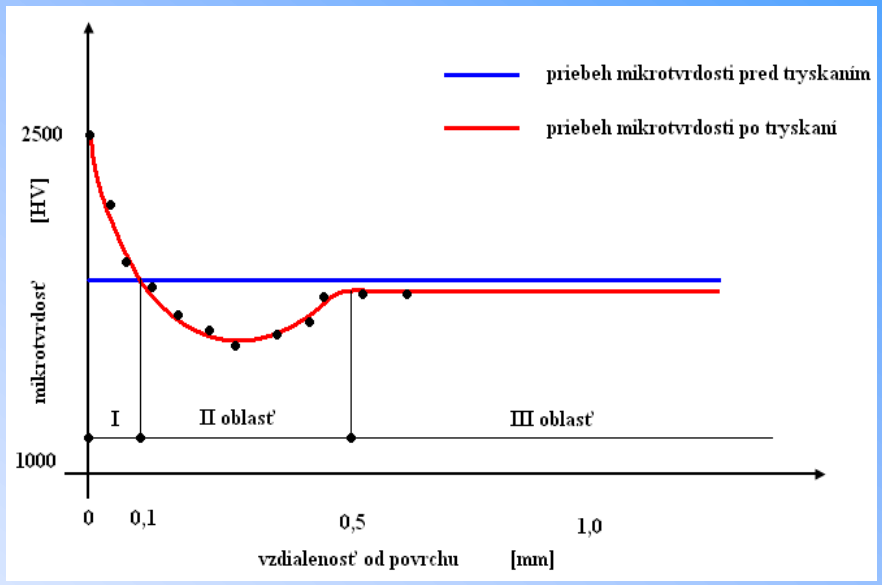
Vplyv tryskania povrchu



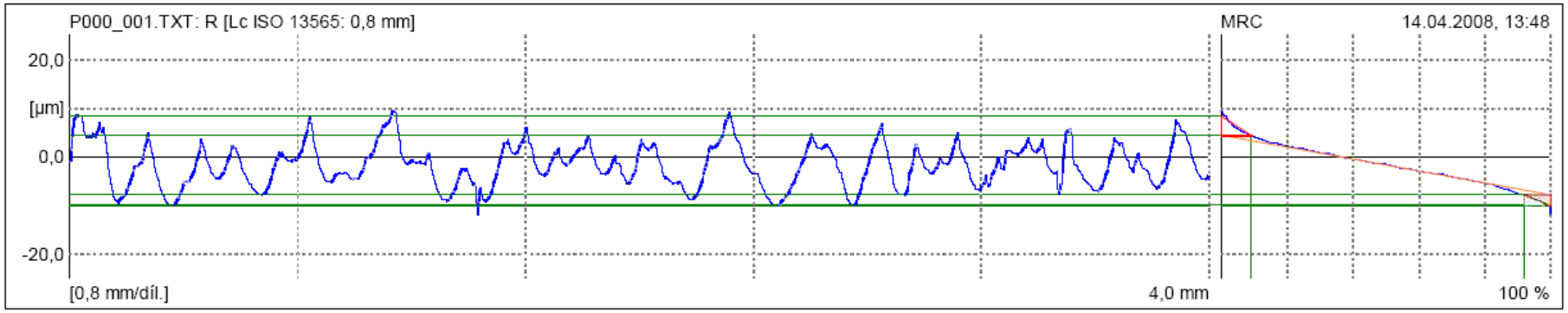
Účinky guľôčkovania povrchu

Intenzívna plastická deformácia povrchu ⟷ **Zmena tvrdosti povrchovej vrstvy**

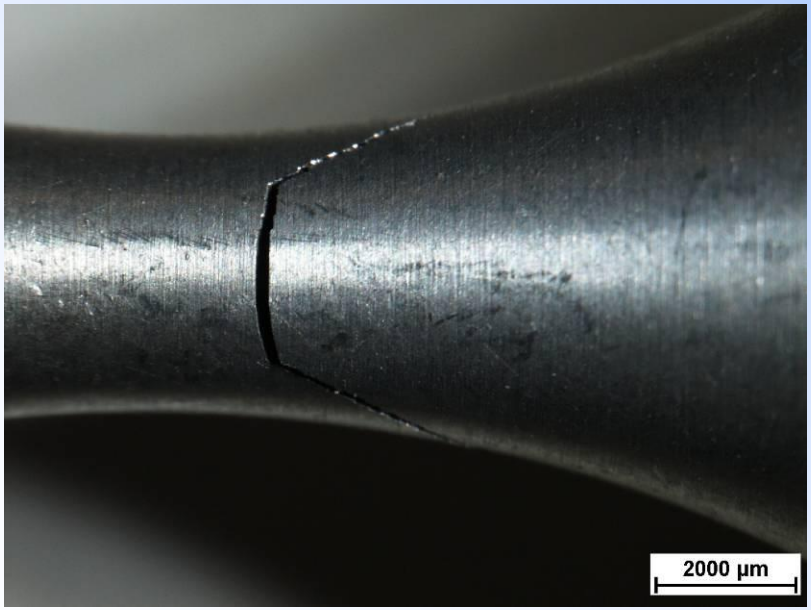




