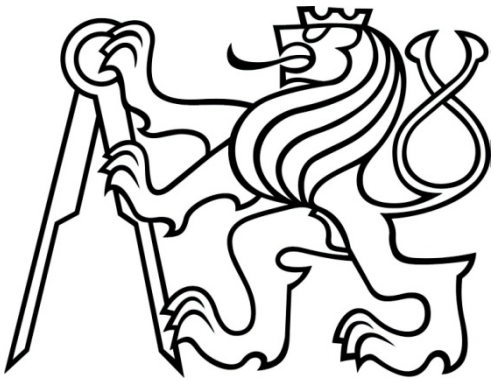
České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ú12105 Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

Odbor pružnosti a pevnosti



Studie únavového poškozování v podmínkách frettingu

Diplomová práce

Autor: Maxim Lutovinov

Vedoucí práce: Ing. Jan Papuga, PhD.

Konzultant práce: Ing. Martin Nesládek

Praha 2015

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu, ze které jsem čerpal.

V Praze dne 29. 6. 2015 Maxim Lutovinov

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi při tvorbě této práce pomáhali. Děkuji konzultantu své diplomové práce, Ing. Martinu Nesládkovi, a také vedoucímu, Ing. Janu Papugovi, PhD.

Děkuji tátovi a přítelkyni, kteří mi během celého studia pomáhali.

Anotační list

Jméno autora:	Maxim LUTOVINOV
Název DP:	Studie únavového poškozování v podmínkách frettingu
Anglický název:	Study on fatigue damaging involving fretting
Rok:	2015
Obor studia:	Aplikovaná mechanika
Ústav/odbor:	Ústav 12105/ odbor 12105.1
Vedoucí:	Ing. Jan Papuga, PhD.
Konzultant	Ing. Martin Nesládek
Bibliografické údaje:	počet stran 53+10
	počet obrázků 20
	počet tabulek 3
	počet příloh 7
Klíčová slova:	únavová predikce, fretting, Dang Vanova metoda, MKP
Keywords:	fatigue estimation, fretting , Dang Van method, FEM

Anotace:

Tato práce se zabývá vyhodnocením kvality predikce Dang Vanovy metody implementované do únavových řešičů MSC Fatigue a PragTic a aplikované na případ cyklického zatěžování vzorku a současného otěru v kontaktu s přítlačným kamenem. V práci jsou popsány experimenty pro stanovení meze únavy provedené dle stupňové metody, numerický model pro výpočet průběhu napětí v místě kontaktu a použití Dang Vanovy metody ve zvolených únavových řešičích.

Abstract:

This thesis deals with evaluation of prediction quality of Dang Van method implemented in the fatigue solvers MSC Fatigue and PragTic and applied to the case of cyclic loading and simultaneous fretting between the specimen and the fretting pad. Experiments carried out according to the staircase method in order to determine fatigue limits, the numerical model for calculating stress history in the contact area, and application of Dang Van method in the selected fatigue solvers are described.

Obsah

POUŽITÉ ZNAČENÍ 3

1 ÚVOD 4

2 LITERÁRNÍ REŠERŠE PROBLEMATIKY FRETTINGU 6

2.1 MECHANISMUS FRETTINGU 6
2.2 ÚNAVOVÉ ZKOUŠKY MATERIÁLU V PODMÍNKÁCH FRETTINGU 8
2.3 METODY PREDIKCE ÚNAVY V PODMÍNKÁCH FRETTINGU 10

3 EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ MEZE ÚNAVY MATERIÁLU VYSTAVENÉHO PODMÍNKÁM FRETTINGU 13

3.1 PŘÍPRAVA VZORKU 15
3.2 INSTALACE VZORKU DO PŘÍPRAVKU 15
3.3 INSTALACE PŘÍPRAVKU DO STROJE NA CYKLICKÉ ZATĚŽOVÁNÍ 16
3.4 CYKLICKÉ ZATĚŽOVÁNÍ VZORKU A UKONČENÍ ZKOUŠKY 17

4 ZPRACOVÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍCH DAT 18

4.1 STUPŇOVÁ METODA 18
4.2 IMPLEMENTACE STUPŇOVÉ METODY DO FINLIVU 20

5 MODELOVÁNÍ EXPERIMENTŮ V PROGRAMU ABAQUS 27

5.1 SOUČÁSTÍ SESTAVY 27
5.2 KONTAKTNÍ VAZBY 28
5.3 ULOŽENÍ SOUSTAVY 29
5.4 SIMULACE ZATĚŽOVÁNÍ 30
5.5 VÝPOČETNÍ SÍŤ MODELU 31
5.6 VÝSLEDKY MKP SIMULACE 32

6 PREDIKCE ÚNAVY 35

6.1 VÝPOČET V MSC FATIGUE 36

6.1.1 NAČTENÍ MODELU 36

6.1.2 ZADÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU POTŘEBNÝCH PRO ÚNAVOVÝ VÝPOČET DANG VANOVOU METODOU 38

6.1.3 PŘÍPRAVA A SPUŠTĚNÍ VÝPOČTU 40

6.1.4 ZOBRAZENÍ VÝSLEDKŮ 44

6.2 VÝPOČET V PRAGTICU 45

6.3 VÝSLEDKY 49

7 ZÁVĚR 52

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 54

PŘÍLOHA 1. FOTOGRAFIE Z EXPERIMENTU 56

PŘÍLOHA 2. TABULKY ZÍSKANÉ DLE STUPŇOVÉ METODY IMPLEMENTOVANÉ DO FINLIVU 57

PŘÍLOHA 3. TABULKY ZÍSKANÉ DLE STUPŇOVÉ METODY RUČNÍM SESTAVENÍM 59

PŘÍLOHA 4. UKÁZKA HLAVNÍHO ROZHRANÍ INTERAKTIVNÍ DATABÁZE FINLIV 60

PŘÍLOHA 5. VYBRANÉ TESTOVACÍ PŘÍKLADY STAIRCASE METODY 61

PŘÍLOHA 6. HLAVNÍ NAPĚTÍ VE VYBRANÝCH UZLECH 62

PŘÍLOHA 7. ZOBRAZENÍ VYBRANÝCH UZLŮ NA SUBMODELU VZORKU 63

Použité značení

A	[-]	součet hodnot 7. sloupce tabulky dle stupňové metody
a	[-]	první konstanta dle jednotlivých metod predikce vysokocyklové únavy
a_{DV}	[-]	první konstanta dle Dang Vanova kritéria
b	[-]	druhá konstanta dle jednotlivých metod predikce vysokocyklové únavy
b_{DV}	[-]	druhá konstanta dle Dang Vanova kritéria
C	[-]	součet hodnot 6. sloupce tabulky dle stupňové metody
E	[-]	součet hodnot 8. sloupce tabulky dle stupňové metody
$f(\tau)$	[MPa]	první parametr dle jednotlivých metod predikce vysokocyklové únavy
f	[-]	6. sloupec tabulky dle stupňové metody
f_{-1}	[MPa]	mez únavy ve střídavém tahu na hladkém vzorku
FI	[-]	fatigue index
$g(\sigma_N)$	[MPa]	druhý parametr dle jednotlivých metod predikce vysokocyklové únavy
HSS	[-]	faktor citlivosti hydrostatického napětí
i	[-]	index hladiny napětí
o	[-]	neporušený vzorek
S(Sig)	[MPa]	směrodatná odchylka
SF	[-]	safety factor
Sig_50	[MPa]	mez únavy vypočtena dle stupňové metody
t	[s]	čas
t_{-1}	[MPa]	mez únavy ve střídavém krutu
TAFE	[MPa]	mez únavy ve střídavém krutu (označení dle řešiče MSC Fatigue)
TypeB	[MPa]	mez únavy ve střídavém tahu (označení dle řešiče MSC Fatigue)
x	[-]	porušený vzorek
z	[-]	5. sloupec tabulky dle stupňové metody
z*f	[-]	7. sloupec tabulky dle stupňové metody
z^2*f	[-]	8. sloupec tabulky dle stupňové metody
$\Delta\sigma_{all}$	[MPa]	krok dle stupňové metody
κ	[-]	poměr meze únavy ve střídavém tahu k mezi únavy ve střídavém krutu
σ_{ao}	[MPa]	nejnižší hladina zatížení vztahována k referenčnímu počtu dle stupňové metody
σ_H	[MPa]	hydrostatické napětí
σ_N	[MPa]	normálové napětí
τ	[MPa]	amplituda smykového napětí

1 Úvod

Fretting je jedním z mechanismů degradace materiálu, který nastává v kontaktech cyklicky zatěžovaných součásti a v extrémních případech může vést k iniciaci únavových trhlin a poruše součásti. Z hlediska kinematiky vzájemného pohybu ploch kontaktního rozhraní frettingem je označován případ, kdy v rozhraní dochází k cyklickým skluzům v řádu jednotek až desítek mikrometrů. Problematika frettingu je do jisté míry podobná problematice vrubovaných dílů, jelikož oblasti, které jsou vystaveny účinkům tohoto jevu, jsou kromě otěru vystaveny i vysokým koncentracím napětí, což ovlivňuje proces iniciace mikrotrhlin.

Únava v podmínkách frettingu se vyskytuje v odvětvích napříč celým spektrem průmyslových aplikací. Z hlediska bezpečnosti a možných ekonomických ztrát vlivem poruch způsobených tímto mechanismem jsou kritická odvětví jako např., letectví a doprava obecně nebo energetika. Typickými konstrukčními prvky, pro které je tato problematika relevantní, jsou závěsy lopatek leteckých motorů a parních turbín, nalisování železničních kol a nápravy, nýtové spoje a drážkové spoje.

Experimenty, které jsou prováděny s cílem získání informace o tom, jak fretting ovlivňuje únavové vlastnosti materiálů, jsou finančně relativně nákladné. To je dáno tím, že frettingové experimenty není možné provádět na klasických strojích pro únavové zkoušky bez speciálních přípravků, a také tím, že jsou náročné z časového hlediska. Proto je žádoucí pro počáteční návrhy součástí nebo konstrukcí používat predikční modely, které na základě znalosti klasických únavových parametrů jako základní mez únavy, poskytnou informaci o únavové pevnosti konstruovaných entit.

Hlavním cílem této diplomové práce bylo zmapovat predikční vlastnosti vybrané metody predikce vysokocyklové únavy v dostupných únavových řešičích (MSC Fatigue a PragTic), a to na případu cyklického zatěžování vzorků žárupevné oceli používané na lopatky parních turbín v zátěžných podmínkách, kdy je uvažováno cyklické namáhání a otěr v kontaktu s přítlačným kamenem s válcovou kontaktní plochou. Jednotlivé dílčí postupné kroky a cíle pro naplnění cíle hlavního jsou následující:

1. Stanovení amplitud a středních hodnot axiálních sil na vzorku odpovídajících hladině experimentálně stanovené meze únavy materiálu vystaveného podmínkám frettingu.
2. Provedení úpravy 3D geometrického modelu zkušebního přípravku a vzorku materiálu. Vytvoření výpočetního modelu pro spouštění numerické simulace deformační a napěťové odezvy v programu Abaqus s uvažováním stanovených hladin zatížení.
3. Vyhodnocení kontaktních napětí a skluzů v místě kontaktu vzorku s přítlačným kamenem.
4. Provedení únavových výpočtů v dostupných únavových řešičích pomocí vybrané metody predikce vysokocyklové únavy.
5. Vyhodnocení kvality výpočtů zvolené metody predikce s ohledem na provedené experimenty.

2 Literární rešerše problematiky frettingu

V této kapitole jsou shrnuty některé významné poznatky o problematice frettingu shromážděné z dostupné literatury. Je popsán mechanismus frettingu a také experimentální a numerické přístupy používané k vyšetření únavového poškozování v podmínkách frettingu.

Odkazy [4], [5] a [7] byly převzaté z [1] z důvodu nedostupnosti originálních prací autoru této práce.

2.1 Mechanismus frettingu

Primárně byl pod pojmem „fretting“ míněn pouze specifický typ opotřebení kontaktních ploch. První zaznamenána reference o frettingu v literatuře je článek Edena a kol. [4] datovaný do roku 1911. V této práci se autoři zmiňují o částicích materiálu na bázi oxidů železa, které byly nalezeny na kontaktních plochách zkušebního vzorku a upínacích čelistí stroje při únavových zkouškách. I když únavový projev frettingu v tomto článku nebyl pozorován, fretting mezi zkušebním vzorkem a upínacími čelistmi byl použít jako základ pro únavové experimenty v [5]. V průběhu let byl identifikován i další průvodní jev frettingu – snížení životnosti vzorků materiálu v cyklicky namáhaných kontaktech ve srovnání se vzorky vystavených podmínkám čisté únavy (tj. bez kontaktu). Postupně se tedy vyvinul termín „únava v podmínkách frettingu“, který označuje jev, kdy mikroskluzy kontaktních povrchů vedou k nižší únavové životnosti, pokud se porovnává s životnosti vzorků v podmínkách klasické únavy. [1]

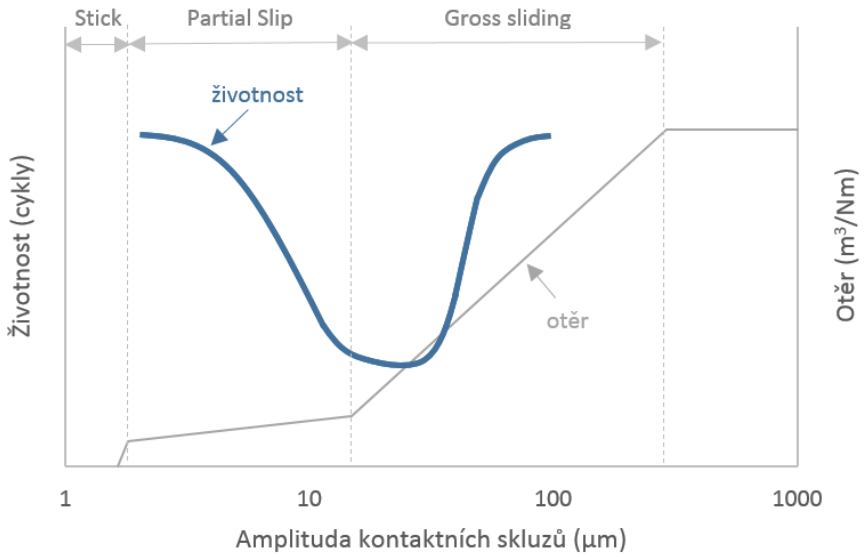
Co je dále v souvislosti s únavou v podmínkách frettingu nutné zmínit, jsou koncentrace napětí a neproporcionální změna složek tenzoru napětí v lokalitě kontaktu. Koncentrace napětí vede k určité analogii s problematikou vrubů, avšak gradienty napětí v blízkosti kontaktních hran jsou obvykle mnohem vyšší než v případě klasických konstrukčních nebo technologických vrubů. Neproporcionální změna složek tenzoru napětí je způsobená nelineární povahou tření. [2]

Pro klasifikaci poškozovacího účinku frettingu se často používají amplituda kontaktních skluzů (Obr. 1). Na základě rozsahu kontaktních skluzů se provádí klasifikace kontaktních rozhraní do třech základních pracovních režimů:

1) Režim, při kterém amplitudy skluzu jsou menší než 3 µm (stick regime). V tomto režimu skluz povrchu je omezen plastickou deformací mikrovazeb, které byly vytvořeny vzájemným přitlačením kontaktních povrchů.

2) Režim, při kterém amplitudy skluzu jsou větší než 3 µm, ale menší než 20 µm (partial regime). Tento režim je charakterizován dramatickým poklesem únavové životnosti.

3) Režim, při kterém jsou amplitudy skluzu větší než 20 µm (gross sliding regime). V tomto režimu dochází k únavovým projevům degradace materiálu jen zřídka.



Obr. 1: Schematická závislost počtu cyklů do iniciace únavové trhliny a otěru na amplitudě kontaktních skluzů

Z hlediska únavové životnosti reálných kontaktních párů je nejméně příznivý stav, kdy jsou ve vzájemném pohybu pouze hranice kontaktu, tj. druhý z výše uváděných režimů. Tato oblast je vystavena vysokým koncentracím napětí, které v kombinaci s prokluzy hranic kontaktu vedou k postupné kumulaci mikrovrubů v průběhu zatěžování. Hranice kontaktu je pak nejvíce poškozovanou oblastí a je nejpravděpodobnějším místem iniciace trhliny. [2]

Zajímavá jsou fakta, která vyplývají z tribologického modelu Matikase a Nicolaoua [6] a které jsou zároveň obecně v souladu s experimentálními pozorováními:

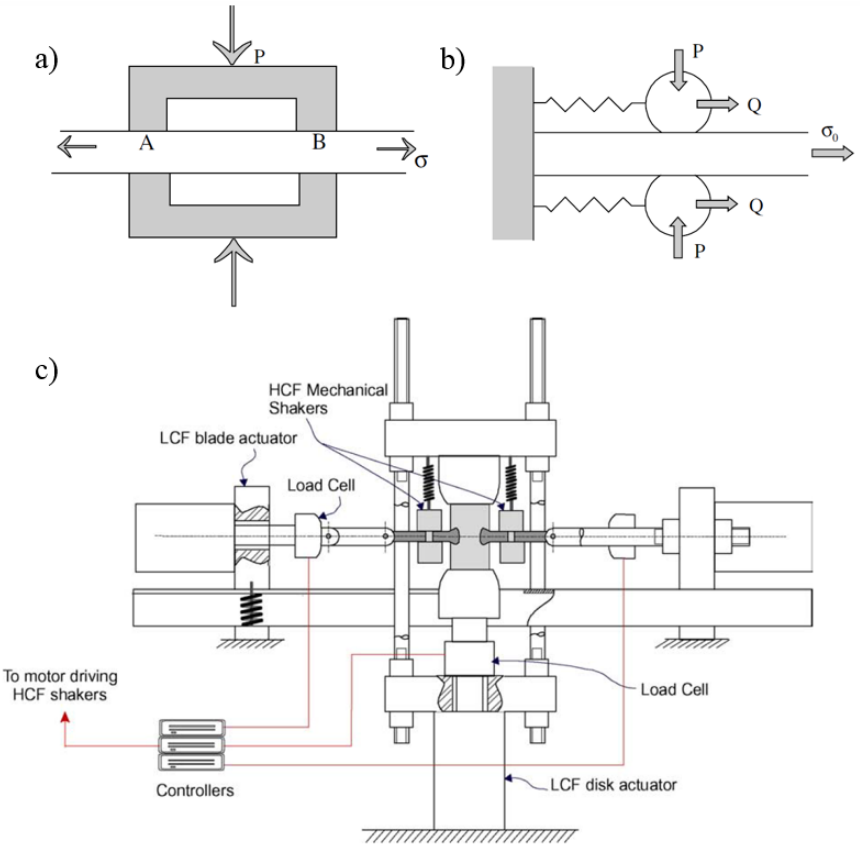
1. Čím větší modul pružnosti materiálu, tím větší je rezistence vůči projevům frettingu;

2. Zvětšení rozměrů přitlačovacích kamenů při zachování stejného maximálního kontaktního tlaku zmenšuje únavovou životnost;

3. Úpravou drsnosti povrchu lze docílit změny životnosti.

2.2 Únavové zkoušky materiálu v podmínkách frettingu

V článku [1] jsou popsány tři typy experimentů, které byly prováděny pro vyšetření chování materiálu v podmínkách frettingu.



Obr. 2: Různé typy únavových zkoušek popsaných v [1]. Zdroj obrázku: [1]

První typ experimentu představuje cyklické zatěžování vzorku přitlačeného dvěma můstkovými kameny (Obr. 2, a), přičemž kontaktní plochy kamenů a vzorku mají rovinný tvar. Autor konstatuje, že tento typ experimentu má řadu nevýhod: kontaktní stav je obtížné charakterizovat, pokud dochází k ohybu přitlačovacích kamenů, podmínky na obou podpěrách

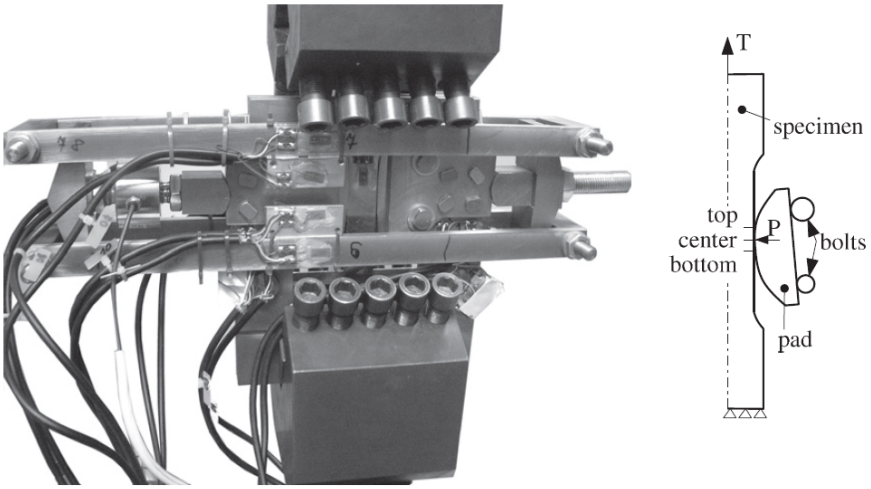
jednotlivých kamenů nebudou absolutně identické a je pravděpodobné, že v jedné podpěře dojde ke skluzu rychleji než ve druhé.

