

Popis plnění balíčku WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování

WP14: Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování.

Vedoucí konsorcia podílející se na pracovním balíčku

FS ČVUT v Praze, zodpov. osoba Doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.

Členové konsorcia podílející se na pracovním balíčku

TÜV SÜD CZECH s.r.o., Ing. Jan Hnilica

Hlavní cíl balíčku

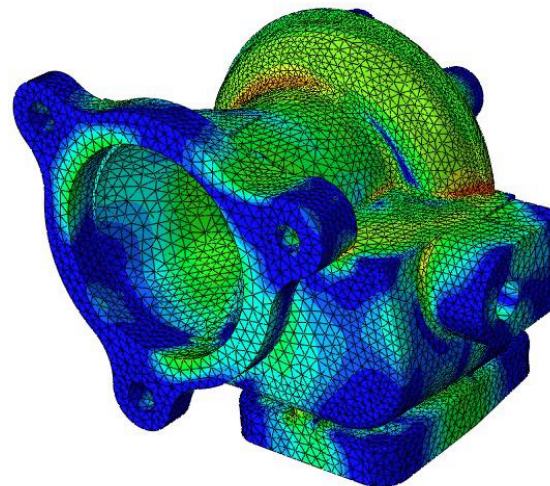
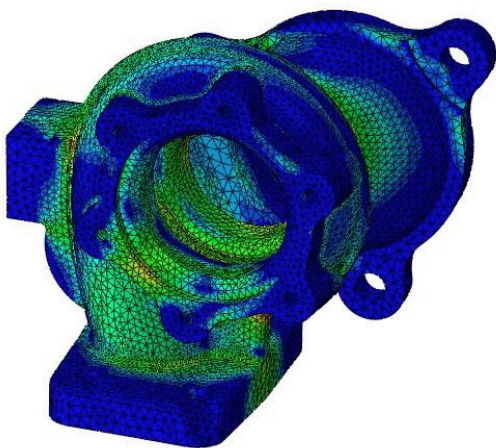
- Předmětem balíčku je komplexní hodnocení životnosti (zejména) skříní turbodmychadel. Hlavním cílem je vyvinout a ověřit metodiku vyhodnocení nízkocyklové termomechanické únavy v interakci s creepem

Dílčí cíle balíčku pro nejbližší období

WP14V04: První aplikace kalibrovaných fenomenologických materiálových modelů na skříně turbodmychadla. Smlouva s ČZ o extenzi materiálových zkoušek.

Popis plnění balíčku WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování

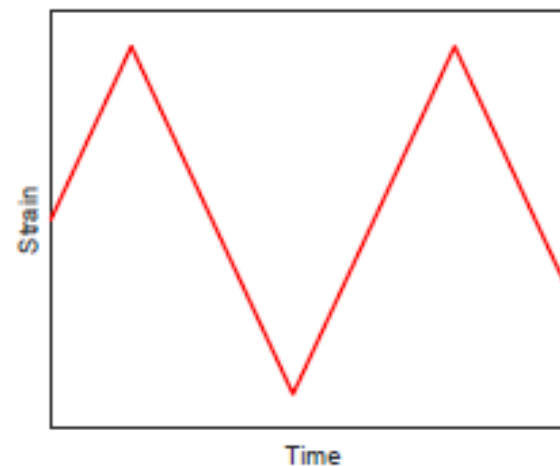
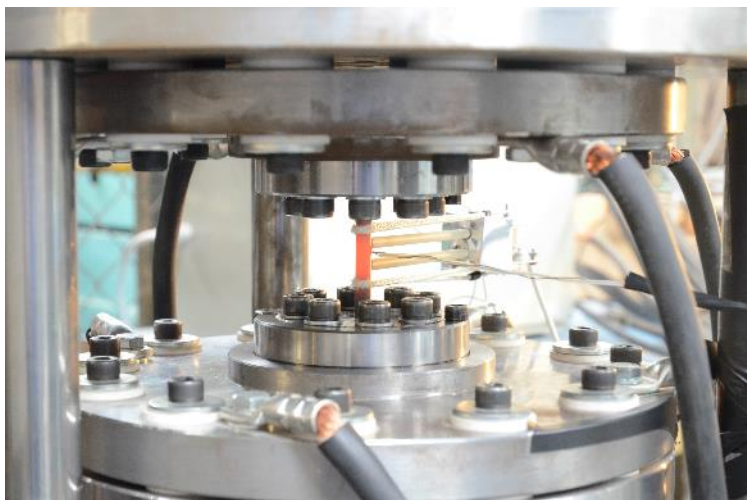
Na skříních turbodmychadel dochází v důsledku provozních podmínek k termomechanické únavě a creepu. Nerovnoměrné rozložení poměrně vysokých teplot, mechanická zatížení a uložení zamezující deformaci od ohřátí vedou ke vzniku inelastických deformací. Predikce životnosti je podle našeho návrhu založena na elasticko plastické analýze MKP na níž navazuje aplikace Prandtlových operátorů pro aproximaci viskoplasticity a výpočet poškození.



