

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

AKCELEROVANÉ ZKOUŠKY KULOVÉHO KLOUBU VOZIDLA

VEHICLE BALL-JOINT ACCELERATED TESTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. BOHUMÍR SÝKORA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. PAVEL RAMÍK

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2009/10

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Bohumír Sýkora

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

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 diplomové práce:

Akcelerované zkoušky kulového kloubu vozidla

v anglickém jazyce:

Vehicle Ball-Joint Accelerated Testing

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte zpracování a vyhodnocení akcelerovaného testu kulového kloubu vozidla a ověřte získané výsledky verifikací experimentem.

Cíle diplomové práce:

1. Proveďte rešerši problematiky akcelerovaných testů komponent automobilů se zaměřením na druhy prováděných testů, vhodnost jejich použití, způsoby praktického provedení a software pro jejich zpracování.
2. Připravte postup zpracování vybraného akcelerovaného testu s využitím zvoleného software.
3. Proveďte praktické zpracování provedené akcelerované zkoušky kulového kloubu vozidla.
4. Ověřte získané výsledky verifikací experimentem.
5. Proveďte celkové zhodnocení, vyslovte se k vhodnosti použitých metod zpracování a vyslovte doporučení pro jejich další použití.

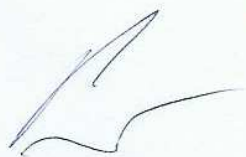
Seznam odborné literatury:

- [1] DODSON, B. L., SCHWAB, H. L. Accelerated Testing. A Practitioner's Guide to Accelerated and Reliability Testing. SAE International 2006.
- [2] KLYATIS, L. M. The Strategy of Accelerated Reliability Testing Development for Car Components. SAE International 2000.
- [3] ALTA: Accelerated Life Testing Data Analysis Software Tool [online], 2009, poslední revize 12.10.2009. Dostupné z: <<http://alta.reliasoft.com/>>
- [4] JANÍČEK, P., ONDRÁČEK, E., VRBKA, J. Pružnost a pevnost I, VUT Brno 1992.

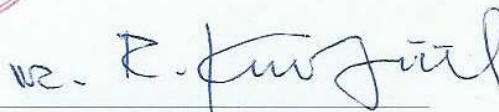
Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Ramík

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.

V Brně, dne 20.11.2009



prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ANOTACE

Cílem této diplomové práce je návrh a vypracování akcelerované zkoušky životnosti kulového kloubu ve spolupráci s firmou TRW-DAS a.s. Diplomová práce obsahuje rešerši problematiky akcelerovaných zkoušek životnosti, se zaměřením na zkoušky prováděné firmou. Dále je v práci rozebrána příprava akcelerované zkoušky životnosti, její samotná realizace a verifikace experimentem. Práce dále obsahuje počítačovou simulaci napjatosti zkoušeného kulového kloubu s použitím softwaru MKP.

KLÍČOVÁ SLOVA

Akcelerovaná zkouška životnosti, analýza napjatosti, kulový kloub, Pro/Engineer, ANSYS

ANOTATION

The subject of this diploma thesis is the design and the development of accelerated Life test of Ball-joint in cooperation with company TRW-DAS a. s. The diploma thesis includes a review about accelerated life tests on specialized tests made by the company. In the thesis are analyzed the preparations of accelerated life tests, the implementation and verification by experiment. The thesis also includes the computer strain simulation of Ball-Joint by FEM software.

KEYWORDS

Accelerated Life Test, Strain Analysis, Ball-Joint, Pro/Engineer, ANSYS

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SÝKORA, B. *Akcelerované zkoušky kulového kloubu vozidla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 102 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval zcela samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Brně 28.května 2010

.....
Bohumír Sýkora

PODĚKOVÁNÍ

Za účinnou podporu a obětavou pomoc, cenné připomínky a rady při zpracování diplomové práce, děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Pavlu Ramíkovi a panu Ing. Janu Ludvíkovi Ph.D. Dále pak děkuji všem, kteří mne podporovali během mého studia.

Obsah

Obsah	13
1. Úvod	15
1.1 Důvod akcelerované zkoušky	15
1.2 Proč akcelerovat - výhody a nevýhody	16
1.3 Úskalí a rizika	17
1.4 TRW Automotive	17
1.4.1 TRW-DAS a.s. v Dačicích	17
2. Akcelerované testy životnosti	18
2.1 Deformačně pevnostní spolehlivost	18
2.1.1 Volba zatížení dle pevnostního hlediska	20
2.2 Definice života produktu	20
2.3 Vzorky	21
2.4 Matematické modely	21
2.4.1 Korelace s realitou	21
2.4.1.1 Degradace (selhání) mechanismu jako kritérium pro dostatečně přesnou simulaci reality	22
2.4.2 Lineární akcelerace	23
2.4.2.2 Zatížení časově závislé	24
2.4.3 Lineární model	27
2.4.4 Arrheniův model	28
2.4.5 Eyringův model	29
2.4.6 Další modely	30
2.4.6 Základní typy rozdělení spojitě náhodné proměnné	33
2.5 Strategie testování	34
2.5.1 Druhy poškozujících faktorů	34
2.5.2 Data z testů a druhy testů	34
2.5.3 Testy s přírůstkovou (skokovou) změnou zatížení (Step-stress testy)	36
2.5.4 Degradací testy	36
2.6 Způsoby softwarového vyhodnocení	38
3. Software ALTA	39
3.1 Možnosti využití	39
3.2 Prostředí	40
4. Kulové čepy	47
4.1 Testy kulových kloubů	49
4.1.2 Základní rozdělení testů	50
5. Vytvoření modelu kulového kloubu	51
5.1 Kulový čep	51
5.2 Vrchní pouzdro kulového kloubu	52
5.3 Spodní pouzdro kulového čepu	53
5.4 Hlavice kulového kloubu	54
5.5 Krycí víko	55
5.6 Přípravek pro prováděný test	55
6. Zatížení kulového čepu během zkoušky	57
6.1 Zjednodušení jednotlivých součástí	57
6.2 Analýza napjatosti v MKP systému ANSYS	60
6.2.1 Tvorba modelu	61
6.3 Výstupy analýzy napjatosti v MKP systému ANSYS	72

6.4 Výsledky analýzy napjatosti	76
7. Průběh testu.....	77
7.1 Získané výsledky z testu	79
7.1.1 Vliv frekvence.....	80
7.2 Vyhodnocení v softwaru ALTA	80
7.2.1 Vliv přeakcelerace.....	82
7.2.1.1 Odhalení přeakcelerace pomocí softwaru ALTA	82
7.2.2 Vliv vedlejších faktorů	84
7.3 Verifikace experimentem	85
7.4 Akcelerační faktor.....	96
8. Závěr	97
9. Seznam použitých zdrojů	98
10. Seznam obrázků	99
11. Použité označení veličin.....	101

1. Úvod

Tato diplomová práce se zabývá zvýšením hospodárnosti zkoušek konstrukčních komponentů automobilů pomocí akcelerovaných testů ve spolupráci se společností TRW-DAS a.s. Společnost TRW-DAS a.s. zkouší automobilové komponenty a má zájem na zvýšení efektivity stávajících zkoušek pomocí akcelerovaných testů životnosti.

Tato metodika zkoušek je v dnešní době velice žádaná z důvodu úspory času a tedy i menší ekonomické náročnosti. Můžeme říci, že i přes vyšší energetické nároky na zkoušku, je finanční úspora akcelerované (zrychlené) zkoušky životnosti více než znatelná.

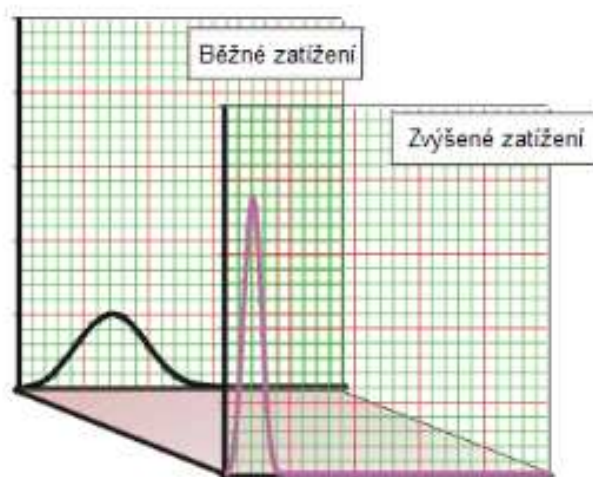
1.1 Důvod akcelerované zkoušky

Akcelerované zkoušky lze rozčlenit na dvě skupiny. První skupinou jsou zkoušky zkrácené, kdy dochází k zhuštění časového průběhu zkoušek (nepřetržitá pracovní doba stroje, odstranění prostojů aj.) nebo zlepšením přesnosti měření výstupních parametrů zkoušky (moderní měřicí metody, extrapolace, statistické zpracování aj.). Zkoušky zkracují odhad základních ukazatelů spolehlivosti. Tato doba je kratší než doba při běžných podmínkách provozu vozidla, resp. jeho části (součástí), tj. během doby testování t_{ZR} touto metodou dostaneme odhady ukazatelů spolehlivosti pro kompletní časový interval provozu t . Zrychlené (akcelerované) zkoušky jsou dány obecným vztahem:

$$t_{ZR} < t \quad (1)$$

Následující typ zkoušek je pro naše účely výhodnější. Tyto zkoušky se nazývají zpřísněné zkoušky. Jsou založeny na zvýšení intenzity probíhajících procesů během testu, které působí náhlé nebo degradační procesy (zvýšení vlivu faktorů okolního prostředí, vlhkost, chem. prostředí aj. a režimu zkoušek tj. zatížení, rychlosti, teplot aj.). Mechanismus poruch u zrychlených zkoušek (například zvýšeným zatížením, zpřísněním provozního režimu, zvýšením teplot, tlaků aj.), umožní zkrácení zkoušky technického života vozidla, kdy dochází ke zvýšené intenzitě výskytu poruch. Výstupní výsledky z testu je možno převést pro normální provozní podmínky a získání akceleračního faktoru či jiných vlastností zkoušky.

Zpřísněné neboli akcelerované (zrychlené) zkoušky životnosti jsou zjednodušeně vysvětleny pomocí obr. 1.1, kde je znázorněná zrychlená zkouška životnosti pomocí zvýšeného napětí, a která znázorňuje rozložení hustoty pravděpodobnosti (tzv. pdf – Probability Density Function) u prováděných zkoušek.



Obr. 1.1 Akcelerovaná zkouška [3]

1.2 Proč akcelarovat - výhody a nevýhody

Hlavním účelem akcelerované zkoušky životnosti je snížení časové náročnosti testu a tím snížení ekonomických nákladů. Akcelerovaný test zhodnotí komponenty mnohem rychleji než stejný standardní neakcelerovaný test.

Výhody (viz. např. [1]):

- snížení časového intervalu zkoušky
- snížení nákladů na zkoušku
- pozitivní působení na spokojenost zákazníka (rychlejší dodání výsledků, levnější zkouška)
- stejný nebo podobný test může být použit pro budoucí podobné testy

Nevýhody (viz. např. [1]):

- ceny
 - cena prototypu
 - ceny vybavení (monitorování výsledků) též vyšší nároky (zátěž apod.)
- složitější návrh zkoušky, nastavení a sestavení testu

Všechny výše zmíněné nevýhody jsou relativní z hlediska ceny, protože dané zkoušky jsou již provedeny bez akcelerace a tedy otázky ceny za zkušební vybavení a laboratoře odpadají. Jedinou nevýhodou je vyšší náročnost na zatížení vzorku a tedy vyšší nároky kladené na zkušební zařízení a spotřebu energie.

1.3 Úskalí a rizika

V automobilovém průmyslu je akcelerovaná zkouška spolehlivosti žádanou a vyhledávanou alternativou běžných neakcelerovaných zkoušek pro snížení délky stávající zkoušky a tedy i snížení ceny testu komponent. K akcelerovaným zkouškám životnosti se však vztahuje několik problémů, které jsou vysvětleny níže.

Mezi zmíněné problémy patří:

- akcelerovaná zkouška pouze napodobuje skutečné podmínky, protože v reálném provozu jsou skutečné podmínky komplexem jednotlivých zátěžových stavů, jejich kombinací, spojením a interakcí. Tyto stavy se velmi těžko nahrazují zkušebními zatíženími,
- jednotlivé akcelerované zkoušky životnosti využívají různé druhy zátěžových faktorů jako např. mechanický, vibrace, vlhkost, chem. sloučeniny a elektrický proud. Tyto faktory mohou zvýšit akcelerační faktor, ale skutečné faktory se mohou vzájemně ovlivnit či vůči sobě na součásti navzájem nevyskytovat,
- některé společnosti využívají pouze jeden nebo několik kroků z akcelerované zkoušky životnosti, ale nepoužijí celý postup řešení,
- frekvence simulace (např. zatěžujících sil) neodpovídá reálným vlivům (reálné frekvenci),
- testované komponenty pracují v reálném prostředí vzájemně, navzájem se tedy ovlivňují (setrvačnost apod.),
- opakovatelnost zkoušky,
- získání podobnosti mezi akcelerovaným a standardním neakcelerovaným testem.

1.4 TRW Automotive

Diplomový projekt byl zpracován ve spolupráci s firmou TRW-DAS a.s. se sídlem v Dačicích. Firma TRW Automotive je jednou s nevýznamnějších firem na poli autopříslušenství, aktivní a pasivní bezpečnosti pro výrobce vozidel ne jen v České republice, ale po celém světě. TRW Automotive působí ve 190-ti lokalitách 24 zemí pěti kontinentů a zaměstnává 67 500 lidí. [9]

V České republice je firma TRW Automotive zastoupena několika závody: TRW Autoelektronika, s.r.o. v Benešově, TRW-DAS a.s. v Dačicích, TRW Automotive ve Frýdlantu v Čechách, TRW Lucas Varity s.r.o. v Jablonci nad Nisou, TRW Carr s.r.o. v Mladé Boleslavi a TRW Volant a.s. v Horních Počernicích. Každý z těchto závodů se zaměřuje na jiné odvětví automobilového průmyslu. [9]

1.4.1 TRW-DAS a.s. v Dačicích

Závod TRW-DAS a.s. vznikla na základě privatizačního projektu dne 1.3.1993, z Dačických strojíren založena akciová společnost TRW-DAS a.s. Firma TRW Inc. zastoupená svou dceřinou společností TRW GmbH für industrielle Beteiligungen získala k 31.4.1993 rozhodující podíl akcií. [9]

TRW-DAS a.s. se skládá ze dvou závodů:

- závod řízení je součástí skupiny Braking & Suspension Europe se sídlem v Koblenzi, SRN.
- závod ventily je součástí skupiny Engine Components Europe se sídlem v Barsinghause, SRN.

Obě skupiny podléhají vedení TRW Automotive Operations se sídlem v Livonia, Michigan, USA.[9]

Mezi výrobky patří motorové ventily, díly řízení, podvozkové díly a sloupky volantu. V diplomové práci se zaměřím na kulové čepy řízení, které spadají do kategorie dílů řízení.

2. Akcelerované testy životnosti

Zrychlené neboli akcelerované zkoušky životnosti jsou v dnešní době velice žádané a dá se říci, že i nevyhnutelné řešení pro společnosti, které potřebují snížit náklady a efektivitu výroby se zachováním či zvýšením kvality výrobků.

„Zrychlená zkouška spolehlivosti je prováděna ve zvláštních podmínkách a je určena k získání informací o spolehlivosti objektu v kratších lhůtách než při provozu v reálných podmínkách stanovených technickou dokumentací. Zvláštní podmínky nesmí způsobovat změnu mechanismu poruch.“[7]

To vše je ještě ohraničeno dvěma tendencemi, získat co nejúplnější charakteristiky spolehlivosti za předpokladu zvýšených nákladů, nebo snaha o krátkost a nízké náklady zkoušek.

Cílem akcelerovaných testů životnosti je urychlení testování komponent v zájmu zachování spolehlivosti a předvídání délky jejich bezporuchového stavu a životnosti.

2.1 Deformačně pevnostní spolehlivost

Základním požadavkem na každou konstrukci je, aby plnila svojí požadovanou funkci:[4]

- a) v realizovaném stavu, přičemž parametry se v jistých tolerancích liší od parametrů předpokládaných v návrhu,
- b) za běžných provozních i některých mimořádných provozních podmínek,
- c) po požadovanou dobu.

Schopnost soustavy za těchto podmínek pracovat, čemuž se říká spolehlivost, která se vyjadřuje tzv. charakterem spolehlivosti a ta různým způsobem:[4]

a) slovně např.: [4]

- spolehlivost je dostatečná,
- malá,
- vyhovující,
- přiměřená,
- nevyhovující apod.

b) jednoduchou relací ve tvaru $\alpha \leq \alpha_M$ nebo $\alpha \geq \alpha_M$ [4]

kde: α je parametr ve vyšetřovaném zátěžovém stavu, který nám charakterizuje deformačně-pevnostní spolehlivost.

α_M je mezní hodnota parametru α

$$\begin{aligned} \alpha < \alpha_M & \quad - \text{vyhovující} \\ \alpha \geq \alpha_M & \quad - \text{nevyhovující} \end{aligned} \quad (2)$$

c) „jednoduchou deterministikou číselnou veličinou, kterou označujeme jako koeficient bezpečnosti k, zkráceně bezpečnost, a která vede ke slovní formulaci:“ [4]

$$\begin{aligned} k < 1 & \quad - \text{nevyhovuje,} \\ k > 1 & \quad - \text{pravděpodobně vyhovuje,} \\ k_i > k_j & \quad - \text{stav } i \text{ je bezpečnější než } j, \text{ atd.} \end{aligned} \quad (3)$$

Bezpečnost k_m vzhledem k meznímu stavu m je číslo [4]

$$k_m = \frac{\alpha_{Mm}}{\alpha} \quad (4)$$

kde: α_{Mm} je mezní hodnota veličiny α , popisující vznik mezního stavu m ,

α je veličina, určená pro vyšetřování zátěžovací stav. [4]

Další charakteristikou spolehlivosti a to je životnost:

„Životnost je doba, nebo počet zátěžovacích cyklů (bloků), kterými lze zatěžovat těleso do vzniku mezního stavu.“ [4]

V tomto případě budeme spolehlivost vyjadřovat relací: [4]

$$t \leq t_f ; t \geq t_f \quad \text{nebo} \quad N \leq N_f ; N \geq N_f \quad (5)$$

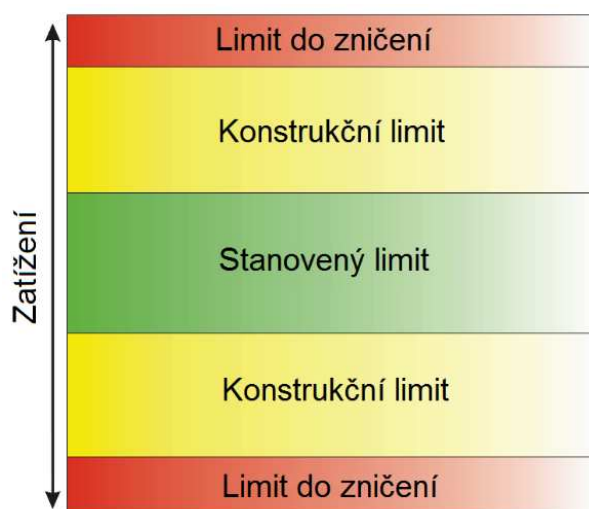
kde: t, N je doba – počet cyklů, kterými bylo těleso již zatíženo,

t_f, N_f je doba – počet cyklů, které jsou požadovány.

2.1.1 Volba zatížení dle pevnostního hlediska

Na akcelerovanou zkoušku životnosti, jak již bylo řečeno v úvodu, se můžeme dívat ze dvou hledisek. Za prvé: Když není výrobek používán nepřetržitě a jen v určitých časových intervalech (cyklech), je tento výrobek akcelerován tím, že se vyloučí tyto intervaly prodlevy, kdy je výrobek nepoužíván. [8]

Druhý přístup je vhodný pro výrobky, které pracují nepřetržitě. Tyto výrobky nemohou být akcelerovány prvním způsobem, tedy vyvstává problém, jak akcelerovat. V tomto případě je výrobek testován zvýšením zátěžového faktoru (zátěže). U těchto výrobků je nutná pevnostní a materiálová charakteristika, kdy je test konzultován s konstrukční částí výroby výrobku. Musí být řečeno, kde je hranice zátěže daného výrobku a jestli se dá, dle konstrukčního hlediska daným způsobem zvednutím zátěže (akcelerace) testovat. [8]



Obr. 2.1 Typický zátěžový rozsah pro testované komponenty [8]

2.2 Definice života produktu

Definicí života produktu je myšlena jeho spolehlivost bezporuchově pracovat za podmínek daných jeho konstrukcí. Životnost produktu se může měřit v cyklech, hodinách, jednotkách vzdálenosti (km, m apod.), teplotě či jiných jednotkách. Životnost produktu je často nazývána čas do poruchy „Time to failure“.[1]

Definovat životnost produktu, simulovanou akceleračním testem, může být obtížné. Pro příklad mnoha automobilových společností určuje životnost brzdného systému 10 let. Akcelerovaný test musí zahrnovat běžné použití brzdného systému (které odráží také řidičovo psychické rozpoložení při použití brzdného systému), počet použití brzdného systému, parkování pomocí brzdného systému a další. Pro akcelerovanou zkoušku potřebujeme data z reálného testu (počet použití brzdného systému, střední hodnotu, percentil atd.). U firem, které se zabývají zkouškami, jsou tyto hodnoty dodány zákazníkem, který určí mezní hodnoty pro daný komponent.[1] Zkouška může být také zjednodušena, kde zátěžový stav tvoří zatížení, která ovlivnění součásti nejvíce a jsou vyloučena ta zatížení, která nemají na součást vliv (např. zkouška tlumičů, kde se vylučuje vliv rovné silnice. Zkouší se pouze na úsecích, které tlumiče ovlivňují).

Určení množství cyklů (zátěže) pro zkoušku, by mělo být blízké skutečnému počtu cyklů zkoušené komponenty. Vysoké množství cyklů dává přesnější výsledky, ale to zvyšuje délku trvání testu a tím i cenovou náročnost.[1] Z tohoto důvodu jsou dvě tendence v přístupu ke zkouškám:

- získat co možná nejúplnější charakteristiky spolehlivosti,
- snaha o krátkost a nízké náklady zkoušek.

Akcelerační test eliminuje dobu prodlevy mezi cykly, což zcela neodpovídá skutečnému procesu zatěžování součásti. Například u testu dveří automobilů projdou dveře 38 000 cyklů (otevřeno a zavřeno) ve 12 hodinách. Panty dveří nejsou ochlazovány jako při běžných podmínkách, do testu není zahrnuta koroze dveří nebo působení jiných kontaminujících látek. [1]

2.3 Vzorky

Statistika předpokládá, že náhodný vzorek reprezentuje celý soubor vzorků. Získání náhodného vzorku reprezentujícího celý soubor, vyžaduje všechny zástupce existujících variant.[1]

Těmi jsou např.: [1]

- variace od mnohonásobné produkce,
- variace od četného množství surových materiálů,
- variace od opotřebení nástroje,
- variace od údržby obráběcích strojů,
- variace od klimatických změn v různých ročních obdobích,
- variace od změn dodavatele.

Tyto variace mohou být přijatelné k dosažení náhodného vzorku reprezentujícího celý soubor vzorků pro opakované vyhodnocení, ale to je téměř nesmyslné pro vývoj nových produktů. Tudiž, test životnosti demonstrující spolehlivost pro statisticky dostatečnou hladinu významnosti není vždy možný. Nejlepší alternativou je test s nejhorším případem tolerance. [1]

2.4 Matematické modely

2.4.1 Korelace s realitou

Nejjednodušším způsobem kontroly akcelerovaného testu je srovnání se standardním neakcelerovaným testem. Z běžného testu vyplývají data pro vytvoření a kontrolu akcelerovaného testu. Když je vzájemná odchylka obou testů v akceptovatelných hodnotách, můžeme pokračovat pouze v akceleračním testu, který později opakujeme bez opětovné kontroly se standardním neakcelerovaným testem.

2.4.1.1 Degradace (selhání) mechanismu jako kritérium pro dostatečně přesnou simulaci reality

Úroveň korelace výsledků akcelerovaných testů (AT) k výsledkům běžných neakcelerovaných testů závisí na tom, jak přesně jsou stanoveny. Tato korelační úroveň je kritérium pro možnosti využití výsledků AT pro rychlé zlepšení jakosti výrobku, vývoj a předpověď únavy produktu, trvanlivosti, spolehlivosti atd. [2]

Různé druhy AT se užívaly po 100 let.

1. V posledních 40 - 50 letech byla základní kritéria pro vyhodnocení úrovně skutečného života, simulace namáhání, zatížení atd., tak primárně získané výsledky testu. Senzory namáhání a zatížení byly jednoduché zařízení pro tento cíl. Tato metoda je jednoduchá, krátká a nejčastěji užívaná. [2]
2. Další metoda je korelace AT výsledků s výsledky standardní neakcelerované zkoušky. Tato metoda je časově náročnější, zvláště jestli chceme vyhodnotit trvanlivost, spolehlivost atd. po několik let. Dalším záporným aspektem této metody je, že nastává konečné zničení produktu. [2]

Když užíváme první metodu, primární parametry výstupu (namáhání, zatížení, atd.) nejsou dostatečné k tomu, aby charakterizovaly proces zrychlené zkoušky. Tam je často dobrá korelace mezi namáháním, zatížením apod. během zrychlené zkoušky a praktické zkoušky, ale nedostatečnou korelací s mechanismy degradace (selhání). Toto je obtížné uskutečnit, pokud se začalo vyskytovat selhání součásti. [2]

3. Lepší metoda je srovnání degradace (selhání) mechanismu (procesu) během AT s tímto procesem během reálné zkoušky. Zde můžeme stručně určit jak vysoká úroveň zrychlení je možná pro AT. Vyšší úroveň korelace znamená kratší čas testování, ale příliš vysoká úroveň zrychlení může měnit fyzikální (chemický, mechanický atd.) charakter degradace produktu (například se mohou projevit praskliny během testovacího intervalu). Fyzikální (chemický, mechanický atd.) mechanismus degradace je přiblížení k zrychlené kvalifikaci a základní kritérium pro simulaci procesu skutečného života zrychlenou zkouškou. Tento mechanismus může být mechanický, fyzický, chemický, elektrický, tepelný, zářením atd. Parametry, například, pro mechanický proces degradace jsou deformace, trhliny, creep, opotřebení atd. Pro parametry chemické degradace je typická elektrolytická koroze kovů, ničení plastů a gumy, snížení barvy, ochrany mazání atd. Pro fyzikální degradaci jsou parametry výsledků střídání fyzikálních podmínek plastů, gumy, kovů atd. Jestli senzory vyhodnotí tyto parametry, mohou měřit jejich rychlost změny během času, srovnávat reálnou zkoušku a laboratorní zkoušku. Můžeme určit, jak jsou podmínky AT podobné se skutečnými životními stavy. Jestli jsou tyto procesy podobné, můžeme si být jisti dostatečnou souvztažností mezi výsledky AT a reálnými výsledky. [2]

2.4.2 Lineární akcelerace

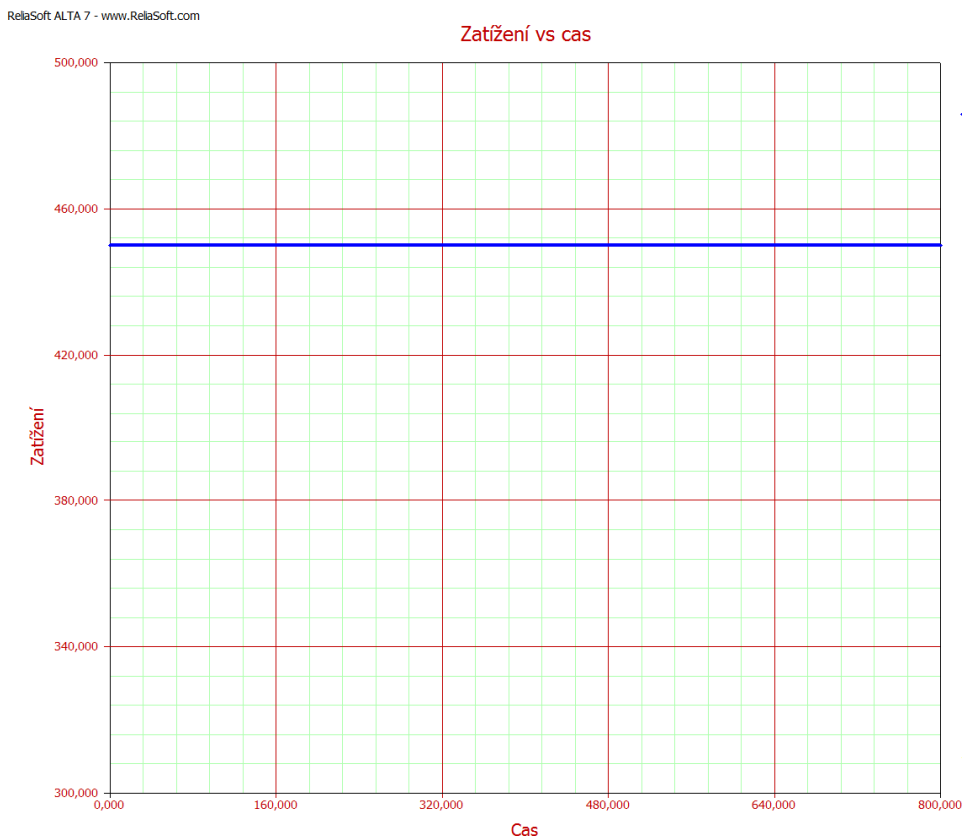
Diskuze o akcelerovaném testu životnosti sahají hodně hluboko, zahrnují předpoklad, že zatěžující faktor aplikovaný na díly při zrychlené zkoušce byl stálý (neměnný). Při skutečném životě jsou různé druhy zátěže a tyto druhy mohou být použity pro vykonávání zrychlené zkoušky. Zrychlené zkoušky životnosti mohou být charakterizovány neměnným namáháním, stupňovitě proměnným namáháním, cyklickým namáháním, náhodným namáháním a dalšími druhy namáhání. Tyto druhy průběhu zatížení jsou charakterizovány podle závislosti na čase. Zde jsou dvě možnosti namáhajících zátěžových schémat: [3]

- zatížení časově nezávislé
- zatížení časově závislé

Matematické zpracování, modely a předpoklady závisí na závislosti namáhání na čase.[3]

2.4.2.1 Namáhání časově nezávislé

Když je namáhání časově nezávislé, namáhání aplikovaná na vzorek se nemění s časem. Jinými slovy, je teplotní zatížení vyvoláno teplotou, každý vzorek je testován působením stejné teploty zvýšené akceleračním faktorem, například 100°C a tato data jsou zaznamenána. Namáhání je časově nezávislé (v čase konstantní) viz obr. 2.2. Tento způsob zatěžování je pro akcelerační zkoušku životnosti méně vhodný, protože omezuje možnosti realizace akcelerace.