Ve druhém typu experimentu se místo můstkových přitlačovacích kamenů s rovinnými kontaktními plochami používají kameny s válcovými kontaktními plochami (Obr. 2, b). Tento typ experimentu má oproti předchozí variantě několik výhod: snazší ustavení kontaktních ploch, výpočet napětí a deformace materiálu lze řešit analyticky. Potřebné parametry pro výpočet napjatosti v kontaktní oblasti, jakými jsou normálová a tangenciální síla, mohou být relativně snadno a přesně měřitelné.

Poslední typ experimentů (Obr. 2, c) uvedených v [1] vychází z konfigurace zkušebního zařízení, jehož cílem je se co nejvíce přiblížit reálnému případu namáhání stromečkových závěsů lopatek turbín. Zkušební vzorek se skládá ze dvou části. První část má obdobný tvar jako lopatky v místě uložení v rotoru. Druhá část reprezentuje segment rotoru, v němž je vzorek („lopatka“) uložen. Na první část je aplikovaná konstantní sila reprezentující odstředivou sílu od rotace. Na tento účinek je superponováno cyklické zatížení reprezentující vibrace lopatek vlivem nestacionárního proudu páry v mezilopatkovém kanále. Na druhou část je aplikována cyklická síla, která simuluje dilataci disku rotoru vlivem proměnlivé odstředivé síly (cykly nájezdu a sjezdu pracovních otáček turbíny).

V článku [2] je popsána konfigurace frettingového experimentu, která byla použita i v této práci. Typem zkušebního vzorku je hladký nevrubovaný vzorek s obdélníkovým průřezem (Obr. 3). Přitlačovací kameny mají válcové kontaktní plochy a spolu se vzorkem jsou uloženy do speciálního přípravku, ve kterém před finálním upnutím celé soustavy mohou být mírně naklápěny nebo posouvány do stran, což umožňuje relativně rovnoměrné dosednutí kontaktních ploch během instalace. Uložení kamenů v přípravku je navrženo tak, aby ke kontaktu docházelo v horní části kontaktní plochy kamenů, což umožnuje použít přitlačovací kameny ve dvou experimentech, kdy vždy na počátku zkoušky jsou kontaktní plochy neporušené. Do speciálního přípravku se vkládá kromě přitlačovacích kamenů i zkušební vzorek a celá soustava přípravku je vkládaná do standardního stroje pro klasické únavové zkoušky Amsler (viz Příloha 1). Na každý zkušební vzorek je lepen tenzometr s cílem měření a zabránění vzniku ohybového napětí, ke kterému může docházet během instalace přípravku

do čelistí zkušebního stroje. Vznik a růst únavové trhliny je monitorován pomocí mikroskopické kamery.



Obr. 3: Konfigurace frettingového experimentu, popsaného v [2] a použitého v této práci. Zdroj obrázku: [2]

2.3 Metody predikce únavy v podmínkách frettingu

Metod predikce navržených přímo pro případ únavového poškozování v podmínkách frettingu je obecně velmi málo v porovnání s problémem klasické únavy. V literatuře jsou nejčastěji zmiňovány dva parametry navržené Ruizem [1]. Prvním parametrem je energetický parametr poškození definovaný jako součin amplitudy kontaktního skluzu s maximálním kontaktním smykovým napětím. Druhý parametr vychází z předchozího a je získán jeho vynásobením maximální lokální složkou napětí paralelní ke kontaktní ploše. Sám autor tvrdí, že je nepravděpodobné, že tyto parametry se dají považovat za materiálové konstanty, nicméně často poskytují přijatelnou míru korelace s řadou experimentů.

V literatuře se s ohledem na problematiku frettingu lze nejčastěji setkat s aplikací metod predikce klasické únavy. V nízkocyklové oblasti jsou nejběžněji uváděna multiaxiální kritéria na bázi metodiky kritické roviny dle Fatemi-Socie a SWT (Smith, Watson, Topper), přičemž na základě zkoumaní Neu et al. [7] se parametr Fatemi-Socie ukázal jako efektivnější ze dvou uvedených ve smyslu predikce lokace a počátečního směru růstu únavové trhliny. Dle dalších zkoumání výpočty počtů cyklů do iniciace trhliny pomocí obou parametrů ukázaly dobrou korelaci s experimentálními výsledky. [1]

Další skupinou přístupů je použití kritérií určených primárně pro predikce klasické únavy ve vysokocyklové oblasti a k poškozování trvalé pevnosti. Kritéria z této skupiny lze obecně formulovat ve tvaru (1):

$$a.f(\tau) + b.g(\sigma_N) \leq f_{-1} \tag{1}$$

kde a a b jsou konstanty identifikované pomocí únavových zkoušek na hladkých tělesech, f a g jsou parametry, které se získávají na základě zátěžné historie, přičemž parametr f je nejčastěji vztahován k amplitudě smykového napětí τ a g k normálovému napětí σ_N. Parametr f_{-1} je mez únavy ve střídavém tahu na hladkém vzorku. Levá strana nerovnice pak představuje ekvivalentní amplitudu napětí pro symetricky střídavý zatěžovací cyklus v tahu/ tlaku. Výsledkem predikce pomocí modelů této skupiny je tzv. Fatigue Index, který lze definovat jako podíl levé a pravé strany (2):

$$FI = \frac{a.f(\tau) + b.g(\sigma_N)}{f_{-1}} \tag{2}$$

V [3] je porovnáváno 17 různých modelů z této skupiny predikčních přístupů na bázi jak metodiky kritické roviny, tak i invariantů napětí. Nejlepších výsledků predikce rozsáhlé sady experimentů dosahují metody Papuga PCR, QCP, Papuga Pir, Crossland a McDiarmid. V [3] multiaxialní metody však nebyly aplikované na problematiku frettingu. Část z metod uvedených v [3] byla v [2] aplikována i na problematiku frettingu a metody Crossland a Dang Van poskytly nejlepší výsledky ze zkoumaných metod. Metoda PCR, která v [2] se ukázala jako nejlepší přes uvažovanou škálu několika stovek experimentů, vedla k Fatigue Indexům mírně posunutým do konzervativní oblasti výsledků predikce. Je ovšem nutné zmínit, že v práci [2] nebyla aplikována korekce na gradient napětí, která obecně vede ke snížení hodnot Fatigue Indexu. Ke korekci na gradient napětí je v souvislosti s frettingem nejčastěji udávána tzv. metoda kritické vzdálenosti (z angl. The theory of critical distances - TCD).

Dang Vanovo kritérium, které bylo nakonec použito i v této práce je formulováno nerovnicí (3):

$$\max_t \left[a_{DV}.\tau(t) + b_{DV}.\sigma_H(t) \right] \leq f_{-1} \tag{3}$$

kde a_{DV} a b_{DV} jsou konstanty dané kritériem, přičemž

$$a_{DV} = \kappa \qquad b_{DV} = 3 - 1{,}5.\kappa \qquad \kappa = \frac{f_{-1}}{t_{-1}} \tag{4}$$

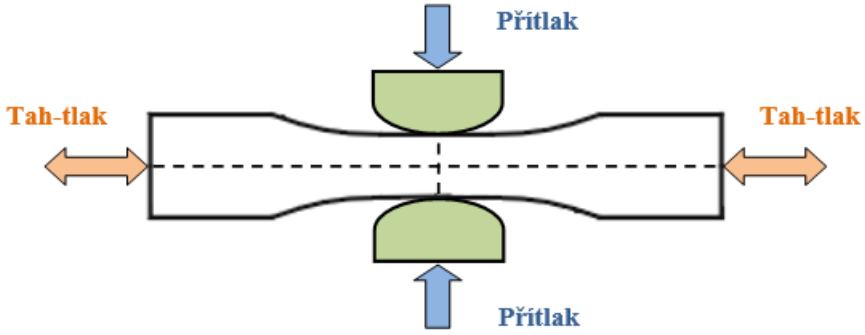
kde κ je poměr meze únavy ve střídavém tahu f_{-1} k mezi únavy ve střídavém krutu t_{-1}.

Parametr $\tau(t)$ je amplituda smykového napětí a počítá se pro každý uzel MKP modelu jako charakteristický rozměr nejmenšího útvaru v šestirozměrové dimenzi, do kterého se dají vepsat body, které představují napětí v jednotlivých časových inkrementech t. Jinými slovy, průběh napětí v každém uzlů tvoří sadu bodů v šestirozměrovém prostoru, kde jednotlivé dimenze prostoru jsou představeny složkami napětí. Pro každou sadu bodů se optimalizací najde nejmenší opsaný útvar a charakteristický rozměr tohoto útvaru pak představuje amplitudu smykového napětí. Jako útvar se nejčastěji používá koule v šesti rozměrovém prostoru a charakteristickým rozměrem je pak rádius této koule. Jiným způsobem výpočtu tohoto parametru je vyhledávání kritické roviny pomocí maximalizace levé strany nerovnice (3). Tento způsob výpočtu je používán např. v únavovém řešiči PragTic [8], o kterém bude řečeno více v kapitole 6.

$\sigma_H(t)$ je hydrostatické napětí a t je časový inkrement.

3 Experimentální stanovení meze únavy materiálu vystaveného podmínkám frettingu

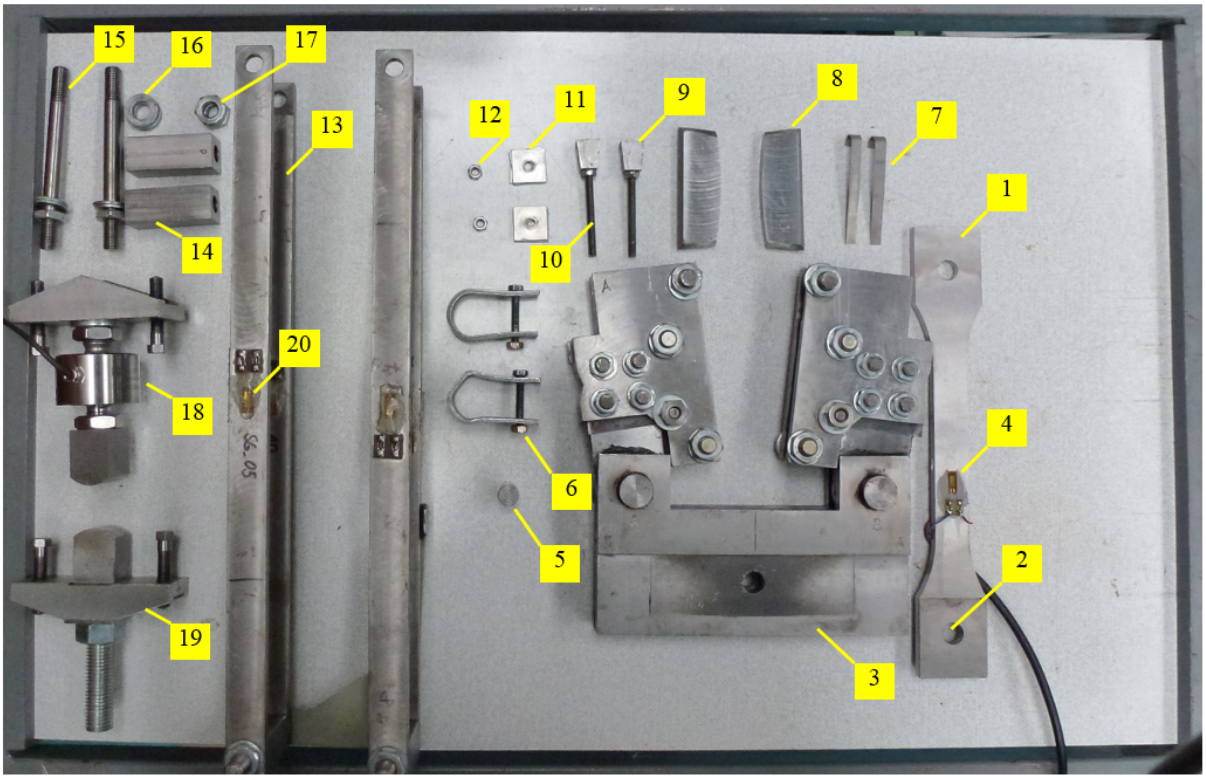
S cílem získání dat pro ověření kvality predikce vysokocyklové únavy v podmínkách frettingu byly ve spolupráci s Ing. Martinem Nesládkem provedeny experimenty, jejichž popis je náplní této kapitoly. Kontaktní únava v podmínkách frettingu byla simulována cyklickým zatěžováním zkušebních vzorků tahem-tlakem a současným přitlačováním kameny s válcovými kontaktními plochami (Obr. 4, Příloha 1). Cílovými hodnotami, které měly být po vyhodnocení zkoušky získány, jsou amplituda a střední hodnota axiální síly na vzorku odpovídající hodnotě meze únavy (uvažované při 10^7 cyklů) zkoušeného materiálu na dané konstantní hladině síly přitlačující válcové kameny k přípravku. Experimentální data byla vyhodnocena pomocí stupňové metody [9] („the staircase method“ dle [10], v [11] je uváděna jako „stupňovaná metoda“). Při znalosti těchto účinků mohla být provedena MKP simulace napjatosti během zatěžovacího cyklu (kapitola 5) s cílem zjištění lokální napjatosti potřebné jako vstup do únavových výpočtů (kapitola 6).



Obr. 4: Zkušební vzorek a hlavní směry zatěžování

Provedené zkoušky kontaktní únavy v podmínkách frettingu nejsou normované. Normovanou analogií je zkouška dle japonské normy JSME S 015-2002, která ovšem uvažuje přitlačovací kameny můstkového typu (Obr. 2., a). Materiálová zkušebna Odboru pružnosti a pevnosti FS ČVUT v Praze disponuje zkušebním přípravkem vycházejícím z konfigurace plochého nevrubovaného vzorku v kontaktu s válcovými přítlačnými kameny (Obr. 5, Příloha 1). Jak již

bylo popsáno v kapitole 2.2, toto uspořádání má oproti můstkovým kamenům několik podstatných výhod, a tudíž použití konfigurace dle JSME S 015-2002 postrádá pro účely této práce smysl.



Obr. 5: Součásti přípravku a zkušební vzorek. (1) zkušební vzorek; (2) díra, pro zafixování vzorku v ose přípravku; (3) přípravek; (4) tenzometry pro měření hodnoty ohybového napětí na vzorku; (5) čep, pro zafixování vzorku v ose přípravku; (6) svorky pro sevření přípravku s cílem zafixovat vzorek; (7) plíšek; (8) přítlačné kamene; (9) klín pro upnutí kamenů; (10) stavěcí šroub; (11) podložky; (12) matice na stavěcí šrouby; (13) táhla; (14) podpěry pro siloměr, jsou analogicky podpěrám pro přitlačovací kamen; (15) šrouby na podpěry; (16) podložky na podpěry; (17) matice na šrouby na podpěry; (18) siloměr, montuje se do táhel ze strany A a přitlačuje přípravek v místě C; (19) přitlačovací kamen, montuje se do táhel ze strany B a přitlačuje přípravek v místě D; (20) tenzometry na táhlech, v tomto experimentu nebyly používané.

Zatěžování vzorků tahem-tlakem bylo realizováno na stroji na cyklické zatěžování AMSLER, který je instalován v materiálové zkušebně Odboru pružnosti a pevnosti FS ČVUT. Přitlačení kamenů ke vzorkům bylo zajištěno zmiňovaným přípravkem pro provádění únavových zkoušek v podmínkách frettingu (Obr. 5, Příloha 1).

Průběh zkoušky je možné rozdělit na několik etap:

1) Příprava vzorku

2) Instalace vzorku do přípravku

3) Instalace přípravku do stroje na cyklické zatěžování

4) Cyklické zatěžování vzorku do iniciace trhliny, přičemž okamžik iniciace je monitorován mikroskopickou kamerou

3.1 Příprava vzorku

Před samotnou instalací bylo potřeba ve vzorku vyvrtat díru (Obr. 5, odkaz 2), určenou pro vymezení požadované polohy vzorku vůči čelistem přípravku. Průměr díry je určen průměrem čepu (Obr. 5, 5), pomocí kterého vzorek se zajišťuje v ose přípravku (Obr. 5, 3). Instalovaný vzorek byl dále opatřen dvojicí tenzometrů v půlmostovém zapojení pro měření ohybového napětí během upínání vzorku v čelistech zkušebního stroje.

3.2 Instalace vzorku do přípravku

Zkušební přípravek se skládá ze dvou hlavních části. První část představuje konstrukce pro uložení a zafixovaní vzorku a kamenů v prostoru (Obr. 5, 3). Druhou částí je soustava táhel určená pro vyvození požadované přítlačné síly (Obr. 5, 13 až 19).

Pokud se v průběhu předchozí zkoušky na vzorku inicializovala trhlina, pro další zkoušku byl použít nový nepoškozený zkušební vzorek. V opačném případě vzorek z předchozí zkoušky byl použit podruhé, přičemž byl nainstalován tak, aby kontaktní oblast neobsahovala známky poškození z předchozí zkoušky. Toto bylo realizováno jednoduše přetočením vzorku kolem vodorovné osy o 180º. Jelikož kvůli konstrukci přípravku kontakt mezi vzorkem a přitlačovacími kameny nebyl realizován uprostřed vzorku, místo kontaktu po přetočení vzorku bylo odlišné od místa kontaktu před přetočením. Rozhodnutí o opětovném použití vzorku bylo přijato z ekonomických důvodu vzhledem k finanční náročnosti podobného experimentu.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2, přitlačovací kameny se kvůli jejich uložení v přípravku daly použít ve dvou experimentech. Kontaktní plochy jak vzorků, tak i přitlačovacích kamenů na počátcích experimentů však byly vždy nepoškozené.

Instalace vzorku do přípravku (Obr. 5) probíhala následovně:

1) Vzorek (1) byl vložen do přípravku (3), zajištěn v ose přípravku pomocí čepu (5) přes vyvrtanou díru (2) a zarovnán do kolmé polohy vůči dosedacím plochám přípravku.

2) Dále následovalo vložení dvou plíšku (7), plnících funkci ochrany čepů použitých v přípravku proti opotřebení. Potom byly vloženy dva přítlačné kameny (8), které byly zajištěny pomocí klínů (9) a stavěcích šroubů (10). Stavěcí šrouby byly z jedné strany zašroubovány do klínů a z druhé strany byly zašroubovány do matic (12) a pojištěny třemi podložkami (11).

3) Aby nedocházelo k uvolnění vzorku a jeho natáčení vůči přípravku během montáže do zkušebního stroje, byl přípravek pevně sevřen pomocí jednoduchých svorek (6).

3.3 Instalace přípravku do stroje na cyklické zatěžování

Po tom co byly vzorek s kameny nainstalovány do přípravku, byl přípravek umístěn do dolních čelistí stroje Amsler (Obr. 3, Příloha 1). Aby upnutí v čelistech nevedlo k ohybu vzorku, probíhalo upnutí za současného sledování hodnoty ohybového napětí na vzorku. Tato hodnota byla sledovaná pomocí tenzometrů, které byly připojeny k měřící ústředně HBM Spider 8, která předávala měřící signál do počítače, kde pomocí softwaru CatmanEasy byl signál automaticky převáděn na hodnotu ohybového napětí a byl zobrazován na obrazovce počítače. Po upnutí do stroje, byly kontaktní plochy odmaštěny speciálním prostředkem a k přípravku byla připojená jeho druhá část, která představuje soustavu táhel se siloměrem pro vyvození a měření síly přitlačující kameny s válcovou kontaktní plochou k přípravku. Stejně jako v případě tenzometrů byl siloměr připojen k ústředně Spider, díky čemuž bylo možné hodnotu přítlaku monitorovat na obrazovce počítače.

Dotažením předepínacích šroubů táhel byla nastavena potřebná hodnota přítlaku. Až v tomto okamžiku bylo možné definitivně doupnout přítlačné kameny pomocí klínů a stavěcích šroubů.

Uvedený postup montáže zaručuje ustavení rovnoměrného kontaktu mezi přítlačnými kameny a vzorkem. Následovalo finální nastavení přítlačné síly a středního axiálního předpětí na zkušebním stroji.

3.4 Cyklické zatěžování vzorku a ukončení zkoušky

Po nastavení parametrů zátěžného cyklu v řídicím programu stroje Amsler bylo možné zahájit samotnou zkoušku s tím, že v první fázi (cca 100 000 cyklů) bylo nutné kontrolovat a korigovat hodnotu přítlačné síly. Druhá fáze zkoušky probíhala zcela automaticky a byla ukončená po 10^7 cyklů, pokud nebyla kamerou pozorována trhlina. O iniciaci trhliny rovněž podával informaci časový průběh frekvence axiálního zatížení. V případě, že docházelo k poklesu frekvence zatížení mimo regulační pásmo stroje (jedná se o vlastní frekvenci systému stroj-zkušební vzorek), značilo toto pokles tuhosti vzorku neboli iniciaci trhliny.

Záznam o zkoušce byl prováděn dle metodiky stupňové metody, kde se zaznamenávají hladiny zatížení a stavy vzorků (viz kapitola 4).

