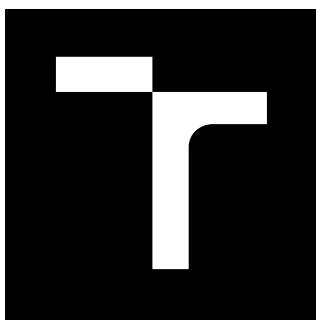




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**POSTUP STANOVENÍ ZBYTKOVÉ ÚNAVOVÉ ŽIVOTNOSTI
VLAKOVÉ NÁPRAVY**

PROCEDURE OF RESIDUAL FATIGUE LIFETIME ASSESMENT OF RAILWAY AXLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Scholz

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Luboš Náhlík, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	David Scholz
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Luboš Náhlík, Ph.D.
Akademický rok:	2015/16

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:

Postup stanovení zbytkové únavové životnosti vlakové nápravy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je provést literární rešerši a na jejím základě popsat obvyklý postup(y) stanovení zbytkové únavové životnosti vlakové nápravy.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je seznámit se s obvyklými postupy stanovení zbytkové únavové životnosti vlakových náprav, tyto popsat a provést ukázkou stanovení zbytkové únavové životnosti modelové nápravy na základě zadaných vstupních parametrů.

Seznam literatury:

Anderson, T.L.: Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, Second Edition, CRC Press, 1994.

Schijve, J.: Fatigue of structures and materials, New York: Springer, 2008.

NASGRO, Fracture Mechanics and Fatigue Crack Growth Analysis Software, Reference manual, 2002.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je představit způsoby výpočtu zbytkové únavové životnosti vlakové nápravy jdoucí nad rámec mezinárodních norem. Tyto postupy jsou vyžadovány provozovateli pro zvýšení bezpečnosti vlakové dopravy. Jedná se především o pohled lomové mechaniky na nápravu jako na součást s iniciační trhlinou či defektem. Rešeršní část se zabývá definicemi lomové mechaniky a postupy popisujícími růst trhliny s využitím nejpoužívanější koncepce součinitele intenzity napětí. Navazující částí je také popis postupu odhadu životnosti součásti od samotného zjištění tzv. charakteristického zátěžového bloku až po stanovení počtu bloků, které náprava vydrží, než dojde k lomu. Tento postup je rovněž předveden na příkladu.

ABSTRACT

The goal of the bachelor's thesis is to present options to calculate residual life of a railway axle from more sophisticated points of view. These methods are requested by railway operators to ensure higher safety of train traffic. The main issue is the perspective of fracture mechanic, considering railway axle as a component with an initial crack or other defect. The theoretical part deals with basic definitions of fracture mechanics and processes describing crack propagation, using conception of stress intensity factor, which is the most used nowadays. Following part also describes a fatigue life estimation process in real. This process is demonstrated using an example after that.

KLÍČOVÁ SLOVA

vlaková náprava, únava, trhlina, zbytková únavová životnost, lomová mechanika, součinitel intenzity napětí, zátěžový cyklus

KEYWORDS

railway axle, fatigue, crack, lifetime, fracture mechanics, stress intensity factor, load cycle

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SCHOLZ, David. *Postup stanovení zbytkové únavové životnosti vlakové nápravy*. Brno, 2016. Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Luboš Náhlík, Ph.D.



Bakalářská práce byla vypracována ve spolupráci s Ústavem fyziky materiálů AV ČR, v. v. i.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji mému vedoucímu panu docentu Náhlíkovi za odborné vedení a konzultace, i za možnost nahlédnout do laboratoře vysokocyklové únavy, jež byla motivací a ukázkou propojení teorie s praxí. Děkuji všem, kteří mě při studiu podporovali.

PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 27.5.2016

.....

podpis

OBSAH

1 ÚVOD	8
2 MOTIVACE K ŘEŠENÍ PROBLÉMU	8
3 CÍLE PRÁCE	8
4 POUŽÍVANÉ POSTUPY PRO STANOVENÍ ÚNAVOVÉ ODOLNOSTI ŽELEZNIČNÍCH NÁPRAV	9
4.1 POSTUPY VYCHÁZEJÍCÍ Z MEZINÁRODNÍCH NOREM	9
4.2 POSTUPY VYŽADOVANÉ PROVOZOVATELI NAD RÁMEC PLATNÝCH NOREM	10
5 LOMOVÁ MECHANIKA.....	10
5.1 HISTORIE ZKOUŠENÍ VLAKOVÝCH NÁPRAV	10
5.2 HISTORIE LOMOVÉ MECHANIKY	11
5.3 ÚNAVA MATERIÁLU	12
5.3.1 ROZDĚLENÍ ÚNAVOVÉHO PORUŠENÍ	12
5.3.2 ETAPY ÚNAVOVÉHO ŽIVOTA.....	13
5.4 ROZDĚLENÍ LOMOVÉ MECHANIKY	14
5.5 LINEÁRNÍ ELASTICKÁ LOMOVÁ MECHANIKA.....	14
5.5.1 MÓDY ZATĚŽOVÁNÍ	15
5.5.2 SOUČINITEL INTENZITY NAPĚTÍ K	16
5.5.3 TVAROVÁ FUNKCE	17
5.5.4 ROVINNÁ NAPJATOST VERSUS ROVINNÁ DEFORMACE.....	18
5.5.5 PLASTICKÁ ZÓNA NA ČELE TRHLINY	19
6 ZÁTĚŽOVÉ CYKLY A JEJICH ZHODNOCENÍ	19
6.1 CHARAKTERISTIKA ZÁTĚŽOVÉHO CYKLU	20
6.1.1 PARAMETRY ASYMETRIE CYKLU.....	21
6.2 RYCHLOST RŮSTU TRHLINY V ZÁVISLOSTI NA K	22
6.2.1 EMPIRICKÉ ROVINCE POPISUJÍCÍ RYCHLOST ŠÍŘENÍ TRHLINY	22
6.2.2 UZAVÍRÁNÍ TRHLIN A EFEKTIVNÍ SOUČINITEL INTENZITY NAPĚTÍ ...	23
6.2.3 PROBLÉM POUŽITÍ ΔK_{EFF} V PROMĚNNÉM CYKLU	24
6.2.4 PROMĚNNÉ ZATÍŽENÍ V CYKLU	25
6.3 VYHODNOCENÍ NEPRAVIDELNÝCH ZÁTĚŽOVÝCH CYKLŮ	27
6.3.1 SBĚR DAT.....	27
6.3.2 SETŘÍDĚNÍ DAT	27
6.3.3 METODY NEUVAŽUJÍCÍ POŘADÍ CYKLU	28
6.3.4 METODY UVAŽUJÍCÍ POŘADÍ CYKLU	29

7 RUTINNÍ POSTUPY KONTROLY NÁPRAV	29
7.1 IDENTIFIKACE TRHLINY, NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY	30
7.1.1 ZKOUŠKA ULTRAZVUKEM	30
7.1.2 MAGNETICKÁ PRÁŠKOVÁ POLÉVACÍ METODA.....	31
8 PŘÍKLAD VÝPOČTU ZBYTKOVÉ ÚNAVOVÉ ŽIVOTNOSTI	31
8.1 ZADÁNÍ PŘÍKLADU	31
8.2 VÝPOČET	32
8.3 ZÁVĚR PŘÍKLADU	35
9 ZÁVĚR.....	35
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ	36
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	38

1 ÚVOD

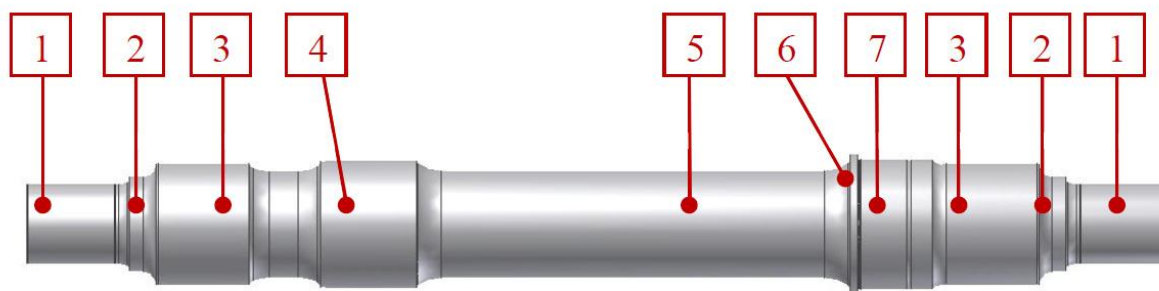
„Bez hranic se lidská díla zdokonalují a stávají se správnějšími; navěky se stále více přibližují a podobají samotnému rozumu lidskému. Avšak od počátku jejich zdají se býti dvě řady: jedna, v níž postupuje konstruktivní tvořivost člověka a všechny velké realizace jeho podle zákona příčinnosti a správnosti; a druhá řada poruch, která je nezákonná a bezpříčinná, zplozená zmatkem, a proto je člověku věčně neovládnutelná, neboť je to řada nevědomí a nepořádku. Oběma těmito řadami prochází neustále život, prodloužení jedné řady znamená prodloužení druhé, vždy nová dokonalost zavádí poruchy nově možné; jsou-li lidská díla divy, budou vždy podléhati zázrakům zkázy. Ale ani tento poměr není jakýmsi zákonem zániku; kdyby byl zákonem, dovedl by jej člověk ovládnouti, ale neovládne ho.“ (Karel a Josef Čapkovi).

2 MOTIVACE K ŘEŠENÍ PROBLÉMU

Během dvacátého století se dostalo obrovského rozvoje nejen společnosti ale také techniky. V druhé polovině století začaly jezdit první rychlovlaky a rychlost se tak oproti „Wöhlerovské“ době několikanásobně zvýšila. Tento trend pokračuje i v tomto století a společně s ním rostou také nároky na technickou stránku vlaků. Rychlost některých souprav dnes dosahuje i 500 km/h. Požaduje se rychlost, ale zároveň i bezpečnost. Tyto proti sobě jdoucí požadavky dodávají důležitost studiu únavy součástí nejen z klasického pohledu na součást jako celek, ale také z pohledu na velmi malé mechanické změny v materiálu tělesa, které svým extrémním počtem opakování a náročným provozním podmínkám vedou ke katastrofálním následkům.

3 CÍLE PRÁCE

Železniční dvojkolí je členem nesoucím celou hmotnost vozu s nákladem, které je navíc zatíženo četnými rázy od nerovností kolejí, výhybek apod. To vše probíhá za rotace, jedná se tedy o cyklicky namáhaný člen a je potřeba počítat s mezním stavem únavy. Dvojkolí se skládá z nápravy a dvou kol. V této práci se budeme zabývat pouze životností samotné nápravy. Náprava je plný nebo vrtaný (dutý) hřídel, s několika sedly pro nalisování kol, ložisek, u některých typů dále kotoučových brzd a hnaných ozubených kol. Tato sedla mají různé průměry a jsou oddělena dřívky s přechodovými rádiusy pro minimalizaci koncentrace napětí v těchto místech. Avšak i přesto se jedná o nejkritičtější místa na nápravě, kde při špatném návrhu či zanedbání údržby může dojít ke vzniku a následnému šíření magistrální trhliny až do kritické délky a finálního lomu nápravy. Cílem této bakalářské práce je tedy představit postup, jakým lze zmiňovanému kritickému stavu předejít, jak přistupovat k nápravě, jako k tělesu s vadami a ukázat jakým způsobem může být vytvořen podklad pro stanovení servisních intervalů provozovatele železničních vozidel.



obr. 1 - ukázková náprava pro tlakový motor - (1) - válcová plocha pro ložiska, (2) - sedla pro ložiskové těsnící kroužky, (3) - sedla kol, (4) - sedlo pro ozubené kolo, (5) - dřík, (6) - osazení k axiálnímu zajištění tlakového ložiska, (7) - sedlo pro tlakové ložisko - [8]

4 POUŽÍVANÉ POSTUPY PRO STANOVENÍ ÚNAVOVÉ ODOLNOSTI ŽELEZNIČNÍCH NÁPRAV

Správné dimenzování součástí je běžný konstruktérský požadavek. Součást má být odolná ale zároveň ne předimenzovaná. Zbytečně velké rozměry a hmotnost přinášejí finanční náklady jak pro výrobu, tak pro samotný provoz. V problematice vlakových náprav se k nalezení optimálního řešení používají následující postupy.