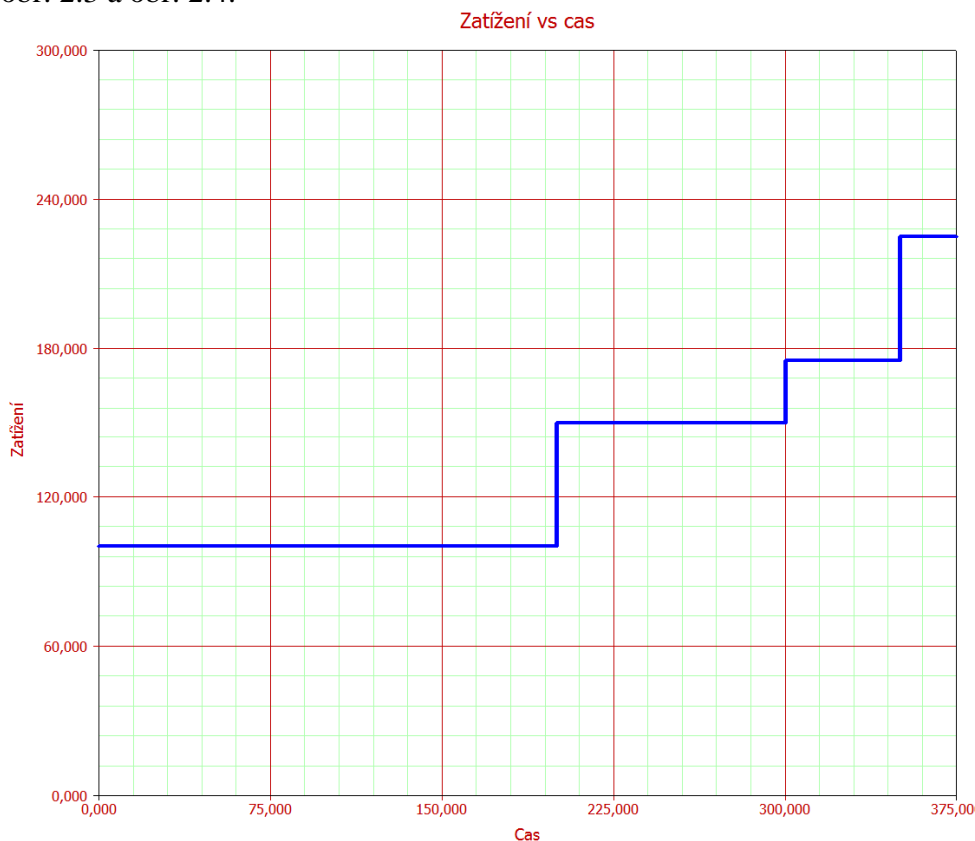


Obr. 2.2 Model namáhání časově nezávislého (konstantního)

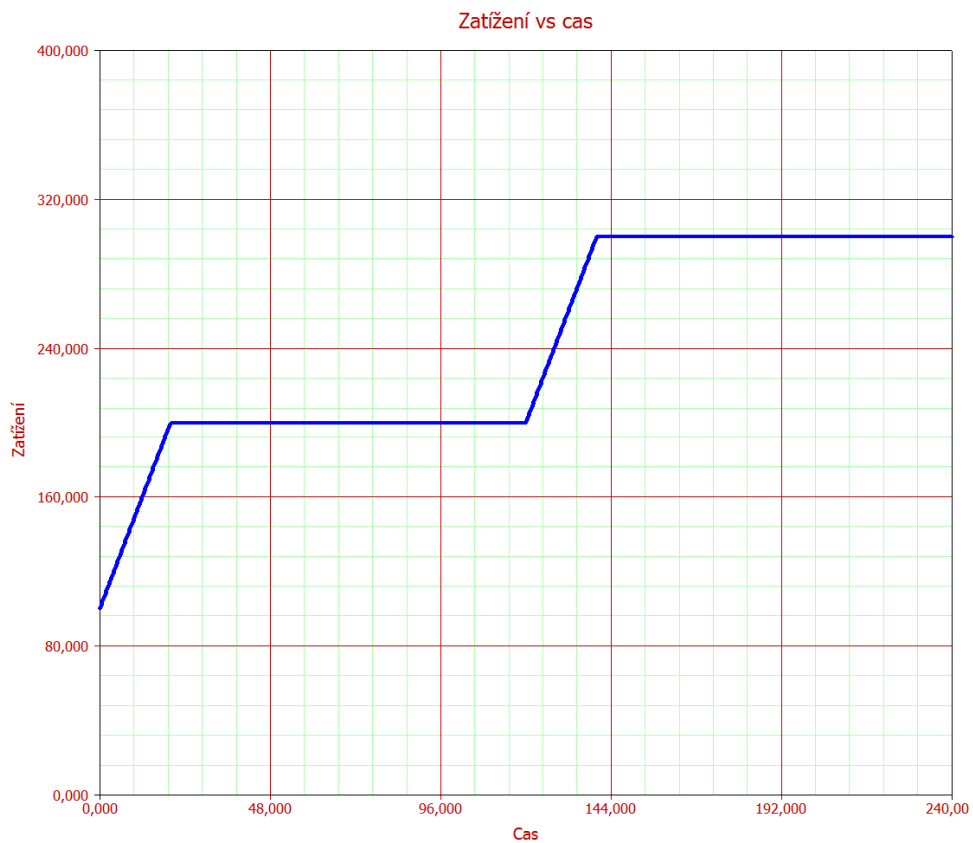
2.4.2.2 Zatížení časově závislé

Když je namáhání časově závislé, produkt je namáhán (mechanicky, chemickými vlivy atd.) kolísajícím v čase. U produktů vystavených časově závislým namáháním dochází rychleji k modu selhání. Tyto modely zatěžování jsou považovány za ideální vstupní data pro akcelerační zkoušku. Kumulativní poškození modelu, dostupné v ALTA 7 PRO, dovolí analyzovat data ze zrychlených zkoušek trvanlivostí s časově závislými zátěžovými profily.[3]

Přírůstkový (skokový) model namáhání a související model rostoucího namáhání jsou typické případy časově závislých zátěžových testů. V těchto případech, namáhání zůstává stále po vymezenou dobu a potom je skokově zvednuto do další úrovně, kde zatížení zůstává opět stále po daný časový interval do té doby, než je opětovně zvýšeno stupňovité zatížení.[3] Tedy zatížení má ve svém charakteru oblasti, kdy je namáhání nezávislé (konstantní) v čase. Při celkovém pohledu na graf zatížení v závislosti na čase, jsou zřetelné četné střídání těchto zatížení, obr. 2.3 a obr. 2.4.

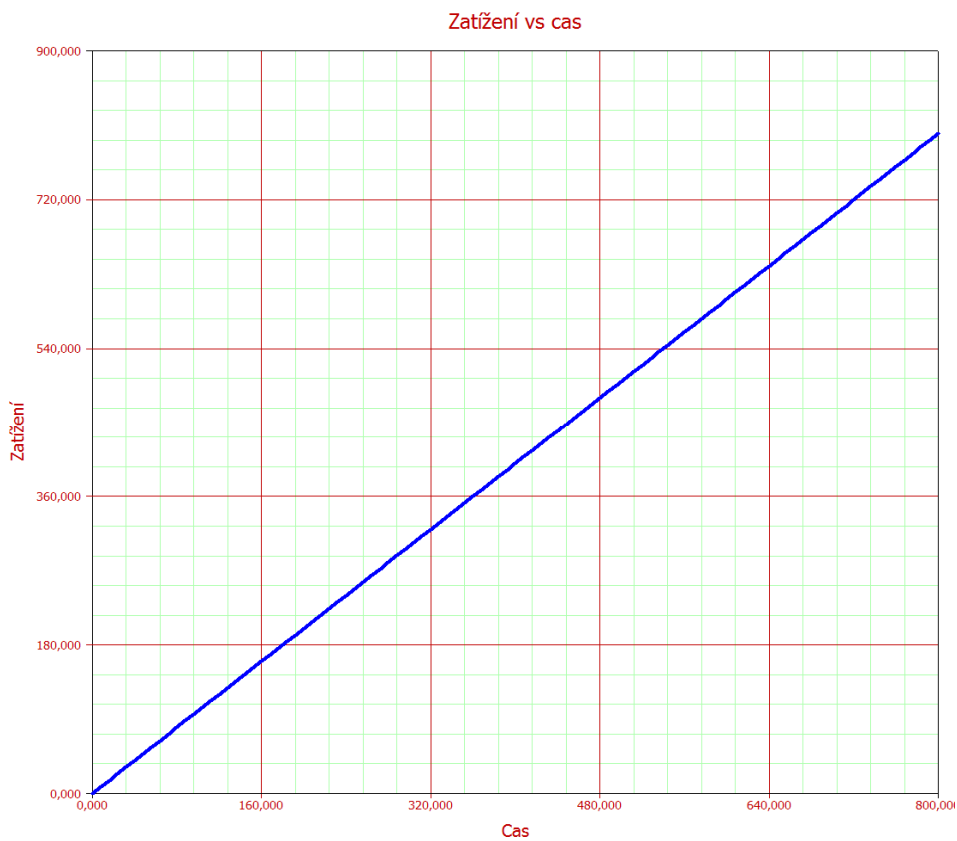


Obr. 2.3 Model přírůstkového (skokového) namáhání

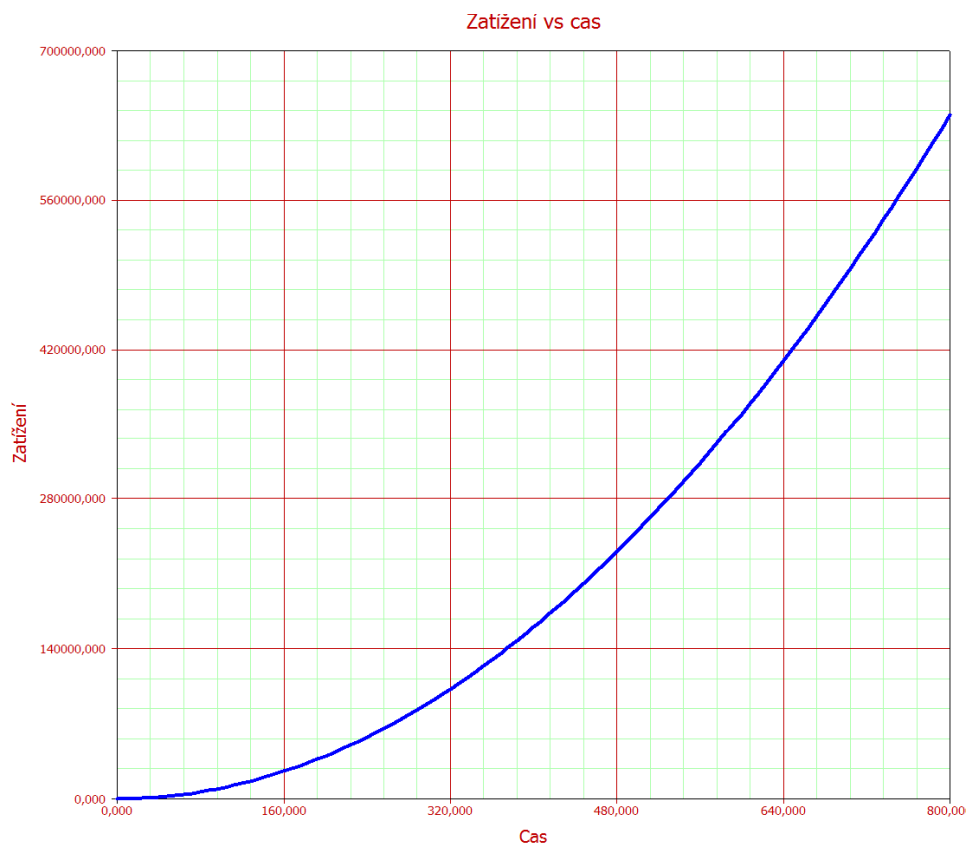


Obr.2.4 Model rostoucího namáhání

Stejná myšlenka může být rozšířena tak, aby zahrnuje zatížení jako nepřetržitou funkci času.[3] Tyto způsoby jsou nejušpornější z hlediska délky času. Jedná se o progresivní namáhání, obr. 2.4 a úplně časově závislé namáhání, obr. 2.5.



Obr. 2.5 Model progresivního modelu namáhání



Obr. 2.6 Model úplně časově závislého namáhání

Shrnutě, zrychlená zkouška životnosti může být sestavena ze sebraných dat z pečlivě navržených zrychlených zkoušek životnosti. Dobře navržené zrychlené zkoušky životnosti používají zatížení (mechanické, chemické atd.) v úrovních, které převyšují úroveň zatížení produktu při skutečném použití, aby urychlily způsoby porušení, jež by se vyskytovalo při neakcelerovaném testu. Výchozí rozdělení náhodné proměnné (jako exponenciální, Weibullova a Log-normální časové rozdělení) je vybráno tak, aby odpovídalo rozdělení pro příslušný test. Model popisující životnost v závislosti na působícím zatížení (Life-Stress Model) - Arrheniův, Eyringův atd., pak může být vybrán kvantitativní cestou z různých funkcí, zohledňující spolehlivost, střední životnost, zkrácení času zkoušky atd.[3]

2.4.3 Lineární model

Nemáme-li žádnou transformační funkci pro model zrychlení, použijeme lineární transformaci podle času, která je nejpoužívanější. Předpokládáme, čas selhání podle normálních provozních podmínek je: [1]

$$t_0 = \varepsilon \cdot t_\varepsilon \quad (6)$$

kde: ε je akcelerační faktor

t_ε je čas selhání nebo čas zvýšení zátěžové charakteristiky

Když $f(t)$ představuje pdf (hustotu pravděpodobnosti) při akceleračních podmínkách, pak pdf pod běžnými provozními podmínkami je: [1]

$$f_0(t) = \frac{1}{\varepsilon} f\left(\frac{t}{\varepsilon}\right) \quad (7)$$

Spolehlivostní funkce podle běžných provozních podmínek je: [1]

$$R_0(t) = R\left(\frac{t}{\varepsilon}\right) \quad (8)$$

Intenzita náhodného jevu (Hazard Function) podle běžných provozních podmínek je: [1]

$$h_0(t) = \frac{1}{\varepsilon} h\left(\frac{t}{\varepsilon}\right) \quad (9)$$

Tabulka 1 ukazuje nejběžnější rozdělení, pro které používáme akcelerační faktor roven jedné. Akcelerační faktor se rovná jedné, pokud $\varepsilon = 1$. Pro $\varepsilon = 1$ jsou spolehlivostní funkce ukázány v tab.1, Tyto funkce nepředstavují žádné zrychlení.

Rozdělení	Funkce spolehlivosti s normálními podmínkami
Weibullovo	$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\varepsilon\theta}\right)^\beta\right]$
Log-normální	$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln t - \ln \varepsilon - \mu}{\sigma}\right)$
Normalní	$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t - \varepsilon\mu}{\varepsilon\sigma}\right)$
Exponenciální	$R(t) = e^{-\frac{\lambda t}{\varepsilon}}$

Tab.1 Nejběžnější rozdělení životnosti [3]

2.4.4 Arrheniův model

Arrheniův model (nebo vztah) je pravděpodobně nejběžnějším vztahem životnost-napětí používaným u zrychlených zkoušek životnosti. Arrheniův model je nejvíce užíván, když vlivy zrychlení (nebo namáhání) jsou teplotní (teplota). Vztah je odvozený z Arrheniovy rovnice reakční rychlosti. Arrheniova rovnice reakční rychlosti se dostane: [3]

$$R(T) = A \cdot e^{-\frac{E_A}{K \cdot T}} \quad (10)$$

kde : R je rychlost odezvy,
A je neznámá netepelná konstanta,
 E_A je aktivační energie (eV),
T je absolutní teplota (K).

Aktivační energie je energie, při které se molekula zúčastní reakce. Jinými slovy, aktivační energie je míra účinku teploty na reakci. [3]

Životnost je úměrná obrácené reakční rychlosti, tak Arrheniův vztah životnost-napětí je dán: [3]

$$L(T) = C \cdot e^{\frac{B}{V}} \quad (11)$$

kde : L reprezentuje střední životnost, charakteristickou životnost, medián nebo životnost $B(X)$,
V reprezentuje úroveň zatížení (formulovanou pro teplotu),
C je určený parametr modelu ($C > 0$),
B je dalším z parametrů modelu.

2.4.4.1 Arrheniův akcelerační faktor

Nejvíce užívaný vztah pro akcelerační faktor je ve tvaru poměru skutečného života k životu zjištěnému akcelerovanou zkouškou:[3]

$$A_F = \frac{L_{USE}}{L_{Accelerated}} \quad (12)$$

Pro Arrheniův model: [3]

$$A_F = \frac{L_{USE}}{L_{Accelerated}} = \frac{C e^{\frac{B}{V_U}}}{C e^{\frac{B}{V_A}}} = e^{\frac{B}{V_U} - \frac{B}{V_A}} = e^{\left(\frac{B}{V_U} - \frac{B}{V_A}\right)} \quad (13)$$

Jestliže předpokládáme, že je B známé (použitím aktivační energie), předpokládaná aktivační energie sama určí akcelerační faktor![3]

2.4.5 Eyringův model

Eyringův vztah byl formulován na principu kvantové mechaniky a nejčastěji je používán pro tepelnou zátěž. Eyringův vztah je také často užíván pro jiné zátěžové veličiny než pro teplotu např. pro vlhkost. Vztah je dán:[3]

$$L(V) = \frac{1}{V} \cdot e^{-\left(\frac{A-B}{V}\right)} \quad (14)$$

kde: L reprezentuje střední životnost, charakteristickou životnost (požadovanou), medián nebo životnost $B(X)$,
 V reprezentuje úroveň zatížení (formulovanou pro teplotu),
 A je parametr modelu,
 B je dalším z parametrů modelu.

Eyring vztah je podobný Arrheniůvu vztahu. Tato podobnost je víc zjevná, jestliže rovnici (14) rozepíšeme následujícím způsobem: [3]

$$L(V) = \frac{1}{V} \cdot e^{-\left(\frac{A-B}{V}\right)} \quad (15)$$

$$L(V) = \frac{e^{-A}}{V} \cdot e^{\frac{B}{V}}$$

nebo :

$$L(V) = \frac{1}{V} \cdot \text{konst.} \cdot e^{\frac{B}{V}} \quad (16)$$

Pro porovnání Arrheniův vztah je dán: [3]

$$L(V) = C \cdot e^{\frac{B}{V}} \quad (11)$$

Porovnání rovnice (16) s Arrheniovým vztahem je zřejmé, že je mezi nimi jediný rozdíl ve zlomku $\frac{1}{V}$ v termínu v rovnici (16). Obecně, oba vztahy dávají velmi podobné výsledky. Eyring vztah je postaven na podobném základě jako Arrheniův vztah. [3]

2.4.5.1 Eyringův akcelerační faktor

Pro Eyringův model je akcelerační faktor dán vztahem: [3]

$$A_F = \frac{L_{USE}}{L_{Accelerated}} = \frac{\frac{1}{V_u} e^{-\left(\frac{A-B}{V_u}\right)}}{\frac{1}{V_A} e^{-\left(\frac{A-B}{V_A}\right)}} = \frac{e^{\frac{B}{V_u}}}{e^{\frac{B}{V_A}}} = \frac{V_A}{V_U} e^{B\left(\frac{1}{V_U} - \frac{1}{V_A}\right)} \quad (17)$$

2.4.6 Další modely

Těmito modely se v práci nezabývám tak detailně, jako u předchozích modelů. Jsou však nedílnou součástí mnoha výpočtů, proto uvádím jejich přehled.

A. Inverse Power Law model

Inverse Power Law vztah (či IPL) se používá obvykle pro analyzování dat, která jsou akcelerovaná netepelným zatížením. IPL model je dán vztahem: [8]

$$L(V) = \frac{1}{K \cdot V^n} \quad (18)$$

Kde: L představuje střední životnost, charakteristický život (požadovanou), střední život, životnost B(X) apod.
V prezentuje zátěžovou úroveň.
K je parametr modelu ($K > 0$).
n je další parametr modelu.

B. Tepelně – vlhkostní vztah

Tento vztah se používá, když jsou akceleračními parametry teplota a vlhkost. Tento kombinovaný model je dán vztahem: [8]

$$L(U, V) = A \cdot e^{\left(\frac{\phi + b}{T + U}\right)} \quad (19)$$

Kde: ϕ je jeden ze tří stanovených parametrů.
b je druhý ze tří definovaných parametrů.
A je třetí ze tří definovaných parametrů.
U je relativní vlhkost (netepelné zatížení).
T je teplota (v absolutních jednotkách).

C. Tepelně-netepelný vztah

Tepelně-netepelný vztah je další dvouparametrický model daný vztahem: [8]

$$L(U, V) = \frac{C}{U^n \cdot e^{\frac{B}{T}}} \quad (20)$$

Kde : U je netepelné zatížení.

T je tepelné zatížení (v absolutních jednotkách).

B, C, n jsou definované parametry modelu.

Víceparametrické vztahy

Doposud byly uvedeny vztahy, kde byly buď jedna nebo dvě zátěžné veličiny. Ve většině praktických případů je celkové zatížení funkcí, která závisí na více než jedné či dvou proměnných. Navíc je život produktu definován jako funkce mechanické zátěže a jiných proměnných, jak je uvedeno v [8].

D. General log-lineární vztah

Tento vztah popisuje životní charakteristický (medián, střední životnost apod.) jako funkci vektoru \mathbf{n} zatížení, čili:[8]

$$\vec{X} = (X_1, X_2 \dots X_n) \quad (21)$$

ALTA 7 PRO dovoluje do tohoto vztahu zahrnout až do osmi zatížených veličin. Výpočetně je dán vztahem:[8]

$$L(\underline{X}) = e^{\alpha_0 + \sum_{j=1}^n \alpha_j X_j} \quad (22)$$

Kde: α_j jsou parametry modelu,

X je vektor n zatížení.

Tento vztah může být upraven a může být redukován na vztah podobný dřívějším vztahům, je-li to potřebné či požadováno. Pomocí zpětné transformace na X, tedy $V = 1 / X$ dostaneme dle [8]:

$$L(V) = e^{\alpha_0 + \frac{\alpha_1}{V}} = e^{\alpha_0} e^{\frac{\alpha_1}{V}} \quad (23)$$

Vztah popsany rovnicí (23) můžeme redukovat na Arrheniův vztah, kde: [8]

$$C = e^{\alpha_0} \quad (24)$$

$$B = \alpha_1 \quad (25)$$

$$L(V) = C e^{\frac{B}{V}} \quad (26)$$

E. Model úměrných rizik (Proportional Hazards model)

Tento model se široce užívá v poli biomechaniky, kde je rostoucí zájem o aplikace spolehlivostního inženýrství. V původní formě je model neparametrický. To znamená, že zde nejsou žádné předpoklady tvaru rozložení chybějící distribuce. Originální neparametrická formulace stejně jako parametrická forma modelu je používána s využitím Weibullova rozložení. V ALTA 7 PRO je Proportional Hazards model, neboli model úměrných rizik obsažen v parametrické formě a může být užíván pro analýzu dat až s osmi proměnnými. [8]

Neparametrická formulace modelu

U tohoto modelu ovlivňuje chybějící poměr systém nejen jeho operační čas, ale také střední kvadratické odchylky, pod kterými model operuje. [8]

Okamžitá intenzita poruch (či intenzita poruch) součásti je dána: [8]

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (27)$$

Kde: $f(t)$ je hustota pravděpodobnosti,
 $R(t)$ je spolehlivostní funkce.

Po úpravách může být intenzita poruch přepsána do tvaru: [8]

$$\lambda(t, \underline{X}) = \lambda_0(t) \cdot e^{\sum_{j=1}^m a_j x_j} \quad (28)$$

Kde: a je neznámý parametr (také nazvaný parametry regrese) modelu,
 x je střední kvadratická odchylka,
 m je počet zatížení souvisejících s náhodnou proměnou (časově nezávislých).

Parametrická formulace modelu

Parametrická forma modelu úměrných rizik může být získána pomocí vhodného rozdělení. V ALTA 7 PRO je dostupné Weibullovo a exponenciální rozdělení. Logaritmicke-normální rozdělení může být také využito, ale prozatím není zahrnuto ve verzi ALTA 7. Intenzitu poruch lze formulovat na základě Weibullova rozdělení: [8]

$$\lambda_0(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (29)$$

Kde: η je parametr Weibullova rozdělení,
 β je parametr modelu,
 t je čas.

Pro model úměrných rizik pro intenzitu poruch dostaneme vztah: [8]

$$\lambda(t, \underline{X}) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\sum_{j=1}^m a_j x_j} \quad (30)$$

Kde: η je parametr Weibullova rozdělení,
 β je parametr modelu,
 t je čas,
 a je neznámý parametr (také nazvané parametry regrese) modelu,
 x střední kvadratická odchylka,
 m je počet zatížení souvisejících s náhodnou proměnou (časově nezávislých).

2.4.6 Základní typy rozdělení spojitě náhodné proměnné

„V této kapitole je pojednáno o rozděleních, podle kterých je možné hodnotám náhodné proměnné přiřazovat odpovídající pravděpodobnosti.“ [11]

Nebudou zde popsány veškerá rozdělení, ale pouze ta hlavní, která používá software ALTA 7 PRO. Tato rozdělení jsou pouze rozdělena podle použití, není zde uvedeno jejich matematické vyjádření.

A. Weibulovo rozdělení

- „Používá se tehdy, když nelze přijmout předpoklad o konstantní intenzitě jevu.“ [11]
- „Široce je využíváno pro popis dob spojených s poruchami i dob opravy a údržby.“ [11]
- „Rozdělení s parametrem $\beta > 1$ umožňuje dobrý popis bezporuchovosti a životnosti objektů u kterých se výrazně projevuje vliv opotřebení, únavy, koroze a dalších degradačních procesů.“ [11]
- „Rozdělení s parametrem $\beta < 1$ umožňuje popis bezporuchovosti v počátečních fázích provozu kdy se projevují výrobní vady.“ [11]
- „V případě, že $\beta = 1$ Weibulovo rozdělení přechází do exponenciálního rozdělení.“ [11]

B. Exponenciální rozdělení

- „V teorii hromadné obsluhy.“ [11]
- „V teorii obnovy.“ [11]
- „Popis bezporuchovosti těch objektů kde se neprojevuje vliv postupné degradace součástí, jako např. stárnutí, koroze, opotřebení a pod. (Konstantní intenzita poruch se běžně předpokládá u vysoce spolehlivých, složitých technických systémů).“ [11]

C. Log-normální rozdělení

- „Popis doby technického života u objektů kde se projevuje únava materiálů.“ [11]
- „Popis doby do technického života u objektů, kde s dobou provozu klesá jejich odolnost vůči zatížení vlivem opotřebení nebo jiné degradace.“ [11]
- „Popis chování prvků u nichž se v počátečních fázích provozu projevuje jisté zvyšování odolnosti vůči zatížení, které v dalším provozu vede ke snižování intenzity poruch. (Například tzv. zahořování elektronických součástek.)“ [11]

2.5 Strategie testování

2.5.1 Druhy poškozujících faktorů

Poškozující faktory okolí se mohou skládat z jednoho či více faktorů. Jedná se např. o teplotní cykly, vibrace, vysokou teplotu, elektrické napětí a teplotní výkyvy (šoky). Všechny profilové charakteristiky poškozujících faktorů jako extrémní zatížení, intenzita výměny, amplituda, frekvence a trvání musí být přizpůsobeny samostatně pro každý produkt. Cílem v determinaci poškozujících faktorů a profilové charakteristiky je dosažení maximální zátěže produktu uvnitř oblasti limitů zátěže produktu a celkové dostupnosti zátěže, jak je popsáno[1].

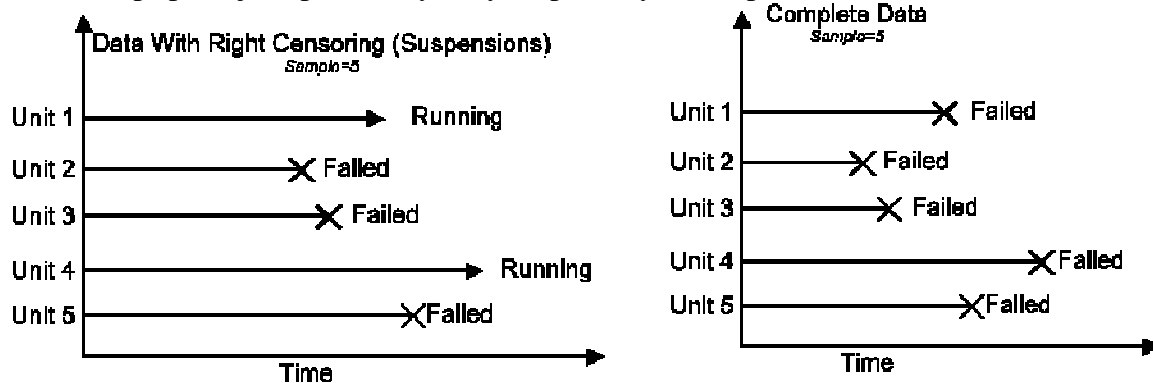
Při volbě poškozujících faktorů musíme brát do úvahy i vliv přexcelerování testu životnosti, která se projevuje zkrácením celkového života produktu. Vliv přexcelerování je zřetelně vidět u vlivu frekvence zatěžující síly na kulový kloub řízení vozidla, kdy dochází k vytavení vnitřní plastové vložky v důsledku vnitřního tření. Tato porucha není avizována systémem jako chybový stav testu a díky tomu test pokračuje dál nebo je rapidně zkrácena životnost pod reálnou mez.

2.5.2 Data z testů a druhy testů

Jednou z možností pro získání dat z testů jsou:

- testy na přežití ,
- testy do poruchy (kompletní data),
- kombinace (cenzurovaná data).

Ve většině případu jsou používány testy do poruchy a dále pak kombinace.



Obr. 2.7 Kompletní a cenzurovaná data z testu [3]

Dalšími možnostmi získávání dat z testu jsou:

- intervaly cenzurovaných výběrů dat – sledování po intervalech např. 100 hodin,
- data s levým cenzurováním.

Tyto metody nejsou vhodné pro akcelerovanou zkoušku životnosti, z tohoto důvodu je tedy vynechán jejich popis.

Pro správné vyhodnocení testu je potřebné větší množství dat. S množstvím dat se zpřesňuje výsledek, obr. 2.9.

Při jedné úrovni zatížení není možné přesné zjištění výsledků testu, obr. 2.8.



Obr. 2.8 Malé množství dat (vzorků) [3]



Obr. 2.9 Testování dvou (více) úrovní zatížení [3]

2.5.3 Testy s přírůstkovou (skokovou) změnou zatížení (Step-stress testy)

Jak již bylo dříve řečeno, tento typ testu patří mezi testy s namáháním časově závislým. Tradičně se pro zrychlenou zkoušku používá s časem se měnící zatížení. Hlavním důvodem použití je záruka rychlejšího selhání. Tento typ testu je dnes vysoce žádaný v průmyslu, protože zkracuje přípravu nového produktu.[3]

Nejčastějším typem těchto testů je typ přírůstkový (skokový), nebo-li „step–stress“. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.4.2.2, zkušební vzorky podléhají jeden po druhém vyšší úrovni zatížení v zvolených přírůstkových stupních, které sleduje s časem se měnící zátěžový profil. Vzorky obvykle začínají zkoušku v nižších úrovních zatížení. V daném čase je zatížení zvětšeno a test pokračuje. Test je ukončen, když všechny vzorky selhaly, když je pozorován daný určitý počet selhání, nebo když uplynul daný časový interval zkoušky. [3]

Přírůstkový test může zahrnovat jeden nebo více druhů zatěžování (např. mechanické a tepelné). V některých případech jsou typy zatížení dva: stálé a přírůstkové zatížení. Například, teplota je stálá, zatímco hladina vibrací je zvětšená nebo oba zátěžové faktory, teplota a vibrace, jsou zvýšeny během jednoho přírůstku (skoku). [1]

Přírůstkový test může podstatně zkrátit zkoušku spolehlivosti. Navíc, jak je uvedeno v předchozích odstavcích, je zde mnoho dalších druhů s časem se měnících zátěžových profilů, které mohou být použité v zrychlené zkoušce životností. Vyskytují se zde, ale problémy přesnosti výsledků plynoucí z měnícího se času u testu, než u tradičních konstantních (lineárních) zátěžových testů v celém rozsahu výběru. [3]

2.5.4 Degradční testy

Modelováním pomocí degradace můžeme dramaticky redukovat časové trvání zkoušky a počet vzorků. Dvě vlastnosti degradovaného testování přinášejí efektivnější délku trvání zkoušky a potřebný počet vzorků [1]:

1. čas selhání (Time to Fail) je vypočítaný modelem podle degradujících vlastností vzorku během testu [1],
2. statistické metody používají kontinuální data z technických parametrů degradace, přesněji binomálně, tj. prospěl - neprospěl[1].

Schopnost testu předpovídat vlastnosti dovoluje, aby byl ukončen dříve, než je výpočetní model ukončen, protože spolehlivostní požadavky nebudou dosaženy. Uloží testování a test ukončí. Testování může být také zastaveno v počátcích, když model předpovídá úspěšný test, ale extrapolace pro úspěšný test je riskantnější než extrapolace k předpovědi selhání. [1]

Nevýhodou degradačního testování je, že model je použitelný pro degradaci, tedy akcelerované modely nemohou být užívány jako degradační modely. [1]

Degradační testy jsou obecně používány pro creep, vznik a šíření trhliny, určení meze pevnosti v tahu a ohybu, jsou obecně používány pro vznik koroze, prodloužení, průrazné napětí, odpor a mnoho dalších. [1]

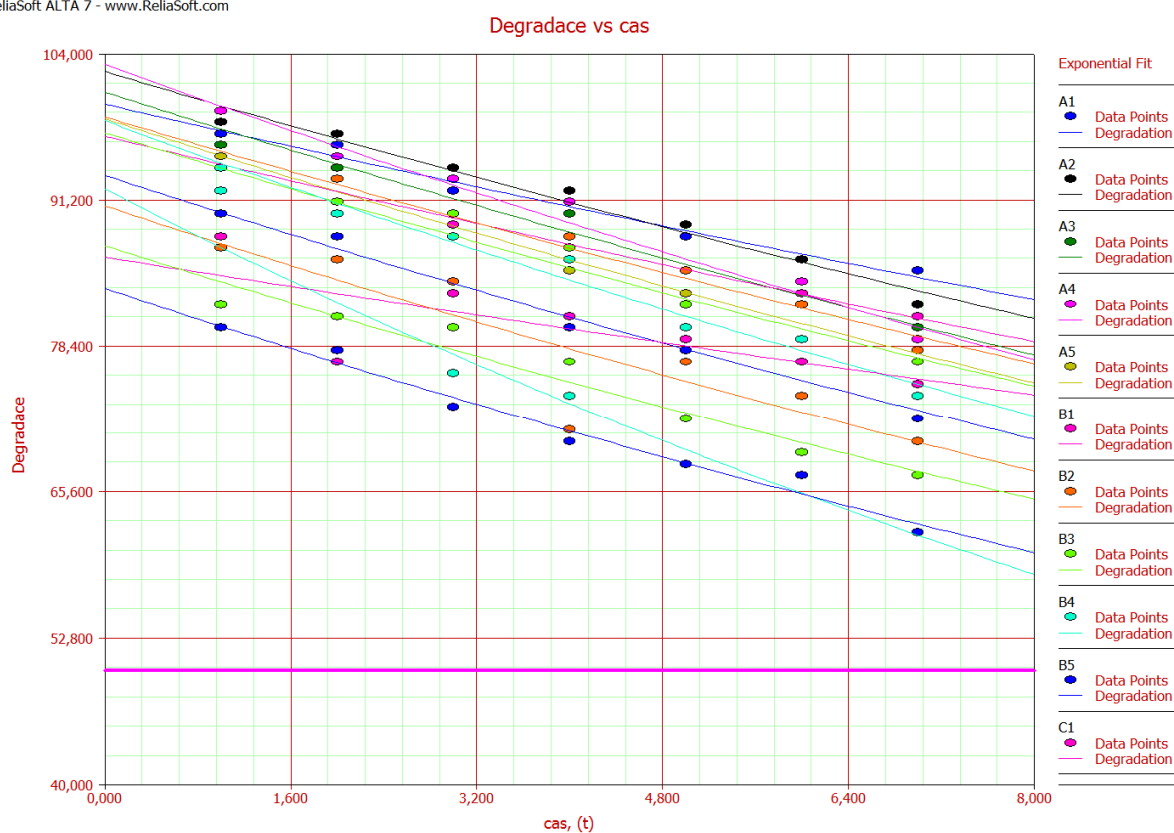
Použitím jednoduchého příkladu lineární degradace, jako je opotřebení materiálu (např. se jedná o brzdové destičky a dezén pneumatiky).[1]

Příkladem je test 15-ti komponent po dobu 7 měsíců při snížené, běžné a zvýšené teplotě, jak ukazuje tab. 2.

