



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

POROVNÁNÍ VOLNĚ ŠÍŘITELNÝCH SOFTWAREŮ PRO VÝPOČET ZBYTKOVÉ ÚNAVOVÉ ŽIVOTNOSTI TĚLES

COMPARISON OF FREEWARE SOFTWARE FOR ESTIMATION OF RESIDUAL FATIGUE LIFE OF BODIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN HANÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

ING. PAVEL POKORNÝ

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Hanáček

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:

Porovnání volně šiřitelných softwarů pro výpočet zbytkové únavové životnosti těles

v anglickém jazyce:

Comparison of freeware software for estimation of residual fatigue life of bodies

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Chování trhliny ve strojních součástech má často velmi zásadní vliv na zbytkovou únavovou životnost strojních součástí. V aplikacích, kde je konec životnosti součásti spojen s riziky (velké ekonomické ztráty či dokonce ohrožení lidského zdraví), je nutné znát alespoň přibližnou zbytkovou únavovou životnost dané součásti. Dnešní nedestruktivní defektoskopické metody nemusí spolehlivě odhalit ani relativně velké trhliny. Z tohoto důvodu je nutné v kritických aplikacích předpokládat v tělese existující trhlínu, která nebyla při defektoskopické kontrole objevena a s existencí takovéto trhliny či materiálové vady počítat již při návrhu součásti.

Cíle bakalářské práce:

Student v rámci své bakalářské práce bude mít za úkol vyhledat volně dostupné výpočetní programy pro výpočty uvažující šíření únavové trhliny (se zaměřením na výpočet zbytkové únavové životnosti) a tyto programy na demonstrativních příkladech vzájemně porovnat a vyjádřit se k jejich použitelnosti např. při návrhu železničního dvojkolí. K tomu bude nezbytné, aby student nastudoval základní pojmy elastické lomové mechaniky (LELM) a únavy materiálu. Pro hledání vhodných výpočetních programů bude student využívat zejména dostupných zdrojů z internetu.

Seznam odborné literatury:


- [1] LAUSCHMANN, Hynek. Mezní stavy I: únava materiálu. Vyd. 2., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, 71 s. ISBN 978-80-01-03671-6.
- [2] KUNZ, Jiří. Základy lomové mechaniky, 2. přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 1994, 172 s. ISBN 80-010-1215-8.
- [3] SCHIJVE, Jaap., Fatigue of structures and materials. New York: Springer, 2008, p. cm. ISBN 978-140-2068-072.
- [4] Internetové zdroje

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Pokorný

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 25.10.2013





prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu



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

ABSTRAKT

V první části této bakalářské práce je pojednáváno o lineárně elastické lomové mechanice, zejména o napjatosti v tělese s trhlinou a o součiniteli intenzity napětí. Dále jsou uvedeny růstové zákony únavové trhliny a jsou vysvětleny interakční efekty, zejména pak retardace únavové trhliny. V druhé části této práce jsou programy NASGRO a AFGROW popsány a porovnány, zejména je popsán princip zadávání jednotlivých parametrů do těchto programů. V poslední části této práce jsou vytvořeny příklady, které porovnávají zbytkové únavové životnost získané bez uvažování a s uvažováním retardační efektů.

ABSTRACT

In the first part of this bachelor's thesis the fundamental laws of linear elastic fracture mechanics are described, especially state of stress in bodies with crack and stress intensity factor. Further, the propagation laws of fatigue crack are described and interaction effects of fatigue crack, especially retardation effects are explained. In the second part of this thesis the software NASGRO and AFGROW are described and compared. In the last part of this work the several examples are carried out to compare residual fatigue life obtained by no retardation approach and approach with consideration of retardation effects.

KLÍČOVÁ SLOVA

LELM, trhlina, únava, AFGROW, NASGRO, retardace

KEYWORDS

LEFM, crack, fatigue, AFGROW, NASGRO, retardation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HANÁČEK, J. *Porovnání volně šiřitelných softwarů pro výpočet zbytkové únavové životnosti těles*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Pokorný.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl vyjádřit svůj dík vedoucímu mojí práce panu Ing. Pavlu Pokornému za velmi ochotné vysvětlení problematiky, formální i odborné poznámky, pravidelné konzultace a především za jeho čas, který mi věnoval.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce pana Ing. Pavla Pokorného a s použitím literatury a pramenů, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury na konci této práce.

V Brně 25. 5. 2014

.....

Jan Hanáček

OBSAH

1. ÚVOD	10
2. ÚVOD DO LOMOVÉ MECHANIKY	11
2.1. NAPJATOST V TĚLESE S VRUBEM.....	11
2.2. NAPJATOST V TĚLESE S TRHLINOU.....	12
2.3. SOUČINITEL INTENZITY NAPĚTÍ.....	13
2.3.1. Odvození součinitele intenzity napětí pro těleso nekonečných rozměrů	13
2.3.2. Odvození součinitele intenzity napětí pro těleso konečných rozměrů	14
2.4. CHOVÁNÍ TRHLINY PŘI VYSOKOCYKICKÉ ÚNAVĚ	15
2.4.1. Etapa iniciace trhliny.....	15
2.4.2. Etapa růstu trhliny	15
2.4.3. Willenborgův zobecněný model.....	20
2.4.4. Wheelerův model	21
3. PROGRAMY PRO VÝPOČET ZBYTKOVÉ ŽIVOTNOSTI.....	22
3.1. NASGRO	22
3.1.1. Rovnice používané v NASGRO.....	22
3.1.2. Zadávání hodnot v NASGRO.....	22
3.2. AFGROW	25
3.2.1. Rovnice používané v AFGROW	26
3.2.2. Zadávání hodnot v AFGROW.....	28
4. POROVNÁVACÍ PŘÍKLAD – RŮSTOVÝ ZÁKON.....	31
4.1. ANALYTICKÉ ŘEŠENÍ PŘÍKLADU	31
4.2. ŘEŠENÍ PŘÍKLADU V AFGROW.....	32
5. POROVNÁVACÍ PŘÍKLAD – INTERAKČNÍ EFEKTY	34
6. ZÁVĚR	42

1. ÚVOD

Základním požadavkem každého výrobku je, aby vydržel vykonávat svoji funkci dlouhou dobu. U konstrukcí (výrobků, těles), které jsou cyklicky namáhány, hrozí, že dojde k únavovému selhání konstrukce vlivem únavy materiálu. Únava materiálu se projevuje šířením únavové trhliny, která v okamžiku dosažení své kritické velikosti způsobí únavový lom na dané konstrukci. Lomová mechanika dokáže popsat napěťový stav v tělese s trhlinou. Pomáhá tedy například určovat zbytkovou únavovou životnost u těles, která se nedají vyměnit (např. součástky ve vesmíru) nebo je jejich výměna je spojena s velkými náklady (součásti velkorypadla), či dokonce náhlé selhání konstrukce je spojeno s ohrožením lidského zdraví. K výpočtům zbytkové únavové životnosti takových těles existuje řada počítačových programů. Tvůrci programů pro výpočet zbytkové životnosti tělesa s trhlinou jsou inženýři pracující v například leteckém průmyslu a podobných odvětvích. Jejich přístup k predikci chování tělesa s trhlinou je velmi odborný a zahrnuje spoustu faktorů, korekčních koeficientů a dat, které nelze analyticky vyjádřit. Programy jsou úzce zaměřené na konkrétní problematiku, avšak vynulováním některých koeficientů mohou sloužit i k určení zbytkové životnosti například u železničního dvojkolí.

2. ÚVOD DO LOMOVÉ MECHANIKY

Lomová mechanika je vědní disciplína, která se snaží svojí činností přispět k odhalení zákonitostí při znehodnocování těles tzv. lomem. Proces lomu provází lidstvo prakticky od počátku, ovšem ke kvantifikaci popisu trhlin a k rozvoji lomové mechaniky začalo docházet až během 2. světové války [1]. Lomová mechanika se dá rozdělit na dvě hlavní části [2]:

- a) **Lineárně elastická lomová mechanika (LELM)** – ta uvažuje, že velikost plastické zóny na čele trhliny je malá ve srovnání s délkou trhliny a a s délkou zbylého nosného průřezu $W-a$ (obrázek 2.1)
- b) **Elasto-plastická lomová mechanika (EPLM)** – nesplňuje podmínky LELM, plastická zóna za čelem trhliny je tak velká, že jí nelze zanedbat

V této práci jsou uvažovány pouze vztahy LELM.

2.1. NAPJATOST V TĚLESE S VRUBEM

Lomový proces je úzce spjat s lokálním výskytem vysokých napětí a deformací v tělese [1]. Příčinou výskytu tohoto napětí je vrub, který působí jako koncentrátor napětí. Pod pojmem „vrub“ je myšlen jak vrub konstrukční (geometrické změny v tělese), tak vrub technologický (např. stopy po opracování tělesa). Podle [1] charakterizuje velikost koncentrace napětí součinitel koncentrace napětí, který v praxi může mít dvě definice:

- součinitel koncentrace napětí α_g :
$$\alpha_g = \frac{\sigma_{max}}{\sigma} \quad , \quad (2.1)$$

kde σ_{max} je maximální napětí v kořeni vrubu,
 σ je nominální napětí v tělese, které neuvažuje oslabení průřezu vlivem vrubu.

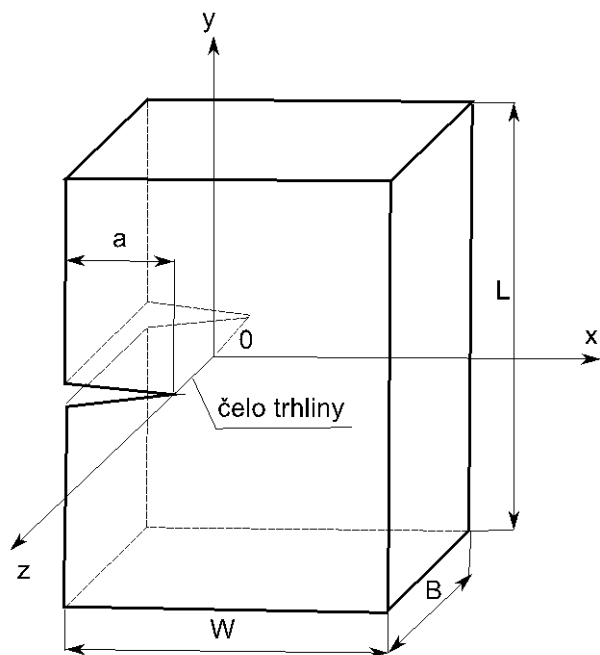
- součinitel koncentrace napětí α_n :

$$\alpha_n = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} \quad , \quad (2.2)$$

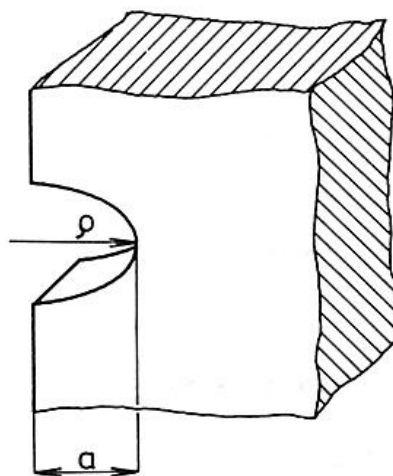
kde σ_{max} je maximální napětí v kořeni vrubu, σ_n je nominální napětí, které uvažuje oslabení průřezu vlivem vrubu.

Dle [1] ovlivňují velikost součinitele napětí tyto faktory:

- a) poloměr zakřivení vrubu ρ a hloubka vrubu a
(viz obrázek 2.2),
- b) tvar a rozměry tělesa,
- c) způsob zatížení.



obr. 2.1 – zavedení souřadného systému [1]

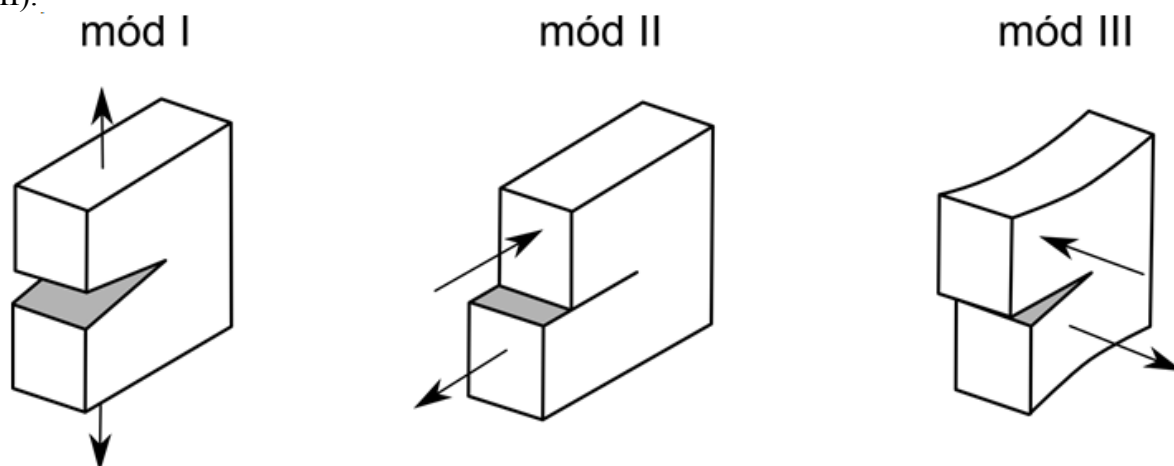


obr. 2.2 – vrub v tělese [1]

2.2. NAPJATOST V TĚLESE S TRHLINOU

Pro popis chování tělesa s trhlinou se zavádí dle [1] pravouhlý souřadnicový systém, který má počátek v čele trhliny, a jehož umístění je zřejmé z obrázku 2.2. Kladný směr osy x je totožný se směrem růstu trhliny. Dále pak W je šířka tělesa, L je délka tělesa, B je tloušťka tělesa a a je délka trhliny.

Podle [1] mohou nastat v tělese tři základní způsoby namáhání tělesa s trhlinou, jejichž silové působení na těleso je zřejmé z obrázku 2.3. Při řešení složitějších (reálných) zatížení se pak využívá zákona superpozice. Výsledkem je součet jednotlivých zátěžných módů (I, II, III).



obr. 2.3 – módy namáhání [1]

- a) **Tahový mód (mód I)** – zatížení na těleso působí kolmo na líce trhliny, tedy ve směru osy y , viz souřadnicový systém na obrázku 2.1. Tento zátěžný mód je z hlediska technické praxe nejvýznamnější.
- b) **Rovinný smykový mód (mód II)** – zatížení na těleso působí ve směru šíření trhliny, tedy ve směru osy x , viz souřadnicový systém na obrázku 2.1.
- c) **Antirovinný smykový mód (mód III)** – zatížení na těleso působí ve směru rovnoběžném s uvažovaným rovným čelem trhliny, tedy ve směru osy z , viz souřadnicový systém na obrázku 2.1.

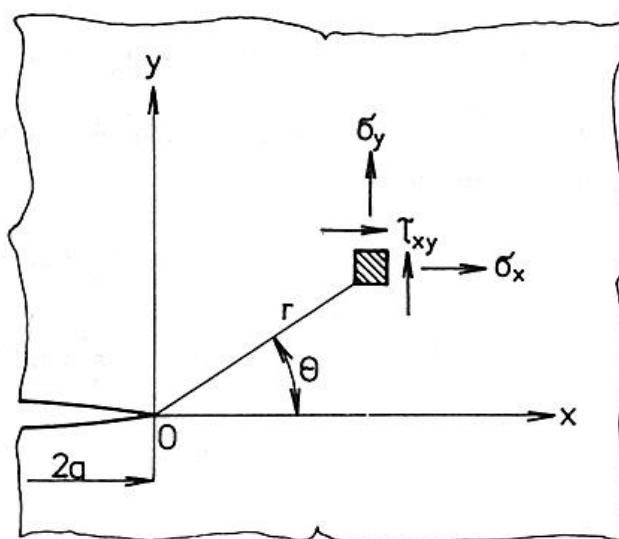
Z literatury [3] lze zjistit, že mód zatěžování je rozhodující z hlediska šíření trhliny. Dále je dle [3] podstatné pro popis chování tělesa s trhlinou určit napjatost a deformaci v tělese. Toto určení může být problematické, protože trhlina je v podstatě vrub s nekonečně malým poloměrem zaoblení. Je zde tedy určitá analogie tělesa s vrubem. Ovšem v důsledku teoreticky nekonečně malého poloměru vzniká již při malém vnějším zatížení v okolí čela trhliny zplastizovaná oblast. Tato zplastizovaná oblast pak má za následek změny napjatosti a deformace oproti pružnému stavu.