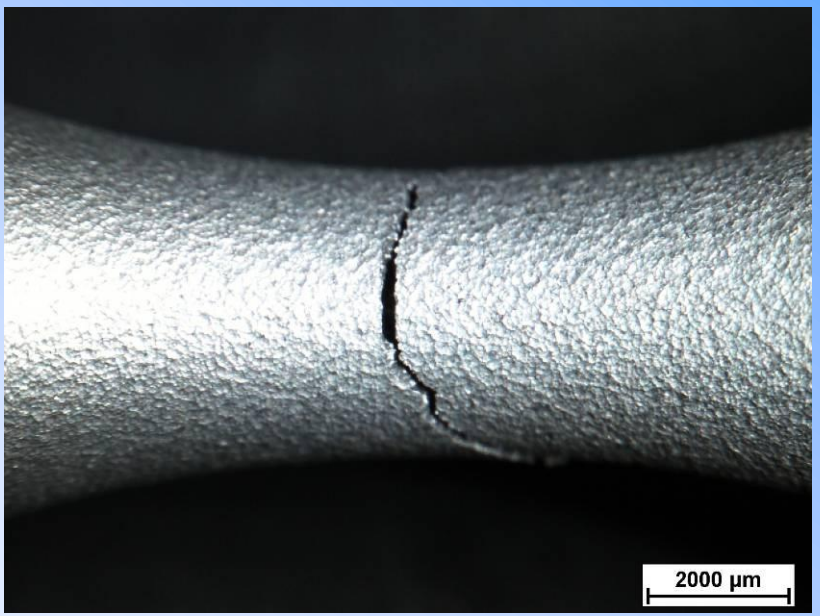
Profil drsnosti po jemnom sústružení a guľôčkovaní povrchu Al-zliatiny AW-6082-T6



Ra	3,485 µm	Rz	17,60 µm	Rmr1 (-1,0; 5,0)	8,1 %
Rmr2 (-2,0; 5,0)	12,0 %	Rmr3 (-3,0; 5,0)	17,0 %		