4.1 POSTUPY VYCHÁZEJÍCÍ Z MEZINÁRODNÍCH NOREM

Železniční dvojkolí je hlavní komponenta, která vede vlakovou soupravu po železniční. Aby byla zajištěna bezpečnost cestujících, bylo pro problematiku železničního dvojkolí vytvořeno několik norem, jejichž dodržování je provozovateli vlaků či drážními úřady vyžadováno. Dvojkolí sestává z nápravy a dvou kol. Nápravy tedy nesou kromě hmotnosti celého vozu a nákladu také samotná kola. Fyzikálně to znamená, že náprava je zatížena silami od vozu, reakčními silami od kol, a také silami od kol vznikajícími při brzdění a průjezdu zatáčkou, a příslušnými reakcemi vozu. Poháněná náprava je navíc zatížena kroutícím momentem od pohonné jednotky. Všechny nápravy jsou dominantně namáhány ohybem za rotace. Platné normy zabývající se nápravami jsou ČSN EN 13103 pro nepoháněné nápravy a ČSN EN 13104 pro poháněné nápravy. Tyto normy uvažují nápravu jako nosník, definují příslušné síly působící na střednici a porovnávají provozní napětí k meznímu stavu únavy materiálu. Hodnota meze únavy jednotlivých materiálů je v normě rovněž stanovena a to rozdílně s ohledem na nápravy vrtané/plné a s možností jisté ochrany proti nárazům a korozi, nebo bez ní. [8]

Nejčastějším poruchovým jevem cyklicky zatěžovaného tělesa je vznik a šíření trhliny. Provedený výpočet podle normy by měl zaručovat, že se trhlina v materiálu neobjeví, neboť návrh počítá s trvalou únavovou životností - 10^7 cyklů. Tento postup uvažuje materiál bez počátečního defektu. Náprava ve svém životním cyklu ale může být vystavena mimořádným událostem, jako je náraz kamene, či jiného předmětu, který může způsobit na nápravě vryp a iniciaci trhliny. Rovněž mikrotrhliny vzniklé při výrobě mohou hrát v případě nepříznivého sledu náhod významnou roli. Je tedy patrné, že pro maximální bezpečnost železniční dopravy je nezbytná pravidelná kontrola náprav. Provádí se defektoskopické zkoušky, jež jsou schopny odhalit trhlínu od určité velikosti, dle typu a způsobu provedení zkoušky. Proto se servisní intervaly stanovují vždy tak, že se předpokládá existence iniciační trhliny o délce odpovídající

rozlišovací schopnosti použité metody. To je úkol, na který již stávající normy nestačí, a provozovatelé tak vyžadují další postupy pro zvýšení bezpečnosti provozovaných náprav.

4.2 POSTUPY VYŽADOVANÉ PROVOZOVATELI NAD RÁMEC PLATNÝCH NOREM

Normy, zmíněné v kapitole 4.1 pojednávají především o „běžné“ vysokocyklové únavě, kterou definují za pomoci Wöhlerovy křivky. Praxe však ukazuje, že tento postup nemusí být dostačující. Jak bylo zmíněno v předchozím bodě, nelze uvažovat dokonalý materiál, proto je potřeba do výpočtu životnosti zahrnout defekty. V této práci se budeme zabývat defektem typu trhlinka, neboť se jedná o nejčastější poruchu, která navíc přímo souvisí s vysokocyklovým zatížením. Uvažujme tedy běžnou nepoháněnou vlakovou nápravu. Působíště a velikost sil působících na nápravu můžeme vypočítat za pomoci výše zmíněných norem. Dále těmito silami zatížíme 3D model nápravy v programu, používajícím konečnoprvkovou metodu výpočtu, a pomocí něj určíme nebezpečná místa na nápravě. Iniciační trhlinku uvažujeme právě v těchto místech a provádíme analytický výpočet za pomoci dále popsaného postupu.

Disciplína, která se zabývá chováním tělesa s trhlinkou včetně cyklického zatížení, v rámci které existují postupy umožňující stanovit zbytkovou únavovou životnost tělesa s trhlinkou, se nazývá lomová mechanika.

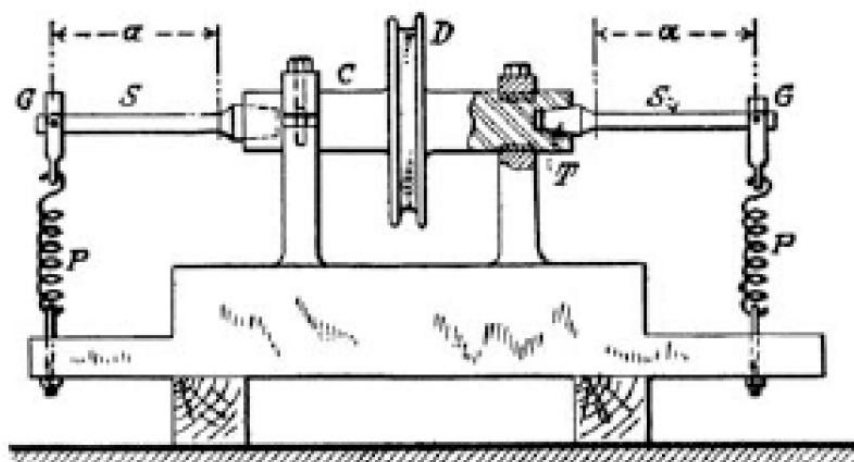
5 LOMOVÁ MECHANIKA

Průmyslová revoluce přinesla masivní používání oceli v mnoha odvětvích. Ocel je pružná a pevná v tahu. Její používání však bylo doprovázeno nežádoucími jevy - docházelo k praskání konstrukcí, a to i když zatížení bylo daleko pod mezí pevnosti. [1]

Do železniční historie se černým písmem zapsala událost ze dne 8.5.1842, kdy na trati Paříž-Versailles došlo k havárii vlakové soupravy. Příčinou neštěstí bylo prasknutí nápravy u první lokomotivy. Přestože rychlost vlaku byla, z dnešního pohledu pouze, 66 km/h, následky byly katastrofální. Tato událost spustila po Evropě vlnu bezpečnostních opatření na železnici, a iniciovala rozsáhlejší výzkum této problematiky. [7]

5.1 HISTORIE ZKOUŠENÍ VLAKOVÝCH NÁPRAV

První řádný výzkum příčin lomů železničních náprav provedl August Wöhler v polovině 19. století. Vzorek testoval ohybem za rotace, tedy stejným způsobem jako je namáhána skutečná náprava. Zjistil, že když střídavé napětí má pouze nepatrně menší hodnotu než statické lomové napětí, pak stačí několik zatěžovacích cyklů a dojde k lomu. Postupným snižováním hodnoty střídavého napětí rostl počet cyklů vedoucích k lomu. Dostal se až k hodnotě, kdy již lom nenastal vůbec. Tato hodnota byla nazvána mezí únavy materiálu a výstupem výzkumu byla dodnes používaná Wöhlerova křivka. (viz kap. 5.3.1)



obr. 2 - zařízení pro únavové testování podle Wöhlera - [10]

5.2 HISTORIE LOMOVÉ MECHANIKY

Prvním náznakem výzkumu, týkajícího se lomové mechaniky, byl experiment Leonarda da Vinciho, který měřil pevnost železných drátů. Jeho zjištění bylo následující: čím delší je drát, tím má menší pevnost. Tento fakt odkazuje na vyšší pravděpodobnost výskytu poškození ve větším objemu materiálu. O kvantitativní popis vztahu mezi pevností a defektem se pokusil Griffith, jeho koncept porovnání deformační energie s povrchovou energií však fungoval pouze pro dokonale křehká tělesa.

Nejnámější událostí, která podnítila rozvoj lomové mechaniky, byla bezesporu Druhá světová válka, kdy se několik lodí třídy Liberty se svařovaným trupem náhle rozlomilo na dvě části.

Po válce vedl výzkum v Námořní vývojové laboratoři USA Irwing. Práce jeho týmu rozšířila Griffithův přístup na kovy a dále používala Westergaardovu techniku pro zjištění napětí a deformace na čele trhliny a představila jediný parametr kterým lze daný stav popsat, později znám jako *součinitel intenzity napětí*. V té době se už problémem zabývalo mnoho vědců a aplikace současného poznání přinášelo vysvětlení různých havárií. V šedesátých letech Paris a kolektiv popsali růst únavové trhliny za pomoci lomové mechaniky. Jejich poznatky však byly tehdejšími inženýry odmítány.

Šedesátá léta byla i přesto zlomová. Předpoklady velkých plastických deformací nestačily a vědci otočili svou pozornost na zplastizovanou oblast na čele trhliny. Byly tak položeny základy lineárně elastické lomové mechaniky.

Další kritérium šíření trhliny navrhl Wells. Opíralo se o popis posuvu lící trhliny, obzvláště použitelné u tvárnějších materiálů, kde použití LELM nebylo vhodné. Dnes je známo jako kritické rozevření trhliny COD. Nachází uplatnění především u svařovaných konstrukcí.

Deformaci nelineárně elastickou popsal Rice integrálem, známým jako J-integrál. Tento se hojně využívá pro vysoce namáhané součásti se značnou plasticitou v okolí vrcholu předpokládané trhliny či defektu. Existuje jednoznačná relace mezi elastickou částí J-integrálu a součinitelem intenzity napětí.

Vztah mezi J-integrálem a COD demonstroval Shih, a nadále se ukázalo jako nejúčinnější použití kombinace obou přístupů.

Další postup výzkumu se orientuje především na zdokonalování již objevených metod popisu lomové mechaniky a také na pozorování a vytvoření věrohodných modelů chování nejrůznějších materiálů, které jsou v dnešní době čím dál populárnější. [1]

5.3 ÚNAVA MATERIÁLU

Únava materiálu je časový proces, kdy se s přibývajícím počtem opakování zatěžování (cyklické zatěžování) v tělese kumuluje poškození. Toto poškození vede ke vzniku iniciační trhliny, jejímu růstu až do kritické velikosti a lomu součásti. Křivka znázorňující závislost zatěžovací amplitudy na počtu cyklů do lomu se nazývá Wöhlerova křivka (viz kap. 5.1) (obr. 3). Nutný předpoklad pro možnost popisu únavy součásti za pomoci Wöhlerovy křivky je hladký materiál bez počátečních defektů, především bez iniciačních trhlin.

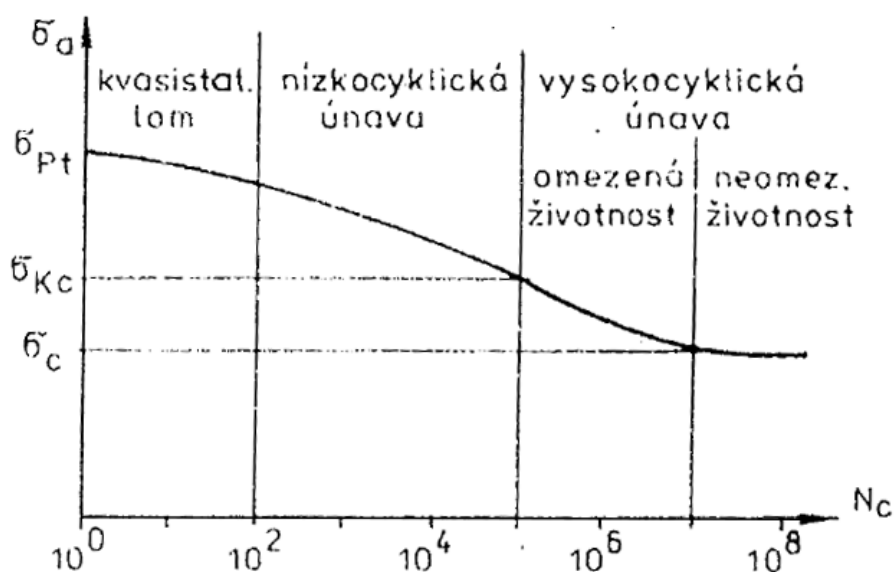
5.3.1 ROZDĚLENÍ ÚNAVOVÉHO PORUŠENÍ

Podle historie zatěžování a materiálových změn před samotným lomem rozlišujeme: [2]

- kvazistatický lom - 10^0 - 10^2 cyklů - velké plastické deformace, součást zatěžována nad mezní stav pružnosti, nepřípustné pro inženýrské aplikace,
- nízkocyklová únava - 10^2 - 10^5 cyklů - plastická deformace probíhá ve znatelné části tělesa,
- vysokocyklová únava - 10^5 - ∞ cyklů - plastická deformace probíhá pouze lokálně, v mikroskopickém měřítku.

Oblast vysokocyklové únavy dále rozdělujeme na:

- oblast s omezenou životností - 10^5 - 10^7 cyklů - kdy je únavová křivka stále klesající, tedy větší počet cyklů znamená lom součásti při nižší amplitudě zatížení,
- oblast s neomezenou životností - 10^7 - ∞ cyklů - kdy je únavová křivka konstantní, tedy lom nenastává. Mezní hodnotu nazýváme mez únavy σ_c .