2.3. SOUČINITEL INTENZITY NAPĚTÍ

Součinitel intenzity napětí K je nejpoužívanější veličinou pro popis napjatosti v tělese s trhlinou [1]. Součinitel intenzity napětí bere do úvahy velikost vnějšího zatížení a geometrii tělesa s trhlinou. Pokud tedy známe tuto veličinu, pak známe pružnou napjatost a deformaci v okolí trhliny [3].

2.3.1. Odvození součinitele intenzity napětí pro těleso nekonečných rozměrů

Pro popis napětí v okolí kořene trhliny se zavádí podle [3] polární souřadnicový systém, který má počátek v kořeni (označení čela trhliny ve 2D) trhliny, viz obrázek 2.4. Pro jednoduchost při odvození je uvažováno pouze plošné těleso (absence osy z).



obr. 2.4 – zavedení polárního souřadnicového systému [1]

Pro odvození budou důležité složky tenzoru napětí, viz obrázek 2.4. Podle [1] mají tyto složky v polárním souřadnicovém systému následující podobu:

$$\sigma_y(r, \theta) = \frac{\sigma\sqrt{a}}{\sqrt{2r}} \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right], \quad (2.3 \text{ a})$$

$$\sigma_x(r, \theta) = \frac{\sigma\sqrt{a}}{\sqrt{2r}} \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right], \quad (2.3 \text{ b})$$

$$\tau_{xy}(r, \theta) = \frac{\sigma\sqrt{a}}{\sqrt{2r}} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right), \quad (2.3 \text{ c})$$

kde σ je nominální napětí, a je délka trhliny, r a θ jsou souřadnice v polárním souřadnicovém systému, viz obrázek 2.4. Otvírání trhliny je řízeno hlavní složkou tenzoru napětí příslušnému módu zatěžování. Tedy například pro mód I je to složka σ_y pro $\theta=0$ (v tomto případě $\sigma_y = \sigma_x$).

Definiční vztah součinitele intenzity napětí v módu I má podle [1] následující podobu:

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_y(r, \theta) \quad (2.4)$$

Pokud do rovnice 2.4 dosadíme rovnici 2.3a ve které položíme $\theta=0$, pak dostane rovnice 2.4 následující podobu:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.5)$$

Rovnice 2.5 je základní rovnice pro výpočet součinitele intenzity napětí pro těleso nekonečných rozměrů s centrální trhlinou, které je zatíženo módem I. Analogicky by probíhalo odvození pro namáhání v módu II a III, přičemž hlavní složkou v módu II je napětí τ_{xy} a v módu III τ_{yz} .

2.3.2. Odvození součinitele intenzity napětí pro těleso konečných rozměrů

Skutečnost, že má těleso konečné rozměry, se projeví na velikosti napětí v okolí čela trhliny [1]. V případě taženého tělesa s centrální trhlinou je napětí ovlivněno volnými konci tělesa a to zejména jeho šířkou W a délkou L , viz obrázek 2.1. Zatěžované těleso má však zpravidla obecný geometrický tvar s obecnou orientací trhliny. Tento fakt se projeví v rovnici přídatným parametrem:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \cdot f_I(a, W, L, \dots), \quad (2.6)$$

kde člen $f_I(a, W, L, \dots)$ se nazývá tvarová funkce. Právě tento člen zahrnuje vliv geometrie tělesa s trhlinou. Analogie mezi rovnicemi 2.5 a 2.6 je zřejmá. Rovnice 2.5 je pouze speciálním případem rovnice 2.6 [1], kde tvarová funkce $f_I=1$. Dále [1] uvádí, že tzv. K-kalibrace, tedy zjišťování tvarové funkce, může být prováděno následujícími čtyřmi způsoby:

- a) metody analytické
- b) metody semianalytické
- c) metody numerické
- d) metody experimentální.

Problematika K-kalibrace však není předmětem této práce, avšak podrobnosti lze nalézt např. v [1].

2.4. CHOVÁNÍ TRHLINY PŘI VYSOKOCYKLIČKÉ ÚNAVĚ

Vysokocyklická únava je proces, při kterém dochází k porušování tělesa, i když je těleso v celém svém objemu výpočtově pod mezí kluzu [4]. Tento proces je dle [4] dělen na tři základní etapy:

1. **Etapa iniciace trhliny**
2. **Etapa růstu trhliny**
3. **Etapa dolomení**

2.4.1. Etapa iniciace trhliny

Pokud by těleso bylo dokonale elasticky deformováno, bylo by poškození vyloučeno. Jelikož ale k poškození dochází, znamená to, že v materiálu probíhají nevratné degradační procesy. To je zapříčiněno [4]:

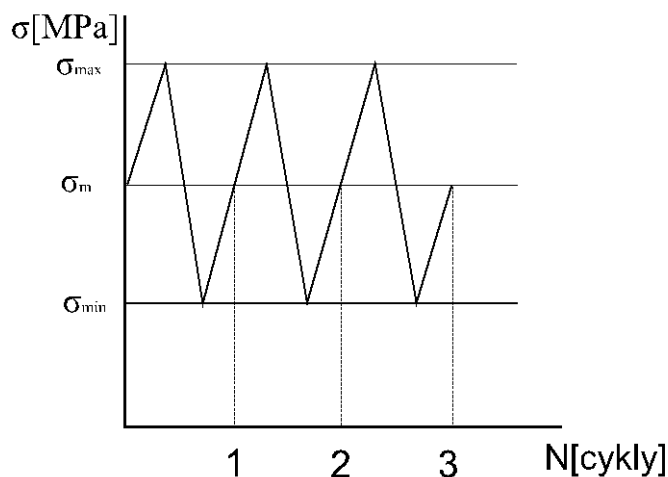
- a) **Anelasticitou** – bylo pozorováno, že na monokrystalech kovů vzniká hystereze napětí-deformace i při velmi malých cyklických napětích. Tato pozorovaná skutečnost je zdůvodňována dislokačními jevy.
- b) **Statistické rozložení vlastností mikroobjemů** – reálný materiál nemá homogenní strukturu, je tvořen anizotropními krystalovými zrny, příměsemi atd. Tuhost materiálu ve směru působení síly je tedy náhodná. To má za následek, že silový tok není v materiálu přenášen rovnoměrně. V důsledku toho může dojít k tomu, že v určitých mikroobjemech mohou probíhat plastické procesy, i když těleso jako celek je ve stavu elastickém.

Oba tyto mechanismy vedou k iniciaci

2.4.2. Etapa růstu trhliny

K definování základních pojmů a pro ukázky růstových zákonů (rovnice popisující etapu růstu makrotrhliny) je pro názornost uvažován zátěžný cyklus s konstantní amplitudou napětí, tedy cyklus, který periodicky nabývá stejných následně definovaných charakteristik, viz obrázek 2.5. Základní charakteristiky dle [4] jsou:

maximální napětí	σ_{max} (též σ_h – horní)
minimální napětí	σ_{min} (též σ_d – dolní)
rozkmit napětí	$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$
amplituda napětí	$\sigma_a = \Delta\sigma/2$
střední hodnota	$\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$
asymetrie cyklu	$R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$



obr. 2.5 – zátěžný cyklus [4]

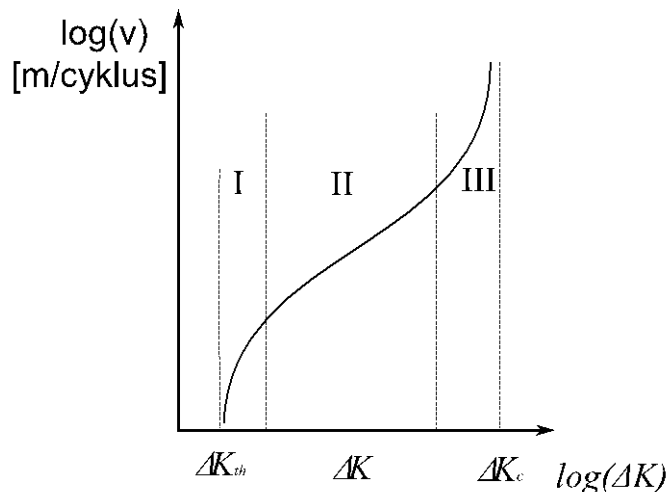
Podobně můžeme zátěžný cyklus vyjádřit silou, deformací nebo pro růstové rovnice významným součinitelem intenzity napětí.

K definování růstových zákonů je nutné znát obvyklý trend závislosti rychlosti růstu únavové trhliny v na rozkmitu součinitele intenzity napětí ΔK , viz obrázek 2.6. Tato závislost se značí jako tzv. v - K křivka, která se obvykle dělí na tři části [4]:

I – dolní ohyb

II – střední část

III – horní ohyb



obr. 2.6 – závislost $v(\Delta K)$ [4]

Část II křivky v - K je v logaritmických souřadnicích přibližně lineární. Hodnota ΔK_{th} v části I je prahová hodnota rozkmitu součinitele intenzity napětí. Je-li skutečná hodnota rozkmitu součinitele intenzity napětí nižší než prahová hodnota, tak trhlina neroste. Hodnota ΔK_c v části III je kritická hodnota rozkmitu součinitele intenzity napětí, je-li tato hodnota překročena, dojde k lomu.

Příklady růstových zákonů, které popisují v - K křivku či její části jsou:

a) **zákon Parise a Erdogana [4]:**

$$v = \frac{da}{dN} = A(\Delta K)^\alpha, \quad (2.7)$$

kde $A, \alpha = konst.$, $\alpha = (2,4)$. Zákon Parise a Erdogana popisuje pouze část II.

b) **zákon Klesnila a Lukáše [4]:**

$$v = \frac{da}{dN} = A(K_a^\beta - K_{ath}^\beta)^\alpha, \quad (2.8)$$

$$K_{ath} = K_{athz} \left(\frac{K_a}{K_{athz}} \right)^\alpha, \quad (2.9)$$

kde $A, \beta, K_{athz}, \alpha$ jsou konstanty, $\alpha \approx 0,7$. Uvedené rovnice platí pouze pro $\sigma_m = 0$, tedy $R = -1$. Zákon Klesnila a Lukáše platí pro část I a II, čehož je dosaženo zavedením hodnoty ΔK_{ath} (interpretace dle obrázku 2.6).

c) **Walkerova rovnice [8]:**

$$v = \frac{da}{dN} = C \left[\Delta K (1-R)^{(m-1)} \right]^n, R \geq 0, \quad (2.10 a)$$

$$v = \frac{da}{dN} = C \left[K_{\max} (1-R)^{(1-m)} \right]^n, R < 0, \quad (2.10 b)$$

kde C, m a n jsou empirické konstanty, $m = (0,1)$. Walkerova rovnice je v podstatě jen rovnice Parise a Erdogana, která bere do úvahy součinitel asymetrie R , popisuje tedy pouze část II.

d) **rovnice NASGRO [5]:**

$$v = \frac{da}{dN} = C \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right]^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{K_{\max}}{K_c} \right)^q}, \quad (2.11)$$

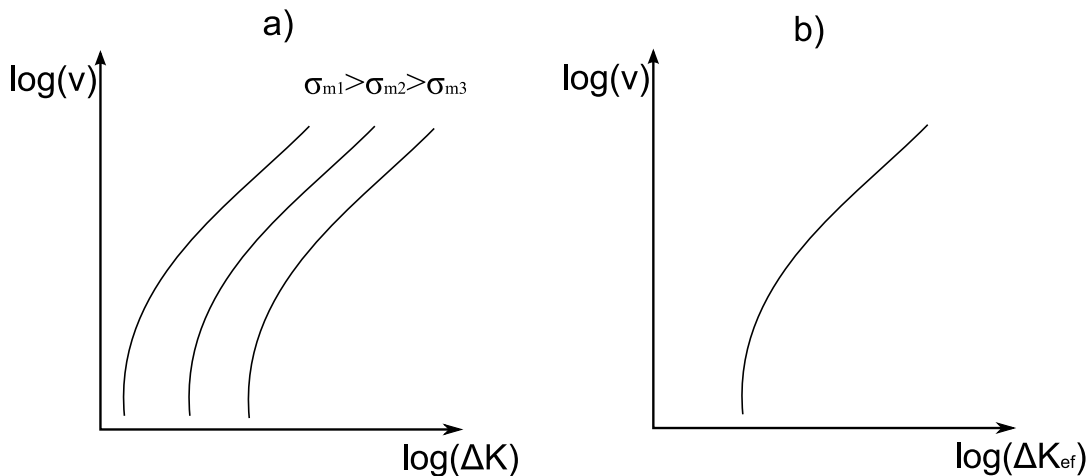
kde C, p, q, n jsou empiricky odvozené konstanty a f je funkce beroucí do úvahy otevírací napětí [5]. Podrobněji jsou parametry této rovnice popsány v [5]. Rovnice NASGO je schopna popsat obě kolena v - ΔK křivky.

e) **Formanova rovnice [4]:**

$$v = \frac{da}{dN} = \frac{AK_a^\alpha}{(1-R)K_{fc} - \Delta K}. \quad (2.12)$$

Hodnota K_{fc} představuje mezní hodnotu maxima cyklu a pokud K_{\max} je téměř rovno K_{fc} , dojde ve jmenovateli rovnice 2.12 k dělení číslem blízkého nule, a tím pádem dojde k prudkému nárůstu rychlosti růstu únavové trhliny (proces lomu). Formanova rovnice tedy popisuje části II. a III.

Pokud budeme uvažovat zátěžný cyklus, který má střední napětí různé od nuly, tak se křivka na obrázku 2.6 bude posouvat ve směru vodorovné osy [4].



obr. 2.7 – vliv asymetrie cyklu na rychlost růstu trhliny [4]

Jak je vidět z obrázku 2.7a, tak pro danou hodnotu ΔK , vyšší hodnota středního napětí σ_m znamená vyšší rychlost růstu únavové trhliny. Dle [4] lze vhodnou transformací řídicí veličiny s uvažováním asymetrie cyklu dosáhnout jediné závislosti, viz obrázek 2.7b. Touto novou řídicí veličinou je efektivní hodnota rozkmitu součinitele intenzity napětí ΔK_{ef} . Fyzikální příčinou zahrnutí asymetrie cyklu do rychlosti růstu únavové trhliny souvisí s otevíracím napětím (nominální napětí, které způsobí otevření trhliny). Ve skutečnosti totiž není rozkmit součinitele intenzity napětí omezen maximální a minimální hodnotou, ale maximální a otevírací hodnotou napětí [4]. Potom tedy lze psát [4]:

$$\Delta K_{ef} = K_{max} - K_{ot}. \quad (2.13)$$

Praktické vyjádření hodnoty ΔK_{ef} je výhradně empirické a je funkcí ΔK a asymetrie cyklu R . V praxi se nejvíce ujalo Elberovo vyjádření [4]:

$$\Delta K_{ef} = \Delta K \cdot U(R). \quad (2.14)$$

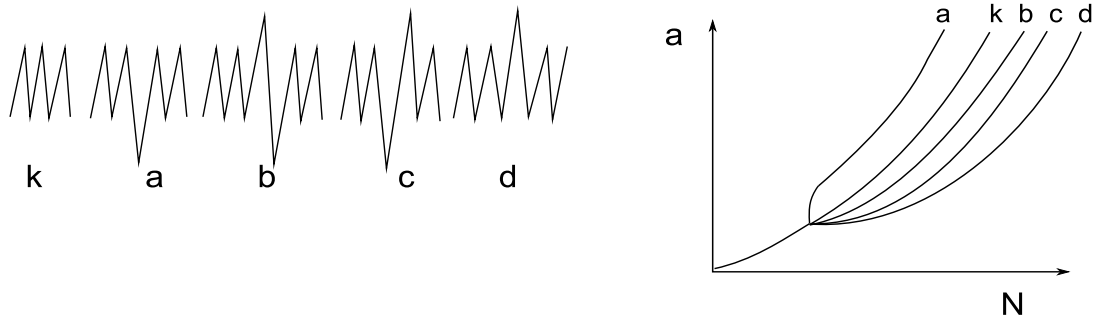
Pro funkci $U(R)$ existuje řada předpisů. Jedním z nich je Schijveho formule (platí pro dural) [4]:

$$U(R) = 0,55 + 0,35R + 0,1R^2. \quad (2.15)$$

Toto vyjádření platí jen v určitém rozsahu záporných hodnot asymetrií cykly R .