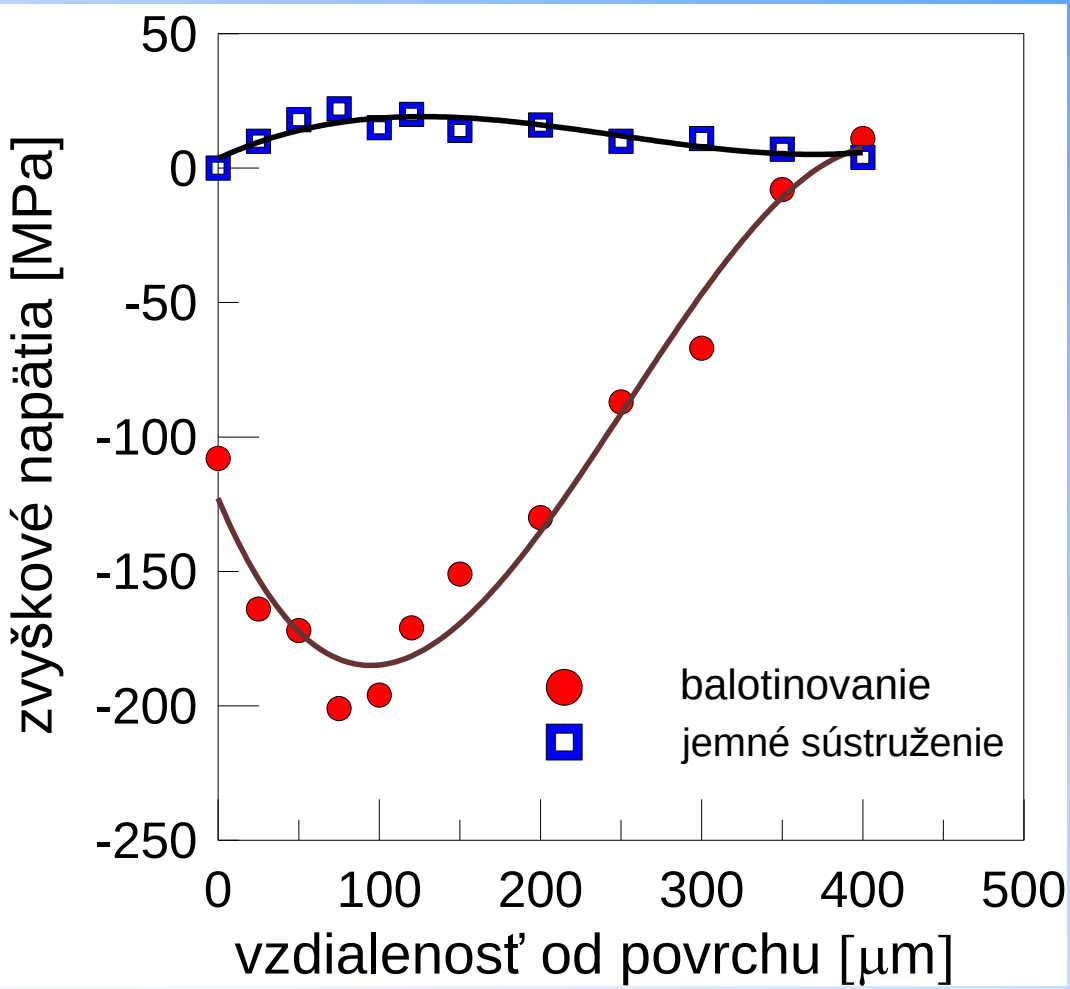


R_a = 0,8 µm



R_a = 3,5 µm

Priebeh napäťových profilov po jemnom sústružení a guľôčkovaní povrchu Al-zliatiny AW-6082-T6



