



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

TECHNICKO-EKONOMICKÉ ASPEKTY VOLBY DOBY ŽIVOTNOSTI VOZIDLA

TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF THE CHOICE OF VEHICLE'S FATIGUE LIFE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MICHAL HEMALA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN VOPAŘIL

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2011/12

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Michal Hemala

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:

TECHNICKO-EKONOMICKÉ ASPEKTY VOLBY DOBY ŽIVOTNOSTI VOZIDLA

v anglickém jazyce:

TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF THE CHOICE OF VEHICLE'S FATIGUE LIFE

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provést rešerši dostupných, více i méně rigorózních, zdrojů zabývajících se zacílením výrobců automobilů na konkrétní dobu životnosti součástí tak, aby si zajistili dostatečně rychlou obměnu vozového parku populace, a tím svůj vlastní hospodářský růst. Definovat termín „neomezená životnost“ a provést jeho přiblížení u konkrétní metody výpočtu únavové životnosti.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše zdrojů zabývajících se optimální dobou životnosti vozidel.
2. Zdůvodnění trendu snižování/zvětšování doby životnosti současných automobilů z technického i ekonomického hlediska.
3. Objasnění termínu „neomezená životnost“ a jeho implikací u konkrétní metody stanovování doby životnosti strojních součástí.

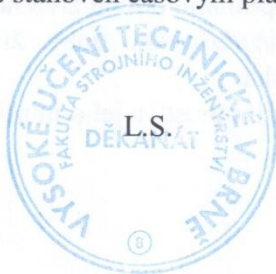
Seznam odborné literatury:

- [1] PÍŠTĚK, V., ŠTĚTINA, J. Pevnost a životnost. Vyd. 1. Brno : VUT Brno, 1993. 205 s. ISBN 80-214-0474-4.
- [2] FOLTA, Z. Příspěvek k navrhování strojních součástí na základě vyhodnocení provozního zatížení, 2004. 133 s. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. Habilitační práce.
- [3] MORAVEC, V. Únosnost cyklicky zatěžovaných součástí v pohonech strojů, 1997. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1997. Habilitační práce.
- [4] ZAHAVI, E., TORBILO, V. Fatigue Design: Life Expectancy of Machine Parts. Vyd. 1. New York: CRC Press, 1996. 325 s. ISBN 0-8493-8970-4.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Vopařil

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 20.11.2011



prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan



ABSTRAKT

Práce shrnuje hlavní důvody zaměření výrobců na konkrétní dobu životnosti vozidla. Zkoumá současný stav vozového parku a optimální životnost automobilu. Dále předkládá několik metod řešení únavové životnosti a popisuje základní faktory, které ji ovlivňují. Tyto poznatky jsou následně demonstrovány na příkladu zvýšení životnosti klikové hřídele.

KLÍČOVÁ SLOVA

životnost vozidla, únava, vozový park, kliková hřídel

ABSTRACT

This thesis summarizes main reasons for producers' focus on the actual lifespan of a vehicle. It studies the current state of fleet and the optimal lifespan of vehicle. It also presents several methods of dealing with fatigue life and describes basic factors affecting it. These findings are illustrated on an example of lifespan increase of a crankshaft.

KEYWORDS

vehicle lifespan, fatigue, vehicle fleet, crankshaft



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HEMALA, M. *Technicko-ekonomické aspekty volby doby životnosti vozidla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Vopařil.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Vopařila a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 21. května 2012

.....

Michal Hemala



PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu Ing. Janu Vopařilovi za odborné vedení, cenné rady a připomínky při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu při studiu.



OBSAH

Úvod	10
1 Současný stav vozového parku	11
1.1 Statická skladba vozového parku	11
1.1.1 Členské státy Evropské unie	11
1.1.2 Největší světové trhy	12
1.2 Dynamická skladba vozového parku	12
1.3 Shrnutí	12
2 Optimální životnost vozidla a jeho částí	13
2.1 Vozidla se spalovacím motorem	13
2.2 Elektromobily a hybridní vozy	13
2.3 Jednotlivé vybrané části vozidla	14
2.3.1 Motor	14
2.3.2 Palivový systém a vstřikovací zařízení	14
2.3.3 EGR ventil	14
2.3.4 Turbodmychadlo	15
2.3.5 Výfukové potrubí	15
2.3.6 Převodovka	15
2.3.7 Karosérie	15
3 Aspekty zacílení na konkrétní dobu životnosti	16
3.1 Ekonomie	16
3.2 Ekologie	16
3.3 Bezpečnost	17
3.4 Pověst společnosti	17
3.5 Důsledky	17
4 Dimenzování na únavu	18
4.1 Únavová životnost	18
4.1.1 Gigacyklová únava	19
4.2 Filosofie konstruování	19
4.2.1 Konstruování na trvalou pevnost	20
4.2.2 Konstruování na časovanou pevnost	20
4.2.3 Pravděpodobnostní metody	20
5 Metody řešení únavové životnosti	21
5.1 Analýza životnosti modální metodou	21
5.1.1 FEM model	21
5.1.2 MBS model	21



5.1.3	Výpočet únavové pevnosti	22
5.2	FALANCIS LMS.....	22
6	Faktory ovlivňující únavu.....	24
6.1	Vliv jakosti povrchu.....	24
6.1.1	Dokončovací operace	25
6.1.2	Tepelné a chemicko-tepelné zpracování.....	27
6.2	Vliv vrubu	28
6.2.1	Zastavení trhliny	28
6.2.2	Kritická místa na klikovém hřídeli	28
6.3	Vliv velikosti strojní součástky.....	29
6.4	Vliv teploty	29
6.5	Součinitel spolehlivosti.....	30
6.6	Vliv zbytkových pnutí v povrchové vrstvě.....	30
6.7	Vliv víceosé napjatosti.....	30
	Závěr.....	31
	Seznam použitých zkratk a symbolů	35



ÚVOD

Tato bakalářská práce se bude zabývat životností vozidel a faktory, které ji ovlivňují. Problémem predikce životnosti se zabývají všichni producenti dopravních prostředků. Kromě leteckého průmyslu, kde se tato problematika začala řešit nejdříve, jde o výrobce automobilů a automobilních dílů. Jedná se tedy o odvětví, kde by případná havárie mohla mít značné následky nejen na samotných strojích, ale je zde možnost i ohrožení lidských životů.

Všichni cítíme, že dříve se stroje a zařízení navrhovali s větším důrazem na jejich robustnost a stálost s tím, že otázka životnosti byla víceméně otevřená. Konkurenční prostředí a rychlý pokrok donutil výrobce daleko více se soustředit na ekonomiku a šetření nákladů až se pomalu zdá, že původní záměr a radost z motorismu se u velkosériových vozů zcela vytratila. Předpověď opotřebení může výrobcům ušetřit spoustu peněz při nákladném a časově náročném zkoušení vozidel, před uvedením do prodeje.

Volba životnosti je tak dnes základním parametrem při konstruování každého stroje. Na první pohled jde pouze o jedno kritérium, které spotřebitel při koupi hodnotí. Ve skutečnosti jde o souhrn takových kritérií, jako například rozměry, použitý materiál a podobně. Tato volba tak nepřímo ovlivňuje výslednou cenu, z toho vyplývající prodejnost výrobku a tedy i schopnost firmy obstát na trhu.



1 SOUČASNÝ STAV VOZOVÉHO PARKU

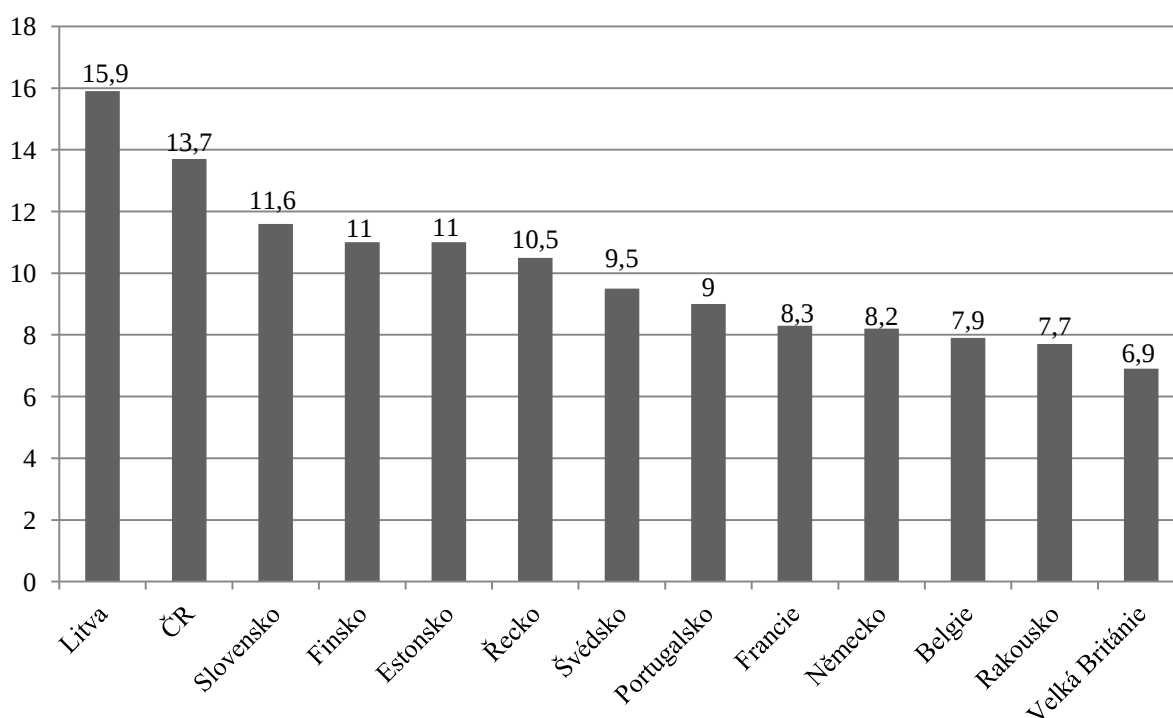
Abychom mohli začít s řešením dané problematiky, musíme mít odpověď na otázku: „Jakou dobu používání vozidla předpokládají samotní výrobci?“. Tato informace je samozřejmě u každého producenta přísně utajovaná a součástí podnikového know-how. Pro představu nám může pomoci analýza skladby vozového parku.