Popis plnění balíčku WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování

Stanovení materiálových dat pro elasticko-plastickou odezvu

Pro kalibraci Chabocheova modelu cyklické plasticity byly v laboratoři FS ČVUT provedeny isothermální testy nízkocyklové únavy (NCÚ) pro Si-Mo 4.06, za relativně vysokých rychlostí deformace, pro teploty od 20 do 750C, in the 12105 laboratory (CTU FME),



Popis plnění balíčku WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování

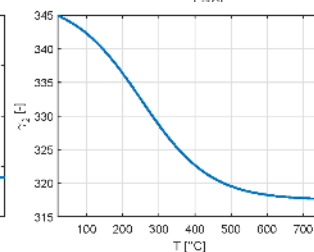
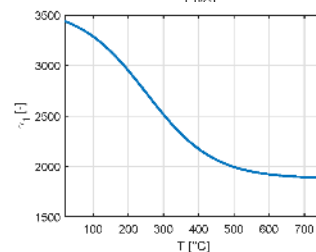
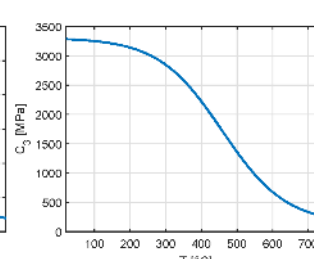
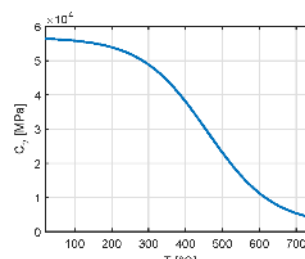
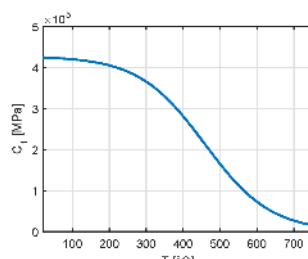
Byl kalibrován Chabocheův inkrementální model plasticity s nelineárním kinematickým zpevněním (implementovaný v programu ABAQUS) Verze se třemi teplotně závislými backstressy byla identifikována jako dostatečná

$$C_{1-3}(T) = \frac{a_{01-03} - a_{04-06}}{1 + \exp\left(\frac{T - a_{07}}{a_{08}}\right)} + a_{04-06}$$

$$\gamma_{1-2}(T) = \frac{b_{01-02} - b_{03-04}}{1 + \exp\left(\frac{T - b_{05}}{b_{06}}\right)} + b_{03-04}$$

$$\sigma_Y(T) = \frac{c_{01} - c_{02}}{1 + \exp\left(\frac{T - c_{03}}{c_{04}}\right)} + c_{02}$$

$$E(T) = d_{01} \left(1 - d_{02} \exp \frac{T}{d_{03}}\right)$$



a_{01-03} to d_{03} jsou kalibrované konstanty. Pro kalibraci jsou vytvořeny programy s optimalizací v PYTHONu a MATLABu obecně nad daty z MKP. Pro tyčové vzorky s kruhovým průřezem je dostačující a rychlejší analytický model