Měsíc	323 K					373 K					383 K				
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	C5
1	97	98	96	99	95	94	94	92	94	90	88	87	82	92	80
2	96	97	94	95	93	93	93	91	90	88	77	86	81	78	78
3	92	94	93	93	88	89	90	90	88	83	83	84	80	76	73
4	91	92	90	91	85	87	88	87	86	80	81	71	77	74	70
5	88	89	85	85	83	85	85	82	80	78	79	77	72	68	68
6	86	86	82	84	82	83	82	79	79	77	77	74	69	67	67
7	85	82	80	79	77	81	78	77	74	72	75	70	67	62	62

Tab. 2 Data pro degrační test [3]

ReliaSoft ALTA 7 - www.ReliaSoft.com



Obr. 2.10 Lineární degradace

Na obr. 2.10 vidíme správný předpoklad lineární degradace během 7 měsíců použití. Vstupní parametry jsou vzájemnou funkcí, jejíž model je vyjádřen v tab. 3. [1] Výpočet byl proveden v softwaru ALTA 7 PRO.

Lineární degradace	$y = a + bx$
Exponenciální degradace	$y = a.e^{b \cdot x}$
Silová degradace	$y = a \cdot x^b$
Logaritmická degradace	$y = a \cdot \ln(x) + b$
Gompertzova degradace	$y = a \cdot b^{(c^x)}$
Lloyd-Lipow degradace	$y = a - \frac{b}{x}$

Tab.3 Degradáční modely[1]

Kde: x,y jsou vstupní parametry (např. tloušťka materiálu a čas trvání testu)
 a,b jsou parametry modelu [3]

Parametry v modelu mohou být odhadovány použitím regrese metodou nejmenších čtverců:[1]

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (31)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - b \sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (32)$$

kde n je počet vzorků. [1]

Pro vyhodnocení degradačního testu je, oproti akcelerovanému testu, v softwaru ALTA 7 PRO zapotřebí velké množství dat. Tyto testy používají spíše v chemickém průmyslu.

2.6 Způsoby softwarového vyhodnocení

Akcelerované zkoušky životnosti jsou popisovány metodami obecné statistiky a tedy běžně používané softwary Statistika, Minitab, ALTA 7 apod. dovedou zkoušku vyhodnotit nebo určit z daných hodnot akcelerační faktor a další veličiny. Dá se použít i MS Excel, ale jeho použití vyžaduje vnesení a sestavení výpočetních modelů od základní úrovně. Tento problém nemají statistické softwarové nástroje typu Statistika, Minitab apod. U nich bývá problém spíše v jejich náročnosti a komplexnosti. To znamená vyšší nároky na sestavení výpočtu a tedy i na statistické vzdělání obsluhy.

Tyto problémy do značné míry odstraňuje nástroj ALTA 7, který je určen výhradně pro akcelerační a degradační testování. Jeho použití je velmi intuitivn  a neklade velké nároky na statistické vzdělání obsluhy. Tento software je možno propojit s dalšími produkty společnosti ReliaSoft a tím zvýšit jeho komplexnost.

3. Software ALTA

Pro upřesnění: v této diplomové práci nebude zevrubně popisován software ALTA, ale popis se bude týkat spíše uživatelských možností a využití. Tato kapitola je psaná jako první seznámení s použitím a nikoliv jako zevrubný návod.

3.1 Možnosti využití

Software ALTA Standard i ALTA PRO (dále jen ALTA) jsou určeny výhradně pro analýzu a návrh akcelerovaných a degradačních testů. Jak bude ještě zmíněno v kapitole 3.2. Prostředí programu ALTA je velmi podobné prostředí MS Excel a je zde tedy možnost kopírovat tabulková data. To velmi rozšiřuje možnosti použití.

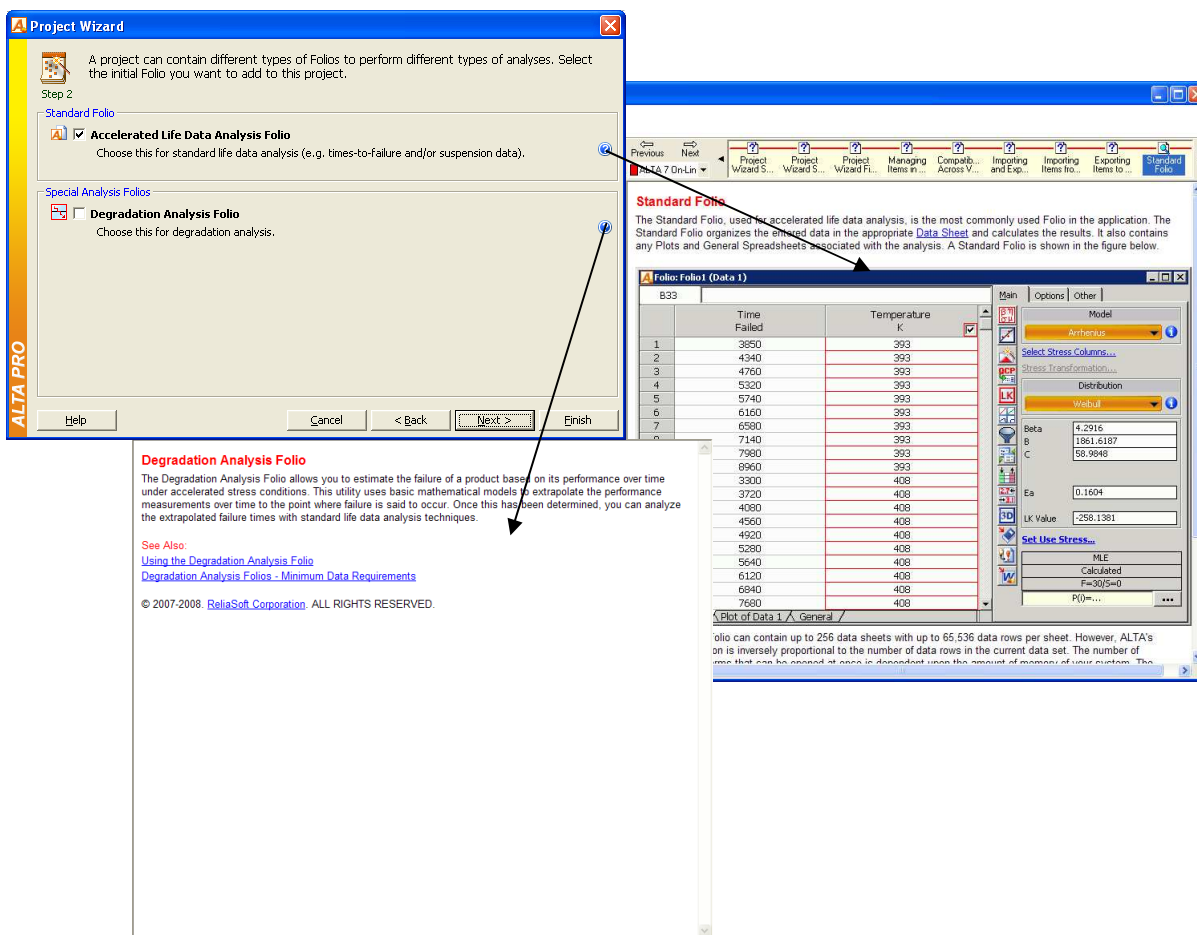
Ve firmě TRW-DAS a.s. je do značné míry využíván pro vyhodnocení zkoušek software MS Excel s předdefinovanými makry. ALTA je oproti tomu prostředím méně náročným jak na obsluhu, tak i na použití. Z tohoto důvodu byl pro diplomovou práci upřednostněn software ALTA.

V softwaru ALTA jsou postupně definované akcelerované či degradační testy, data z výstupu testu a v neposlední řadě vstupní zátěžové veličiny, u kterých je možnost výběru z již předdefinovaných, ale i vytvoření vlastních zátěžových veličin, což rozšiřuje možnost jejího využití.

3.2 Prostředí

Prostředí softwaru ALTA 7 je podobné prostředí Microsoft Excel a tedy je možné např. využívat možnosti kopírování dat ve formě tabulky.

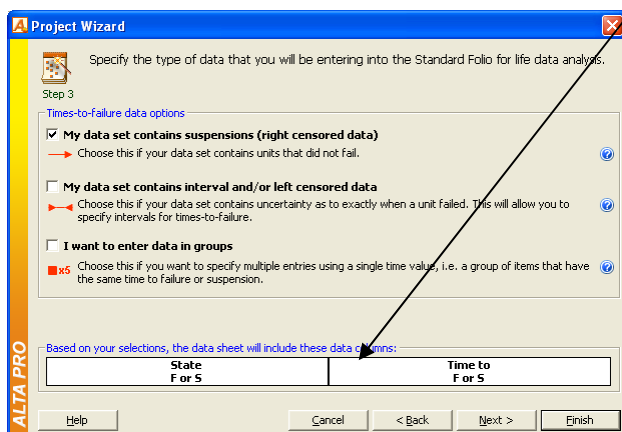
ALTA 7 uživatele prvotními kroky provede a je jen na uživateli, kterou z nabízených alternativ postupu si vybere. Úskalí nastává, pokud nevíme, co daná nabídka znamená. ALTA je proto vybavena nápovědou (helpem), který je umístěn přímo u uživatelem volených možností a tím zjednodušuje použití a zkracuje dobu přípravy výpočtu.



Obr. 3.1 Návod v softwaru ALTA 7 PRO

Jak je vidět z obr. 3.1 návod je přehledný a rychle k dispozici.

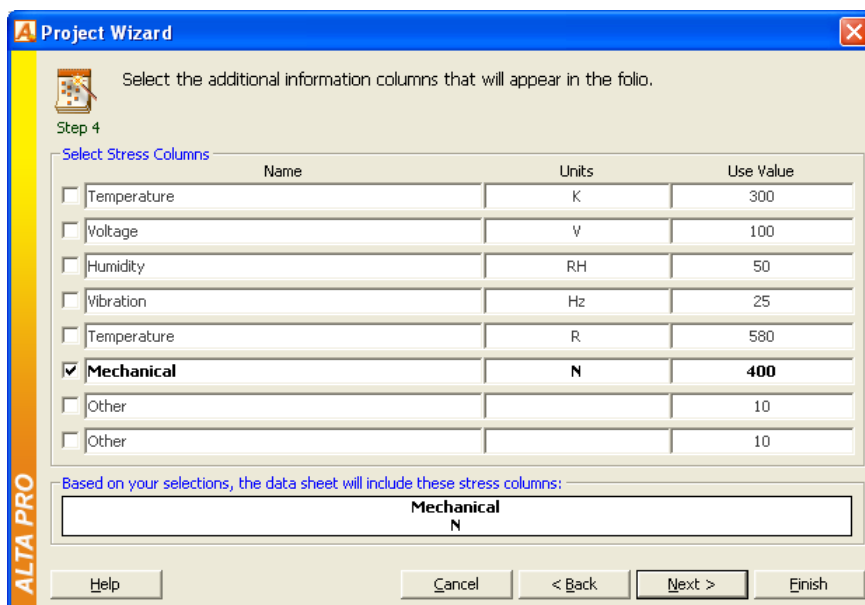
Dalším krokem je určení způsobu zadání hodnot z testu. V tomto případě záleží pouze na hodnotách, které jsme získali z měření, nebo které jsou zadány zákazníkem.



Obr. 3.2 Vlastnosti vstupních dat

V softwaru ALTA jsou výběry dat znázorněny pro názornost i graficky. A je zde možnost i kombinovat různé varianty společně (cenzurovaná data, data s utčitým intervalem apod.). Z toho plyne rozšířená použitelnost pro více typů akcelerovaných zkoušek.

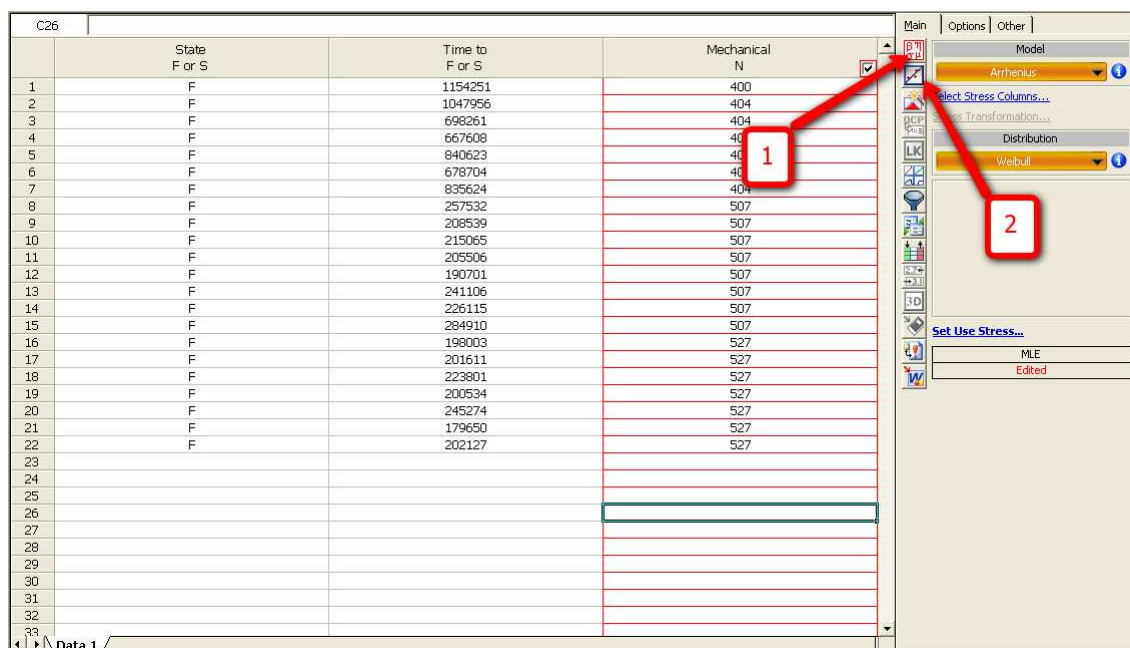
Posledním z kroků, v kterých jsou voleny postupy zadávání hodnot, je výběr vlivu, který způsobuje namáhání. Máme na výběr z několika nejpoužívanějších namáhání, jako jsou teplota, vlhkost, mechanické zatížení apod. Pokud není ve výběru namáhání, které jsme



Obr. 3.3 Výběr zátěže

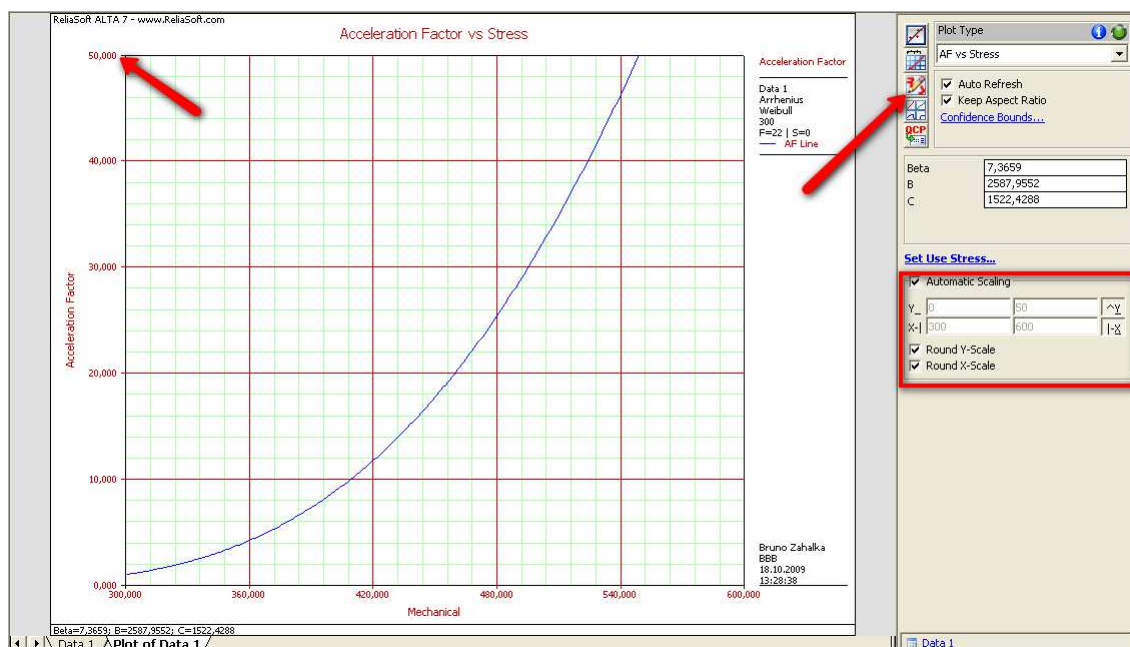
použili při testu, je možné si nadefinovat namáhání vlastní. Při testu s více akceleračními parametry je software ALTA vybaven kombinací těchto namáhání a lze tudíž vybrat více položek.

V postupu následuje výpočtová část. Tato část je velmi podobná prostředí aplikace MS Excel a tedy pro většinu uživatelů známá, ať už se jedná o samotné buňky či záložky listů obr.3.4.

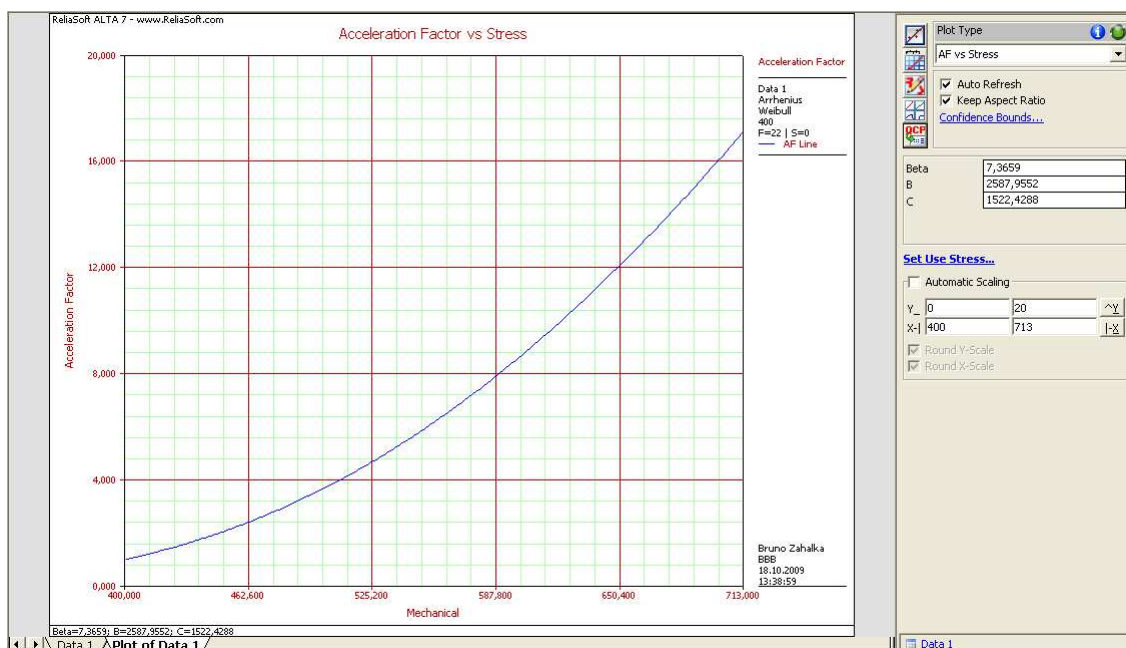


Obr. 3.4 Prostředí ALTA

Situace po vložení hodnot je znázorněna na obr. 3.4, V pravé části okna jsou dvě pro postup důležité ikony (výpočet a vykreslení grafů). Jejich posloupnost je dána postupem při práci s programem. To znamená, že prvně musíme výsledné hodnoty vypočítat a až následně je možné vykreslit grafy. Samozřejmě až po kompletním zadání celého testu zadáním výpočtového modelu a rozdělení, které byly popsány v dřívějších kapitolách.



Obr. 3.5 Možnosti měřítka

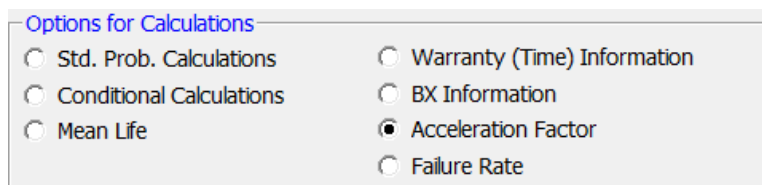


Obr. 3.6 Akcelerační faktor pro 400 N

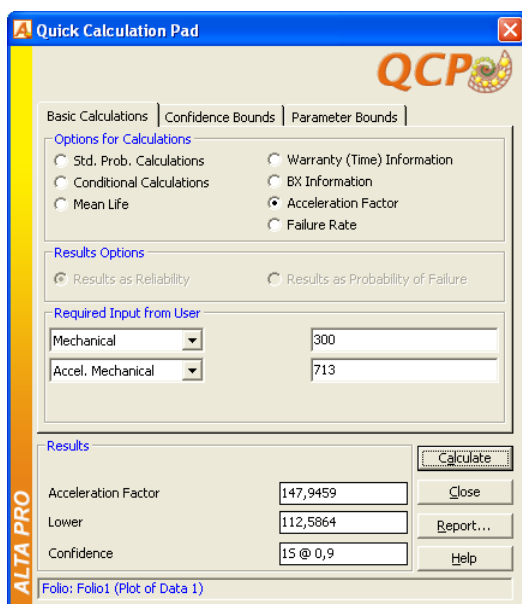
Pro vypsání přesných výsledků používáme funkci *Quick Calculation Pad* (QCP), obr.3.7. V QCP je možné zjišťovat přesné hodnoty. QCP má sedm možností, kterými definujeme, co je potřebné vypočítat, obr. 3.7.

Volby výpočtu:

- standardní výpočet pravděpodobnosti,
- podmíněná spolehlivost,
- střední životnost,
- výpočet (času) záruky (Warranty (Time) Information),
- životnost BX (BX informatik),
- akcelerační faktor,
- intenzita poruch,



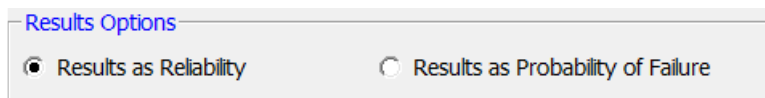
Obr. 3.7 Volby výpočtu



Obr. 3.8 Quick Calculation Pad

Standardní výpočet pravděpodobnosti

Standardní výpočet pravděpodobnosti umožňuje výpočet spolehlivosti a pravděpodobnosti poruchy, které se nastavují ve volbách požadovaných výsledků, obr. 3.9.



Obr. 3.9 Volby výsledků

Podmíněná spolehlivost

Podmíněná spolehlivost umožňuje výpočet spolehlivosti či pravděpodobnosti poruchy pro námi zvolenou dobu (rozsah) v závislosti na výběru požadovaných výsledků, obr. 3.9. Požadované vstupy jsou: úroveň zatížení, doba počátku zkoušky a konečná doba zkoušky, po kterou byla zkouška spuštěna.[16]

Střední životnost

Výpočet střední životnosti s 50% úrovní konfidence (důvěry). Jestli hranice konfidence nejsou vybrané, jediné požadované parametry pro výpočet jsou úroveň zatížení.[16]

Výpočet (času) záruky (Warranta (Time) Information)

Výpočet počtu cyklů (času) pro úroveň zatížení a požadovanou spolehlivost.

Životnost BX (BX Information)

Tato hodnota je velmi podobná výpočtu *Výpočtu (času) záruky*, ale požadovaný vstup je pravděpodobnost poruchy namísto spolehlivosti.

Termín B(X) je odvozen z názvosloví užívaného mnoha výrobci, kteří používají termín životnost B(10). Životnost B(10) odkazuje na čas, za který by selhalo 10 % vzorků. V softwaru ALTA je možno volit pravděpodobnost selhání. Opět se volí úroveň zatížení a pravděpodobnost poruchy (selhání). [16]

Akcelerační faktor

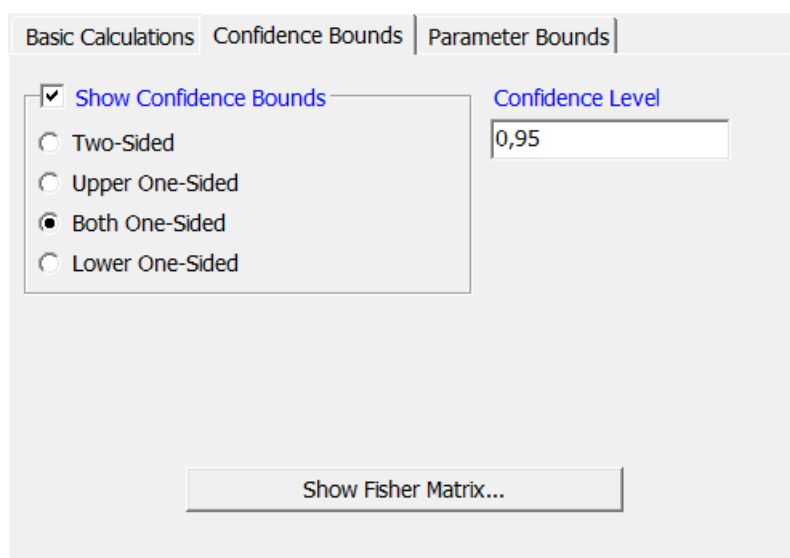
Zde je určen akcelerační faktor pomocí vzorce (12), viz kapitola 2.4.4.1
Požadované parametry jsou zmíněné úrovně zatížení.

Intenzita poruch

Výpočet intenzity poruch pro zvolenou zátěž a předpokládaný časový interval. [16]

Pro veškeré parametry se volí *úroveň konfidence*, která udává časový interval (nebo počet cyklů) pro danou spolehlivost. Pro úroveň konfidence 0,95, je interval konfidence rozšířen pomocí spodní a horní hodnoty, abychom jsme měli 95% jistotu, že výsledek zkoušky bude v daném intervalu.

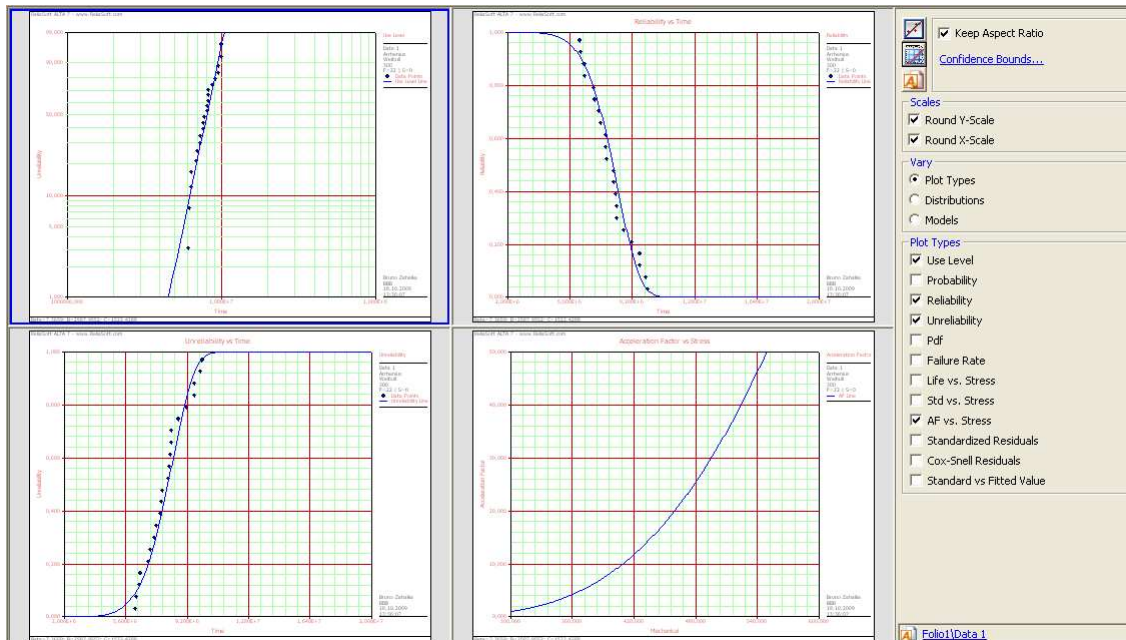
Zadání úrovně konfidence v softwaru ALTA je pouze formou možnosti volby intervalu a úrovně spolehlivosti, kdy jsou možné volby spodní hranice, horní hranice nebo obou současně. Další možností zadání je zadání celého intervalu konfidence, tedy hodnota 0,9 znamená interval od 5% do 95% (kdy spodní hranice konfidence je značená *lower* 5% a horní hranice konfidence *upper* 95%), obr.3.10.



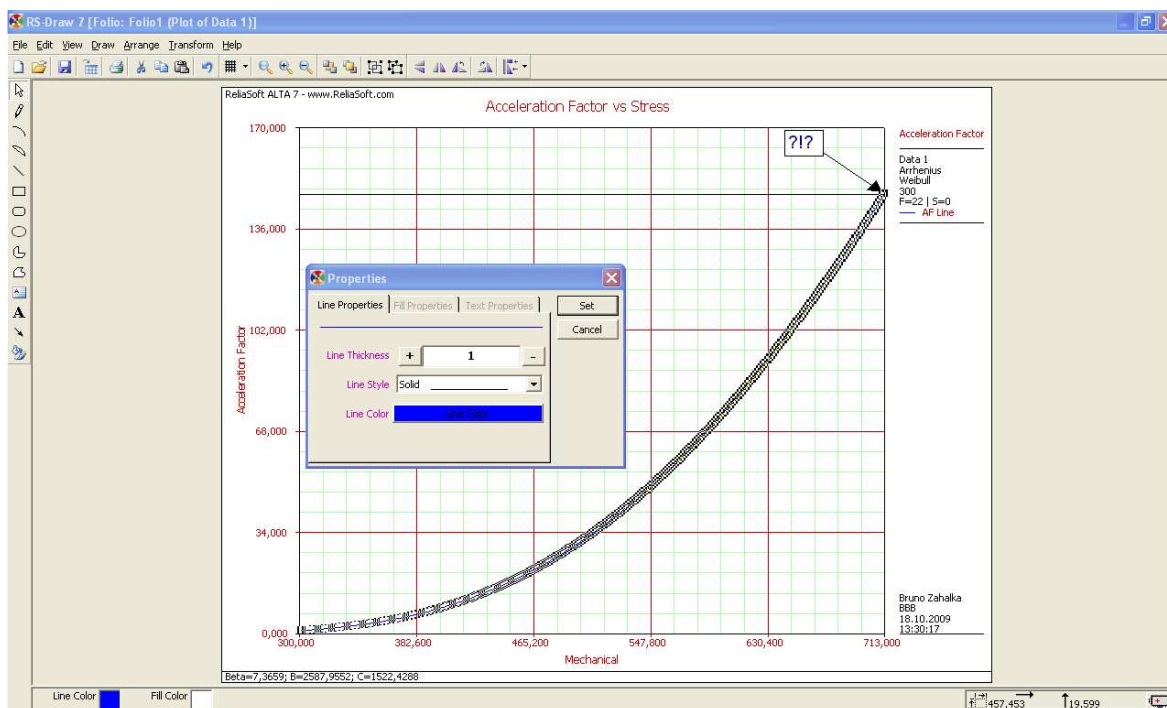
Obr. 3.10 Volby úrovně konfidence

Všechny výše zmíněné výpočty jsou velmi názorně a do podrobností popsány v nápovědě (Helpu) softwaru ALTA.