1.1 STATICKÁ SKLADBA VOZOVÉHO PARKU

Tyto statistické údaje jsou dostupné v Centrálním registru vozidel. Data mohou být ovlivněna chybami při zadávání do systému (například špatně nebo neúplně zadaný rok výroby vozidla).

1.1.1 ČLENSKÉ STÁTY EVROPSKÉ UNIE

Následující graf ukazuje statickou skladbu vozového parku ve vybraných státech EU (rok průzkumu: 2008).



Obr. 1 Stáří vozového parku ve vybraných zemích EU [10]

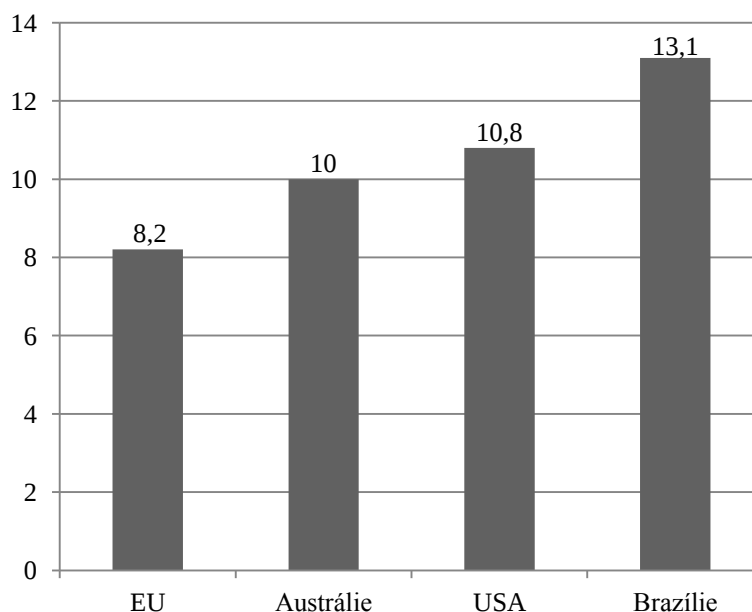
Průměrný věk vozidel celé Evropské unie je podle výše zmíněného průzkumu 8,2 roku. Z toho 33,6% vozidel je mladších 5 let, 31,9% vozidel je ve stáří 5 až 10 let a zbytek jsou vozy starší 10 let.



1.1.2 NEJVĚTŠÍ SVĚTOVÉ TRHY

Některé trhy především v rozvojových zemích nemají žádnou podobnou statistiku nebo mají statistiku zastaralou. Příkladem je například Čína (bez statistiky) nebo Indie (průměrné stáří vozového parku 15 let, údaj z roku 2000 [24]).

Následující graf ukazuje statickou skladbu vozového parku na největších světových trzích (rok průzkumu: 2008, [7] [25] [28]).



Obr. 2 Stáří vozového parku na největších světových trzích

1.2 DYNAMICKÁ SKLADBA VOZOVÉHO PARKU

Dynamickou skladbu je nutné zjišťovat přímo na komunikacích. Na vybraných silnicích všech úrovní, městských i mimoměstských, probíhá zaznamenávání registračních značek. Tyto záznamy jsou následně předány ministerstvu dopravy, které k nim přiřadí potřebné parametry. Takto získaná data nejsou ovlivněna množstvím vozidel vyrobeným před rokem 1985, které obvykle vůbec nejedí nebo jedí jen minimálně. Dává tedy daleko lepší představu o skutečném stavu vozového parku než statická metoda. V České republice probíhal takový průzkum naposledy v roce 2010 a byl zjištěn průměrný věk vozidel 7,6 roku [39].

1.3 SHRNUÍ

Průměrné stáří vozidel v EU je 8,2 roku, v USA 10,8 roku. Pokud však budeme uvažovat vozový park, který je aktivně využíván, dostaneme se k nižším hodnotám.

Představu o potřebách zákazníků nám může dát i průměrný nájezd kilometrů. Podle statistického úřadu Eurostat najede průměrný Evropan 9 800 kilometrů ročně. Podle agentury Polk najede americký spotřebitel v průměru 13 390 kilometrů a jediný majitel vozidlo užívá nejčastěji necelých 6 let, než ho prodá. [35]



2 OPTIMÁLNÍ ŽIVOTNOST VOZIDLA A JEHO ČÁSTÍ

Za životnost se považuje doba, kdy si vozidlo dokáže udržet své původní nebo téměř původní vlastnosti. Jedná se především o výkonnostní charakteristiky, spolehlivost, užitkové vlastnosti, estetickou stálost a nízkou hlučnost. V této kapitole jsem čerpal z různých zdrojů, abych našel jistou mez, po které končí optimální život vozidla. Za touto hranicí se sice automobil náraz nerozpadne, ale při poruše bývá cena opravy obvykle vyšší než cena vozidla. Životnost vozu se nejčastěji posuzuje podle počtu ujetých kilometrů, případně podle doby po jakou je vozidlo využíváno vyjádřeno v letech.

Vycházel jsem zejména ze zkušeností majitelů a nelze tedy tyto závěry aplikovat zcela obecně. Faktory, které mohou značně ovlivnit délku života automobilu jsou:

- kvalita paliva,
- pravidelné servisní prohlídky vozidla v intervalech stanovených výrobcem včetně výměny předepsaných dílů,
- používání maziv doporučených výrobcem,
- při údržbě či poruše používat originální náhradní díly nebo díly rovnocenné úrovně,
- styl jízdy řidiče.

2.1 VOZIDLA SE SPALOVACÍM MOTOREM

Zdroje zabývající se problematikou životnosti vozidla jako celku mluví obvykle o době osmi let nebo stavu tachometru 240 tisíc najetých kilometrů. Tyto informace podporují i fakta zpracovaná v první kapitole této práce.

Snahu výrobců o snížení celkové délky provozu vozidla dokazuje mnoho zkušeností majitelů na internetu. Jako příklad lze uvést vůz Mercedes-Benz 240D z roku 1976, který dosáhl 2 858 307 mil (přibližně 4,6 milionu kilometrů) nebo VW Beetle z roku 1963 s 2,3 milionem najetých kilometrů [11]. Při dnešním navrhování založeném především na pravděpodobnostních výpočtech se považují za rekordmany vozidla s více než milionem najetých kilometrů.

2.2 ELEKTROMOBILY A HYBRIDNÍ VOZY

Se stoupající cenou ropy získávají stále více na oblibě alternativní způsoby pohonu vozidla. Mezi jedno z nejdůležitějších a v současné době nejpropracovanějších řešení se dají považovat elektromobily. Ty jsou omezovány především nedostatkem dobíjecích stanic a stále ještě vysokou pořizovací cenou.

Motor elektromobilu neprodukuje vibrace a je celkově jednodušší, což ho předurčuje k nižší poruchovosti. Samotný elektromotor má také delší životnost, protože během provozu není vystavován vysokým tlakům a teplotám. Jedinou opravdu citlivou součástí elektromobilu jsou jeho baterie. Ty v současnosti tvoří velkou část pořizovací ceny a po uplynutí jejich životnosti je tedy již ekonomicky nevýhodné pořizování nových. Životnost baterií je závislá na typu a je orientačně určena počtem nabíjecích cyklů. Celková doba života elektromobilu je tedy úzce spojena s druhem použité baterie a s četností nabíjení, tj. intenzitě používání. Obecně se uvádí životnost zhruba 9 let (při každodenní jízdě 130km). [19]



V budoucnosti se předpokládá nižší pořizovací cena baterií v souvislosti s rostoucí poptávkou po elektromobilech a technologický pokrok při jejich vývoji. Zároveň již dnes existuje způsob, který životnost baterie řeší. Jedná se o prodej elektromobilů, do jejichž ceny nebude započtena cena baterií. Tu bude mít majitel vozu pouze v pronájmu. Hlavními protagonisty tohoto řešení jsou v Evropě Renault a Smart, v Asii pak společnosti BYD a Better Place. [21]

2.3 JEDNOTLIVÉ VYBRANÉ ČÁSTI VOZIDLA

Automobil se skládá z mnoha prvků, z nichž každý má svou životnost. Některé komponenty s malou životností se dnes vyměňují jako součást běžné údržby, jiné vydrží déle. Takové součásti mají obvykle vyšší cenu, ovšem při delším používání vozidla je obvykle nutná obnova. V této podkapitole se budu zabývat pouze vybranými konstrukčními celky, u kterých není životnost přímo spojena s jejich opotřebením, jako jsou například brzdy, spojka a podobně.

U některých modelů sledujeme stále opakující se závady na vybraných částech, zatímco u jiných vozidel tyto poruchy nenastávají. V takovém případě může jít o chybu při konstrukci nebo právě o zcela účelné nastavení životnosti. Pokud je navíc predikovaná výdrž některých prvků vystavena nevhodnému zacházení, zanedbané údržbě nebo jiným vlivům, pak se skutečná délka života rapidně snižuje.

2.3.1 MOTOR

Podle společnosti Total [29] je průměrná životnost motoru 250 tisíc kilometrů. Poté by se dala udělat generální oprava motoru, což se vzhledem k vysoké ceně práce mechanika nevyplatí. Tento postup byl běžný dříve, kdy se taková oprava prováděla pravidelně při 100 tisíci kilometrů. Dnes závada na motoru nejčastěji znamená konec automobilu.