Interakční efekty

Literatura říká [4], že bude-li těleso zatěžováno proměnlivými cykly, tak rychlost šíření trhliny nebude odpovídat rychlosti šíření trhliny při zatěžování konstantním cyklem a bude ovlivněna historií zatěžování. Toto ovlivnění je nazýváno interakčním efektem. Demonstrace interakčních efektů je nejzřetelnější na tzv. interakci vloženého cyklu. Na obrázku 2.7 lze vidět jednotlivé druhy přetěžujících vložených cyklů a jim odpovídající rychlost šíření trhliny [4].



obr. 2.8 – typy vložených cyklů a jejich vliv na rychlost šíření trhliny [4]

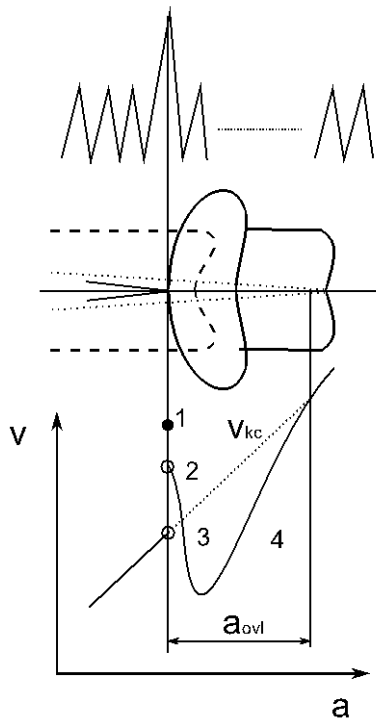
Nejefektivněji se projevuje jednorázové tahové přetížení, viz obrázek 2.8d. V tomto případě dochází k jevu zvanému retardace – významné zpomalení růstu trhliny. V důsledku jednoho přetěžujícího tahového cyklu je plastická zóna za čelem trhliny a jí příslušné otevírací napětí $\sigma_{ot,p}$ větší než v základním režimu. Zdroj [4] dělí rychlosti šíření trhliny po jednorázovém tahovém přetížení na čtyři fáze, viz obrázek 2.9:

- 1) Přetěžující cyklus způsobí větší přírůstek než by tomu bylo u zatěžování základním konstantním cyklem.
- 2) Po přetížení někdy následuje krátká oblast zrychleného (ale již zpomalujícího) růstu trhliny.
- 3) Náběh retardace – rychlost šíření trhliny klesá.
- 4) Odezdnívání retardace – rychlost šíření trhliny relativně pomalu roste a vrací se do původního trendu rychlosti růstu.

Podrobnější výklad jednotlivých fází tahového přetěžujícího cyklu lze nalézt v [4].

Modely popisující interakční efekty se dělí dle [4] na:

- 1) modely založené na interakci plastických zón,
- 2) modely založené na otevíracím napětí,
- 3) fenomenologický popis interakčních efektů,
- 4) elastickoplastický výpočet šíření trhliny metodou konečných prvků.



obr. 2.9 – efekt jednorázového tahového přetížení [4]

Pro zahrnutí interakčních efektů je možné použít řadu různých retardačních modelů, příkladem těchto modelů je Willenborgův a Wheelerův model [4].

2.4.3. Willenborgův zobecněný model

Zobecněný Willenborgův model je jeden z nejběžněji používaných retardačních modelů [8]. Jeho výstupem je rozkmit součinitele intenzity napětí ΔK , se kterým se nadále počítá v růstovém zákonu. K rozkmitu faktoru intenzity napětí je zapotřebí znát maximální a minimální efektivní hodnotu součinitele intenzity napětí. To je dáno vztahy [8]:

$$K_{\max,eff} = K_{\max} - K_{red}, \quad (2.16 a)$$

$$K_{\min,eff} = K_{\min} - K_{red}. \quad (2.16 b)$$

K vypočtení těchto hodnot je potřeba definovat redukovaný součinitel intenzity napětí K_{red} [8]:

$$K_{red} = PHI \left[K_{\max ol} \cdot \sqrt{1 - \frac{a - a_{ol}}{R_{yol}}} - K_{\max} \right], \quad (2.17)$$

kde PHI je parametr, který využívá zobecněný model, $K_{\max ol}$ je maximální velikost součinitele intenzity napětí v přetěžujícím cyklu, a je délka trhliny, a_{ol} je délka trhliny v přetěžujícím cyklu, R_{yol} je velikost poloměru plastické zóny vytvořené přetěžujícím cyklem.

Parametr PHI má následující podobu [8]:

$$PHI = \frac{1 - \Delta K_{tr} / K_{\max}}{SOR - 1}, \quad (2.18)$$

kde ΔK_{tr} je prahová hodnota rozkmitu součinitele intenzity napětí pro $R=0$, SOR je parametr, který je pro ocel 2, hliník 3, viz [8].

Posledním neobjasněným parametrem ve výpočtovém modelu je výpočet velikosti poloměru plastické zóny v přetěžujícím cyklu. To je realizováno takto [8]:

$$R_{yol} = \frac{(K_{maxol} / R_e)^2}{PSX \cdot \pi}, \quad (2.19)$$

kde R_e je mez kluzu a $PSX=2$ pro rovinnou napjatost, $PSX=6$ pro rovinnou deformaci.

2.4.4. Wheelerův model

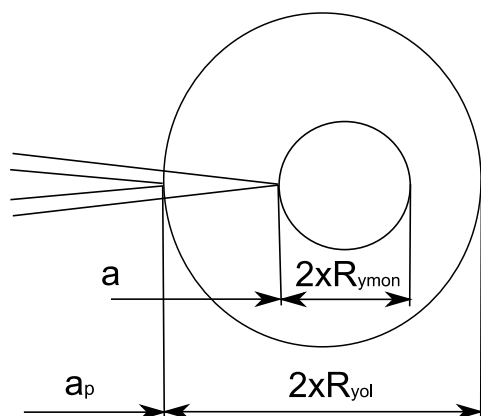
Přírůstek trhliny v aktuálním cyklu je určen následujícím vztahem [4]:

$$\Delta a = v_{mov} C_p \quad (2.20)$$

Nejdůležitější je tedy určit hodnotu C_p . To je realizováno pomocí následujícího vztahu [4]:

$$C_p = \min \left[1; \left(\frac{R_{ymon}}{a_p + R_{yol} - a} \right)^M \right], \quad (2.21)$$

kde R_{ymon} je velikost plastické zóny při monotónním zatěžování, a_p je délka trhliny při přetížení, a je délka trhliny při monotónním zatěžování a M je Wheelerův parametr. Význam uvedených veličin je zřejmý z obrázku 2.10.



obr. 2.10 – schéma Wheelerova modelu

3. PROGRAMY PRO VÝPOČET ZBYTKOVÉ ŽIVOTNOSTI

3.1. NASGRO

Prvním vyhledaným volně šiřitelným softwarem pro výpočet zbytkové únavové životnosti tělesa je program NASGRO. Program NASGRO byl vyvinut společností NASA v devadesátých letech, v současnosti lze zakoupit verzi NASGRO 7.0. Testovaný software je volně šiřitelná demoverze NASGRODEMO 4.0, která má značná omezení ve výběrech materiálů a možnostech tvarových výběrů součástí. Program byl primárně vytvořen pro výpočet zbytkové životnosti v leteckém průmyslu, avšak tvůrci uvádějí, že je po světě využíván i pro analýzu neleteckých součástí [5].

Program je schopen počítat jak v lineárně-elastickém, tak v elasticko-plastickém módu. Prováděné simulace probíhaly všechny v módu lineárně-elastickém. Dále je schopen tří základních typů výpočtu:

- 1) Výpočet růstu trhliny zadáním počáteční délky trhliny a zatížení.
- 2) Výpočet počáteční délky trhliny při zadané životnosti a zatížení.
- 3) Výpočet zatížení pro zadanou životnost a počáteční délku trhliny.

3.1.1. Rovnice používané v NASGRO

Program NASGRO využívá při svých výpočtech tzv. NASGRO rovnici (2.11), která byla vyvinuta v NASA Royce G. Formanem a Sami R. Mettuem, proto je někdy nazývána Forman-Mattuova rovnice. Poznamenejme, že v celém programu NASGRO se vyskytuje celá řada korekčních empiricky odvozených konstant. Pokud se jim chceme vyhnout, tak v rovnici 2.11 vynulujeme členy p a q a rovnice se pak téměř zredukuje na rovnici Parise a Erdogana (2.7) [5].

Pro výpočet součinitele intenzity napětí využívá NASGRO rovnici (3.1), která zahrnuje kombinované namáhání:

$$K = [S_0 F_0 + S_1 F_1 + S_2 F_2 + S_3 F_3 + S_4 F_4] \sqrt{\pi a} , \quad (3.1)$$

kde S_0 je napětí od tahu či tlaku, S_1 je napětí od smyku S_2 a S_3 je napětí od ohybu ve směru tloušťky a šířky součástí. Nejméně častým zatížením je S_4 , které v sobě nese velikost napětí v tahu či tlaku v ose kolmé na případ S_0 . F_i jsou geometrické korekční faktory jednotlivých napětí.

Interakční efekty jsou zahrnuty do výpočtu pomocí hodnoty ΔK_{th} v rovnici 3.1. Tato hodnota je funkcí několika empiricky zjištěných hodnot, z nichž je nejdůležitější konstanta C_{th} . Velikost parametru C_{th} má vliv na interakční efekty. Pokud je hodnota C_{th} nastavena na nulu, tak uvažujeme model bez retardace a předpověď růstu trhliny je konzervativní, naopak nenulová hodnota konstanty C_{th} směřuje k nekonzervativní predikci. Proto NASGRO nabízí tři možnosti postupu při výpočtu [5]:

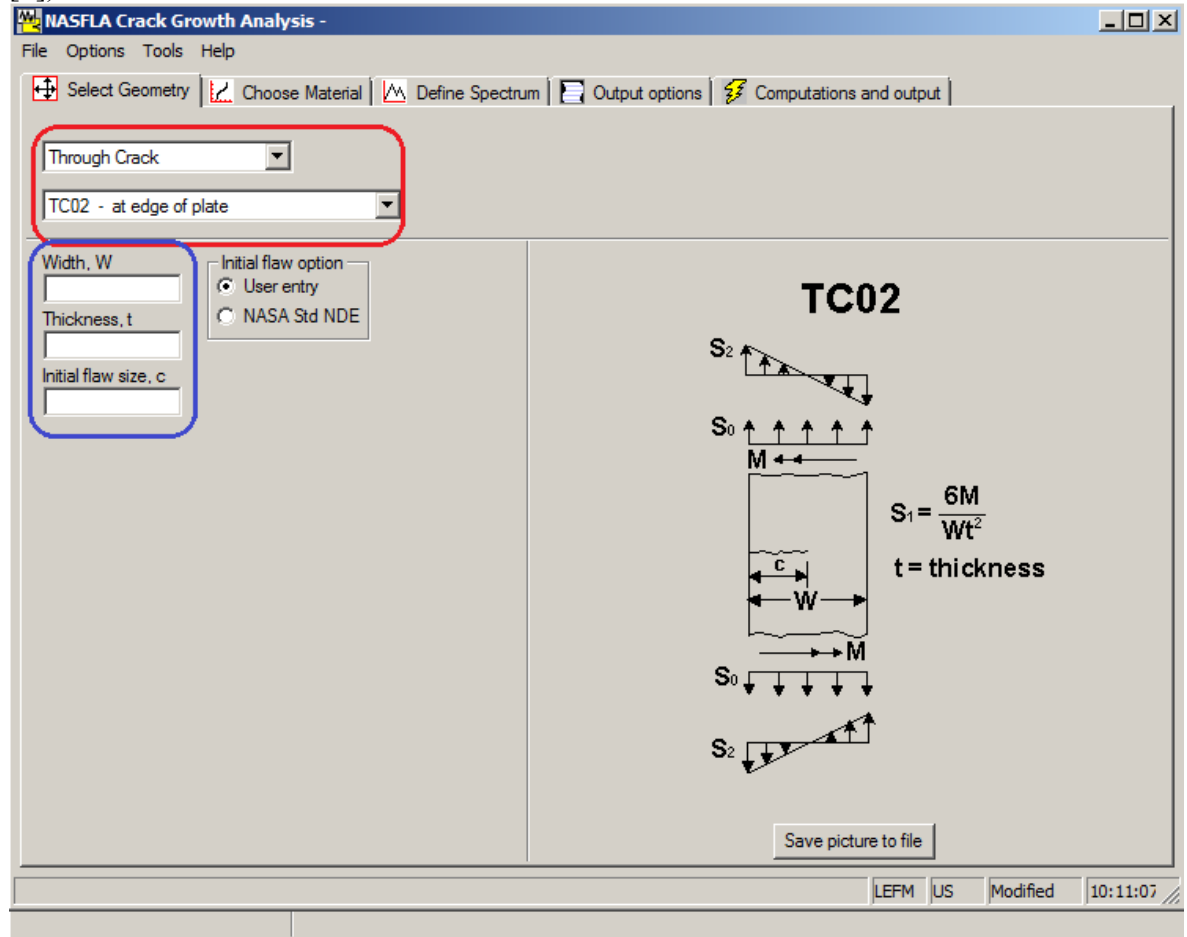
- 1) Začít s hodnotou C_{th} nastavenou na 0, ale umožnit její nastavení na hodnotu ze souboru za určitých podmínek změny namáhání součástí.
- 2) Nastavit hodnotu C_{th} permanentně na nulu.
- 3) Použít nenulové hodnoty C_{th} po celou dobu výpočtu (nejméně konzervativní).

3.1.2. Zadávání hodnot v NASGRO

K zadání všech parametrů do programu potřebných pro predikci chování trhliny je potřeba podstoupit následujících pět kroků:

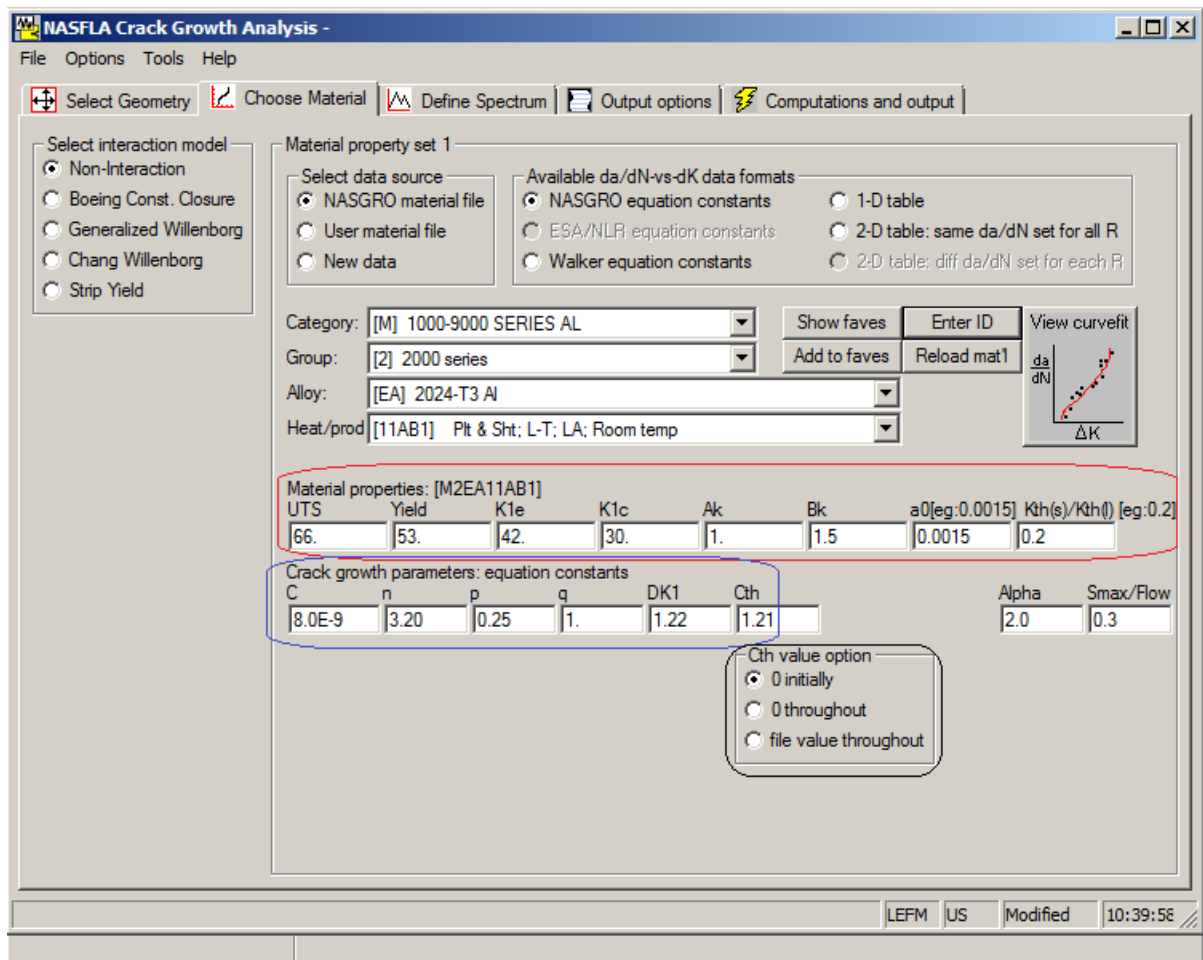
- 1) **Výběr geometrie součásti** - v prvním kroku je třeba vybrat vhodnou geometrii součásti a trhliny a její způsob zatížení (na obrázku 3.1 ohraničeno červeně) a dále hodnoty jednotlivých rozměrů (ohraničeno modře), jejichž podstata je zřejmá z obrázku 3.1. NASGRO umožňuje zadat 50 typů geometrií součástí [5], ovšem demoverze má tento výběr omezen na dva typy geometrií.