4 Zpracování experimentálních dat

4.1 Stupňová metoda

Všechny experimenty a zpracování experimentálních dat byly provedeny na základě stupňové metody [10], která umožnuje stanovení meze únavy na základě statistického hodnocení změřených dat. Podstatou metody je inkrementální zvyšování nebo snižování zatížení vzorku o konstantní zvolenou hodnotu na základě toho, jestli při provedení experimentu došlo ke vzniku trhliny či nikoliv. Pokud trhlina vznikne, je dle pravidel metody potřeba v následujícím experimentu hladinu snížit o zvolený krok a naopak. Do připravené tabulky dle doporučení normy (Tab. 1), ve které řádky představují jednotlivé hladiny zatížení a sloupce pořadí experimentů, se vynáší symbol „o“ pokud nedojde ke vzniku trhliny, nebo symbol „x“ v opačném případě. Pokud bylo správně dodrženo výše zmíněné pravidlo pro změnu zatížení, symboly „x“ a „o“ v tabulce jsou uspořádané do sekvence připomínající schůdky. Odtud je tedy pochází původní anglický název metody „the staircase method“. Při vhodné volbě hladiny zatížení pro první vzorek a kroku mezi jednotlivými hladinami, by mělo po několika experimentech (cca 10) dojít k ustálení hladin zatěžování v blízkém okolí jedné hodnoty – meze únavy. Hodnota meze únavy a odpovídající ji směrodatná odchylka se dopočítá pomocí vztahů uvedených v normě, do nichž vstupují hodnoty zpracované v dalších částech tabulky.

Tab. 1: Tabulka získaná dle stupňové metody implementované do FinLivu pro případ přítlaku 3 kN

1	2								3	4	5	6	7	8
Stress [MPa]	x Failure o Non-failure								x	o	z	f	z*f	z^2*f
103.6								x	1	0	3	1	3	9
98.2					x		o		1	1	2	1	2	4
92.9				o		o			0	2	1	0	0	0
87.5	x		o						1	1	0	1	0	0
82.1		o							0	1	0	0	0	0
Test piece No.	1	2	3	4	5	6	7	8						
Sum of columns 3, 4, 6, 7, 8									3	5	-	3	5	13
												C	A	E
Sig_50 =	93.8													
S(Sig)=	13.8617													

Vyhodnocená mez únavy je v Tab. 1 značena jako parametr *Sig_50* a je počítána dle (5):

$$Sig_50 = \sigma_{ao} + \Delta\sigma_{all}\left(\frac{A}{C} + x\right) \tag{5}$$

kde σ_{ao} je nejnižší hladina zatížení, na které se vyskytne první neporušený vzorek, pokud celkový součet neporušených vzorků je menší než celkový součet porušených vzorků, nebo první porušený vzorek v opačném případě. V normě není uvedeno jak postupovat v případě, když počet neporušených a porušených vzorků je stejný. Testovací příklady (Příloha 5) vyzkoušené v této práci a spadající do skupiny případů, kdy zmíněné počty vycházejí stejné, vedly na stejné výsledky nezávislé na tom, která skupina vzorků, tj. porušené nebo neporušené, byla zvolena jako referenční. Je to důsledkem hodnot ve sloupcích *f*, *z* a parametru *x*, které se mění na základě zvoleného referenčního počtu. Parametr $\Delta\sigma_{all}$ je krok mezi jednotlivými hladinami zatěžování. Parametry *A* a *C* jsou součty hodnot sloupců *z*f* a *f*. Parametr *x* je roven +0.5 v případě že celkový počet neporušených vzorků je menší než počet porušených vzorků, nebo -0,5 v opačném případě. Je vhodné podotknout, že metodu lze použít jak pro hladiny zatížení, které jsou představovány napětími, tak i pro hladiny představené silami. Výsledkem je pak buď mez únavy nebo síla odpovídající hladině meze únavy.

Parametr *S(Sig)* je směrodatná odchylka a je počítána dle vzorce (6):

$$S(Sig) = 1{,}62.\Delta\sigma_{all}\left(\frac{CE - A^2}{C^2} + 0{,}029\right) \tag{6}$$

kde parametr *E* je součet hodnot sloupce *z^2*f*.

Metoda staircase byla zvolena z následujících důvodu:

1) Z hlediska využití je metoda staircase dnes nejběžnější.

2) Metoda staircase je standardizována.

3) Jednoduchá z hlediska provádění experimentů, postup vyhodnocení lze algoritmizovat.

Nevýhodou staircase metody je to, že je náročná na počet zkušebních vzorků.

Existují i další metody pro vyhodnocení únavových zkoušek. V [10] jsou uvedeny další dvě metody (metoda hranic a metoda arc sin), které se rovněž dají použit pro zjištění mezí únavy.

4.2 Implementace stupňové metody do FinLivu

S cílem automatizace procesu vyhodnocení experimentálních dat a vyloučení chyb, které by mohly vzniknout při manuálním vyplňování tabulky pro stupňovou metodu, byl napsán program, který vyhodnocuje zvolená experimentální data pomocí pravidel stupňové metody. Program byl napsán v jazyce Visual Basic For Applications a byl implementován do MS Excel aplikace FinLiv. FinLiv je databáze určená pro sběr, ukládání a práce s experimentálními daty získanými z deformačně řízených a napěťové řízených experimentů a také ze statických experimentů. Náhled hlavního rozhraní je k dispozice v Příloze 4.

Na obr. 3 je vidět jedno z rozhraní aplikace FinLiv, které obsahuje tabulku s experimentálními daty a je určeno pro zpracování dat, např. pro vykreslení S-N křivky. Do tohoto rozhraní byla implementována stupňová metoda. S cílem co nejvíce usnadnit použití metody byl vyvinut algoritmus pro vyhodnocení dat včetně úpravy uživatelského rozhraní databáze FinLiv. Tento doplněk umožňuje použít metodu nejen na data získaná z experimentů provedených podle doporučení stupňové metody, ale i na data získaná z experimentů, které nebyly původně prováděny podle metodiky staircase.

	point ID	master variable	load channel No. 1				load channel No. 2	number of cycles		finished / interrupted
			tension-compression				tension-compression			
			amplitude [MPa or %]	mean value [MPa or %]	frequency [Hz]	phase shift [deg]	mean value [MPa or %]	till END	till break	
4	NeL001_Rm	1022	953.866663	1022	1	0	3	0.25	0.25	finished
5	NeL001_01	103.6	96.693333	103.6	1	0	3		50000	finished
6	NeL001_02	98.2	91.653333	98.2	1	0	3		500000	finished
7	NeL001_03	98.2	91.653333	98.2	1	0	3		10000000	interrupted
8	NeL001_04	92.9	86.7066664	92.9	1	0	3		10000000	interrupted
9	NeL001_05	92.9	86.7066664	92.9	1	0	3		10000000	interrupted
10	NeL001_06	87.5	81.6666664	87.5	1	0	3		5000000	finished
11	NeL001_07	87.5	81.6666664	87.5	1	0	3		10000000	interrupted
12	NeL001_08	82.1	76.6266664	82.1	1	0	3		10000000	interrupted

S-N Curve | The Staircase | K&V Curve

csv | SumUP | SumUP_EN | NeL001 | NeL002 | NeL003 | NeL004

Obr. 6: Ukázka jednoho z rozhraní FinLiv

Po zmačknutí tlačítka „The staircase“ je uživatel vyzván k výběru buněk obsahujících hodnoty, které odpovídají hladinám napětí, na kterých byl proveden experiment. Dále následuje volba buněk, které obsahují informaci o stavech vzorků. Stavem vzorku je myšlen údaj o tom, zda na příslušném vzorku během provádění experimentu došlo ke vzniku trhliny či nikoli. Na základě zvolených buněk s hodnotami napětí aplikace ví, na jakých řádcích jsou umístěny buňky obsahující informace o stavech vzorků, a proto v tomto kroku stačí zvolit libovolnou buňku ze sloupce se stavy.

Po definování buněk s napětím a sloupce se stavy zahájí aplikace automaticky vyhodnocování dat. Nejdříve jsou ze zvolených hladin napětí sestaveny různé kombinace umožňující vyhodnocení podle stupňové metody a lišící se velikosti kroku mezi hladinami napětí. Tento postup je implementován primárně z důvodu, kdyby uživatel chtěl použit metodu na data získaná z obecných zkoušek, ne ze zkoušek obstaraných dle stupňové metody. V tom případě je potřeba zkontrolovat, zda všechna zvolená data nebo alespoň nějaká část je vhodná pro stupňovou metodu, a také navrhnout různé kombinace, aby uživatel mohl vhodnou variantu zvolit. Aplikace na základě zvolených dat provede výpočet tříd zatížení a navrhne uživateli možné sekvence experimentů. Pro stupňovou metodu je potřeba, aby zkoušky byly provedeny alespoň na dvou hladinách napětí. Proto, kdyby všechny zvolené buňky s napětím obsahovaly tutéž hodnotu, aplikace upozorní uživatele na tuto událost a ukončí operaci.

Následuje kontrola předvybraných kombinací experimentů na vhodnost pro zpracování pomocí stupňové metody. Data se posuzují podle následujících kritérií:

1. Kritérium počtu vzorků bez porušení na nejvyšší hladině. Toto kritérium hodnotí, zda počet vzorků bez porušení na nejvyšší hladině napětí je větší než jedna. Pokud ano, tato kombinace není vhodná pro stupňovou metodu. Kritérium vychází z principu provádění experimentů dle stupňové metody, který již byl zmíněn: pokud se vzorek během zkoušky neporuší, buď se přechází na vyšší hladinu zatížení, nebo se zkouška ukončuje, pokud jde o poslední zkoušený vzorek. Pak počet vzorků bez porušení na nějaké hladině znamená, že jeden nebo několik vzorků byly zkoušeny na vyšších hladinách a mezi těmito vzorky na vyšších hladinách byly vzorky s porušením, což vedlo k tomu, že byl zkoušen další vzorek na původní hladině a ten nebyl porušen. Jinými slovy hladina obsahující několik neporušených vzorků nemůže být nejvyšší hladinou. Tím pádem i kombinace, jejíž nejvyšší hladina nesplňuje toto kritérium, není vhodná pro stupňovou metodu

2. Kritérium počtu vzorků s porušením na nejnižší hladině. Toto kritérium je zcela analogické jako první kritérium, ale místo kontrolování počtu vzorku bez porušení na nejvyšší hladině, je kontrolován počet vzorků s porušením na nejnižší hladině.

Následující skupina kritérií je založená na vazbách mezi sousedními hladinami napětí.

3. Kritérium výšky schůdku. Rozdíl počtu přechodů na vyšší hladinu (dále jen vzestupů) a počtu přechodů na nižší hladiny (dále jen sestupů) mezi dvěma sousedními hladinami by neměl být větší než jedna. Toto kritérium také vyplývá ze způsobu zpracování dat dle stupňové metody. Nulový rozdíl vzestupů a sestupů mezi sousedními hladinami znamená, že počet vzorků bez porušení na nižší hladině je stejný jako počet vzorků s porušením na vyšší hladině, neboli počet přechodů na každou hladinu ze zkoumané dvojice hladin je stejný.

4. Kritérium blokovacího schůdku (kritérium rozdílu počtu vstupů a počtu výstupů). Obdobně jako je vazba mezi počtem vzestupů a sestupů mezi dvěma sousedními hladinami, existuje vazba mezi počtem přechodů mezi jednou hladinou a vyšší hladinou a zároveň mezi toutéž hladinou a nižší hladinou. Tato vazba je porušena, pokud počet sestupů z i+1 hladiny je o jednu větší než počet vzestupů z i-té na i+1 hladinu a zároveň počet vzestupů z i-1 hladiny je o jednu větší než počet sestupů z i-té hladiny. Jedná se o celkový počet vstupů do hladiny, který by neměl převyšovat počet výstupů z této hladiny více než o jednu.

5. Kritérium rozdílu počtu výstupů a počtu vstupů. Toto kritérium je analogií kritéria blokovacího schůdku. Rozdíl mezi počtem výstupů z hladiny a počtem vstupů nesmí být větší než jedna.

6. Kritérium počtu hladin s nenulovým rozdílem vstupů a výstup. Počet hladin, které mají počet výstupů větší než počet vstupů, nesmí být větší než jedna.

7. Kritérium počtu vzorků. Minimální počet vzorku by měl být roven 4.

8. Kritérium minimálního počtu porušených a neporušených vzorků. Zkoumaná kombinace hladin napětí by měla obsahovat alespoň jeden porušený a jeden neporušený vzorek.

Kritéria 1 až 6 vyplývají z principu seřazení dat dle stupňové metody. Kritérium č. 7 vyplývá z úvahy, že počet vzorků menší než 4 nemá dostatečnou statistickou významnost. Jde pouze o úvahu a existují práce, ve kterých je pro stupňovou metodu používán počet vzorků menší než 4 [12]. Kritérium č. 8 je nezbytné pro použití metody.

Je možné sestavit i jiná kritéria, v jiném počtů a jiném znění, ale všechna další kritéria by nejspíše byla jenom dalšími variantami jedné nebo kombinací několika z uvedených kritérií. Pro všechny testované případy se uvedená kritéria jevila jako vyhovující.

Pokud nějaké kombinace vyhoví uvedeným kritériím, tyto kombinace budou seřazeny dle počtu vzorků, pro každou kombinaci bude vypočtena mez únavy dle stupňové metody a tyto kombinace budou nabízeny uživateli pro finální výběr té nejvhodnější.

Jak již bylo zmíněno, může nastat případ, kdy postup dle normy není jednoznačný. Jedná se o případ, kdy celkový počet porušených vzorků je roven celkovému počtu vzorků neporušených. V tabulce dle normy sloupec *f* se rovná sloupci *x* nebo *o*, právě v závislosti na tom, který z těchto sloupců obsahuje menší počet vzorků. V normě není uvedeno jak postupovat, když je tento počet stejný, a právě proto vzniká zmíněná nejednoznačnost. Pro všechny testovací příklady použité v této práci (např. Příloha 5, příklady 1 a 2) se však ukázalo, že pro zmíněný případ nejednoznačnosti, nezávislé na tom, zda sloupec *f* byl vztahován k sloupeci *x* nebo *o*, výsledky vycházejí stejné pro obě varianty. Vzhledem k tomu, že nebylo provedeno žádné další zkoumání této vlastnosti staircase metody, nejednoznačnost byla vyřešena úpravou algoritmu tak, že pokud takový případ nejednoznačnosti nastává, algoritmus počítá mez únavy oběma způsoby, tj. jednou když sloupec *f* se rovná sloupci *x* a podruhé když sloupec *f* se rovná sloupci *o*, a pak zvolí to řešení, které ve výsledku dává menší mez únavy.

Po volbě jedné z nabízených kombinací je uživatel vyzván zvolit místo pro umístění tabulky v aktivním excelovském listu. Uživatel volí jednu buňku odpovídající levému hornímu rohu tabulky, aplikace kontroluje, zda zvolená lokace obsahuje nějaká data a pokud ne, vykreslí tabulku dle normy [10] a daty dle provedených kriteriálních hodnocení a propočtů. Pokud by zvolená lokace nějaká data obsahovala, uživatel by byl na to upozorněn a měl by zvolit, jestli chce pokračovat, nebo zvolit jiné umístění nebo zrušit celou operaci.

Je důležité poznamenat, že pořadí vzorků ve vykreslené tabulce nemusí odpovídat pořadí, při jakém byly prováděny experimenty. To je dané tím, že pro některé případy lze schůdky dle normy sestavit více způsoby. Na výslednou mez únavy to však nemá žádný vliv.

Implementované vykreslení stupňové sekvence se dá rozdělit na dvě etapy:

1. Stanovení startovací hladiny a startovacího symbolu;

2. Samotné vykreslení sekvence;

První etapa je realizovaná dle následujícího algoritmu:

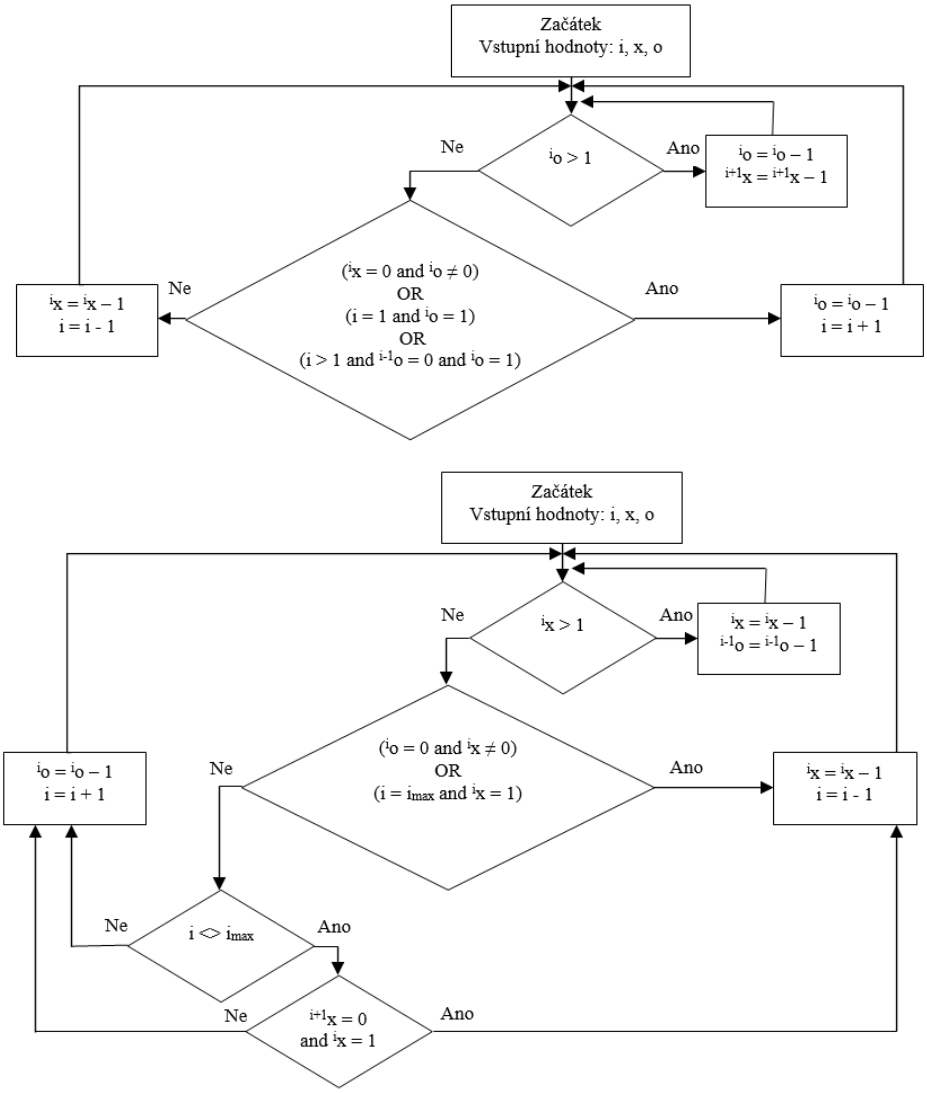
1) Pokud kombinace obsahuje hladinu, na kterou se nevracíme, startovací hladinou je tato hladina. Startovacím symbolem je pak x, pokud tato hladina obsahuje porušený vzorek, nebo o, pokud hladina obsahuje neporušený vzorek;

2) Pokud kombinace neobsahuje hladinu, na kterou se nevracíme, tak

a) Pokud kombinace obsahuje vazbu s počtem vzestupů/ sestupů větším než počet sestupů/ vzestupů na vyšší/ nižší hladině, startovací hladinou je hladina s větším počtem vzestupů/ sestupů. Algoritmus kontroluje hladiny od nejnižší, proto pokud takových hladin je více, startovací hladina bude nejnižší hladina z takovýchto hladin. Pokud převyšuje počet sestupů, startovacím symbolem je x, v opačném případě startovacím symbolem je o;

b) Pokud počty sestupů/ vzestupů mezi každou dvojicí hladin jsou stejné, startovací hladinou je nejvyšší hladina, pokud součet porušených a neporušených vzorků na nejvyšší hladině je větší než počet neporušených vzorků na předposlední hladině. Startovacím symbolem je pak x. V opačném případě startovací hladinou je první hladina a startovacím symbolem je o.

Druhá etapa v závislosti na startovacím symbolu se řídi jedním ze dvou vývojových diagramů uvedených na obr. 4:



Obr. 7: Vývojové diagramy pro startovací symboly *o* (nahoře) a *x* (dole). Označení: *i* je index hladiny; *x* je celkový počet porušených vzorků; *o* je celkový počet neporušených vzorků; ${}^{i}o$ je počet neporušených vzorků na hladině *i*; ${}^{i}x$ je počet porušených vzorků na hladině *i*; i_{max} je index nejvyšší hladiny. Ukončení cyklů: cykly se ukončí, jakmile celkový počet porušených a neporušených vzorků klesne na nulu.