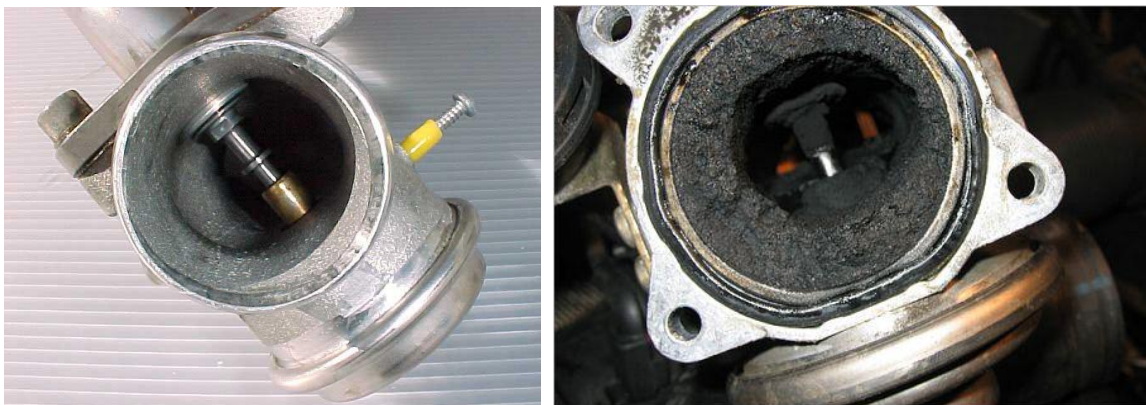
Litinové bloky mají vyšší životnost než bloky z hliníkových slitin. Litinový blok odlitý s válci z jednoho kusu je velmi pevný a tuhý, lépe snáší přetížení v provozu z rázů.

2.3.2 PALIVOVÝ SYSTÉM A VSTŘIKOVACÍ ZAŘÍZENÍ

Vstřikovače a vstřikovací čerpadla jsou jednou z nejcitlivějších částí vozů, zejména pak vybavených vznětovým motorem. Jemné injektory jsou velmi citlivé na kvalitu nafty. Příčinou zvýšení hlučnosti motoru obvykle bývají právě nečistotou zanešené injektory. Především podle kvality paliva a stylem jízdy řidiče je životnost vstřikovačů mezi 150 a 200 tisíci najetých kilometrů.

2.3.3 EGR VENTIL

Ventil EGR (exhaust gas recirculation) přepouští část spalin z výfukového potrubí zpět do spalovacího prostoru a tím snižuje obsah oxidů dusíku ve zplodinách hoření. Díky přímému kontaktu s výfukovými plyny se tento ventil znečišťuje karbonem a jeho životnost se uvádí v intervalu 80 až 150 tisíc kilometrů. U některých typů lze tento interval prodloužit vyčištěním ventilu.



Obr. 3 Porovnání ventilů EGR (vlevo – nový; vpravo - zanešený, nepohyblivý) [15]

2.3.4 TURBODMYCHADLO

Moderní turbodmychadla jsou konstrukčně menší, obvykle pracující ve velmi vysokých otáčkách. Provoz turbodmychadla je proto velmi citlivý na dva faktory - mazání a chlazení. Pokud je některý z těchto faktorů zanedbán, pak se životnost prudce snižuje. Obvykle je nutná výměna v rozmezí mezi 100 a 250 tisíci kilometrů nebo repasování při počínajících příznacích závady (pískání).

2.3.5 VÝFUKOVÉ POTRUBÍ

Životnost vlastního výfukového potrubí se pohybuje okolo 3 let provozu v závislosti na použitém materiálu, zátěži vozidla v zimním provozu a podobně. Katalyzátor vydrží zhruba 130 tisíc kilometrů, potom se jeho účinnost snižuje a obsah škodlivin ve výfukových plynech roste. Filtr pevných částic u vznětových motorů málokdy pracuje po ujetí 300 tisíc kilometrů a jeho výměna se pohybuje v rozmezí 10 až 170 tisíc korun.

2.3.6 PŘEVODOVKA

Výdrž manuálně řazené převodovky je velmi vysoká. Obvyklé závady se vztahují spíše na opotřebení synchronizačních spojek a ložisek. U klasické automatické převodovky se uvádí životnost 250 tisíc kilometrů.

2.3.7 KAROSÉRIE

Koroze dříve patřila mezi největší překážky životního cyklu vozidla. Například u staré Škody 120/105 byla předpokládána životnost karosérie 4 až 5 let. V dnešní době garantují přední automobilky odolnost proti prorezavění karosérie na úrovni 12 roků. Tento pokrok nastolily celopozinkované a zaplavovacím voskem konzervované karosérie, pro které není problém jezdit 30 let od data výroby. Pro běžného spotřebitele tedy karosérie nemá značný vliv na životnost celého vozidla. Karosérie některých vozidel jsou vyráběny celé nebo částečně z hliníku, kde problém s korozí odpadá. [20]

3 ASPEKTY ZACÍLENÍ NA KONKRÉTNÍ DOBU ŽIVOTNOSTI

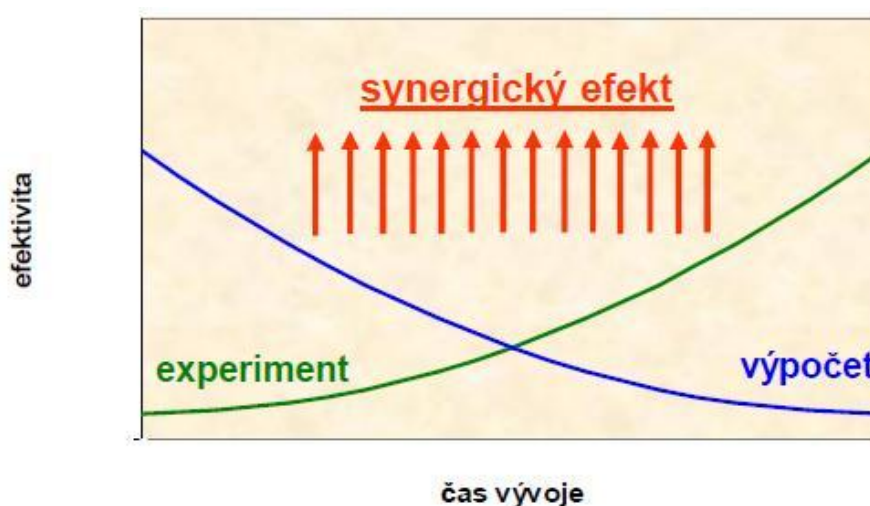
Jak jsem již uvedl v úvodu této práce, volba životnosti má značný vliv na podobu finálního produktu. Výrobci se musí snažit splnit očekávání zákazníků, která jsou stále náročnější, z druhé strany je ale zbytečné vyrábět vozidlo s životností například 20 let. Při současném tempu vývoje je zřejmé, že takové vozidlo by bylo v té době již morálně zastaralé, nevyhovující předpisům na ochranu životního prostředí a bezpečnost.

3.1 EKONOMIE

Základním cílem každého výrobce automobilu je dosažení co největšího zisku. Odtud se taky odvíjí všechny ekonomické, a v některých případech i technické, nároky na vozidlo.

S vývojem počítačů se stále zdokonalují programy predikce životnosti a pravděpodobnostní metody. Konstrukteři se snaží navrhnout stroj co nejefektivněji. Na jedné straně optimální vlastnosti produktu, krátká doba vývoje, nízké náklady na výrobu, vysoká spolehlivost a na straně druhé maximální vytiženost továren, dostatečný odběr náhradních dílů jsou pilíře každé automobilky.

Při využití moderních softwarů lze predikovat očekávanou délku života součásti. Pokud takové programy spojíme se zkušenostmi daného výrobce v oboru a vhodným zakomponováním zkoušek, pak lze zkrátit čas při navrhování a zkoušení až na polovinu oproti konvenčním způsobům vývoje [17]. Ušetřený čas znamená ušetřené peníze (i při započítání nákladů na zakoupení drahých softwarů) a náskok před konkurencí.



Obr. 4 Koncept hybridního experimentu (fyzikálně-virtuálního) [36]

3.2 EKOLOGIE

Normy ošetřující dopad provozu vozidel na životní prostředí se stále zpřísňují. Tento trend podporuje i současná světová politika. Ta zavádí vyšší silniční daně případně poplatky za vjezd do velkých měst pro automobily, které produkují větší množství škodlivin. Dá se tedy předpokládat, že v budoucnu bude doprava omezena těmito ekologickými poplatky ještě více a provoz starého „neekologického“ vozu bude velmi nevýhodný.



3.3 BEZPEČNOST

Bezpečnost je na tom podobně jako ekologie. Klade se stále větší důraz na aktivní i pasivní bezpečnost a nikdo si dnes nemůže koupit vůz bez ABS nebo airbagu. Každý zákazník chce jezdit v bezpečném automobilu a producenti to vědí. Z bezpečnosti se stal marketingový nástroj hodnocený stupnicí EuroNCAP.

3.4 POVĚST SPOLEČNOSTI

Dobrá pověst je vždy podporována kvalitními výrobky nebo alespoň výrobky s životností, jakou očekává spotřebitel. Před uvedením nového modelu do prodeje výrobce ověřuje vlastnosti automobilu sérií testů v laboratorních zkušebnách i při jízdních zkouškách.



Obr. 5 Multiaxiální simulátor vozovky při vývoji vozu Škoda Octavia [36]

Závažné chyby by znamenali nejen snížení pověsti u zákazníků, ale také značné finanční ztráty. Část ceny každého automobilu je totiž určena na pokrytí nákladů záručních oprav. Pokud je tato částka vyčerpána, musí přijít peníze z jiných zdrojů.

Značnou ztrátu pověsti může způsobit tzv. svolávací oprava. Takový případ nastane, pokud se u vybraného modelu opakuje závada, která má vliv na bezpečnost cestujících nebo silničního provozu. Tehdy je potřeba, aby všichni vybraní klienti navštívili autorizovaný servis, který provede kontrolu dané části vozidla a sjedná případnou nápravu.

3.5 DŮSLEDKY

Každoročně se na světě vyrobí něco kolem 70 milionů vozidel. Kdyby mělo každé vydržet 20 let, nebylo by pro výrobce možné zajistit neustálé naplnění výrobních kapacit a vlastní hospodářský růst. Producenti vozidel přitom přímo zaměstnávají 8,5 milionu lidí a další jsou navázáni na jejich dodavatele. [16]

Tento systém plánované životnosti však přináší výrazné úspory na straně výroby a celý automobil se stává levnější. Nákup nového vozu je tím pádem dostupnější.

