



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Centrum kompetence automobilového průmyslu Josefa Božka

- AutoSymposium a Kolokvium Božek 31. 10. až 2. 11. 2017, Roztoky -



Popis obsahu 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

Nejsou

Hlavní cíl balíčku a jeho plnění za dobu projektu

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



Plnění cílů, milníků a výstupů, splněné výsledky balíčku WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování

Plnění cílů

WP14M04:

Metodika hodnocení životnosti skříní turbodmychadel s využitím vhodného komerčního MKP programu (ABAQUS, NASTRAN).

Je hotovo

WP14DV005:

Stanovení životnosti skříně vybraného turbodmychadla na základě MKP analýzy napjatosti v provozních stavech a dosud kalibrovaných fenomenologických modelů materiálové odezvy a poškození. Forma: Technická zpráva.

Technická zpráva je sepisována



Plnění cílů, milníků a výstupů, splněné výsledky balíčku WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování

Přehled splatných výsledků a jejich plnění

WP14V005: Metodika určení životnosti skříní turbodmychadel

Jedná se o uplatnění znalostí a know-how získaných v rámci řešení pracovního balíčku " WP14: Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování" formou výsledku článek a software. Výsledek z balíčku 14, dílčího cíle C06. Je vytvořena metodika hodnocení a určení životnosti skříní turbodmychadel. Metodika je implementována jako software - soubor programových nástrojů a příslušných návodů ve znalostním systému DASY.

Půjde za 2016 do RIV:

Bartošák, M.; Španiel, M. Software routines for material model of low-cycle thermo-mechanical fatigue in Abaqus FEM software Software. 2016.



Plnění cílů, milníků a výstupů, splněné výsledky balíčku WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování

Přehled splatných výsledků a jejich plnění

WP14V006: Metodika určení životnosti skříní turbodmychadel

Jedná se o uplatnění znalostí a know-how získaných v rámci řešení pracovního balíčku " WP14: Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování" formou výsledku článků a software. Výsledek z balíčku 14, dílčího cíle C06. Je vytvořena metodika hodnocení a určení životnosti skříní turbodmychadel. Metodika je implementována jako software - soubor programových nástrojů a příslušných návodů ve znalostním systému DASY.

Půjde za 2016 do RIV:

Bartošák, M.; Španiel, M.; Nesládek, M. THERMO-MECHANICAL FATIGUE OF SI-MO 4.06 TURBINE HOUSING OF TURBOCHARGER - DAMAGE OPERATOR BASED LIFETIME PREDICTIONS. In: Engineering Mechanics 2016 - Book of full texts. Prague: Institute of Thermomechanics, AS CR, v.v.i., 2016. pp. 46-49. ISSN 1805-8248. ISBN 978-80-87012-59-8.



Plnění cílů, milníků a výstupů, splněné výsledky balíčku WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování

Přehled splatných výsledků a jejich plnění

WP14V006: Metodika určení životnosti skříní turbodmychadel

Jedná se o uplatnění znalostí a know-how získaných v rámci řešení pracovního balíčku " WP14: Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování" formou výsledku článků a software. Výsledek z balíčku 14, dílčího cíle C06. Je vytvořena metodika hodnocení a určení životnosti skříní turbodmychadel. Metodika je implementována jako software - soubor programových nástrojů a příslušných návodů ve znalostním systému DASY.

Půjde za 2016 do RIV:

Bartošák, M.; Španiel, M.; Doubrava, K.; Novotný, C. Isothermal LCF, relaxation and thermomechanical fatigue tests of Si-Mo based cast iron. In: Experimental Stresss Analysis 2016. Plzeň: Západočeská universita, Fakulta aplikovaných věd, 2016. ISBN 978-80-261-0624-1.



Plnění cílů, milníků a výstupů, splněné výsledky balíčku WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování

Přehled splatných výsledků a jejich plnění

WP14V006: Metodika určení životnosti skříní turbodmychadel

Jedná se o uplatnění znalostí a know-how získaných v rámci řešení pracovního balíčku " WP14: Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování" formou výsledku článků a software. Výsledek z balíčku 14, dílčího cíle C06. Je vytvořena metodika hodnocení a určení životnosti skříní turbodmychadel. Metodika je implementována jako software - soubor programových nástrojů a příslušných návodů ve znalostním systému DASY.

Půjde za 2016 do RIV.

Bartošák, M.; Španiel, M.; Černý, J. Lifetime calculation for turbine housing of turbocharger under thermo-mechanical loading: damage operator approach. In: LCF 8, Eighth International Conference on Low Cycle Fatigue. The German Association for Materials Research and Testing, 2017. pp. 93-98. ISBN 978-3-9814516-5-8.