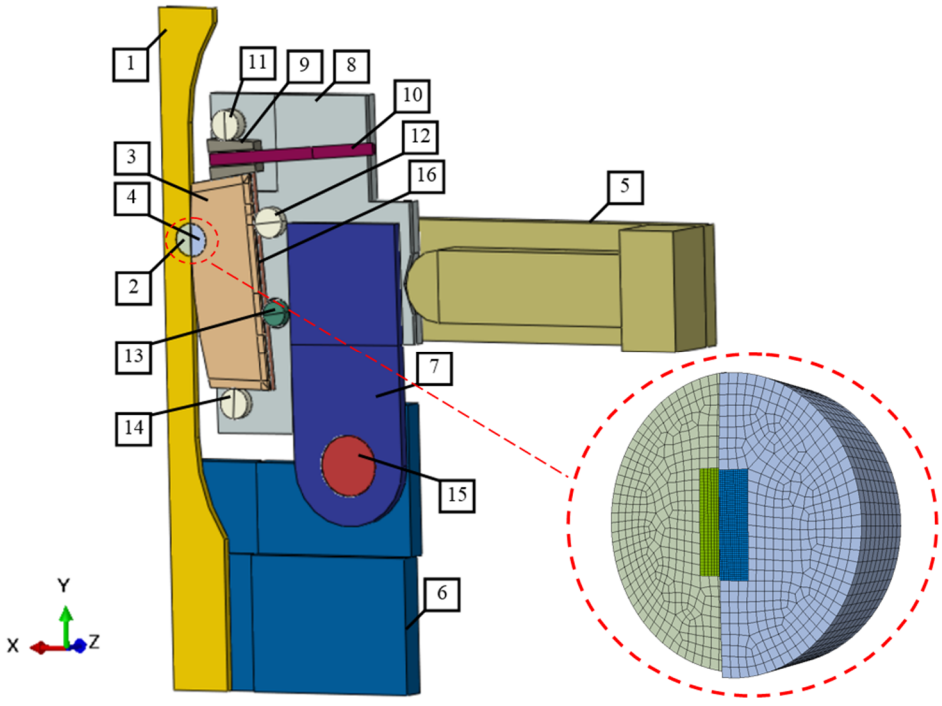
Všechny experimenty byly provedené v rámci této práce vyhodnoceny dvěma způsoby, a to výše popsanými algoritmy implementovanými do FinLivu a zároveň pro porovnání ručně pomocí excelovských tabulek. Výsledné tabulky pro amplitudy a střední hodnoty napětí jsou uvedeny v příloze 2 a 3. Drobný rozdíl ve výsledcích je způsoben tím, že hodnoty středního napětí v tabulkách získaných ručním vyhodnocením jsou odvozené z hodnot střední síly a přesto, že se zobrazuji s přesností na jedno desetinné místo, Excel s nimi počítá jako s čísly zaokrouhlenými na více desetinných míst. Dá se to ověřit ručním přepsáním těchto čísel. Pak výsledky jsou zcela stejné.

Pro některé případy je vidět, že pořadí zkoušené sekvence stanovené algoritmem vyšlo jinak, než probíhalo testování ve skutečnosti. To jsou právě případy, kdy se sekvence dají sestavit více způsoby. Je také vidět že na výsledky to nemá žádný vliv. To je důsledkem metodiky vyhodnocení podle stupňové metody, která nepoužívá pro vypočet pořadí sekvenci, ale pouze počty porušených a neporušených vzorků na jednotlivých hladinách, které pro různé pořadí vzorků zůstávají stejné.

5 Modelování experimentů v programu Abaqus

Po vyhodnocení amplitud a středních hodnot axiálních sil odpovídajících hladině meze únavy zkušebních vzorků pro daný přítlak, byly tyto účinky použity pro numerický výpočet s cílem získání časového a prostorového průběhu lineárně elastického napětí v místě kontaktu. Výpočet byl proveden numerickou simulací v prostředí programu Abaqus. Výpočetní model byl vytvořen vlastní úpravou dodané geometrie s využitím dvou rovin symetrie (Obr. 8). V rámci této práce byl vytvořen prvotní návrh globálního modelu. Samotné ladění modelu potom probíhalo ve spolupráci s Ing. Martinem Nesládkem. V konečné fázi bylo přistoupeno k verzi využívající submodely kontaktní lokality z důvodu přesnějšího popisu napjatosti. Následující text bude omezen především na popis hlavních entit globálního modelu.

5.1 Součástí sestavy



Obr. 8: 3D model zkušebního přípravku a vzorku materiálu (vlevo) a submodel kontaktní oblasti (vpravo). (1) zkušební vzorek, část pro hrubou síť; (2) zkušební vzorek, část pro jemnou síť; (3) přitlačovací kamen, část pro hrubou síť; (4) přitlačovací kamen, část pro jemnou síť; (5) boční část přípravku namodelovaná společně s přitlačovacím kamenem; (6) dolní část přípravku; (7) otočná část přípravku; (8) horní část přípravku; (9) klín; (10) stavěcí šroub; (11), (12), (13), (14), (15) čepy; (16) plíšek.

Vzorek s přípravkem byly modelovány jako soustava 3D poddajných těles. Vzhledem k tomu, že úloha má (s jistou mírou zjednodušení) dvě roviny symetrie, byla modelovaná jen jedna čtvrtina soustavy. Uložení v čelistech a zatížení od zkušebního stroje byla nahrazena kinematickými a silovými okrajovými podmínkami (viz kapitola 5.2). Na Obr. 8 jsou očíslovány jednotlivé součásti zahrnuté do výpočetního modelu.

Zkušební vzorek byl rozdělen na dvě separátní instance, a to část vyhrazenou pro aplikaci hrubší sítě (1) a část vyhrazenou pro aplikaci jemné sítě (2). Část s jemnou sítí reprezentuje místo frettingového kontaktu, proto s cílem získání co nejpřesnějšího výpočtu v této oblasti musí tato část modelu mít co nejjemnější síť. Stejným způsobem je rozdělen model přitlačovacího kamene (3 a 4). Toto rozdělení umožňuje použití mnohem hrubší sítě na částech vzorku a kamene, které jsou vzdálené od frettingového kontaktu (1 a 3). Kdyby vzorek a přitlačovací kamen nebyly rozdělovány na dvě části, změna velikosti elementů směrem od kontaktního místa by mohla být provedena jen postupnou změnou. Počet elementů by v tom případě byl větší a proto i výpočetní čas by byl delší.

Část modelu přípravku (5) představuje zjednodušený model soustavy táhel (obr. 5, čísla 13 až 19). Předepínáním této části jsou vyvozeny účinky reprezentující přítlak kamenů na vzorek.

Zbylá část výpočetního modelu reprezentuje zjednodušený model přípravku.

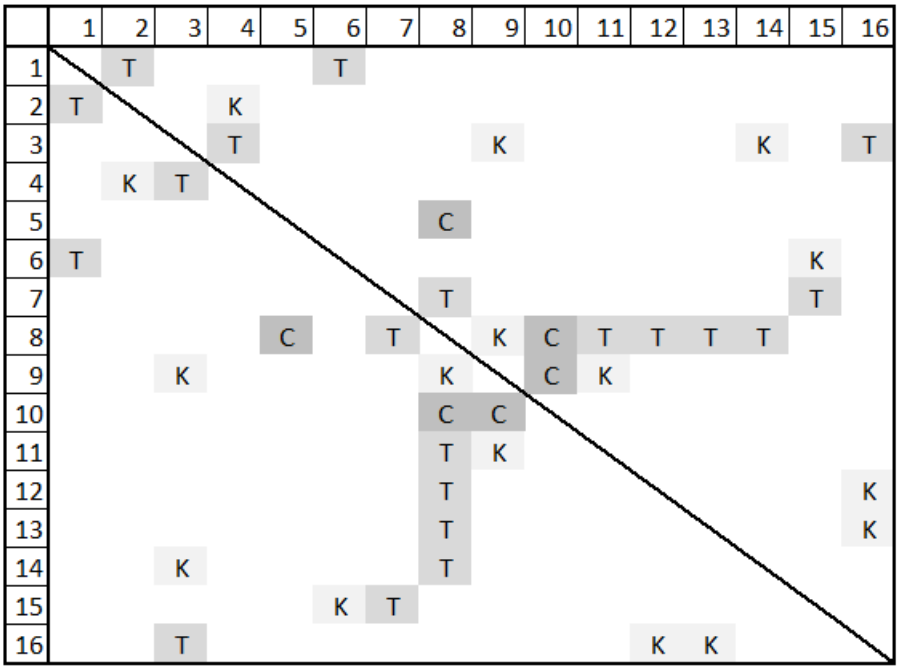
5.2 Kontaktní vazby

Mezi řadou instancí modelu byl nastaven typ vazby nahrazující reálné kontaktní chování s Coulombovým třením. V normálovém směru byla definována vazba nulových penetraci kontaktních ploch (tzv. „tvrdý“ kontakt). V tangenciálním směru je pro většinu případů nastaven koeficient tření 0,2. Pro frettingový kontaktní pár (tj. kámen-vzorek (2, 4)) byla nastavena hodnota koeficientu tření 0,5, která byla pro tento kontaktní pár stanovena metodou korelace digitálního obrazu (DIC) [13].

Řada dalších kontaktů byla idealizována vazbou typu Tie, která zaručuje nulové tangenciální i normálové vzájemné posuvy kontaktních ploch. Taková vazba reprezentuje případy, kdy se součástky vzájemně nepohybují, např., v případě svěrného šroubového spoje.

Dále byla vytvořena řada Coupling vazeb, které rovnoměrně rozdělují silové a kinematické účinky z řídícího bodu na vazebnou plochu. Takováto vazba byla aplikovaná například v horní části vzorku z důvodu rovnoměrného rozložení axiální síly na čelní plochu vzorku.

Obr. 9 udává informaci o typech vazeb mezi konkrétními kontaktními dvojicemi.



Obr. 9: Typy kontaktních vazeb mezi instancemi modelu zkušebního přípravku. (1) zkušební vzorek, část pro hrubou síť; (2) zkušební vzorek, část pro jemnou síť; (3) přitlačovací kámen, část pro hrubou síť; (4) přitlačovací kamen, část pro jemnou síť; (5) boční část přípravku namodelovaná společně s přitlačovacím kamenem; (6) dolní část přípravku; (7) otočná část přípravku; (8) horní část přípravku; (9) klín; (10) stavěcí šroub; (11), (12), (13), (14), (15) čepy dle obr. 5; (16) plíšek. Zkratky: K … kontaktní vazba s Coulombovým třením; T … tie vazba; C … coupling vazba.

5.3 Uložení soustavy

Uložení soustavy bylo realizováno pomocí následujících kinematických okrajových podmínek:

1. Uložení referenčního bodu coupling vazby pro aplikaci a distribuci axiální síly na horní čelní plochu vzorku. Tato podmínka představuje uložení vzorku (1) v horní čelisti zkušebního stroje. Podmínka zamezuje všem posuvům a natočením, kromě posuvu ve směru y (axiální směr). Směr y je ponechán pro následující cyklické zatěžování vzorku (1).

2. Podmínka kontaktu táhel (5) a přípravku zakazuje všechny posuvy a rotace, kromě posuvu ve směru x a rotace kolem osy z, které pak umožnuji přitlačení táhel (5) a jejich ustavení vůči přípravku (8).

3. Podmínky rovin symetrie. Jak již bylo zmíněno, soustava přípravku, táhel a vzorku má dvě roviny symetrie. Aby deformační a napěťová odezva modelované čtvrtiny soustavy tuto vlastnost respektovala, je potřeba aplikovat podmínky symetrie, neboli zamezit posuvům ve směru normál k rovinám symetrie.

4. Náhrada uložení v dolní čelisti stroje. Pro nahrazení uložení přípravku v dolní čelisti byla na spodní část přípravku (6) aplikovaná podmínka, která zakazuje posuvy ve všech třech souřadných směrech.

5.4 Simulace zatěžování

Upnutí vzorku bylo simulováno ve čtyřech statických krocích přibližně odpovídajících postupu montáže přípravku a vzorku ve zkušebním stroji:

1. Přítlak. V prvním kroku byly aplikované přítlačné síly v rámečku (5) a stavěcím šroubu (10). Síla v rámečku (5) odpovídá přítlačné síle kamenů (3, 4) ke vzorku (1, 2). Síla v stavěcím šroubu (10) přibližně odpovídá nedotaženému stavu šroubu (10) a byla rovna hodnotě 50 N. Předepínací síla v stavěcím šroubu (10) o velikosti 50 N byla zaveden z důvodu ustavení kontaktních vazeb mezi klínem (9) a přítlačným kamenem (3) a tedy i lepší konvergence úlohy v dalším průběhu analýzy.

2. Předepnutí vzorku (1). Ve druhém kroku na vzorek (1) ve směru osy y bylo aplikováno předpětí, které odpovídá hodnotě střední síly zatěžovacího cyklu.

3. Dotažení klínu (9) (doupnutí přítlačných kamenů (3, 4)). V dalším kroku byla aplikovaná síla, která simuluje dotažení klínu (9) přes stavěcí šroub (10).

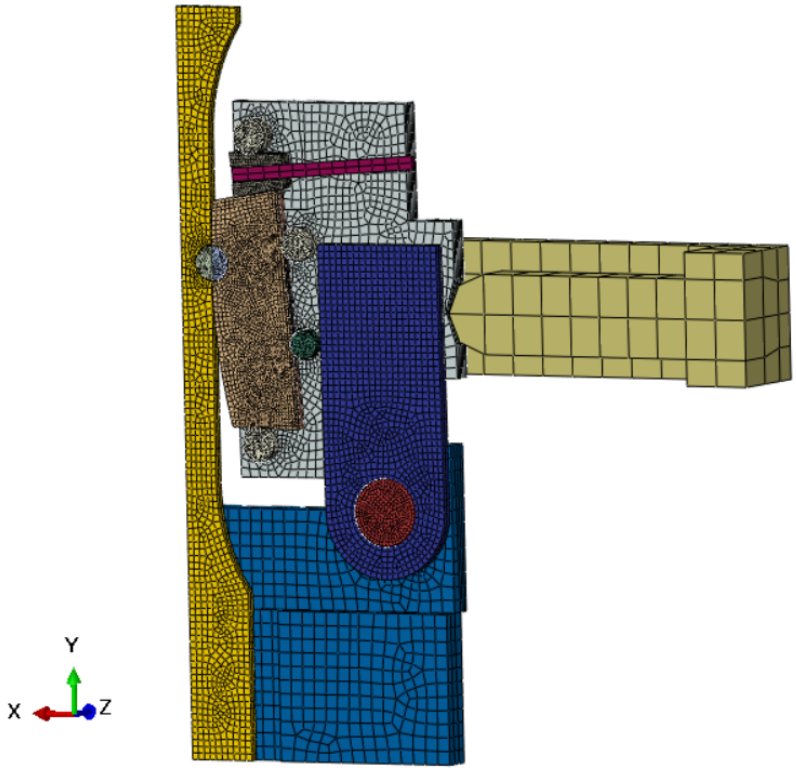
4. Zafixování šroubu (10) a táhel (5). V posledním kroku představujícím upnutí vzorku bylo provedeno zafixování posuvů předepínacího šroubu (10) a rámečku (5) daných předepínacími silami. Zafixování bylo provedeno metodou „fix at current length“, což v podstatě znamená, že předpětí vyvozené v předchozích krocích bude v dalším výpočtu funkcí deformační odezvy přípravku.

Na účinky simulované v těchto statických krocích byly dál superponované časově závislé účinky simulující jednak axiální cyklickou sílu na vzorku a jednak setrvačné účinky pohybujících se hmot přípravku a vzorku. Hodnoty axiální cyklické síly byly získány jednoduchým převodem (vynásobení napětí plochou průřezu) z hodnot amplitudy a středního napětí (Příloha 2) při znalosti plochy průřezu vzorku 120 mm^2.

Kroky odpovídající dynamickému zatěžování byly definovány tak, aby první krok tvořil čtvrtinu cyklu a představoval nárůst periodické složky axiálního zatížení z 0 na maximum. Následující kroky představovaly polovinu periody cyklu, tj. přechod z horní úvratě do dolní a naopak, přičemž simulovány byly celkem čtyři cykly z důvodu potřeby ustavení odezvy přípravku na zatížení.

5.5 Výpočetní síť modelu

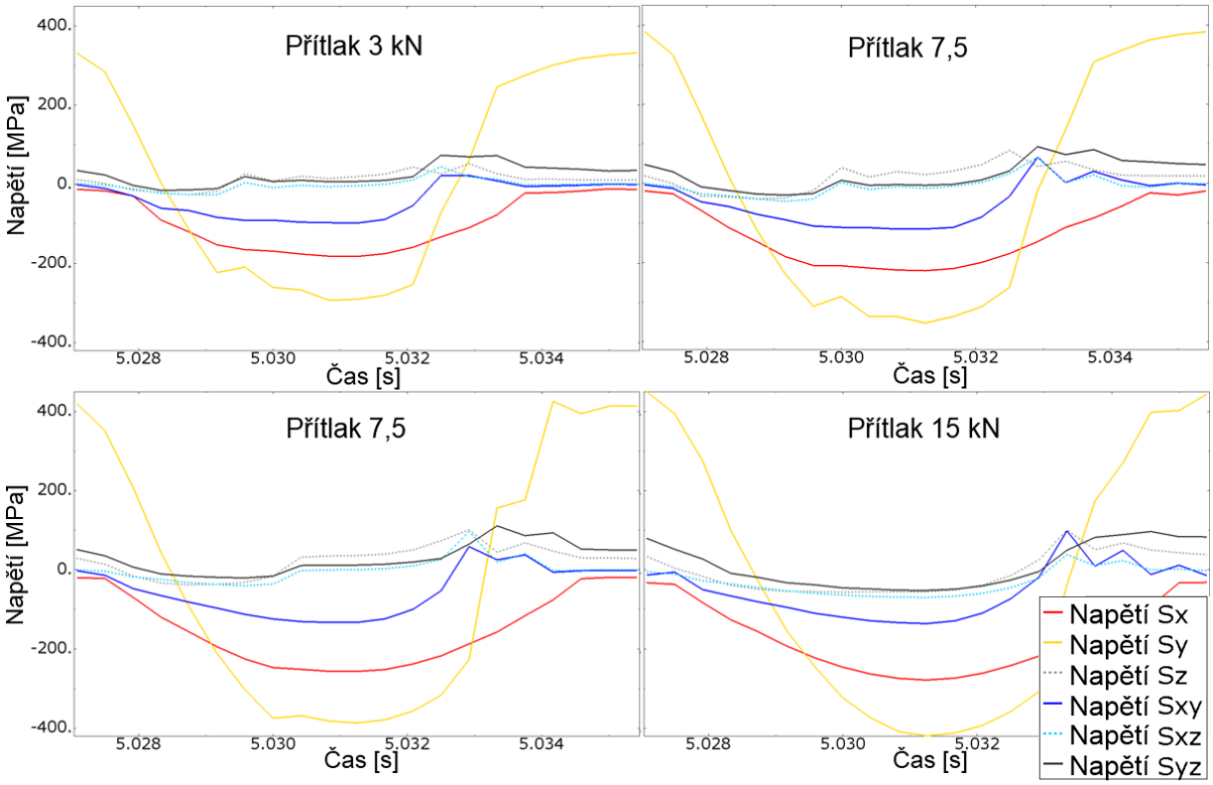
Z důvodu co největší úspory výpočetního času byla většina geometrie přípravku síťována relativně hrubší sítí lineárních šestistěnných elementů. Výrazné zjemnění bylo voleno pouze v místě kontaktu kamene a vzorku, tj. v kritickém místě z hlediska únavového poškozování. Zde byla zvolena velikost elementu 0,1 mm (obr. 7). Submodely kontaktní oblasti byly tvořeny sítí s poloviční velikostí elementu, tedy s délkou hrany přibližně 0,05 mm.



Obr. 10: Výpočetní síť 3D globálního modelu zkušebního přípravku a vzorku materiálu

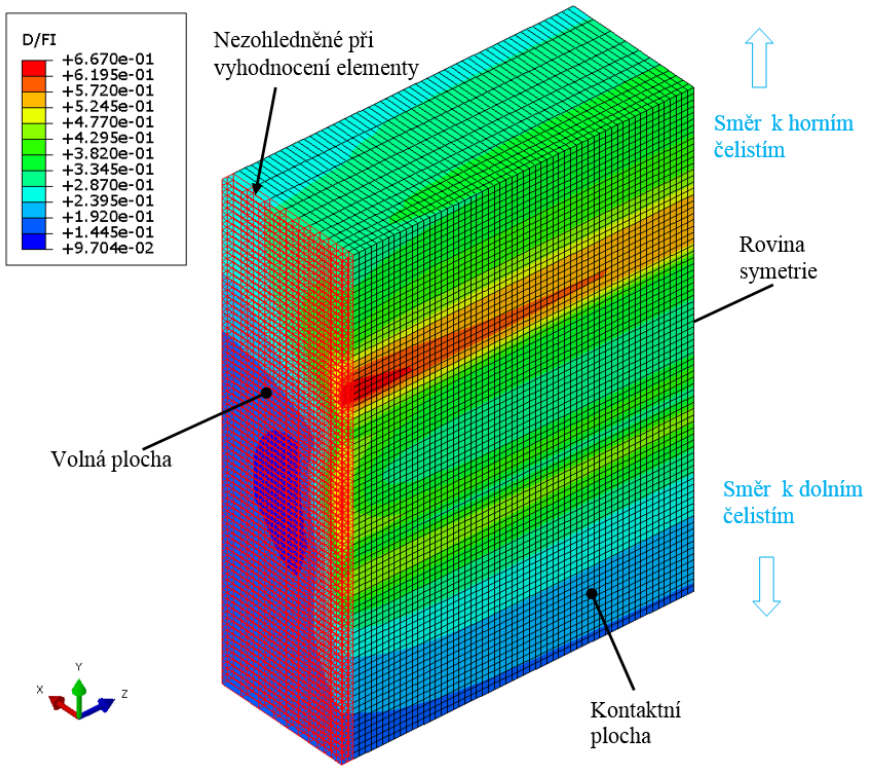
5.6 Výsledky MKP simulace

Na Obr. 11 jsou zobrazeny průběhy složek napětí v globálním souřadném systému submodelu vzorku (Obr. 12) v čtvrtém cyklu dynamického zatěžování v uzlech s největší hodnotou parametru Fatigue Index (viz kapitola 6). Souřadný systém vzorku a submodel vzorku (Obr. 12) jsou umístěny vůči sobě tak, že x-ová osa je normálou ke kontaktní rovině vzorku, , y-ová osa je rovnoběžná s osou, ve směru které působí cyklické zatěžování vzorku, a z-ová osa je kolmá k volné ploše a ploše symetrie vzorku. Čtvrtý cyklus zatěžování byl zvolen vzhledem k ustálení střední hodnoty zatěžovací síly kvůli povolování přítlaku. Uzly, pro které jsou vykresleny průběhy napětí, jsou kritická místa na submodelu vzorku a byly zvoleny na základě polohy maxima parametru Fatigue Index pro jednotlivé hladiny přítlačných sil (viz kapitola 6).