Software ALTA umožňuje též společné vykreslení několika grafů, obr. 3.11. Grafy lze různě popisovat a upravovat. Tato funkce je vidět na obr. 3.12. Ale je nutné podotknout, že její možnosti jsou velmi omezené.



Obr. 3.11 Vykreslení více grafů současně



Obr. 3.12 Grafická úprava

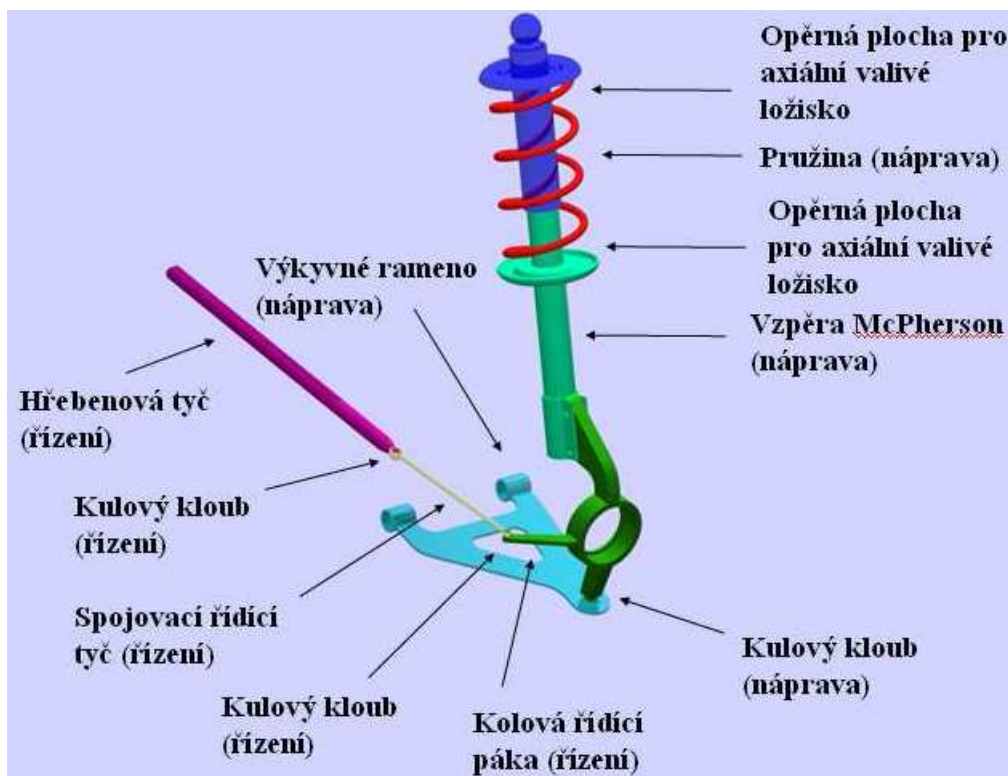
4. Kulové čepy

Kulové klouby řízení jsou nedílnou součástí řízení vozidla. Všechny prvky řízení mají několik účelů:[5]

- přenos pohybu z převodky řízení ke kolové řídicí páce,
- přenos síly a její změna podle potřeby,
- nastavení vzájemné polohy rejdových kol.

Kulový čep představuje z hlediska kinematiky sférickou vazbu a je umístěn na těhlici kola. Jeho použití na řízené nápravě je z důvodu změny geometrie kola při změně směru jízdy vozidla.

Od převodovky řízení se přenáší pohyb ke kolové řídicí páce soustavou pák a řídicích tyčí. Přitom jsou některé části řídicího ústrojí upevněny na odpružených hmotách podvozku, některé na neodpružených částech. Jejich vzájemný pohyb tedy není rovinný, ale prostorový. Tomuto prostorovému pohybu musí vyhovovat vzájemné spojení jednotlivých dílů řídicího ústrojí. Pro toto spojení se proto používají kulové klouby.[6]



Obr.4.1 Náprava McPherson [6]



Obr. 4.2 Pozice kulového kloubu v řízení [12]

Používá se mnoho typů kulových kloubů. Proto jsou zavedeny zkratky vyplývající ze zkrácení anglického názvu. Zde jsou uvedeny zkratky těch, které se používají v TRW-DAS a.s.:

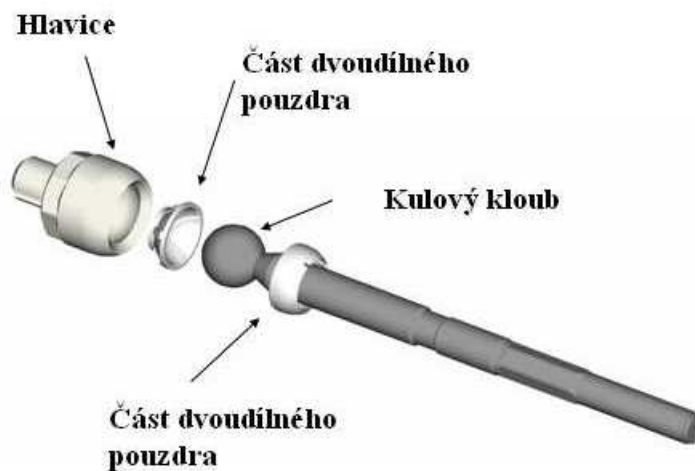
- IBJ (Inner ball joint),
- OBJ (Outer ball joint),
- SBJ (Suspension ball joint),
- PBJ (Pillow ball joint),
- CA (Control arm).

Kloub OBJ, který je testován zrychlenou zkouškou životnosti, se skládá z kulového čepu, vrchního a spodního pouzdra kulového kloubu, hlavice, krycího víka, protiprachové manžety a dvou přítlačných objímek, obr. 4.3.



Obr. 4.3 Kulový kloub OBJ [6].

Pro zkoušku je nutný i kloub IBJ, obr. 4.4, který tvoří testovací soustavu. Ale v této práci se zabývám pouze kloubem OBJ.



Obr. 4.4 Kulový kloub IBJ [6]

4.1 Testy kulových kloubů

Výběr náhodného vzorku a samotné testování v TRW-DAS a.s. musí vyhovovat požadavkům zákazníků.

4.1.2 Základní rozdělení testů

- *Funkční* – všechny níže uvedené funkční testy se dějí s přítlakem nebo bez přítlaku (zatížené v axiálním směru). [6]
 - *Elasticita*
 - Radiální – kloub se zátěží v radiálním směru (v ose hlavice) a měříme radiální posuv (příp. i vůli) kulového čepu vůči hlavici.[6]
 - Axiální – kloub zatížíme v axiálním směru (v ose kulového čepu) a měříme posuv (příp. i vůli) kulového čepu vůči hlavici.[6]
 - *Moment*
 - Točivý – zjišťujeme maximální točivý moment, kterým se pohybuje kulový čep v hlavici. Dále měříme maximální utrhovací točivý moment po zatuhnutí tuku mezi pouzdrem a kulovým čepem.[6]
 - Klopný – zjišťujeme klopný moment a utrhovací klopný moment. Klopný moment je moment potřebný k uvedení hlavice kulového čepu do kyvného pohybu okolo středu čepu. [6]
 - *Vytrhnutí a vytlačení kulového čepu z hlavice* – „zjišťujeme minimální sílu, která vede k vytrhnutí (směrem k manžetě) nebo k vytlačení (směrem ke spodnímu víčku) kulového čepu z hlavice. [6]
 - *Měření úhlu výkyvu* – každý kloub musí umožňovat natočení požadované velikosti ve všech směrech od podélné osy kulové střední části čepu.[6]
- *Dlouhodobé*
 - *Fatigue test* – jelikož automobil při skutečné jízdě nejezdí konstantní rychlostí, nejezdí vždy v přímém směru, nejezdí vždy po dokonale rovné silnici, jsou jeho podvozkové části namáhané časově proměnlivou silou. To se projevuje mimo jiné únavou materiálu. Nejvíce namáhaná místa na únavu u kloubů jsou vruby na pinu (kulové středové části) a jiné změny průřezu. Odběratelé tedy po TRW-DAS a.s. požadují předem stanovenou životnost kulových kloubů.[6]
 - *Wear test* - díky pohybu pinu v plastové misce vzniká v obouh dých vzájemné opotřebení. Jelikož je plastová miska z mnohem méně tvrdého materiálu, vzniká v ní mnohem větší opotřebení. Toto opotřebení se navýší, vnikne-li cizorodá částice do kluzných ploch. [6]
 - *Sealling test* - jedná se o test, kterým se zkouší těsnost prachovky. Při zkoušce na kloub s prachovkou stříká voda. Vyhodnocuje se množství H₂O v tuku. Tuk nesmí obsahovat žádnou vodu, jinak kloub začne ihned korodovat. [6]
 - *Enviromental test (salt – spray test)* - hlavice (housing) nebo pin (bez tuku) se vloží do solné mlhy. Vyhodnocuje se druh koroze. „červená“ koroze je nebezpečná, „bílá koroze“ nikoliv. [6]

Všechny výše zmíněné testy mohou být akcelerovány. Pro experiment v rámci diplomové práce a jeho vyhodnocení byl použit *fatigue test*. U tohoto testu je možné dosáhnout pomocí zvýšeného zatížení nejlepších výsledků. Nevýhodou akcelerace těchto testů je riziko jejich přeakcelerování, v tomto případě se jedná o zvýšení teploty vnitřní vložky v důsledku tření, hystereze v materiálu a její vytavení.

5. Vytvoření modelu kulového kloubu

Pro vytvoření modelu jsem zvolil software Pro/Engineer Wildfire 4.0. Tento software jsem zvolil z důvodu vyšší kompatibility se softwarem ANSYS 12.0.

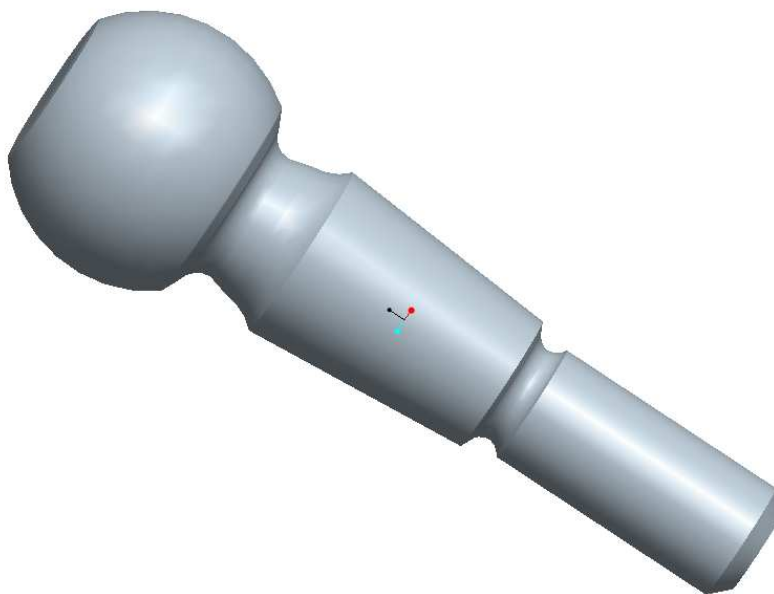
5.1 Kulový čep

Tento díl je vyrobený z materiálu 41CrS4V (SAE-1041). Jedná se o uhlíkovou mangančitou ocel.

Materiálové vlastnosti pro určení napjatosti v MKP byly zjištěny z [4], [12] a [17] a jsou:

- Modul pružnosti v tahu – $2,1 \times 10^5$ MPa
- Poissonovo číslo – 0,3
- Hustota materiálu – 7850 kg.m^{-3}
- Mez pevnosti - $R_m = 883\text{-}1020\text{MPa}$
- Mez kluzu - $R_{p0,2} = 700\text{MPa}$

Kulový čep jsem vymodeloval podle výkresové dokumentace TRW-DAS a.s.



Obr. 5.1 3D model kulového čepu

5.2 Vrchní pouzdro kulového kloubu

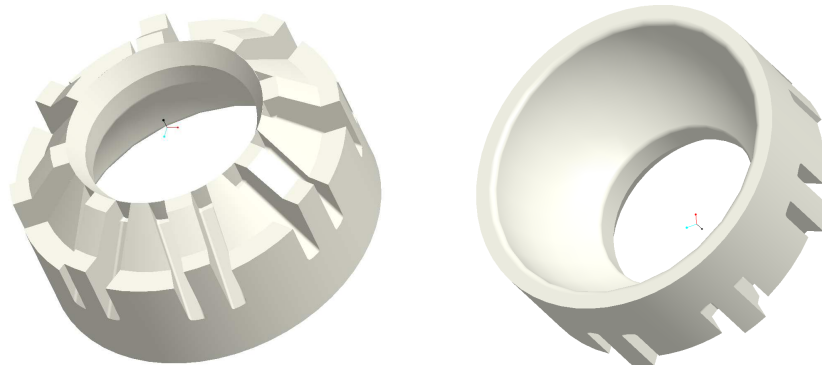
Vrchní pouzdro jsem vymodeloval také podle výkresové dokumentace TRW-DAS a.s. Zde je uveden materiál pouzdra PUR 03-03-0, jedná se o polyuretan. Pro porovnání s kulovým čepem je uvedena mez pevnosti.

Materiálové vlastnosti pro určení napjatosti v MKP byly zjištěny z [4], [10] a [17] a jsou::

- Modul pružnosti v tahu – $2,5 \times 10^3$ MPa
- Poissonovo číslo – 0,35
- Hustota materiálu – 1140 kg.m^{-3}
- Mez pevnosti - $R_m \geq 30 \text{ MPa}$

Tento materiál je zvolen s ohledem na:

- vyšší možnost tvarovatelnosti vložky a tím lepší přilnutí styčných ploch čepu a vložky,
- lepší tření mezi čepem a vložkou,
- v neposlední řadě i proto, že se jedná o kulový kloub bez možnosti mazání.



Obr. 5.2 3D model vrchního pouzdra

5.3 Spodní pouzdro kulového čepu

Spodní část pouzdra kulového kloubu je vyrobena z materiálu POM 01-01-1 tedy z polyacetalu.

Materiálové vlastnosti pro určení napjatosti v MKP byly zjištěny z [4], [13] a [17] a jsou::

- Modul pružnosti v tahu – $3,25 \times 10^3$ MPa
- Poissonovo číslo – 0,35
- Hustota materiálu – 1420 kg.m^{-3}
- Mez pevnosti $R_m \geq 70 \text{ MPa}$

Tento materiál byl, tak jako v předchozím případě, zvolen z následujících důvodů:

- vyšší možnost tvarovatelnosti vložky,
- lepší přilnutí styčných ploch čepu a vložky,
- lepší tření mezi čepem a vložkou,
- v neposlední řadě proto, že se jedná o kulový kloub bez možnosti mazání.



Obr. 5.4 3D model spodního pouzdra

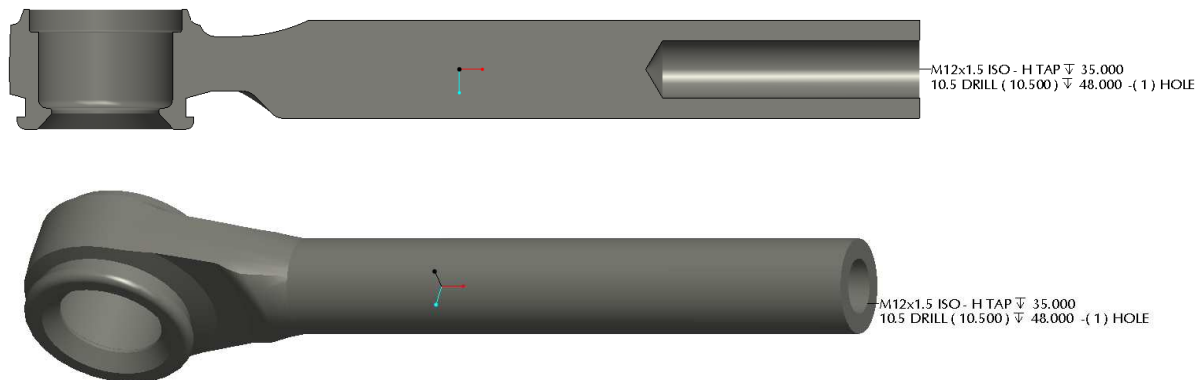
5.4 Hlavice kulového kloubu

Hlavice kulového kloubu je z materiálu C35N DIN EN 10083-2, který je alternativou oceli 12 040 ČSN 41 2040.

Tento díl je vyroben jako výkovek s následným obrobením funkčních ploch, pro vložení spodního, vrchního pouzdra a pro vytvoření závitu úchytu.

Materiálové vlastnosti pro určení napjatosti v MKP byly zjištěny z [4] a [17] a jsou::

- Modul pružnosti v tahu – $2,1 \times 10^5$ MPa
- Poissonovo číslo – 0,3
- Hustota materiálu – 7850 kg.m^{-3}
- Mez pevnosti - $R_m \geq 520 \text{ MPa}$



Obr.5.5 3D model hlavice

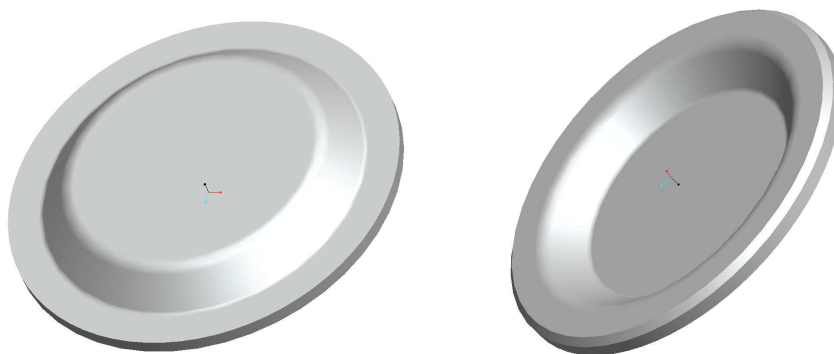
5.5 Krycí víko

Pro tento díl nebyla k dispozici detailní výkresová dokumentace, jeho rozměry jsem určil ze sestavy kulového kloubu. Nepřesnost vyplývající z určení rozměrů je pro daný účel zanedbatelná.

Materiál krycího víka byl určen, po konzultaci, jedná se o ocel běžných parametrů.

Materiálové vlastnosti pro určení napjatosti v MKP byly zjištěny z [4] a jsou::

- Modul pružnosti v tahu – $2,1 \times 10^5$ MPa
- Poissonovo číslo – 0,3
- Hustota materiálu – 7850 kg.m^{-3}



Obr. 5.6 3D model krycího víka

5.6 Přípravek pro prováděný test

Pro uchycení kužele čepu musí být navrhnout (vyroben) přípravek. Firma TRW-DAS a.s. má dva druhy přípravků pro tento test. Liší se pouze materiálem, z kterého jsou vyrobeny. Materiál 11 600 je použit u přípravků, které se musí po každém zkoušeném vzorku přebrousit z důvodu vymačkání kuželovité díry přípravku. Materiál 15 230 je použit u přípravků pro více použitých vzorků.

Tvar přípravku je ukázán na obr. 5.7 a obr. 5.8. Na obr. 5.8 je zřetelně vidět čtyři otvory ve spodní části přípravku. Tyto otvory na výkresové dokumentaci nejsou. Tyto otvory nemají na analýzu napjatosti žádný vliv. Ve výpočtovém modelu byly proto zanedbány.



Obr. 5.7 Přípravek pro uchycení kulového čepu při zkoušce



Obr. 5.8 Přípravek použitý při zkoušce

6. Zatížení kulového čepu během zkoušky

Tato stať je zde zařazena z důvodu provedení kompletní akcelerované zkoušky, která vychází z reálného namáhání zkoušené součásti. Analýzu napjatosti jsem provedl z důvodů určení míst koncentrace napětí a nejpravděpodobnějšího místa vzniku trhliny. Za předpokladu, že se materiál chová lineárně do meze kluzu. Po jejím překročení výsledky neplatí a bylo by nutno použít nelineární charakteristiky.

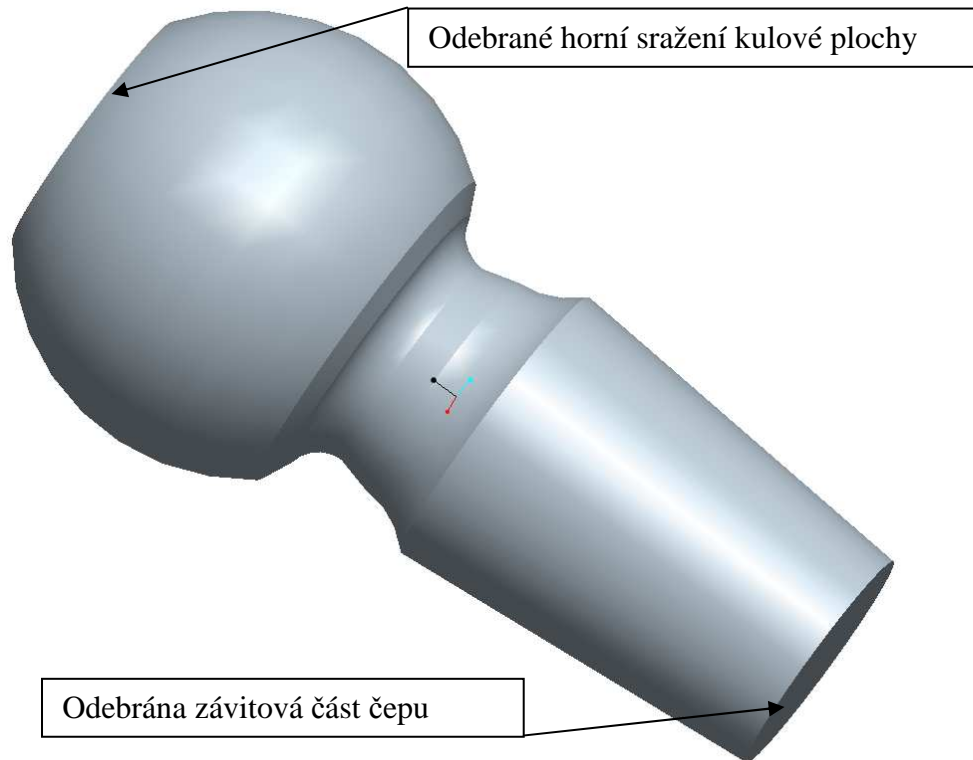
Modely jsou pro účely výpočtu potřebným způsobem zjednodušeny. To spočívá v odstranění částí, které nemají na napjatost kloubu vliv nebo je můžeme pro účely prováděné analýzy zanedbat (např. rádiusy, sražení hran apod.).

6.1 Zjednodušení jednotlivých součástí

Jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci, jedná se o zjednodušení, kterými je celkový výsledek analýzy podstatně neovlivňují.

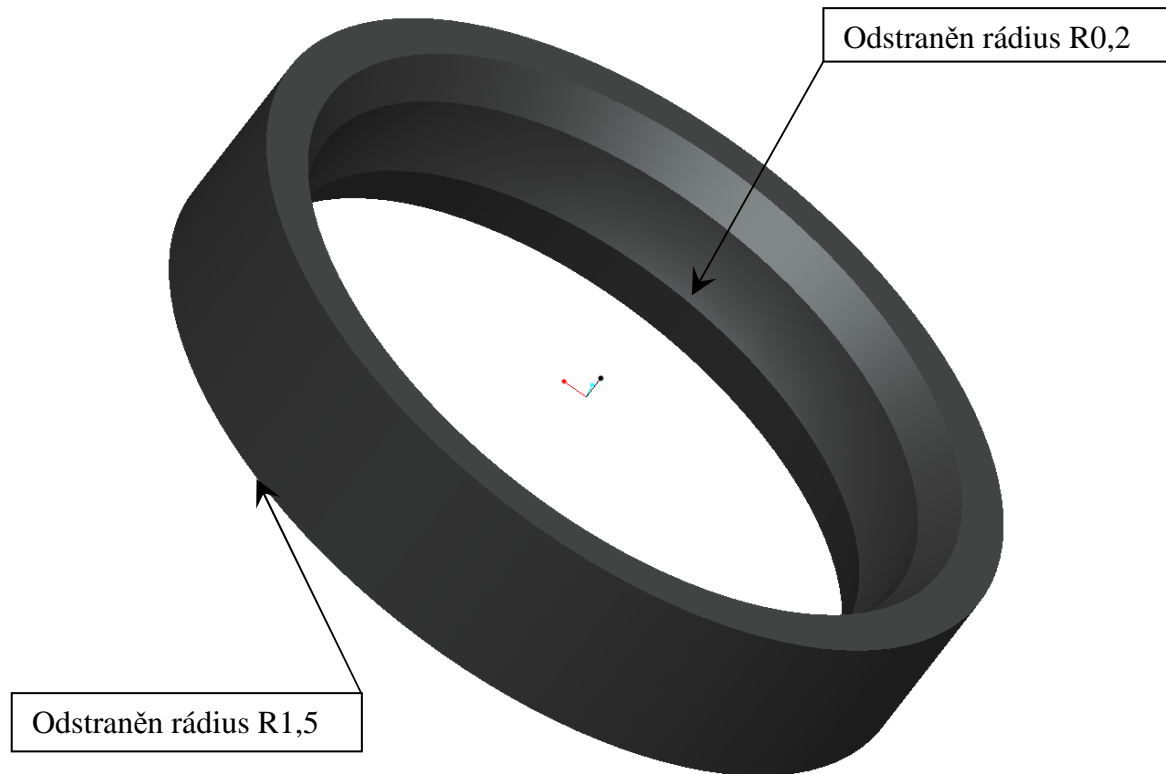
Zjednodušení provedená pro jednotlivé součásti:

- Kulový čep – odstranění horního sražení kulové plochy čepu a odstranění závitové části s přechodem, obr. 6.1.



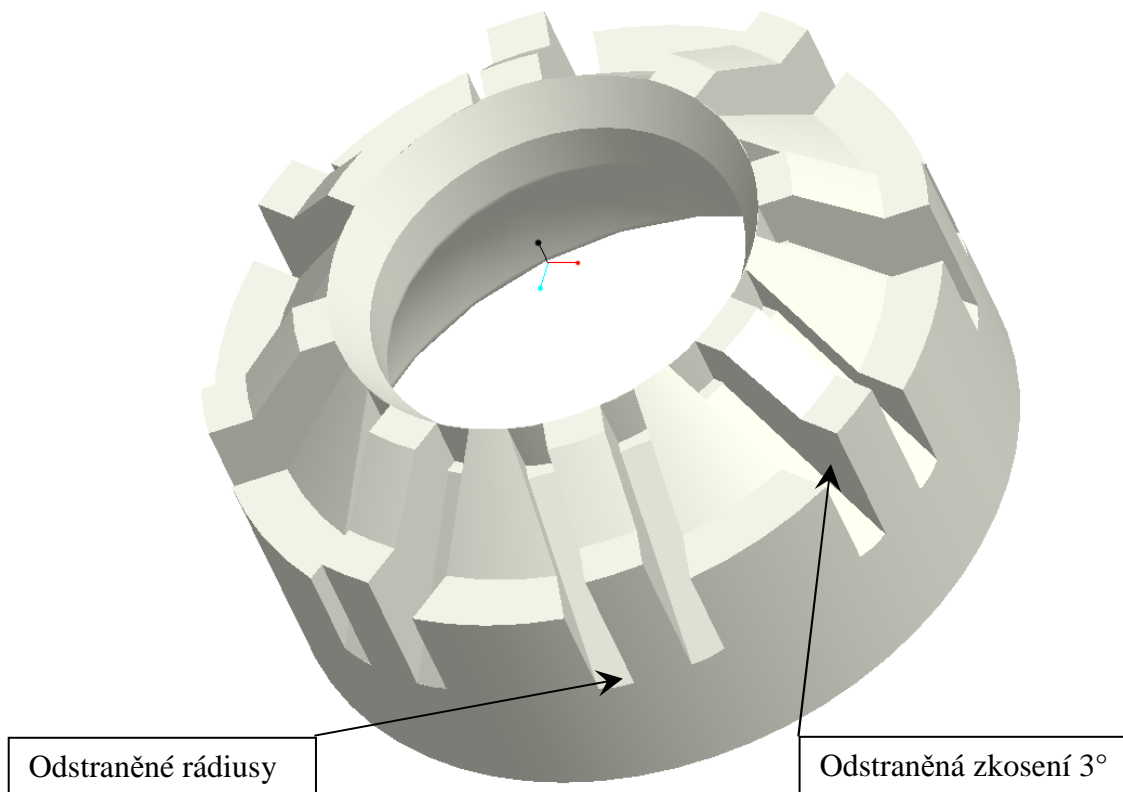
Obr. 6.1 Zjednodušený model kulového čepu

- Spodní pouzdro - odstraněny výstupky pro vzájemné pevné usazení vůči vrchnímu pouzdru, snížení výšky pouzdra (vzájemné přesazení o 1,9 mm a nahrazení kontaktem s offsetem), odstraněny rádiusy R1,5 a R0,2, upravena míra kuželovitost na válcový tvar s konstantním vnějším průměrem 25 mm obr. 6.2.



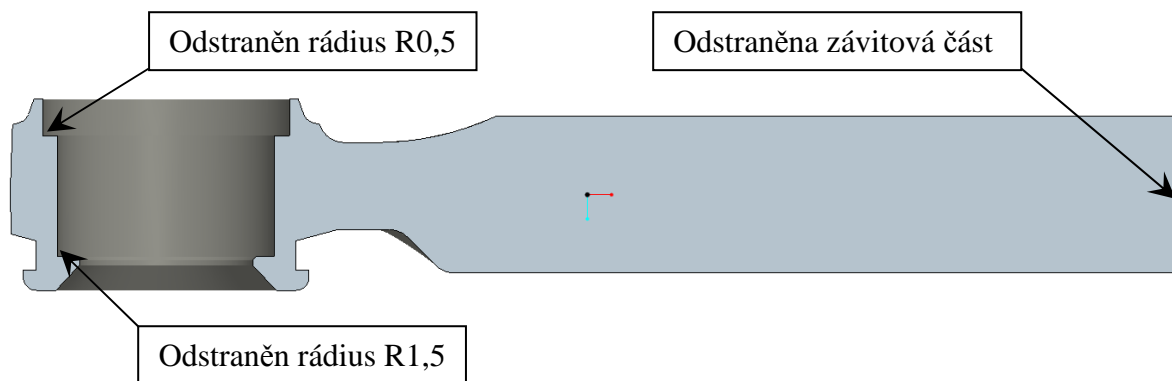
Obr. 6.2 Zjednodušený model spodního pouzdra

- Vrchní pouzdro - odstranění rádiusů R0,5 na dosedací kulové ploše a rádiusů v žebrování vrchní části pouzdra, kde bylo odebráno i zkosení žeber 3°, dále snížení výšky pouzdra a nahrazení kontaktem, obr. 6.3.



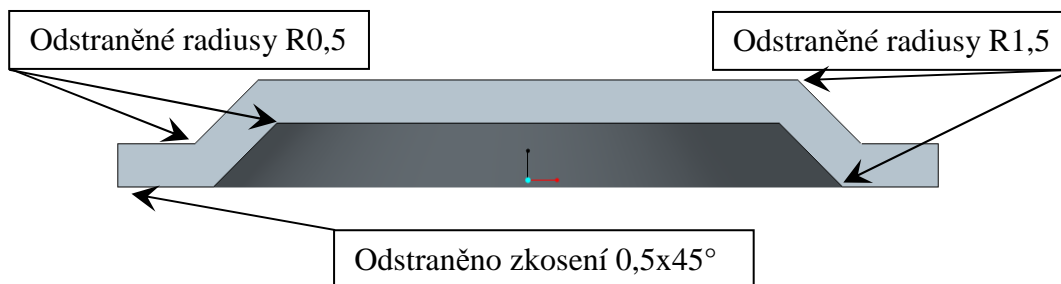
Obr. 6.3 Zjednodušený model vrchního pouzdra

- Hlavice kulového čepu - odstranění závitové části, rádiusu R1,5 v dosedací ploše spodního pouzdra a odstranění rádiusu R0,5 v ploše dosednutí krytky, obr. 6.4.