Zhodnocení dopadu výsledků balíčku WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování

Celkové zhodnocení dopadu výsledků a jejich průběžná i budoucí realizace:

- **Vyvinuté experimentální zařízení umožňuje provádění základních zkoušek nutných pro popis pro teplotně-mech. únavy – pro válcovou i vrubovanou geometrii vzorku**
- **Inženýrská metodika kalibrace materiálových modelů běžně dostupných v komerčních MKP programech**
- **Prakticky použitelný zrychlený výpočet stabilizované viskoplastické odezvy materiálu při cyklickém teplotně-mechanickém zatěžování s využitím procedury Direct cyclic v programu Abaqus**
- **Implementace inženýrských výpočtů životnosti s ohledem na nízkocyklovou teplotně-mechanickou únavu vhodných pro návrhové i kontrolní výpočty – tj. pro elastoplastický resp. i viskoplastický popis materiálu**



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Centrum kompetence automobilového průmyslu Josefa Božka

- AutoSympo a Kolokvium Božek 31. 10. až 2. 11. 2017, Roztoky -



Stav přípravy SoVV a implementačních plánů balíčku WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování

Příprava Smluv o využití výsledků (SoVV) a v nich obsažených Implementačních plánů.

SoVV 2016-17

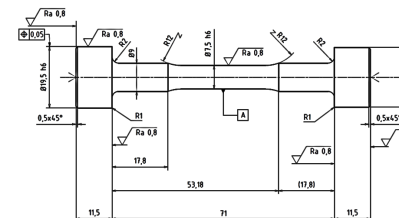
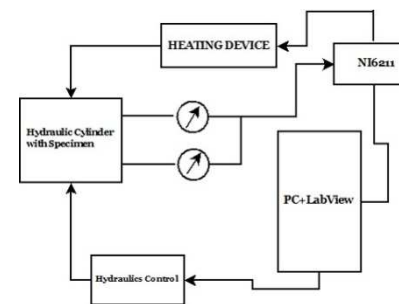
WP14: Výsledky implementuje FS ČVUT sama, ČZ Strakonice souhlasí



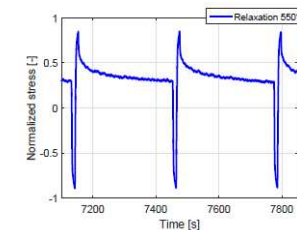
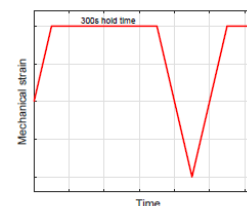
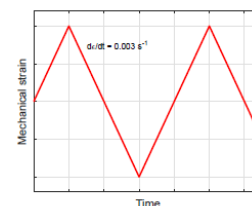
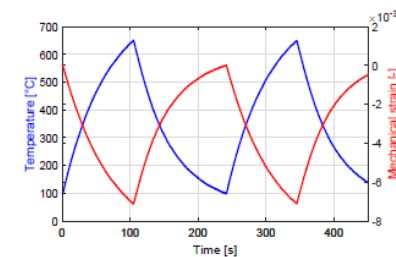
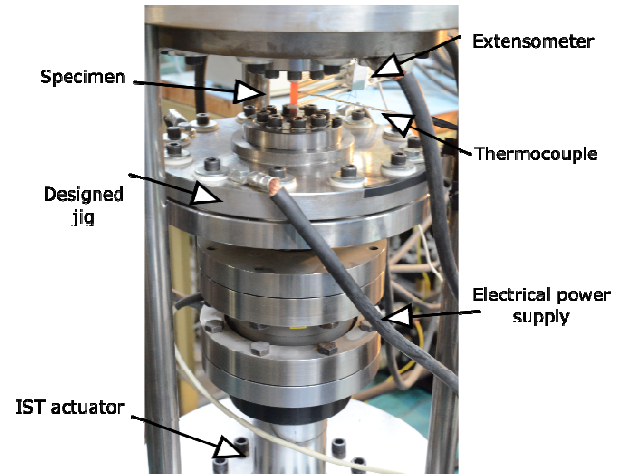
WP14 Advanced Methods of Thermal-Mechanical Low-Cycle Fatigue Damage Prediction

Experimental Program

- **Conceptual design, dimensioning, design and manufacturing, assembly and start of operation, programming of control -> Test Stand**
- **LCF isothermal tests with and without dwell time**
- **OP-TMF and IP-TMF tests**
- **TMF tests for notched specimens**



Test stand, tested specimens, experiments.

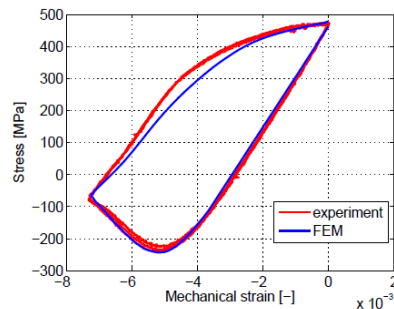
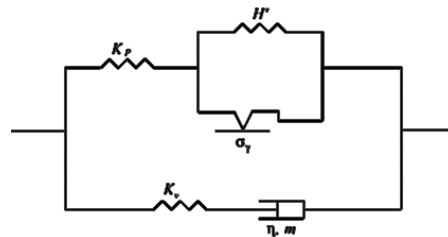