Obr. 11: Průběhy složek napětí dle souřadnicového systému submodelu vzorku (Obr. 12) v čtvrtém cyklu dynamického zatěžování v uzlech s největší hodnotou parametru Fatigue Index dle výpočtů v PragTicu: uzel č. 2652 (Přítlak 3 kN), uzel č. 2568 (Přítlak 7,5 kN), uzel č. 3528 (Přítlak 10 kN), uzel č. 2520 (Přítlak 15 kN). Všechny uzly jsou umístěny na submodelu vzorku.

Jak je vidět z grafů na Obr. 11 největších hodnot rozkmitů napětí během zatěžovacího cyklu dosahuje složka ve směru osy y, což odpovídá směru cyklického natahování a stlačování vzorku. Složka napětí ve směru přitlačení kamenem S_x je maximální, když je vzorek stlačován ve směru osy y. To je dáno vlivem stlačování vzorku v podélném směru, kdy naopak v příčném směru dochází k roztahování materiálu, což ve směru osy x vede ke zvětšení tlaku na přitlačovací kámen. Naopak, když je vzorek roztahován složka S_x klesá a je skoro nulová pro největší hodnoty složky S_y. Složka ve směru osy z reprezentuje napětí ve směru volné plochy vzorku, ve které vzorek není v kontaktu se žádnou další součástkou. Tomu odpovídají hodnoty složky S_z, které jsou v tomto směru výrazně menší než ve dvou ostatních směrech. Smykové napětí S_{xy} je důsledkem Coulombovského tření mezi kontaktními plochami.



Obr. 12: Submodel vzorku pro případ 3 kN s vyznačenými elementy, které nebyly zohledněné při odečtení výsledků. Natočení submodelu na obrázku odpovídá reálnému umístění vzorku v čelistech: směr od horní části submodelu k dolní odpovídá směru od horních čelistí k dolním. Barevná škála odpovídá rozložení hodnot parametru Fatigue Indexu na submodelu vzorku.

Vzhledem k tomu, že tensor vykazuje dvojici výrazných normálových napětí (napjatost lze přibližně klasifikovat jako dvouosou), je tímto opodstatněné nasazení metod predikce multiaxiální únavy.

Průběhy hlavních napětí ve zvolených uzlech jsou k nahlédnutí v příloze 6. Vybrané uzly jsou vyznačeny na submodelu vzorku v příloze 7.

6 Predikce únavy

V kapitole 2 byly stručně shrnuty různé způsoby výpočtu únavy v podmínkách frettingu. V předchozí kapitole byla na časových průbězích složek tensoru napětí zdůvodněna vhodnost nasazení metod predikce multiaxiální únavy. V této práci byla pro účely testování zvolena Dang Vanova metoda a tato kapitola se zabývá postupy a vyhodnocením výpočtu s využitím této metody.

Důvodem volby Dang Vanovy metody je její rozšířené použití ve výpočetních programech. Pro aplikaci Dang Vanova modelu byly zvoleny dva únavové řešiče dostupné na Odboru pružnosti a pevnosti FS ČVUT v Praze – MSC Fatigue a PragTic. Cílem bylo ověřit jak přesně Dang Vanův model v obou řešičích únavu v podmínkách frettingu predikuje a porovnávat výsledky získané oběma řešiči.

Řetězec vyhodnocení, počínající zpracováním výsledků zkoušek a končící posouzením účinku cyklického namáhání vzorků na jejich únavovou pevnost, vypadal následovně:

1. Stanovení mezí únavy z provedených experimentů pro přítlaky 3 kN, 7,5 kN, 10 kN a 15 kN (viz kapitola 4).

2. Numerická simulace cyklického namáhání vzorku v místě kontaktu s přítlačným kamenem při zatěžování, které odpovídá stanoveným hladinám mezí únavy, s cílem získat časové průběhy napětí v místě kontaktu (viz kapitola 5).

3. Export získaných průběhů napětí v místě kontaktu z programu Abaqus do dvou zvolených únavových řešičů – MSC Fatigue a PragTic.

4. Aplikace Dang Vanovy metody na časové historie napětí.

5. Zobrazení výsledků pomocí parametru Fatigue Index. V případě softwaru MSC Fatigue řešič po dokončení vyhodnocení poskytl hodnotu parametru Safety Factor. Tento parametr je interním parametrem daného softwaru a na rozdíl od parametru Fatigue Index (viz kapitola 2) nevyjadřuje bezpečnost vůči materiálovému parametru jakým je mez únavy [14]. Proto

parametr Safety Factor byl pak pomocí vztahu (8) přepočítán na parametr Fatigue Index, který je běžně v literatuře používaným měřítkem únavové pevnosti. V případě softwaru PragTic výsledky bylo potřeba exportovat zpátky do prostředí programu Abaqus, vzhledem k tomu, že PragTic nemá vlastní grafické prostředí pro zobrazení výsledků, které je užitečné pro získání celkového přehledu o rozložení vypočtených hodnot na numerickém modelu.

6. Vyhodnocení výsledků. Jelikož do výpočtů vstupovaly hodnoty napětí odpovídající hladině únavy, hodnota Fatigue Indexu by se měla v případě ideálně přesného řešiče rovnat jedné. Vychází-li hodnota Fatigue Indexu menší než jedna, svědčí to o tendenci řešiče k nekonzervativním výsledkům. Je-li tato hodnota větší než jedna, vypovídá to naopak o tendenci řešiče ke konzervativním výsledkům.

Body 3 až 6 jsou podrobně popsány v následujících dvou podkapitolách.

6.1 Výpočet v MSC Fatigue

Pro predikci únavy pomocí Dang Vanovy metody byly zvoleny dva únavové řešiče, ve kterých je tato metoda implementována – jako první MSC Fatigue ve formě pluginu pro graficky pre- a postprocesor MKP modelů MSC Patran a druhý program PragTic vyvinutý na Fakultě strojní ČVUT v Praze. V této podkapitole je popsán postup přípravy a spuštění analýzy pomocí MSC Fatigue.

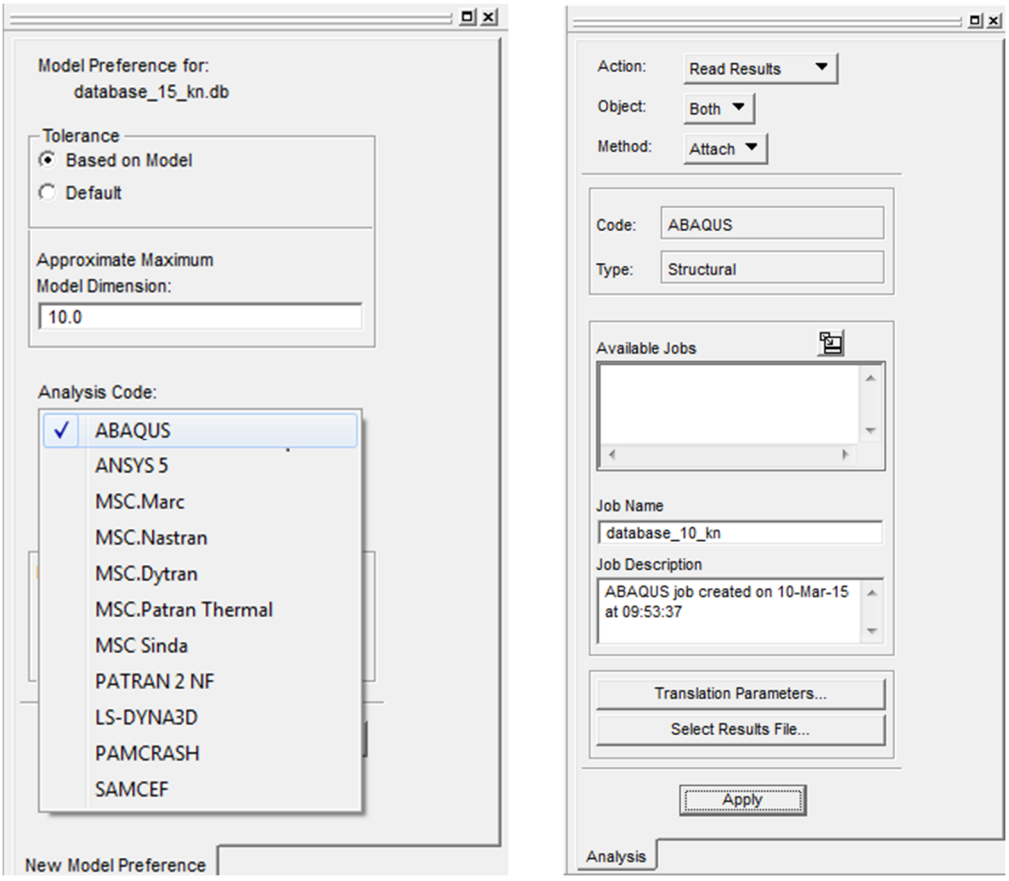
6.1.1 Načtení modelu

Pro použití únavového řešiče MSC Fatigue je potřeba výsledky z programu Abaqus ve formátu výstupní databáze (soubor s příponou „odb“) načíst do Patranu. Tyto výsledky byly získány numerickou simulací metodou konečných prvků (viz kapitola 5) a obsahují mimo jiné pole napětí v místě kontaktu pro zvolené časové inkrementy. ODB soubor může být uložen do libovolného adresáře a nemusí se nacházet v adresáři vytvořeném pro soubory MSC řešiče, protože MSC Patran ukládá odkaz na ODB soubor do vlastní databáze.

Před načtením souboru s výsledky je potřeba vytvořit novou prázdnou modelovou databázi, do níž budou načteny výsledky a topologie modelu z ODB databáze Abaqusu. Vzhledem k tomu, že v průběhu práce s MSC Fatigue je nutno použít příkazový řádek a příkazový řádek

nerozeznává mezery v názvech složek, je lepší, aby název databáze a názvy jednotlivých složek, ve kterých databáze bude umístěna, neobsahovaly mezery.

V dialogovém okně „New Model Preference“ (Obr. 13), které se otevře automaticky po vytvoření nové prázdné databáze, je dále nutno specifikovat datový typ výsledků, s nimiž bude program pracovat. Ten se nastavuje v poli Analysis Code volbou MKP řešiče, kterým byla simulace prováděna. Ostatní nastavení v okně „New Model Preference“ je možné ponechat na standardních hodnotách.



Obr. 13: Dialogové okno „New Model Preference“ (vlevo) a dialogové okno „Analysis“ (vpravo)

Načtení výsledků probíhá pomocí dialogového okna „Analysis“ (Obr. 13, vpravo), které se spouští tlačítkem „Analysis“ v řádku nástrojů. V tomto oknu je potřeba specifikovat, že akce, kterou bude provádět, je načtení výsledků (volba „Read Results“), že má načíst jak geometrii, tak i výsledky uložené v „odb“ databázi (volba „Both“ pro parametr „Object“) a zvolit metodu „Attach“, která se používá pro výsledky ve formátu „odb“. V okně „Translation Parameters“, které se spustí příslušným tlačítkem, je možné nastavit, zda budou načítány také

invariantní hodnoty (pro výpočty pomocí Dang Vanovy metody nejsou potřeba). Nakonec pomocí tlačítka „Select Result File“ se zvolí požadovaná ODB databáze a zmačknutím tlačítka „Apply“ se spustí proces načtení topologie a výsledkových polí do databáze Patranu. Jakmile je načtení dokončeno, v grafickém okně „Viewport“ se zobrazí model, který reprezentuje kontakt mezi vzorkem a přitlačovacím kamenem. Ačkoliv v grafickém okně se zobrazí jenom síť, načten je celý model včetně výsledků.

6.1.2 Zadání mechanických vlastností materiálu potřebných pro únavový výpočet Dang Vanovou metodou

Zadání materiálových parametrů pro únavové výpočty se realizuje již v samotném prostředí MSC Fatigue. Ten disponuje materiálovou databází, která je přístupná z jeho hlavního dialogového okna. Toto okno je dostupné z hlavního menu Patranu pod položkami „Tools → MSC.Fatigue → Main Interface“. V okně „MSC.Fatigue“ je nutno kliknout na tlačítko „Material info…“, v novém okně otevřít správce materiálové databáze a vytvořit nový materiál. Pro výpočet s použitím Dang Vanovy metody je nutno zadat mez pevnosti, modul pružnosti[1] a také parametry v databázi označované zkratkami *TAFE* a HSS. TAFE je mez únavy ve střídavém krutu. Parametr HSS je faktor citlivosti hydrostatického napětí (hydrostatic stress sensitivity factor) a počítá se dle vztahu (7).

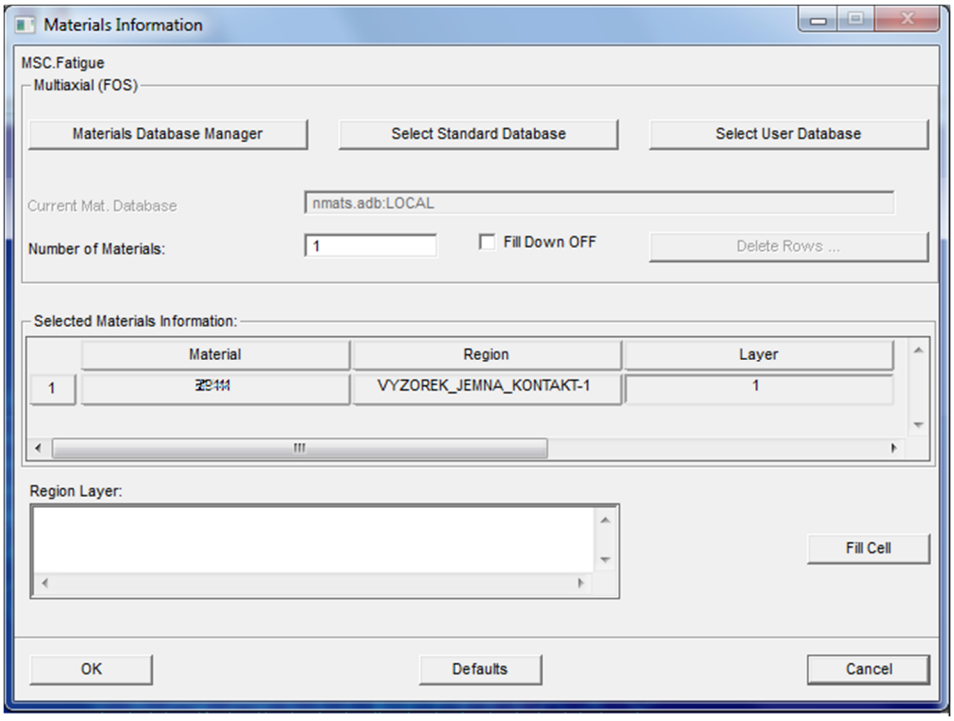
$$HSS = 3.\left(\frac{TAFE}{TypeB} - \frac{1}{2}\right) \tag{7}$$

Kde *TypeB* je mez únavy ve střídavém tahu.

Není třeba vytvářet nový materiál pro každou novou úlohu, jelikož již po prvním vytvoření je uložen do databáze. V případě že nová úloha je umístěna do jiné složky, materiálovou databázi je potřeba zkopírovat do též složky. Toto se udělá jednoduše zkopírováním souboru s příponou „mdb“. Při následném otevření materiálové databáze bude obsah MDB souboru automaticky identifikován a k dříve vytvořeným materiálům bude umožněn přístup.

[1] Tyto statické parametry nejsou pro výpočet pomocí Dang Vanovy metody potřevné, nicméně jsou nutnou podmínkou pro uložení nového materiálu v databázi Patranu.

Po zadání materiálu v materiálové databázi je nutné v dialogovém okně „MSC.Fatigue“ přepnout typ analýzy na „Multiaxial. FOS“ (Obr. 15, okno „MSC.Fatigue“) a v okně „Solution Parameters“, které ze zavolá z okna „MSC.Fatigue“, nastavit Dang Vanovu metodu analýzy. Pokud se toto neučiní, nemusí se nový materiál zobrazit v nabídce materiálů pro přiřazení materiálu modelu, jelikož v této nabídce se zobrazují pouze ty materiály, které obsahují všechny potřebné parametry pro zvolenou úlohu.

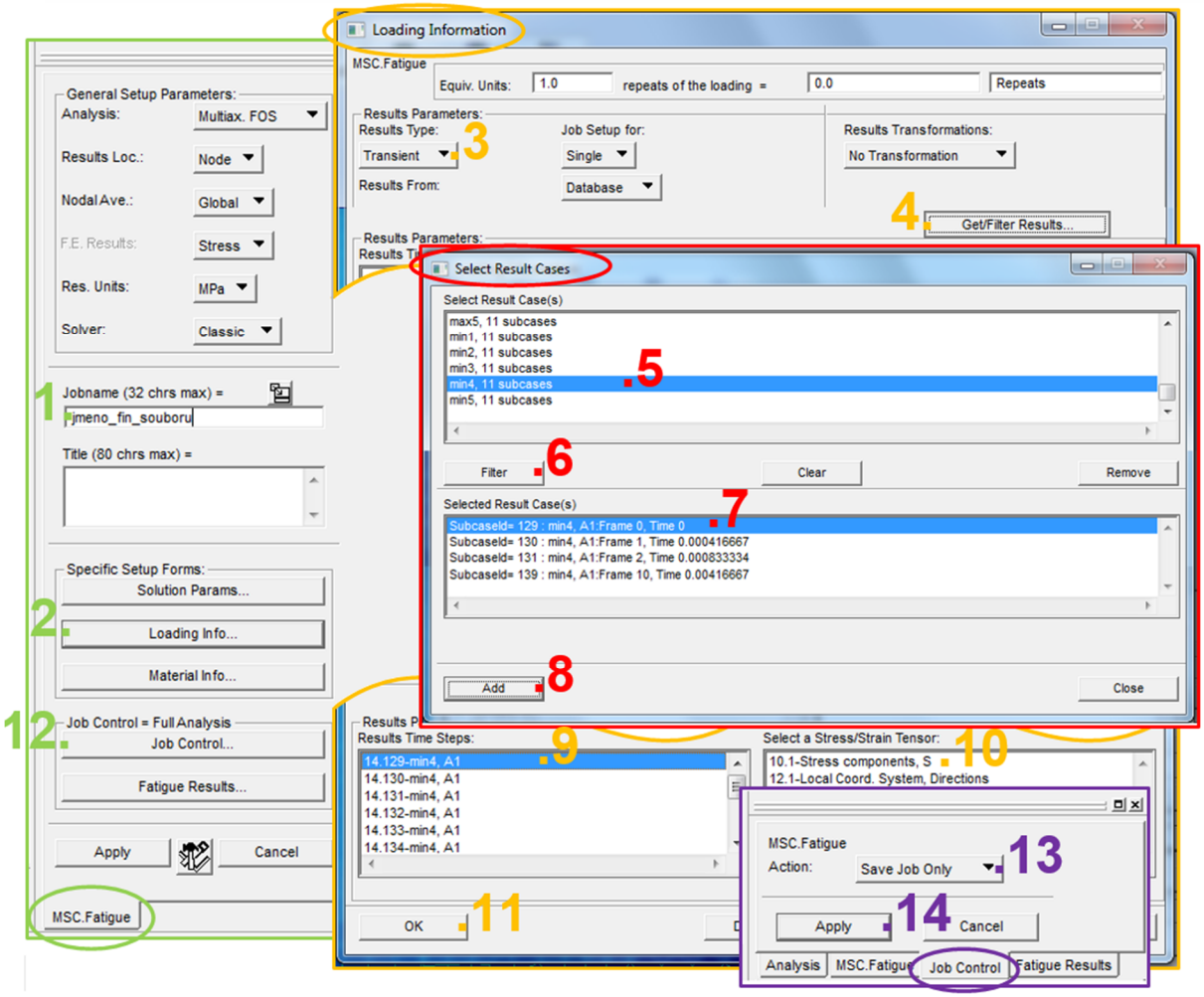


Obr. 14: Dialogové okno „Materials Infromation“

Přiřazení materiálu požadované množině elementů MKP modelu probíhá v poli „Selected Materials Information“ okna „Materials Information“ (Obr. 14), které se spustí z okna „MSC.Fatigue“. Zde je nutné kliknout na prázdnou buňku, která se nachází pod buňkou s nadpisem „Material“, a zvolit potřebný materiál z nové nabídky. V buňce „Region“ je potřeba zvolit oblast „VZOREK_JEMNA_KONTAKT-1“, která odpovídá kontaktní oblasti na vzorku vytvořené a pojmenované v programu Abaqus. Ostatní buňky v poli „Selected Materials Information“ lze ponechat na standardních hodnotách.