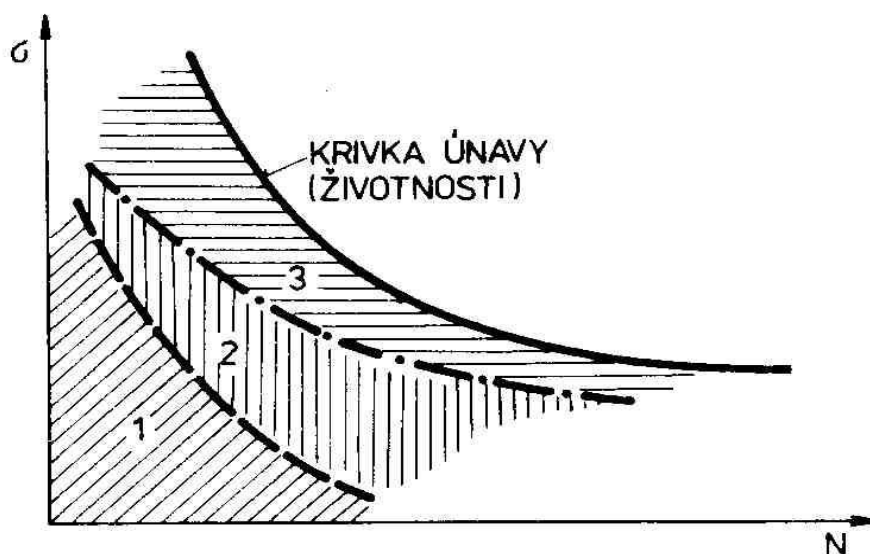


obr. 3 - Wöhlerova křivka - [11]

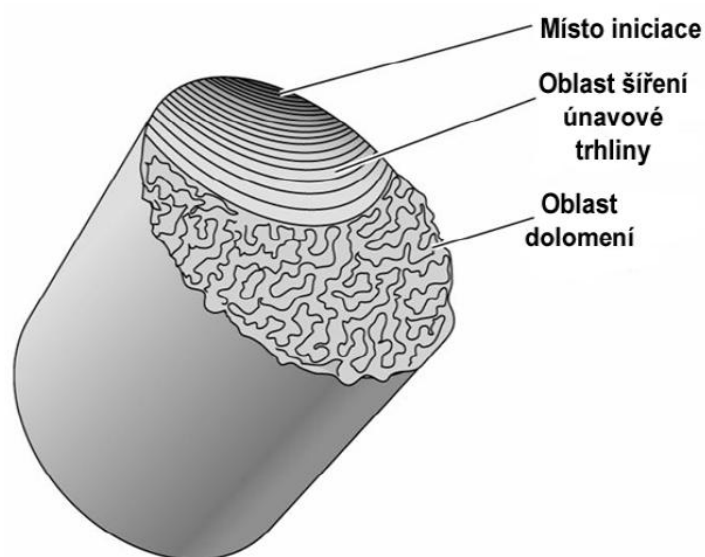
5.3.2 ETAPY ÚNAVOVÉHO ŽIVOTA

Únavový život cyklicky namáhané součásti lze dle [9] a [10] rozdělit do tří základních částí:

1. změna mechanických vlastností - změny probíhají v celém objemu tělesa, nejvýrazněji se však promítnou na povrchové vrstvě [2],
2. vznik únavových trhlin - v místech koncentrace plastické deformace může vzniknout nespojitost [2],
3. šíření únavových trhlin - probíhá nejprve v strukturálním měřítku (z vnějšku nepozorovatelné), dále se rozšíří na trhlinu znatelně větší než je struktura a zde ji můžeme pozorovat a popisovat metodami lomové mechaniky (viz kap. 5.4 a 5.5) [2]. Poté trhlina doroste kritické délky, kdy nastává lom (viz obr. 5).



obr. 4 - graf vymežující tři etapy únavového života - [9]

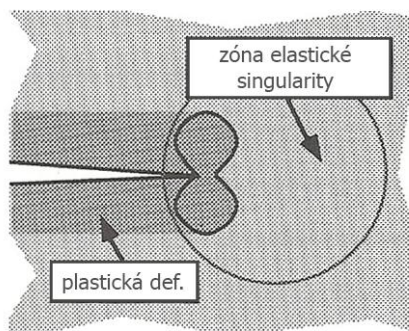


obr. 5 - schéma únavového lomu hřídele - [10]

5.4 ROZDĚLENÍ LOMOVÉ MECHANIKY

Lomová mechanika se dělí na dva základní podobory: [13]

- lineární elastická lomová mechanika - LELM
energetický přístup: Griffithova koncepce, Irwingova koncepce, hnací síla trhliny, J - integrál, Sihova koncepce
napětíový přístup: K - součinitel intenzity napětí
- elastoplastická lomová mechanika - EPLM
 COD - kritické rozevření trhliny, J - integrál



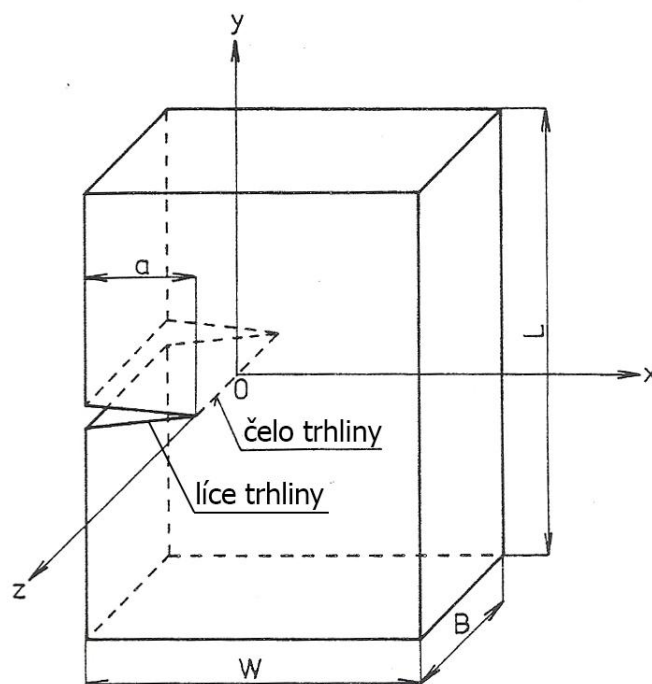
obr. 6 - zóna vlivu elastické singularity
vs. zplastizovaná oblast - [1]

Použití jednotlivé z nich je dáno porovnáním velikosti zplastizované oblasti na čele trhliny ku celkové délce trhliny. Pro použití LELM platí podmínka, že zplastizovaná oblast musí být výrazně menší než délka trhliny - v takovém případě lze plastickou oblast z globálního pohledu zanedbat a uvažovat lineárně pružný materiál dle Hookova zákona. V opačném případě je potřeba použít elastoplastickou lomovou mechaniku [13]. Zdroj [1] porovnává zplastizovanou oblast na čele trhliny se zónou elastické singularity, která musí být znatelně větší pro možnost použití LELM (obr. 6).

5.5 LINEÁRNÍ ELASTICKÁ LOMOVÁ MECHANIKA

V této práci budeme uvažovat pouze velmi malou zplastizovanou oblast na čele trhliny, tedy využijeme k výpočtu a popisu tělesa s trhlinou LELM a z nabízených přístupů volíme napětíový přístup, tedy součinitel intenzity napětí K , který je zdaleka nejpoužívanější.

Následující obrázek definuje některé parametry tělesa s trhlinou:



obr. 7 - těleso s trhlinou - [3] upraveno

W - šířka tělesa

L - délka tělesa

B - tloušťka tělesa

a - délka trhliny

5.5.1 MÓDY ZATĚŽOVÁNÍ

Pro přehlednost byly popsány tři základní módy zatěžování (ostatní stavy mohou být kombinací těchto tří, přičemž platí princip superpozice), viz obr. 8. Rozevírání trhliny je dáno velikostí příslušné složky tenzoru napětí před čelem trhliny. Módy byly označeny římskými číslicemi I, II, III, jsou to:

MÓD I

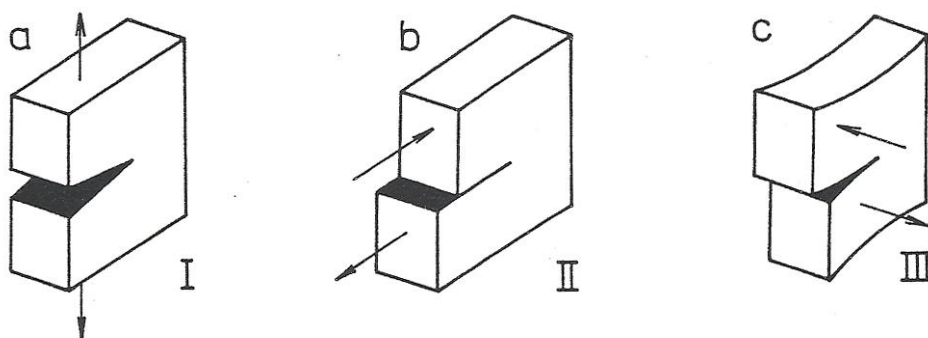
Tahový mód je charakterizován silou působící kolmo na rovinu lomu, tj. ve směru osy y. Rozhodující složkou tenzoru napětí je zde σ_y .

MÓD II

Rovinný smykový mód je charakterizován silami působícími ve směru šíření trhliny, tj. ve směru osy x. Rozhodující složka tenzoru napětí je τ_{yx} .

MÓD III

Antirovinný smykový mód je charakterizován silami působícími rovnoběžně s čelem trhliny, tj. ve směru osy z. Rozhodující složkou tenzoru napětí je τ_{yz} .

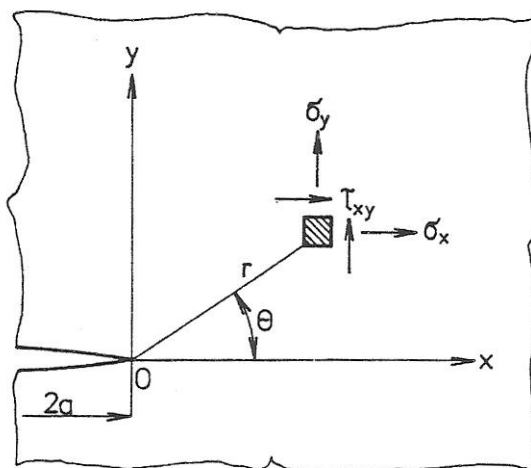


obr. 8 - zatěžovací módy tělesa s trhlinou, a - tahový, b - smykový, c - smykový antirovinný - [3]

5.5.2 SOUČINTEL INTENZITY NAPĚTÍ K

Dle [3] je součinitel intenzity napětí K nejpoužívanější veličinou pro popis rozdělení napětí před vrcholem trhliny, zahrnující jak velikost a způsob vnějšího zatížení, tak i tvar tělesa a vrubu. Koncept K -faktoru, jak se také někdy tento nazývá, převádí vnímání cyklu ve smyslu napětí-čas na součinitel intenzity napětí-čas. Výhodou tohoto převodu je, že nyní můžeme popsat stav tělesa s trhlinou za pomoci jediného parametru, který zahrnuje napětí v místě trhliny a její délku. Na základě tohoto můžeme popsat více stavů s různými napětími a délkami trhlin totožnou hodnotou K , a snadněji tak klasifikovat stav, ve kterém se těleso nachází. Zdroj [1] připomíná, že K je pouze aproximací skutečnosti.

POPIS POLE NAPĚTÍ PŘED VRCHOLEM TRHLINY ZA POMOCÍ SOUČiniteLE INTENZITY NAPĚTÍ



obr. 9 - napětí v blízkosti trhliny - nekonečně velké těleso s centrální trhlinou - [3]

Předpokládejme rovinnou napjatost (viz. 5.5.4), platí, že $\sigma_z = 0$. Napětí prvku v blízkosti trhliny je znázorněno na obr. 9. Prvek se nachází ve vzdálenosti r od čela trhliny, pod úhlem θ od vodorovné osy, tedy směru šíření trhliny. Uvažujeme elastický, izotropní materiál. Pro napětí prvku podle [14] platí:

$$\sigma_x = \frac{\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3 \cdot \theta}{2} \right] \quad (5.1)$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3 \cdot \theta}{2} \right] \quad (5.2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r}} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3 \cdot \theta}{2} \quad (5.3)$$

Dosazením $\theta = 0$ do rovnic, dostaneme:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r}} \quad (5.4)$$

Přibližováním se k čelu trhliny dostáváme limitu pro r jdoucí k nule:

$$\sigma_x = \sigma_y = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r}} = \infty \quad (5.5)$$

Na čele trhliny je tedy teoreticky nekonečné napětí. Tento výstup z rovnice ukazuje skutečnost, že na čele trhliny je singularita napětí. Takovýto popis trhliny je značně nepraktický pro další výpočty, proto se definuje součinitel intenzity napětí K :

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \sigma_y \quad (5.6)$$

Tato definice platí pro zatěžovací mód I, pro módy II a III je shodná, s rozdílem, že místo σ_y se dosadí napětí charakteristické danému módu (viz kap. 5.5.1). [3]

Dosazením odvozeného napětí na čele trhliny (rov. 5.4) do rov. 5.6 dostáváme vztah pro součinitel intenzity napětí v tahovém módu nekonečně dlouhé a široké desky s centrální trhlinou (obr. 9):

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r}} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot r} = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (5.7)$$

Obecně lze pole napětí v okolí trhliny vyjádřit jako:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r}} \cdot f_{ij} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r}} \cdot f_{ij} + \frac{K_{III}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot r}} \cdot f_{ij} \quad (5.8)$$

kde a je délka trhliny, σ_{ij} je tenzor napětí a f_{ij} je známá funkce.

5.5.3 TVAROVÁ FUNKCE

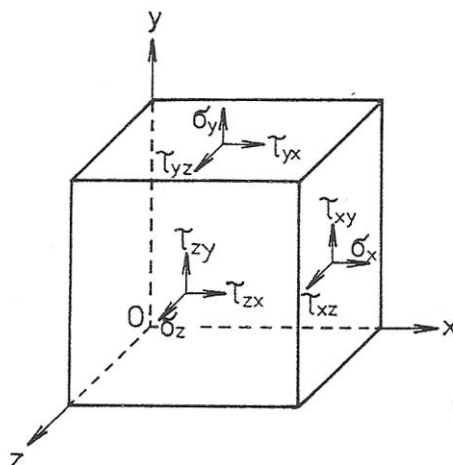
Tvarová funkce Y koriguje hodnotu součinitele napětí s přihlédnutím ke tvaru součásti a převážším poměru délky trhliny k charakteristickému rozměru součásti. Funkce Y je tedy nejčastěji funkcí poměru $\left(\frac{a}{W}\right)$, viz obr. 7. Do výpočtu součinitele intenzity napětí se tvarová funkce začleňuje následujícím způsobem:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot Y_I \quad (5.9)$$

pro tahový mód I, obdobně pro mód II a III.