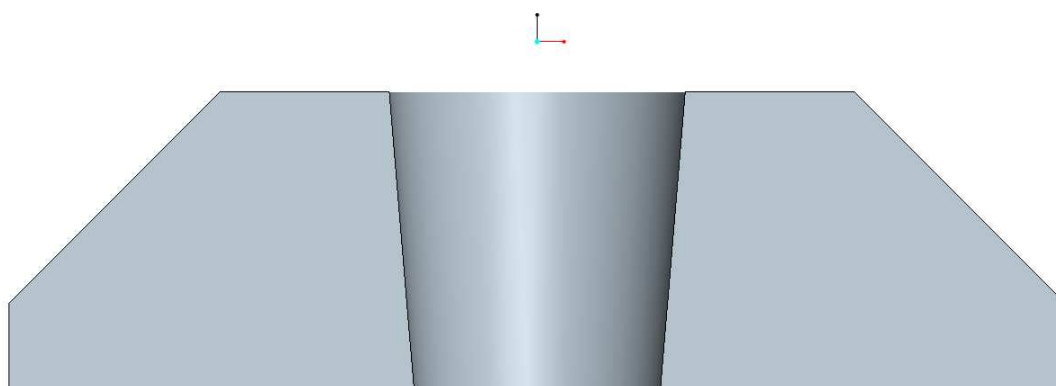
Obr. 6.4 Zjednodušená hlavice kulového čepu

- Krytka – zde zjednodušení spočívá v odstranění rádiusu R0,5, R1,5 a stražení 0,5x45°.



Obr. 6.5 Zjednodušený model krytky kulového čepu

- Přípravek – zjednodušení přípravku je provedeno odstraněním částí, které nemají vliv na výsledky analýzy. Odstraněna je proto celá spodní část přípravku.



Obr. 6.6 Zjednodušený model přípravku

Na hlavici kulového kloubu byl z hlediska věrnosti tvaru brán menší ohled, protože zde v důsledku zatížení nedochází k výrazným napjatostem jako u kulové části, která je hlavní zkoušenou součástí a pro kterou je tato analýza především připravena.

6.2 Analýza napjatosti v MKP systému ANSYS

Během této analýzy jsem model zatížil a upevnil, aby model co nejvíce odpovídal stavu kloubu během testu, obr. 6.7. Model jsem řešil jako kontaktní úlohu.

Pro analýzu byly vybrány tři úrovně zatížení:

- nízká hodnota: 3,5kN
- hraniční hodnota: 7kN
- hodnota při překvalitaci: 8kN



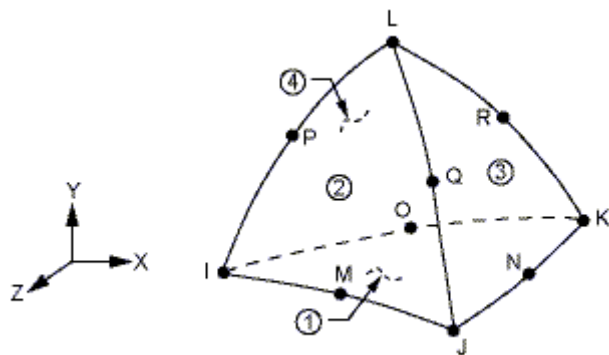
Obr. 6.7 Test vzorku

6.2.1 Tvorba modelu

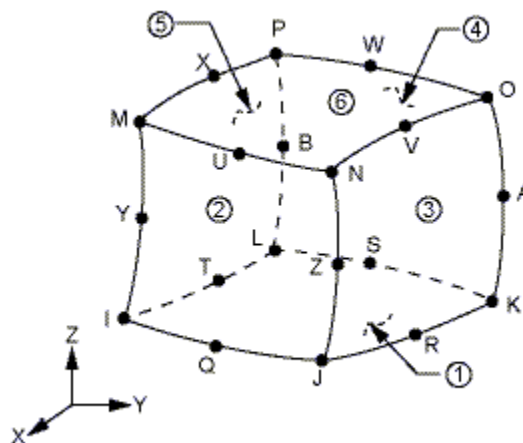
Při tvorbě modelu jsem použil symetrie, kloub je modelován polovinou celkového tvaru. Symetrie je v tomto případě modelována vazbami v rovině symetrie, zátěž se zadává v poloviční hodnotě.

Model jsem rozdělil na více objemů, obr. 6.10, z důvodu vytvoření mapované a jemnější sítě v místech kontaktů a zatížení. Rozdělení objemů jsem provedl v softwaru ANSYS 12.0 pomocí pracovních rovin.

Pro tvorbu sítě jsem zvolil elementy SOLID 186 s 20 nody pro mapované síťování a SOLID 187 s 10 nody pro volné síťování, z důvodu tvarové složitosti některých součástí modelu.

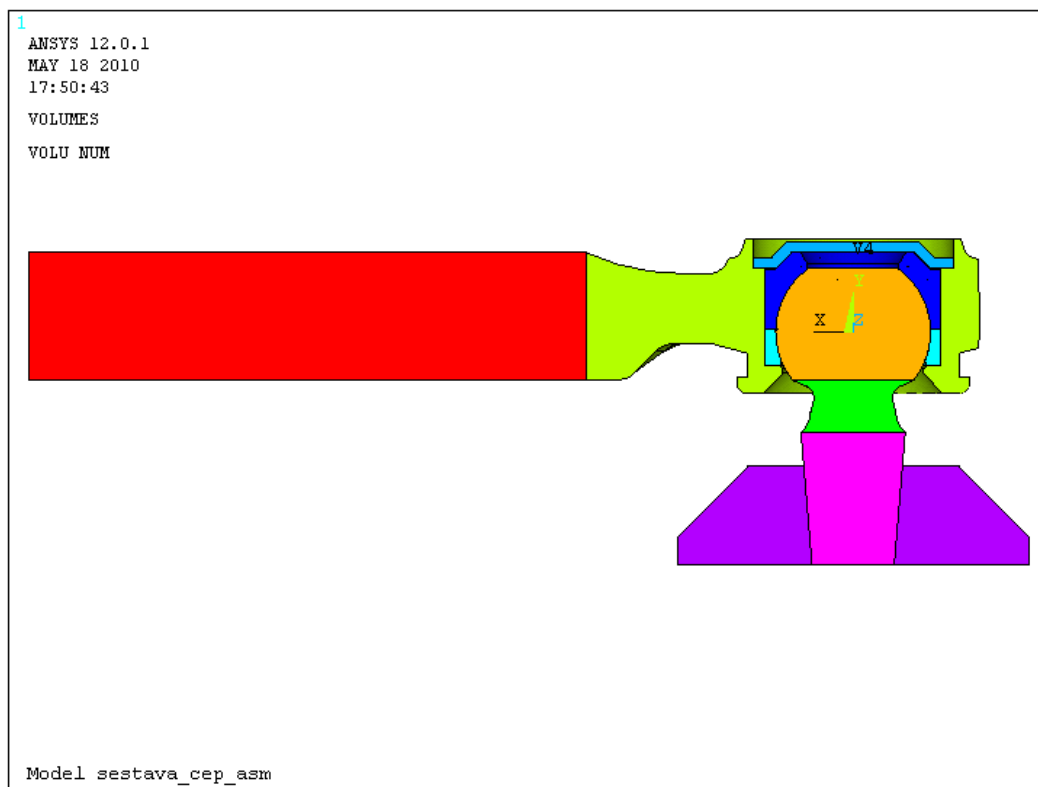


Obr. 6.8 SOLID 187 [14]



Obr. 6.9 SOLID 186 [14]

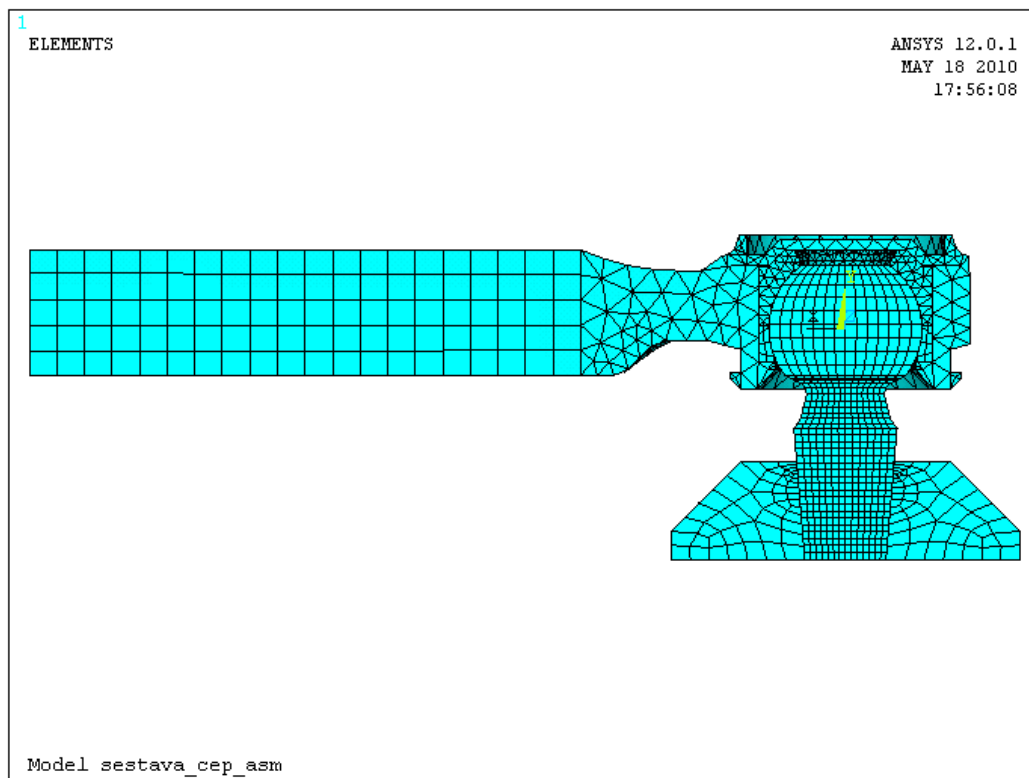
Na obr. 6.10 je vidět výsledný model pro analýzu napjatosti, tvořený jednotlivými objemy.



Obr. 6.10 Koncový model

Síťování

Hustotu a typ sítě jsem zvolil na základě míst předpokládaného vzniku koncentrace napětí a s ohledem na kontaktní místa dvou součástí, obr. 6.11. Tedy hlavici kulového kloubu jsem síťoval volně. Pro samotný kulový čep, kde jsou požadovány přesnější výsledky, jsem použil jemnější mapovanou síť, obr. 6.11. Síť čepu má charakteristickou velikost prvků 1 mm, jemnější dělení nemá na přesnější výsledek velký vliv a pro hardwarové nároky je zvolená hustota sítě vyhovující.



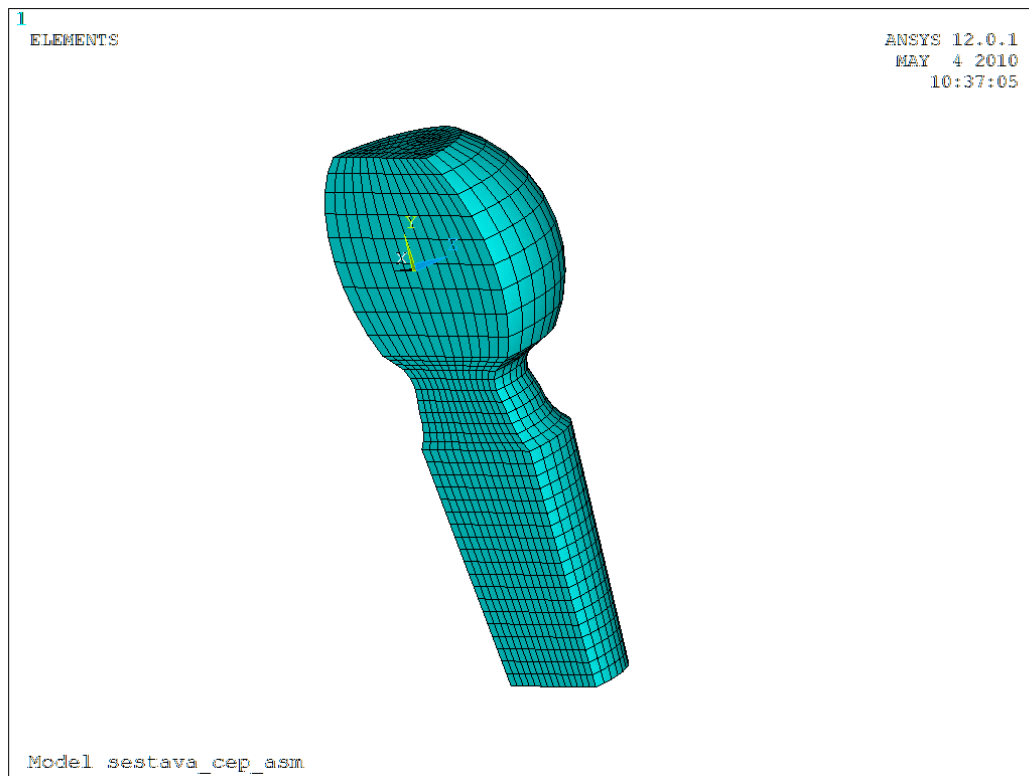
Obr. 6.11 Vysíťovaný model

Posledním požadavkem na síť byla její velikost vyjádřená počtem prvků a uzlů. Hardwarové nároky na jemnou síť byly vyšší než možnosti použitého hardwaru. Z těchto důvodů jsem zvolil hrubší síť, která nemá znatelně negativní vliv na přesnost výsledků a zároveň umožňuje výpočet v přijatelném čase.

Čep

Síť čepu má rozdílnou hustotu dle místa požadovaných výsledků. Nejmenší charakteristickou velikost prvků sítě 1 mm jsem zvolil v krčku a dříku, jemnější hodnota nemá na přesnější výsledek velký vliv a zvyšuje hardwarové nároky. V kulové části jsem zvolil síť o velikosti prvků 2 mm.

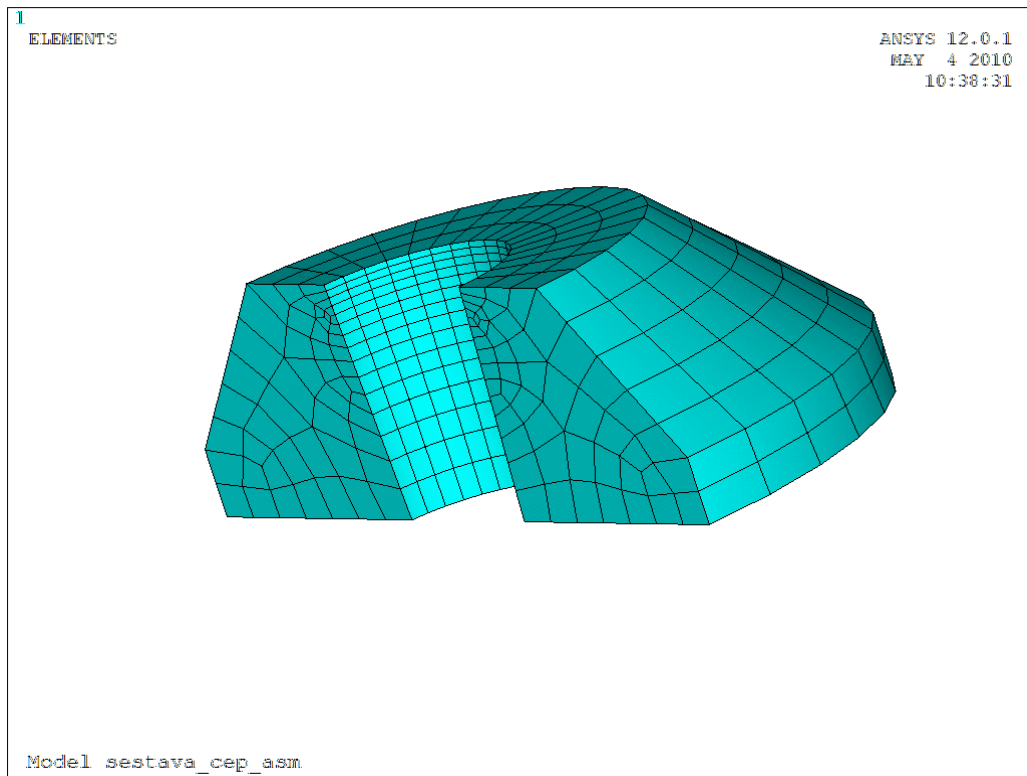
Celý čep je síťován mapovaně. Je to součást, na kterou se zaměřuje analýza napjatosti.



Obr. 6.12 Mapované elementy kulového čepu

Přípravek

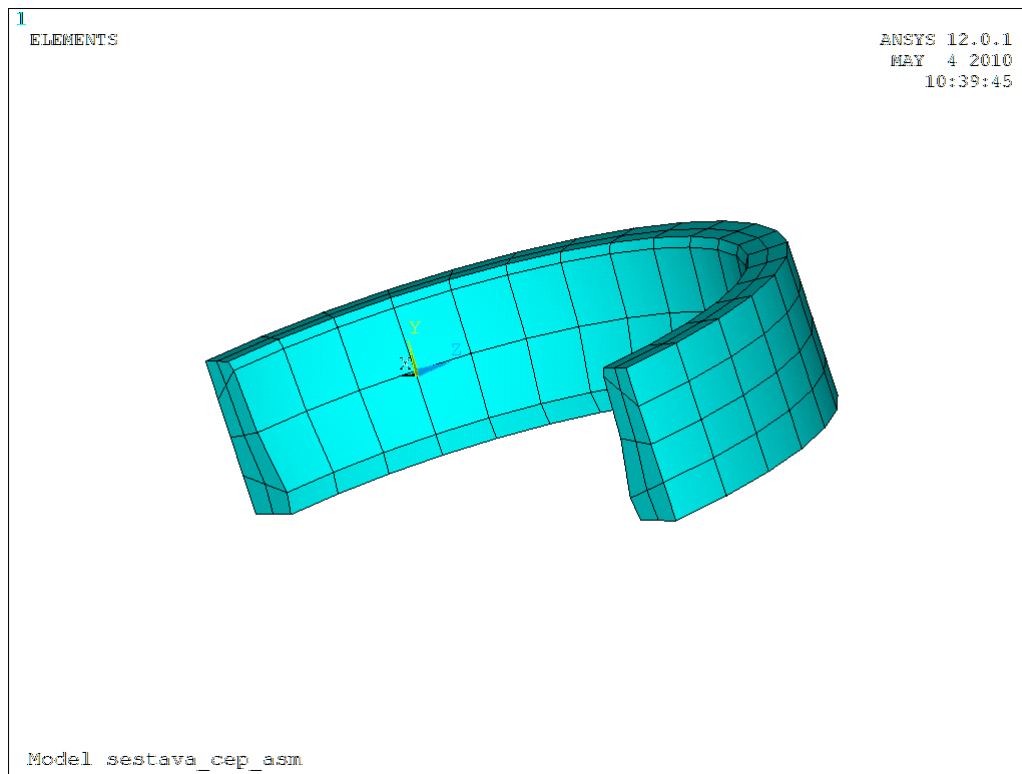
U přípravku jsem zvolil také mapovanou síť, ale velikost prvků má velikost 3 mm. To by, ale nedávalo dostatečně přesné výsledky na hranici uchycení mezi kuželovou částí čepu a přípravkem. V této části jsem proto zvolil jemnější síť, která se zjemňuje k vrchnímu okraji kuželové díry v přípravku obr. 6.13, kde dochází k otláčení.



Obr. 6.13 Zjemněná mapovaná síť přípravku

Spodní pouzdro

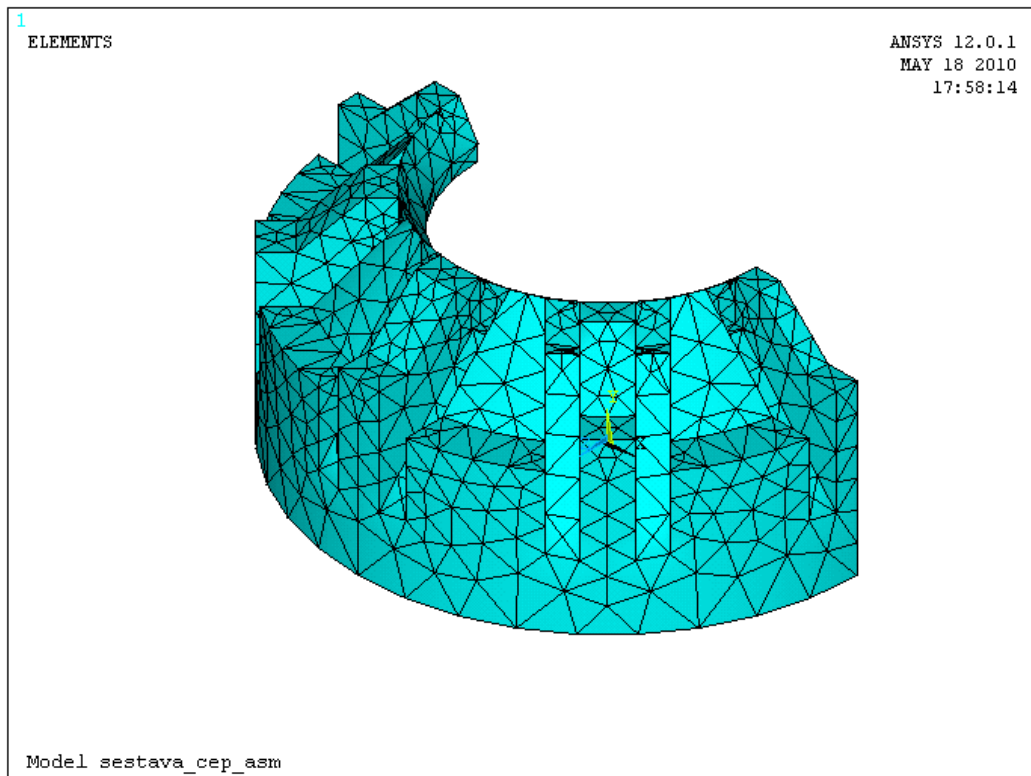
Zde jsem zvolil také mapovanou síť o velikosti prvků 2 mm, z důvodu tvarové nenáročnosti.



Obr. 6.14 Mapovaná síť spodního pouzdra

Vrchní pouzdro

Vrchní pouzdro je už velmi tvarově náročné a mapovaná síť by v tomto případě znamenala velké zjednodušení. Tady je síť volná o velikosti prvků 1,5 mm, obr. 6.15.



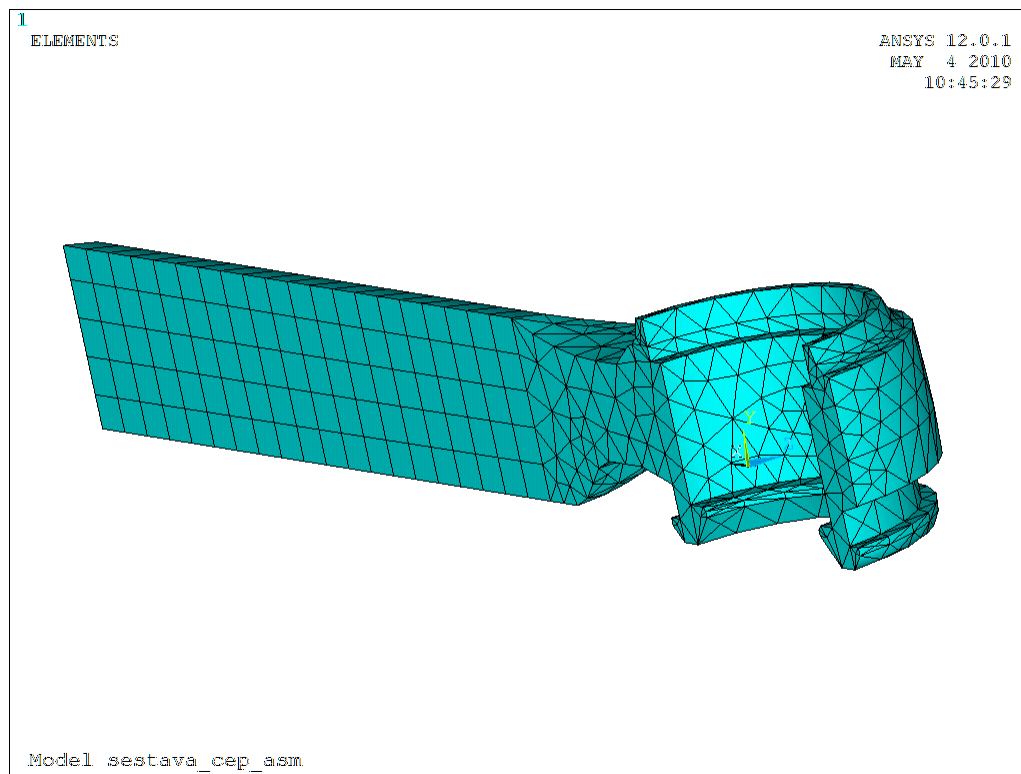
Obr. 6.15 Volná síť vrchního pouzdra

Krytka

Tuto součást jsem síťoval volně o velikosti prvků sítě 3 mm.

Hlavice čepu

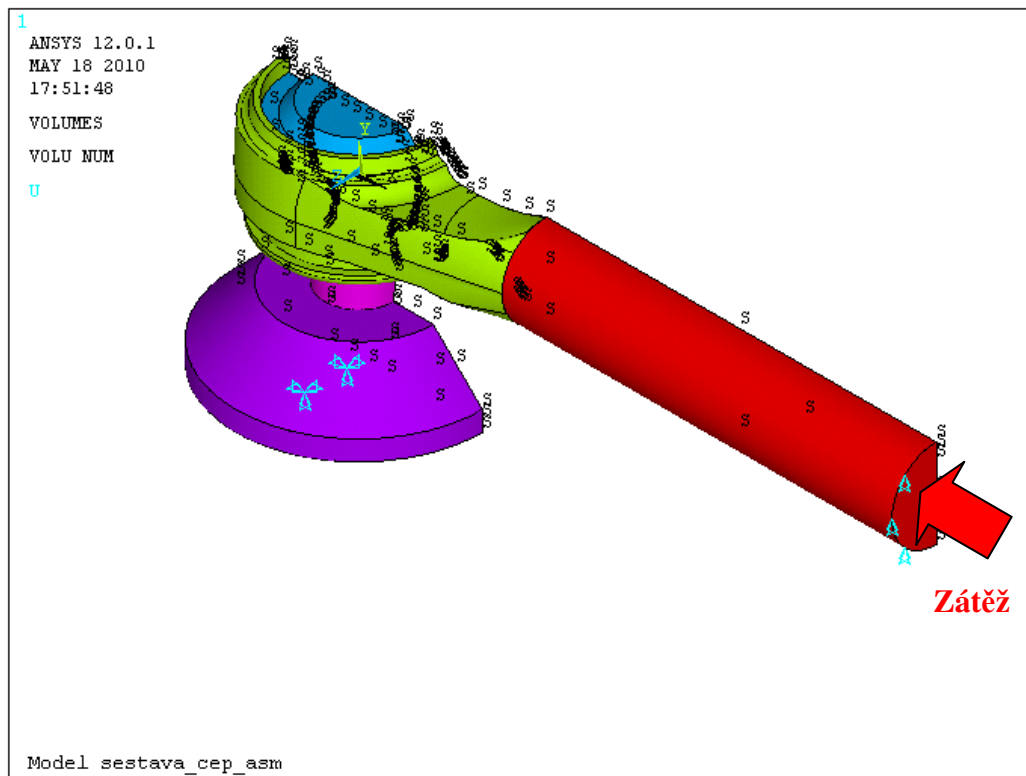
Hlavici čepu jsem rozdělil na dva objemy, které jsou síťované každý jiným způsobem. Koncová úchytná část je jednoduchého tvaru a tedy síťovaná mapovaně o velikosti prvků 4 mm a pouzdro hlavice je opět z důvodu své složitosti síťováno volně o velikosti sítě 4 mm, obr. 6.16.



Obr. 6.16 Síť hlavice čepu

Vazby

Pro uchycení sestavy modelu jsem vycházel z reálných vazeb dané součásti během testu, které jsem modeloval způsoby realizovatelnými v modelovém prostředí. Upnutí přípravku a kulového čepu v přípravku jsem nahradil omezením všech stupňů volnosti (ALL DOF) na spodní plochu, obr. 6.17. Dále jsem podepřel hlavici ve směru osy y (vertikální posuv), kde jsem podepření realizoval na konci úchytné plochy závitové části tyče na čáře okraje válcové plochy v místě řezu, obr. 6.17.



Obr. 6.17 Vazby na modelu

Zátěž

Zátěž jsem volil podle skutečného zatížení při testu. Její velikost je přepočítaná na tlakové zatížení plochy ohraničenou čarou, na které je vazba v ose y, obr. 6.17. Tuto plochu jsem určil z modelu v CAD softwaru Pro/Engineer Wildfire 4.0 a její obsah má hodnotu $127,23 \text{ mm}^2$, na kterou působí zátěž při testu (3,5 kN, 7 kN nebo 8 kN).

Kontaktní místa

Model jsem zhotovil jako model s kontakty. Kontakty jsou:

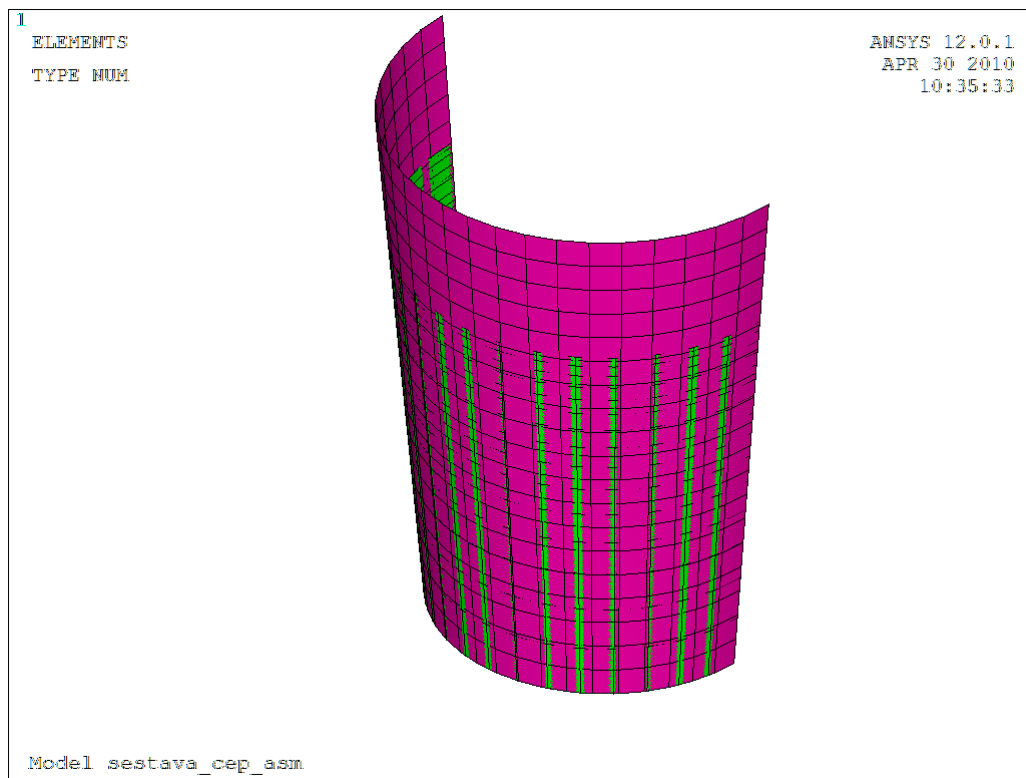
- v místě ukotvení čepu v přípravku,
- mezi spodním pouzdrem a koulí čepu
- mezi vrchním pouzdrem a koulí čepu
- mezi hlavicí a pouzdry
- mezi vrchním a spodním pouzdrem, kde je ještě definován offset vůči sobě (zalisování).

Krytka čepu je u reálné součásti zalisována, v modelu je pomocí funkce GLUE slepená s hlavicí čepu a tvoří jeden celek.

Hodnoty koeficientů tření jsem zvolil na základě podobnosti materiálů z interních podkladů TRW-DAS a.s.