6.1.3 Příprava a spuštění výpočtu

Spuštění samotného výpočtu v MSC Fatigue je však poněkud problematické. Hlavním problémem je to, že kvůli chybám v kódu MSC Fatigue (v této práci byla používána verze 2013 64-bit) nelze provést zadání zatěžovací historie přímo přes grafické rozhraní. Proto je potřeba nastavení zadat ručně v textovém formátu do souboru s příponou „fin“ (podrobně popsáno dál), kam by se tato nastavení automaticky zapsala v případě bezchybného fungování programu. Poté je možné spustit z příkazové řádky překladač „fattrans“, který na základě uživatelských předvoleb uložených ve FIN souboru připraví úlohu (soubor s příponou „fes“) pro únavovou analýzu.



Obr. 15: Vytvoření FIN souboru. Čísla odpovídají jednotlivým bodům v níže uvedeném postupu

Pro vytvoření základní struktury FIN souboru, který bude dále upravován v textovém režimu, lze postupovat dle Obr. 15 a následujícího textu:

1. Do políčka „Jobname“ v okně „MSC.Fatigue“ je nutno zadat název úlohy, který zároveň bude jménem FIN souboru.

2. Dále je potřeba přejít do okna „Loading Information“. V případě bezchybného fungování programu by zde bylo možné nastavit celou historii zatěžování. Ovšem aktuální funkčnost dovoluje použít časovou historii pouze z jednoho kroku MKP analýzy. Celou časovou historii je nutné sestavit ručně v textovém režimu FIN souboru.

3. V okně „Loading Information“ je potřeba přepnout hodnotu pole „Result Type“ na „Transient“.

4. Zmačknutím tlačítka “Get/ Filter Results” se zavolá okno „Select Result Cases“.

5. V novém okně „Select Result Cases“ se uvádí jednotlivé kroky zátěžné sekvence. Je vhodné zvolit jeden ze dvou, které popisují čtvrtý cyklus dynamického zatěžování při numerické simulaci. Jak již bylo řečeno v kapitole 6.3, čtvrtý cyklus zatěžování byl zvolen vzhledem k ustálení střední hodnoty zatěžovací síly kvůli povolování přítlaku. První půlce čtvrtého cyklu odpovídá krok min4, druhé půlce čtvrtého cyklu odpovídá krok max5.

6. Po volbě některého z kroků ve stejném okně je potřeba kliknout na tlačítko “Filter”.

7. Dále je nutno zvolit libovolný řádek z pole “Selected Result Case(s)”.

8 Tlačítkem “Add” se potvrdí volba a uživatel bude přesměrován zpátky do okna „Loading Information“, kde se v poli “Results Time Steps” okna objeví řádky, které odpovídají jednotlivým časovým inkrementům zvolené půlky cyklů.

9. Z tohoto seznamu je nutno zvolit libovolný řádek.

10. Následovně je potřeba zvolit v poli „Select a Stress/Strain Tensor“ hodnotu „10.1-Stress component, S“.

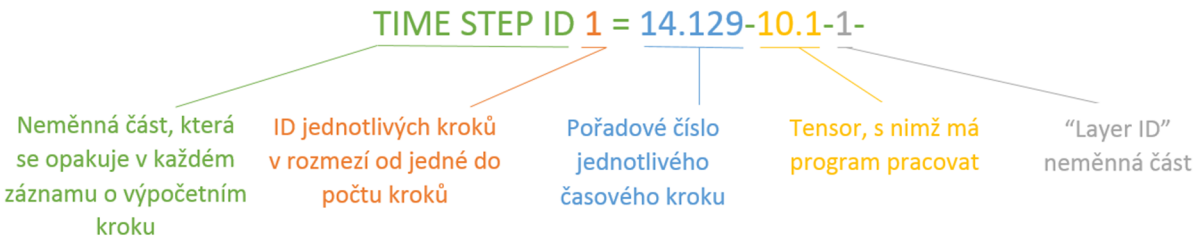
11. Zmačknutím tlačítka „Ok“ se potvrdí zvolené nastavení.

12. Dále je nutno přejít do okna „Job Control“ zmačknutím příslušného tlačítka.

13. V okně „Job Control“ je nutno v nabídce akcí zvolit „Save Job Only“ a kliknout na tlačítko „Apply“.

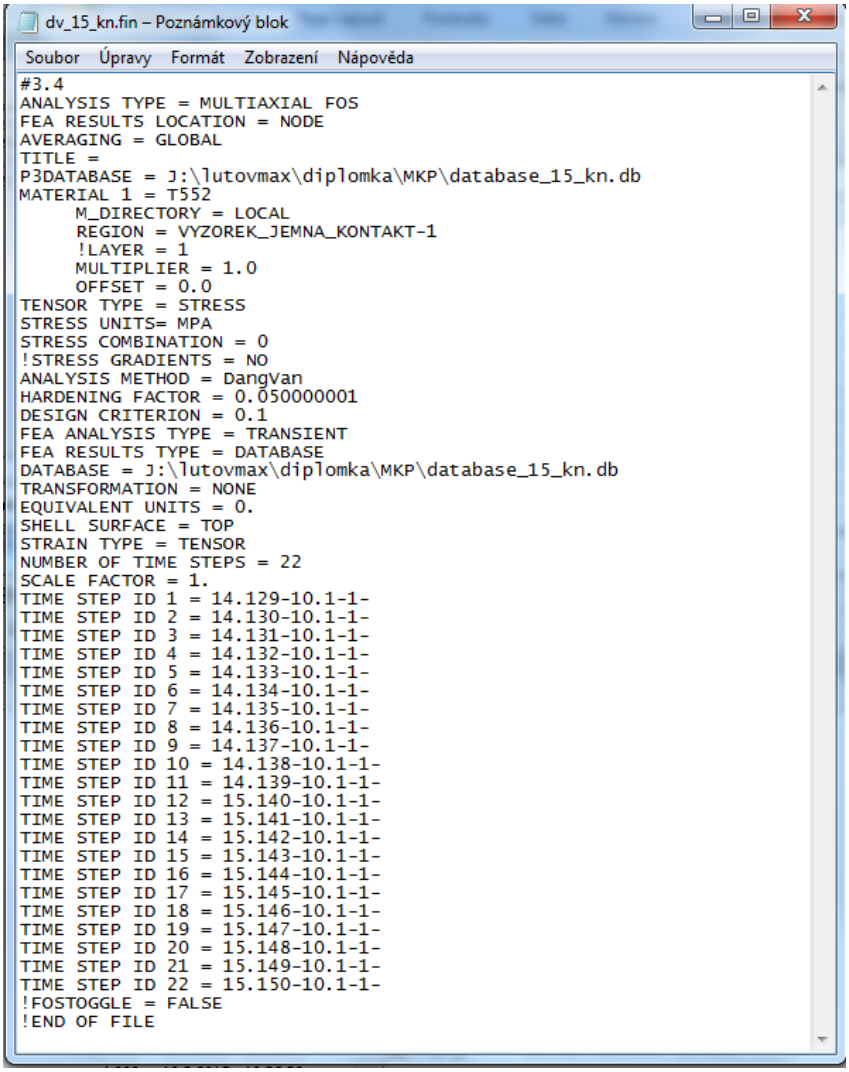
14. FIN soubor se vytvoří po zmačknutí tlačítka „Apply“ v pracovním adresáři.

Ve FIN souboru je po jeho otevření v libovolném textovém editoru potřeba upravit dvě položky, a sice počet výpočetních kroků a seznam udávající historii zatěžování. Počet výpočetních kroků odpovídá celkovému počtu časových inkrementů načítaných z ODB souboru pro sestavení časové historie zatěžování uvažované v únavovém výpočtu. Seznam časových inkrementů a příslušných polí napětí pro sestavení historie zatěžování je tvořen jednotlivými řádky ve formátu dle Obr. 16.



Obr. 16: Struktura řádku popisující jeden časový inkrement a jemu odpovídající identifikace pole napětí v FIN souboru

Do souboru s příponou „fin“ je potřeba vložit tolik řádků s časovými inkrementy (Obr. 16), kolik je inkrementů MKP analýzy potřebných pro sestavení zatěžovací historie uvažované v únavové analýze. Proměnnými parametry jsou ID jednotlivých kroků a pořadová čísla časových kroků. Při načtení výsledků z programu Abaqus Patran zavádí vlastní pořadová čísla dle svého vnitřního algoritmu a toto číslování obecně neodpovídá číslování časových kroků v programu Abaqus. Do FIN souboru je potřeba zadávat pořadová čísla, které používá Patran. Získat pořadová čísla kroků dle Patranu je možné přes již zmíněné dialogové okno „Loading Information“. Stejným způsobem jako při vytvoření struktury souboru FIN se musí zvolit postupně krok min4 a krok max5. Kroky min4 a max5 je nutno postupně promítnout do pole “Results Time Steps” okna “Load Information” a z těchto polí opsat požadována pořadová čísla. Náhled výsledného FIN souboru je uveden na Obr. 17.



Obr. 17: Upravený FIN soubor pro případ odpovídající přítlaku 15 kN

Když jsou úpravy FIN souboru dokončeny, je nutné na základě tohoto souboru připravit úlohu pro vypočet. To je realizováno spuštěním speciálního příkazu z příkazového řádku. Nejdříve však je nutno zavřít otevřenou databázi v programu Patran, aby byla eliminována možnost kolize dat při zápisu a čtení z dvojice procesů – Patran a procedura „fattrans“ vytvářející úlohu pro únavovou analýzu. Pokud databáze nebude zavřena, nepodaří se spustit příkaz z příkazové řádky. Po zavření databáze je nutno v příkazovém řádku přejít do adresáře, kde je uložen FIN soubor, a spustit příkaz „fattrans“ a jako argument uvést název FIN souboru (tj. „fattrans *název FIN souboru*“).

Po dokončení přípravy úlohy (tj. vygenerování souboru s příponou „fes“) je možné spustit samotný únavový výpočet. To lze provést pomocí uživatelského rozhraní programu Patran,

resp. Modulu MSC Fatigue. Potřebný řešič se nachází v „Tools → MSC.Fatigue → Solvers → Global Multi-Axial Fatigue (femlf)". V novém okně zvolíme „Safety factor analysis". V dalším okně se zadá jméno vstupního souboru, který byl vytvořen spuštěním příkazu „fattrans" a má příponu „fes". V okně „FEMLF – Multiaxial E-N Options" se nastaví Damage Model („Dang Van") a zkoumaná oblast, kterou je celý vstupní soubor.

6.1.4 Zobrazení výsledků

Pro zobrazení výsledků je nutné je nejdříve do databáze Patranu načíst. Proto v hlavním rozhraní MSC Fatigue je potřeba vyplnit jméno souboru s výsledky do pole „job name". Tento soubor má příponu „fef" a má stejné jméno jako soubor s příponou „fes". Po vyplnění jména souboru je nutné přejít do okna „Fatigue Results", zvolit akci „Read Results" a potvrdit volbu tlačítkem „Apply". Tím se výsledky načtou do databáze jako standardní load case a budou dostupné v okně „Results" pro vizualizaci a další zpracování v grafickém rozhraní Patranu. Okno „Results" se spustí zmačknutím příslušného tlačítka v řádku nástrojů.

Mimo to MSC Fatigue umožňuje zobrazit výsledky jako textový výpis hodnot Safety Factoru a dalších veličin pro všechny nebo pouze pro specifikované uzly. Dialogové okno pro zobrazení tohoto výpisu se spustí z okna „Fatigue Results", na které se dá přejít z hlavního rozhraní MSC Fatigue. V poli „Action" je nutno zvolit „List Results" a pak potvrdit tlačítkem „Apply". V novém okně je třeba zadat jméno výsledného souboru. V dalším okně je možné nastavit parametr, na základě kterého se budou výsledky filtrovat. V následujícím okně je nutno zvolit čísla uzlů, pro něž mají být vypsány hodnoty parametru Safety Factor.

Pro převedení hodnot parametru Safety Factor na hodnoty parametru Fatigue Index je třeba použít vzorec (8):

$$FI = \frac{\tau}{t_{-1}}\left(1 - SF\right) + 1 \tag{8}$$

kde τ je amplituda smykového napětí, t_{-1} je mez únavy ve střídavém krutu, FI je Fatigue Index, SF je Safety Factor. Amplitudu smykového napětí lze nalézt v textovém výpisu spolu s hodnotou Safety Factor.

Pro přehlednější zobrazení výsledků je užitečná operace skrytí části modelu a změny barevné škály. Provést skrýti se dá pomocí akce „Post“ v dialogovém okně „Group“, které se spustí z řádku menu.

Změna rozsahu barevné škály v MSC Patran není zdaleka intuitivní a proto postup pro změnu barevné škály je pro účely dalších prací zdokumentován v tomto odstavci. Změna škály se uskutečňuje pomocí okna „Set Range“. Toto okno se otevře následujícím způsobem: v okně „Result“ je potřeba zvolit akci „Create“ a v poli „Object“ zvolit hodnotu „Quick Plot“. Poté je potřeba zmačknout tlačítko „Fringe Attributes“. Tím se změní část obsahu okna „Results“ a mezi jiné se objeví tlačítko „Range…“. Zmačknutí tohoto tlačítka vyvolá okno „Set Range“. V okně „Set Range“ je potřeba odškrtnout volbu „Overwrite Range Values“ a pak zmáčknout tlačítko „Define Range“. V novém okně je potřeba zkontrolovat že je zvolená akce „Create“. Dále je nutno zadat název nové škály. Algoritmus výpočtu jednotlivých intervalů škály je možné ponechat nastavený na hodnotu „Auto“. Potom je nutno zadat požadované meze škály. Pak je nutno kliknout na tlačítko „Calculate“, odškrtnout „Allow Overwrite“ a následně kliknout na tlačítko „Apply“. Tím se vytvoří nová škála, kterou je ještě nutno použit na model. Ve stejném okně je proto potřeba změnit akci na „Assign to Viewport“, kliknout na tlačítko „Existing Range“, zkontrolovat zvolený viewport a kliknout na „Apply“. To vyvolá změnu barevné škály modelu.

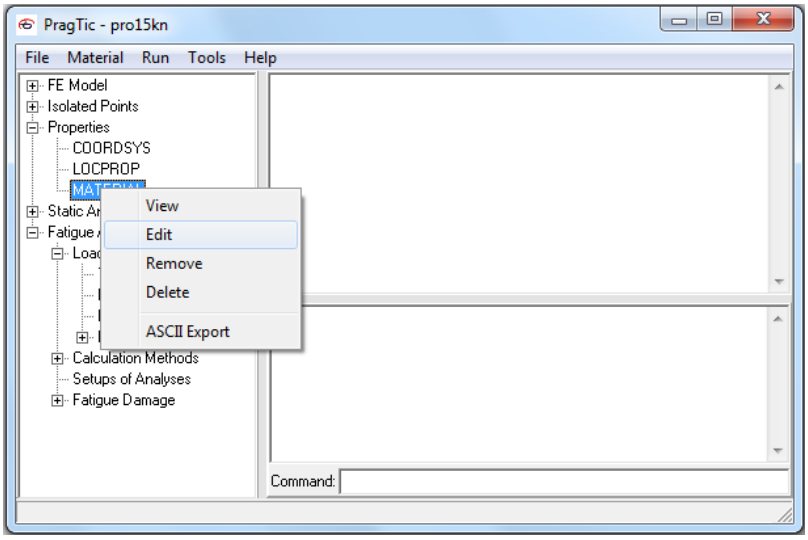
6.2 Výpočet v PragTicu

Druhým softwarem, který byl zvolen pro únavovou predikci pomocí Dang Vanovy metody, je PragTic. Na rozdíl od práce s únavovým řešičem Patran (verze 2013 64-bit), během práce s PragTicem uživatel nemusí ručně opravovat interní soubory programu. Druhou výhodou tohoto řešiče je to, že je volně dostupným softwarem. Nevýhodou je to, že PragTic nenačítá soubory s příponou „odb“ a nemá grafickou zpětnou vazbu. V této práci byl proto použit plugin FPU[2] vyvinutý Ing. Martinem Nesládkem v programovacím jazyce Python a určený pro export a import souborů z a do PragTicu. Tento plugin umožňuje vytvořit soubor

[2] Plugin je volně dostupný na webových stránkách Odboru pružnosti a pevnosti FS ČVUT: http://mechanika.fs.cvut.cz/veda-a-vyzkum/softwary/

s příponou „pti“, který je PragTic schopen načíst. PTI soubor obsahuje informace o topologii zdrojového MKP modelu a časovou historii požadovaných veličin.

Hlavní rozhraní PragTicu (Obr. 18) obsahuje stromovou strukturu jednotlivých entit analyzového MKP modelu včetně nastavení předvoleb výpočetních metod. Pro nastavení parametrů výpočtu je nutno kliknout pravým tlačítkem myši na příslušnou složku rozbalovacího seznamu a v nové nabídce zvolit „Edit“. Objeví se dialogové okno, přes které uživatel může zadávat jednotlivé parametry. Okno může obsahovat další oddělení.

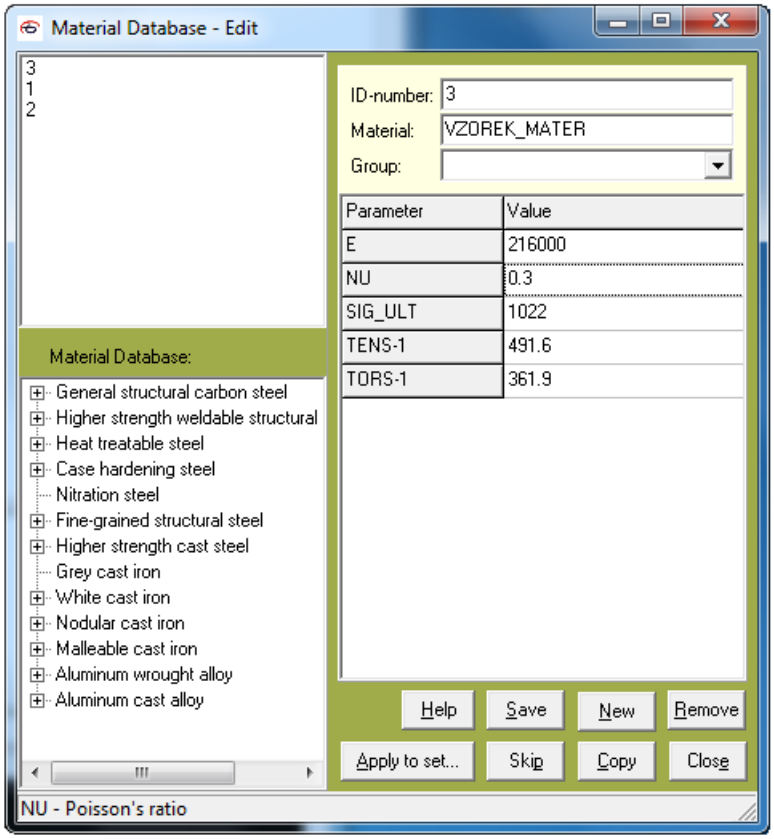


Obr. 18: Hlavní rozhraní programu PragTic

Pro načtení dat z MKP modelu je potřeba v PragTicu vytvořit nový projekt („File→New/Open…“) a pak importovat „pti“ soubor („File→Import…“). V novém oknu je nutno zvolit „Get all“ a kliknout tlačítko „run“. Na dotaz programu, je-li nutno oddělit povrchové uzly a normály je vhodné odpovědět „ano“ kliknutím příslušného tlačítka. Na základě tohoto povelu program vygeneruje množinu všech uzlů ležících na povrchu a vypočte k nim vektory normál k povrchu. Obojí má pro multiaxiální analýzu velkou důležitost – seznam povrchových uzlů snižuje rozsah analýz, protože uzly pod povrchem nejsou analyzovány, zatímco normály jsou použity při algoritmu prohledávání jednotlivých rovin při maximalizaci použitého poškozovacího parametru.