Popis plnění balíčku WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování

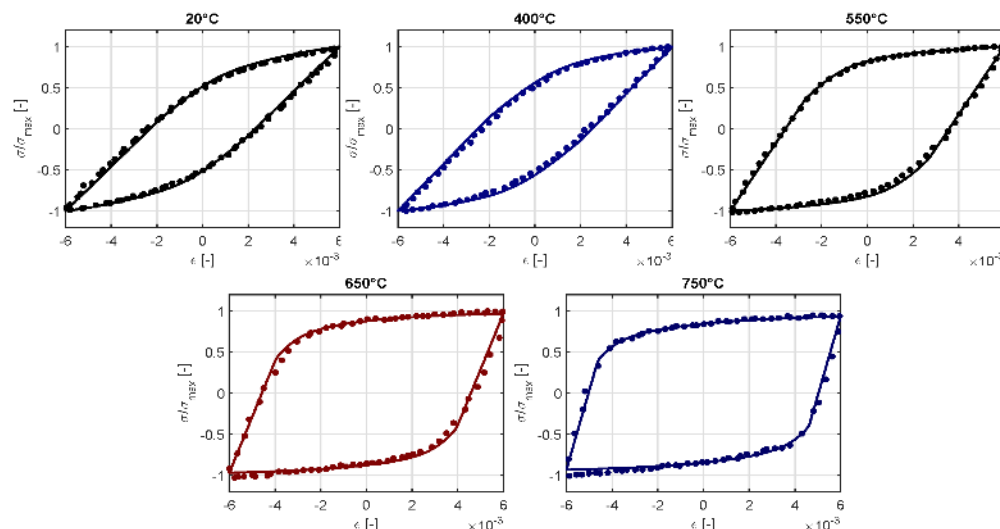
Byl kalibrován Chabocheův inkrementální model plasticity s nelineárním kinematickým zpevněním (implementovaný v programu ABAQUS) Verze se třemi teplotně závislými backstresy byla identifikována jako dostatečná

$$C_{1-3}(T) = \frac{a_{01-03} - a_{04-06}}{1 + \exp\left(\frac{T - a_{07}}{a_{08}}\right)} + a_{04-06}$$

$$\gamma_{1-2}(T) = \frac{b_{01-02} - b_{03-04}}{1 + \exp\left(\frac{T - b_{05}}{b_{06}}\right)} + b_{03-04}$$

$$\sigma_Y(T) = \frac{C_{01} - C_{02}}{1 + \exp\left(\frac{T - C_{03}}{C_{04}}\right)} + C_{02}$$

$$E(T) = d_{01} \left(1 - d_{02} \exp\left(\frac{T}{d_{03}}\right)\right)$$



a_{01-03} to d_{03} jsou kalibrované konstanty. Pro kalibraci jsou vytvořeny programy s optimalizací v PYTHONu a MATLABu obecně nad daty z MKP. Pro tyčové vzorky s kruhovým průřezem je dostačující a rychlejší analytický model

Popis plnění balíčku WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování

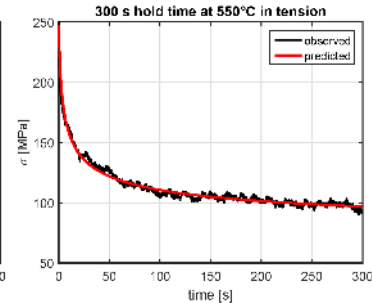
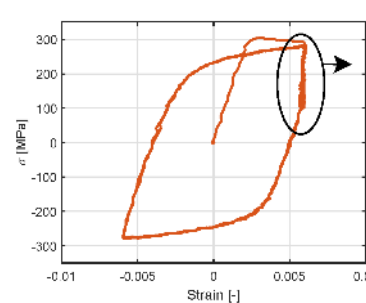
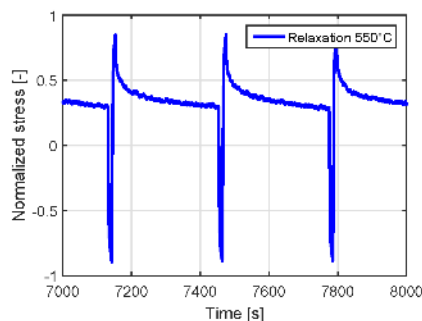
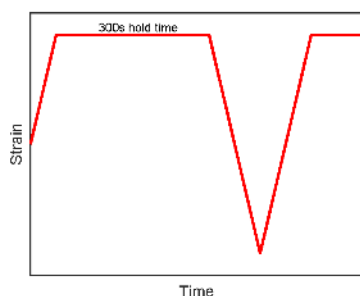
Stanovení parametrů viskoplastického modelu

Nabízely se tři možnosti:

- Creepové statické zkoušky - nedoporučeno
- **Izotermální NCÚ testy** při dvou úrovních rychlosti verifikace
- **Relaxační testy** – nejvhodnější pro kalibraci

Pro aproximaci viskoplasticity byl použit
mocninný model v podobě formulace odezvy
s elastickou doménou:

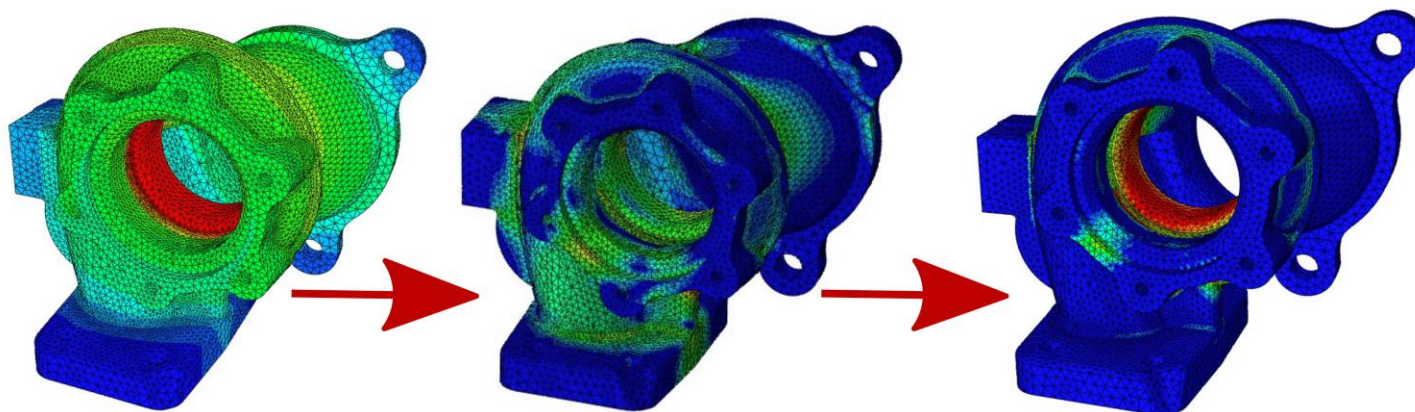
$$\dot{\epsilon}_{vp}(t) = \left\langle \frac{\sigma(t) - k(T)}{K(T)} \right\rangle^{N(T)}$$



Popis plnění balíčku WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování

Navržený přístup obsahuje tři kroky, které se provádějí v prostředí MKP programu ABAQUS:

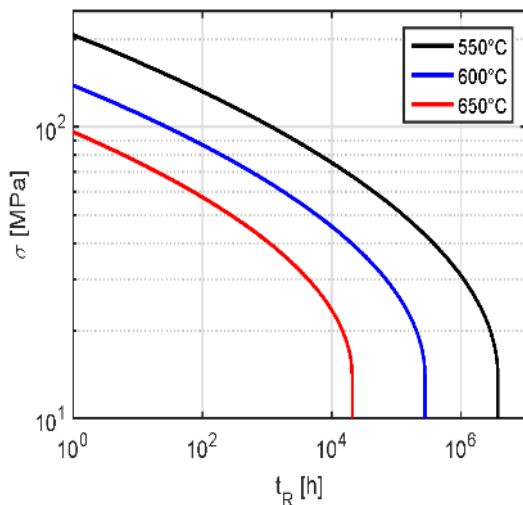
- Nestacionární teplotní analýza
- Elasticko plastická analýza napjatosti
- **Stanovení životnosti (zahrnuje viskoplastickou aproximaci, únavu a creep) s využitím programu v podobě uživatelské procedury ABAQUSu v C/C++. (C)**



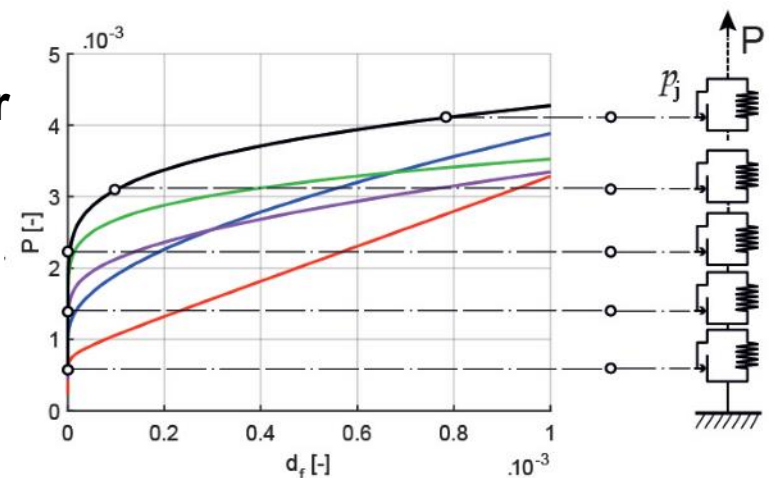
Popis plnění balíčku WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování

Únavové poškození

Je stanoveno pomocí **přístupu přes operátor poškození (damage operator approach DOA)**, který umožňuje vyjádřit okamžitou (efektivní) deformaci pomocí Prandtlova operátoru, a sumací poškození pro jednotlivé hysterezní smyčky.