Pozn.: Parametry ohraničené modře je třeba dosazovat v palcích (1 mm = 0,0394 inch [6]).



obr. 3.1 - výběr geometrie součásti v NASGRO

- 2) **Výběr materiálu** – v demoverzi programu je možné vybrat pouze jeden materiál (jedná se o slitinu hliníku – 90 % Al + dalších kovů – Cr, Cu, Fe [5]), jeho vlastnosti jsou zadány materiálovými parametry, viz červená oblast na obrázku 3.2. Důležitější význam má oblast ohraničená modře, ve které je možno měnit parametry popisované v kapitole 3.1.1. K těmto parametrům patří konstanty rovnice NASGRO (C , n , p , q), dále hodnota C_{th} , pomocí které se počítají interakční efekty. Dalším důležitým parametrem je hodnota „ α “, která rozhoduje o rovinné deformaci nebo rovinné napjatosti. V oblasti ohraničené černě je výběr ze tří možností zahrnutí interakčních efektů popsanych též v 3.1.1.



obr. 3.2 –výběr materiálu v NASGRO

3) **Vložení zatížení** – NASGRO umožňuje zadávat až 20 druhů zátěžných spekter (bloků, na obrázku 3.3 ohraničeno červeně). Každé z těchto zátěžných spekter může být definováno pěti způsoby (ohraničeno zeleně):

a) – *užití předem definovaných bloků* (ohraničeno modře), probíhá tak, že je pouze zaškrtnuto zatížení a počet cyklů, které je předdefinované.

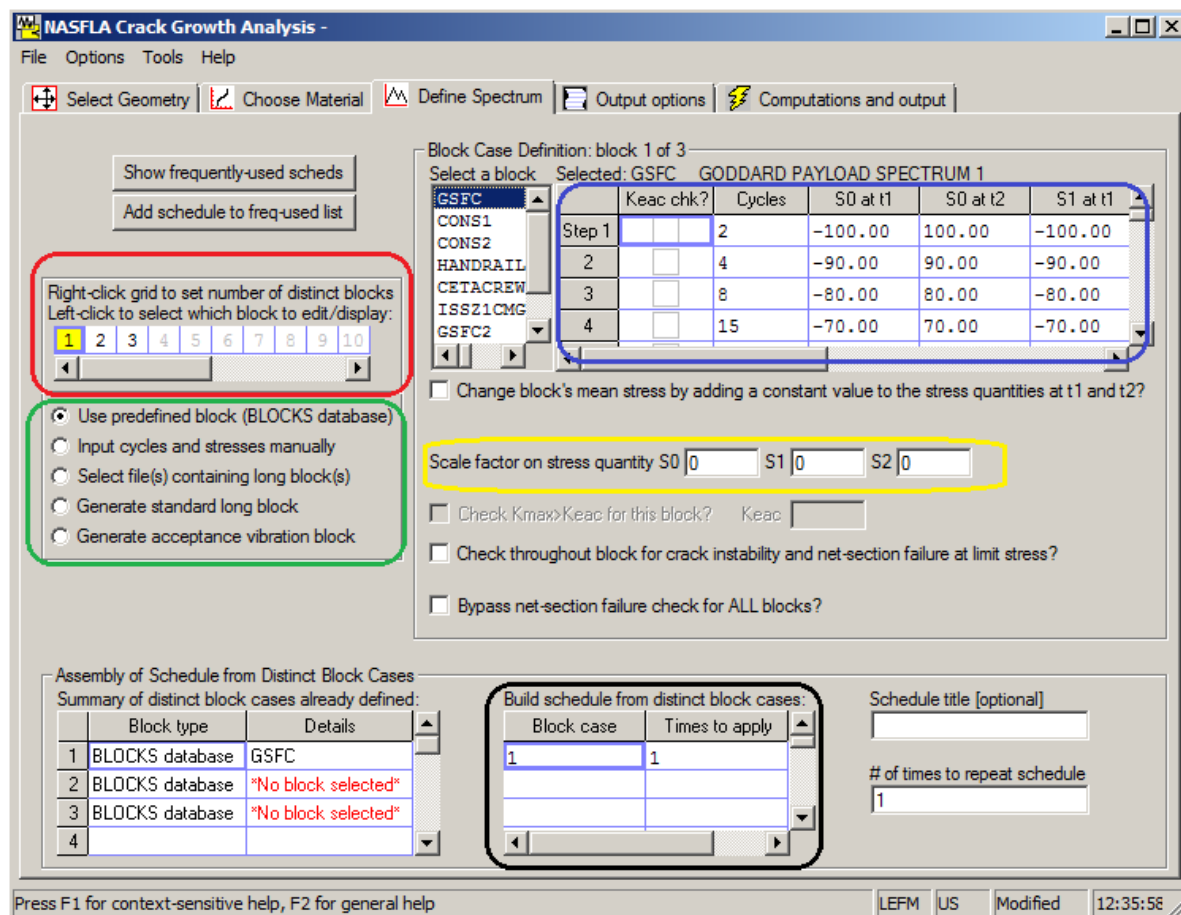
b) – *vložení napětí a cyklů manuálně*, probíhá tak, že tabulka z případu vložení a) je nabídnuta k vyplnění. Zadání napětí S_i (viz rovnice 3.2) pak vyžaduje velikost napětí S_i v čase t_1 a t_2 , což není nic jiného než velikost napětí σ_{min} a σ_{max} pro dané zatížení S_i . Poznamenejme, že v NASGRO jsou zadávána napětí v kilopondech na čtvereční palec ($1\text{ksi}=6,89\text{Mpa}$ [6]).

c) – *vložením souboru obsahující dlouhé bloky*.

d) – *vygenerování standartních dlouhých bloků*, spočívá v zadání napětí S_i jako násobku jmenovitého napětí.

e) – *vygenerování bloků pomocí zadávání frekvencí*.

Každé z těchto pěti zadání umožňuje zadat měřítka jednotlivých napětí S_i (ohraničeno žlutě). Toto měřítko je vhodné zejména pro eliminaci některého ze zatížení (příslušnou hodnotu S_i nastavíme na 0). Pomocí již definovaných bloků lze pak sestavit zátěžný model (ohraničeno černě) tak, že je určeno, kolikrát má být jaký blok aplikovat a v jakém časovém sledu budou definované bloky následovat.



obr. 3.3 – vložení zatížení v NASGRO

- 4) **Nastavení výpočtu** – v tomto kroku je třeba zadat velikost jednoho dílku pro postupnou integraci a popřípadě interval, po kterých vyžadujete vykreslení charakteristik. Tyto hodnoty jsou defaultně nastaveny na doporučených hodnotách, takže není třeba, pokud nejsou kladeny speciální požadavky, je měnit.
- 5) **Získání výstupních informací** – po spuštění tlačítka „Run“ se rozjede výpočet a po jeho dokončení lze vidět soubory obsahující zadané parametry, výstupní parametry (hlavně počet cyklů do lomu a vývoj délky trhliny) a také je zde možnost vykreslení charakteristik (a , K_{max} , ΔK_{th} , ...) v závislosti na rychlosti šíření trhliny nebo na délce trhliny.

3.2. AFGROW

Druhým testovaným softwarem je program AFGROW. Tento software byl vyvinut v USA vědeckou výzkumnou organizací The Air Force Research Laboratory (AFRL), ale dnes je vyvíjen společností LexTech, Inc. AFGROW umožňuje předpovídat iniciaci trhliny, růst trhliny a lom u kovových konstrukcí. Stejně jako NASGRO tak i AFGROW bylo vyvinuto primárně pro letecké účely, ale tvůrci opět uvádějí, že program je vhodný pro všechny kovové konstrukce, kde se může vyskytovat únava [7]. Databáze tvarových funkcí pro stanovení součinitele intenzity napětí umožňuje zadávat více než 30 druhů geometrií trhlín s různými druhy zatížení. Dále v [7] je uvedeno, že je možné analyzovat dvě nezávislé trhlíny v tělese, ale i nesymetrickou rohovou trhlínu.

Celkově se jeví AFGROW uživatelsky přívětivější než NASGRO. Testovaný program byla verze AFGROW 5.1.

3.2.1. Rovnice používané v AFGROW

AFGROW umožňuje na rozdíl od NASGRO výběr rovnice, podle které má být počítána rychlost šíření trhliny. Při tomto výběru je možnost z následujících pěti postupů výpočtu [8]:

- 1) **Formanova rovnice** – viz rovnice 2.12
- 2) **Walkerova rovnice** – viz rovnice 2.10
- 3) **Metoda Tabular LOOKUP data** – tato metoda výpočtu je realizována pomocí Walkerovy rovnice (3.3), pokud neznáme hodnotu m . Tato metoda je schopna nahradit m při zadání dvou a více hodnot sousedních R pro dané rychlosti šíření trhliny (také minimálně dvě). Maximální počet zadání rychlostí je 30 a pro každou rychlost lze definovat až 10 hodnot součinitele asymetrie R (viz obrázek 3.4). Charakteristika hodnoty m je zřejmá z obrázku 3.5.

Input values of Delta_K for up to 30 da/dN values and up to 10 different R(stress ratio) values. Matrix must have at least two R values and two da/dN values.
Input Delta_K for R >= 0, input Kmax for R < 0.0

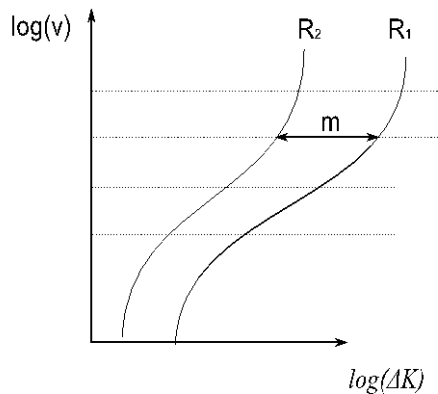
Number of da/dn Sets: 27 Number of R Sets: 2

		R[1]	R[2]
		0.1	0.6
da/dN[1]	1.00e-009	2.606	1.38
da/dN[2]	3.00e-009	2.636	1.409
da/dN[3]	1.00e-008	2.673	1.503
da/dN[4]	2.00e-008	2.685	1.66
da/dN[5]	4.00e-008	2.729	1.897

Material name: User defined data

Ultimate Strength: 66 Young's Modulus: 10500
Coefficient of Thermal Expansion: 1.25e-005 Poisson's Ratio: 0.33
Upper limit on da/dN, DADNHI: 0.01 Lower limit on da/dN, DADNLO: 1e-009
Plane Stress Fracture Toughness, KC: 62.777 Yield Strength, YLD: 47
Plane Strain Fracture Toughness, KIC: 35 Lower limit on R shift (Max: 0): -0.3
Delta K threshold value @R=0: 2.831 Upper limit on R shift (0, 1): 0.63

obr. 3.4 – tabulka pro vyplnění hodnot v AFGROW metodou Tabular LOOKUP



obr. 3.5 – grafické znázornění hodnoty m [8]

- 4) **Tabular (Harter T-metoda)** – jedná se v podstatě o metodu Tabular LOOKUP data, jenom již data nemusí být vyplněna, ale jsou brána z materiálových databází. Je ovšem doporučováno upřednostňovat vlastní data než data z databází.
- 5) **NASGRO rovnice** – viz rovnice 2.11

AFGROW dále využívá pět modelů, které uvažují interakční efekty (pochopitelně je zde i možnost s interakčními efekty nepracovat), které mohou být téměř libovolně kombinovány s použitím postupů výpočtů uvedených výše [8]:

- 1) **Model pracující s otevíracím napětím** – (v AFGROW paradoxně označen jako model „Closure“). Pro počítání s touto metodou musí uživatel zadat hodnotu C_f . Tato hodnota je důležitým parametrem pro počítání touto metodou. Pokud hodnota C_f není známa, může být odvozena z prvního zátěžného cyklu podle následující rovnice [8]:

$$C_f = 1 - \left[(1 - C_{f0})(1 + 0,6R)(1 - R) \right] \quad (3.1)$$

kde C_{f0} je hodnota C_f pro $R=0$. Tuto hodnotu musí uživatel zadat (typická je hodnota 0,4). Rovnicí 3.4 je vypočítána počáteční hodnota C_f , která je defaultně počítaná pro hodnotu R z prvního zátěžného cyklu. Tímto je uživatelská část výpočtu zajištěna a program pomocí tohoto zadání je schopen počítat s řadou dalších rovnic dle určitých podmínek zatížení.

- 2) **Model FASTRAN** – tento retardační model využívá program založený na modelu pracujícího s otevíracím napětím. Byl vyvinut pány Jamesem a Newmanem. Chce-li uživatel počítat touto metodou, je nejprve vyzván, aby vybral, z čeho bude počítána efektivní hodnota součinitele intenzity napětí ΔK_{ef} . Zde je na výběr ze tří možností, z nichž jedna počítá za předpokladu LELM a dvě za předpokladu EPLM. Poté následuje výzva k výběru rovnice růstu trhliny:

$$v = \frac{da}{dN} = f(C3, C4), \quad (3.2a)$$

$$v = \frac{da}{dN} = f(\Delta K_{ef}) \frac{1}{1 - \left(\frac{K_{\max}}{C5}\right)^{C6}}. \quad (3.2b)$$

Je-li zvolena rovnice 3.2a, tak následuje výzva k zadání konstant $C3$ a $C4$. Tyto konstanty slouží k vypočítání počáteční hodnoty ΔK_{ef} . Pro nepokročilé zadávání AFGROW doporučuje hodnoty konstant $C3=1$ a $C4=0$. Je-li vybrána rovnice 3.2b (volba této rovnice je pro pokročilé), tak jsou kromě konstant $C3$ a $C4$ vyžadovány i konstanty $C5$ a $C6$, které se starají o zvýšení rychlosti růstu trhliny v oblastech blízkých dolomení. Typické hodnoty jsou $C5=10^6, C6=2$.