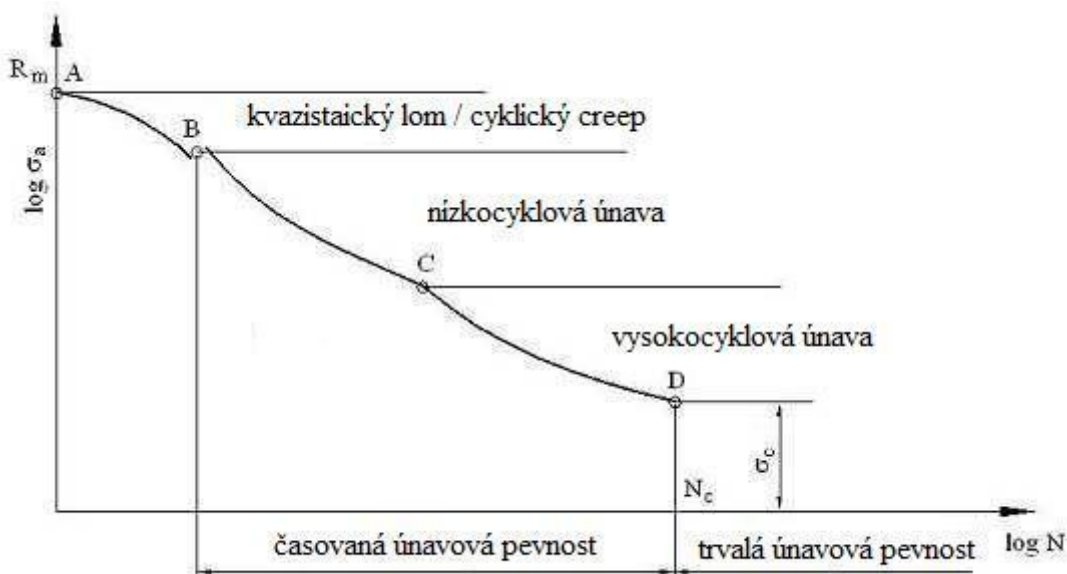
4 DIMENZOVÁNÍ NA ÚNAVU

Abychom mohli dále proniknout do pojmu životnosti a odhalit způsoby jejího ovlivnění, je třeba vysvětlit základní problematiku cyklického namáhání a únavového porušování.

Mezním stavem únavy je definován stav, kdy v důsledku působení časově proměnných zatížení dojde k poruše funkční způsobilosti konstrukce či jejího elementu. Charakteristické pro tento proces je to, že maximální hladina kmitavého napětí je mnohem nižší než činí statická pevnost daného dílu. Součásti jsou v praxi cyklicky namáhány nepravidelně, avšak při zkoušení je používán obvykle sinusový průběh zatěžování (méně často trojúhelníkový nebo obdélníkový). Vzhledem k počtu cyklicky pracujících částí v automobilu je tento způsob zatížení velmi podstatný a pokud budeme uvažovat i vibrace při jízdě, pak má vliv na celé vozidlo.

4.1 ÚNAVOVÁ ŽIVOTNOST

Únavové chování materiálů lze vyjádřit pomocí křivek únavových životností. Nejčastěji používanou je Wöhlerova křivka, což je závislost amplitudy napětí σ_a na počtu cyklů do porušení N . Protože jsou hodnoty příliš vysoké, je obvykle vynášena v semilogaritmických souřadnicích.



Obr. 6 Schematické znázornění Wöhlerovy křivky [34]

Wöhlerovu křivku lze rozdělit na několik oblastí:

- A-B oblast kvazistatického lomu (při zatěžování symetrickým cyklem $\sigma_m=0$),
- A-B oblast cyklického creepu (při zatěžování míjivým cyklem $\sigma_m=\sigma_a$),
- B-C oblast nizkokyكلové únavy (pro oceli zhruba 10^2 - 10^5 cyklů),
- C-D oblast vysokocyكلové únavy (pro oceli zhruba 10^5 - 10^8 cyklů).



Výchozí hodnotou je mez pevnosti R_m a při dosažení počtu cyklů N_c definujeme napětí σ_c jako mez únavy. Pro ocel bývá obvykle stanoveno $N_c=10^7$ cyklů. V oblasti A-B dojde k poruše velmi brzy – nejedná se o únavový proces.

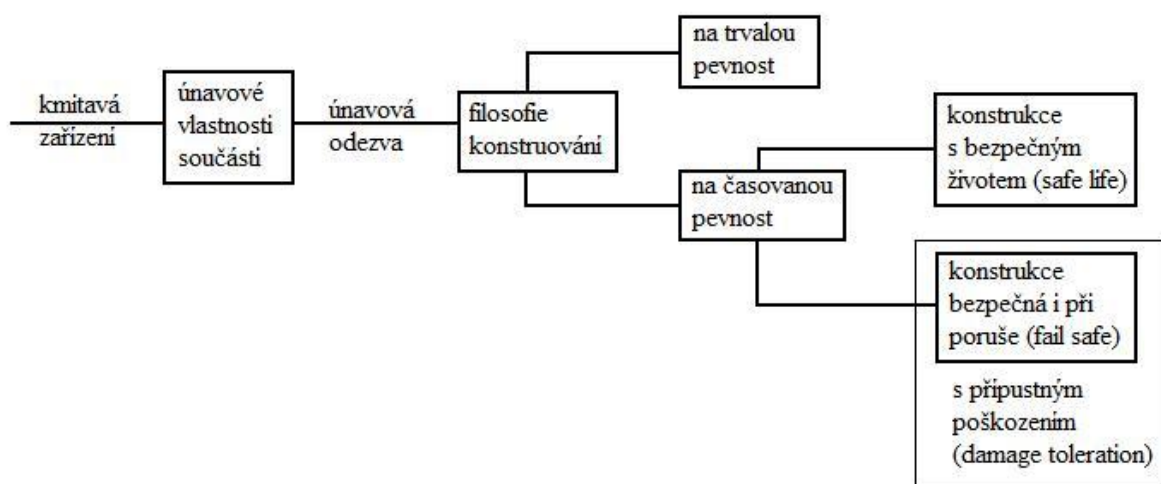
4.1.1 GIGACYKLOVÁ ÚNAVA

Od počátku výzkumu životnosti byla mez únavy (σ_c) chápána jako hodnota napětí, při kterém se materiál neporušil do 10^7 cyklů. Z této teorie vznikl předpoklad, že materiál vydrží nekonečný počet cyklů (= má neomezenou životnost) při napětí menším nebo rovno mezi únavy. V posledních desítkách let se ovšem ukazuje, že k porušení může dojít i při mnohem větším počtu cyklů, přestože je hodnota cyklické plastické deformace 10^{-5} i méně. Této oblasti říkáme gigacyklová oblast únavy materiálu. Lze sem zařadit například lopatky parních turbín (10^{11} cyklů), klikové hřídele spalovacích motorů (10^{10} cyklů), součásti klikových mechanismů spalovacích motorů ($5 \cdot 10^8$ cyklů), hnací hřídele ($3,6 \cdot 10^8$ cyklů) a další. [18]

Přestože jsou oblasti nízkocyklové a vysokocyklové únavy dostatečně probádány, chování materiálů v oblasti gigacyklové únavy není dosud zcela přesně popsáno. Toto je také způsobeno velkou nákladností zkoušek i v případě použití vysokofrekvenčního zatěžování. Na dosažení např. 10^{10} cyklů při vysokofrekvenčním namáhání je potřeba přibližně týden, ale na prozkoumání gigacyklové oblasti únavy je nutné dosáhnout hodnot až $10^{11} - 10^{12}$ počtu cyklů, což je extrémně náročné. Za takto dlouhou dobu zatěžování je zkušební proces ovlivněn mnoha faktory.

4.2 FILOSOFIE KONSTRUOVÁNÍ

Konstruktor se zajímá o únavovou pevnost a životnost a také o stanovení bezpečnosti součásti proti porušení.



Obr. 7 Schéma konstruování na únavu [32]



4.2.1 KONSTRUOVÁNÍ NA TRVALOU PEVNOST

Někdy označované také jako dimenzování pod mez únavy nebo na neomezenou životnost je nejstarší a nejpoužívanější postup, při kterém je zaručena provozní způsobilost součástí během celé fyzické životnosti součástí. Výpočet je završen stanovením součinitele bezpečnosti. Při používání analytických metod byla výsledkem poměrně robustní, neefektivní konstrukce, kde se odhadovali špičky napětí v nebezpečných místech na základě zkušeností konstruktéra. Tento problém odstraňují moderní softwary na bázi metody konečných prvků. Je zřejmé, že tento postup je využíván v malosériové výrobě. [32]

4.2.2 KONSTRUOVÁNÍ NA ČASOVANOU PEVNOST

Dimenzování na časovanou pevnost neboli na omezenou životnost vyžaduje podstatně větší znalosti o únavovém zatížení konstrukce. Tento způsob je často používán například při konstruování součástí pro motorsport. [32]

KONSTRUKCE S BEZPEČNÝM ŽIVOTEM (SAFE-LIFE)

U žádné ze součástí soustavy není dovolen vznik únavového porušení během přípustné doby provozu. Po skončení přípustné životnosti musí být daná součást nahrazena.

KONSTRUKCE BEZPEČNÉ I PŘI PORUŠE (FAIL-SAFE)

Spočívá v navržení systému tak, aby při poškození některé součásti přenášely zatížení ostatní prvky po dobu nezbytně nutnou. Včasná identifikace takových poruch je podmíněna skupinou preventivních kontrolních prohlídek.