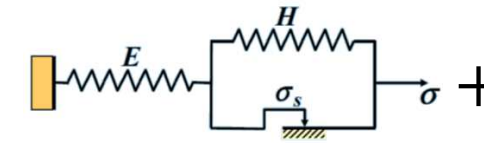
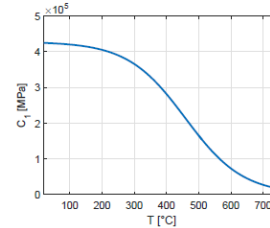
WP14 Advanced Methods of Thermal-Mechanical Low-Cycle Fatigue Damage Prediction

Material Model Identification

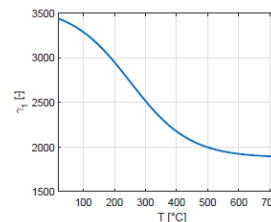
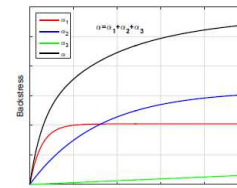
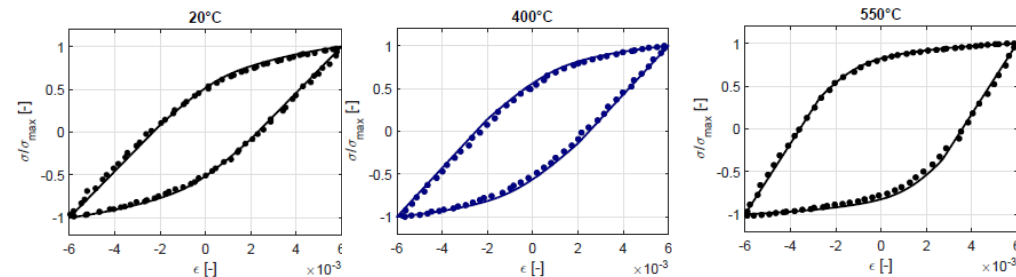
- Elastic-plastic with viscoplastic approximation (post-processing)
- Visco-plastic material model – Two layer viscoplasticity**



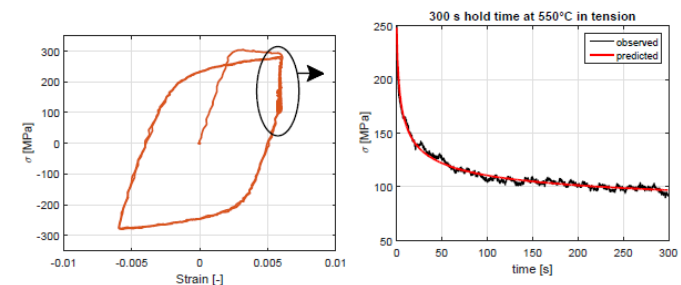
Systematical
temperature
dependent
calibration



LCF Tests



LCF Tests with dwell time



OP-TMF TEST – Viscoplastic material model



WP14 Advanced Methods of Thermal-Mechanical Low-Cycle Fatigue Damage Prediction

Thermal-mechanical Fatigue Prediction

Damage operator approach implementation into Abaqus (C/C++):

- For elastic-plastic material model – including relaxation with Prandtl operators
- And for visco-plastic material model

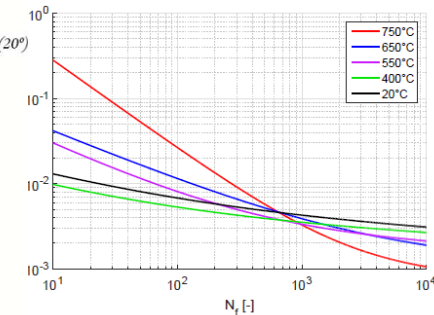
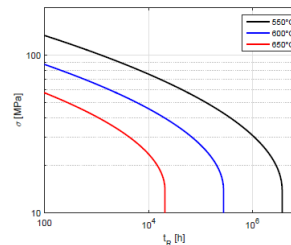
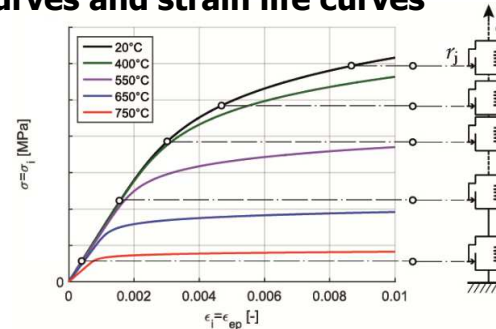
Multiaxial criterion:

- Signed von Mises
- Critical plane approach

Creep master curves

SWT parameter. Continuous damage calculation – temperature dependency taken into account.