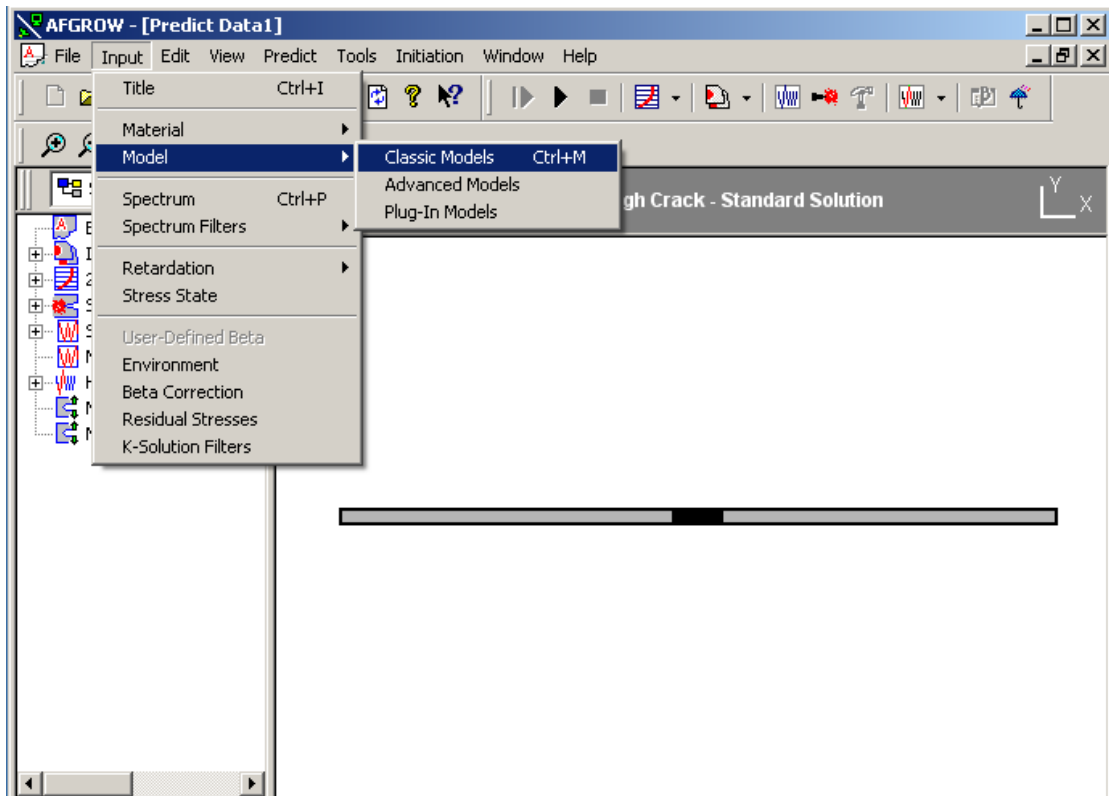
Pozn.: Model FASTRAN pracuje dohromady pouze s postupem výpočtu Tabular Lookup data.

- 3) **Wheelerův model** – je založen na interakci plastických zón. Uživatelsky stačí pro počítání touto metodou zadat hodnotu M - Wheelerův exponent. Hodnota tohoto exponentu je zjišťována empiricky a závisí na materiálu, zátěžném spektru atd.
- 4) **Metoda Hus** – kombinuje metodu otevíracích napětí a interakci plastických zón. Pro uživatele je klíčové zadat hodnoty M (M má stejný význam jako v modelu Wheelera). Není-li známa hodnota M , zadává se $M0=(0,1)$, typická hodnota $M0=(0,3; 0,5)$. Dále je nutné zadat hodnotu $Rcut=(0,1)$, typická hodnota $Rcut=(0,5; 0,8)$.
- 5) **Willenborgův model** – je založen na interakci plastických zón. Uživatelsky je důležité zadat hodnotu SOR , která se liší dle materiálu. Hodnoty SOR jsou pro základní materiály v AFGROW uvedeny (např. pro ocel platí $SOR=2$ [8]).

3.2.2. Zadávání hodnot v AFGROW

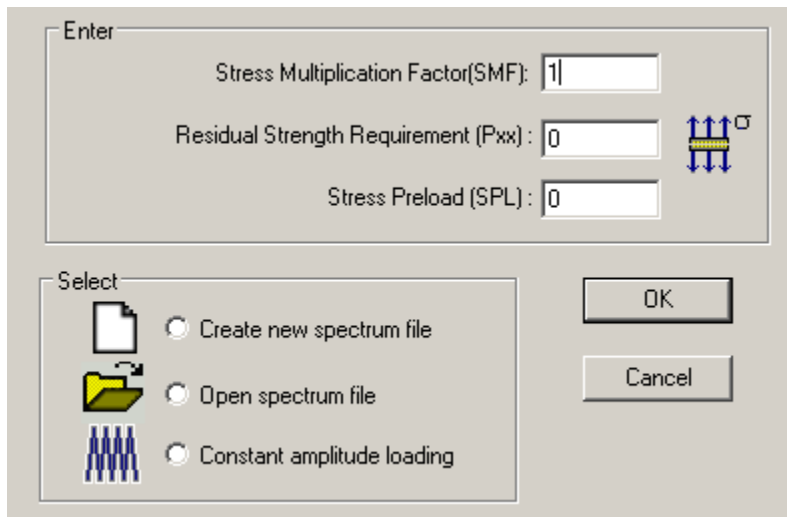
K úspěšnému vypočítání počtu cyklů do lomu je v AFGROW nutné zadat následující parametry:

- 1) **Vložit geometrii, rozměry tělesa a trhliny** – tento krok probíhá podobně jako v NASGRO, zadávání rozměrů i napětí je intuitivní. Na výběr je z více jak třiceti modelů běžných a z devíti modelů pokročilých. Při zadání těchto hodnot se v hlavním okně objeví těleso s trhlinou v příčném řezu, viz obrázek 3.6. Toto těleso je zobrazeno v měřítku a při výpočtu můžeme pozorovat, jak trhlina roste a zastaví se na kritické délce trhliny.



3.6 vložení geometrie tělesa v AFGROW

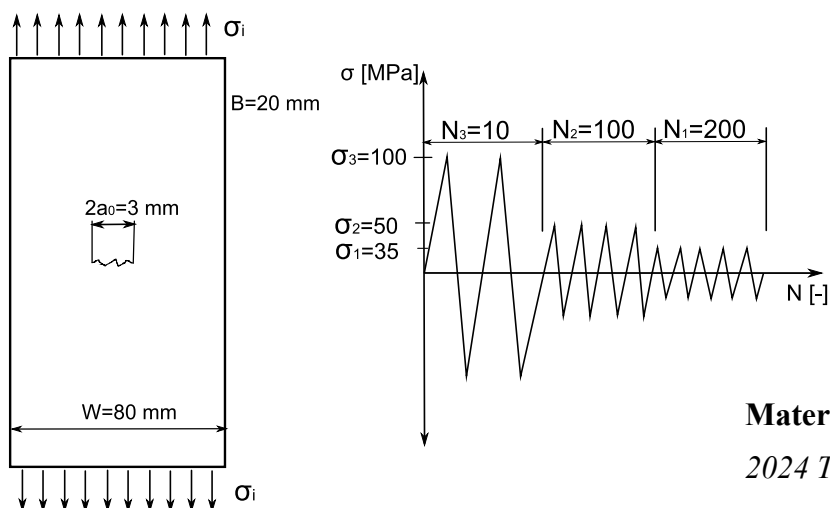
- 2) **Vložení materiálu** – vložení materiálu v AFGROW úzce souvisí s výběrem postupu výpočtu (růstovým zákonem). V záložce „Input“--> „Material“ (obrázek 3.6) je na výběr z pěti uvedených postupů výpočtu, viz kap. 3.2.1. Je-li tedy vybíráno z uvedených postupů výpočtu, tak mimo konstanty v rovnicích je možno měnit i materiálové charakteristiky, viz obrázek 3.4 v dolní polovině. Je třeba poznamenat, že u Harter T-metody materiálové konstanty měnit nelze.
- 3) **Zvolení modelu počítání interakčních efektů** – V záložce „Input“--> „Retardation“, viz obrázek 3.6, lze vybrat z pěti respektive šesti (+1 model bez interakčních efektů) modelů uváděných v kapitole 3.2.1. Po zvolení metody je uživatel vyzván k zadání potřebných konstant.
- 4) **Vložení zátěžného spektra** – nejjednodušším zadáním zatížení je zatěžování konstantním, souměrným cyklem, u kterého stačí vyplnit pouze hodnotu SMF (stress multiplication factor). Tato hodnota v sobě nese velikost σ_{max} . Poté stačí zadat počet cyklů a vložení spektra je kompletní. Pokud je vyžadováno zadávat zatěžování nekonstantním cyklem, tak je možno vytvořit zatěžovací spektrum (je-li již vytvořené, tak je možně spektrum pouze otevřít) dvěma způsoby: 1 – blokovým spektrem, 2 – spektrem zadávaným cyklus po cyklu. Spektrum zadávané cyklus po cyklu je náročné na vytvoření, AFGROW navíc udává [8], že výsledky mezi zadáváním blokovým spektrem a zadáváním cyklus po cyklu se výrazně neliší. Zabývejme se tedy zadáváním pomocí blokového spektra. Při vytváření takového soboru je potřeba zadat počet zátěžných podspekter (každé podspektrum může mít až 25 úrovní zatížení definovaných pomocí σ_{max} , σ_{min} a počtem cyklů) a počet úrovní zatížení. Zadávání je podobné jako v NASGRO s tím rozdílem, že v AFGROW lze takto vytvořené zatížení uložit a použít v jiné úloze. Je důležité, aby při počítání s nekonstantním cyklem byla hodnota SMF nastavena na hodnotu 1, protože jinak funguje jako měřítko zatížení.



obr. 3.7 – možnosti vložení zátěžného spektra v AFGROW

4. POROVNÁVACÍ PŘÍKLAD – RŮSTOVÝ ZÁKON

K porovnání byl vytvořen jednoduchý příklad. Jeho zadání je následující: Pro dané těleso s centrální trhlinou u počáteční délky $2a_0 = 3 \text{ mm}$ (obrázek 4.1) určete počet cyklů, které je třeba aplikovat, aby trhlina narostla na délku $2a_{kon} = 10 \text{ mm}$. Pro jednoduchost uvažujte tvarovou funkci $f_T = 1$ a uvažujte vztah Parise a Erdogana, pro který jsou známa materiálová data pro rychlost růstu únavové trhliny.



Materiál [5]:

2024 T-3Al

$A = 3,284$

$C = 1,5451 \text{ m/cyklus}$

$K_{th} = 2,2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$

obr 4.1 – zadání 1. příkladu

4.1. ANALYTICKÉ ŘEŠENÍ PŘÍKLADU

Pro analytické řešení příkladu bude zanedbávána tvarová funkce. To lze připustit, pokud $2a_{kon}/W$ je dostatečně malé, což platí. Nejprve je potřeba zjistit, zda jsou všechna zatížení od začátku poškozující to provedeme dosazením do rovnice 2.5:

$$K_{Ipoč1} = \sigma_1 \cdot \sqrt{\pi a} = 35 \cdot \sqrt{\pi \cdot 0,0015} = 2,4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}, \quad (4.1 \text{ a})$$

$$K_{Ipoč2} = \sigma_2 \cdot \sqrt{\pi a} = 50 \cdot \sqrt{\pi \cdot 0,0015} = 3,4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}, \quad (4.1 \text{ b})$$

$$K_{Ipoč3} = \sigma_3 \cdot \sqrt{\pi a} = 100 \cdot \sqrt{\pi \cdot 0,0015} = 6,9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}. \quad (4.1 \text{ c})$$

Protože všechny amplitudy napětí platí, že $K_{Ipoč i} > K_{th}$, tak jsou všechna amplitudy zatížení od začátku poškozující a přispívají k růstu únavové trhliny. Nyní je tedy třeba vyjádřit, kolik je potřeba cyklů k tomu, aby byla dosažena hodnota a_{kon} od každého zatížení zvlášť. To bude provedeno tak, že z rovnice Parise a Erdogana (2.7) vyjádříme N . Místo hodnoty ΔK bude zadávána hodnota K_{max} , pro kterou jsou definované konstanty A a α . Součinitel intenzity napětí je vyjádřen pomocí rovnice 2.5. Tím dostaneme následující diferenciální rovnici pro výpočet jednotlivých cyklů:

$$\begin{aligned}
N_{f1} &= \int_{a_0}^{a_{kon}} \frac{1}{A(K_I)^\alpha} da = \int_{a_0}^{a_{kon}} \frac{1}{A(\sigma_1 \cdot \sqrt{\pi} a)^\alpha} da = \frac{1}{A(\sigma_1 \cdot \sqrt{\pi})^\alpha} \cdot \left[\frac{a^{-\frac{\alpha}{2}+1}}{-\frac{\alpha}{2}+1} \right]_{a_0}^{a_{kon}} = \quad (4.2) \\
&= \frac{1}{1,5451 \cdot 10^{-10} \cdot (35\sqrt{\pi})^{3,284}} \cdot \left[\frac{0,005^{-\frac{-3,284}{2}+1}}{-\frac{-3,284}{2}+1} - \frac{0,0015^{-\frac{-3,284}{2}+1}}{-\frac{-3,284}{2}+1} \right] = 457\,593 \text{ cyklů}
\end{aligned}$$

Analogicky budou vypočteny hodnoty N_{f2} a N_{f3} , pouze v rovnici zaměníme nominální napětí. Hodnoty pak budou následující: $N_{f2}=141834$ cyklů a $N_{f3}=14561$ cyklů. Nyní jednotlivé hodnoty poškozujících cyklů se sečtou pomocí kumulativní hypotézy poškození dle Palmgrena-Minera [4]:

$$D = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_{fi}}} \quad , \quad (4.3)$$

kde D je tzv. počet bloků (v tomto případě jeden blok představuje graf v obrázku 4.1), N_i je počet daných cyklů v bloku a N_{fi} je počet cyklů, které je potřeba realizovat k dosažení dané hodnoty délky trhliny. Dosažením zadaných hodnot dostáváme:

$$D = \frac{1}{\frac{N_1}{N_{f1}} + \frac{N_2}{N_{f2}} + \frac{N_3}{N_{f3}}} = \frac{1}{\frac{200}{457\,593} + \frac{100}{141\,834} + \frac{10}{14\,561}} = 547 \text{ bloků}. \quad (4.4)$$

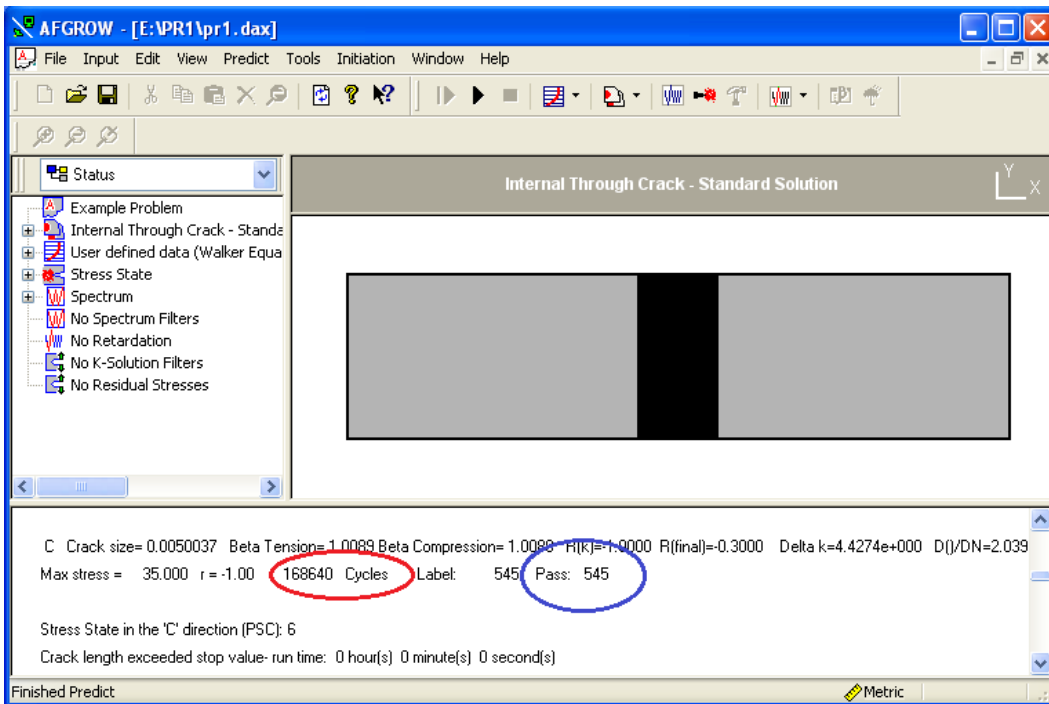
K vyjádření počtu cyklů místo bloků je použita triviální rovnice:

$$N_c = D \cdot (N_1 + N_2 + N_3) = 547 \cdot (200 + 100 + 10) = 169\,570 \text{ cyklů}, \quad (4.5)$$

Tedy celkový počet cyklů do nárůstu trhliny na a_{kon} je $N_c=169\,570$ cyklů.