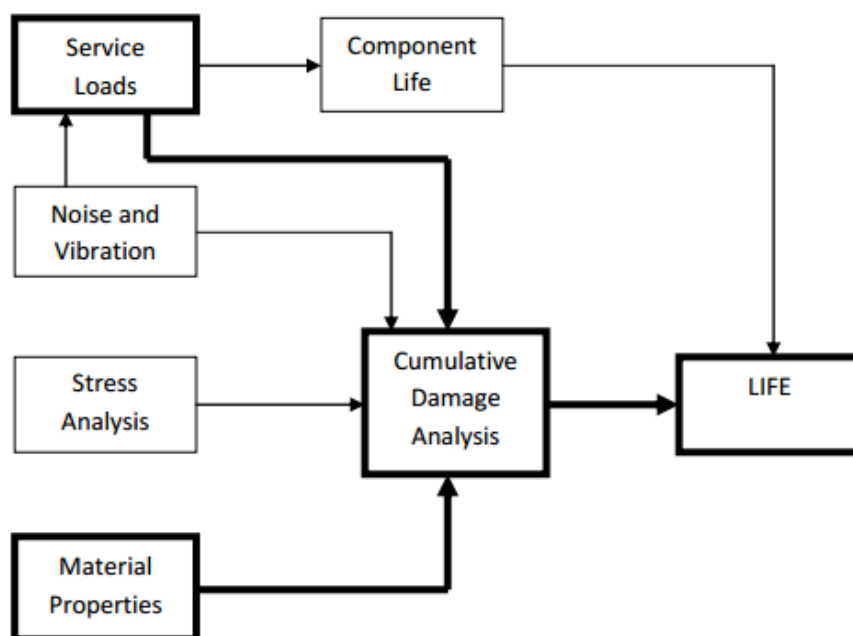
4.2.3 PRAVDĚPODOBNOSTNÍ METODY

V současné době se pro velké série součástí zatěžovaných vysokocyklovou (nebo dokonce gigacyklovou) únavou používají pravděpodobnostní metody posuzování spolehlivosti. V rámci těchto metod je již uvažován náhodný charakter veličin vstupujících do posudku spolehlivosti. To potom umožňuje vyjádřit podmínku spolehlivosti mírou pravděpodobnosti dosažení mezního stavu. Výsledkem použití statistických metod je hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce doby života součásti, která charakterizuje souvislosti dob provozu (počtu cyklů) s pravděpodobností bezporuchového provozu. V automobilovém průmyslu jsou tyto metody často využívány, protože poskytují potřebné informace pro optimální návrh. Ten musí být kompromisem mezi maximální spolehlivostí a minimálními náklady. [22]



5 METODY ŘEŠENÍ ÚNAVOVÉ ŽIVOTNOSTI

V této kapitole se budu zabývat metodami, které používají výrobci vozidel při navrhování. Následující schéma ukazuje základní prvky výpočtu únavové životnosti.



Obr. 8 Schéma základních prvků při výpočtu únavové životnosti [1]

5.1 ANALÝZA ŽIVOTNOSTI MODÁLNÍ METODOU

Jako první jsem vybral výpočet životnosti klikové hřídele podle společnosti Škoda Auto, a.s. [8]. Tento výpočet probíhá ve třech základních fázích.

5.1.1 FEM MODEL

Jako první je provedena modální analýza klikové hřídele se setrvačníkem. Na jejím základě jsou vyhodnoceny a porovnány různé varianty hřídele s ohledem na jejich tuhost v základních tvarech kmitů. Modální tvary jsou počítány pomocí FEM (MKP) modelu, na kterém jsou vytvořeny tzv. interface nody sloužící k zadání zatížení a okrajových podmínek v následném MBS modelu

5.1.2 MBS MODEL

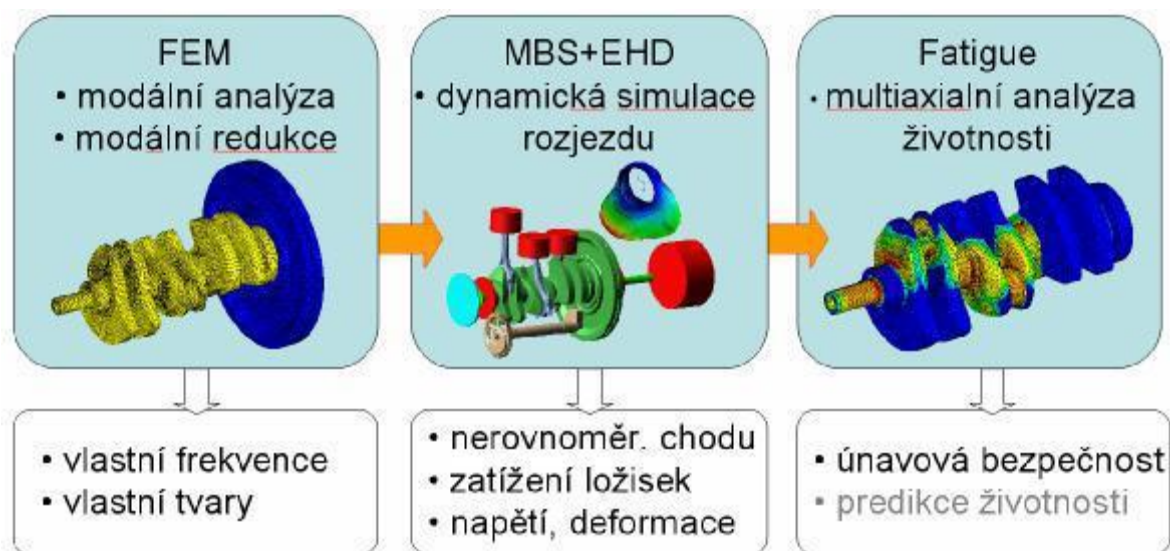
Z dynamické simulace rozběhu motoru (v tomto případě prostředí ADAMS) zjistíme průběhy modálních souřadnic jednotlivých tvarů klikového hřídele, deformace jednotlivých zalomení a zatížení hlavních ložisek. Z těchto dat lze provést optimalizaci za účelem potlačení torzních kmitů (návrh torzních tlumičů) a snížení nerovnoměrnosti chodu (návrh setrvačníku) a podobně.

V každém uzlu FEM modelu se nalezne rovina s nejkritičtějším průběhem napětí. Tomuto napětí odpovídá zátěžný bod v Haighově diagramu. Rovina s nejnižším koeficientem bezpečnosti je hledanou kritickou rovinou a po aplikaci na celou součást je známo rozložení bezpečnosti na celém hřídeli.

5.1.3 VÝPOČET ÚNAVOVÉ PEVNOSTI

K výpočtu je v tomto případě použit software FEMFAT-MAX. Výsledné řešení je potom buď ve formě výpočtu únavy (je nutné znát celkové spektrum zatěžování) nebo výpočtu bezpečnosti vůči mezi trvalé pevnosti (nepřipouští porušení), což je vzhledem k zatížení klikové hřídele častější postup.

Obr. 9 Analýza životnosti klikového hřídele [8] ukazuje jednotlivé fáze výpočtu včetně jejich významu a výstupů.



Obr. 9 Analýza životnosti klikového hřídele [8]

5.2 FALANCIS LMS

Program FALANCIS používá Fiat research center se sídlem v Turíně a poprvé byl aplikován při návrhu kabiny traktoru značky CNH. Hlavním cílem tohoto programu je snížit náklady a čas potřebný na vývoj produktu z hlediska únavové pevnosti. Dříve byl fyzický prototyp testován a v případě poruchy musel být konstruován tak dlouho až prošel zkouškami, případně byl na místa poruch přidán další materiál svařováním.

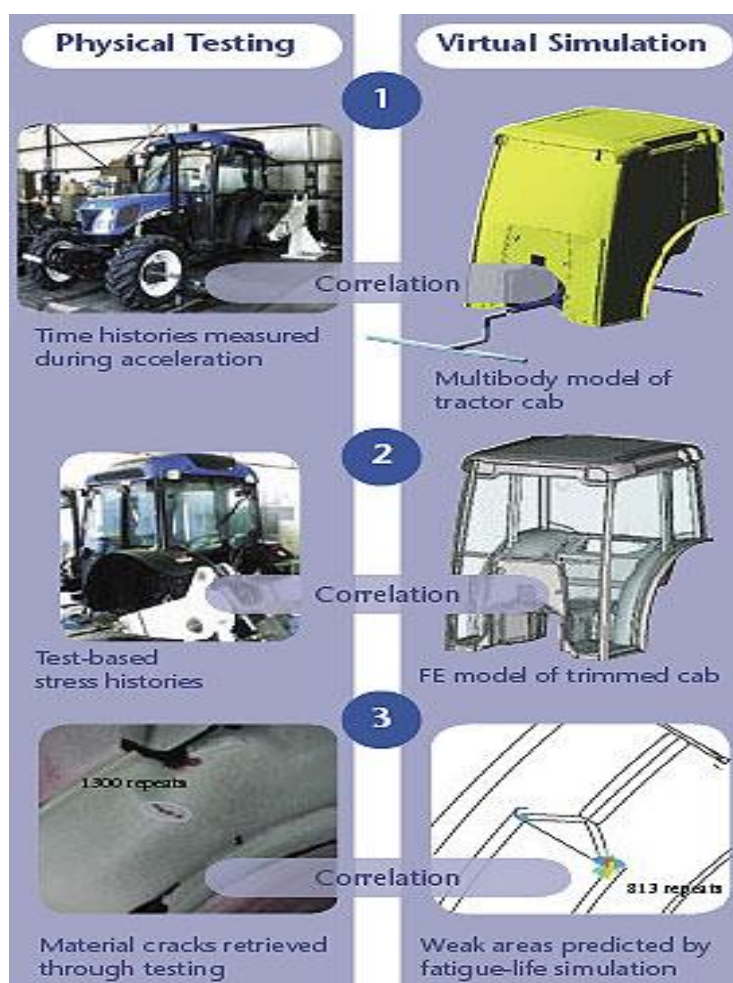
Za pomoci FALANCIS simulace bylo možné vybrat nejvhodnější z dvanácti uvažovaných konstrukčních řešení. Současně bylo dosaženo výborné životnosti kabiny, která je výrazně namáhána nerovnostmi terénu a vibracemi a celkový počet fyzicky testovaných cyklů bylo možné snížit o tři. Výzkumné centrum odhaduje, že při aplikaci této metody ušetřilo 200 tisíc dolarů a zkrátilo čas potřebný k vývoji o šest měsíců, čímž došlo ke zvýšení ziskovosti celého projektu.



Celý proces se skládá z:

- MultiBody Simulation (MBS) – určení průběhu zatížení a působení na kabinu,
- Finite-Element Modeling (FEM) – pomocí metody konečných prvků bylo zjištěno napětí v celé struktuře při působení různých režimů vibrace,
- Fatigue-Life Prediction (FLP) – určení pravděpodobného poškození v závislosti na únavových kritériích.

Při vývoji kabiny došlo k verifikaci závěrů zjištěných simulací také při fyzickém testu na zkušebně. Testování potvrdilo závěry získané při simulaci včetně praskliny v tepelně ovlivněné oblasti svařování.



Obr. 10 Posouzení životnosti konstrukce kabiny traktoru [17]



6 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ÚNAVU

Základním parametrem, kterým lze ovlivnit únavovou životnost je materiál a způsob výroby.