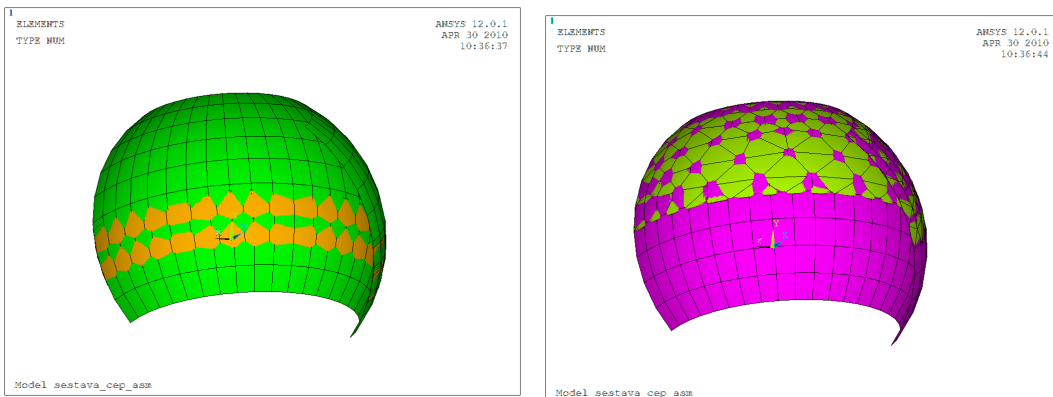
Jednotlivé kontakty jsou zobrazeny níže:

- Kontakt čep a přípravek obr. 6.18
 - Koeficient tření $f = 0,2$ určeno z [15]



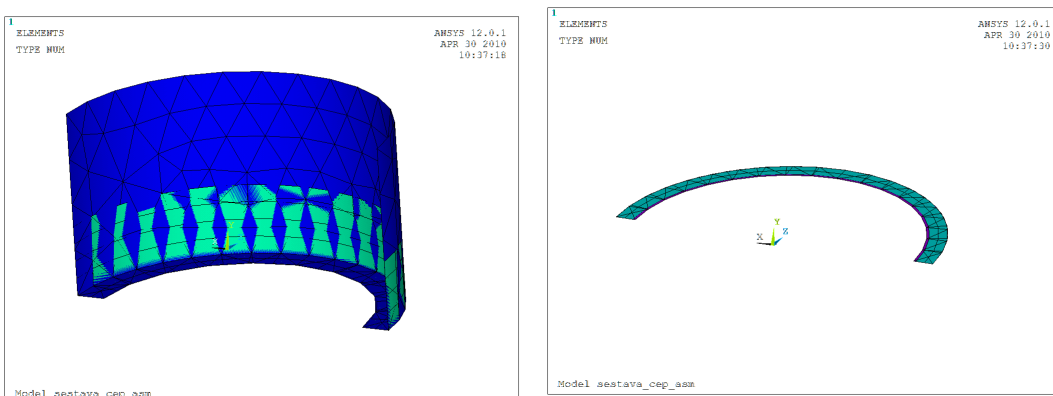
Obr. 6.18 Kontaktní plochy přípravek a čep

- Kontakt kulové plochy čepu s kulovými plochami pouzder
 - Koeficient tření $f = 0,3$ určeno z [18]



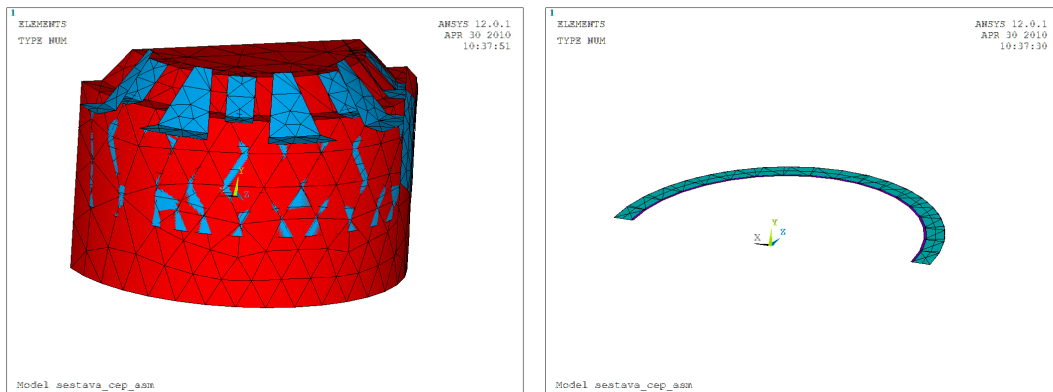
Obr. 6.19 Kontakty koule

- Kontakty spodního pouzdra s hlavicí a vrchním pouzdrém, obr. 6.20
 - Koeficient tření spodní pouzdro - hlavice $f = 0,3$ určeno z [18]
 - Koeficient tření spodní – vrchní pouzdro $f = 0,4$ [18] a offset 0,1 mm



Obr. 6.20 Kontaktní plochy spodní pouzdro

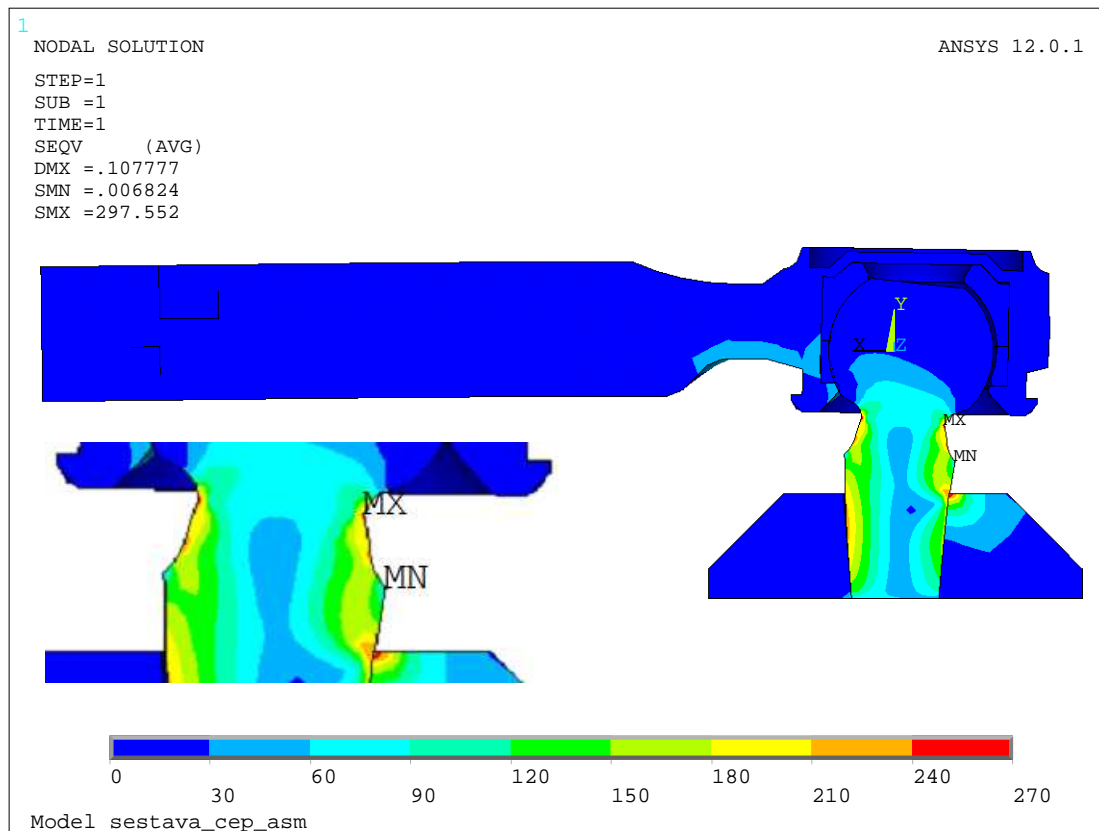
- Kontakty vrchního pouzdra s hlavicí a spodním pouzdrém, obr. 6.21
 - Koeficient tření $f = 0,3$ určeno z [18]



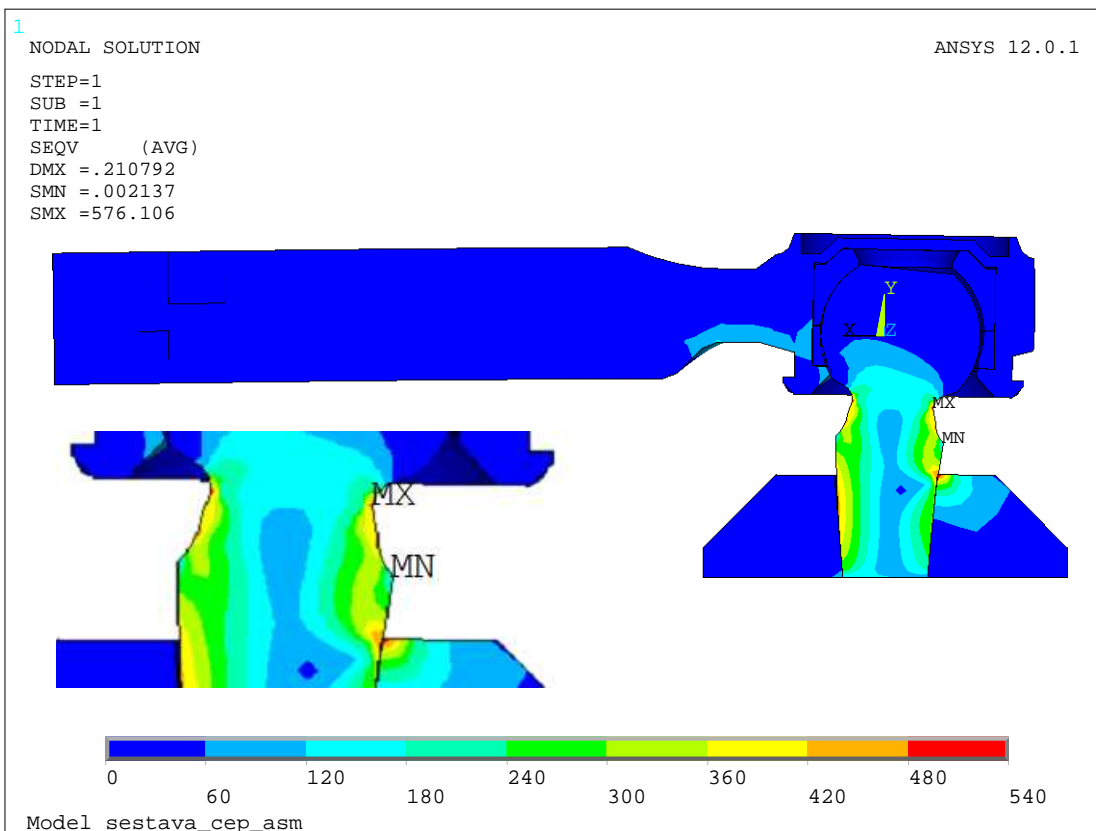
Obr. 6.21 kontaktní plochy vrchní pouzdro

6.3 Výstupy analýzy napjatosti v MKP systému ANSYS

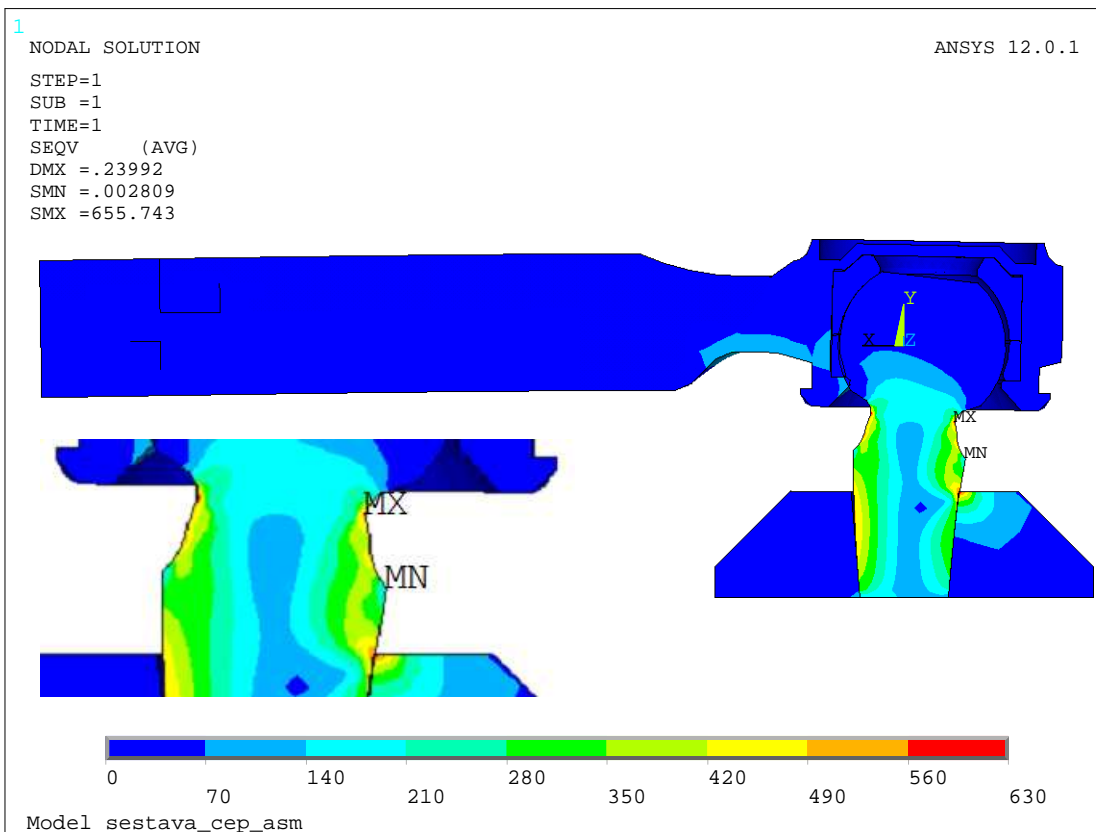
Pro vykreslení výsledků analýzy napjatosti jsem použil zobrazení redukovaných napětí podle hypotézy von Mises stress.



Obr. 6.22 Výsledky analýzy pro zatížení 3,5kN (von Mises stress)



Obr. 6.23 Výsledky analýzy pro zatížení 7kN (von Mises stress)



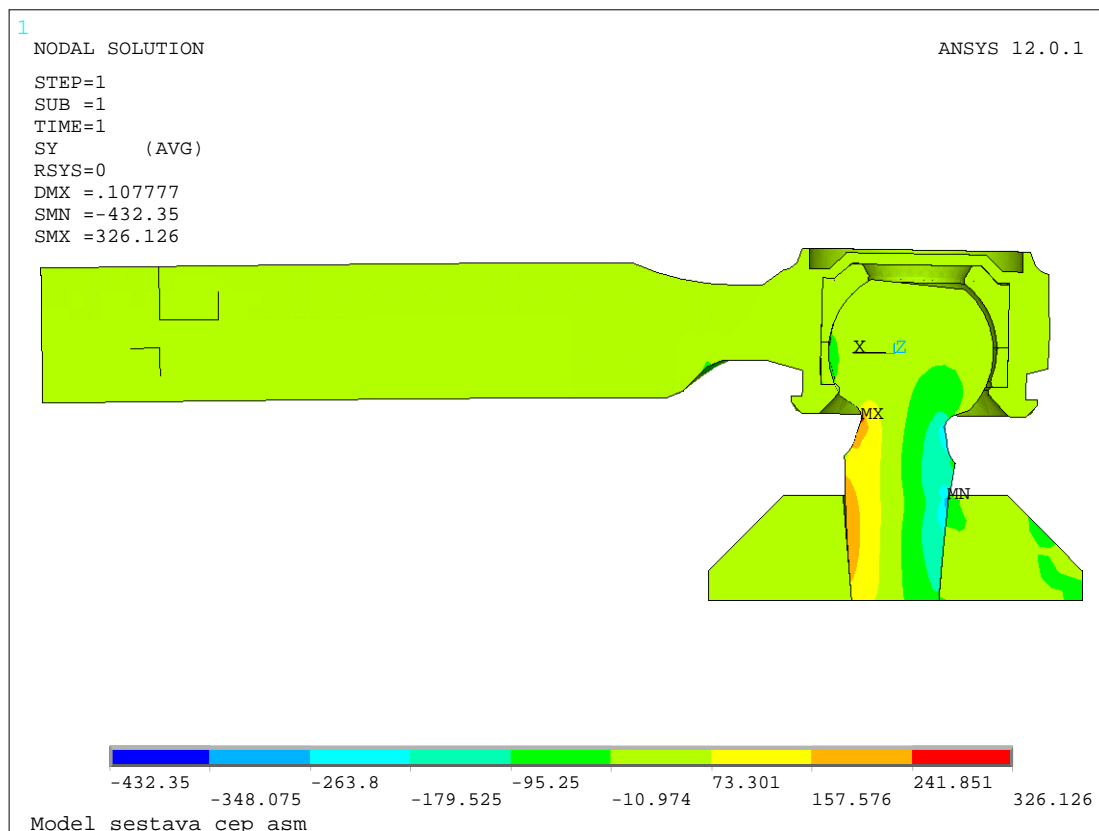
Obr. 6.24 Výsledky analýzy pro zatížení 8kN (von Mises stress)

Maximální redukovaná napětí podle hypotézy HMH (von Mises stress) pro jednotlivá zatížení:

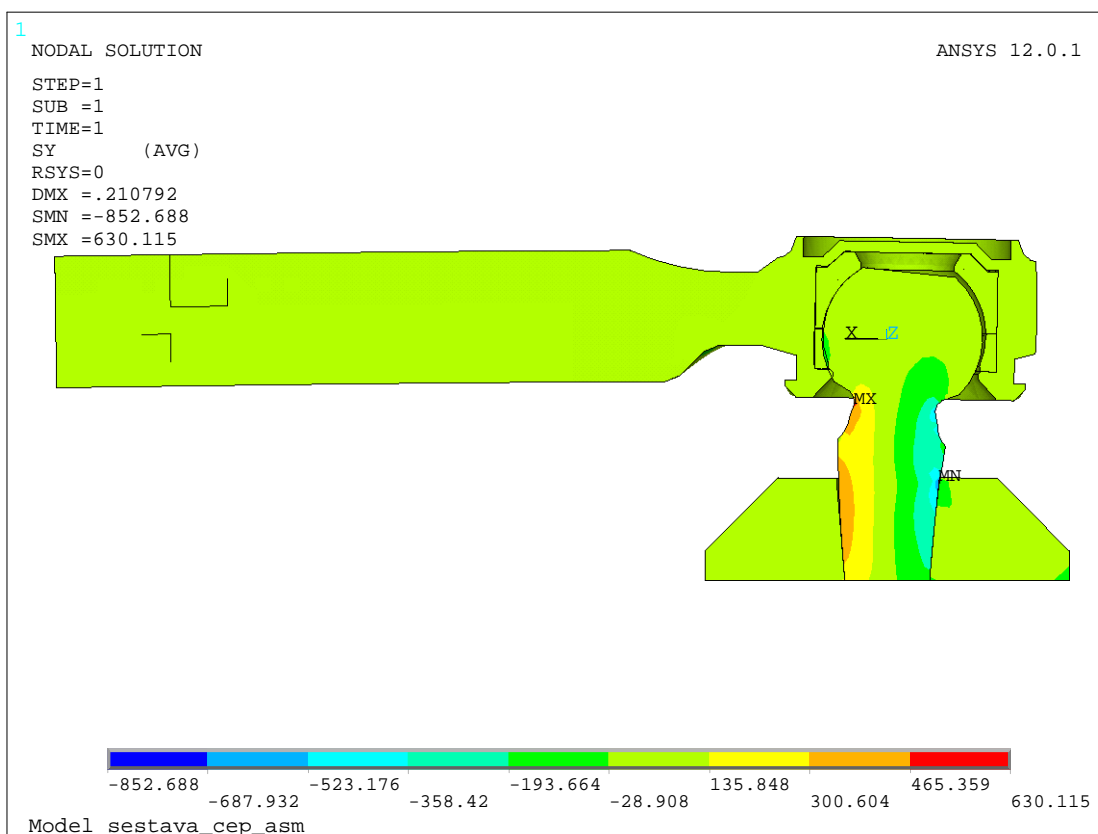
- při zatížení 3,5kN je maximální redukované napětí $\sigma_{red} = 297,552$ MPa,
- při zatížení 7kN je maximální redukované napětí $\sigma_{red} = 576,106$ MPa,
- při zatížení 8kN je maximální redukované napětí $\sigma_{red} = 655,743$ MPa.

Maximální redukované napětí se u všech modelů vyskytuje na hraně kuželového uchycení čepu a kuželové díry přípravku.

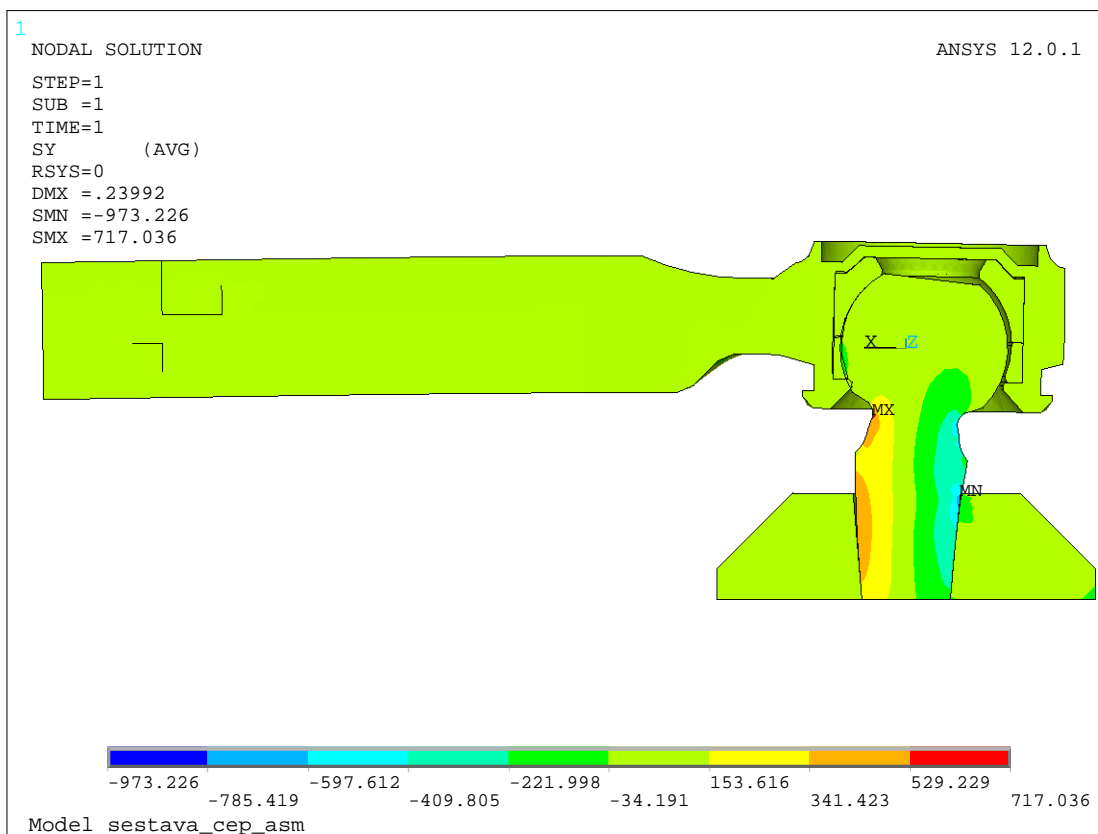
Pro názornost jsem znázornil i výsledky napětí v ose y (vertikální ose).



Obr. 6.25 Výsledky analýzy pro zatížení 3,5kN



Obr. 6.26 Výsledky analýzy pro zatížení 7kN



Obr. 6.27 Výsledky analýzy pro zatížení 8kN

Na těchto výsledcích je možno si všimnout dvou míst maximálního a minimálního napětí, které jsou opět v nejužším místě krčku čepu a na hraně kuželového uchycení čepu. Dále stojí za povšimnutí, že na jedné polovině čepu jsou hodnoty kladné a na druhé záporné. Tedy zde působí tahové a tlakové napětí, jedná se o klasický ohyb.

6.4 Výsledky analýzy napjatosti

Analýza napjatosti v softwaru ANSYS 12.0 jsem provedl pro zjištění míst koncentrací napětí a určení možného místa vzniku trhliny.

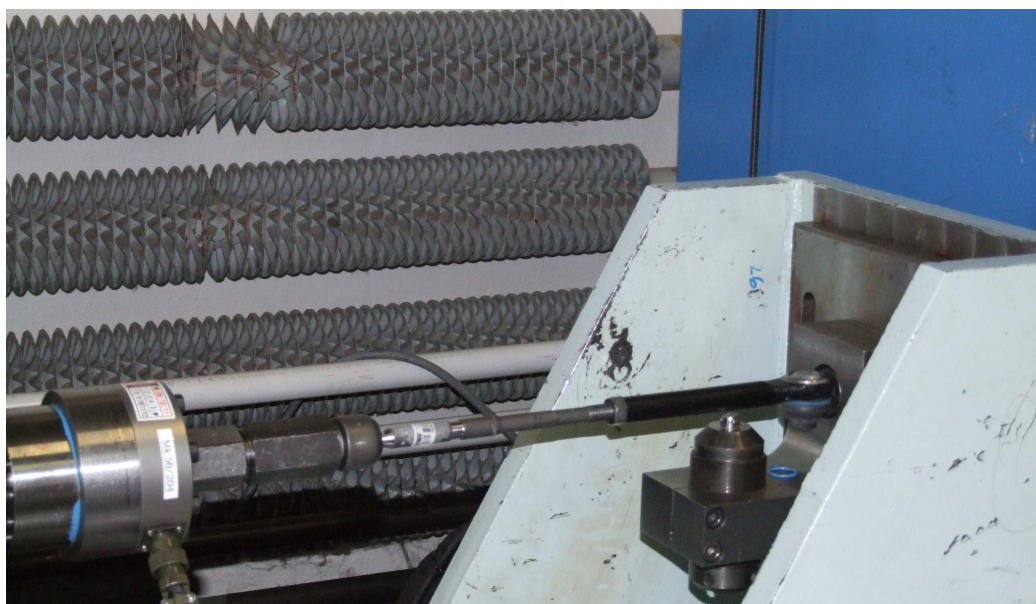
Při přípravě testu je vhodné zjištění zda nedojde vlivem přeměny mechanické energie v kloubu na teplo a k vytavení vnitřních pouzder. Tato problematika je řešena v diplomové práci *Mezní ohřev kulového kloubu při akcelerovaném testu* autora Bc. Ondřeje Kříže a společně s touto prací tvoří základ pro zjištění podmínek během testu.

Z výsledků jsou patrná dvě hlavní místa koncentrace napětí, obě leží na kulovém čepu. Jedno se nachází v nejužším místě krčku čepu a druhé na hraně kuželového uchycení čepu a kuželové díry v přípravku, obr. 6.22 a obr. 6.25. Tato místa koncentrací vychází stejně u všech modelových zatížení. Jak je patrné z výsledků, dochází i k vzniku nezanedbatelného napětí v hlavici čepu, které je způsobeno excentricitou osy kulové části čepu a osy hlavice.

Po skutečné realizaci během testu bylo následně na vzorcích patrné, obr. 6.28, že místa koncentrace napětí z analýzy napjatosti se shodují s místy lomu čepu. Tyto dva lomu vznikaly ve stejných místech nezávisle na velikosti amplitudy a frekvenci síly zatěžující čep.



Obr. 6.28 Prasknutí na hraně kuželového uchycení



Obr. 6.29 Prasknutí v krčku čepu

7. Průběh testu

Test probíhal ve zkušebně firmy TRW-DAS a.s. Vzorek byl dle standardů, podle kterých byly testovány prvotní vzorky, uchycen a zatěžován, obr. 7.1. Ale při testu se vyskytly odchylky, které ovlivnili přesnost výsledků. Byly způsobeny několika možnými faktory, které jsou popsány v dalších kapitolách.



Obr. 7.1 Uchycení vzorku

Z dříve provedených zkoušek byla získána data z testování 12 vzorků. Prvních šest vzorků bylo zatěžováno silou 3,5 kN při frekvenci 12 Hz a dalších šest vzorků silou 6,4 kN frekvencí 10 Hz, tab. 4.

Hodnoty z předchozích testů jsme rozšířili z důvodu ověření funkčnosti softwaru ALTA 7 a následného určení překcelerace a zjištění odchylky přesnosti oproti předchozí zkoušce.

Pro ověření jednotlivých vlivů a funkčnosti softwaru ALTA byly zvoleny tyto hodnoty zatěžování pro zkoušku:

- Zpřesnění výsledků:
 - 3 vzorky: zatížení 5kN při 12Hz
- Postupný vliv překcelerace:
 - 1 vzorek: zatížení 7kN při 8Hz
 - 1 vzorek: zatížení 7kN při 4Hz
 - 3 vzorky: zatížení 7,5kN při 8Hz
- Překcelerování:
 - 2 vzorky: zatížení 8kN při 8Hz

Tyto testy neprobíhaly v uvedeném pořadí, ale postup jednotlivých testů byl způsoben zjištěním faktorů ovlivňujících zkoušku. První testované vzorky byly vzorky zatížené silou 5kN, dále pak 8kN při 8Hz pro prvotní zjištění překcelerace vlivem vysokého zatížení, které bylo zjištěno rozříznutím čepu, obr. 7.2. Následovala zátěž 7 kN pro frekvence 4 Hz a 8 Hz, při které se zjišťoval vliv frekvence na počet cyklů do poruchy. Nakonec se testovali vzorky zatížené silou 7,5 kN pro zjištění postupného vlivu překcelerace.



Obr. 7.2 Řez kulovým čepem

Během zkoušky bylo zkoušeno deset vzorků, u kterých následně vznikl mod porušení (Failure Mode) viz obr. 6.28 a obr. 6.29. V našem případě se jednalo o vznik trhliny s následným lomem. Místa lomu byly popsány v kapitole 6 a výsledky zkoušek tato místa potvrdily. Dále bylo zjištěno, že místa lomu v krčku a kuželovém uchycení čepu vznikaly bez ohledu na zátěž či frekvenci.

7.1 Získané výsledky z testu

Výsledky prvotních zkoušek, ze kterých tyto testy vycházejí, jsou v tab. 4.

zkouška	počet kusů	počet cyklů do poruchy	frekvence zatížení [Hz]	hodnota zatížení [N]
1	1	454584	12	3500
2	1	455864	12	3500
3	1	487332	12	3500
4	1	518279	12	3500
5	1	558007	12	3500
6	1	567971	12	3500
7	1	47999	10	6400
8	1	62314	10	6400
9	1	63509	10	6400
10	1	65536	10	6400
11	1	75070	10	6400
12	1	75725	10	6400

Tab. 4 Prvotní zkoušky

Výsledky získané při následujících zkouškách jsou v tab. 5.

zkouška	počet kusů	počet cyklů do poruchy	frekvence zatížení [Hz]	hodnota zatížení [N]
13	1	169093	12	5000
14	1	183289	12	5000
15	1	172549	12	5000
16	1	39687	4	7000
17	1	37537	8	7000
18	1	28815	8	7500
19	1	23553	8	7500
20	1	24945	8	7500
21	1	20465	8	8000
22	1	18178	8	8000

Tab. 5 Následující zkoušky

7.1.1 Vliv frekvence

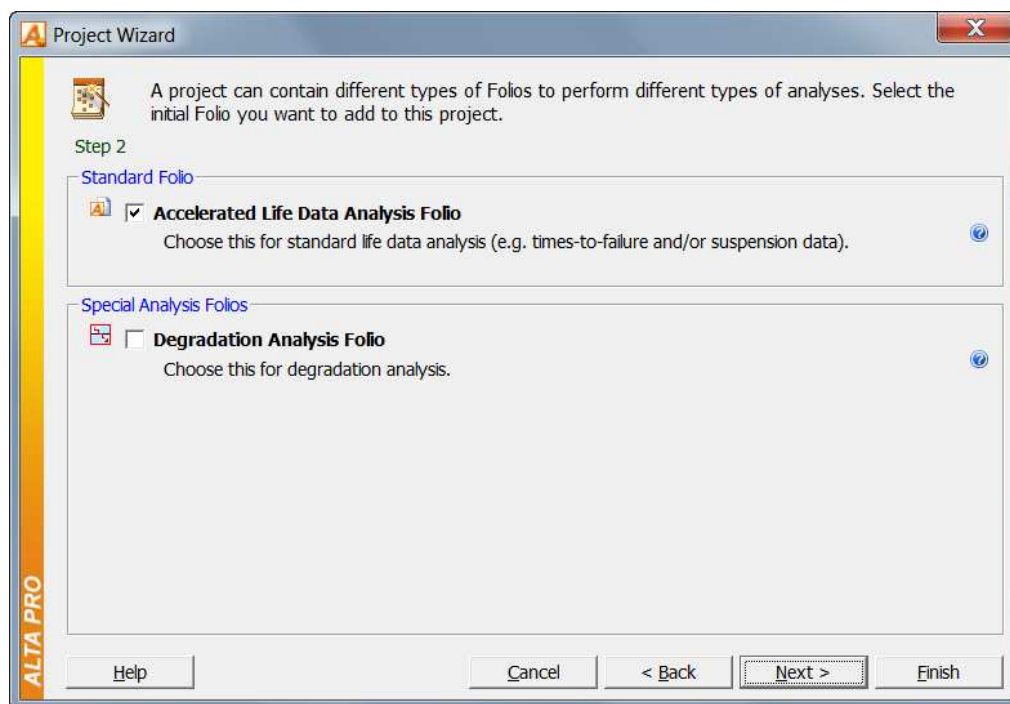
Frekvence ovlivňuje přiváděnou práci přeměněnou na teplo především na vnitřní plastové vložce kulového kloubu, které je produkováno zmíněnou prací účinkem velikosti síly a její frekvence. Jedná se zde o známku přeakcelerace. Jak již bylo uvedeno, touto problematikou se zabývá diplomová práce *Mezní ohřev kulového kloubu při akcelerovaném testu* autora Bc. Ondřeje Kříže.

Z důvodu přeakcelerace (vytavení) jsme následně zvolili hodnotu frekvence na 8 Hz, Při této hodnotě se práce při amplitudě síly 8 kN rovná přibližně práci síly o amplitudě 3,5 kN a 12 Hz.