Předpisy tvarových funkcí pro různé konfigurace tělesa s trhlinou lze nalézt v literatuře, příručkách, nebo je lze určit numericky za pomoci MKP. [13]

5.5.4 ROVINNÁ NAPJATOST VERSUS ROVINNÁ DEFORMACE



obr. 10- napětí elementární krychle tělesa - [3]

O rovinné napjatosti nebo deformaci mluvíme tehdy, pokud se jedná o těleso se dvěma rozměry výrazně většími než třetím (ploché těleso). Podmínkou je, že zatížení působí v rovině dvou větších rozměrů, xy . Rozlišujeme tedy: [12]

- rovinnou napjatost (RN) - napětí leží v jedné rovině, na povrchu tělesa je nulové, neboť deformace je možná

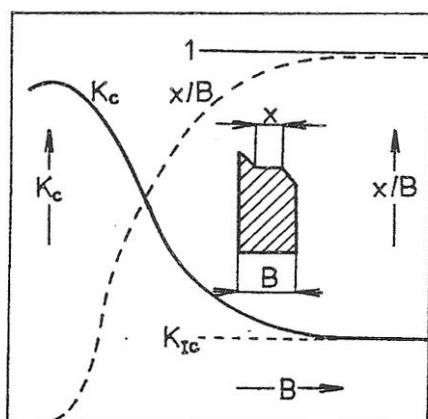
$$\sigma_z = 0, \varepsilon_z \neq 0$$

- rovinnou deformaci (RD) - těleso se z konstrukčních či velikostních důvodů nemůže ve třetím směru deformovat, deformace tedy probíhá pouze rovinně, vzniká trojosé napětí

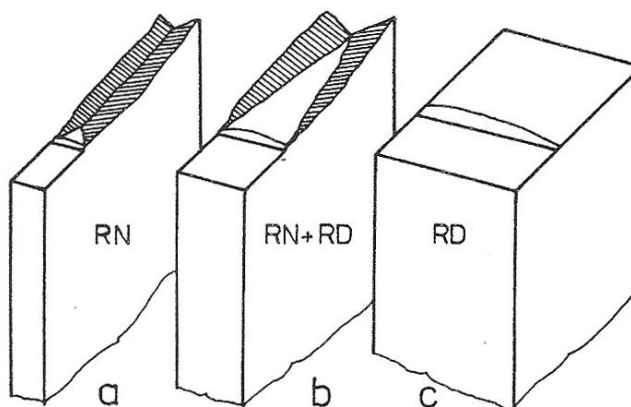
$$\varepsilon_z = 0, \sigma_z \neq 0$$

Typ rovinné úlohy závisí nejvíce na třetím rozměru tělesa, můžeme říci na jeho tloušťce. Pro tělesa tenká platí, že jsou schopna deformace ve třetím směru (z), a řadíme je proto do kategorie rovinných úloh s rovinnou napjatostí. Tělesa větší tloušťky se deformovat nemohou, proto patří do kategorie rovinné deformace. Mezi těmito dvěma stavy není ostrý přechod, pokud však chceme užít výhod RN a RD, musíme těleso do jedné kategorie zařadit podle převládající vlastnosti.

Bylo zjištěno, že tělesa tvarově odpovídající úloze rovinné napjatosti (RN) mají přibližně 3x větší lomovou houževnatost než tělesa odpovídající rovinné deformaci, jak je patrné z grafu (obr. 11). Jejich odlišná napjatost způsobuje i odlišnou morfologii lomu (obr. 12), a to v podobě šikmého lomu. Lom RD je plochý. Jak již bylo řečeno, těleso nemusí jednoznačně spadat do jedné kategorie (obr. 12-b). [3]



obr. 11 - závislost lomové houževnatosti na šířce tělesa - [3]



obr. 12 - šikmý (RN) a plochý (RD) lom - [3]

5.5.5 PLASTICKÁ ZÓNA NA ČELE TRHLINY

Znalost plastické zóny na čele trhliny je pro nás důležitá pro zkoumání dalšího růstu trhliny. Nejdůležitější parametr plastické zóny je její hloubka w od čela trhliny ve směru jejího růstu. Rozlišujeme případ rovinné napjatosti a rovinné deformace, pro hloubku plastické zóny jednotlivé z nich platí: [2]

pro rovinnou napjatost (RN)	$w = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_k} \right)^2$ (5.10)
pro rovinnou deformaci (RD)	$w = \frac{1}{3\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_k} \right)^2$ (5.11)

Tyto hodnoty jsou pouze teoreticky vypočtené a neodpovídají přesně skutečné velikosti plastické zóny. I přesto jsou pro nás důležité, neboť je využijeme pro ověření použitelnosti LELM pro daný konkrétní případ zatížení tělesa s trhlinou. Podmínka nutná pro možnost použití LELM je porovnání délky trhliny s poloměrem plastické zóny. Musí platit, že plastická zóna je výrazně menší než délka trhliny a zbývající ligament, obvykle se udává:

$$w < 0,1 \cdot a \quad (5.12)$$

Tento poměr je pouze přibližný, v praxi může LELM fungovat i pro méně přísný poměr. [6]

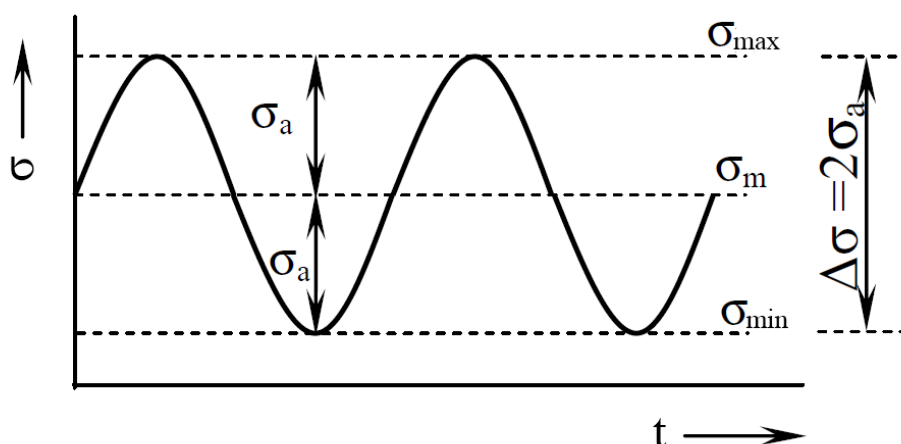
6 ZÁTĚŽOVÉ CYKLY A JEJICH ZHODNOCENÍ

V šedesátých letech minulého století demonstroval Paris spolu s kolektivem, že lomová mechanika je užitečným nástrojem k popisu růstu únavové trhliny. Teorie lomové mechaniky je založena na popisu podobnosti (plastické oblasti) skutečných podmínek u vrcholu trhliny pomocí jediné veličiny - součinitele intenzity napětí, neboli K-faktoru. Výhoda tohoto konceptu je, že rychlost šíření trhliny a zbývající doba do lomu není závislá pouze na délce trhliny,

a jedinou hodnotou K lze popsat nekonečně mnoho stavů o různých napětích a délkách trhliny. [1]

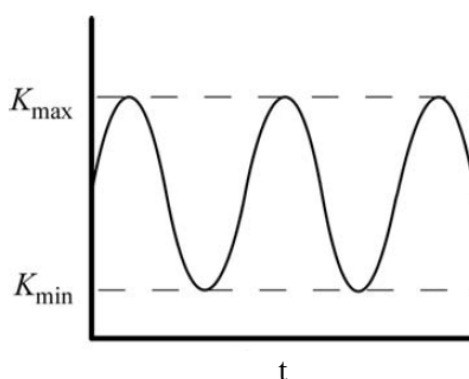
6.1 CHARAKTERISTIKA ZÁTĚŽOVÉHO CYKLU

Pro definování parametrů obecného cyklu použijeme jednoduchý cyklus sinusového průběhu, kde na vodorovné ose je čas, a na svislé ose napětí.



obr. 13 - sinusový zátěžový cyklus a jeho významné body - [10] - upraveno

Je zřejmé, že napětí cykluje kolem střední hodnoty σ_m . Dolní extrém cyklu značíme σ_{min} a horní extrém σ_{max} . Rozdíl mezi středním napětím a horním, resp. dolním napětím nazýváme amplitudou napětí a značíme σ_a . Tento parametr je nejdůležitější pro popis únavy, neboť dává informaci o tom „jak hodně“ součást cykluje. Celkový rozkmit napětí je tedy dán součtem dílčích rozdílů, resp. rozdílu extrémních hodnot, tedy $\Delta\sigma = 2\sigma_a = \sigma_{max} - \sigma_{min}$.



obr. 14 - sinusový zátěžový cyklus K-faktoru - [1]

Popíšeme-li trhlinu za pomoci součinitele intenzity napětí získáváme zátěžový sinusový graf, kde na svislé ose je právě K-faktor. Pro další výpočet jsou významné body K_{min} , K_{max} , a především jejich rozdíl, neboli rozkmit součinitele intenzity napětí $\Delta K = K_{max} - K_{min}$.

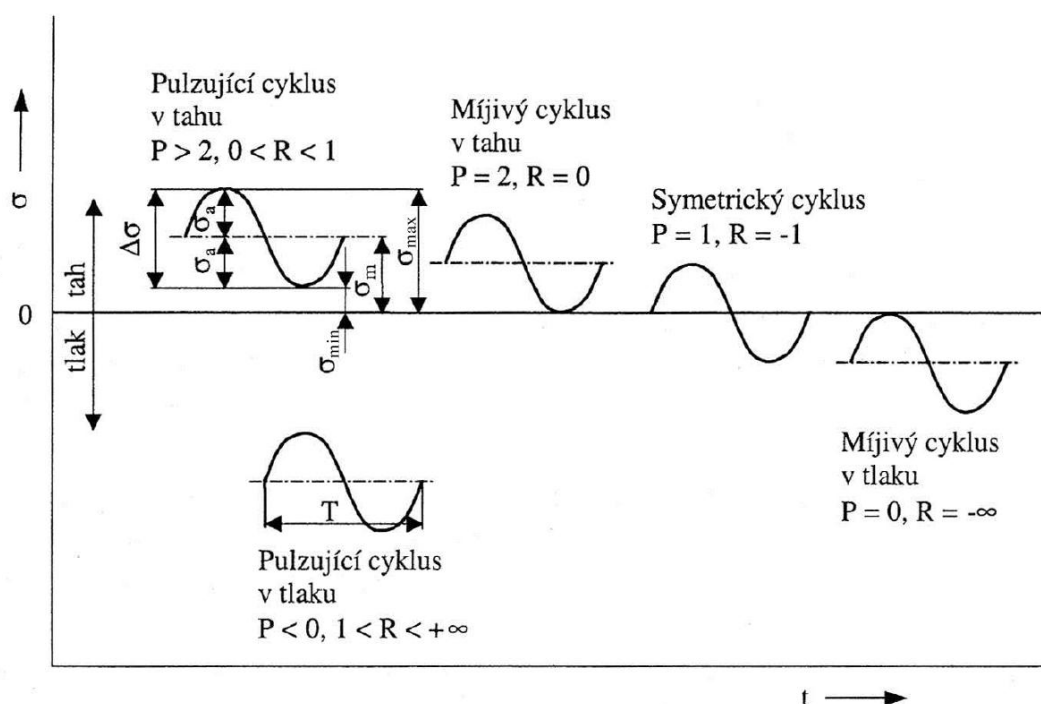
6.1.1 PARAMETRY ASYMETRIE CYKLU

Abychom mohli zátěžový cyklus popsat kvalitativně, zavádíme tzv. parametry asymetrie R, P. Především parametr R hraje významnou roli při výpočtech šíření trhliny.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (6.1)$$

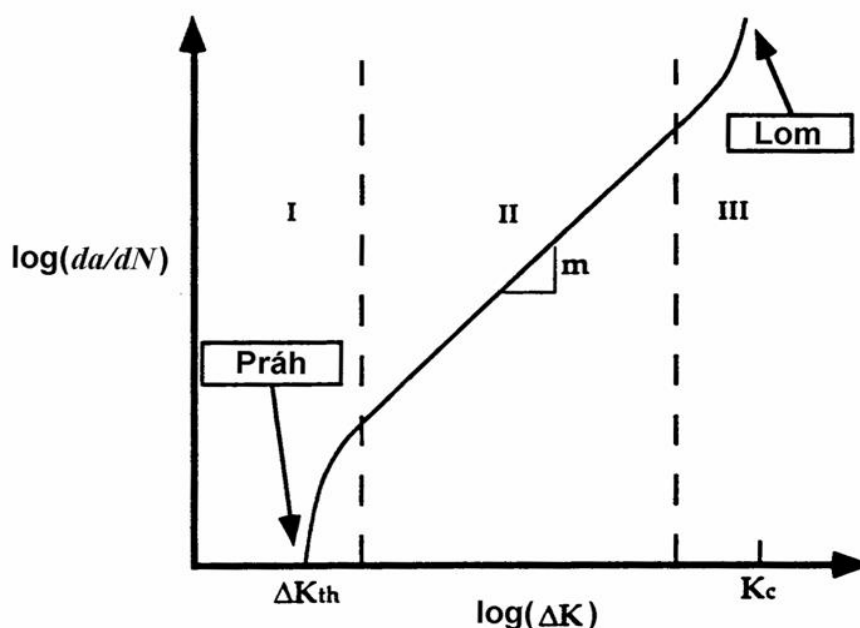
$$P = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_a} \quad (6.2)$$