Pro klikové hřídele je v sériové výrobě možné uvažovat zápustkové kování nebo tlakové lití. Při kování je výhodou dosažená textura, u níž vlákna kopírují tvar hřídele a zlepšují mechanické vlastnosti. U tlakového lití jsou hlavními výhodami vlastnosti používaných materiálů. Litiny mají lepší tlumicí vlastnosti, což pozitivně ovlivňuje amplitudu kmitů v rezonančních podmínkách. Nižší modul pružnosti snižuje citlivost k vrubům a rizikovost vnitřního pnutí. Pro kusovou případně prototypovou výrobu se kliková hřídel obrábí z polotovaru. Výroba je levnější, avšak mechanické vlastnosti jsou oproti předcházejícím způsobům horší. [5]

Mez únavy se stanovuje na zkušebních vzorcích v laboratorních podmínkách. U skutečného konstrukčního dílu jsou takové podmínky nereálné. V případech, kdy nemáme k dispozici výsledky únavových zkoušek přímo na reálné součásti, pak její mez únavy přepočítáváme podle níže uvedených součinitelů. Následně jsou uvedeny metody zvýšení únavové životnosti u klikového hřídele.



Obr. 11 Únavový lom klikového hřídele [30]

Pozn.: Níže uvedené podkapitoly jsou zpracovány podle SHIGLEY, J. *Konstruování strojních součástí* [2]. Z důvodu jednoduchosti jsou součinitele uvažovány pro deterministické způsoby výpočtu a poskytují zde pouze představu o změně meze únavy oproti hodnotám získaným z únavových zkoušek. Pro stochastické metody jsou tyto součinitele využívány s drobnými modifikacemi (kromě součinitele k_e).

6.1 VLIV JAKOSTI POVRCHU

K iniciaci trhliny dochází obvykle na povrchu materiálu a proto má stav povrchu významný vliv na únavové vlastnosti. Platí, že materiály o vyšší mezi pevnosti jsou citlivější na stav povrchu. Zavádíme tedy součinitel jakosti povrchu k_a :



$$k_a = aR_m^b \quad (1)$$

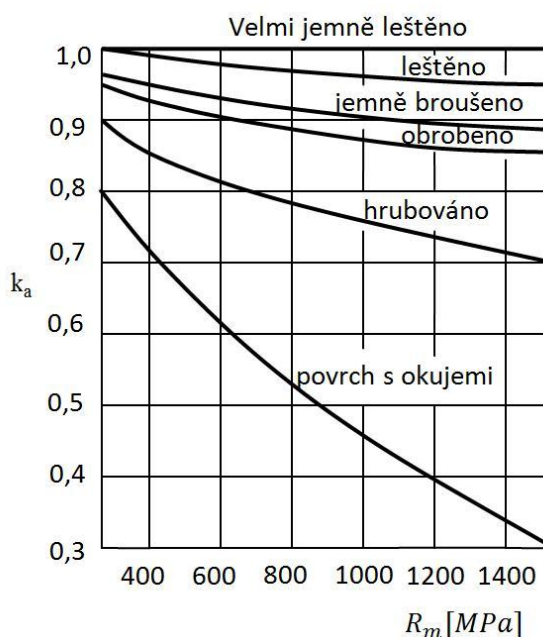
kde R_m je minimální hodnota meze pevnosti v tahu,
parametry a, b jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1 Parametry rovnice (1) pro výpočet součinitele jakosti povrchu [2]

Povrch dokončený	a	b
broušením	1,58	-0,085
obráběním nebo tažením za studena	4,51	-0,265
válcováním za tepla	57,7	-0,718
kováním	272	-0,995

6.1.1 DOKONČOVACÍ OPERACE

Pro funkční plochy klikového hřídele obvykle nestačí povrch získaný po obrábění. Proto se zařazují dokončovací operace, jejichž vliv na mez únavy ukazuje následující graf.



Obr. 12 Vliv dokončovacích operací na mez únavy[3]

BROUŠENÍ

Broušení je nejvyužívanější dokončovací operace, která nevyžaduje speciální stroje. Lze dosáhnout drsnosti povrchu R_a 0,04 až 0,02 μm a materiál se obvykle musí chladit, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění. Vždy se zařazuje po nitridování.

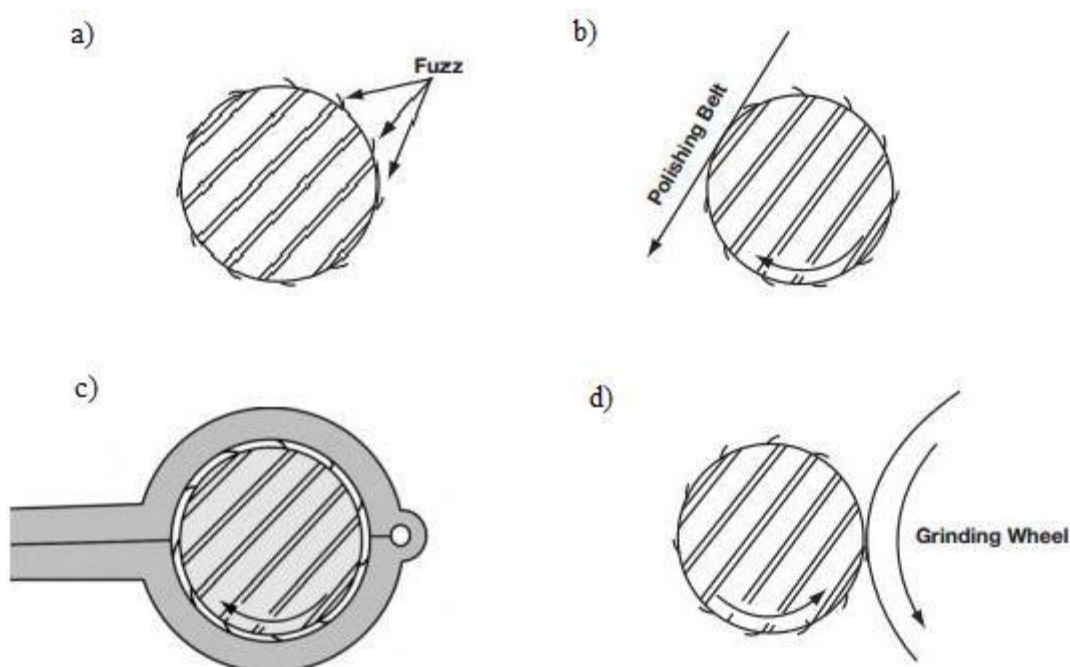
LAPOVÁNÍ A SUPERFINIŠOVÁNÍ

Pokud požadavkům na povrch nevyhoví broušení, pak se zařazuje lapování nebo superfinišování. Po těchto operacích se uvádí drsnost povrchu $Ra\ 0,012\mu m$.

HLAZENÍ

I po broušení jsou na povrchu čepu přítomny mikroskopické nerovnosti (Obr.13a) orientované proti směru hodinových ručiček. Snahou je tyto nerovnosti „zahladit“ do polohy ve směru hodinových ručiček.

Toho lze dosáhnout několika metodami. Obr.13b ukazuje použití leštícího pásu, který běží rychleji než otáčky hřídele, přitom nezáleží na směru otáčení hřídele. Další možností je hlazení za pomoci leštícího kotouče (Obr.13d) nebo otáčení hřídelí v uzavřené kleci (Obr.13c).



Obr. 13 Dokončování hlazením [13]

KULIČKOVÁNÍ

Na povrch součásti jsou vystřelovány drobná tělíska (obvykle kuličky). Díky kuličkování dochází ke ztuhnutí povrchu a tedy zvýšení napětí v povrchové vrstvě. Uzavírají se tak trhlinky ve struktuře a brání se jejich dalšímu šíření, což pozitivně ovlivňuje únavovou pevnost (ta se může zvýšit až desetinásobně). [11]

Kuličky jsou na předmět vystřelovány za pomoci proudu vzduchu, progresivní metody pak zahrnují použití laseru (Laser Shock Peening) nebo ultrazvuku (Ultrasonic Peening).



NANÁŠENÍ DLC (DIAMOND LIKE CARBID) POVLAKŮ

Jedná se o nanášení amorfních vrstev složených z grafitického uhlíku, diamantového uhlíku a vodíku v různých poměrech. Výsledná struktura má tzv. super nízký součinitel tření. V současné době se však vzhledem k vysokým nákladům nepoužívá. [5]

6.1.2 TEPELNÉ A CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Chemicko-tepelné zpracování je používáno nejen z důvodu zvýšení odolnosti proti opotřebení, ale také ke zlepšení únavových vlastností materiálu. Zvyšuje se tvrdost a tlaková pnutí v povrchových vrstvách a tím se zvyšuje mez únavy materiálu.

KALENÍ + POPOUŠTĚNÍ

Kalením lze zlepšit určité mechanické vlastnosti materiálu, především zvýšení tvrdosti. Spočívá v ohřátí na kalící teplotu a prudkým ochlazením v kalícím prostředí. Některé materiály jsou kalitelné na vzduchu (samokalitelné) na jiné musíme použít tzv. kryogenní zpracování, abychom dosáhli teploty a proměnili většinu zbytkového austenitu na martenzit (teplota „martenzit finiš“). Po kalení je zařazováno popouštění, které má za úkol odstranit velká vnitřní pnutí v materiálu.

Samotná tato metoda však není dostatečná pro povrchy klikových čepů. Tvrdost po kalení je obvykle spojena s nízkou mezí únavy.