Ověření bylo provedeno zkouškou s amplitudou síly 7 kN. Z hodnot v tab. 5 je zřetelně vidět, že pro hodnoty zatížení 7 kN a maximální frekvenci při této hodnotě zatížení do 8Hz nemá frekvence na výsledky velký vliv a nedochází důsledkem frekvence k velkému vzniku přeakcelerování nebo nedochází vůbec k žádnému vlivu.

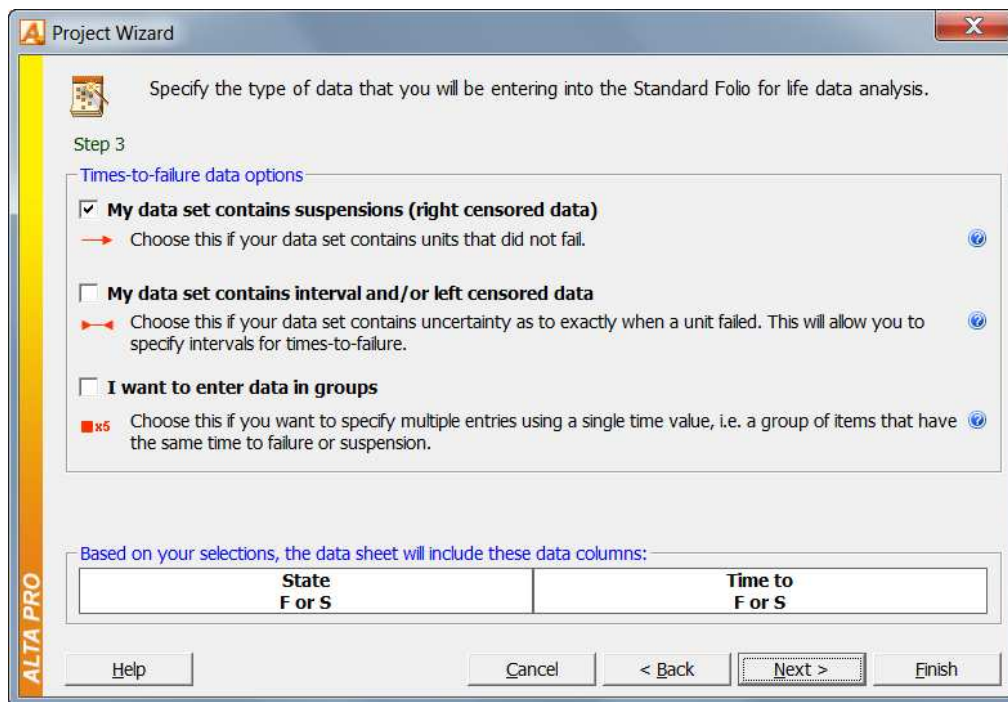
7.2 Vyhodnocení v softwaru ALTA

V uvažovaném případě se jedná o akcelerovaný test. Při zadání testu v softwaru ALTA 7 PRO volím v první nabídce Accelerated Life Data Analysis Folio, obr. 7.3, což znamená, že se jedná o akcelerovanou zkoušku životnosti.



Obr. 7.3 Accelerated life data Analysis Folio

Dalším postupem je volba způsobu testování vzorků v našem případě se jedná o počet cyklů do poruchy (Time to Fail) a zkouška u všech vzorků končí Failure Modem, tedy porušením funkce vzorku (porušení celistvosti – trhлина). Z toho vyplývá, že jde o kompletní data, kdy všechny vzorky končí poruchou, přesněji *right censored data*, obr. 7.4, kde si můžeme zvolit, zda vzorek vydržel nebo ne.



Obr. 7.4 Volba datového souboru

Aby bylo určeno kompletní výpočetní folio (soubor dat vstupujících do výpočtu), musí být zvoleno, jakým druhem zatížením (teplota, mechanické zatížení, vibrace apod.) byly vzorky namáhány. Jak je zmíněno v dřívějších kapitolách, zatěžující veličiny jsou dvě, mechanické zatížení a frekvence, tedy volíme mechanické a vibrační zatížení.

Po zadání způsobu namáhání se již zadávají naměřené hodnoty. Tyto hodnoty nemusí být zadány v pořadí, v jakém byly zkoušky prováděny (budou seřazeny vzestupně).

Pro vyhodnocení jsou zvoleny následující modely z těchto důvodů:

- *General Log-lineární model*
 - jelikož působí více zatěžujících vlivů na vzorek,
 - nejedná se o tepelnou zátěž, ale mechanické zatížení,
 - posledním důvodem volby tohoto modelu je, že Model úměrných rizik (Proportional Hazard model) neobsahuje log-normální rozdělení.
- *Log-lineární rozdělení*
 - používá se pro součásti, které podléhají únavě (je možno použít ještě weibullovo rozdělení. Toto rozdělení je, ale pro tento typ zkoušky méně přesné).

7.2.1 Vliv překcelerace

Překcelerace je nejpodstatnějším a v řadě případů nesnadno odhalitelným jevem při akcelerované zkoušce životnosti. Její vznik závisí na mnoha faktorech, které se mohou i vzájemně kombinovat. Tato situace může nastat, když např. vezmeme do úvahy vliv teploty již akcelerovaného testu.

Budeme nyní vliv překcelerování vztahovat na konkrétní výrobek (vzorek) a to na uvažovaný kulový kloub vozidla. Odhalení překcelerace po nebo před zkouškou je možné jen pokud provedeme jeden zkušební test a překceleraci odhalíme vytavením vložky. Toto je možné při velkém vzniku tepla a viditelném vytavení. Pokud je vytavení pouhým okem neodhalitelné, nastupují laboratorní zkoušky a ty jsou zdoluhavé a drahé. A v mnoha případech se překcelerace neodhalí. Zkreslené výsledky jsou brány jako přesné a navazuje se na ně při dalším plánování.

7.2.1.1 Odhalení překcelerace pomocí softwaru ALTA

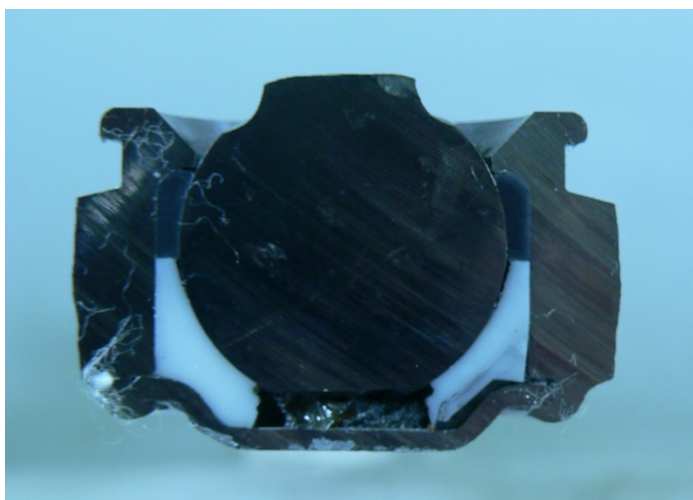
Odhalení překcelerace není v softwaru ALTA přímo definované jako samostatná funkce, ale z výsledků ji lze zjistit.

Určení překcelerace je v softwaru ALTA možno provést pomocí grafického zobrazení. Aby bylo docíleno postupnému vzniku překcelerace, je zvoleno zatěžování v užších intervalech mezi hodnotami překcelerované a pouze akcelerované zkoušky.

Vyhodnocení a následné vykreslení do grafického zobrazení pravděpodobnosti-log-normální velmi zřetelně zobrazí postupné oddalování jednotlivých bodů (vzorků) od proložené křivky. Oddalování směrem doleva, tedy snížení počtů cyklů do poruchy, od křivky znamená postupné překcelerování.

Toto zobrazení může přehledně a bez nutnosti složitých programovacích znalostí zjistit postupný vznik překcelerace při zatížení a může zamezit použití špatných výsledků, které mohou ve svém důsledku znamenat ztrátu času a finančních prostředků.

Pro tuto zkoušku byla volena hodnota síly pro překceleraci testu 8 kN, ale při ověření vytavení a deformací vnitřního pouzdra (překcelerace), obr. 7.5. V tomto případě se jedná o zanedbatelný až žádný vliv překcelerace a zkouška tedy byla správně vyhodnocena jako jako nepřekcelerovaná.



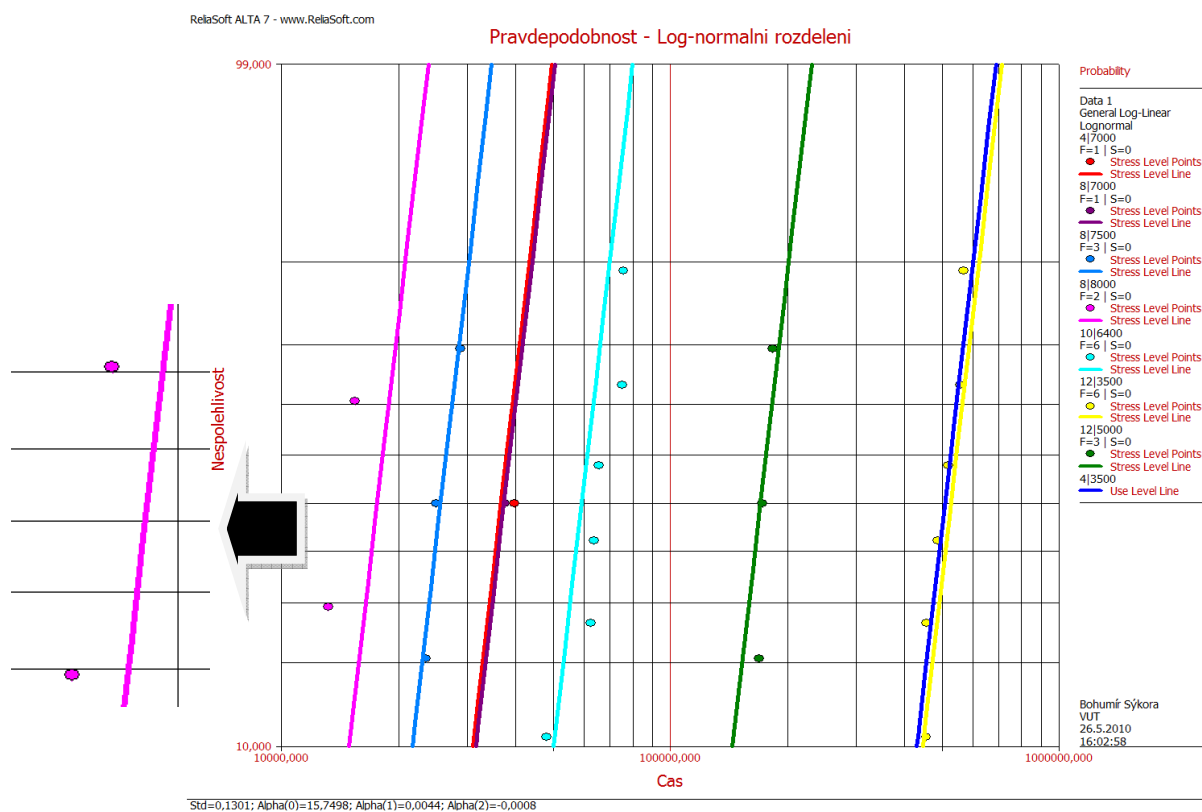
Obr. 7.5 Řez kulovým kloubem

Pro ukázkou překcelerace jsem zvolil příklad, kdy jsem do softwaru ALTA 7 PRO zadal upravené hodnoty pro 8 kN při 8Hz. U těchto hodnot jsem simuloval překceleraci snížením hodnoty počtu cyklů do poruchy o 5000. Ostatní výsledky testů byly zachovány. Následně jsem s těmito hodnotami provedl výpočet.

zkouška	počet kusů	počet cyklů do poruchy	frekvence zatížení [Hz]	hodnota zatížení [N]
21	1	15465	8	8000
22	1	13178	8	8000

Tab. 6 Snížené hodnoty pro překceleraci

Z grafického zobrazení je zřetelně vidět zmíněná překcelerace, obr. 7.6.



Obr. 7.6 Překcelerace

7.2.2 Vliv vedlejších faktorů

Vlivy na vzorek jsou popsány též v kapitole 2.3.

Jak již bylo zmíněno v dřívějších kapitolách, jedná se o navazující zkoušky kulového čepu řízení, které proběhly ve firmě TRW-DAS a.s. Na tyto zkoušky jsme navazovali novými vzorky z jiné výrobní série.

Vlivy:

- Tyto vzorky byly vyrobeny o rok později než předchozí.
- Podobným typ kloubu IBJ, z důvodu nedostatku původních kloubů IBJ
- Dalším faktorem vzniku nepřesností je vliv montáže, která se provádí s roční prodlevou. Tento vliv může zapříčinit jinou zástavbu zkušebního stroje, na kterém se během roční prodlevy prováděly jiné testy.

Tyto vlivy a mnoho dalších způsobuje odchylky v přesnosti a jiné množství cyklů do poruchy prvotních testů. Jak se na závěr výpočtu ukázalo, tento vliv byl zanedbatelný.

7.3 Verifikace experimentem

Pro ověření zjištěných výsledků byly brány hodnoty z dříve, prvotně provedených zkoušek a z navazujících zkoušek byly brány hodnoty pouze pro 5 kN při frekvenci 12 Hz (zpřesnění), tab. 5 zkoušky č. 13 až 15.

Tedy pro první výpočet byly brány hodnoty výše zmíněné, ze kterých byla vypočtena hodnota středního života pro zatížení 8 kN při 8Hz (zkoušky č. 21 a 22). Tato hodnota se brala jako porovnávací i při následujících testech. V druhém výpočtu bylo provedeno zpřesnění přidáním hodnot 7 kN při 8Hz a 4Hz (zkoušky č. 16 a 17). Ve třetím a posledním případě je ještě přidána hodnota 7,5 kN při 8Hz (zkoušky č. 18, 19 a 20). Volbou tří případů jsme simulovali vliv počtu vzorků, které jsou v našem případě ze statistického hlediska nedostačující, ale pro názornost přesnosti softwaru ALTA 7 jsou postačující.

počet kusů	počet cyklů do poruchy	frekvence zatížení [Hz]	hodnota zatížení [N]	
1	454584	12	3500	Data pro prvotní ověření
1	455864	12	3500	
1	487332	12	3500	
1	518279	12	3500	
1	558007	12	3500	
1	567971	12	3500	
1	169093	12	5000	
1	183289	12	5000	
1	172549	12	5000	
1	47999	10	6400	
1	62314	10	6400	
1	63509	10	6400	
1	65536	10	6400	
1	75070	10	6400	
1	75725	10	6400	
1	39687	4	7000	Přidaná data pro druhé přesnější ověření
1	37537	8	7000	
1	28815	8	7500	Přidaná data pro závěrečné ověření
1	23553	8	7500	
1	24945	8	7500	
1	20465	8	8000	Porovnávací data
1	18178	8	8000	

Tab. 7 Data pro jednotlivé ověření

Pro ověření jsem zvolil hledisko střední životnosti, kde je vypočten i interval konfidence. Pro porovnání beru vypočtenou hodnotu (tedy parametr proložené křivky) softwaru ALTA s určitou přesností, kterou procentuálně srovnávám.

Dalším porovnávacím faktorem je životnost B(X) (BX Information), protože firma TRW-DAS a.s. životnost BX používá pro vyhodnocení testů.

Skutečnou hodnotu středního života pro 8 kN při 8Hz jsem určil jako aritmetický průměr dvou naměřených hodnot pro 8 kN při 8Hz.

Skutečná hodnota:

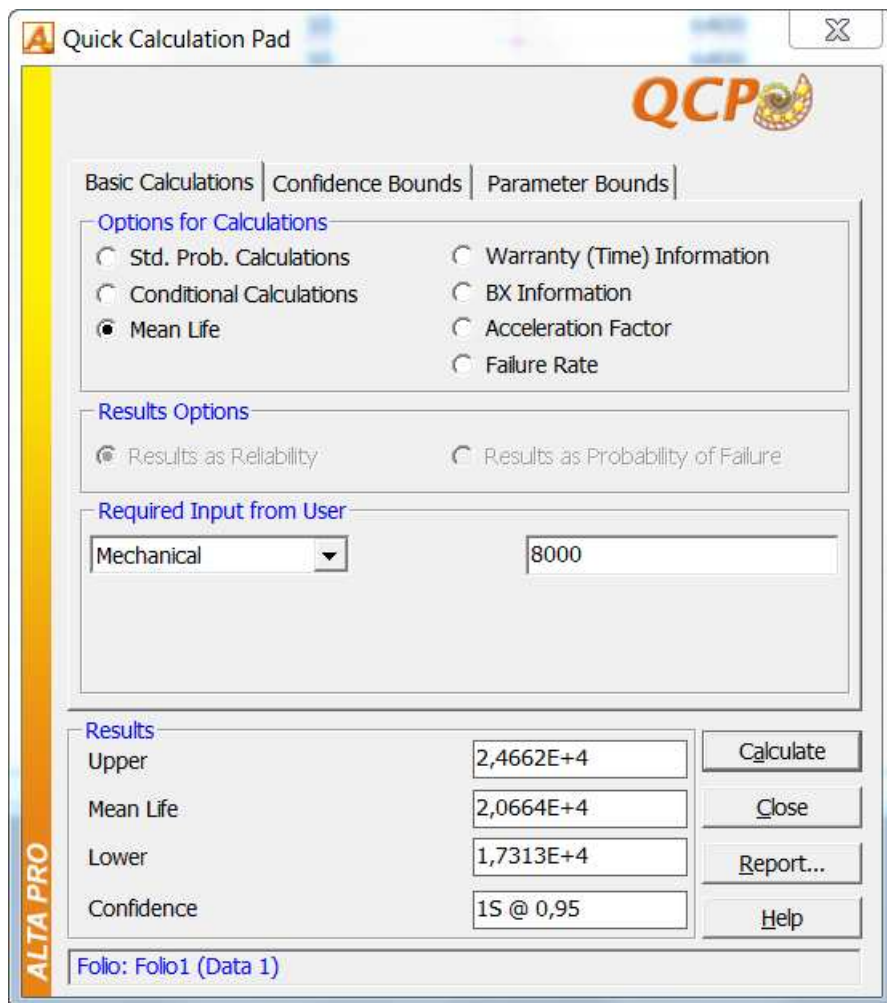
$$N_{SKUT} = \frac{20\,465 + 18\,178}{2} = 19\,321,5 \text{ cyklů do poruchy}$$

Střední životnost (Mean Life)

Hodnoty vstupující do výpočtu:

- úroveň konfidence jsem po konzultaci zvolil 95%,
- amplituda zatěžující síly (mechanické zatížení) 8 kN,
- frekvence zatěžující síly (frekvenční zatížení) 8 Hz,

Pro výpočet jsem použil funkci *Quick Calculation Pad (QCP)*.



Obr. 7.7 Použití panelu QCP pro 8kN při 3,5kN, 5kN a 6,4kN

Střední životnosti činí 20 664 cyklů do poruchy a interval konfidence je:

$$\text{Interval konfidence } \langle 17\,313; 24\,662 \rangle$$

Oba naměřené vzorky svým počtem cyklů do poruchy spadají do intervalu konfidence.

$$20\,465 \in \langle 17\,313; 24\,662 \rangle$$

$$18\,178 \in \langle 17\,313; 24\,662 \rangle$$

Vstupní veličiny pro ověření:

- Skutečná hodnota pro 8 kN při 8Hz: $N_{SKUT} = 19\,321,5$ cyklů do poruchy
- Vypočtená hodnota pro 8 kN při 8Hz: $N_{ALTA} = 20\,664$ cyklů do poruchy

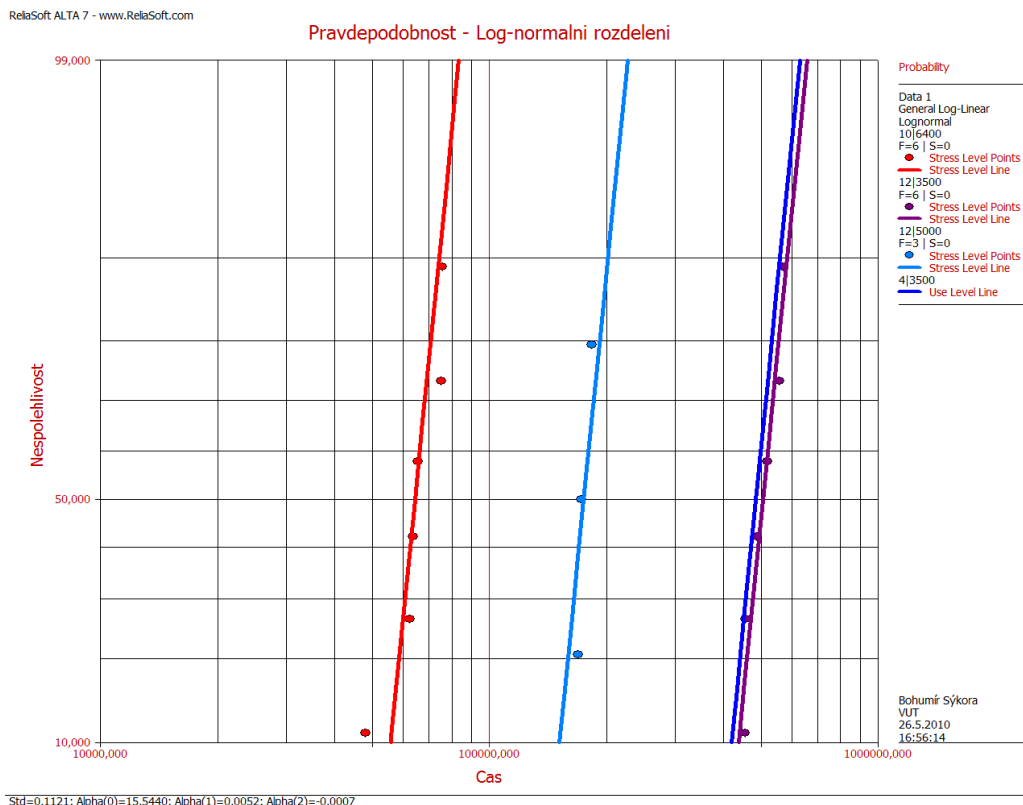
Procentuální odchylka:

$$\Delta = \left| \frac{N_{ALTA} - N_{SKUT}}{N_{SKUT}} \right| \cdot 100$$

$$\Delta = \left| \frac{20\,664 - 19\,321,5}{19\,321,5} \right| \cdot 100$$

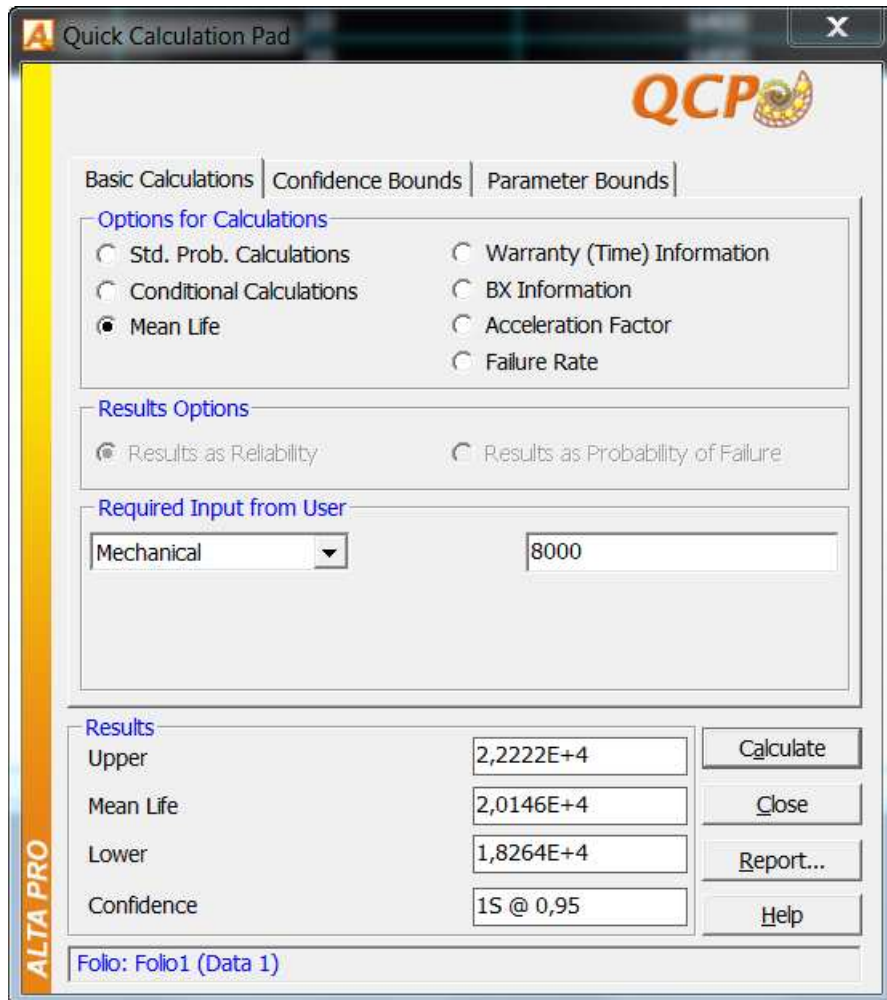
$$\Delta = 6,95\%$$

(33)



Obr. 7.8 Graf Pravděpodobnost - Log-normální rozdělení

Druhý výpočet – rozšířený počet zkoušek:



Obr. 7.9 Výpočetní panel QCP pro 8kN při 3,5kN, 5kN, 6,4kN a 7kN

Hodnota střední životnosti činí 20 146 cyklů do poruchy a interval konfidence:

Interval konfidence $\langle 18\,264; 22\,222 \rangle$

Oba naměřené vzorky svým počtem cyklů do poruchy spadají do intervalu konfidence.

$20\,465 \in \langle 18\,264; 22\,222 \rangle$

$18\,178 \in \langle 18\,264; 22\,222 \rangle$

Vstupní veličiny pro ověření:

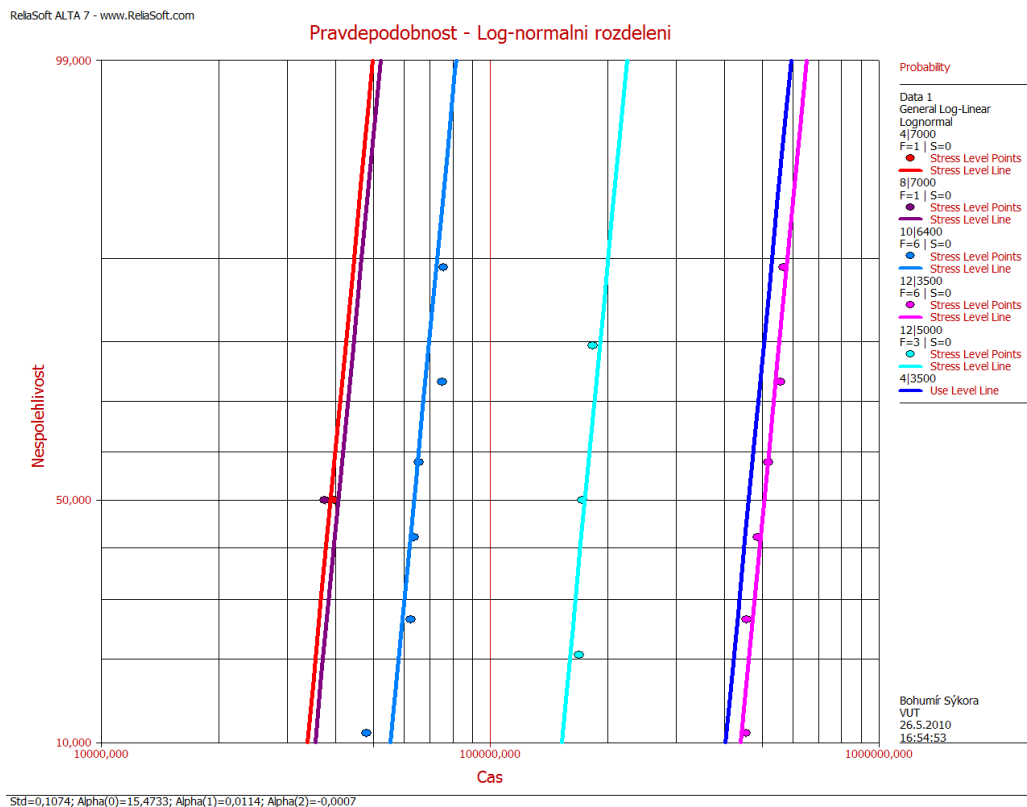
- Skutečná hodnota pro 8 kN při 8Hz: $N_{SKUT} = 19\,321,5$ cyklů do poruchy
- Vypočtená hodnota pro 8 kN při 8Hz: $N_{ALTA} = 20\,146$ cyklů do poruchy

Procentuální odchylka:

$$\Delta = \left| \frac{N_{ALTA} - N_{SKUT}}{N_{SKUT}} \right| \cdot 100$$

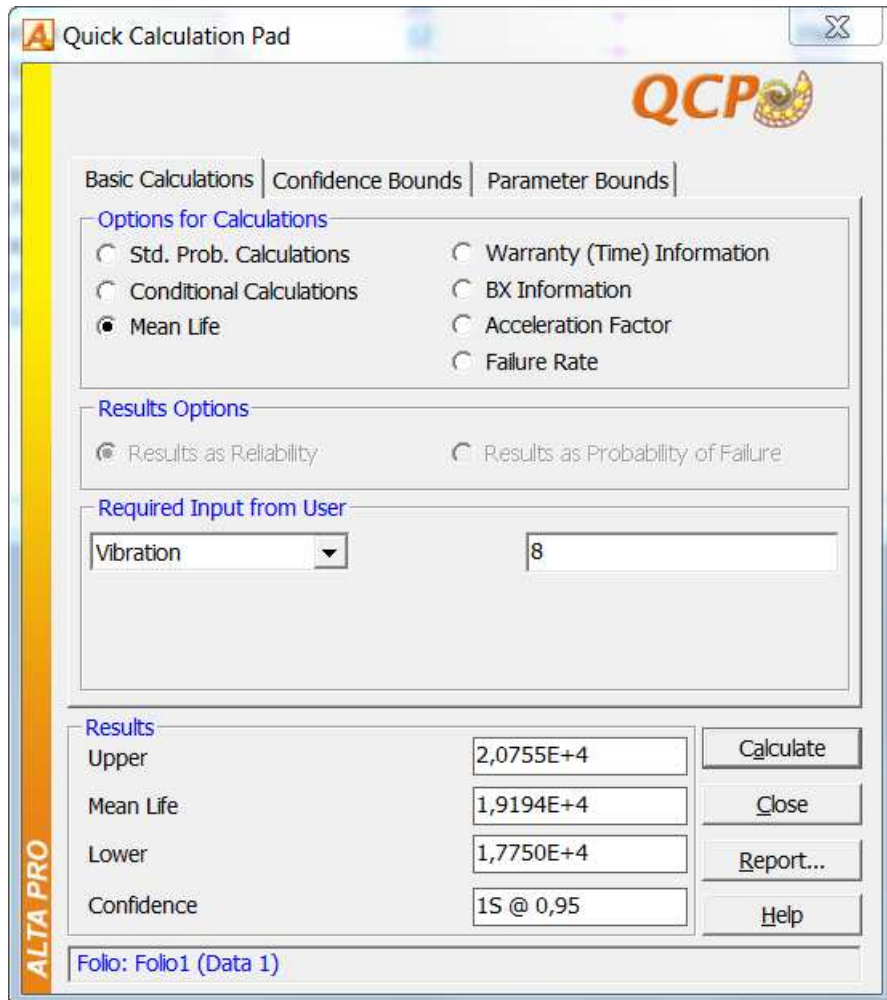
$$\Delta = \left| \frac{20\,146 - 19\,321,5}{19\,321,5} \right| \cdot 100$$

$$\Delta = 4,26\%$$
(34)



Obr. 7.10 Graf Pravděpodobnost - Log-normální rozdělení

Třetí výpočet-zahrnutý všechny zkoušky:



Obr. 7.11 Výpočetní panel QCP pro 8kN při 3,5kN, 5kN, 6,4kN, 7kN a 7,5kN

Hodnota střední životnosti činí 19 194 cyklů do poruchy a interval konfidence:

Interval konfidence $\langle 17\,750; 20\,755 \rangle$

Oba naměřené vzorky svým počtem cyklů do poruchy spadají do intervalu konfidence.