4.2. ŘEŠENÍ PŘÍKLADU V AFGROW

K vyřešení zadaného příkladu v AFGROW byla použita Walkerova rovnice (2.10), která byla zredukována na rovnice Parise a Erdogana. To bylo provedeno tak, že byla nastavena hodnota m na hodnotu 1. Dále byly do programu zadány hodnoty A a α . Hodnota α je v AFGROW označena jako n , hodnota A jako C , ale jejich významy jsou totožné. Interakční efekty nebyly při výpočtu zahrnuty. Dále bylo nastaveno jako kritérium ukončení výpočtu dosažení hodnoty $a_{kon}=5mm$. Poté byl výpočet spuštěn a program vypočetl hodnotu $N_{cb}=168\,640$ cyklů (na obrázku 4.2 ohraničeno červeně).



obr 4.2 – Výsledky příkladu z AFGROW

Shrnutí příkladu: Analytický výpočet se od řešení v programu AFGROW liší o nepatrnou hodnotu 930 cyklů, což může být způsobeno zanedbáním tvarové funkce v analytickém výpočtu nebo tím, že AFGROW ukončilo výpočet ne přesně v délce $a_{kon}=5 \text{ mm}$ (počet bloků, na obrázku 4.2 ohraničeno modře, musí být celé číslo).

5. POROVNÁVACÍ PŘÍKLAD – INTERAKČNÍ EFEKTY

Na základě shody analytického řešení s řešením v programu AFGROW v předcházejícím porovnávacím příkladu byl vytvořen příklad, který bude porovnávat interakční efekty. Důvodem těchto výpočtů je odhalit velikost vlivu retardačních efektů a posoudit, zdali započítání retardačních efektů má praktický význam na výpočty rychlosti růstu únavové trhliny. Jako základní růstový zákon bude využita právě Walkerova rovnice (2.10). Zadání příkladu je následující:

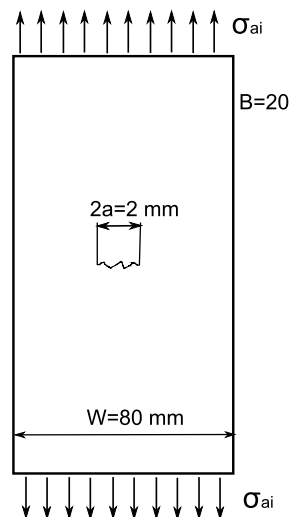
Př1: Určete počet cyklů do lomu u tělesa dle obrázku (obr. 5.1) s počáteční délkou trhliny $2a=2\text{mm}$ (v AFGROW označeno $2c=2\text{mm}$), materiály tělesa jsou D6AC, EA1N a EA4T (poslední dva materiály jsou oceli pro výrobu železničních dvojkolí), součinitel asymetrie uvažujte $R = -1$. U zadaného bloku zatížení měňte měřítko jeho zatížení a zjistěte závislost velikosti zatížení na počtu bloků nutných pro nárůst na kritickou délku trhliny a určete vliv velikosti zatížení na míru retardačních efektů.

Zadané základní zatížení (100%) je zátěžné spektrum odpovídající 1 000 km provozu železniční nápravy [12]. Dané spektrum je setříděné do 35 zátěžných tříd, viz tabulka 5.1.

tab. 5.1 – základní zátěžné spektrum

číslo	amplituda napětí [MPa]	počet cyklů
1	151,80	1
2	148,50	1
3	145,20	1
4	141,90	3
5	138,60	7
6	134,75	23
7	131,45	86
8	128,15	167
9	124,85	353
10	121,55	719
11	118,25	888
12	114,95	1179
13	111,65	1523
14	108,35	1306
15	105,05	1899
16	101,75	2440
17	98,45	1779
18	95,15	3218

číslo	amplituda napětí [MPa]	počet cyklů
19	91,85	4249
20	88,55	3613
21	85,25	5280
22	81,40	5966
23	78,10	4655
24	74,80	11154
25	71,50	10933
26	68,20	9922
27	64,90	20660
28	61,60	18674
29	58,30	30661
30	55,00	92033
31	51,70	56514
32	48,40	31976
33	45,10	15284
34	41,80	7129
35	38,50	5705



obr. 5.1 - tvar tělesa

Pro níže uvedené důvody bylo potřeba ještě vytvořit nové spektrum, které bude mít stejné hodnoty napětí, ale 10x menší hodnoty cyklů (tedy spektrum odpovídající 100 km provozu). To nebylo možné uskutečnit bez menší úpravy dat. Tabulka zatížení bude mít potom následující podobu:

tab. 5.2 – upravené zátěžné spektrum

číslo	amplituda napětí [MPa]	počet cyklů	číslo	amplituda napětí [MPa]	počet cyklů
1	151,80	0	19	91,85	425
2	148,50	0	20	88,55	361
3	145,20	1	21	85,25	528
4	141,90	0	22	81,40	597
5	138,60	1	23	78,10	466
6	134,75	2	24	74,80	1115
7	131,45	9	25	71,50	1093
8	128,15	17	26	68,20	992
9	124,85	35	27	64,90	2066
10	121,55	72	28	61,60	1867
11	118,25	89	29	58,30	3066
12	114,95	118	30	55,00	9203
13	111,65	152	31	51,70	5651
14	108,35	131	32	48,40	3198
15	105,05	190	33	45,10	1528
16	101,75	244	34	41,80	713
17	98,45	178	35	38,50	571
18	95,15	322			

Zadaný materiál D6AC je vysokopevnostní ocel, materiálové parametry byly získány především z materiálové knihovny programu AFGROW [10]. Materiály EA1N a EA4T jsou oceli pro výrobu železničních dvojkolí, pro které byly uvažovány konstanty, které byly poskytnuty pracovníky ÚFM AV ČR [12].

A) Materiál D6AC [10]:

$$\begin{aligned}
 E &= 206\,843\text{ MPa} \\
 K_{IC} &= 76,9\text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5} \\
 K_{th} &= 4,395\text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5} \\
 A &= 6,3794\cdot 10^{-11}\text{ m/cyklus} \\
 \alpha &= 2,57 \\
 R_e &= 1482\text{ MPa}
 \end{aligned}$$

- konstanta pro Willenborgův model [8]: $SORL = 2$ (pro ocel obecně)
- konstanta pro Wheelerův model [11]: $M = 1,43$

B) EA1N [12]:

$$\begin{aligned}
 E &= 206\,000\text{ MPa} \\
 R_e &= 370\text{ MPa} \\
 K_{th} &= 7\text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5} \\
 K_c &= 65\text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}
 \end{aligned}$$

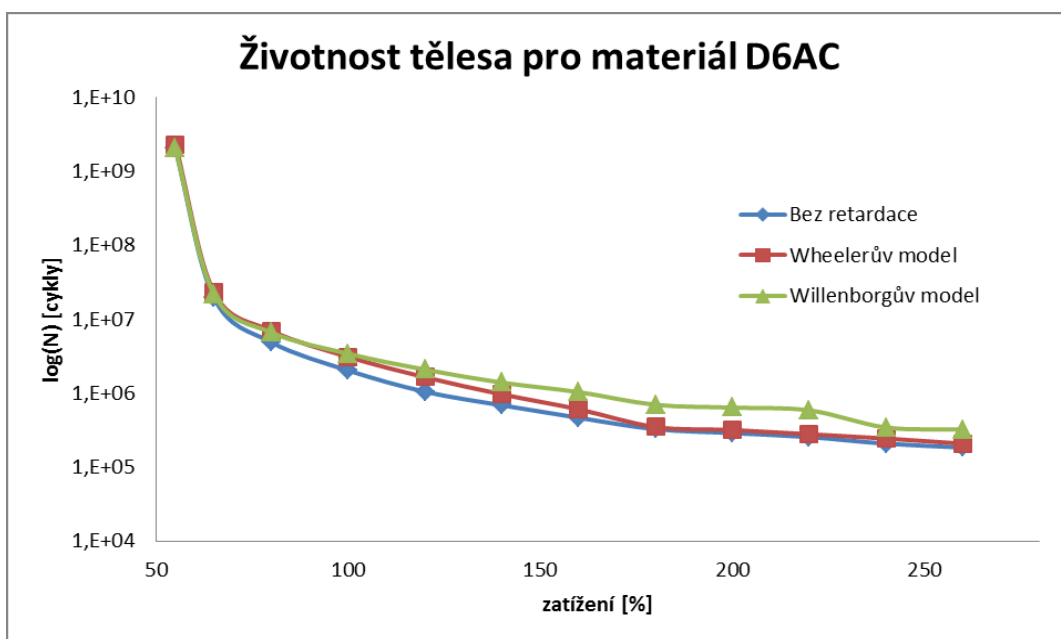
C) EA4T [12]:

$$\begin{aligned}
 E &= 209\,000\text{ MPa} \\
 R_e &= 500\text{ MPa} \\
 K_{th} &= 6\text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5} \\
 K_c &= 65\text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}
 \end{aligned}$$

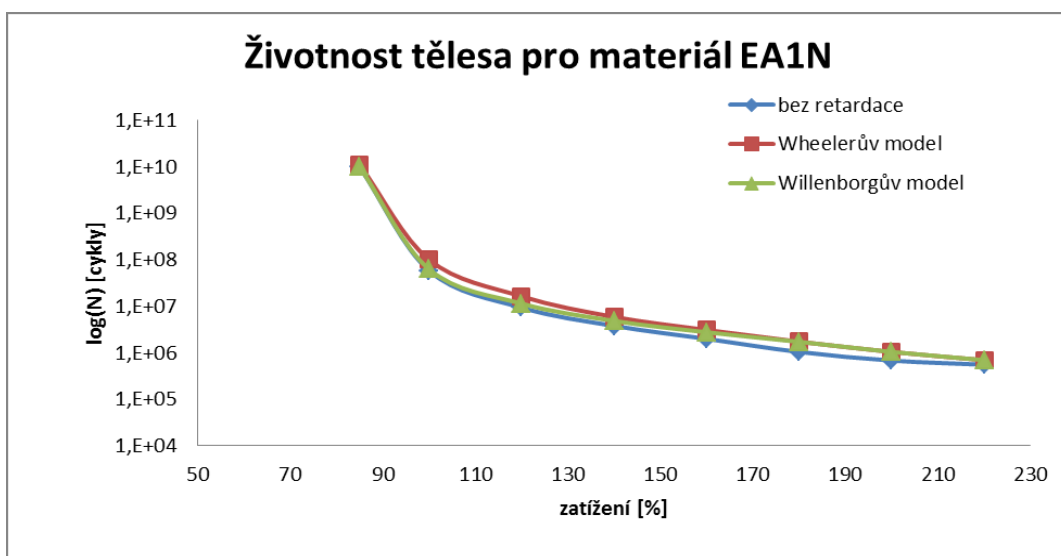
Poslední dva zjištěné parametry k materiálu D6AC jsou konstanty pro počítání interakčních

efektů pro Willenborgův a Wheelerův model (viz kapitola 3.2.1). Pro obě železniční oceli je uvažována hodnota $SORL$ stejná, protože platí pro všechny oceli obecně a hodnota M byla brána stejná jako pro vysokopevnostní ocel, výsledky tedy úplně neodpovídají skutečnosti. Dále byl zadaný zátěžný blok roztržěn do sedmi podspekter (v každém podspektru bylo pět zatížení), čímž bylo v programu vytvořeno zátěžné spektrum o 35 zátěžných třídách, viz tabulka 5.1. Zátěžné spektrum bylo podobně vytvořeno i pro upravené zátěžné spektrum, viz tabulka 5.2. Ve vytvořených spektrech bylo dosaženo změny zatížení pomocí hodnoty SMF , viz obrázek 3.7, tedy pro základní zatížení platí $SMF = 1$, ale například pro zatížení 160% se $SMF = 1,6$.

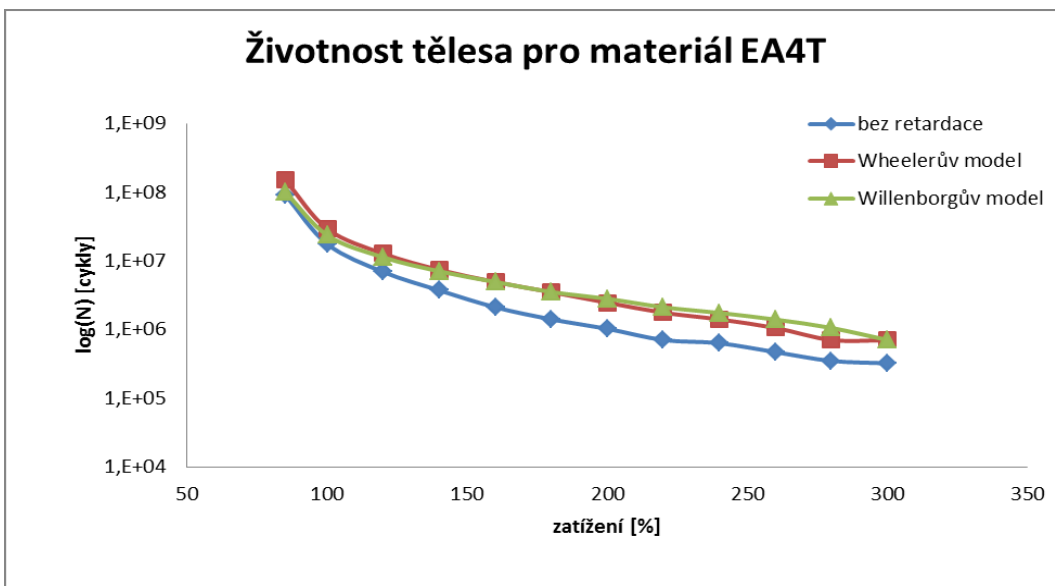
Pro zbytkovou životnost tělesa s trhlinou, které má počáteční délku $2a=2\text{mm}$, a pro jednotlivé úrovně zatížení a materiály byly z programu AFGROW získány následující výsledky (osa počtu cyklů je pro větší názornost v logaritmickém měřítku):



obr. 5.2a - životnost tělesa pro materiál D6AC



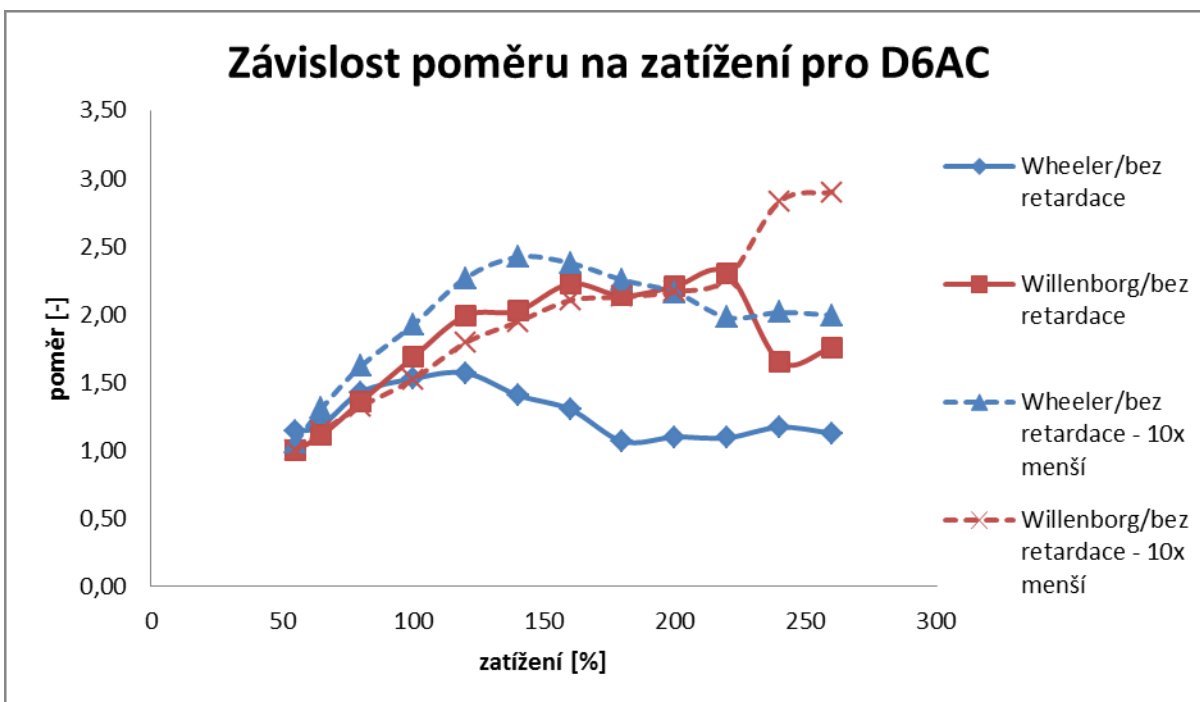
obr. 5.2b - životnost tělesa pro materiál EA1N