Identification – Prandtl operators – Cyclic stress-strain curves and strain life curves

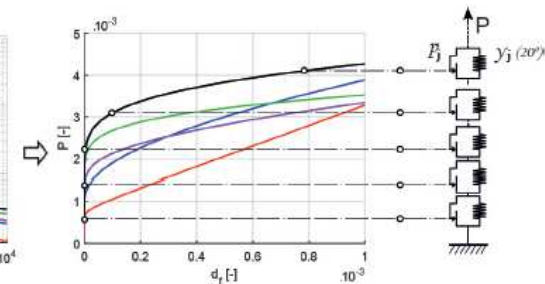
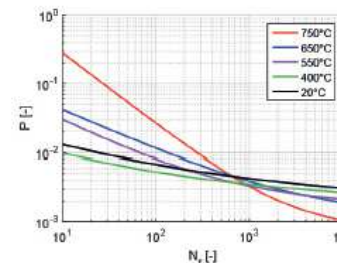


$$\mathcal{D}(t_i) = \sum_{j=1}^{n_p} \mathcal{D}_j(t_i) = \sum_{j=1}^{n_p} \gamma_j(T_i) P_{\gamma_j}(t_i)$$

$$P(t_i) = P_{SWT}(t_i) = \sqrt{(\sigma_m(t_i) + \sigma_a(t_i)) E(T_i) \epsilon_a^{ep}(t_i)}$$

$$D(t_i) = D_f(t_i) + D_c(t_i)$$

Creep and fatigue damage summation.

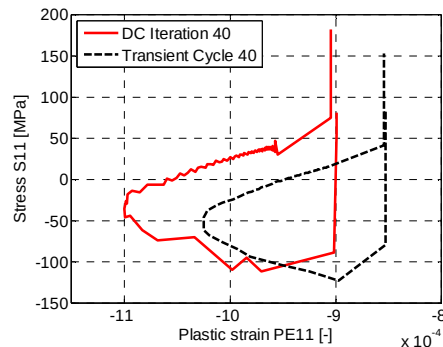




WP14 Advanced Methods of Thermal-Mechanical Low-Cycle Fatigue Damage Prediction

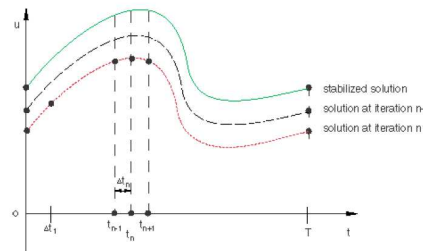
Turbocharger Turbine Housing Structural FEA Case Study

- Direct Cyclic – time efficient procedure in Abaqus
- Classical approach

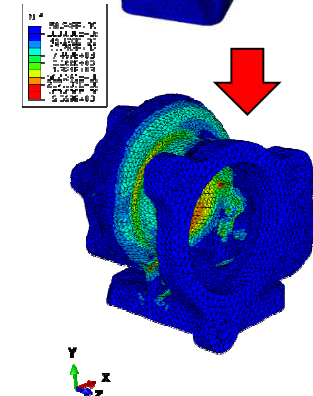
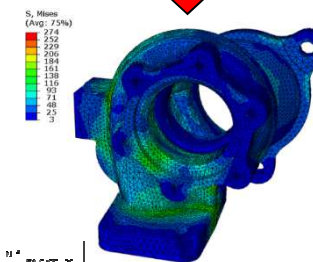
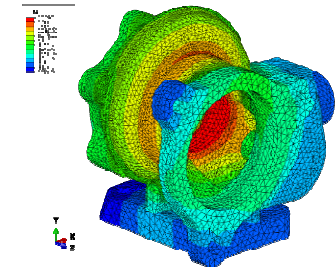
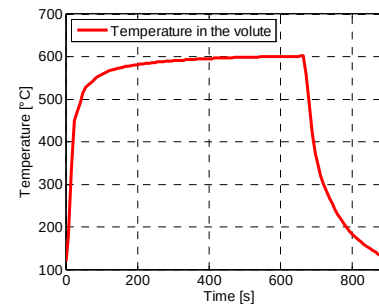


Direct cyclic analysis (40 iterations) is approximately 20% of the computational time spent in the transient analysis (40 steps).

	Transient Analysis - 40 cycles	Direct cyclic -40 iterations, 40 Fourier Terms
Wall clock time [h]	124,9 h	24,3 h



1. Transient Thermal FE Analysis



2. Structural FE Analysis

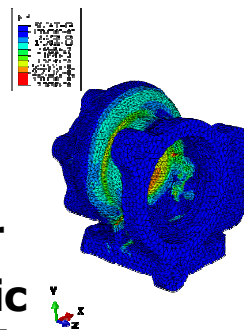
3. Thermal-mechanical fatigue damage calculation



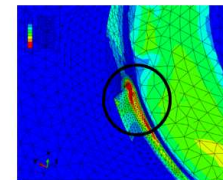
WP14 Advanced Methods of Thermal-Mechanical Low-Cycle Fatigue Damage Prediction

Turbocharger Turbine Housing Thermal-mechanical Fatigue Calculation

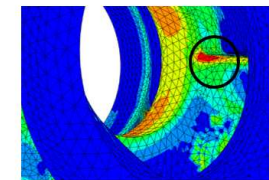
- Simplified FE model
- Closed WasteGate cycle
- Critical plane, Signed HMH for elastic-plastic with viscoplastic approximation material model
- Visco-plastic material model