Celkové poškození je definováno součtem
Únavového poškození
+
Creepového poškození



Creepové poškození

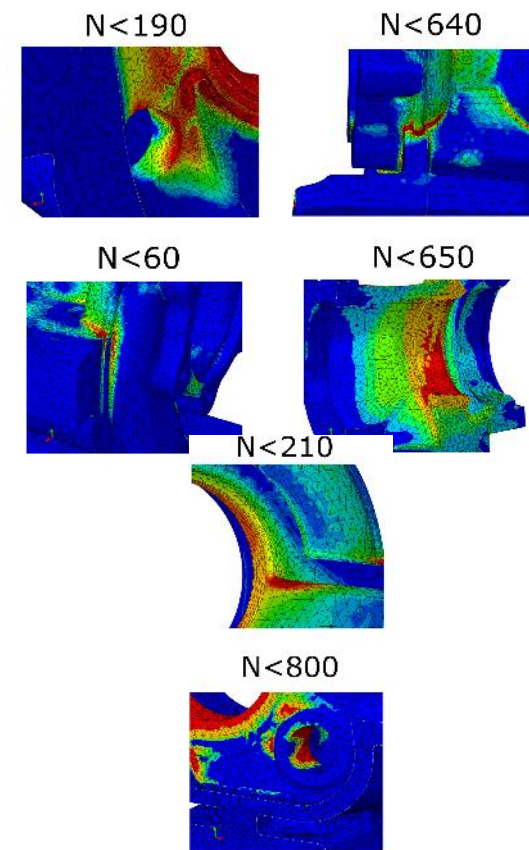
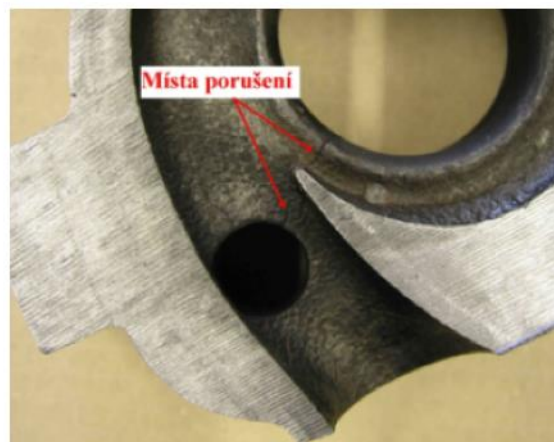
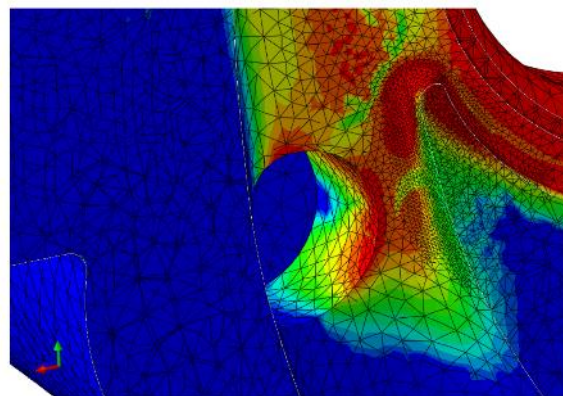
Creepové poškození je stanoveno prostřednictvím **Robinsonova zákona** s použitím Manson-Brownova parametru

Popis plnění balíčku WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování

Výpočtový model a aktuální výsledky (B)

Shrnutí předpokladů výpočtu životnosti skříně turbodmychadla

1. Smith-Watson-Topperova korekce středního napětí
2. Multiaxialita řešena signovaným HMH z MKP (A)
3. Zahrnut cyklický creep
4. Zahrnuta viskoplastická aproximace



Popis plnění balíčku WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování

Simulací termomechanického zatěžování se podařilo identifikovat kritické oblasti turbínové skříně turbodmychadla. Navržený a **kalibrovaný elasticko-plastický model** materiálu s kinematickým zpevněním je schopen popsat složku odezvy nezávislou na čase. **Viskoplastická aproximace (DOA)** s využitím hysterezních operátorů umožňuje dostatečně rychlý výpočet viskózních deformací. **Přístup přes operátor poškození** nabízí průběžný výpočet únavového poškození

Plány dalších kroků

- Unifikovaný Chabocheův model viskoplasticity s **Direct cyclic procedurou**
- Simulation of other operating modes of the component

Přínos viskoplastického MKP výpočtu plné historie zatěžování byl sledován v porovnání s aplikací DOA příliš časově náročným a byl z dalších úvah vyloučen.