Rozlišujeme 5 základních typů zátěžových cyklů, ty jsou znázorněny, spolu se svými parametry asymetrie na obr. 15.



obr. 15 - typy zátěžových cyklů s parametry - [10] - upraveno

6.2 RYCHLOST RŮSTU TRHLINY V ZÁVISLOSTI NA K



obr. 16 - rychlost růstu trhliny v závislosti na rozkmitu K - [9]

Rychlost růstu trhliny v závislosti na rozkmitu součinitele intenzity napětí byla získána proložením experimentálně naměřených dat křivkou, a je graficky znázorněna na obr. 16. Jak je patrné, graf lze rozdělit do tří oblastí. V první oblasti dochází nejprve k iniciaci trhliny, trhlina se začíná šířit až od prahové hodnoty ΔK_{th} . Prvotní šíření se stabilizuje do lineární podoby, ta představuje druhou oblast. Trhlina se šíří s ohledem na dodávanou energii. Závislost je zde velmi dobře popsatelná (viz. Paris-Erdoganův zákon). Třetí oblast je oddělena určitým okamžikem, kdy se trhlina začne šířit nestabilně, již není potřeba jí dodávat energii a po dosažení kritické hodnoty K_c nastává úplný lom součásti.

6.2.1 EMPIRICKÉ ROVINCE POPISUJÍCÍ RYCHLOST ŠÍŘENÍ TRHLINY

Graf vykreslující závislost rychlosti růstu trhliny na rozkmitu součinitele intenzity napětí je potřeba matematicky popsat pro možnost výpočtů. Této úlohy se zhostilo mnoho vědců, kteří postupně zpřesňovali tento popis. Nabízí se nám tedy k dispozici mnoho vzorců, z nichž mnohé popisují pouze část dané křivky. Jako první přinesli v šedesátých letech minulého století základní vztah Paris a Erdogan. Je známá jako Paris-Erdoganův zákon. [1]

PARIS-ERDOGANŮV ZÁKON

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (6.3)$$

kde $m = (2 \text{ až } 4)$ v případě kovů a C jsou experimentálně zjištěné materiálové charakteristiky.

Paris spolu s Erdoganem popsali oblast grafu II, která se jeví jako lineární. Tuto oblast omezili dvěma materiálovými konstantami, prahovou hodnotou a lomovou houževnatostí. Tento základní popis je dodnes stěžejním pro základní inženýrské výpočty, neboť oblast II je velmi dobře předvídatelnou a vypočítatelnou oblastí šíření trhliny.

VZTAH KLESNILA A LUKÁŠE

Českoslovenští vědci Klesnil a Lukáš (z dnešního ÚFM AV ČR) popsali rovnici oblasti I i II:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (6.4)$$

kde ΔK_{th} je experimentálně zjištěná hodnota. Ta také často závisí na parametru R , což je problémem u proměnlivého cyklu, kde se R neustále mění. Více bude tato problematika rozvedena v kap. 6.2.4.

FORMANŮV VZTAH

Popis úseků II a III navrhl Forman:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \cdot \Delta K^m}{(1 - R) \cdot K_c - \Delta K} \quad (6.5)$$

kde K_c je kritická hodnota K , při které dojde k lomu. Rovnici lze přepsat do tvaru:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \cdot \Delta K^m}{\frac{K_c}{K_{max}} - 1} \quad (6.6)$$

NASGRO

Roku 1986 vznikl ve vývojovém centru NASA program pro usnadnění analytického výpočtu lomové kontroly. Velmi dobře však poslouží nejen leteckým účelům k automatizaci výpočtů lomové mechaniky, ale také k výpočtu šíření trhliny. Rychlost šíření trhliny je zde dána rovnicí, na jejímž vývoji se podílelo několik vědců, kromě Jamese C. Newmana, Jr. také např. Forman. Svou komplexitou popisuje celou oblast šíření trhliny, od iniciace až po lom.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \cdot \Delta K \right]^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_c} \right)^q} \quad (6.7)$$

Kde C, n, p, q jsou empiricky zjištěné konstanty. [4]

DALŠÍ VZTAHY POPISUJÍCÍ RYCHLOST ŠÍŘENÍ TRHLINY

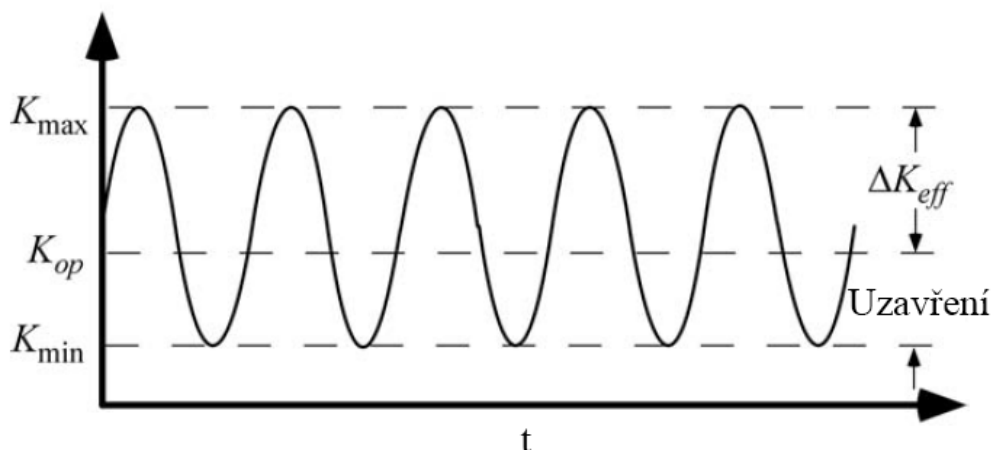
Existuje ještě řada jiných rovnic s různými přístupy autorů, které však již není potřeba v této práci rozebírat. Základní popis všech oblastí byl nastíněn známými rovnicemi a pro zajímavost ukázán softwarový analytický řešič.

6.2.2 UZAVÍRÁNÍ TRHLIN A EFEKTIVNÍ SOUČINITEL INTENZITY NAPĚTÍ

Krátce po definování Paris-Erdoganova vztahu bylo zjištěno, že toto pravidlo není univerzálně aplikovatelné. Problémem se zabýval Elber a jeho výzkum přinesl teorii o uzavírání trhlín. Při cyklickém namáhání trhliny dochází k oddalování a přibližování lící trhliny. Zatímco oddalování není ničím limitováno, přibližování je limitováno stykem ploch. Elber tento okamžik v cyklu označuje jako otevírací hodnotu součinitele intenzity napětí K_{op} , a udává, že část cyklu

pod touto hodnotou nemá žádný vliv na růst trhliny. Toto tvrzení stojí na předpokladu, že trhlina neroste, jsou-li její lícé zavřené. Zavádí tedy modifikovanou veličinu rozkmitu součinitele intenzity napětí a to tzv. rozkmit efektivní hodnoty intenzity napětí ΔK_{eff} .

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} \quad (6.8)$$



obr. 17 - uzavření trhliny a efektivní hodnota rozkmitu součinitele intenzity napětí

Dále zavádí poměrnou veličinu U , která vyjadřuje poměr efektivní hodnoty a původní hodnoty ΔK dle Parise:

$$U = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} \quad (6.9)$$

a konečně modifikuje Paris-Erdoganův vztah:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K_{eff}^m \quad (6.10)$$

Velichinu U je možné vyjádřit jako funkci asymetrie cyklu R . Nejznámější vyjádření experimentálně stanovil Schijve a platí pro rozsah R od -1 do 0,54 [5]

$$U(R) = 0,55 + 0,33 \cdot R + 0,12R^2$$

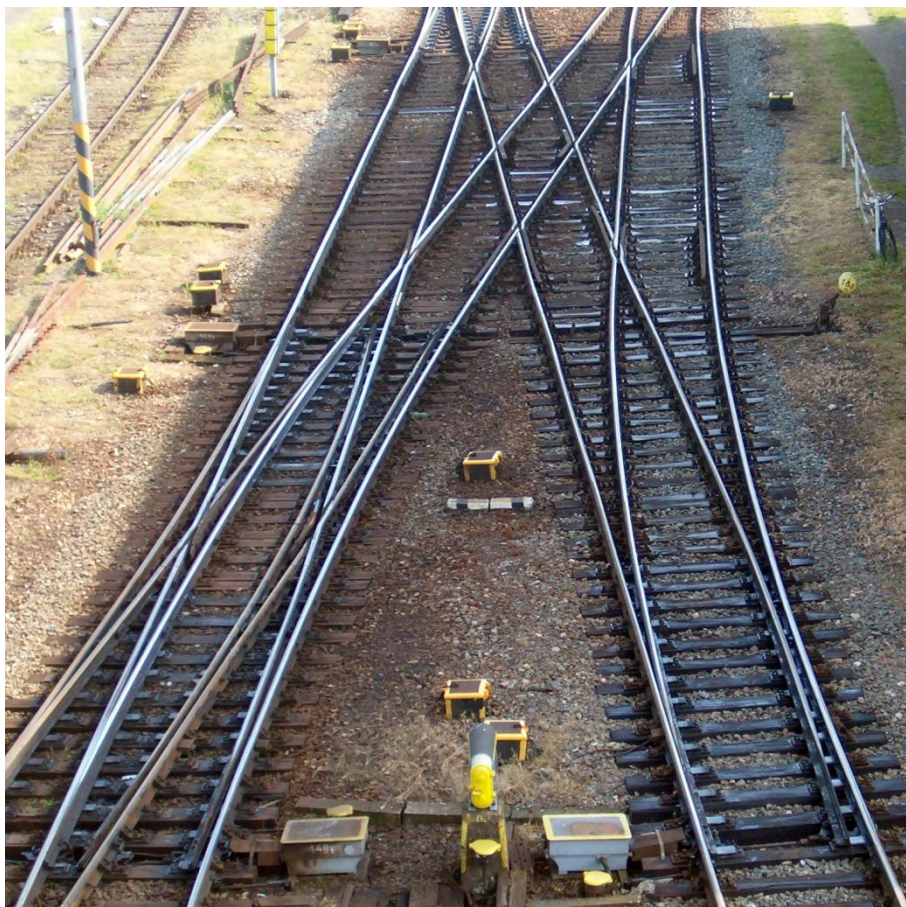
K uzavírání trhlín může dojít i dříve než dosednutím samotných lících ploch trhliny na sebe. Konkrétně bylo popsáno pět případů, např. tekutina v trhlíně, produkty koroze v trhlíně, plasticky zdeformované líce, resp. uzavírací účinek tlakových vnitřních pnutí podél lící [2]. Jejich vlivem dochází k dřívějšímu zavírání trhliny a tedy zpomalení jejího růstu.

6.2.3 PROBLÉM POUŽITÍ ΔK_{EFF} V PROMĚNNÉM CYKLU

Zjednodušeně by se dalo říct, že K_{op} je pro každý materiál konstantní. Bohužel jak již bylo naznačeno v minulém odstavci, otevírací intenzita napětí se mění, a to nejen vlivem cizích částic, ale také vlivem historie zatěžování (plastické deformace) lící trhliny.

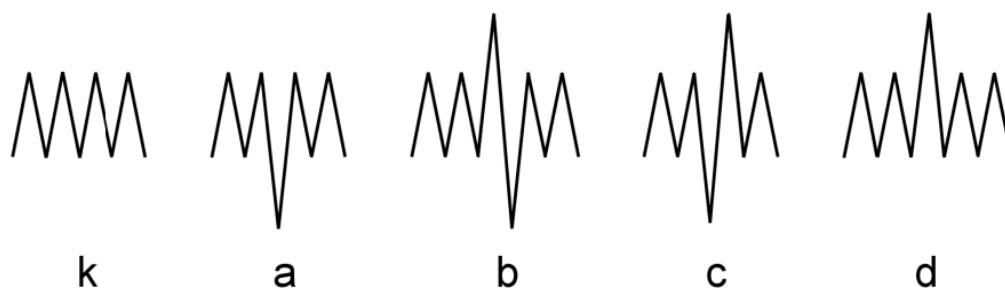
Pro přesný popis šíření trhliny bychom tedy potřebovali zjišťovat K_{op} průběžně v každém cyklu, což prakticky není možné. Další postup, jak se s tímto faktem vypořádat, je popsán v následující kapitole.