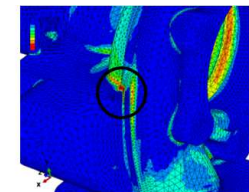
Lifetime Calculation Results



Critical location I

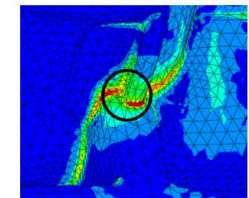


Critical location II



Critical location III

N - number of cycles to initialize the damage								
	DC it=10		DC it=40		Transient cycle=40		Elastic-Plastic + approx.	
	HMH	CPA	HMH	CPA	HMH	CPA	HMH	CPA
I	63	28	65	29	58	20	4	2
II	106	34	107	28	108	34	6	1
III	120	22	122	29	99	25	47	4
IV	35	3	36	6	45	4	38	11



Critical location IV

Turbocharger Turbine Housing More Complex FE models

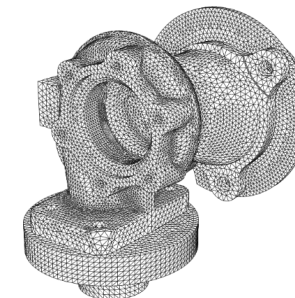
- Full model – Turbine housing assembly
- Thermal loading cycles - Closed WG, Open WG cycles



WP14DV005:

Stanovení životnosti skříňe vybraného turbodmychadla na základě MKP analýzy napjatosti v provozních stavech a dosud kalibrovaných fenomenologických modelů materiálové odezvy a poškození. Forma: Technická zpráva.