Popis plnění balíčku WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování

Plnění dílčích cílů, milníků a výstupů

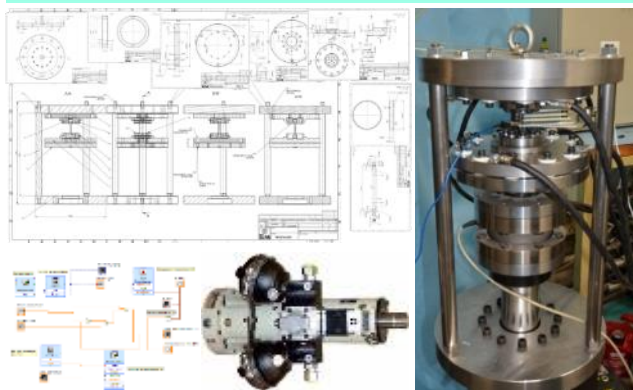
- **WP14M03: Kritéria pro nízkocyklovou termomechanickou únavu v podmínkách multiaxiálního zatěžování. A**
- **WP14C05: Výběr a kalibrace vhodného multiaxiálního kritéria pro hodnocení teplotněmechanické únavy. A**
- **WP14V04: První aplikace kalibrovaných fenomenologických materiálových modelů na skříň turbodmychadla. B**

Přehled splatných výsledků a jejich plnění

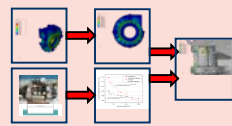
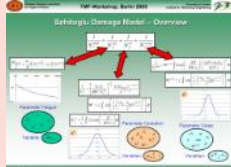
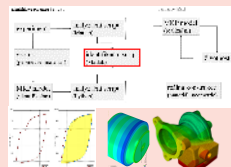
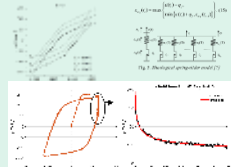
- **WP14V04: Kriterium nízkocyklové teplotněmechanické únavy. (C).
Software**

Výtah z prací 2012-2016 na WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování.

Návrh základních rozměrů, pevnostní kontrola, výroba dílů, sestavení a oživení a programové vybavení zkušebního stroje NCTMÚ



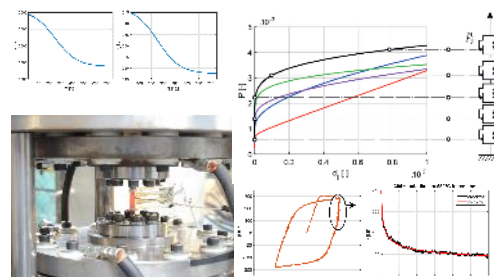
Rešerše postupů pro popis NCTMÚ

Manson-Coffin	Neu/Sehitoglu	Abaqus	LMS Nagode
			
Standární přístup •Jednoduchá identifikace •Nepřilíh přesný, pracuje pouze s cyklickými zkouškami •Výpočet hysterezních smyček Výchozí stav	Sofistikovaný přístup •Velmi komplikovaná identifikace, nejednoznačnost (20 parametrů) •Výpočet hysterezních smyček Nepoužit	Implementováno v MKP řešiči Abaqus •Na bázi <i>progressive failure analysis</i>, •Modifikováno na zohlednění teplota vrubů •Malá přesnost i výkon Nepoužit	Kompromisní a inženýrský přístup •Identifikace NCÚ i creepu •Semianalytické postupy •Výpočet elasticko plastický Vybráno

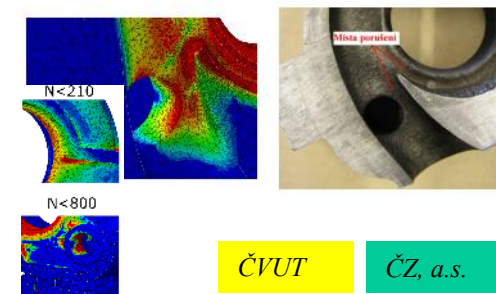
Návrh a výroba zkušebních vzrků pro zkoušky NCTMÚ