Pozitívny vplyv na únavovú životnosť

jemné sústruženie

↕

guľôčkovanie

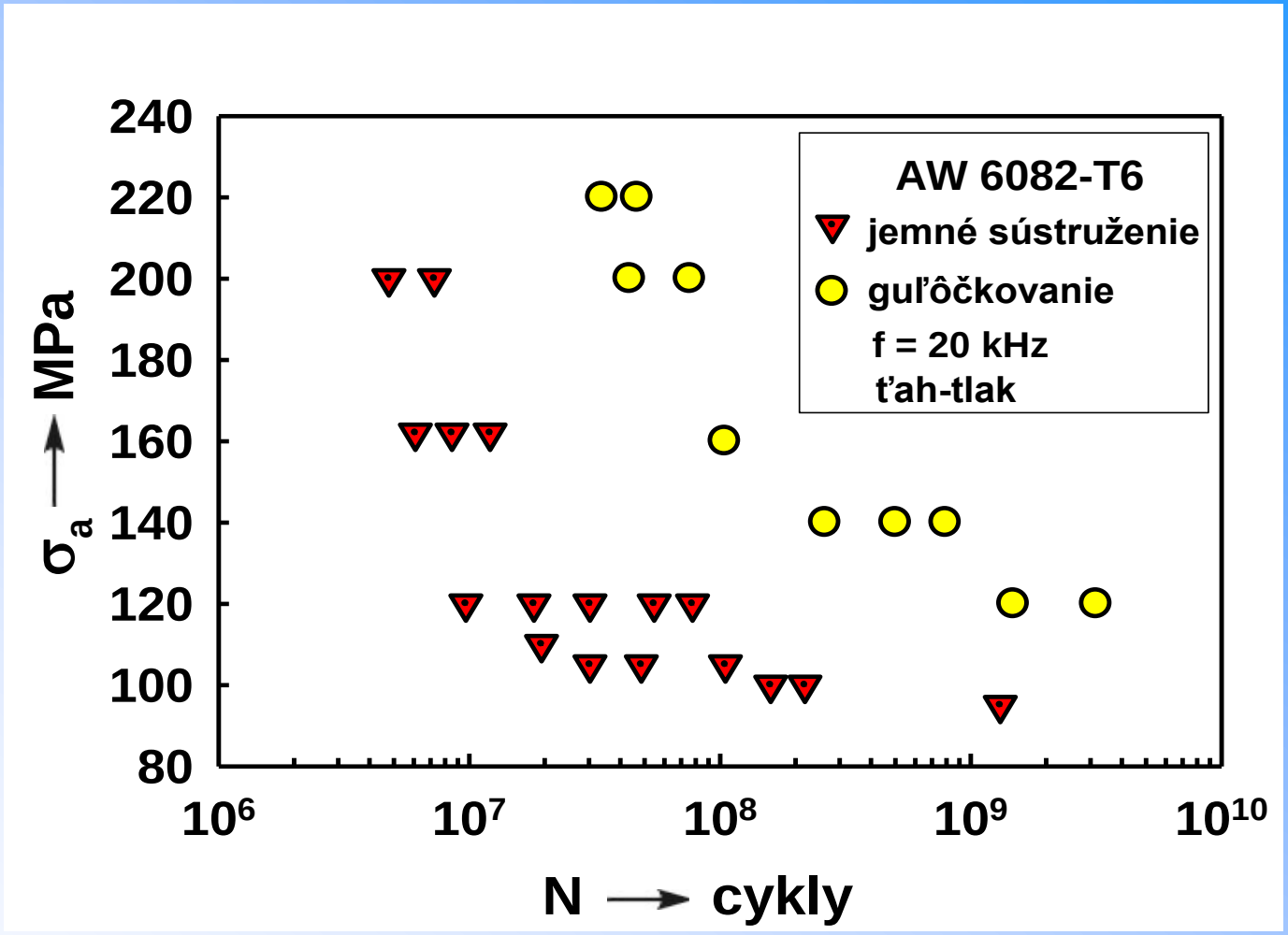
⇓

$\Delta\sigma_a \approx 40$ MPa

$10^6 \leftrightarrow 10^9$ cyklov