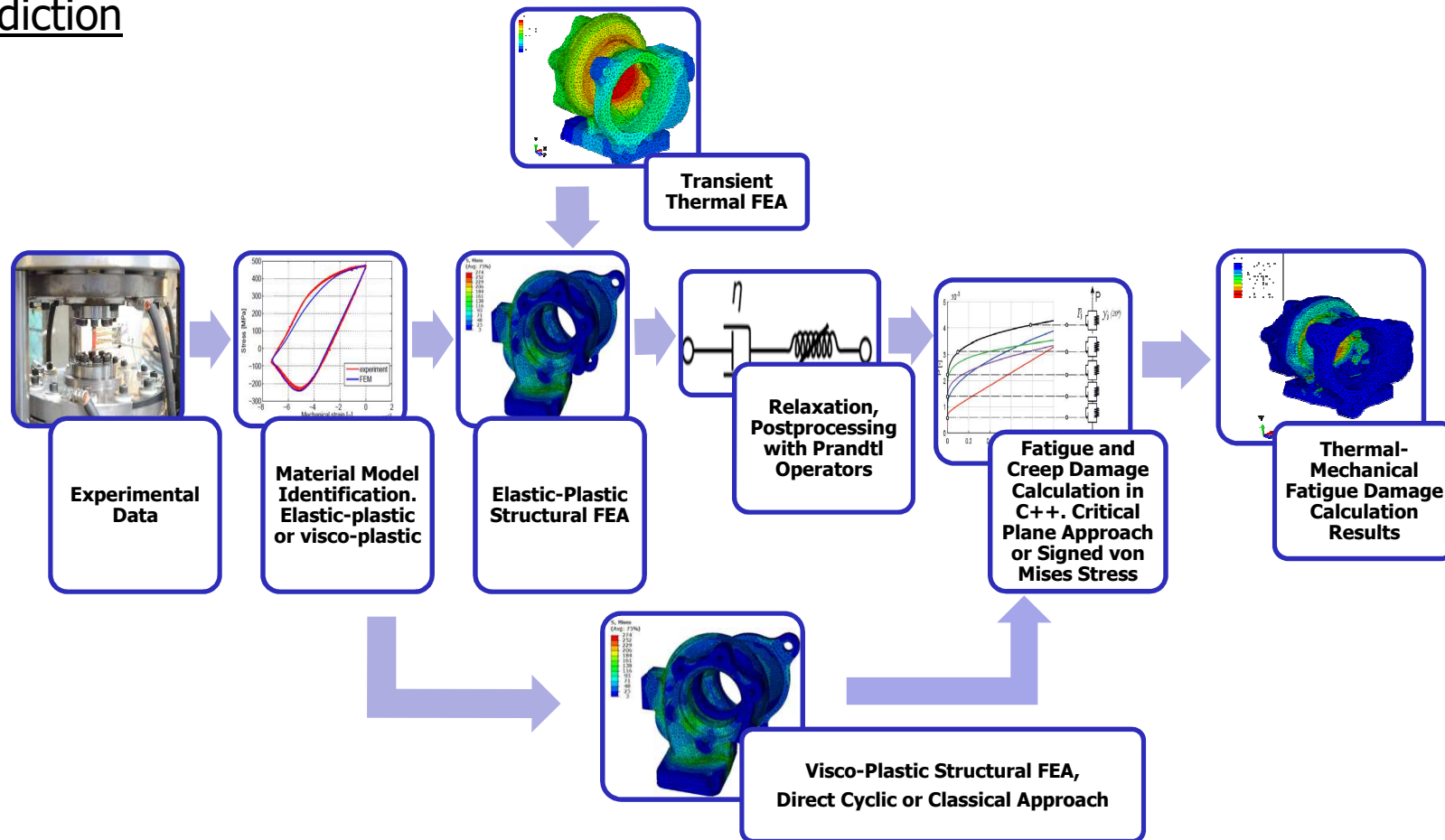
Technická zpráva je sepisována





WP14 Advanced Methods of Thermal-Mechanical Low-Cycle Fatigue Damage Prediction

Advanced Methods of Thermal-Mechanical Low-Cycle Fatigue Damage Prediction



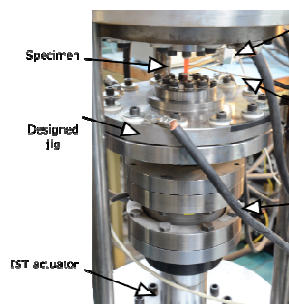


Popis plnění balíčku WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování

- **Hlavní cíl, vyvinout a verifikovat komplexní metodiku pro numerický popis nízkocyklové teplotně-mechanické únavy včetně creepu, byl splněn.**
- **Navržená metodika se opírá o materiálová data kalibrovaná v podmínkách časově proměnné teploty i mechanické deformace (obojí je možno získat s využitím v rámci projektu zkonstruovaného a vyrobeného zkušebního standu – Coffinova aparátu) a o numerický výpočet viskoplastické odezvy řešeného dílu.**
- **Metodika je využitelná v oblastech spalovacích motorů a turbín**
- **Další vývoj a využití metodiky bude probíhat v CAAT v rámci OPVVV.**

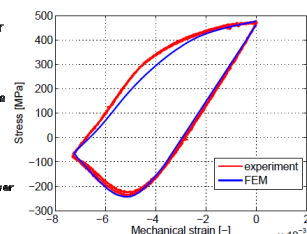
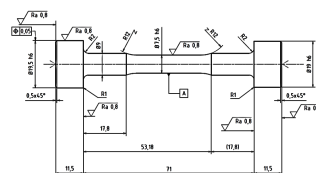
Výťah z prací za léta 2012-2017 na WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování

**Návrh zkušebního stroje NCTMÚ.
Zkoušky nízkocyklové únavy za
proměnné i konstantní teploty.
Identifikace teplotně závislého
viskoplastického a elastoplastického
materiálového modelu.**

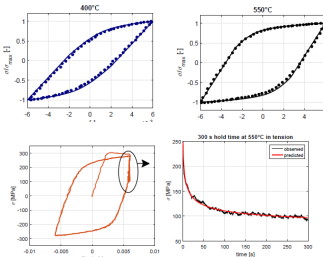


**Teplotně-mechanická únava
ne/vrubaovaných vzorků.**

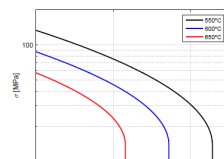
Kalibrace multiaxiálního kritéria
životnosti. Signované HMH napětí a
metoda kritické roviny mód I.



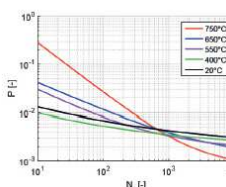
- Viskoplastický materiálový model.
- Elastoplastický model s aproximací relaxace napětí.
- Systematická teplotně závislá kalibrace materiálového modelu



**Procedura Direct Cyclic.
Implementace výpočtu
relaxace napětí pomocí
Prandtlových operátorů.
Model pro výpočet
poškození od NCTMÚ.**



Křivky creepu.
Použity pro výpočet
poškození od creepu.

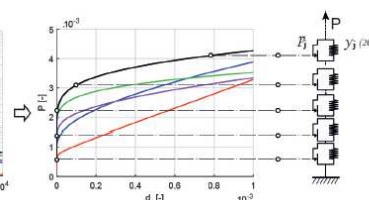


Poškození od NCTMÚ.

Únavové a creepové poškození jsou kontinuálně vyčísleny pro každý inkrement s ohledem na proměnnou teplotu.

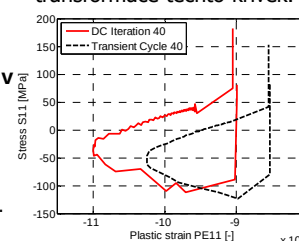
Procedura Direct Cyclic v MKP programu Abaqus.

Efektivní procedura pro výpočet stabilizované viskoplastické odezvy obzvláště velkých modelů.



Únavové křivky deformace.

Únavové poškození je vypočteno pomocí hysteretických operátorů na základě transformace těchto křivek.

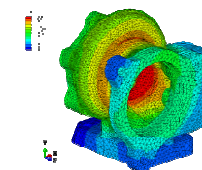


MKP analýza skříně turbodmychadla.