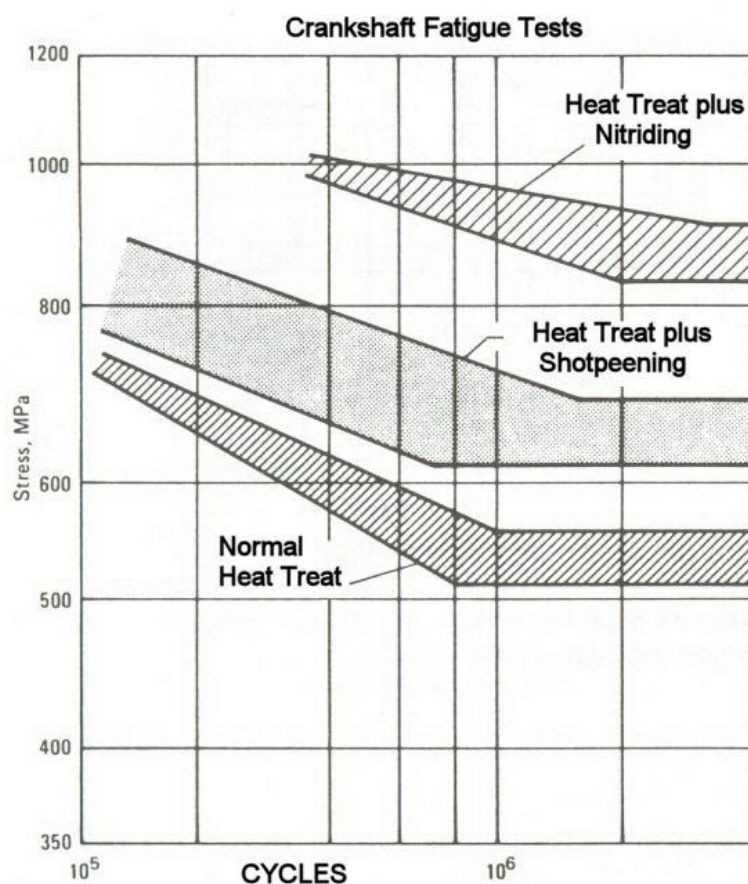
CEMENTOVÁNÍ

Cementování je sycení povrchu uhlíkem za vysokých teplot, což podporuje tvorbu martenzitu. Finální součást se následně povrchově kalí a popouští. V současné době je tato metoda na ústupu a nahrazuje ji nitridování. Hlavními negativy této metody jsou dlouhé působení vysoké teploty a časté praskliny na povrchu hřídele. Mez únavy se zvyšuje o 30 až 70 %.

NITRIDOVÁNÍ

Dnes nejčastěji využívaný způsob zpracování klikového hřídele, při němž se dosahuje vysoké tvrdosti (až 900 HV), pevnosti, odolnosti proti opotřebení a zlepšení únavové životnosti o 50 až 70%. Tyto účinky se objevují bez nutnosti kalení. Nitridování je sycení povrchu dusíkem, přičemž tloušťka vrstvy je obvykle 0,1 až 0,2mm (jeden z výrobců uvádí až 1mm silnou vrstvu pro použití ve vysoce zatížených motorech). Jsou uváděny tři způsoby nitridování: plynová, nanášení roztavených solí na bázi kyanidu a přesnější plazma-iontová nitridace. Nejlepší výsledky je možné pozorovat u slitiny s vyšším obsahem chromu, molybdenu nebo vanadu. Po nitridaci musí být vždy zařazeno broušení pro odstranění svrchní vrstvy s bílými částicemi. Oproti cementování je tato operace prováděna za nízkých teplot a je tedy levnější.[12]

Následující obrázek ukazuje mez únavy stejného materiálu klikového hřídele, který je zpracován kalením (Normal Heat Treat), kalením + kuličkováním (Heat Treat plus Shotpeening) a nitridováním (Heat Treat plus Nitriding).



Obr. 14 Test únavy klikového hřídele [12]

6.2 VLIV VRUBU

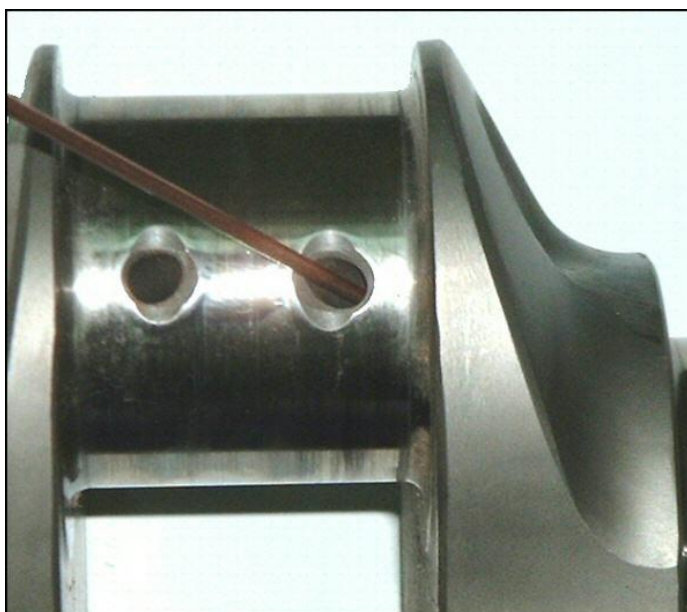
Konstrukční (drážky, osazení, otvory) i technologické (stopy po obrábění a podobně) vruby mají velký dopad na únavové charakteristiky. V okolí vrubu dochází k nerovnoměrnému rozdělení napětí. Nejvyšší koncentrace napětí a deformace vzniká ve vrcholu vrubu a začíná iniciace trhliny.

6.2.1 ZASTAVENÍ TRHLIN

Někdy se využívají vruby s velkým poloměrem k zastavení postupující trhliny. Typickým příkladem použití je oprava čelního skla uvolněním napětí na špičce praskliny.

6.2.2 KRITICKÁ MÍSTA NA KLIKOVÉM HŘÍDELI

Na klikovém hřídeli jsou kritickými místy zaoblení u hlavních a ložiskových čepů. Zvětšování těchto zaoblení ale zvětšuje samotný hřídel a proto se dnes obvykle používá přechod s proměnným zaoblením. Šikmé hrany otvorů pro mazání jsou dalším významným původcem únavových trhlin a obvykle se jejich okraj srazí třískovým obráběním. Moderní metodou je vytvoření tvarovaného přechodu mezi vzniklými plochami, jak je uvedeno na následujícím obrázku.



Obr. 15 Úprava hrany šikmo vrtaného otvoru [12]

Tyto úpravy hran je nutné provádět ještě před chemicko-tepelným zpracováním, abychom zamezili možnosti odlomení zpevněného povrchu.

Jinou metodou je vtlačení kuličky do vzniklého otvoru (příznivé působení i z hlediska pnutí v povrchové vrstvě). Jeden z předních výrobců (Bryant Racing) vyvinul vlastní honovací systém při vysokých tlacích. Při této metodě jsou významně eliminovány ostré hrany a povrchové vady, což přispívá k celkové únavové životnosti součásti. [12]

6.3 VLIV VELIKOSTI STROJNÍ SOUČÁSTKY

Zkoušky pro stanovení Wöhlerovy křivky se provádějí na hladkých válcových vzorcích o průměru 6 až 10 mm. Pro integraci těchto výsledků na rozměrnější součástky používáme součinitel velikosti k_b , který je závislý na tvaru a velikost průřezu součásti. Při konstrukci klikového hřídele je tento problém spojený s volbou materiálu, kdy v případě použití litiny obvykle narůstají rozměry díky nižší ohybové pevnosti.

6.4 VLIV TEPLoty

Se stoupající teplotou klesá mez únavy materiálu a naopak. Tento proces je omezen dosažením tranzitní teploty, při kterém mez únavy prudce klesá (materiál zkřehne).

Tab. 2 Vliv teploty na mez únavy [2]

teplota [°C]	20	50	100	150	200	250	300	400	500	600
souč. teploty k_d	1,00	1,01	1,02	1,025	1,020	1,000	0,975	0,900	0,768	0,549



Kliková hřídel je chlazená motorovým olejem s obvyklou provozní teplotou 80 až 90°C. Pro tyto podmínky dosahuje součinitel vlivu teploty k_d hodnoty 1,02 a nemá tedy zásadní vliv na mez únavy.

6.5 SOUČINITEL SPOLEHLIVOSTI

Následující tabulka ukazuje, jak se mění mez únavy s rostoucími nároky na spolehlivost součásti. Součinitel spolehlivosti k_e je používán pro deterministické metody výpočtu. Při pravděpodobnostním dimenzování vychází toto omezení z podstaty metody.

Tab. 3 Vliv spolehlivosti na mez únavy [2]

spolehlivost [%]	50	90	95	99	99,9	99,99	99,999	99,9999
souč. spolehlivosti k_e	1,000	0,897	0,868	0,814	0,753	0,702	0,659	0,620

V automobilovém průmyslu se pro velké série uvažuje celková spolehlivost minimálně 99,0%. Při použití štíhlé výroby podle principů společnosti Toyota je zaručena minimální spolehlivost 99,8%. [4]

6.6 VLIV ZBYTKOVÝCH PNUTÍ V POVRCHOVÉ VRSTVĚ

Zbytková napětí v povrchové vrstvě mohou být tahová (zhoršují únavovou pevnost) nebo tlaková (zlepšují únavovou pevnost). Příčiny pnutí jsou mechanické síly, ohřev, ochlazování, fázové transformace nebo vylučování nových strukturních složek. Při výrobě klikového hřídele se využívá zbytkových pnutí ke zlepšení únavové pevnosti například při tepelném zpracování nebo dokončovacích operacích.

6.7 VLIV VÍCEOSÉ NAPJATOSTI

Víceosá napjatost vzniká v důsledku zatěžování kombinovaným namáháním nebo prostým namáháním v okolí vrubu. Na klikový hřídel působí setrvačné síly a přes píst síly od tlaku plynů. Ty vyvolávají napětí ohybové, tlakové, tahové a krut. Jestliže působí maximální napětí od více druhů namáhání ve stejném místě a vždy současně, pak se urychluje rozvoj únavového poškození.



ZÁVĚR

V automobilovém průmyslu se v současnosti používá mnoho softwarů k řešení únavové životnosti, které mohou výrobci přinést značné úspory. Pomocí počítače tak lze virtuálně odhalit kritické místo ještě před fyzickým testováním nebo naopak snížit náklady v oblastech s příliš velkou bezpečností. Únavové vlastnosti dané součásti ovlivňuje mnoho faktorů. V některých případech se tyto vlivy využívají k ovlivnění životnosti, jak bylo ukázáno na příkladu klikové hřídele.