6.2.4 PROMĚNNÉ ZATÍŽENÍ V CYKLU



obr. 18 - výhybky a křížení jsou častou příčinou přetížení - Depo Maloměřice

Pokud se náhle vyskytne změna v zátěžovém cyklu, pak v tomto okamžiku neroste trhlina stejným způsobem, jako by rostla v konstantním cyklu o daném zatížení, a je rovněž ovlivněna historií zatěžování (tzv. interakční efekt). Nedá se tedy uvažovat celkový růst trhliny jako součet nezávislých přírůstků trhliny v jednotlivých cyklech. [2]



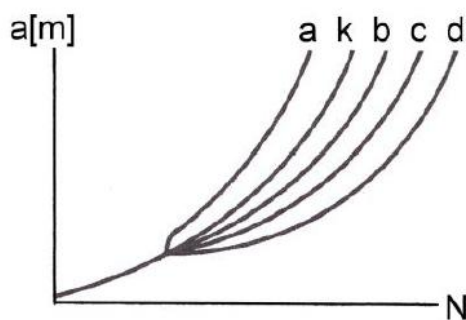
obr. 19 - nepravidelnosti v cyklu - (a) - jednorázové tlakové přetížení, (b) - tahové a následující tlakové přetížení, (c) - tlakové a následující tahové přetížení, (d) - tahové přetížení - [2]



obr. 20- špatně provedený svar - Brno - Židenice

V praxi se můžeme setkat s několika druhy náhlých změn v cyklu. Nastávají především při průjezdu výhybkami, dilatačními spoji, nebo v místě nedokonalého spojení kolejnic, ať už jsou to šroubované spoje, nebo nedokonale svařené (viz obr. 20).

Obrázek 19 schematicky představuje druhy nepravidelností cyklů, a na obrázku 21 je znázorněn jejich vliv na růst trhliny. Je patrné, že urychlení růstu trhliny nastává pouze v případě jednorázového tlakového přetížení (a). Protože takový stav je v praxi málo pravděpodobný, nebudeme jej dále uvažovat. [6] Mnohem častěji se setkáme s jednorázovým tahovým přetížením (d), které způsobí zpomalení růstu trhliny, neboli retardaci.



obr. 21 - vliv přetěžujícího cyklu na rychlost růstu trhliny - [2]

RETARDACE

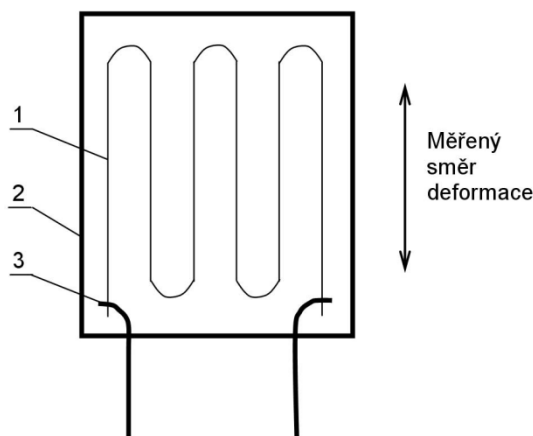
Uvažujme cyklus konstantní s náhlým jednorázovým tahovým přetížením. Velikost plastické zóny konstantního cyklu je stálá. V okamžiku přetížení však oblast naroste na velikost odpovídající danému přetížení - před čelem trhliny vzniknou velké plastické tahové deformace, vyvolávající tlaková napětí. Další růst trhliny touto oblastí je tedy značně ztížen. Rovněž dojde k otupení čela a trhlina se více otevře, její otevírací napětí K_{op} se tedy v tomto okamžiku sníží. [2]

6.3 VYHODNOCENÍ NEPRAVIDELNÝCH ZÁTĚŽOVÝCH CYKLŮ

Pro vyhodnocení skutečného zátěžového cyklu je potřeba jej nejprve zjistit (změřit), následně data zpracovat a vyhodnotit.

6.3.1 SBĚR DAT

Abychom mohli správně odhadnout životnost součásti, potřebujeme zjistit, jakými zátěžovými cykly prochází za provozních podmínek. Budeme měřit napětí v kritických místech nápravy, kde očekáváme možnou iniciaci a šíření trhliny. K měření použijeme tenzometrické snímače, neboli tenzometry, a tyto nalepíme na měřená místa. Tenzometry kopírují deformaci nápravy a důsledkem toho se elasticky deformuje i vnitřní drát tenzometru - jeho délka a průřez, což má za následek změnu jeho odporu. Zapojením do Wheatstoneova můstku získáváme elektrické napětí v závislosti na odporu drátu, resp. na deformaci nápravy. Signál z tenzometru je, dnes již bezdrátově (dříve za pomoci kartáčů a kolektoru), přenášen do měřicího zařízení, kde se dále zpracovává. Výstupem je pak deformace materiálu v závislosti na čase. [17]



obr. 22 - odporový tenzometr - [18]

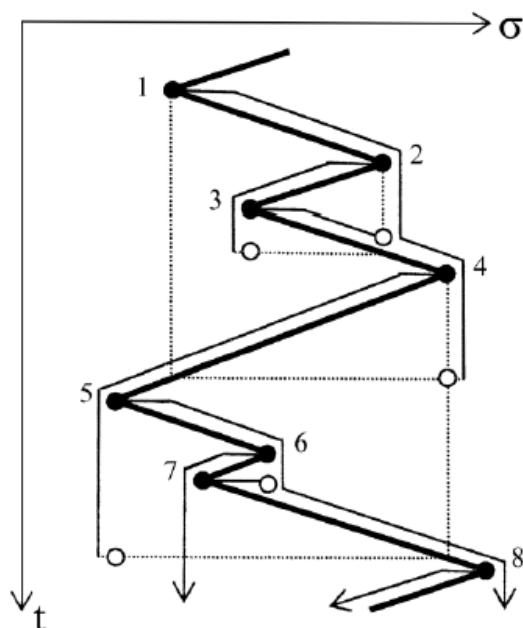
6.3.2 SETŘÍDĚNÍ DAT

V kapitole 6.3.1 jsme provedli sběr dat, máme tedy nyní obrovský soubor popisující deformaci v čase, respektive napětí (po přepočtení), s hodnotami náhodně jdoucími po sobě. Jejich seřazením podle amplitud napětí získáme vizuálně lepší přehled o tom, v jakých hodnotách se zatížení pohybuje, jak četné jsou extrémy atp. Každé hodnotě napětí přiřadíme odpovídající počet cyklů do lomu součásti namáhané konstantním cyklem s daným napětím. Vznikne tedy soubor dat ve formě $(n_1, N_f^1; n_2, N_f^2; \dots)$, který můžeme dále vyhodnocovat metodami neuvažujícími pořadí cyklu. Nejběžnější metodou pro setřídění dat je metoda Rain-flow.

METODA RAIN-FLOW

Název metody je odvozen podle představy svisle otočeného záznamu dat, po kterém stéká déšť (obr.23). Postup vyhodnocení je následující:

1. uvnitř lokálního extrému začíná půlcykl (stékající kapka)
2. půlcykl končí, když je dosaženo jeho výchozí úrovně, nebo když kapka narazí na kapku stékající z vyšší střechy



obr. 23 - princip metody Rain flow - [2]

Metoda tak spojuje ty extrémy, které vytvářejí jednu hysterezní smyčku. Rain-flow má nejlepší výsledky v predikci životnosti výpočtem kumulace poškození (kap. 6.3.3). [2]

6.3.3 METODY NEUVAŽUJÍCÍ POŘADÍ CYKLU

Jak bylo zmíněno v kapitole 6.2.4, historie zatěžování má vliv na další růst trhliny. Z toho plyne, že vyhodnocení nepravidelného cyklu, které neuvažuje pořadí cyklu, nemusí být přesné. Existuje však několik důvodů proč se používá. Je rychlé, výpočetně nenáročné, a není k němu potřeba uchovávat obrovská množství dat. Nejpoužívanější metodou je bezesporu Palmgrenova-Minerova.

PALMGREN-MINEROVA HYPOTÉZA

Teorie Palmgren-Minerovy hypotézy je založena na sčítání příspěvků od jednotlivých zátěžových amplitud σ_a . Ze seřazeného souboru dat vyčteme jejich četnosti n a odpovídající počet cyklů, které by při zatěžování konstantním cyklem dané amplitudy, způsobily lom N_f . Teorie říká, že pokud životnost při dané amplitudě je N_f cyklů, pak jeden cyklus přispívá podílem $\frac{1}{N_f}$ do lomu součásti. Lom tedy nastane za následující podmínky: [5]

$$\sum \frac{n_i}{N_f^i} = 1 \quad (6.11)$$

V praxi se však ukázalo, že hodnota pravé strany rovnice se pohybuje v rozmezí 0,7 až 12. Důvody této odchylky jsou detailně rozloženy v literatuře [5]. V praxi se tento problém řeší zjištěním konkrétní hodnoty pravé strany zkouškou, a s tou se dále počítá. [2]

Praktická aplikace Palmgren-Minerovy hypotézy pro zjištění zbytkové únavové životnosti součásti zatížené proměnným cyklem je následující. Z naměřených dat definujeme charakteris-

tický zátěžový blok $(n_1, N_f^1; n_2, N_f^2; n_3, N_f^3)$. Pro zjištění počtu těchto bloků, které způsobí lom, se využije rovnice:

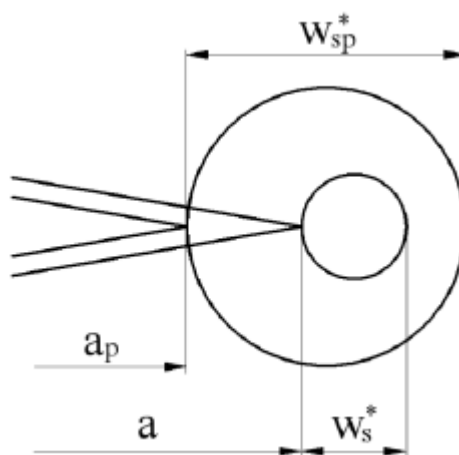
$$B = \frac{1}{\frac{n_1}{N_f^1} + \frac{n_2}{N_f^2} + \frac{n_3}{N_f^3}} \quad (6.12)$$

kde B je počet zátěžových bloků do lomu. [9]

6.3.4 METODY UVAŽUJÍCÍ POŘADÍ CYKLU

V této kapitole bude naznačen princip fungování metod uvažujících historii zatěžování, samotné metody však blíže nebudeme rozebírat.

Přírůstek trhliny da je při průchodu oblastí, která byla zplastizována předchozím přetížením, menší, a je možné jej vypočítat (metoda Wheelerova). Do výpočtu se bere v potaz velikost současné plastické zóny na čele trhliny, velikost zplastizované oblasti a vzdálenost, kterou trhlina již urazila od okamžiku přetížení. [1]



obr. 24 - přetížení a Wheelerův model - a_p - délka trhliny při přetížení, w_{sp}^* - rozměr plastické zóny od přetížení, a - délka současné trhliny, w_s^* - rozměr současné plastické zóny - [2]

Metoda Willenborgova počítá s myšlenkou požadovaného napětí, kterému by odpovídala plastická zóna na čele aktuální trhliny, dotýkající se konce plastické zóny od přetížení. Rovněž také uvažuje uraženou dráhu trhliny od okamžiku přetížení. [2]

7 RUTINNÍ POSTUPY KONTROLY NÁPRAV

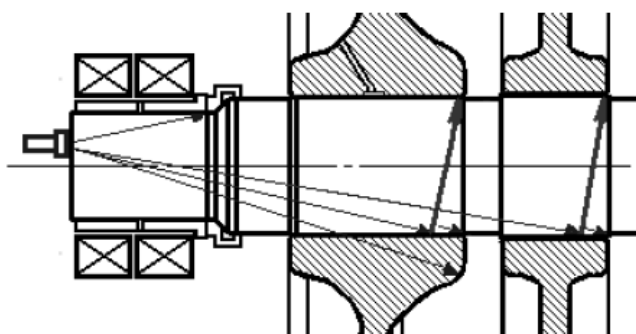
Pro zajištění maximální bezpečnosti kolejové dopravy je potřeba pravidelně preventivně kontrolovat všechny funkční části vagónů a lokomotiv, především pak části stěžejní a nejvíce namáhané. Jak již bylo zmíněno v bodě 4 této práce, železniční dvojkolí sestávající z nápravy a kol je právě částí, jejíž porucha je pravděpodobná a prakticky s jistotou vede k havárii celé vlakové soupravy. Tato kapitola je zpracována především za pomoci dokumentů Českých drah, jakožto majoritního železničního dopravce v České republice.

7.1 IDENTIFIKACE TRHLINY, NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY

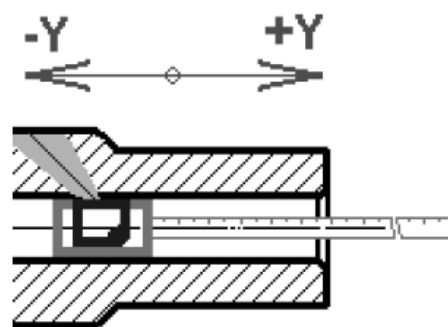
Vlaková náprava je součástí, kterou je jednoznačně potřeba zkoušet nedestruktivně, aby mohla dále plnit svou funkci. Destruktivní zkoušky se na ni provádějí pouze po vyřazení např. pro zpětné zjištění příčiny jejího chování za provozu.