Identifikace materiálu

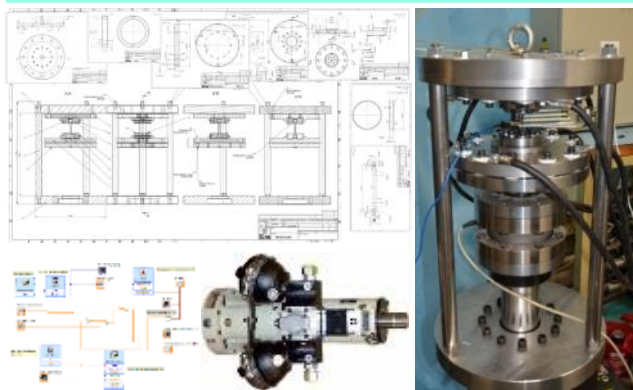


Výpočty únavy



Results of WP14 Advanced methods of low-cycle fatigue under temperature loading evaluation - Achieved 2012-2016

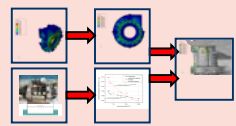
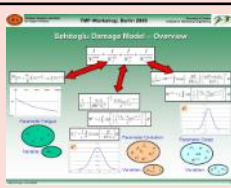
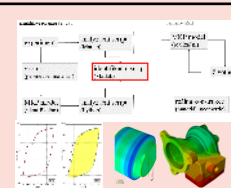
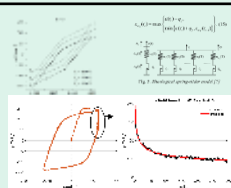
Conceptual design, dimensioning, design and manufacturing, assembly and start of operation, programming of control of LCTMF setup



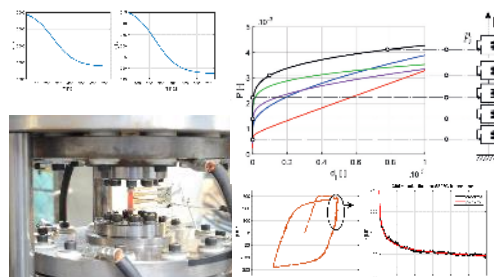
Design and manufacturing of LCTMF specimens



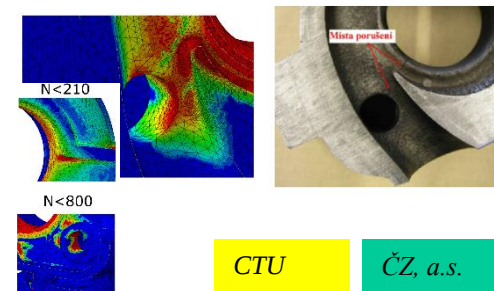
Approaches to low cycle thermo-mechanical fatigue LCTMF

Manson-Coffin	Neu/Sehitoglu	Abaqus	LMS Nagode
			
Standard approach - Simple identification - Not very precise, it uses cyclic tests only - Hysteresis loops calculation needed	Sophisticated approach - Extremely complex identification, no uniqueness (20 parameters) - Hysteresis loops calculation needed	Implemented in Abaqus - On the basis of progressive failure analysis - Modified to include temperature and notches - Insufficient precision and performance	Compromised and engineering approach - Identification of both LCF and creep - Semianalytical response - Elastic plastic fields calculations only needed
Original approach	Not to use	Not to use	Selected

Material identification



Fatigue analysis



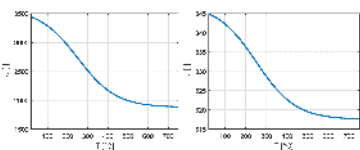
CTU

ČZ, a.s.

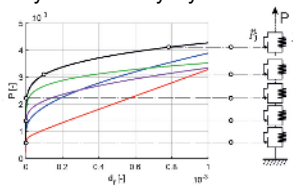
Výtah z prací za r. 2016 na WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování.

Identifikace materiálu

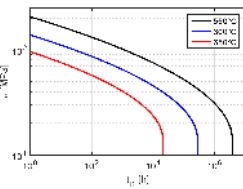
Chabochoův model s proměnnou teplotou
Model cyklického a dlouhodobého creepu
Model únavy



Únavové poškození
přes operátor poškození
(DOA). Efektivní deformace
– Prantlův operátor. Suma-
ce poškození pro jednotlivé
hysterezní smyčky.