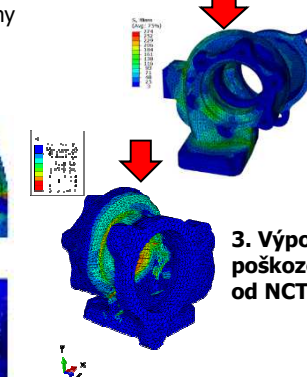
Inženýrský přístup – Damage operator approach

- Elastoplastický materiálový model s aproximací viskoplasticity
- Nebo viskoplastický model
- Signované HMM napětí
- Metoda kritické roviny

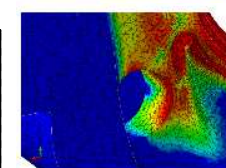
1. Teplotní MKP analýza



2. Mechanická analýza MKP



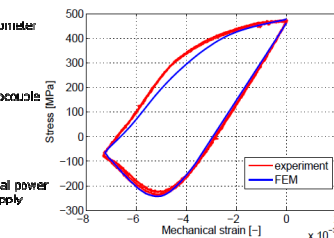
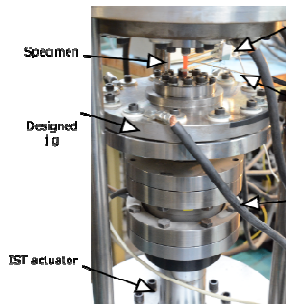
3. Výpočet poškození od NCTMÚ





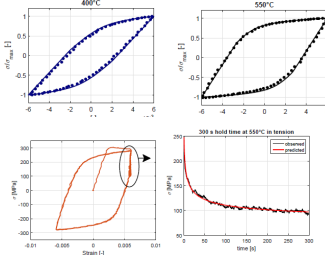
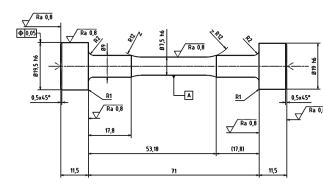
Abstract 2012-2017 of WP14 Advanced Methods of Thermal-Mechanical Low-Cycle Fatigue Damage Prediction

Design and Control of TMF Test Stand. Experimental Tests (LCF, TMF, Notched Specimens). Identification/Calibration of Temperature Dependent Chaboche Material Model (Elastic-Plastic) and Two-layer Viscoplastic Model.

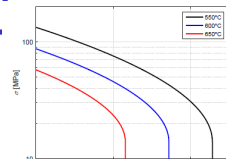


- Two-layer visco-elastic elastic-plastic material model.
- Elastic-plastic with approximation.
- Systematical temperature dependent calibration.

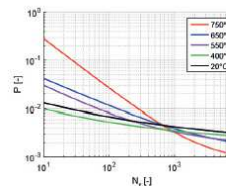
Thermal-mechanical fatigue of un/notched specimens. Identification/calibration of multiaxial fatigue criterion. Signed MMH. Critical Plane Approach.



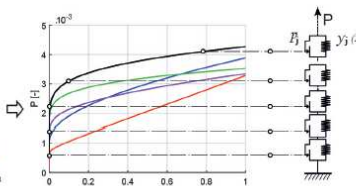
Approximation for Elastic-Plastic Model or Direct Cyclic. Multiaxial Fatigue and Creep Damage Accumulation. Thermo-Mechanical Fatigue Model.



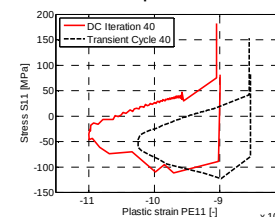
Creep master curves. Required for creep damage calculation.



Total damage. Creep damage and fatigue damage are calculated continuously. Variable temperature is taken into account.



Strain-life curves. Transformed to P-d curves. Fatigue damage calculated with the Prandtl operators.



Direct Cyclic procedure in Abaqus.

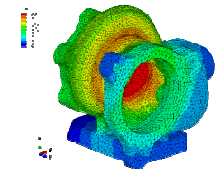
Effective procedure for stabilized visco-plastic response of large FE model.

FEA of Turbocharger Turbine Housing.

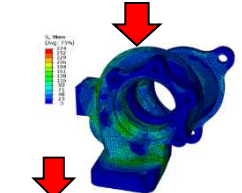
Damage operator approach. Engineering approach.

- Elastic-plastic material model with viscoplastic approximation
- Visco-plastic material model
- Signed von Mises
- Critical Plane approach

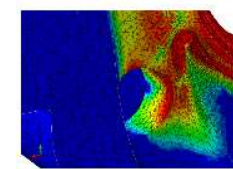
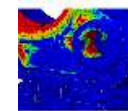
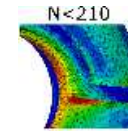
1. Transient Thermal FE Analysis



2. Structural FE Analysis



3. Thermal-mechanical fatigue damage calculation



ČVUT

ČZ, a.s.