7.1.1 ZKOUŠKA ULTRAZVUKEM

Náprava dvojkolí je hřídel s různě odstupňovanými sedly pro nalisování samotných kol a případných ozubených kol či kotoučových brzd. Přechody různých průměrů jsou opatřeny rádiusy (viz obr. 1). Dynamické namáhání pomáhá iniciaci únavových trhlin přibližně po jednom milionu ujetých kilometrů, a to nejčastěji právě v místech přechodů průměrů nebo na okraji lisovacích ploch. Mírně odlišný přístup zkoušení vyplývající z konstrukce platí pro dva typy náprav - plné a s podélným vývrtem. [15]



obr. 25 - ultrazvuková zkouška plné nápravy z čela - [15]



obr. 26 - ultrazvuková zkouška duté nápravy z dutiny - [15]

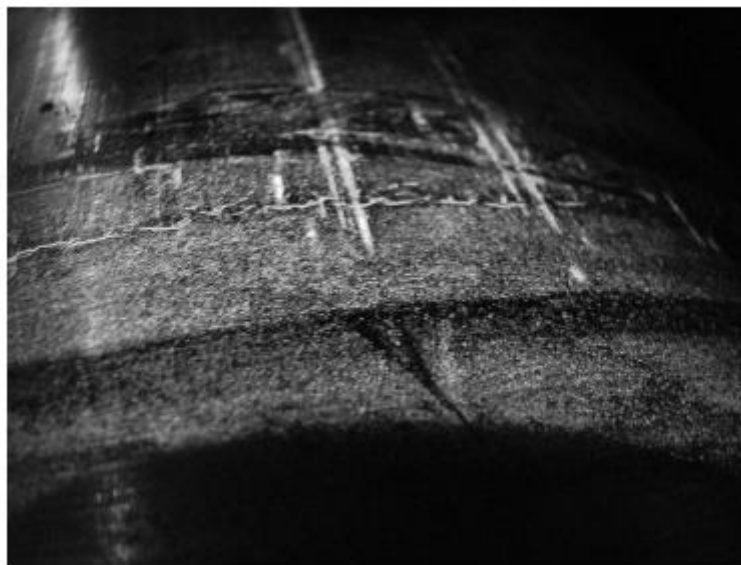
Nápravy plné se zkouší z přístupného čela. Sonda bývá doplněna o plexiklíný pro úpravu směru vlny. Při zkoušce dochází k mnoha odrazům, průchodům a transformacím vlny. Pro objektivní posouzení se vyžaduje od obsluhy zkušenost a důkladná znalost nápravy. [15]

Nápravy duté - s podélným vývrtem - se zkoušejí mnohem snadněji, zavedením sondy do dutiny nápravy. Sonda snímá pod úhlem 30° - 70° , přičemž se překlápí pro snímání opačným směrem. Samotná zkouška pak probíhá ve velké rozlišovací schopnosti na minimální tloušťce materiálu. V roce 2011 byla navržena optimalizace zkoušky, kdy do té doby používaná sonda s úhlem svazku 45° , pracující na frekvenci 2 MHz a se schopností rozlišit trhlínu délky 0,8 mm měla být nahrazena sondou s úhlem svazku 37° , pracovní frekvence měla být zvýšena na 5 MHz a hodnota minimální identifikované trhlíny tak klesla na 0,35 mm. [15]

Zkouška ultrazvukem je tedy nejpoužívanější metodou především pro její rychlost a možnost provádění často přímo na stojícím voze bez nutnosti demontování nápravy. Za pomoci poloautomatizovaného zařízení pro zkoušky dutých náprav je možné kompletní činnost kontroly jedné nápravy zvládnout za 30 minut. Nevýhodou této zkoušky je vyšší náročnost jejího vyhodnocení. Z toho důvodu bylo již v minulém století definováno několik stupňů zaškolení personálu, zkoušku musí provádět zaškolená osoba a dohlížet zkouškám musí osoba s vyšším stupněm zaškolení. [16]

7.1.2 MAGNETICKÁ PRÁŠKOVÁ POLÉVACÍ METODA

Dalším způsobem nedestruktivního zkoušení materiálu na přítomnost únavových trhlin je magnetická prášková polévací metoda. Provádí se ze vnější strany nápravy tehdy, pokud ultrazvuková metoda nedává jednoznačnou informaci o bezpečném stavu nápravy. Metoda se standardně používá na identifikaci závad na sedle kola, je tedy nezbytné slisování kol. Rovněž naopak je striktně nařízeno po jakémkoliv slisování kol za jiným servisním účelem, provést tuto zkoušku a ověřit tak, že sedla nejsou poškozena.



obr. 27 - iniciační trhliny po slisování kola - [15]

8 PŘÍKLAD VÝPOČTU ZBYTKOVÉ ÚNAVOVÉ ŽIVOTNOSTI

Příklad výpočtu zbytkové únavové životnosti byl proveden podle podkladů pana Ing. Pokorného k letní škole pružnosti a pevnosti v Hrubé Vodě, 2015. [19]

8.1 ZADÁNÍ PŘÍKLADU

V kritickém místě vlakové nápravy uvažujte trhlínu s počáteční délkou 4 mm a určete kolik kilometrů provozu je nutných pro nárůst trhlíny na kritickou délku stanovenou na 55 mm .

počáteční délka trhlíny	a_0	4 mm
kritická délka trhlíny	a_k	55 mm
prahová hodnota součinitele K	K_{th}	$5\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$
materiálová konstanta	C	$4 \cdot 10^{-13}\text{ m/cyklus}$
materiálová konstanta	m	4

Naměřené namáhání v kritickém místě, měřené přibližně na jednom tisíci kilometru jízdy:

σ_1	55 MPa	n_1	300 000
σ_2	80 MPa	n_2	75 000
σ_3	105 MPa	n_3	10 000
σ_4	130 MPa	n_4	2 000
σ_5	155 MPa	n_5	50

Předpis tvarové funkce je zadán jako funkce délky trhliny:

$$Y_I = 0,63 - 18,43a + 447,33a^2 - 3356,7a^3 \quad (8.1)$$

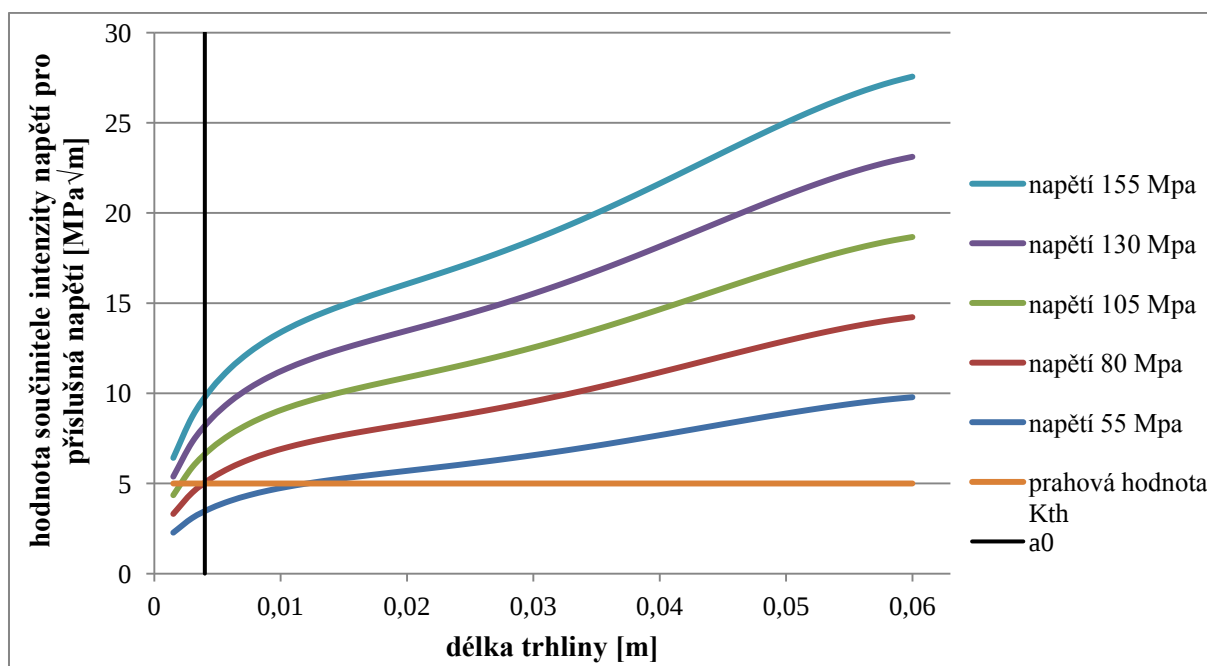
8.2 VÝPOČET

Vzhledem k tomu, že zadání je rozříděný soubor dat (zátěžový blok), neznáme historii zatěžování a nebudeme uvažovat retardaci. Celkový růst trhliny při délce trhliny a tak bude součtem růstových příspěvků od jednotlivých napětí. Je nutné si uvědomit, že konkrétní napětí přispívá k růstu trhliny pouze tehdy, pokud je hodnota příslušného součinitele intenzity napětí vyšší než je prahová hodnota K_{th} . Součinitele intenzity napětí vypočteme dosazením jednotlivých napětí do rovnice 8.2 a jejich průběhy vykreslíme na obr. 28.

$$K_{I,i} = \sigma_i \sqrt{\pi a} \cdot Y_I \quad (8.2)$$

Dosazením rovnice 8.1 do rovnice 8.2 dostáváme:

$$K_{I,i}(a, \sigma_i) = \sigma_i \sqrt{\pi a} \cdot (0,63 - 18,43a + 447,33a^2 - 3356,7a^3) \quad (8.3)$$



obr. 98 - graf hodnot součinitelů intenzity napětí v závislosti na délce trhliny

Z grafu je patrné, že již od počáteční délky trhliny přispívají k jejímu růstu napětí 105, 130 a 155 MPa. U napětí 80 MPa není z grafu patrné, zda jeho křivka protíná prahovou hodnotu před, nebo za hranicí délky a_0 , proto provedeme výpočet hodnoty $K_{I,2}$ pro délku trhliny a_0 . Napětí 55 MPa pak jednoznačně nepřispívá k růstu počáteční trhliny, ale je zřejmé, že od určité délky trhliny přispívat bude.

$$K_{I,2}(a) = \sigma_2 \sqrt{\pi a} \cdot (0,63 - 18,43a + 447,33a^2 - 3356,7a^3) \quad (8.4)$$

$$K_{I,2}(a_0) = 80 \cdot \sqrt{\pi \cdot 0,004} \cdot (0,63 - 18,43 \cdot 0,004 + 447,33 \cdot 0,004^2 - 3356,7 \cdot 0,004^3) = 5,05 \text{ MPa} \quad (8.5)$$

$$K_{I,2}(a_0) > K_{th} \quad (8.6)$$

Hodnota součinitele intenzity napětí pro napětí 80 MPa při délce trhliny a_0 je větší než prahová hodnota součinitele intenzity napětí. Konstatujeme tedy, že napětí 80 MPa přispívá k růstu trhliny již od její počáteční délky.

Nyní je již patrné, že z pohledu poškozujících napětí jsou pouze dva intervaly cyklického života nápravy. První interval, kdy k růstu trhliny přispívají napětí 80, 105, 130 a 155 MPa, a druhý interval, kdy růstu přispívá kromě zmíněných také napětí 55 MPa. Hranici těchto dvou intervalů je potřeba zjistit, hledáme tedy průsečík křivky součinitele intenzity napětí pro napětí 55 MPa s křivkou prahové hodnoty, neboli

$$K_{I,1}(a_1) = K_{th} \quad (8.7)$$

$$a_1 = ? \quad (8.8)$$

$$K_{I,1}(a) = \sigma_1 \sqrt{\pi a} \cdot (0,63 - 18,43a + 447,33a^2 - 3356,7a^3) \quad (8.9)$$

$$K_{I,1}(a_1) = 55 \cdot \sqrt{\pi a_1} \cdot (0,63 - 18,43a_1 + 447,33a_1^2 - 3356,7a_1^3) = K_{th} \quad (8.10)$$

$$55 \cdot \sqrt{\pi a_1} \cdot (0,63 - 18,43a_1 + 447,33a_1^2 - 3356,7a_1^3) - K_{th} = 0 \quad (8.11)$$

K řešení této rovnice použijeme vhodný software, např. volně dostupný výpočtový software s webovým rozhraním Wolfram Alpha. V množině reálných čísel dostáváme dva kořeny rovnice:

$$a_{11} = 0,0121 \text{ m} \quad (8.12)$$

$$a_{12} = 0,0887 \text{ m} \quad (8.13)$$

Druhý kořen nám dává informaci o změně monotónnosti funkce součinitele intenzity napětí pro napětí 55 MPa pro rostoucí délku trhliny. Tato hodnota je však již zcela mimo oblast našeho zájmu a můžeme ji tedy ignorovat. Za hledanou hranici dvou intervalů zbytkového únavového života nápravy tedy označíme první kořen:

$$a_1 = a_{11} = 0,0121 \text{ m} \quad (8.14)$$

Aplikací Palmgren-Minerovy hypotézy zjistíme, kolik zátěžových bloků musí proběhnout, abychom se ze stavu 0 (s počáteční délkou trhliny) dostali do stavu 1 (s délkou trhliny a_1) a dále ze stavu 1 do stavu k (s kritickou délkou trhliny a_k), kdy dojde k lomu nápravy.