⇓

$\Delta\sigma_a \approx 100$ MPa



Únavová životnosť

Negatívny vplyv na únavovú životnosť

Konštrukčná oceľ S235 – nevhodné parametre tryskania

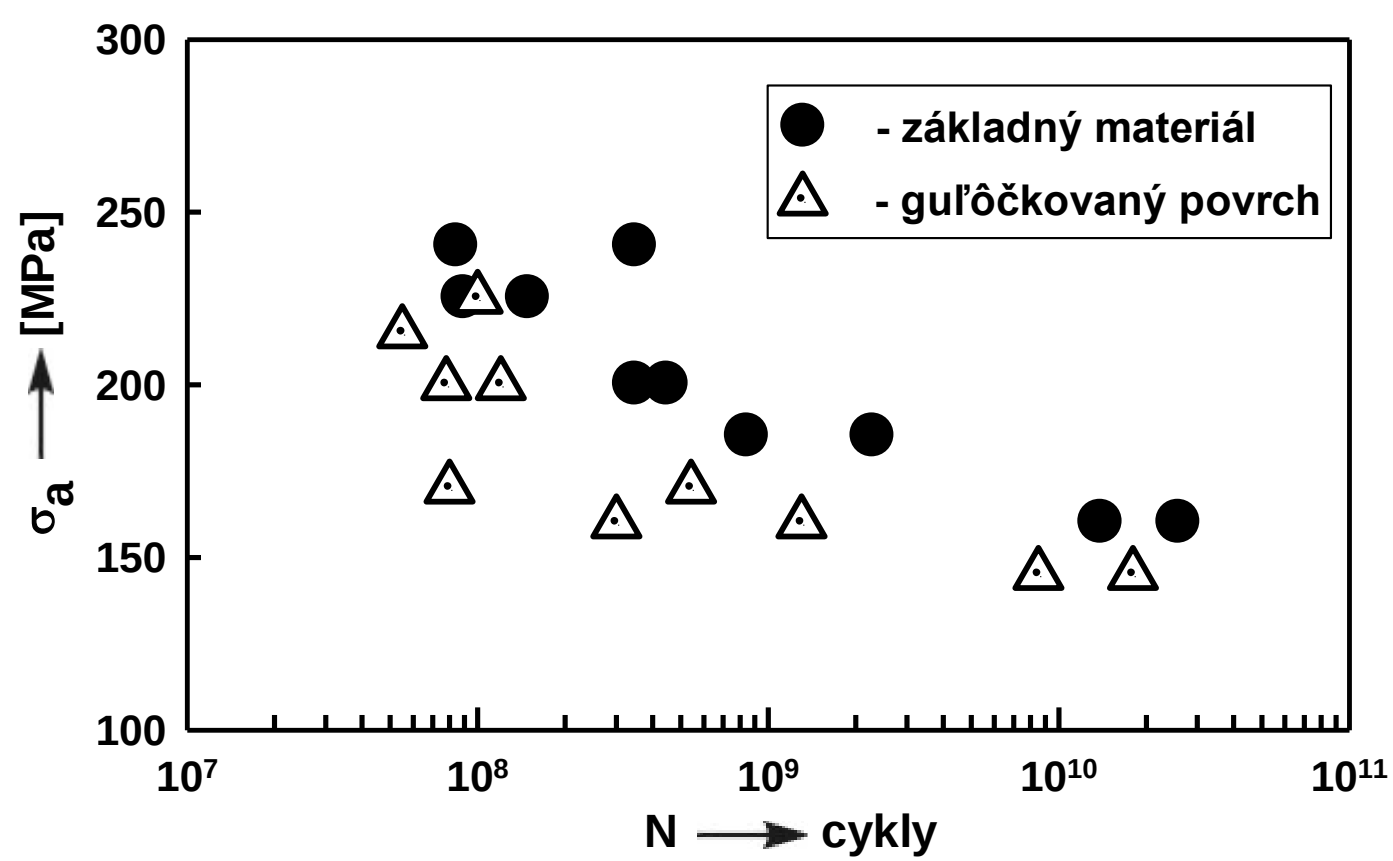
jemné sústruženie

↕

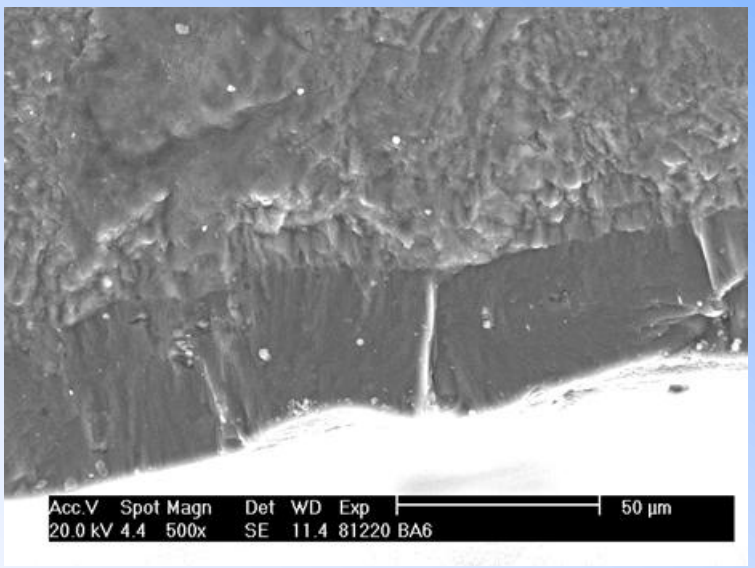
guľôčkovanie

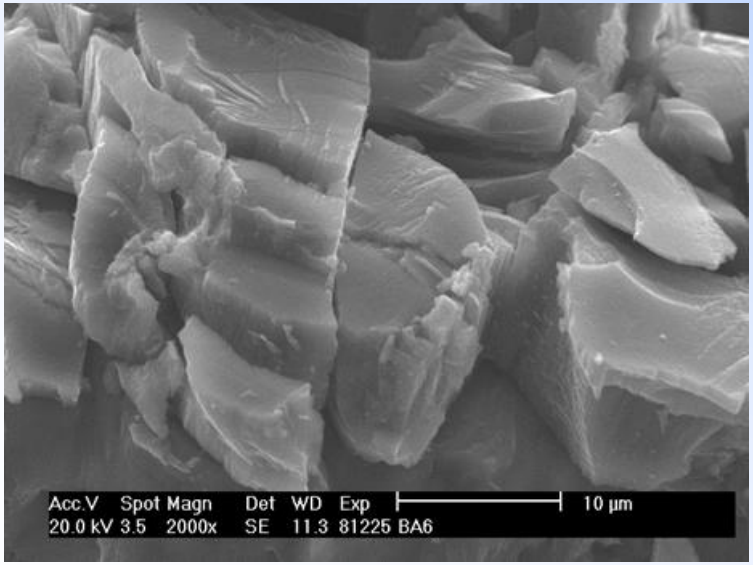
⇓

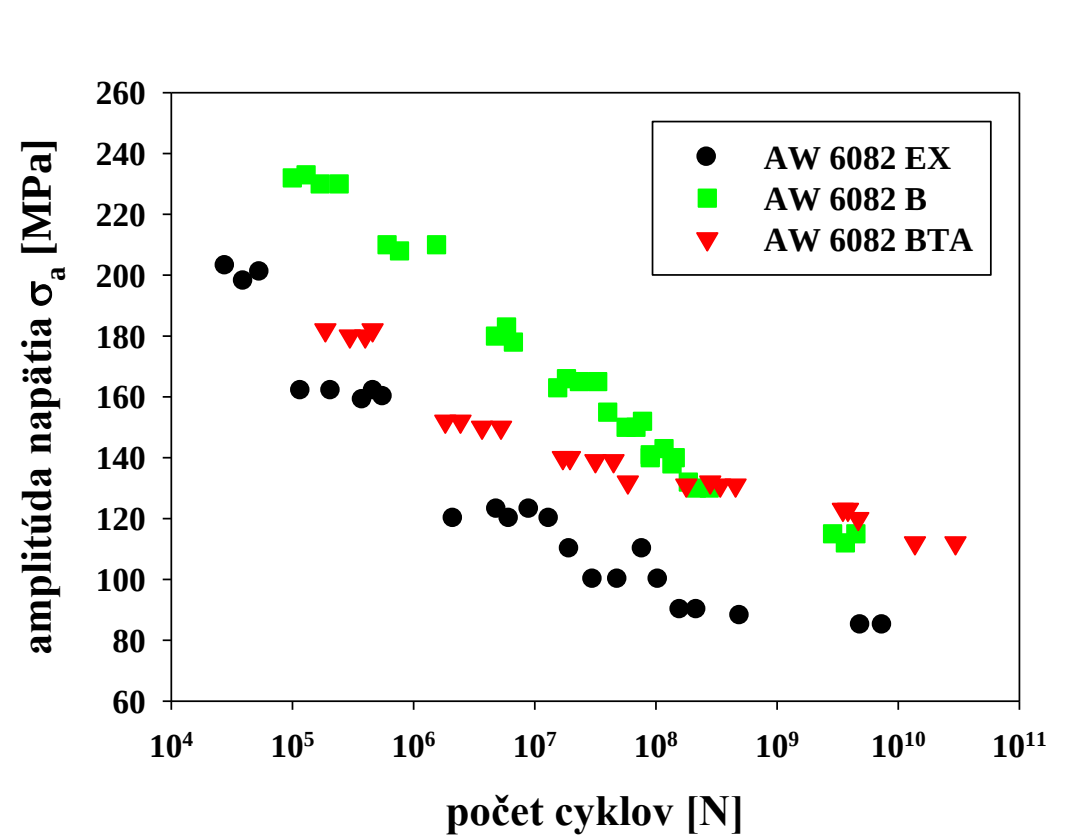