Dále je potřeba zadat vlastnosti materiálu související s únavovou pevností v „Properties → MATERIAL“. V okně „Material Database“ je nutno přepnutím čísel v levém horním poli

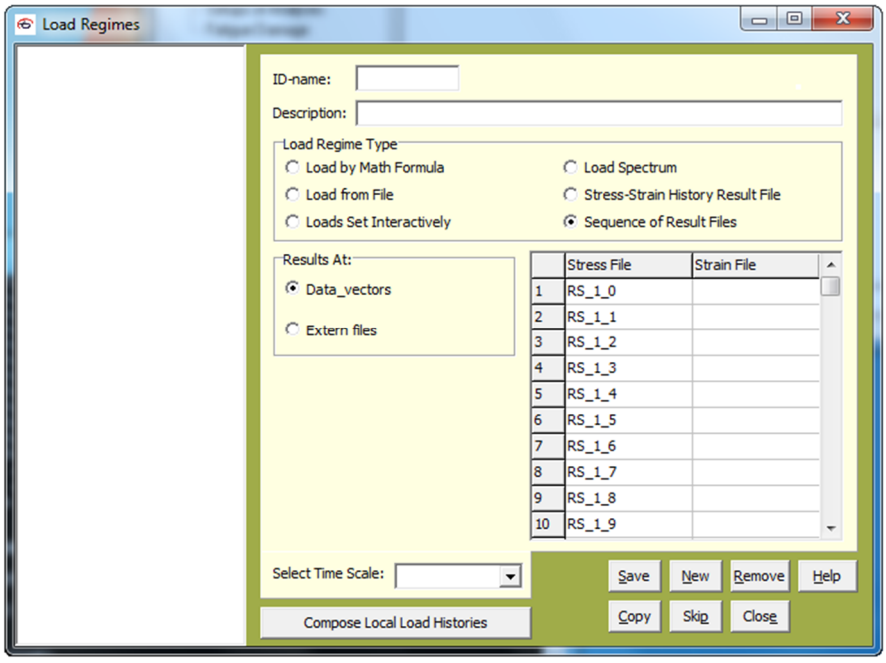
zvolit materiál, který odpovídá materiálu vzorku. Čísla představují materiály načtené z programu Abaqus. Materiál odpovídající vzorku se dá poznat pomocí hodnoty v poli „Material“, kde se promítají názvy jednotlivých materiálu. Pro vypočet dle Dang Vanovy metody je potřeba zadat mez únavy ve střídavém tahu, mez únavy ve střídavém krutu, mez pevnosti a modul pružnosti (Obr. 19).



Obr. 19: Dialogové okno „Material Database“ pro zadání materiálových parametru v programu PragTic

Pomocí nástrojů v nabídce „Fatigue Analysis → Loading → Load Regimes → Sequence of Result Files“ se sestaví lokální historie zatěžovaní. Ve sloupci „Stress File“ je zde třeba nastavit 21 kroků, nejdříve od „RS_1_0“ do „RS_1_10“ a hned za tím „RS_2_1“ až „RS_2_10“ (Obr. 20). Nastavení probíhá postupnou volbou ze seznamu, který se objevuje po každém umístění kursoru do jednotlivých polí sloupce. Jakmile sekvence zatěžovací historie je nastavena je nutno kliknout na tlačítko „Compose Local Load Histories“ a v novém okně zadat jméno historie, tj. popisu napěťového a deformačního tenzoru v čase. Tuto historii je následně potřeba zvolit v oddělení „Stress-Strain History Result File“, které se otevře pomocí

příslušného checkboxu. V hlavičce okna „Load Regimes“ je dále nutno zadat jméno výsledného souboru a poté kliknout na tlačítko „Save“.



Obr. 20: Dialogové okno „Load Regimes“

V „Fatigue Analysis → Calculation Method“ je potřeba zvolit výpočetní metodu, kterou je Dang Vanova metoda. Ostatní nastavení v okně „Calculation Methods“ je možné ponechat na standardních hodnotách. Před uložením je také nutno zadat název zvoleného nastavení výpočtu.

V „Fatigue Analysis → Setups of Analyses“ probíhá spouštění výpočtu. Před samotným spouštěním je nutno v tomto okně pomocí tlačítka „→“ provést selekci výpočetní metody, historie zatížení a množiny uzlů, na kterých má vypočet probíhat. Výpočetní metoda a zatěžovací historie odpovídají těm, které byly zadávány v oknech „Load Regimes“ a „Calculation Method“. Výpočet se spustí po kliknutí na tlačítko „Run“.

Po dokončení výpočtu je nutné výsledky exportovat zpátky do programu Abaqus, protože PragTic neposkytuje výsledky v grafické formě, ale jen ve formě textového výpisu. Proto je potřeba přejít do „Fatigue Analyses → Fatigue Damage“, kliknout pravým tlačítkem myši na „FAT_RES“ a zvolit „Pragtic *.pto Export“. Tato akce vytvoří soubor s příponou „pto“, který pomocí pluginu FPU je možné načíst do programu Abaqus.

6.3 Výsledky

Po dokončení výpočtu pro každou výpočetní úlohu byla odečtena nejvyšší hodnota parametru Fatigue Index (Tab. 2), resp. nejnižší hodnota parametru Safety Factor a ta přepočtena podle vztahu (8) na Fatigue Index.

Tab. 2: Nejvyšší výsledné hodnoty Fatigue Index v jednotlivých vypočtených případech

Přitlak [kN] / Program	3	7.5	10	15
Patran	0.774	0.853	0.911	0.928
PragTic	0.667	0.781	0.864	0.888
Poměrná odchylka [%]	13.8	8.5	5.2	4.2

Při vyhodnocování výsledků nebyly zohledněny dvě krajní řady elementů submodelu vzorku (Obr. 12). K tomu kroku bylo přistoupeno proto, že zvolený způsob modelování, kdy je uvažován pouze lineárně elastický popis materiálu, neumožňuje adekvátní popis napěťové a deformační odezvy materiálu na ostré hraně vzorku mezi boční a kontaktní plochou.

Z Tab. 2 je vidět, že všechny hodnoty parametru Fatigue Index jsou menší než jedna, což znamená, že Dang Vanova metoda pro všechny případy predikuje to, že porucha nenastane. Výpočet však probíhal na modelu, na který byly aplikovány síly odpovídající experimentálně stanovené meze únavy. Ideální predikční model v tomto případě by měl poskytnout výsledné hodnoty Fatigue Indexu, které by se rovnaly jedné. To, že Dang Vanův predikční model pro všechny případy vedl na hodnoty menší než jedna, může znamenat buď to, že je náchylný k nekonzervativnímu výpočtu, nebo to, že není schopný správně postihnout problematiku frettingu. Také je vhodné poznamenat, že vyhodnocení dle Dang Vanova kritéria samo o sobě nezahrnuje korekci na gradient napětí, tzn., že při posouzení únavového stavu pracuje jen se složkami napětí na povrchu součástí a nezohledňuje vliv toho, že pod povrchem má napjatost klesající tendenci. Při zahrnutí vlivu gradientu napětí by model tedy predikoval Fatigue Index ještě menší, nebo jinými slovy, výsledky by byly posunuty do nekonzervativní oblasti.

V Tab. 2 je také vidět, že se zvětšujícím se přítlakem se zvětšují i výsledné hodnoty Fatigue Indexu. Vysvětlením by pro to mohlo být to, že Dang Vanova metoda není schopna

postihnout vliv skluzů, které jsou v případě menších přítlačných sil větší a mají tedy větší podíl na degradaci materiálu.

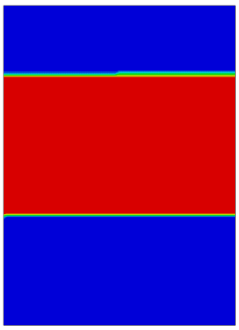
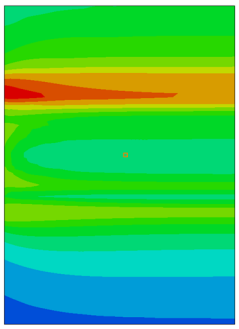
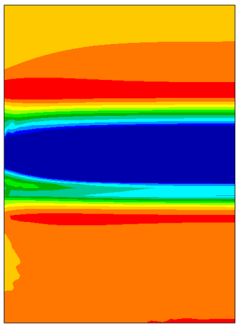
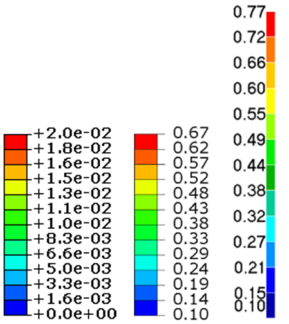
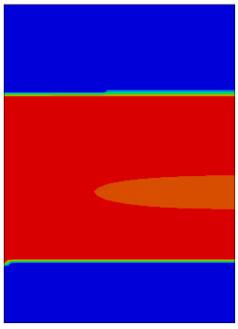
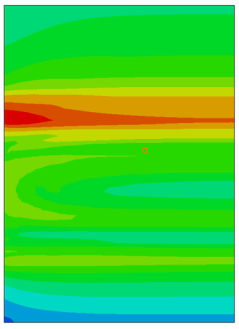
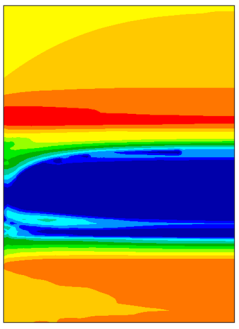
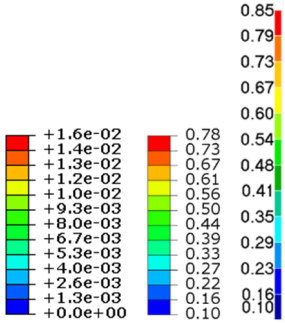
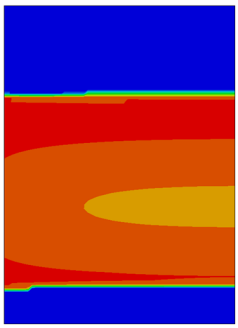
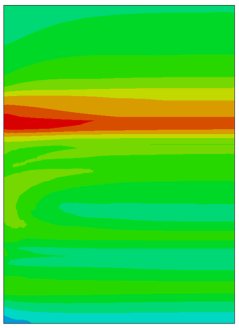
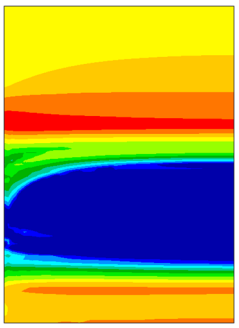
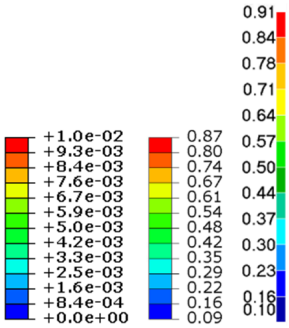
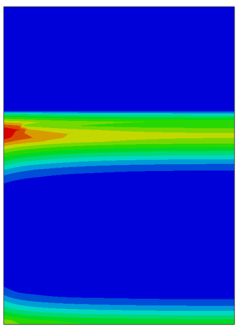
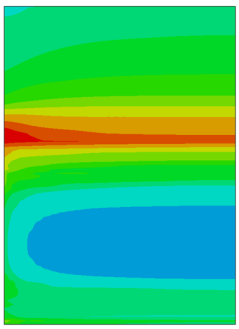
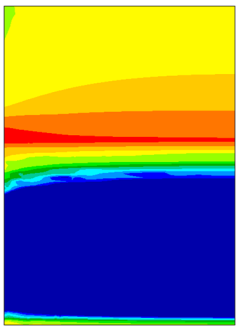
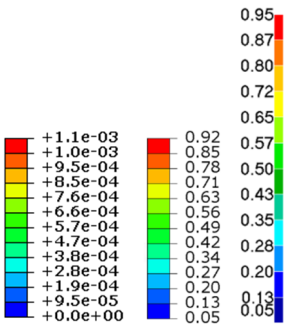
Výsledné hodnoty v PragTicu vyšly více nekonzervativní než odpovídající hodnoty v Patranu. Se zvětšujícím se přítlakem odchylka ve výpočtech obou programů však klesá. Rozdíl by mohl být způsoben rozdílnou formulací Dang Vanovy metody v obou softwarech. Amplituda smykového napětí v PragTicu je počítána pomocí vyhledávání kritických rovin, když v Patranu je počítána jako charakteristický rozměr koule v šestirozměrovém prostoru.

V Tab. 3 je uvedeno rozložení hodnot amplitud skluzů a také rozložení hodnot parametru Fatigue Index v obou použitých řešičích. Červená oblast v barevné mapě amplitud skluzů odpovídá největším skluzům. Modré oblasti představují oblasti nulových skluzů a v případech přítlaků 3 až 10 kN rovněž oblasti mimo kontaktu. V případě 15 kN jen horní modrá oblast představuje oblast mimo kontakt.

Je zřejmé, jak se zvětšujícím se přítlakem klesá amplituda skluzů a uprostřed oblasti nejvyšších hodnot amplitud skluzů se objevuje oblast s nižšími hodnotami. Postupně „vnitřní“ oblasti kontaktu přestávají navzájem proklouzávat a pohybují se vůči sobě jen hranice kontaktu, kde klesá přílak. To je vidět na případě 15 kN, kde dolní hranice kontaktu je posunuta až za oblast jemné části submodelu vzorku.

Rozložení hodnot parametru Fatigue Index v použitých řešičích vykazují jistou odlišnost. Predikce MSC Fatigue udává poněkud větší hodnoty mimo kontakt, ale zároveň menší hodnoty uvnitř kontaktu. Nejvyšších hodnot ale oba řešiče dosahují na horní hranici kontaktu, což je v souladu s experimenty.

Tab. 3: Rozložení hodnot amplitud skluzů a parametru Fatigue Index. Pohled na plochu *yz* dle souřadnicového systému na Obr. 12.

Amplitudy skluzu	Fatigue Index (PragTic)	Fatigue Index (Patran)	Barevné škála v pořádí „skluzy – FI_PragTic – FI_Patran “ [mm], [-], [-]	Přítlak [kN]
				3
				7,5
				10
				15

7 Závěr

V rámci diplomové práce bylo provedeno vyhodnocení únavových zkoušek v podmínkách frettingu s cílem získat parametry zatěžovacích cyklů (amplitudy a střední hodnoty axiálních sil na vzorku) odpovídajících hladinám mezí únavy pro dané konstantní hladiny přítlačných sil. Vyhodnocení zkoušek bylo provedeno pomocí vlastních skriptů na bázi stupňové metody, které byly v rámci této práce implementované do databáze FinLiv.

S cílem simulace experimentů na hladině stanovené meze únavy byly vytvořeny výpočetní modely na bázi MKP. Převzatý geometrický model přípravku a vzorku byl upraven tak, aby soustava představovala čtvrtinu reálné soustavy, čímž je dosaženo významné redukce výpočetní úlohy. Dále byly zavedeny vazby mezi jednotlivými součástmi, bylo namodelováno uložení soustavy a byla vytvořena výpočetní síť. Zatěžování v modelu kombinovalo statické zatěžovací stavy (montáž a předpětí vzorku) s dynamickými stavy (zatížení cyklickou axiální silou na vzorku).

Kontaktní napětí v kritických lokalitách numerického modelu byla vyhodnocena. Největší složku dosahuje složka ve směru cyklického zatěžování vzorku. Další významnou složkou je složka ve směru kontaktu s kamenem, která je maximální, když je vzorek v podélném směru stlačován, v důsledku čehož je v příčném směru roztahován.

Ve dvou dostupných únavových řešičích, MSC Fatigue a PragTic, byly provedeny únavové výpočty s použitím Dang Vanovy metody, která je jednou z metod určených pro predikce klasické multiaxiální únavy ve vysokocyklové oblasti. Příprava únavových výpočtů a spuštění analýz v obou řešičích byla detailně zdokumentována v této práci.

Predikce pomocí Dang Vanovy metody v obou řešičích vedla na nekonzervativní výsledky. To je obecně závěr dle očekávání, neboť tato metoda nezohledňuje vliv kontaktních skluzů, ale pouze analyzuje lokální napjatost.

Výpočet pomocí Dang Vanova kritéria v MSC Fatigue vedl na poněkud odlišné výsledky, než výpočty v PragTicu, což by mohlo být způsobeno rozdílnou formulací výpočtu amplitudy

smykového napětí. Z Tab. 2 je však vidět, že obě metody nejsou schopné správně postihnout vliv skluzů.

Z uživatelského hlediska je použití MSC Fatigue ve verzi 2013 problematické, neboť tato verze programu obsahuje řadu chyb, kvůli kterým uživatel musí zadávat historii zatěžování do interního souboru s příponou „fin“ „manuálně“. Postup přípravy tohoto souboru je také součásti diplomové práce.

Vyhodnocení amplitud skluzů a hodnot parametru Fatigue Index, který charakterizuje únavový stav součástí, vedlo ke zjištění, že pro všechny analyzované varianty jsou nejkritičtější místa na horní hranici kontaktu, což je v souladu s experimenty. Z vyneseného rozložení hodnot amplitud skluzů (Tab. 3) je také vidět, že se zvětšujícím se přítlakem „střed“ kontaktu přestává klouzat a ve vzájemném posuvu se nacházejí pouze hranice kontaktu. To, že zároveň se zmenšujícími se hodnotami amplitud skluzů se zlepšují predikce Dang Vanovy metody, potvrzuje tvrzení, že metoda není schopná zahrnout vliv skluzů.

Další práci by dále bylo vhodné zaměřit na identifikaci korekčního faktoru, který by upravoval predikci Dang Vanovy metody pro případ únavy v podmínkách frettingu, tedy i se zahrnutím kontaktních skluzů.

Seznam použité literatury

[1] NOWELL, D., D. DINI a D.A. HILLS. Recent developments in the understanding of fretting fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*. 2006, vol. 73, issue 2: 207-222. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2005.01.013. ISSN 00137944. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794405001803

[2] NESLÁDEK, M., M. ŠPANIEL, J. JURENKA, J. RŮŽIČKA a J. KUŽELKA. Fretting fatigue – Experimental and numerical approaches. *International Journal of Fatigue*. 2012, vol. 44: 61-73. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.05.015. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112312001983

[3] PAPUGA, Jan. A survey on evaluating the fatigue limit under multiaxial loading. *International Journal of Fatigue*. 2011, vol. 33, issue 2: 153-165. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2010.08.001. ISSN 01421123. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112310001672

[4] EDEN, E. M., W. N. ROSE a P. L. CUNNINGHAM. The endurance of metals: experiments on rotating beams at University College, London. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineer*. 1911, vol. 81, no. 1: 839-974. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1911_081_017_02.

[5] HUTSON, Alisha L., Noel E. ASHBAUGH a Ted NICHOLAS. An Investigation of Fretting Fatigue Crack Nucleation Life of Ti-6Al-4V under Flat-on-Flat Contact. In: MUTOH, Y., S. KINYON a David W. HOEPPNER. *Fretting fatigue: advances in the basic understanding and applications*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2003, s. 307-322. ISBN 0-8031-3456-8.

[6] MATIKAS, T.E. a P.D. NICOLAOU. Development of a model for the prediction of the fretting fatigue regimes. *Development of a model for the prediction of the fretting fatigue regimes*. 2011, vol. 16, issue 9. DOI: http://dx.doi.org/10.1557/JMR.2001.0371. Dostupné z: http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=8000151&fileId=S0884291400059689

[7] NEU, Richard W., John A. PAPE a Dana R. SWALLA. Methodologies for Linking Nucleation and Propagation Approaches for Predicting Life Under Fretting Fatigue. In: HOEPPNER, David W., V. CHANDRASEKARAN a Charles B. ELLIOTT. *Fretting fatigue: current technology and practices*. West Conshohocken, PA: ASTM, 2000, s. 369-388. ISBN 0-8031-2851-7.

[8] PAPUGA, Jan. *PragTic Manual* [online]. © 2007 [cit. 2015-06-28]. Dostupné z: http://www.pragtic.com/PragTicHelp/PragTic%20v.0.2.htm

[9] RŮŽIČKA, Milan, Miroslav HANKE a Milan ROST. *Dynamická pevnost a životnost*. Praha: České vysoké učení technické, 1987, 212 s. Dostupné také z: http://mechanika2.fs.cvut.cz/documents/dpz_high.pdf

[10] *Threaded fasteners - Axial load fatigue testing - Test methods and evaluation of results*. Switzerland: International Organization for Standardization, 1993.

[11] *Spojovací součásti se závitem - Zkouška únavy osovým zatížením - Zkušební metody a vyhodnocení výsledků*. Praha: Český normalizační institut, 1997.

[12] BERNASCONI, A., M. FILIPPINI, S. FOLETTI a D. VAUDO. Multiaxial fatigue of a railway wheel steel under non-proportional loading. *International Journal of Fatigue*. 2006, vol. 28, issue 5-6: 663-672. DOI: doi:10.1016/j.ijfatigue.2005.07.045. Dostupné také z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112305003269

[13] KUŽELKA, Jiří. *Experimentální a numerické stanovení tribologických parametrů kontaktu v podmínkách frettingu*. Praha, 2014. Disertační práce. České vysoké učení technické.

[14] PAPUGA, Jan, Nikola SCHMIDOVÁ, Martin NESLÁDEK a Vít SHÁNĚL. *Postup použití MSC.Fatigue pro únavovou analýzu*. Praha: Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, Fakulta strojní ČVUT v Praze, 2014. Číslo zprávy 12105/14/12.