$20\,465 \in \langle 17\,750; 20\,755 \rangle$

$18\,178 \in \langle 17\,750; 20\,755 \rangle$

Vstupní veličiny pro ověření:

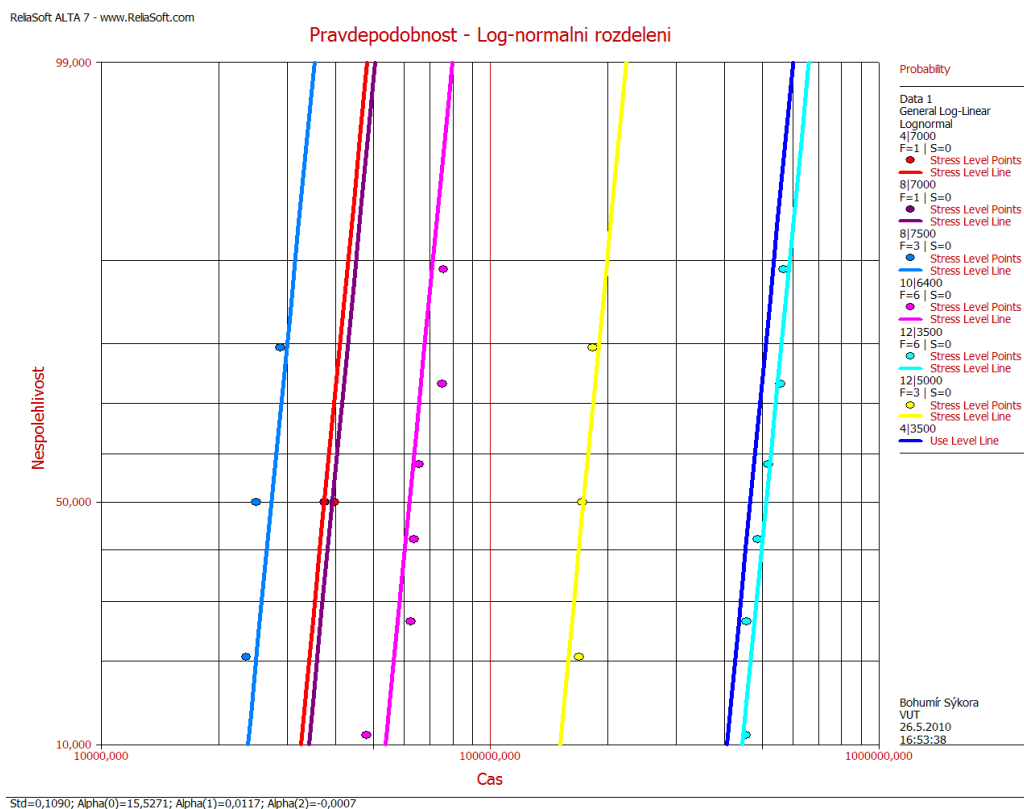
- Skutečná hodnota pro 8 kN při 8Hz: $N_{SKUT} = 19\,321,5$ cyklů do poruchy
- Vypočtená hodnota pro 8 kN při 8Hz: $N_{ALTA} = 19\,194$ cyklů do poruchy

Procentuální odchylka:

$$\Delta = \left| \frac{N_{ALTA} - N_{SKUT}}{N_{SKUT}} \right| \cdot 100$$

$$\Delta = \left| \frac{19\,194 - 19\,321,5}{19\,321,5} \right| \cdot 100 \quad (35)$$

$$\Delta = 0,66\%$$

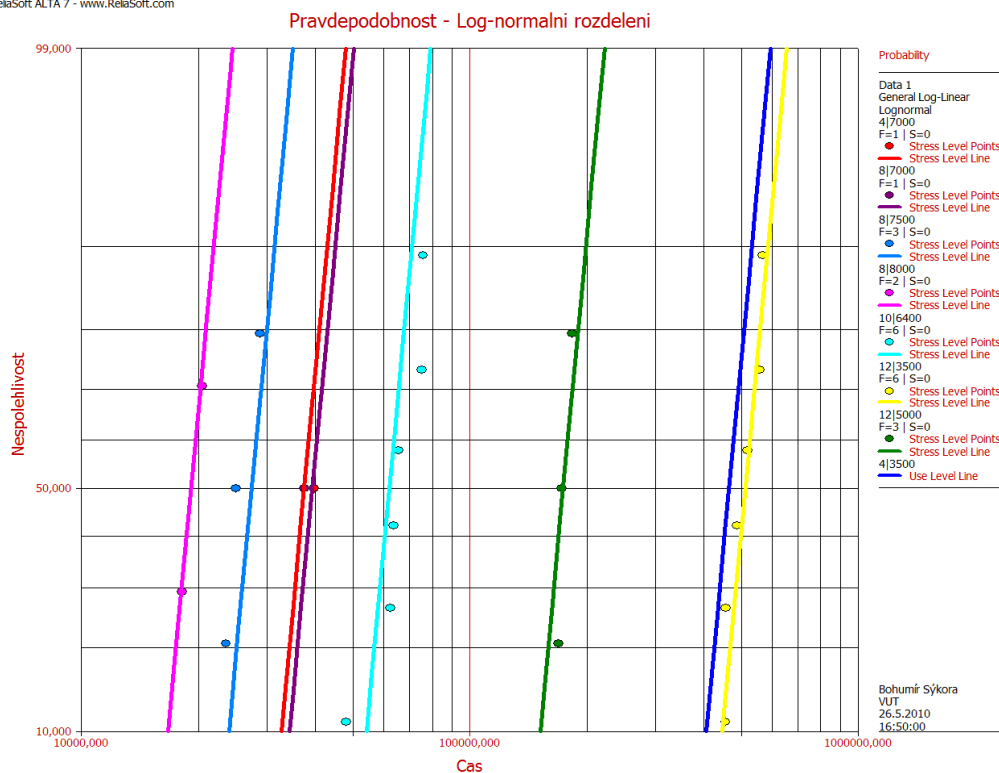


Obr. 7.12 Graf Pravděpodobnost - Log-normální rozdělení

Porovnáním hodnot je zřejmé, že největší odchylka je 6,95 %. Tato odchylka je ze statistického hlediska opravdu poměrně malá a dokazuje přesnost výpočtu softwaru ALTA 7 PRO. ALTA 7 PRO je tedy možno použít pro předpověď a plánování akcelerovaných zkušebních testů a vlivů s nimi spojených

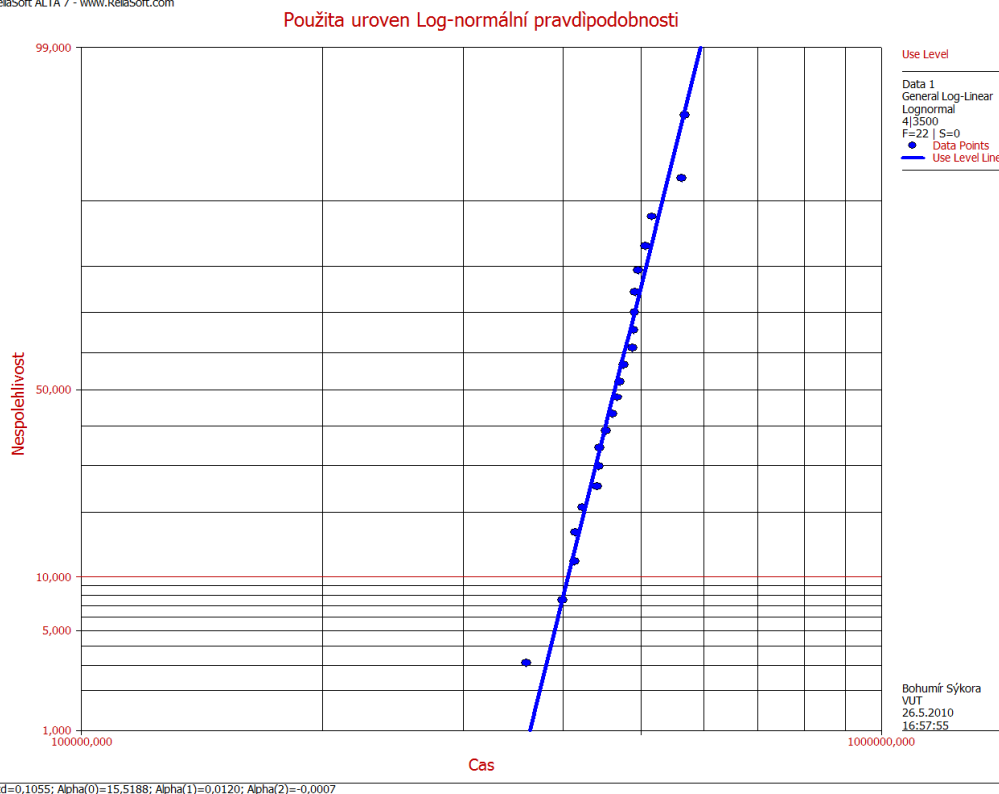
Následuje kompletní zobrazení všech dat pomocí *Pravděpodobnostního – Log-normálního zobrazení a Použité úrovně log-normální pravděpodobnosti.*

ReliaSoft ALTA 7 - www.ReliaSoft.com



Obr. 7-13 Graf Pravděpodobnost - Log-normalní rozdělení se všemi vzorky

ReliaSoft ALTA 7 - www.ReliaSoft.com



Obr. 7.14 Použitá úroveň Log-normalní pravděpodobnosti

Z grafů, ve kterých jsou použita data veškerých testů vzorků, lze vyčíst, že vyhodnocení dat proběhlo s velmi vysokou přesností proložení bodů křivkou a zároveň nám ukazují poměrně malý rozptyl výsledků zkoušek.

Životnost B(X)

Toto porovnání jsem zvolil, protože je to jeden z hlavních požadavků při zkouškách. Pro názornost byly zvoleny úroveň konfidence 95 %. Interval konfidence je tedy ohraničen horní hranicí konfidence *Upper* a dolní hranicí konfidence *Lower* hodnotou.

Postup je stejný jako při řešení střední životnosti.

Hodnoty vstupující do výpočtu:

- úroveň konfidence jsem zvolil 95%,
- amplituda zatěžující síly (mechanické zatížení) 8 kN,
- frekvence zatěžující síly (frekvenční zatížení) 8 Hz.

První případ – původní s skupina měření rozšířena o zkoušky s amplitudou zatěžující síly 8 kN a frekvencí zatížení 12 Hz

Options for Calculations
<input type="radio"/> Std. Prob. Calculations
<input type="radio"/> Conditional Calculations
<input type="radio"/> Mean Life
<input type="radio"/> Warranty (Time) Information
<input checked="" type="radio"/> BX Information
<input type="radio"/> Acceleration Factor
<input type="radio"/> Failure Rate

Results Options
<input checked="" type="radio"/> Results as Reliability
<input type="radio"/> Results as Probability of Failure

Required Input from User	
Mechanical	8000
BX% Information At	10

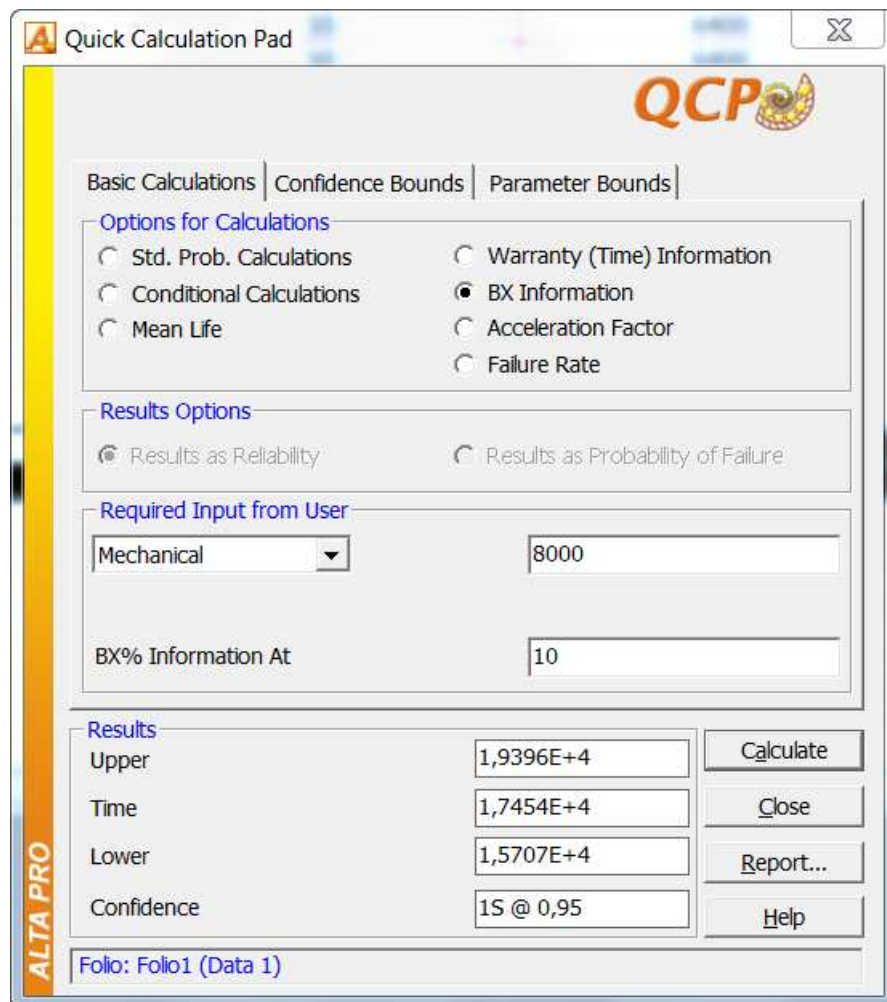
Results	
Upper	2,1338E+4
Time	1,7786E+4
Lower	1,4825E+4
Confidence	1S @ 0,95

Obr. 7.15 Vyhodnocení B(10) pro 8kN při 3,5kN, 5kN a 6,4kN

Výsledky:

- $B(10) = 17\,786$ cyklů

Druhý případ – rozšířená skupina měření:

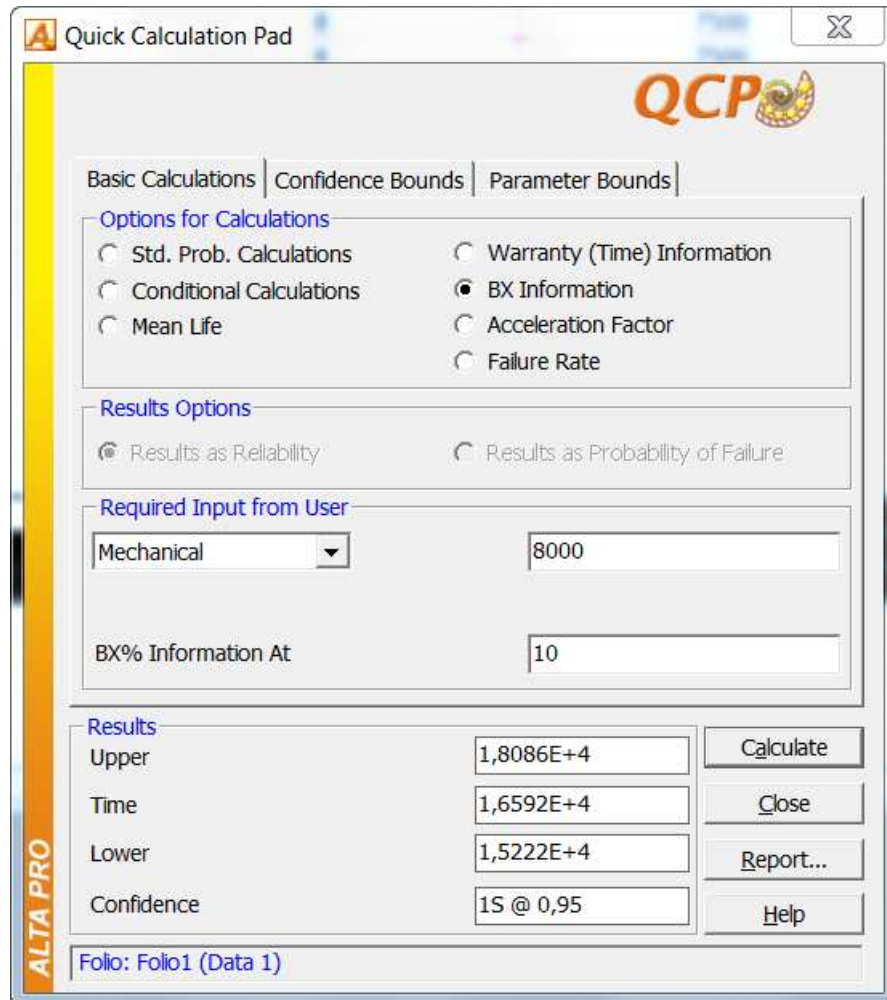


Obr. 7.16 Vyhodnocení $B(10)$ pro 8kN při 3,5kN, 5kN, 6,4kN a 7kN

Výsledky:

- $B(10) = 17\,454$ cyklů

Třetí případ- zahrnuta všechna měření:



Obr. 7.17 Vyhodnocení B(10) pro 8kN při 3,5kN, 5kN, 6,4kN, 7kN a 7,5kN

Výsledky:

- $B(10) = 16\,592$ cyklů

Z výsledků je vidět, že všechny hodnoty mají nižší hodnotu počtu cyklů, než jsme získali ze zkoušky.

7.4 Akcelerační faktor

ALTA 7 má funkci pro určení akceleračního faktoru pro různé hodnoty zatížení. Na tento faktor mají velký vliv počáteční parametry zatěžování, v tomto případě amplituda síly 3,5 kN při frekvenci 4 Hz. Tyto hodnoty byly zvoleny s ohledem na to, že se jedná o nejnižší zadávané hodnoty v testu. Hodnoty z běžného použití kulového kloubu nebyly k dispozici, protože test byl prováděn pro cizího výrobce. Tyto hodnoty pro názornost postačují.

Průběh akceleračního faktoru (AF):

Hodnota zatížení [kN]	Frekvence zatěžování [Hz]	Akcelerační faktor [-]
5	12	2,6734
6,4	12	7,3192
7	8	11,8223
7,5	8	16,9401
8	8	24,2733

Tab. 8 Průběh akceleračního faktoru

Z hodnot akceleračního faktoru zřetelně vidíme postupný nárůst akceleračního faktoru a zároveň postupné klesání času trvání zkoušky a tedy i nákladů s ní spojených.

8. Závěr

Cílem této práce bylo získání přehledu o problematice akceleračních testů životnosti ve spolupráci s firmou TRW-DAS a.s., která touto metodou zvyšuje efektivitu stávajících zkoušek. Pro firmu nebylo prvořadé pouhé sestavení akcelerované zkoušky životnosti, ale i hlubší náhled do problematiky tohoto tématu, který přináší řešerše v úvodu této práce. A v neposlední řadě software ALTA 7, který měla firma zájem vyzkoušet v praktickém užití.

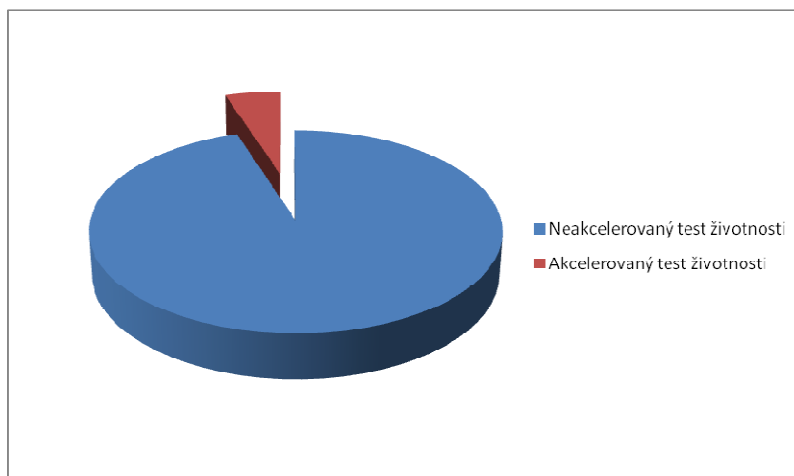
Pro realizaci celé zkoušky jsem provedl analýzu napjatosti pro zjištění rozložení napjatostí a míst koncentrace napětí s následným vznikem trhliny. Pro analýzu napjatosti bylo nutné vytvoření modelů v softwaru Pro/Engineer Wildfire 4.0. Z analýzy napjatosti jsem zjistil místa koncentrace napětí a tedy místa vzniku trhliny. Tato místa vzniku trhliny se nachází v neušším místě krčku čepu a druhé na hraně kuželového uchycení čepu a kuželové díry v přípravku. Místa vzniku trhliny byly verifikací experimentem potvrzeny.

V části pro ověření procentuálních odchylek výsledků softwaru ALTA 7 PRO jsem zvolil zkušební zatížení 8kN při frekvenci 8 Hz, které ověřilo mimo jiné i vhodnost zvoleného modelu a procentuální odchylku od výsledků ze softwaru ALTA 7 PRO. Z důvodu dostupného množství vzorků jsem ověření prováděl ze statistického hlediska s menším počtem vzorků, ale pro zjištění přesnosti výsledku softwaru ALTA 7 PRO byl počet vzorků postačující. Po verifikací experimentem jsem došel k závěru, že software ALTA 7 PRO poskytuje výsledky s poměrně velmi malou procentuální odchylkou, která se v posuzovaném případě pohybovala do 7%.

Pokud se srovnají délka trvání zkoušky životnosti a akcelerované zkoušky životnosti, je akcelerovaná zkouška při amplitudě síly 7 kN a frekvenci 8 Hz oproti zkoušce při 3,5kN a 12Hz kratší o 10,4 hodin. Při amplitudě síly 8 kN při frekvenci 8 Hz akcelerované zkoušky je zkrácení o 11,08 hodin. To je při běžném trvání zkoušky 11,7 hodin nezanedbatelná hodnota a tedy i více než 90% úspora času.

Časové úspory využití stroje znamenají v důsledku kratšího trvání jedné zkoušky možnost provedení většího počtu zkoušek na zkušebním stroji a tedy vyšší využití. Z ekonomického hlediska bude návratnost financí z jeho nákupu přibližně o 90 % rychlejší.

Získané závěry naznačují, že akcelerované zkoušky jsou trendem ve zkušebnictví, stejně jako software řešící tuto problematiku též.



Obr. 8.1 Časové srovnání akcelerované a neakcelerované zkoušky životnosti v hodinách

9. Seznam použitých zdrojů

- [1] DODSON, B. L., SCHWAB, H. L. *Accelerated Testing. A Practitioner's Guide to Accelerated and Reliability Testing*. SAE International 2006.
- [2] KLYATIS, L. M. *The Strategy of Accelerated Reliability Testing Development for Car Components*. SAE International 2000.
- [3] *Accelerated Life Testing Analysis* [online]. 2007. USA : ReliaSoft, 2007. Dostupné z WWW: <http://www.weibull.com/>
- [4] JANÍČEK, P., ONDRÁČEK, E., VRBKA, J. *Pružnost a pevnost I*, VUT Brno 1992.
- [5] JAN, Z.-VÉMOLA, A.-ŽĎÁNSKÝ, B.: *Automobily – podvozek a převodová ústrojí*, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno 2003, ISBN 80-7204-262-9
- [6] NOVÁK, J., *Návrh uložení hydraulického válce zkušebního zařízení kulových kloubů*, Brno: VUT, 2009
- [7] Jiráček, J., Havlíček, S., Rozsivalová, Z.: *Diagnostika a zkušebnictví. Elektronické texty*, Brno 2002.
- [8] VASSILIOU, Pantelis. *Understanding Accelerated Life-Testing Analysis : Pantelis Vassiliou and Adamantios Mettas* [online]. Tucson : ReliaSoft, 2003. Dostupné z WWW: <ftp://ftp.estec.esa.nl/pub3/tosqq/qq/RAMS2003ConferenceTutorial/Tutorials/2Dnotes.pdf>.
- [9] [Http://www.trwczech.cz/dacice](http://www.trwczech.cz/dacice) [online]. 13.5:2010. TRW-DAS a.s. Dostupné z WWW: http://www.trwauto.cz/02_index.html.
- [10] [Http://www.proform.ch/](http://www.proform.ch/) [online]. 2009. Materialen-elastomere. Dostupné z WWW: http://www.proform.ch/de/m_vg.htm.
- [11] Studijní podklady VUT v Brně 2009 předmětu *QDS - Spolehlivost dopravních strojů a zařízení*, autor prof. Ing. Zdeněk Vintr, CSc.
- [12] SONSINO, C.M. *LIGHT-WEIGHT DESIGN CHANCES USING HIGH-STRENGTH STEELS* [online]. Darmstadt/Germany : LBF, 2005. Dostupné z WWW: <http://www.msm.cam.ac.uk/phasetrans/2005/LINK/171.pdf>.
- [13] *Technisches Datenblatt von: Polyamid (POM)* [online]. Austria : Werner Winkler GmbH, 2007. Dostupné z WWW: http://www.acrylglastechnik.at/Datenblatt/Db_POM.pdf.
- [14] KOHNKE, P. ANSYS Theory Reference. Release 5.7, ANSYS Inc., 1999.

- [15] LEINVEBER,J.-ŘASA,,J-VÁVRA,P: *Strojnické tabulky*, SCIENTIA spol. s.r.o , Brno 2000, ISBN 80-7183-164-6
- [16] Help ALTA 7 PRO, ReliaSoft Corporation, USA
- [17] *Výkresová dokumentace* TRW-DAS a.s., TRW-DAS a.s., 2009
- [18] *Low wear low friction* [online]. USA : Dupont, 2010. Dostupné z WWW: <plastics.dupont.com/plastics/pdflit/europe/delrin/DELLWLFe.pdf>.

10. Seznam obrázků

- Obr. 1.1** Akcelerovaná zkouška
- Obr. 2.1** Typický zátěžový rozsah pro testované komponenty
- Obr. 2.2** Model namáhání časově nezávislého (konstantního)
- Obr. 2.2** Model přírůstkového (skokového) namáhání
- Obr. 2.3** Model rostoucího namáhání
- Obr. 2.5** Model progresivního modelu namáhání
- Obr. 2.6** Model úplně časově závislého namáhání
- Obr. 2.7** Kompletní a cenzurovaná data z testu [weibull.com.]
- Obr. 2.8** Malé množství dat (vzorků)
- Obr. 2.9** Testování dvou (více) úrovní zatížení
- Obr. 2.10** Lineární degradace
- Obr. 3.1** Návod v softwaru ALTA 7 PRO
- Obr. 3.2** Time to Failure options
- Obr. 3.3** Výběr zátěže
- Obr. 3.4** Prostředí ALTA
- Obr. 3.5** Možnosti měřítka
- Obr. 3.6** Akcelerační faktor pro 400N
- Obr. 3.7** Volby výpočtu
- Obr. 3.8** Quick Calculation Pad
- Obr. 3.9** Volby výsledků
- Obr. 3.10** Volby úrovně confidence
- Obr. 3.11** Vykreslení více grafů současně
- Obr. 3.12** Grafická úprava
- Obr. 4.1** Náprava McPherson
- Obr. 4.2** Pozice kulového kloubu v řízení
- Obr. 4.3** Kulový kloub OBJ
- Obr. 4.4** Kulový kloub IBJ
- Obr. 5.1** 3D model kulového čepu
- Obr. 5.2** 3D model vrchního pouzdra
- Obr. 5.4** 3D model spodního pouzdra
- Obr. 5.5** 3D model hlavice
- Obr. 5.6** 3D model krycího víka
- Obr. 5.7** Přípravek pro uchycení kulového čepu při zkoušce
- Obr. 5.8** Přípravek použitý při zkoušce
- Obr. 6.1** Zjednodušený model kulového čepu
- Obr. 6.2** Zjednodušený model spodního pouzdra

- Obr. 6.3** Zjednodušený model vrchního pouzdra
- Obr. 6.4** Zjednodušená hlavice kulového čepu
- Obr. 6.5** Zjednodušený model krytky kulového čepu
- Obr. 6.6** Zjednodušený model přípravku
- Obr. 6.7** Test vzorku
- Obr. 6.8** SOLID 187
- Obr. 6.9** SOLID 186
- Obr. 6.10** Koncový model
- Obr. 6.11** Vysíťovaný model
- Obr. 6.12** Mapované elementy kulového čepu
- Obr. 6.13** Zjemněná mapovaná síť přípravku
- Obr. 6.14** Mapovaná síť spodního pouzdra
- Obr. 6.15** Volná síť vrchního pouzdra
- Obr. 6.16** Síť hlavice čepu
- Obr. 6.17** Vazby na modelu
- Obr. 6.18** Kontaktní plochy přípravek a čep
- Obr. 6.19** Kontakty koule
- Obr. 6.20** Kontaktní plochy spodní pouzdro
- Obr. 6.21** kontaktní plochy vrchní pouzdro
- Obr. 6.22** Výsledky analýzy pro zatížení 3,5kN (von Mises stress)
- Obr. 6.23** Výsledky analýzy pro zatížení 7kN (von Mises stress)
- Obr. 6.24** Výsledky analýzy pro zatížení 8kN (von Mises stress)
- Obr. 6.25** Výsledky analýzy pro zatížení 3,5kN
- Obr. 6.26** Výsledky analýzy pro zatížení 7kN
- Obr. 6.27** Výsledky analýzy pro zatížení 8kN
- Obr. 6.28** Prasknutí na hraně kuželového uchycení
- Obr. 6.29** Prasknutí v krčku čepu
- Obr. 7.1** Uchycení vzorku
- Obr. 7.2** Řez kulovým čepem
- Obr. 7.3** Accelerated life data Analysis Folio
- Obr. 7.4** Volba datového souboru
- Obr. 7.5** Řez kulovým kloubem
- Obr. 7.6** Překcelerace
- Obr. 7.7** Použití panelu QCP pro 8kN při 3,5kN, 5kN a 6,4kN
- Obr. 7.8** Graf Pravděpodobnost - Log-normální rozdělení
- Obr. 7.9** Použití panelu QCP pro 8kN při 3,5kN, 5kN, 6,4kN a 7kN
- Obr. 7.10** Graf Pravděpodobnost - Log-normální rozdělení
- Obr. 7.11** Použití panelu QCP pro 8kN při 3,5kN, 5kN, 6,4kN, 7kN a 7,5kN
- Obr. 7.12** Graf Pravděpodobnost - Log-normální rozdělení
- Obr. 7.13** Graf Pravděpodobnost - Log-normální rozdělení se všemi vzorky
- Obr. 7.14** Použitá úroveň Log-normální pravděpodobnosti
- Obr. 7.15** Vyhodnocení B(10) pro 8kN při 3,5kN, 5kN a 6,4kN
- Obr. 7.16** Vyhodnocení B(10) pro 8kN při 3,5kN, 5kN, 6,4kN a 7kN
- Obr. 7.17** Vyhodnocení B(10) pro 8kN při 3,5kN, 5kN, 6,4kN, 7kN a 7,5kN
- Obr. 8.1** Časové srovnání akcelerované a neakcelerované zkoušky životnosti v hodinách

Tabulky:

- Tab. 1** Nejběžnější životní distribuce
Tab. 2 Data pro degradační test
Tab. 3 Degradační modely
Tab. 4 Prvotní zkouška
Tab. 5 Následující zkouška
Tab. 6 Snížené hodnoty pro překceleraci
Tab. 7 Data pro jednotlivé ověření
Tab. 8 Průběh akceleračního faktoru

11. Použité označení veličin

A	netepelná konstanta	
A_F	akcelerační faktor	[-]
b	parametr modelu	[-]
B	parametrů modelu	[-]
C	parametr modelu	[-]
E_A	aktivační energie	
$f_0(t)$	pdf (hustotu pravděpodobnosti) při běžných podmínkách	[%]
$h_0(t)$	Intenzita náhodného jevu (Hazard Function) při běžných provozních podmínkách	[%]
k	koeficient bezpečnosti	[-]
K	parametr modelu	[-]
L	parametr reprezentující střední životnost, charakteristickou životnost, medián nebo B(x)	
$L_{\text{Accelerated}}$	zatížení při standardní funkci součásti	
L_{USE}	zatížení při akcelerovaném testu	
m	počet zatížení souvisejících s náhodnou proměnou (časově nezávislý)	[-]
n	počet vzorků degradačního modelu	[-]
N	další modelový parametr	[-]
N	počet cyklů, kterými bylo těleso již zatíženo	[-]
N_A	vypočtený počet cyklů	[-]
N_f	požadovaný počet cyklů pro životnost součástky	[-]
N_{SKUT}	skutečný počet cyklů	[-]
R	rychlost odezvy	
$R_0(t)$	spolehlivostní funkce při běžných provozních podmínkách	[%]
t	čas zkoušky	[s]
t_{ZR}	čas zrychlené zkoušky	[s]
t_f	požadovaná doba pro životnost součástky	[s]
t_0	čas do selhání součásti	[s]
t_e	čas selhání nebo čas zvýšení zátěžové charakteristiky	[s]
T	absolutní teplota	[K]
U	netepelné zatížení	
V	parametr reprezentující úroveň zatížení	[K]
x	vstupní parametr degradačního modelu	

\mathbf{x}	střední kvadratická odchylka	[-]
$\overline{\mathbf{X}}$	vektor \mathbf{n} zatížení	[-]
y	vstupní parametr degradačního modelu	
α	parametr ve vyšetřovaném zátěžovém stavu, charakterizující deformačně-pevnostní spolehlivost	[MPa]
α_j	parametry modelu	[-]
α_M	mezní hodnota parametru α	[MPa]
α_{Mm}	mezní hodnota veličiny α , popisující vznik mezního stavu m	[MPa]
β	parametr modelu	[-]
ε	akcelerační faktor	[-]
η	parametr modelu	[-]
$\lambda_0(t)$	intenzita poruch	[%]
ϕ	parametr modelu	[-]