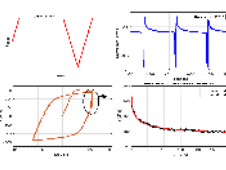
Creepové poškození
stanoveno prostřednictvím
Robinsonova zákona s
použitím Manson-Brownova
parametru



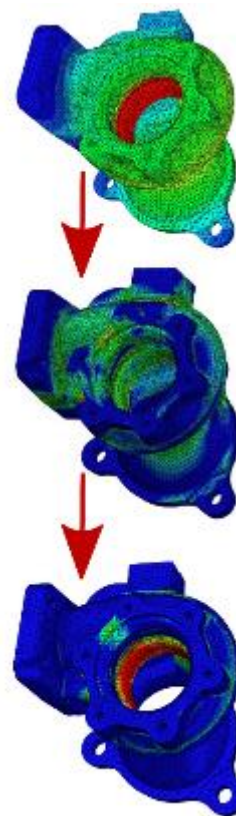
Celkové poškození

Únavové poškození +
Creepové poškození

Cyklický creep

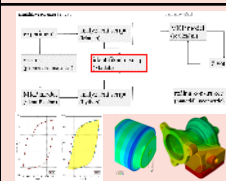


Výpočty únavy turbodmychadla

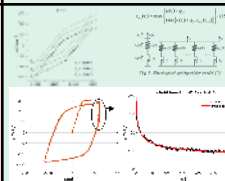


Výběr nejvhodnějšího postupu hodnocení NCTMÚ

Abaqus



LMS Nagode

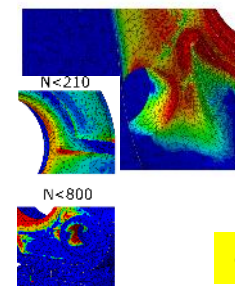


Implementováno v
MKP řešiči Abaqus

- Na bázi *progressive failure analysis*,
- Modifikováno na zohlednění teplota vrubů
- Malá přesnost i výkon
- Nepoužit

Kompromisní a
inženýrský přístup

- Identifikace NCÚ i creepu
- Semianalytické postupy
- Výpočet elasticko plastický
- Vybráno

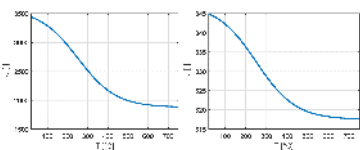


ČVUT

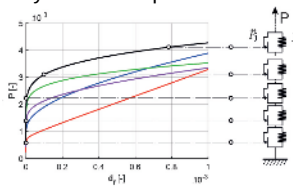
ČZ, a.s.

Abstract 2016 of WP14 Advanced methods of low-cycle fatigue under temperature loading evaluation.

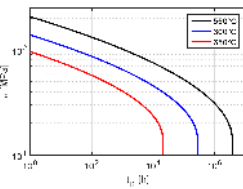
Identification/calibration of material
Chaboche model with variable temperature
Model of both cyclic and long term creep
Fatigue model



Fatigue damage
damage operator approach
(DOA). Effective strain by
Prandtl type operator.
Damage summed for single
hysteresis loops



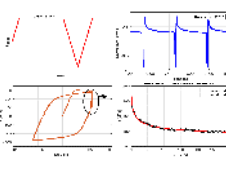
Creep damage
computed using **Robinson's**
rule. Missing values by
Restrained Manson-Brown
parameter.



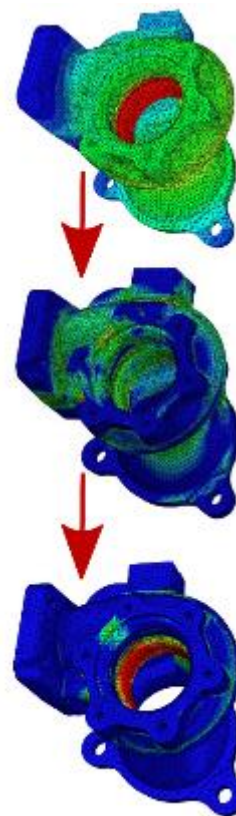
Complete damage

Fatigue damage +
Creep damage

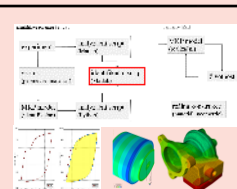
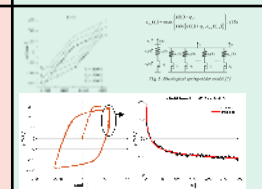
Cyclic creep

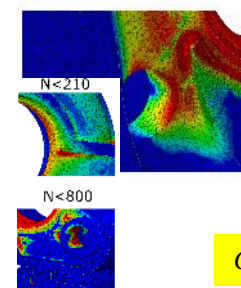


Turbocharger
fatigue analysis



The best approach to low cycle
thermo-mechanical fatigue
LCTMF

Abaqus	LMS Nagode
	
Implemented in Abaqus - On the basis of progressive failure analysis - Modified to include temperature and notches - Insufficient precision and performance Not to use	Compromised and engineering approach - Identification of both LCF and creep - Semianalytical response - Elastic plastic fields calculations only needed Selected



ČVUT

ČZ, a.s.