[15] DASSAULT SYSTÈMES. *Abaqus 6.12 Online Documentation* [online]. 2012 [cit. 2015-06-23]. Dostupné z: http://www.maths.cam.ac.uk/computing/software/abaqus_docs/docs/v6.12/

Příloha 1. Fotografie z experimentu

Příloha 2. Tabulky získané dle stupňové metody implementované do FinLivu

Tabulka pro přítlak 3 kN sestavená pro hodnoty středního napětí:

1	2								3	4	5	6	7	8
Stress [MPa]	x Failure o Non-failure								x	o	z	f	z*f	z^2*f
103.6								x	1	0	3	1	3	9
98.2					x		o		1	1	2	1	2	4
92.9				o		o			0	2	1	0	0	0
87.5	x		o						1	1	0	1	0	0
82.1		o							0	1	0	0	0	0
Test piece No.	1	2	3	4	5	6	7	8						
Sum of columns 3, 4, 6, 7, 8									3	5	-	3	5	13
												C	A	E
Sig_50 =	93.8													
S(Sig)=	13.8617													

Tabulka pro přítlak 7,5 kN sestavená pro hodnoty středního napětí:

1	2						3	4	5	6	7	8
Stress [MPa]	x Failure o Non-failure						x	o	z	f	z*f	z^2*f
108.9					x		1	0	1	1	1	1
103.6		x		o		x	2	1	0	2	0	0
98.2	o		o				0	2	0	0	0	0
Test piece No.	1	2	3	4	5	6						
Sum of columns 3, 4, 6, 7, 8							3	3	-	3	1	1
										C	A	E
Sig_50 =	102.7											
S(Sig)=	2.19769											

Tabulka pro přítlak 10 kN sestavená pro hodnoty středního napětí:

1	2									3	4	5	6	7	8
Stress [MPa]	x Failure o Non-failure									x	o	z	f	z*f	z^2*f
114.3	x		x							2	0	3	0	0	0
108.9		o		x		x				2	1	2	1	2	4
103.6					o		x		o	1	2	1	2	2	2
98.2								o		0	1	0	1	0	0
Test piece No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9						
Sum of columns 3, 4, 6, 7, 8										5	4	-	4	4	6
													C	A	E
Sig_50 =	106.3														
S(Sig)=	4.627692														

Tabulka pro přítlak 15 kN sestavená pro hodnoty středního napětí:

1	2						3	4	5	6	7	8
Stress [MPa]	x Failure o Non-failure						x	o	z	f	z*f	z^2*f
92.9		x				o	1	1	1	1	1	1
87.5	o		x		o		1	2	0	1	0	0
82.1				o			0	1	0	0	0	0
Test piece No.	1	2	3	4	5	6						
Sum of columns 3, 4, 6, 7, 8							2	4	-	2	1	1
										C	A	E
Sig_50 =	87.5											
S(Sig)=	2.44069											

Tabulka pro přítlak 3 kN sestavená pro hodnoty amplitudy napětí:

1	2								3	4	5	6	7	8
Stress [MPa]	x Failure o Non-failure								x	o	z	f	z*f	z^2*f
96.7								x	1	0	3	1	3	9
91.7					x		o		1	1	2	1	2	4
86.7				o		o			0	2	1	0	0	0
81.7	x		o						1	1	0	1	0	0
76.6		o							0	1	0	0	0	0
Test piece No.	1	2	3	4	5	6	7	8						
Sum of columns 3, 4, 6, 7, 8									3	5	-	3	5	13
												C	A	E
Sig_50 = 87.5														
S(Sig)= 12.9376														

Tabulka pro přítlak 7,5 kN sestavená pro hodnoty amplitudy napětí:

1	2						3	4	5	6	7	8
Stress [MPa]	x Failure o Non-failure						x	o	z	f	z*f	z^2*f
101.6					x		1	0	1	1	1	1
96.7		x		o		x	2	1	0	2	0	0
91.7	o		o				0	2	0	0	0	0
Test piece No.	1	2	3	4	5	6						
Sum of columns 3, 4, 6, 7, 8							3	3	-	3	1	1
										C	A	E
Sig_50 = 95.9												
S(Sig)= 2.05118												

Tabulka pro přítlak 10 kN sestavená pro hodnoty amplitudy napětí:

1	2									3	4	5	6	7	8
Stress [MPa]	x Failure o Non-failure									x	o	z	f	z*f	z^2*f
106.7	x		x							2	0	3	0	0	0
101.6		o		x		x				2	1	2	1	2	4
96.7					o		x		o	1	2	1	2	2	2
91.7								o		0	1	0	1	0	0
Test piece No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9						
Sum of columns 3, 4, 6, 7, 8										5	4	-	4	4	6
													C	A	E
Sig_50 = 99.2															
S(Sig)= 4.31918															

Tabulka pro přítlak 15 kN sestavená pro hodnoty amplitudy napětí:

1	2						3	4	5	6	7	8
Stress [MPa]	x Failure o Non-failure						x	o	z	f	z*f	z^2*f
86.7		x				o	1	1	1	1	1	1
81.7	o		x		o		1	2	0	1	0	0
76.6				o			0	1	0	0	0	0
Test piece No.	1	2	3	4	5	6						
Sum of columns 3, 4, 6, 7, 8							2	4	-	2	1	1
										C	A	E
Sig_50 = 81.7												
S(Sig)= 2.27798												

Příloha 3. Tabulky získané dle stupňové metody ručním sestavením

Tabulka pro přítlak 3 kN:

F_amp [N]	F_mean [N]	σ_amp [MPa]	σ_mean [MPa]	σ_max [MPa]		x	o	z	f	zf	z^2f
11600	12429	96.7	103.6	200.2	x	1	0	3	1	3	9
11000	11786	91.7	98.2	189.9	x o	1	1	2	1	2	4
10400	11143	86.7	92.9	179.5	o o	0	2	1	0	0	0
9800	10500	81.7	87.5	169.2	x o	1	1	0	1	0	0
9200	9857	76.7	82.1	158.8	o	0	1	0	0	0	0
					součet:	3	5	-	3	5	13
									C	A	E

sig_mean_50 =	93.8
S (sig_mean) =	13.7517
sig_amp_50 =	87.5
S (sig_amp) =	12.8349

Tabulka pro přítlak 7,5 kN:

F_amp [N]	F_mean [N]	σ_amp [MPa]	σ_mean [MPa]	σ_max [MPa]		x	o	z	f	zf	z^2f
12200	13071	101.7	108.9	210.6	x	1	0	2	0	0	0
11600	12429	96.7	103.6	200.2	x x o	2	1	1	1	1	1
11000	11786	91.7	98.2	189.9	o o	0	2	0	2	0	0
					součet:	3	3	-	3	1	1
									C	A	E

sig_mean_50 =	102.7
S (sig_mean) =	2.1803
sig_amp_50 =	95.8
S (sig_amp) =	2.0349

Tabulka pro přítlak 10 kN:

F_amp [N]	F_mean [N]	σ_amp [MPa]	σ_mean [MPa]	σ_max [MPa]		x	o	z	f	zf	z^2f
12800	13714	106.7	114.3	221.0	x x	2	0	3	0	0	0
12200	13071	101.7	108.9	210.6	x o x	2	1	2	1	2	4
11600	12429	96.7	103.6	200.2	x o o	1	2	1	2	2	2
11000	11786	91.7	98.2	189.9	o	0	1	0	1	0	0
					součet:	5	4	-	4	4	6
									C	A	E

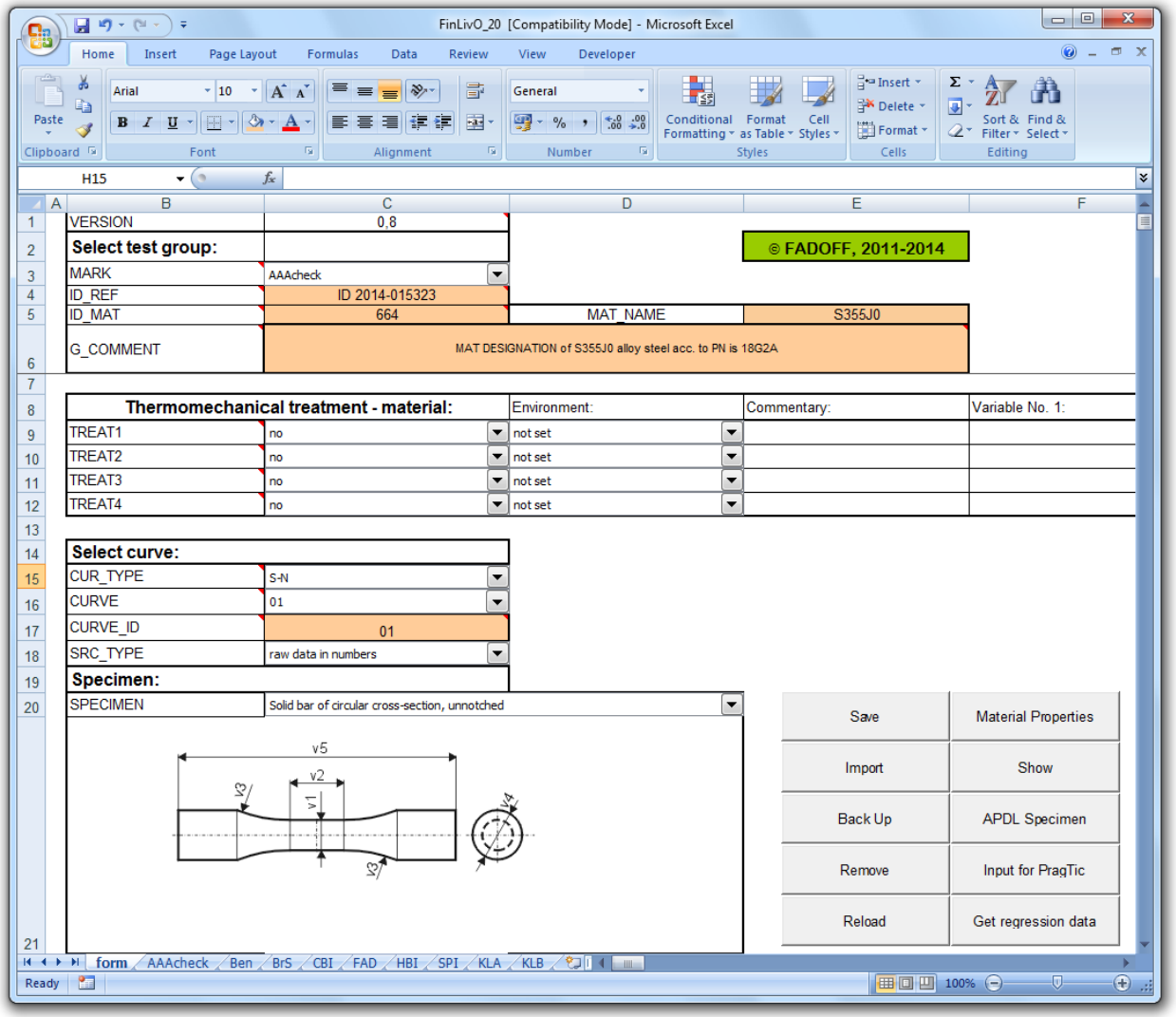
sig_mean_50 =	106.3
S (sig_mean) =	4.5910
sig_amp_50 =	99.2
S (sig_amp) =	4.2849

Tabulka pro přítlak 15 kN:

F_amp [N]	F_mean [N]	σ_amp [MPa]	σ_mean [MPa]	σ_max [MPa]		x	o	z	f	zf	z^2f
10400	11143	86.7	92.9	179.5	x o	1	1	1	1	1	1
9800	10500	81.7	87.5	169.2	x o o	1	2	0	1	0	0
9200	9857	76.7	82.1	158.8	o	0	1	0	0	0	0
					součet:	2	4	-	2	1	1
									C	A	E

sig_mean_50 =	87.5
S (sig_mean) =	2.4213
sig_amp_50 =	81.7
S (sig_amp) =	2.2599

Příloha 4. Ukázka hlavního rozhraní interaktivní databáze FinLiv



Příloha 5. Vybrané testovací příklady staircase metody

Testovací příklad 1 (tabulka z vlastních experimentů pro přítlak 7,5 kN; celkový počet porušených vzorků je roven celkovému počtu vzorků neporušených → dvě varianty výpočtu → mění se sloupec *f* a *z*, znaménko parametru *x* a hodnota parametru σ_{ao}):

1	2						3	4	5	6	7	8
Stress [MPa]	x Failure o Non-failure						x	o	z	f	z*f	z^2*f
108.9					x		1	0	2	0	0	0
103.6		x		o		x	2	1	1	1	1	1
98.2	o		o				0	2	0	2	0	0
Test piece No.	1	2	3	4	5	6						
Sum of columns 3, 4, 6, 7, 8							3	3	-	3	1	1
										C	A	E
Sig_50 = 102.7												
S(Sig)= 2.19769												

1	2						3	4	5	6	7	8
Stress [MPa]	x Failure o Non-failure						x	o	z	f	z*f	z^2*f
108.9					x		1	0	1	1	1	1
103.6		x		o		x	2	1	0	2	0	0
98.2	o		o				0	2	0	0	0	0
Test piece No.	1	2	3	4	5	6						
Sum of columns 3, 4, 6, 7, 8							3	3	-	3	1	1
										C	A	E
Sig_50 = 102.7												
S(Sig)= 2.19769												

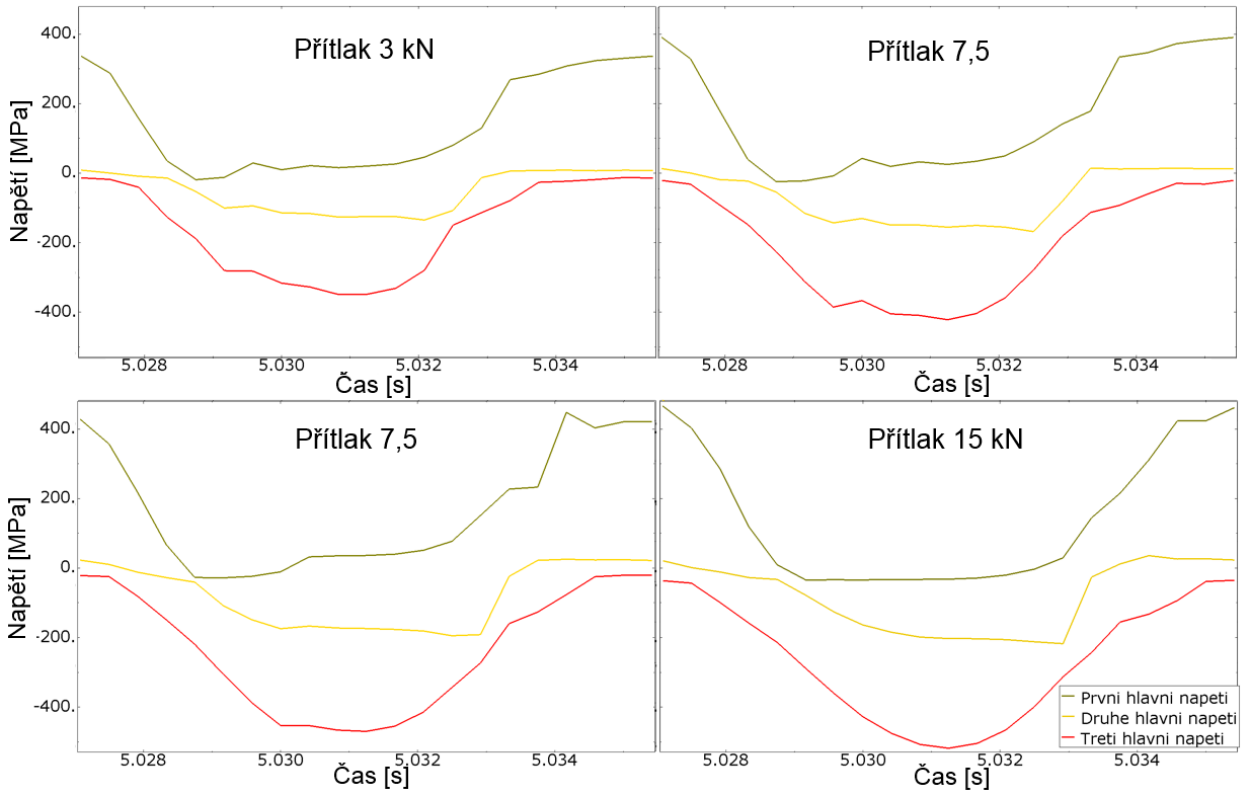
Testovací příklad 2 (celkový počet porušených vzorků je roven celkovému počtu vzorků neporušených → dvě varianty výpočtu → mění se sloupec *f* a *z*, znamínko parametru *x* a hodnota parametru σ_{ao}):

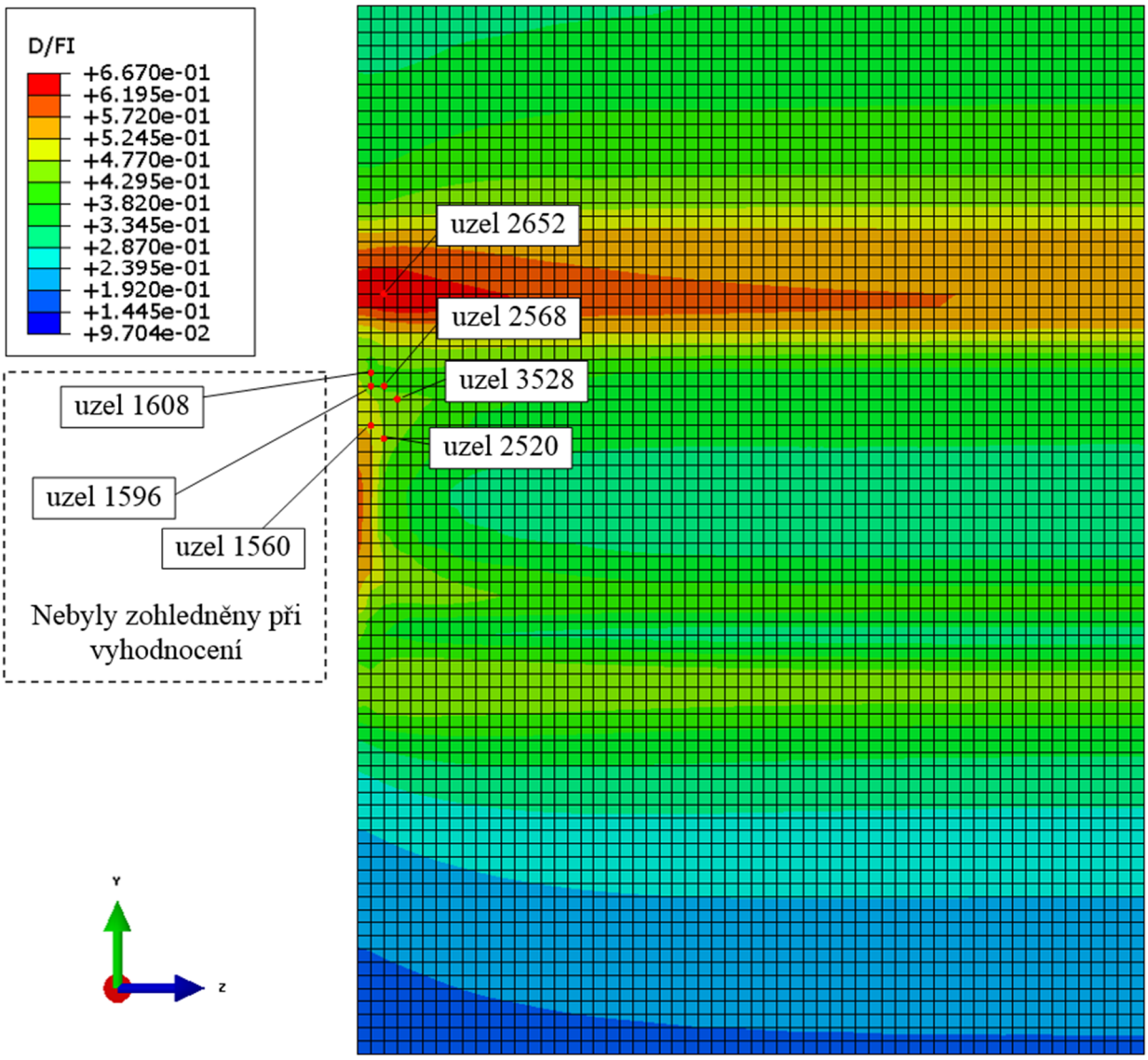
1	2						3	4	5	6	7	8
Stress [MPa]	x Failure o Non-failure						x	o	z	f	z*f	z^2*f
110					x		1	0	2	0	0	0
100		x		o		x	2	1	1	1	1	1
90	o		o				0	2	0	2	0	0
Test piece No.	1	2	3	4	5	6						
Sum of columns 3, 4, 6, 7, 8							3	3	-	3	1	1
										C	A	E
Sig_50 = 98.3333												
S(Sig)= 4.0698												

1	2						3	4	5	6	7	8
Stress [MPa]	x Failure o Non-failure						x	o	z	f	z*f	z^2*f
110					x		1	0	1	1	1	1
100		x		o		x	2	1	0	2	0	0
90	o		o				0	2	0	0	0	0
Test piece No.	1	2	3	4	5	6						
Sum of columns 3, 4, 6, 7, 8							3	3	-	3	1	1
										C	A	E
Sig_50 = 98.3333												
S(Sig)= 4.0698												

Příloha 6. Hlavní napětí ve vybraných uzlech

Hlavní napětí v čtvrtém cyklu dynamického zatěžování v uzlech 2652 (Přítlak 3 kN), uzel č. 2568 (Přítlak 7,5 kN), uzel č. 3528 (Přítlak 10 kN), uzel č. 2520 (Přítlak 15 kN):



Příloha 7. Zobrazení vybraných uzlů na submodelu vzorku

Uzly s nejvyšší hodnotou parametru Fatigue Index dle výpočtů v programu PragTic.