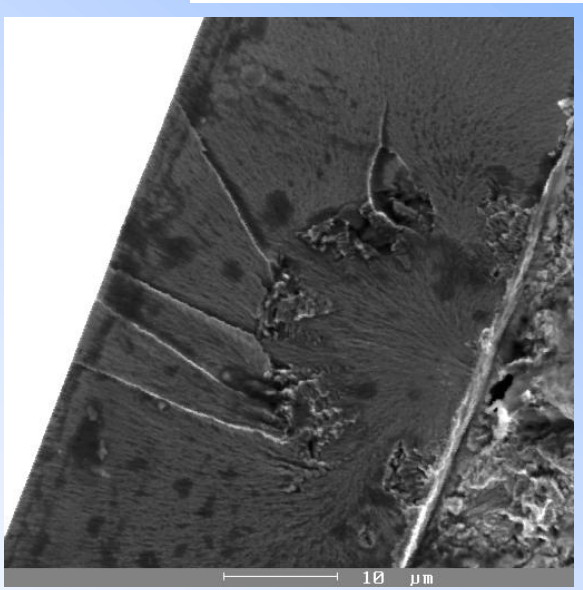
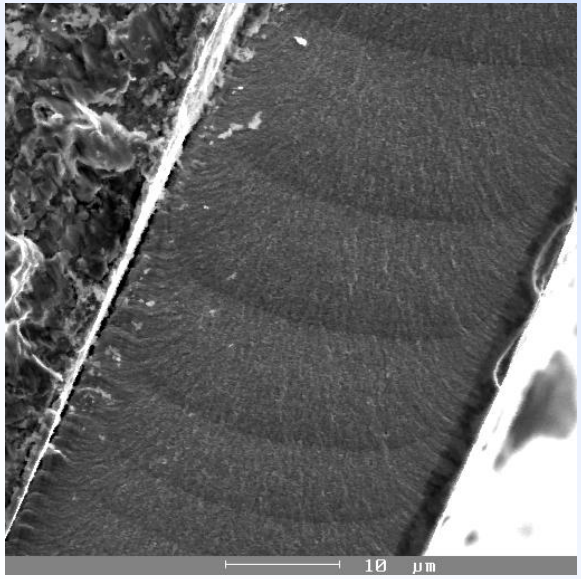
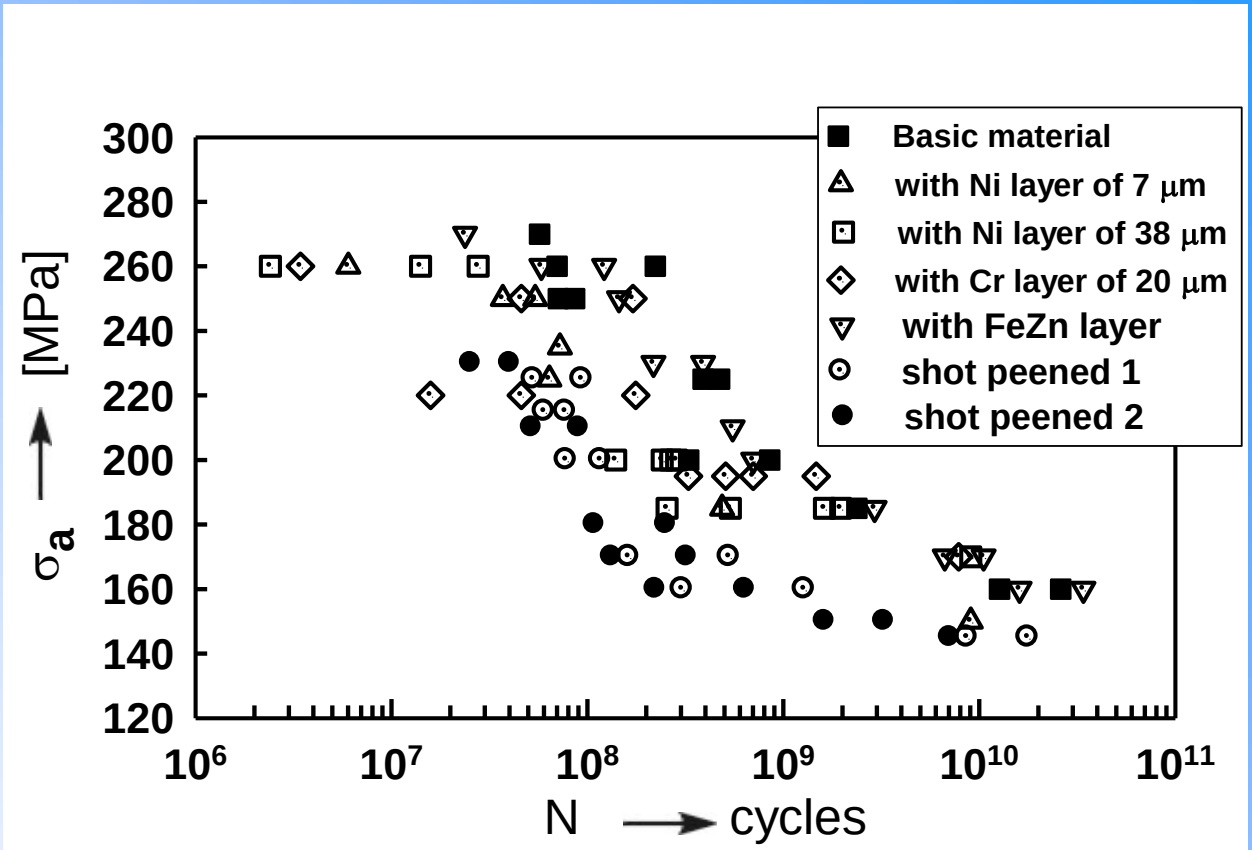
$\Delta\sigma_a \approx 40$ MPa



Vplyv tryskania a následnej anodickej oxidácie povrchu (eloxovania) na únavovú životnosť







Vplyv galvanicky na únavovú odolnosť konštrukčnej ocele zvyčajnej akosti.