Produkce vozidel se stále více přibližuje produkci spotřebního zboží. Emisní normy směřují k stále menšímu dopadu na životní prostředí a automobily s vyšším obsahem škodlivin již dnes podléhají sankcím například při vjezdu do některých měst. Kromě těchto ekologických aspektů jde také o ekonomii. Na automobily jsou kladeny stále vyšší nároky na komfort a bezpečí. Mnoho konstrukčních celků, které se dříve opravovaly, se dnes vyměňují za nové. Těžší havárie znamená, vzhledem k množství airbagů, totální škodu. Celá produkce tak směřuje k době, kdy bude oprava jakékoliv pozáruční závady finančně náročnější než koupě nového vozu.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] RASHID, M. *Development of strain-based fatigue life calculation software for variable amplitude loading data*. 2010. 24 s. Pahang: Universiti Malaysia Pahang. Faculty of mechanical engineering.
- [2] SHIGLEY, J., MISCHKE, C., BUDYNAS, R. *Konstruování strojních součástí*. 1. Vyd. Brno: VUTUM, 2010. 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [3] FOLTA, Z. *Příspěvek k navrhování strojních součástí na základě vyhodnocení provozního zatížení*. 2004. 133 s. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. Habilitační práce.
- [4] LIKER, J. *The Toyota Way*. 1. Vyd. Praha: Management Press, 2007. 390 s. ISBN 978-80-7261-173-7.
- [5] VOPARIL, J. *Tvarová optimalizace klikového hřídele leteckého motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 85 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.
- [6] KAŠPAR, J. *Vliv frekvence zatěžování na únavové vlastnosti konstrukčních materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Stanislav Věchet, CSc.
- [7] *Aging American vehicle fleet* [online], 2012. [cit. 2012-02-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.carpaint.com.au/news/2012/aging-american-vehicle-fleet-28517>>.
- [8] SKÁCEL, J., KUCHAR, P., HLAVÁČEK, P. *Analýza klikových hřidelí* [online], 2004. [cit. 2012-0-14]. Dostupný z WWW: <https://www.civ.cvut.cz/others/ansys_meeting/data/12._AUM_Sbornik/Sekce_A_Mechanical/Skacel+Kuchar+Hlavacek-Analyzy_klikovych_hrideli.pdf>.
- [9] *Automobilky a obrat* [online], 2006. [cit. 2012-03-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.dfens-cz.com/view.php?cislocclanku=2006031903>>.
- [10] *ACEA: Average car age by country* [online], 2008. [cit. 2012-02-25]. Dostupný z WWW: <http://www.acea.be/images/uploads/files/20100520_average_car_age.pdf>.
- [11] *Car longevity* [online], 2012. [cit. 2012-03-11]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Car_longevity>.
- [12] *Crankshaft design issues* [online], 2010. [cit. 2012-04-14]. Dostupný z WWW: <http://www.epi-eng.com/piston_engine_technology/crankshaft_design_issues.htm>.
- [13] HAVEL, J. *Crankshaft surface finish* [online], 2009. [cit. 2012-04-24]. Dostupný z WWW: <http://www.aera.org/ep/downloads/ep7/EP07-2009_52-54.pdf>.
- [14] VAVERKA, L. *Dieslová pro a proti část IV* [online], 2012. [cit. 2012-03-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.auto.cz/dieselova-pro-a-proti-cast-iv-kolik-stoji-novy-filtr-65656>>.



- [15] *EGR blocking plate kit* [online], 2006. [cit. 2012-03-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.peachparts.com/shopforum/diesel-discussion/140290-egr-blocking-plate-kit-3-a-5.html>>.
- [16] *Employment* [online], 2010. [cit. 2012-04-10]. Dostupný z WWW: <<http://oica.net/category/economic-contributions/auto-jobs/>>.
- [17] *Fiat research center predicts fatigue life up-front product development* [online], 2010. [cit. 2012-03-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.lmsintl.com/Fiat-research-center-predicts-fatigue-life-up-front-product-development>>.
- [18] PANTĚLEJEV, L. *Gigacyklová únava kovových materiálů* [online], [cit. 2012-04-11]. Dostupný z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/gu/Uvod.html>>.
- [19] *Jaké jsou provozní náklady elektromobilu* [online], 2011. [cit. 2012-03-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.enviweb.cz/clanek/ekoauto/88936/jake-jsou-provozni-naklady-elektromobilu>>.
- [20] SIKAČ, J. *Je koroze vůbec ještě zajímavá* [online], 2006. [cit. 2012-03-10]. Dostupný z WWW: <http://www.vscht.cz/met/aki/kom_50/50_73_77.pdf>.
- [21] HORČÍK, J. *Levný elektromobil bude mít výměnné baterie* [online], 2011. [cit. 2012-03-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.hybrid.cz/levny-elektromobil-renault-zoe-bude-mit-vymenne-baterie>>.
- [22] VLK, M., FLORIAN, Z. *Mezní stavy a spolehlivost* [online], 2007. [cit. 2012-04-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.zam.fme.vutbr.cz/~vlk/meznistavy.pdf>>.
- [23] ŠVIDRNOH, R. *Moderní motor vydrží hravě čtvrt milionu km* [online], 2010. [cit. 2012-03-24]. Dostupný z WWW: <http://auto.idnes.cz/moderni-motor-vydrzi-hrave-ctvrt-milionu-km-nevadi-mu-ani-1100-otacek-1fn-/automoto.aspx?c=A100420_111826_auto_moto_fdv>.
- [24] HARRINGTON, W., MCCONNELL, V. *Motor vehicles and the environment* [online], 2003. [cit. 2012-02-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.rff.org/rff/documents/rff-rpt-carsenvirom.pdf>>.
- [25] *Motor vehicle census, Australia* [online], 2011. [cit. 2012-02-25]. Dostupný z WWW: <<http://www.abs.gov.au/ausstats/abs@.nsf/mf/9309.0>>.
- [26] ŠVIDRNOH, R. *Proč nezvolit automatickou převodovku* [online], 2008. [cit. 2012-03-24]. Dostupný z WWW: <http://auto.idnes.cz/proc-ne-zvolit-automatickou-prevodovku-fdf-/automoto.aspx?c=A080225_104250_automoto_fdv>.
- [27] NUTT, A. *Průměrná životnost vozidla* [online], 2009. [cit. 2012-03-11]. Dostupný z WWW: <http://www.articleannuaire.com/cs/Jak%C3%A1-je-pr%C5%AFm%C4%9Brn%C3%A1-%C5%BEivotnost-vozidla_250765>.
- [28] VASCONCELLOS, E., SIVAK, M. *Road safety in Brazil* [online], 2009. [cit. 2012-02-26]. Dostupný z WWW: <<http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/2027.42/63586/1/102260.pdf>>.



- [29] *Total Quartz* [online], 2011. [cit. 2012-03-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.total.cz/lub/content/NT000C127A.pdf>>.
- [30] SV TALK, *Tuning & Tweaking* [online], 2006. [cit. 2012-04-24]. Dostupný z WWW: <<http://forums.sv650.org/showthread.php?p=2114662>>.
- [31] ČERVENKA, J. *Týden s naftou* [online], 2007. [cit. 2012-03-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.autoweb.cz/tyden-s-naftou-diesel-z-druhe-ruky-je-past-na-kupujici>>.
- [32] JÍRA, J. *Únava* [online], Praha: ČVUT v Praze, 2009. [cit. 2012-04-11]. Dostupný z WWW: <<http://mech.fd.cvut.cz/education/master/k618tam/download/Unava.pdf>>.
- [33] ÚFM AV ČR, v.v.i., Skupina křehkého lomu. *Podpora výuky – mezní stavy materiálů: Únava materiálu* [online], 2010. [cit. 2012-04-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.ipm.cz/group/fracture/vyuka/doc/P10.pdf>>.
- [34] VĚCHET, S., LIŠKUTÍN, P., PETRENEC, M. *Únava materiálu* [online], Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. [cit. 2012-04-14]. Dostupný z WWW: <http://www.stanek-martin.euweb.cz/downloads/vut/2_semestr/bum/07_Unava.pdf>.
- [35] *U.S. consumers hold on to new vehicles nearly six years* [online], 2012. [cit. 2012-02-25]. Dostupný z WWW: <https://www.polk.com/company/news/u.s._consumers_hold_on_to_new_vehicles_nearly_six_years_an_all_time_high>.
- [36] ZDRAŽIL, K. *Úloha experimentu ve fázi vzniku výroby* [online], 2009. [cit. 2012-04-25]. Dostupný z WWW: <http://intech2.tul.cz/dokumenty/vystupy_z_projektu/09~Partner%20-%20%C5%A0KODA%20Auto/P2-02_%C3%A0loha%20experimentu%20ve%20f%C3%A1zi%20vzniku%20v%C3%BDrobku.pdf>.
- [37] *Výfuky, často kladené dotazy* [online], 2011. [cit. 2012-03-24]. Dostupný z WWW: <<http://www.aaavyfuky.cz/index.php?stranka=50-casto-kladene-dotazy->>>.
- [38] *Zadření motoru* [online], 2011. [cit. 2012-03-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.motorkari.cz/forum-detail/?ft=108491&fid=21>>.
- [39] PÍŠA, V. *Zjištění aktuální dynamické skladby vozového parku na silniční síti v ČR* [online], 2010. [cit. 2012-02-25]. Dostupný z WWW: <[http://www.rsd.cz/rsd/rsd.nsf/a3eda25d005dc6bec125737e0045602e/d3c30603511f1240c12578b500326e2f/\\$FILE/Vozov%C3%BD%20park%202010.pdf](http://www.rsd.cz/rsd/rsd.nsf/a3eda25d005dc6bec125737e0045602e/d3c30603511f1240c12578b500326e2f/$FILE/Vozov%C3%BD%20park%202010.pdf)>.
- [40] *Životnost* [online], 2012. [cit. 2012-03-10]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Životnost>>.



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	[-]	parametr pro výpočet součinitele jakosti povrchu
b	[-]	parametr pro výpočet součinitele jakosti povrchu
k_a	[-]	součinitel jakosti povrchu
k_b	[-]	součinitel velikosti
k_d	[-]	součinitel teploty
k_e	[-]	součinitel spolehlivosti
N	[-]	počet cyklů do porušení
R_m	[MPa]	mez pevnosti v tahu
σ_a	[MPa]	amplituda napětí