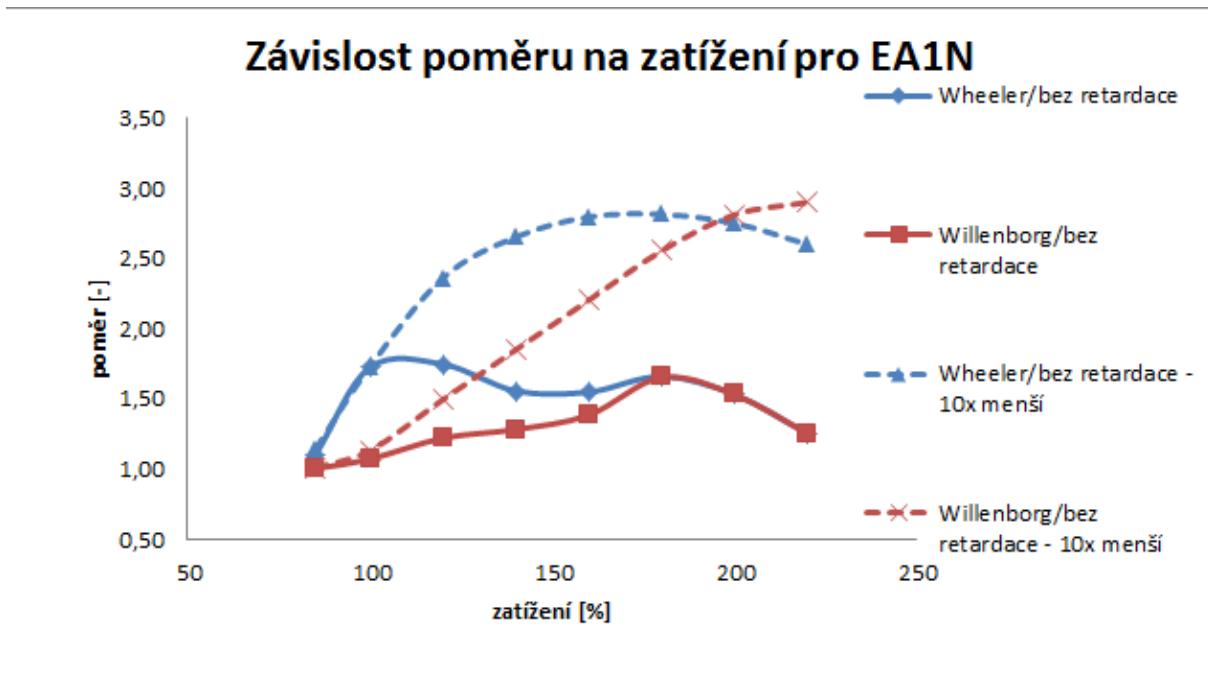
obr. 5.2c - životnost tělesa pro materiál EA4T

Pro zjevnější vliv interakčních efektů, byla vytvořena závislost, viz obrázek 5.3, kde je znázorněn poměr výsledků metod uvažující retardační efekty a přístupu bez uvažování retardace. Tato závislost byla vytvořena pro spektrum základní (odpovídající 1 000 km) i pro spektrum 10x menší (odpovídající 100 km).

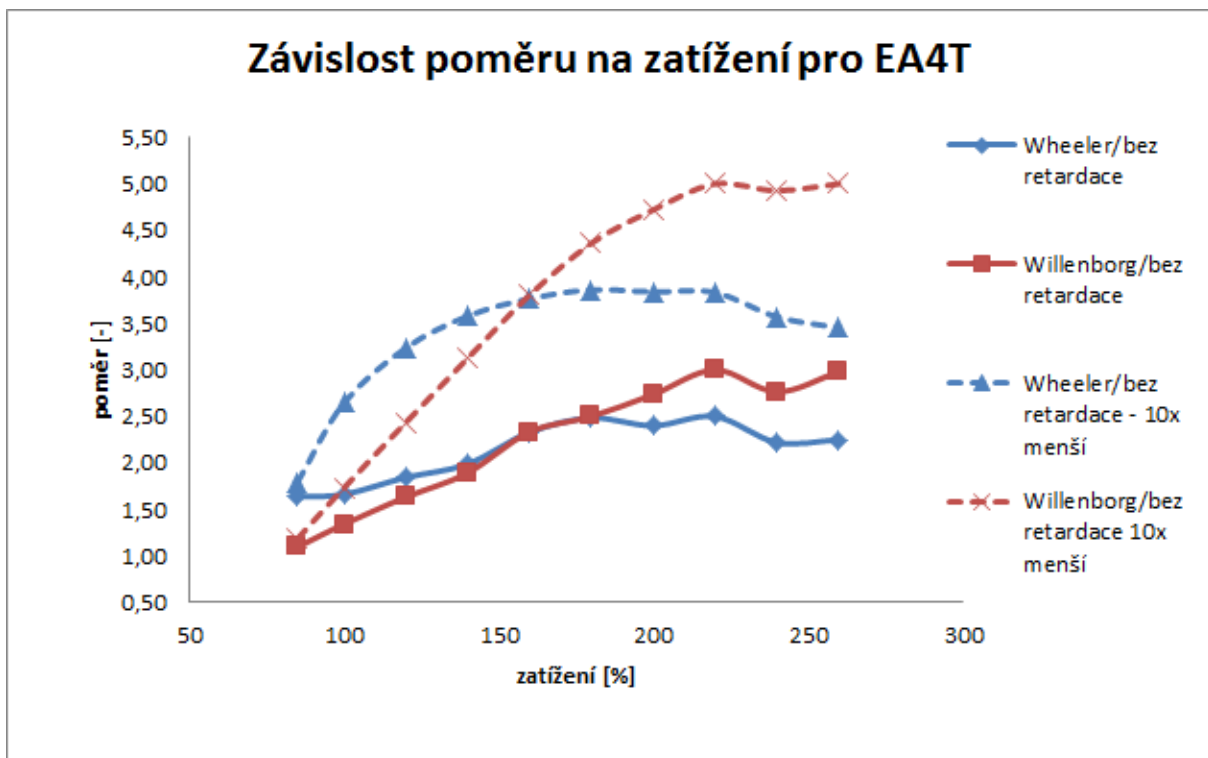
Na dalších obrázcích je plnou čarou vždy označen výpočet realizovaný pomocí základního spektra a přerušovanou čarou výpočet pomocí spektra s 10x menší četností všech zátěžných amplitud napětí:



obr. 5.3a – zobrazení vypočtených poměrů pro materiál D6AC



obr. 5.3 b– zobrazení vypočtených poměrů pro materiál EA1N



obr. 5.3c– zobrazení vypočtených poměrů pro materiál EA4T

Pozn.: Pro zatížení, která jsou extrémně velká nemusí být splněny podmínky LELM. Proto je uvedena ještě velikost plastické zóny pro největší dosažené napětí v nejvyšším uvedeném procentu zatížení. Tyto vypočty jsou vztaženy k počáteční délce trhliny, protože největší část zbytkové únavové životnosti zaujímá růst kratších trhlin. Velikost plastické zóny pro rovinnou deformaci je počítána podle následujícího vztahu [3]:

$$R_y = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2 \quad (5.1)$$

Po dosazení do rovnice 5.1 v kombinaci s rovnicí 2.5 pro tři zadané materiály bylo vypočteno:

$$R_{yD6AC} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\sigma_{\max,D6AC} \cdot \sqrt{\pi a}}{R_e} \right)^2 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{395 \cdot \sqrt{\pi \cdot 0,001}}{1482} \right)^2 = 0,02mm$$

$$R_{yEA1N} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\sigma_{\max,EA1N} \cdot \sqrt{\pi a}}{R_e} \right)^2 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{395 \cdot \sqrt{\pi \cdot 0,001}}{570} \right)^2 = 0,16mm$$

$$R_{yEA4T} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\sigma_{\max,EA4T} \cdot \sqrt{\pi a}}{R_e} \right)^2 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{334 \cdot \sqrt{\pi \cdot 0,001}}{370} \right)^2 = 0,27mm$$

U ocelí pro výrobu železničních náprav tedy pro nejvyšší uvažované zatížení neplatí podmínka, že $a \gg R_y$.

Na základě nejasných výsledků graficky zobrazených na obrázku 5.3 bylo vytvořeno nové spektrum, u kterého je možno zvětšit počty cyklů, aniž by docházelo ke znehodnocování spektra. Nové spektrum má následující podobu [12]:

tab. 5.3 – základní spektrum [12]

Pořadové číslo	Počet cyklů	Amplituda napětí
[-]	[-]	[MPa]
1	4	145
2	12	137,5
3	44	130
4	119	122,5
5	220	115
6	300	107,5
7	369	100
8	554	92,5
9	736	85
10	1048	77,5
11	1900	70
12	5584	62,5
13	13910	55
14	8339	47,5
15	1862	40

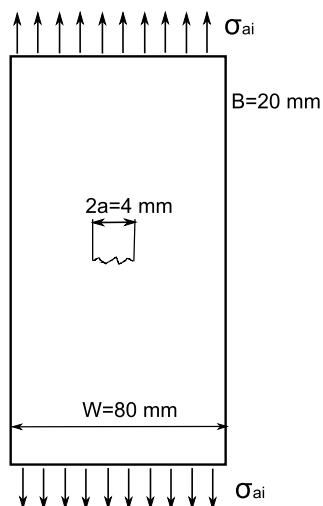
Nové spektrum bylo vytvořeno tak, že četnosti zátěžných cyklů z tabulky 5.3 byly 10 x zvětšeny:

tab. 5.4 – spektrum 10x větší

Pořadové číslo	Počet cyklů	Amplituda napětí
[-]	[-]	[MPa]
1	40	145
2	120	137,5
3	440	130
4	1190	122,5
5	2200	115
6	3000	107,5
7	3690	100
8	5540	92,5
9	7360	85
10	10480	77,5
11	19000	70
12	55840	62,5
13	139100	55
14	83390	47,5
15	18620	40

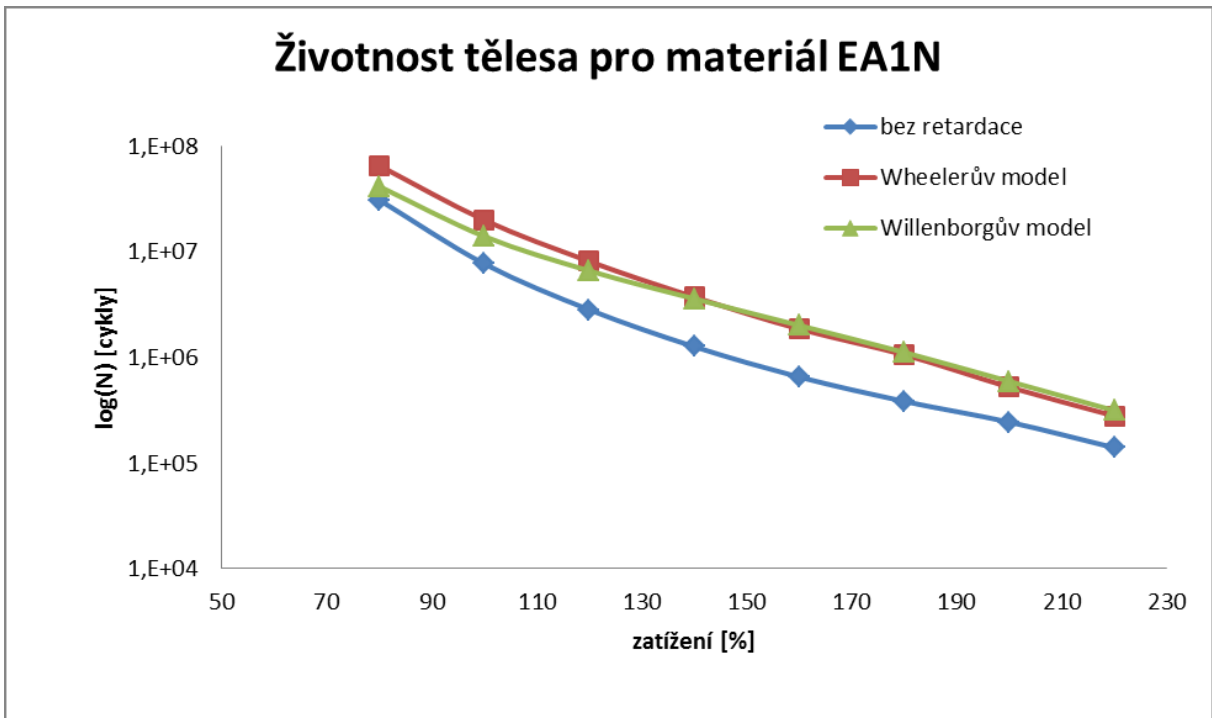
Poté byl vytvořen příklad, který porovnává tato dvě spektra v programu AFGROW, jeho zadání je následující:

Př2: Určete počet cyklů do lomu nebo do nárůstu trhliny na $a_{kon}=15\text{mm}$ podle tělesa dle obrázku 5.4 v programu AFGROW s počáteční délkou trhliny $2a=4\text{mm}$. Uvažujte materiál EA1N, součinitel asymetrie uvažujte $R=-1$. U zadaného bloku zatížení měňte měřítko jeho zatížení a zjistěte závislost velikosti zatížení na počtu cyklů k dosažení uvedené podmínky.

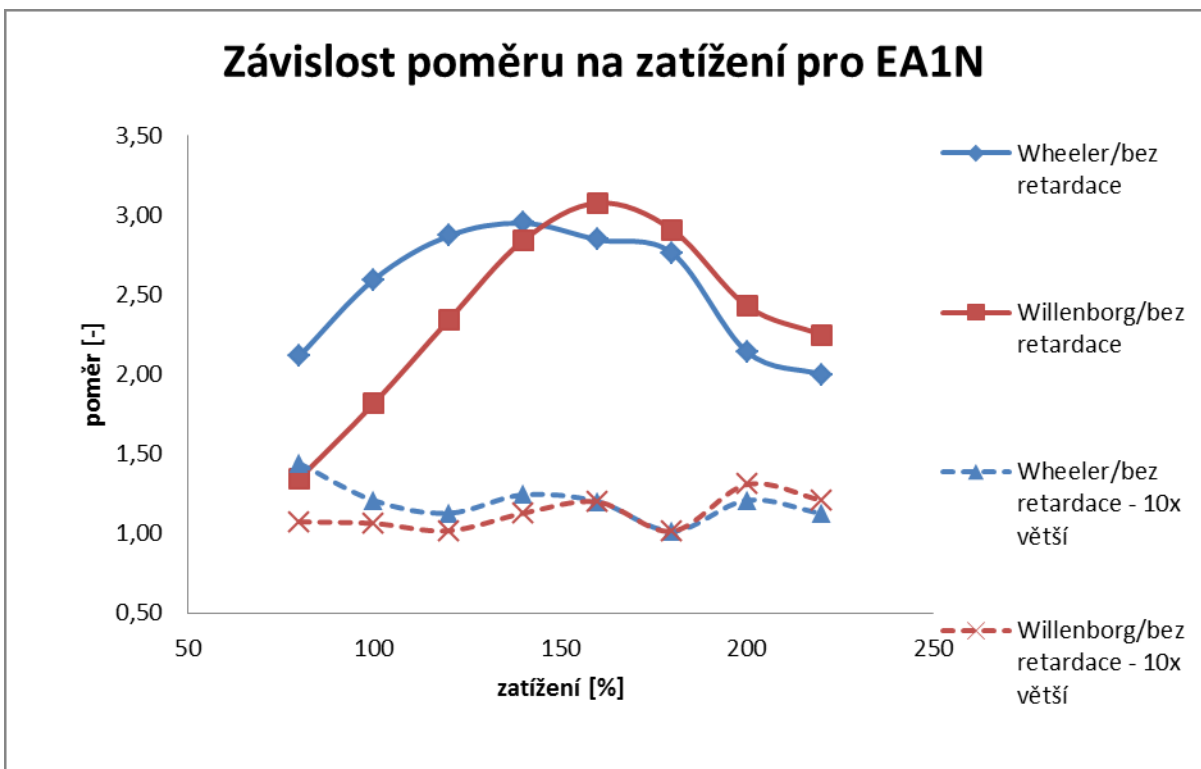


obr. 5.4 – zadání příkladu 2

Konstanty pro materiál EA1N byly již uvedeny, proto bylo přistoupeno rovnou k vykreslení životnosti a poměrů, které znázorňují vliv retardačních efektů:



obr. 5.5 zbytková únavová životnost tělesa u příkladu 2



obr. 5.6 - zobrazení vypočtených poměrů pro materiál EA1N – příklad 2

Shrnutí příkladu 2: Ukazuje se, že vliv velikosti spektra má naprosto klíčový dopad na výsledky z programu v AFGROW, což je pravděpodobně zapříčiněno tím, že program si není schopen rozřadit jednotlivé cykly a tím se nemůžou retardace dostatečně projevit.

6. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce pojednává o porovnání softwarů, které zjišťují zbytkovou únavovou životnost těles s vadou typu trhlinka. Pro uvedení do problematiky lomové mechaniky je první část práce věnovaná napjatosti v tělese s trhlinkou a zavedení pojmu součinitel intenzity napětí. Dále jsou v první části popsány růstové zákony, které jsou schopny popisovat tzv. v - K křivku, viz obrázek 2.6. Následně je v práci popisován vliv interakčních efektů, zejména pak retardačních efektů, které prodlužují životnost těles, ale na druhou stranu vytvářejí méně konzervativní predikci zbytkové únavové životnosti.

Jádru problematiky této práce jsou věnovány kapitoly 3 a dále. Konkrétně jsou zde porovnávány výpočetní programy NASGRO a AFGROW. Je uvedeno zejména zadávání vstupních parametrů do těchto programů pro zjištění zbytkové únavové životnosti tělesa. Dalo by se konstatovat, že program AFGROW se jeví uživatelsky příjemnější a v dostupné demoverzi má více možností než demoverze NASGRO. Přednostmi programu AFGROW jsou větší možnosti výběru růstového zákona či zahrnutí interakčních efektů. Pro ověření správnosti výpočtů těchto programů byl vytvořen příklad, který bylo možné analyticky ověřit. Výpočet ověřovacího příkladu byl realizován pomocí Walkerovy rovnice (rovnice 2.10) v AFGROW a analytickým řešením pomocí rovnice Parise a Erdogana (rovnice 2.7). Porovnáním těchto dvou výpočtů došlo ke shodě s analytickým řešením.

Na základě této shody byl vytvořen příklad (kapitola 5), který posuzuje míru vlivu retardačních efektů na zbytkovou únavovou životnost. V programu AFGROW byl pro tento záměr užít zobecněný Willenborgův a Wheelerův model. Zadané spektrum (tabulka 5.1) bylo rozříděno do sedmi podspekter a aplikováno na tažený pás s centrální trhlinkou. Pro daný příklad byla počítána zbytková únavová životnost pomocí zmíněných retardačních modelů a přístupu bez uvážení retardace. Výsledky byly následně porovnány pro různé hladiny zatížení. Bylo očekáváno, že čím větší bude procento zatížení, tím větší vliv budou mít retardační efekty na životnost tělesa. Tato očekávaná závislost zpočátku platila, ovšem pro větší procenta zatížení program vypočetl nesmyslné výsledky. To bylo pravděpodobně způsobeno tím, že vytvořená bloková spektra v AFGROW nejsou „stochasticky“ rozříděna. Proto bylo ze základního zadaného spektra vytvořeno spektrum, které má 10x menší počet cyklů u každého nominálního napětí. Tím měl být zajištěn reálnější časový sled cyklů ve vytvořeném spektru. Pro takto vytvořené spektrum byly vypočteny životnosti stejně jako pro spektrum původní (je třeba poznamenat, že nově vytvořené spektrum nebylo dokonale zmenšenou kopií spektra původního, protože již v základním spektru se některá napětí vyskytují pouze jednou). Výsledky (obrázek 5.3) byly porovnány tak, že byl pro každý zátěžný model pro určitý násobek zatížení vypočten poměr počtu cyklů do lomu pro příslušný model a počtu cyklů do lomu bez uvážení retardací. Jak lze vidět na obrázku 5.3 (kde jsou čárkovaně zobrazeny poměry pro zmenšené spektrum a plnou čarou výpočty poměrů pro původní spektrum) tak pro zmenšené spektrum počítané pomocí Willenborgova modelu roste vliv interakčních efektů s procentem zatížení pro všechny tři uvedené materiály. Zatímco pro Wheelerův model vliv interakčních efektů z počátku roste, ale pro extrémně velká zatížení opět klesá. Při pohledu na poměry vypočtené z původního spektra, se dá říct, že výsledky pro zatížení nad 120% jsou všechny méně reálné, za což pravděpodobně může nemožnost rozřídění napětí v bloku stochasticky. V případě Wheelerova modelu se dá konstatovat, že uvažovaná konstanta M je empiricky měřená hodnota pro konkrétní spektrum s konkrétní hladinou namáhání. Tím se dají vysvětlit zjevné chyby ve výpočtu vlivu retardací při vysokých zatíženích.

Protože výsledky na obrázku 5.3 se jevily nesmyslné, bylo vytvořené ještě jedno zátěžné spektrum, u kterého bylo možno měnit počet cyklů, aniž by docházelo ke

znehodnocení spektra vlivem zaokrouhlování četností zátěžných amplitud u 10x menšího spektra (tabulka 5.3 a 5.4). Pro toto spektrum pak byla počítána zbytková únavová životnost v programu AFGROW. Výsledky jsou zaneseny na obrázku 5.6. Z výsledků vyplývá, že velikost spektra má naprosto klíčový dopad na výsledky z AFGROW. Důvodem je pravděpodobně už uvedený fakt, že program si cykly v blocích „stochasticky“ neroztřídí a tím pádem se nemůže retardace významně projevit.

Je třeba poznamenat, že při počítání zbytkové únavové životnosti tělesa pro železniční oceli pomocí Wheelerova modelu byla brána konstanta pro vysokopevnostní ocel D6AC, proto je možné, že se budou výsledky od skutečnosti lišit. Také je třeba zmínit, že velikost plastické zóny pro oceli železničních dvojkolí nebyla při zatíženích nad 200% podstatně větší než počáteční délka trhliny, nebyly tedy úplně splněny podmínky LELM. Dalším zajímavým faktem je, že AFGROW vypočítá zbytkovou únavovou životnost tělesa během několika málo sekund, i když je výsledkem počet cyklů v řádu desítek milionů (retardační modely by měly počítat přírůstky délky trhliny cyklus po cyklu, což by mělo být spojeno s vyššími výpočetními časy). Není tedy prakticky možné, aby software počítal tak rychle a bral při tom do úvahy vytvořené spektrum cyklus po cyklu.

V duchu těchto uvedených faktů lze konstatovat, že došlo ke splnění zadání této bakalářské práce.

SEZNAM PUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KUNZ, Jiří. *Základy lomové mechaniky*. 2. přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 1994, 172 s. ISBN 80-010-1215-8.
- [2] *Mechanika těles: pružnost a pevnost II*. 4. přeprac. vyd. Brno: CERM, 2006, 262 s. ISBN 80-214-3260-8.
- [3] Základy lomové mechaniky. HUTAŘ, Pavel a Luboš NÁHLÍK. [online]. [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: http://www.student.chytrak.cz/unava/08%20zaklady_LM.pdf
- [4] LAUSCHMANN, Hynek. *Mezní stavy I: únava materiálu*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, 71 s. ISBN 978-80-01-03671-6.
- [5] Manuál k programu NASGRO. [online]. [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <https://vault.swri.org/nasgro/public/logon.asp>
- [6] *Převodník jednotek* [online]. [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.jednotky.cz/tlak/pascal/?hodnota=1>
- [7] *AFGROW* [online]. 2009 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.afgrow.net/about.aspx>
- [8] *Manuál k programu AFGROW*. *AFGROW* [online]. 2009 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.afgrow.net/userarea/default.aspx>
- [9] Podklady z přednášek a cvičení z předmětu Pružnost a pevnost II.
- [10] Databáze materiálů v programu AFGROW. *AFGROW* [online]. 2009 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.afgrow.net/userarea/default.aspx>
- [11] BROEK, David. *Elementary engineering fracture mechanics* [online]. 4th rev. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1986, xiv, 516 s. [cit. 2014-05-12]. ISBN 90-247-2580-1. Dostupné z: http://books.google.cz/books?id=LC4E7OjnhuEC&pg=PA269&lpg=PA269&dq=wheeler+retardation+constant+D6AC&source=bl&ots=bi_VCDegCt&sig=euEOCfBij0pEwAUgTrowwh8PD_8&hl=cs&sa=X&ei=ApNDU9WnF8KjtAaC1YBw&ved=0CEQQ6AEwAw#v=onepage&q=wheeler%20retardation%20constant%20D6AC&f=false
- [12] POKORNÝ, Pavel, data poskytnuta pracovníky UFM AV ČR, v. v. i., duben 214

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	délka trhliny	[m]
A	konstanta v rovnici Parise a Erdogana	[-]
a_0	počáteční délka trhliny	[m]
a_c	kritická délka trhliny	[m]
$a_{ef, ol}$	efektivní délka trhliny při přetížení	[m]
a_{eff}	efektivní délky trhliny	[m]
a_{kon}	konečná délka trhliny	[m]
a_{mon}	je délka trhliny při monotónním zatěžování	[m]
a_{ol}	je délka trhliny v přetěžujícím cyklu	[m]
a_{ovl}	ovlivněná délka od přetěžujícího cyklu	[m]
B	tloušťka tělesa s trhlinou	[m]
C	konstanta ve Walkerově rovnici	[-]
c	počáteční délka trhliny	[m]
$C3, C4, C5, C6$	konstanty v modelu FASTRAN (AFGROW)	[-]
C_f	parametr v modelu Closure	[-]
C_{f0}	hodnota C_f pro $R=0$ v modelu Closure (AFGROW)	[-]
C_p	konstanta pro růstový zákon ve Wheelerově modelu	[-]
C_{th}	parametr zohledňující interakce v NASGRO	[-]
D	počet bloků	[-]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
f	funkce beroucí do úvahy otevírací napětí	[-]
F_0, F_1, F_2, F_3, F_4	korekční koeficienty pro příslušná napětí v NASGRO	[-]
f_I	tvarová funkce v I. Módu namáhání	[-]
K	součinitel intenzity napětí	[MPa.m ^{0,5}]
K_a	amplitude součinitele intenzity napětí	[MPa.m ^{0,5}]
K_{ath}	amplitude prahové hodnoty součinitele intenzity napětí	[MPa.m ^{0,5}]
K_c	kritická hodnota součinitele intenzity napětí	[MPa.m ^{0,5}]
K_{fc}	mezní hodnota maxima cyklu	[MPa.m ^{0,5}]
K_I	součinitel intenzity napětí v I. módu namáhání	[MPa.m ^{0,5}]
$K_{Ipoč.}$	počáteční hodnota součinitele intenzity napětí (kapitola 4.)	[MPa.m ^{0,5}]
$K_{max ol}$	maximální součinitel intenzity napětí v přetěžujícím cyklu	[MPa.m ^{0,5}]
K_{max}	maximální hodnota součinitele intenzity napětí	[MPa.m ^{0,5}]
$K_{max}(eff)$	maximální efektivní hodnota součinitele intenzity napětí	[MPa.m ^{0,5}]

$K_{min}(eff)$	minimální efektivní hodnota součinitele intenzity napětí	[MPa.m ^{0,5}]
K_{ot}	otevřací hodnota součinitele intenzity napětí	[MPa.m ^{0,5}]
K_{red}	redukovaný součinitel intenzity napětí	[MPa.m ^{0,5}]
K_{th}	prahová hodnota součinitele intenzity napětí	[MPa.m ^{0,5}]
L	délka tělesa s trhlinou	[m]
m	konstanta ve Walkerově rovnici	[-]
M	Wheelerův exponent	[-]
$M0$	parametr pro výpočet M – model Hsu (AFGROW)	[-]
n	konstanta ve Walkerově rovnici	[-]
N	počet cyklů	[-]
N_1, N_2, N_3	počty cyklů v bloku (kapitola 4.)	[-]
N_c	celkový počet cyklů do nárůstu trhliny na a_{kon} (kapitola 4.)	[-]
N_{f1}, N_{f2}, N_{f3}	počty cyklů do lomu (kapitola 4.)	[-]
p	konstanta v NASGRO-rovnici	[-]
PHI	parametr zobecněného Willenborgova modelu	[-]
PSX	parametr pro rovinnou deformaci nebo rovinnou napjatost	[-]
q	konstanta v NASGRO-rovnici	[-]
R	součinitel asymetrie cyklu	[-]
r	vzdálenost elementu od kořene trhliny (v polárním ss)	[m]
R_{cut}	parametr modelu Hsu	[-]
R_e	mez kluzu	[MPa]
R_y	velikost plastické zóny	[m]
$R_{y,mon}$	velikost plastické zóny při monotónním zatěžování	[m]
R_{yD6AC}	velikost plastické zóny pro materiál D6AC (kapitola 5.)	[m]
R_{yEA1N}	velikost plastické zóny pro materiál EA1N (kapitola 5.)	[m]
R_{yEA4T}	velikost plastické zóny pro materiál EA4T (kapitola 5.)	[m]
R_{yol}	je velikost plastické zóny vytvořené přetěžujícím cyklem	[m]
S_0	napětí od tahu či tlaku v NASGRO	[MPa]
S_1	napětí od smyku v NASGRO	[MPa]
S_2	napětí od ohybu ve směru tloušťky součásti v NASGRO	[MPa]
S_3	napětí od ohybu ve směru šířky součásti v NASGRO	[MPa]
S_4	napětí v tahu či tlaku v ose kolmé na případ S_0 v NASGRO	[MPa]
SMF	měřítka zatížení v AFGROW	[-]
SOR	Willenborgův parametr	[-]
$U(R)$	funkce vyjadřující efektivní hodnotu ΔK	[-]

v	rychlost růstu únavové trhliny	[m/cyklus]
v_{kc}	rychlost šíření trhliny pro zatěžování konstantním cyklem	[m/cyklus]
W	šířka tělesa s trhlinou	[m]
α	exponent v rovnici Parise a Erdogana	[-]
α_g	součinitel koncentrace napětí – vztažen k neoslabenému průřezu	[-]
α_n	součinitel koncentrace napětí - vztažen k oslabenému průřezu	[-]
ΔK	rozkmit faktoru intenzity napětí	[MPa.m ^{0,5}]
ΔK_c	rozkmit kritické hodnoty faktoru intenzity napětí	[MPa.m ^{0,5}]
ΔK_{ef}	efektivní hodnota rozkmitu součinitele intenzity napětí	[MPa.m ^{0,5}]
ΔK_{th}	rozkmit prahové hodnoty faktoru intenzity napětí	[MPa.m ^{0,5}]
ΔK_{tr}	prahová hodnota rozkmitu součinitele intenzity napětí pro R=0	[MPa.m ^{0,5}]
$\Delta\sigma$	rozkmit napětí	[MPa]
θ	úhel natočení (v polárním s.s.)	[rad]
ρ	poloměr zakřivení vrubu	[m]
σ	napětí	[MPa]
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	nominální napětí (kapitola 4.)	[MPa]
σ_a	amplituda napětí	[MPa]
σ_{ai}	amplitudy napětí (kapitola 5.)	[MPa]
σ_m	střední hodnota napětí	[MPa]
σ_{max}	maximální napětí	[MPa]
σ_{min}	minimální napětí	[MPa]
$\sigma_{ol,p}$	otevírací napětí pro plastickou zónu	[MPa]
σ_x	x-ová složka tenzoru napětí	[MPa]
σ_y	y-ová složka tenzoru napětí	[MPa]
τ_{xy}	smyková složka tenzoru napětí	[MPa]

SEZNAM PŘÍLOH:

DVD obsahuje:

- Elektronickou verzi této bakalářské práce ve formátu .pdf.
- Obrázky užití v této bakalářské práci.