$$B = B_{01} + B_{1k} = \frac{1}{\sum_2^5 \frac{n_i}{N_{01}^i}} + \frac{1}{\sum_1^5 \frac{n_i}{N_{f,1k}^i}} \quad (8.15)$$

K výpočtu bude potřeba znát hodnoty N_{01}^i , resp. $N_{f,1k}^i$, což jsou počty cyklů s konstantní amplitudou σ_i , které by musely proběhnout, aby se trhlina rozšířila z délky a_0 na a_1 , resp. z délky a_1 na a_k .

$$\frac{da}{dN^i} = C \cdot (\sigma_i \sqrt{\pi a} \cdot Y_I(a))^m \quad (8.16)$$

$$N_{01}^i = \frac{1}{C \cdot (\sigma_i \sqrt{\pi})} \int_{a_0}^{a_1} \frac{1}{(\sqrt{a} \cdot Y_I)^m} da = A_i \cdot I_{01} \quad (8.17)$$

$$N_{f,1k}^i = \frac{1}{C \cdot (\sigma_i \sqrt{\pi})} \int_{a_1}^{a_k} \frac{1}{(\sqrt{a} \cdot Y_I)^m} da = A_i \cdot I_{1k} \quad (8.18)$$

Výpočet počtů cyklů jsme rozdělili na konstantní část (A_i) a integrální část, přičemž konstantní část je pro oba intervaly shodná.

$$A_1 = \frac{1}{C \cdot (\sigma_1 \sqrt{\pi})} = \frac{1}{4 \cdot 10^{-13} \cdot (55 \sqrt{\pi})} = 27\,681 \quad (8.19)$$

Obdobně pro ostatní zbylé konstanty, výsledky jsou uvedeny v následující tabulce:

A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
27 681	6 184	2 084	887	439

Následující integrální výraz (a podobně pro I_{1k}^i) je příliš složitý pro analytický výpočet, budeme jej proto řešit numericky, opět s využitím software Wolfram Alpha.

$$I_{01} = \int_{a_0}^{a_1} \frac{1}{(\sqrt{a} \cdot Y_I)^m} da = \int_{a_0}^{a_1} \frac{1}{(\sqrt{a} \cdot (0,63 - 18,43a + 447,33a^2 - 3356,7a^3))^{-4}} da \quad (8.20)$$

$$I_{01} = 2\,205 \quad (8.21)$$

$$I_{1k} = 2\,147 \quad (8.22)$$

Nyní určíme všechny počty cyklů, potřebné pro aplikaci Palmgren-Minerovy hypotézy.

$$N_{01}^2 = A_2 \cdot I_{01} = 6\,184 \cdot 2\,205 = 13\,638\,070 \text{ cyklů} \quad (8.23)$$

$$N_{f,1k}^1 = A_1 \cdot I_{1k} = 27\,681 \cdot 2\,147 = 59\,431\,107 \text{ cyklů} \quad (8.24)$$

Obdobně zbývající:

N_{01}^1	N_{01}^2	N_{01}^3	N_{01}^4	N_{01}^5
∞	13 638 070	4 595 220	1 955 835	967 995

$N_{f,1k}^1$	$N_{f,1k}^2$	$N_{f,1k}^3$	$N_{f,1k}^4$	$N_{f,1k}^5$
59 431 107	13 277 048	4 474 348	1 897 948	942 533

Dosazením všech příslušných hodnot do rovnice 8. dostáváme:

$$B = \frac{1}{\sum_2^5 \frac{n_i}{N_{01}^i}} + \frac{1}{\sum_1^5 \frac{n_i}{N_{f,1k}^i}} = \frac{1}{\frac{75\,000}{13\,638\,070} + \frac{10\,000}{4\,595\,220} + \frac{2\,000}{1\,955\,835} + \frac{50}{967\,995}} +$$

$$+ \frac{1}{\frac{300\,000}{59\,431\,107} + \frac{75\,000}{13\,277\,048} + \frac{10\,000}{4\,474\,348} + \frac{2\,000}{1\,897\,948} + \frac{50}{942\,533}} = 185 \text{ bloků} \quad (8.25)$$

8.3 ZÁVĚR PŘÍKLADU

Provedli jsme výpočet zbytkové únavové životnosti modelové nápravy s předpokládanou existencí trhliny v kritickém místě. Zadaný soubor amplitud napětí s jejich četnostmi jsme označili jako zátěžový blok. Pomocí Palmgren-Minerovy hypotézy jsme odhadli zbývající životnost nápravy na 185 zátěžových bloků, tj. v přepočtu asi 185 000 km.

9 ZÁVĚR

V bakalářské práci byla představena problematika bezpečnosti železniční nápravy z pohledu mezinárodních norem, kdy se při návrhu nápravy vychází ze znalosti meze únavy materiálu (Wöhlerovy křivky) a dimenzuje se na neomezenou životnost dle této křivky. Tento přístup uvažuje bezdefektní materiál, což kvůli velikosti součásti a náročným vnějším provozním podmínkám nelze brát za samozřejmost. Proto je vhodné uvedený postup doplnit postupem, který uvažuje materiál s počátečním defektem - iniciační trhlinou. Vhodný nástroj pro popis šíření trhliny a predikci zbývající únavové životnosti je lomová mechanika.

V kapitole lomové mechaniky byla tato rozdělena na elastoplastickou a lineární elastickou (LELM), kterou se tato práce dále zabývá. Byly definovány některé významné pojmy související s LELM, jako např. módy zatěžování, rovinná napjatost, rovinná deformace, plastická zóna na čele trhliny. Byla stanovena podmínka použití LELM za pomoci porovnání hloubky plastické zóny na čele trhliny s délkou trhliny. Chování zatíženého tělesa s trhlinou se nejčastěji popisuje za pomoci součinitele intenzity napětí a stejně tak tomu je v této práci. Experimentálně naměřená závislost rychlosti růstu únavové trhliny na rozkmitu součinitele intenzity napětí byla po částech popsána několika vědci, jejichž rovnice byly představeny, a to včetně sofistikovaného přístupu NASGRO, popisující celou oblast šíření únavové trhliny, od prahové hodnoty rozkmitu součinitele intenzity napětí až po kritickou hodnotu.

V další části práce byl představen postup stanovení životnosti u existující reálné součásti, s využitím tenzometru pro zjištění zátěžového spektra, setříděním dat s pomocí metody Rainflow a vyhodnocením za pomoci Palmgren-Minerovy hypotézy. Krátce byly nastíněny postupy a možnosti kontroly náprav v praxi.

Na závěr byl proveden výpočet odhadované zbytkové únavové životnosti modelové nápravy, kdy vstupem byly rozříděné hodnoty namáhání s jejich četnostmi a zadané materiálové charakteristiky. V potaz byla brána prahová hodnota; zátěže spadající pod prahovou hodnotu při určité délce trhliny nepřispívají růstu trhliny.

Tato bakalářská práce měla za cíl představit postupy stanovení odhadu únavové životnosti vlakové nápravy z pohledu na nápravu jako na součást s defekty. Je možné konstatovat, že cíl práce byl splněn.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ

- [1] ANDERSON, T.L. *Fracture Mechanics: fundamentals and applications*. 2nd ed. Boca Raton: CRS Press, 1995, xvi, 688 s. : il. ISBN 0849342600.
- [2] LAUSCHMANN, Hynek. *Mezní stavy I: Únava materiálu*. 2. přeprac. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2007, 71 s. ISBN 8001020649.
- [3] KUNZ, Jiří. *Základy lomové mechaniky*. 2. přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 1994, 172 s. ISBN 8001012158.
- [4] *NASGRO: Fracture Mechanics and Fatigue Crack Growth Analysis Software, Reference manual*. 2002.
- [5] SCHIJVE, Jaap. *Fatigue of structures and materials*. Dordrecht: Kluwer Academic, 2001, 513 s. : il. ISBN 0792370147.
- [6] NÁHLÍK, Luboš. *Interní komunikace. ÚFM AV ČR, 2016*.
- [7] Historie železnic. KREJČÍŘÍK, Mojmír. *Vagóny - technická řešení* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://vagony.cz/historie/dvere.html>
- [8] FIŠER, Petr. *ANALYTICKÝ ŘEŠIČ PRO PEVNOSTNÍ VÝPOČET NÁPRAV DVOJKOLÍ*. Brno, 2012. Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Michal VAVERKA, Ph.D.
- [9] Únava materiálu. In: DLOUHÝ, CHLUP a HADRABA. *Podpora výuky - Mezní stavy materiálů* [online]. 2010, 50 s. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.ipm.cz/group/fracture/vyuka/>
- [10] Mechanické vlastnosti a charakteristiky materiálů II. In: *Podklady pro výuku - letní semestr: Úvod do materiálových věd a inženýrství (BUM)* [online]. 55 s. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/cs/studium/podklady-pro-vyuku-letni-semestr>
- [11] ONDRÁČEK, Emanuel, Přemysl JANÍČEK a Jan VRBKA. *Mechanika těles. Pružnost a pevnost II*. Brno: VUT Brno, 1988, 262 s.
- [12] NOVÁK, Drahomír a Luděk. BRDEČKO. *Pružnost a pevnost. Modul BD02-M01: Základní pojmy a předpoklady*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2004, 48 s. : il.
- [13] POKORNÝ, Pavel. *Odhad zbytkové životnosti železničního dvojkolí*. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. LUBOŠ NÁHLÍK, Ph.D.
- [14] VLK, Miloš a Zdeněk FLORIAN. *Mezní stavy a spolehlivost*. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 2007, 185 s. : il. ISBN 8021403861.

- [15] HOLEC, Josef. Optimalizace rutinních ultrazvukových zkoušek za podpory dalších metod NDT a výsledků materiálových analýz. In: *NDT Database & Journal of Nondestructive Testing - NDT, Ultrasonic Testing, X-Ray, Radiography, Eddy Current and all NDT Methods* [online]. 2011, s. 14 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.ndt.net/article/defektoskopie2011/papers/41_p.pdf
- [16] SEKERÁŠOVÁ, Vladislava. Zavádění nových metod NDT kontrol železničních kolejových vozidel v souvislosti se zaváděním vysokorychlostních vozidel do provozu na ČD. In: *Railvolution | Železniční magazín | Czech Raildays* [online]. 2006, s. 6 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.railvolution.net/czechraildays/2006/seminare/i_4.pdf
- [17] Výzkum v oblasti kolejových vozidel na DFJP v Pardubicích. *ŽelPage* [online]. 2010 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.zelpage.cz/clanky/vyzkum-v-oblasti-kolejovych-vozidel-na-dfjp-v-pardubicich?lang=cs>
- [18] Obrázek tenzometru. In: *Vysoká škola Báňská* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~jur286/mast/tenzometry.htm>
- [19] POKORNÝ, Pavel. Škola pružnosti a pevnosti: Stanovení zbytkové únavové životnosti strojních součástí s trhlinou. Hrubá Voda, 2015.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	délka trhliny	mm
a_0	počáteční délka trhliny	mm
a_k, a_c	kritická délka trhliny, při níž nastává lom	mm
a_p	délka trhliny při přetížení	mm
B	počet zátěžových bloků	-
C	materiálová konstanta	-
da	přírůstek trhliny	mm
K_I	součinitel intenzity napětí pro tahový mód	MPa. $\sqrt{\text{mm}}$
K_c	kritická hodnota K, při níž dojde k lomu	MPa. $\sqrt{\text{mm}}$
K_{max}	maximální hodnota K v cyklu	MPa. $\sqrt{\text{mm}}$
K_{min}	minimální hodnota K v cyklu	MPa. $\sqrt{\text{mm}}$
K_{op}	otevírací hodnota K - okamžik dosednutí lící trhliny	MPa. $\sqrt{\text{mm}}$
ΔK	rozkmit součinitele intenzity napětí	MPa. $\sqrt{\text{mm}}$
ΔK_{eff}	efektivní rozkmit K v cyklu	MPa. $\sqrt{\text{mm}}$
ΔK_{th}	prahová hodnota rozkmitu K při níž začíná trhlina růst	MPa. $\sqrt{\text{mm}}$
m	materiálová konstanta	-
n	počet cyklů	-
n	materiálová konstanta	-
N	počet cyklů k dosažení jiného stavu	-
N_f	počet cyklů do lomu	-
P	parametr asymetrie cyklu	-
p	materiálová konstanta	-
R	parametr asymetrie cyklu	-
q	materiálová konstanta	-
U	poměrná veličina cyklu zahrnující otevírací hodnotu K	-
W	šířka tělesa	mm
w_s^*	rozměr současné plastické zóny před čelem trhliny	mm
w_{sp}^*	rozměr plastické zóny od přetížení	mm
Y_I	tvarová funkce pro mód I	-
ε_z	deformace v ose z	mm
σ_{min}	dolní napětí v cyklu	MPa
σ_{max}	horní napětí v cyklu	MPa
σ_a	amplituda napětí v cyklu	MPa
σ_m	střední napětí v cyklu	MPa
σ_x	napětí v ose x	MPa
σ_y	napětí v ose y	MPa
σ_z	napětí v ose z	MPa
τ_{xy}	smykové napětí v rovině xy	MPa