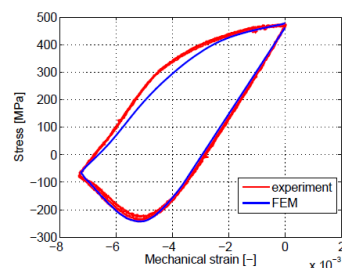
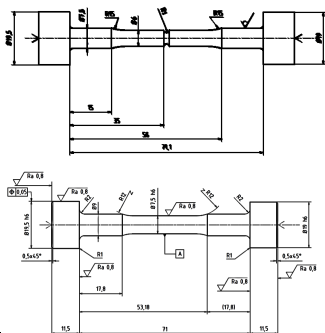
Abstract 2017 of WP14 Advanced Methods of Thermal-Mechanical Low-Cycle Fatigue Damage Prediction

Identification of Temperature Dependent Twolayer Visco-Elastic Elastic-Plastic Material Model TMF Tests for Notched Specimens



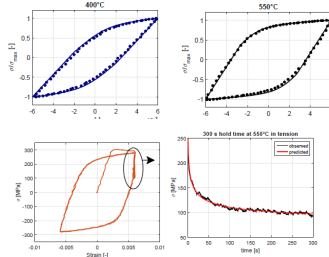
Thermal-mechanical fatigue of notched specimens.

Identification/calibration of multiaxial fatigue criterion.



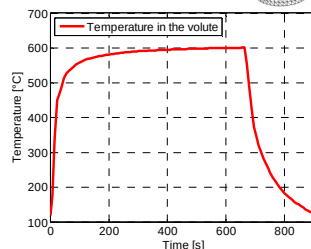
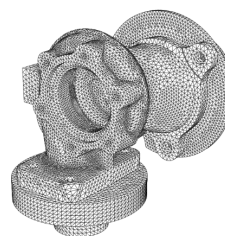
Two-layer visco-elastic elastic-plastic material model.

Parallel network.
Description of cyclic viscoplastic material behaviour in Abaqus.



FEA of Turbocharger Turbine Housing Assembly

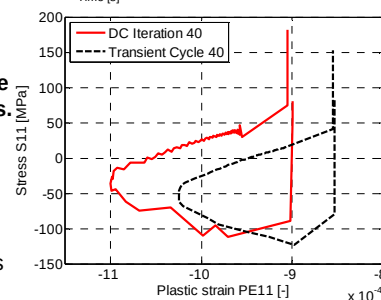
FE model of the turbine housing.
Thermal, structural and fatigue analysis.



Temperature loading.

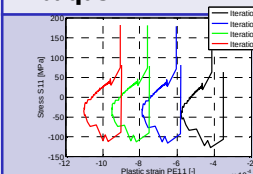
Temperature history in the volute of turbine housing.

Direct cyclic procedure in Abaqus.
Classic approach versus Direct cyclic.
Hysteresis loops in global direction 1.



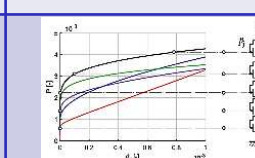
Multiaxial Thermo-mechanical Fatigue

Direct Cyclic Procedure in Abaqus

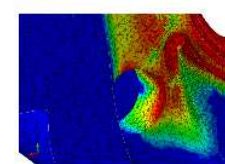


- Fast solution for large engineering problems
- Avoids the considerable numerical expense associated with a transient analysis
- Stabilized solution obtained iteratively

DOA with Critical Plane Approach



- Compromised and engineering approach
- Implemented in C++ for viscoplastic material (2017)
- Creep and fatigue damage
- Elastic plastic fields approximated (2016)
- Critical Plane Approach added in C++ code (2017)



ČVUT

ČZ, a.s.



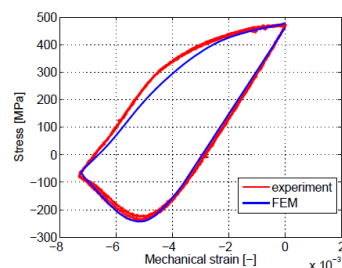
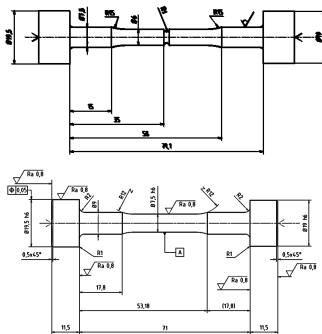
Výtah z prací za r. 2017 na WP14 Vývoj pokročilých metod hodnocení nízkocyklové únavy při teplotním zatěžování

Identifikace visko-elastického, elasto-plastického materiálového modelu v závislosti na teplotě. NCTMÚ vrubovaných vzorků.



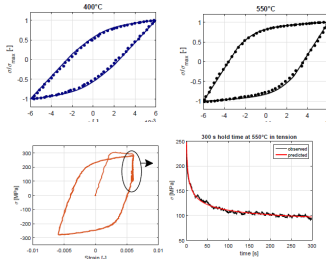
Teplotně-mechanická únavu vrubovaných vzorků.

Kalibrace víceosého kritéria životnosti při NCTMÚ.



Visko-elastický, elasto-plastický materiálový model.

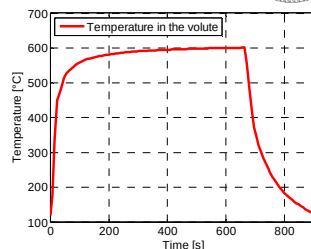
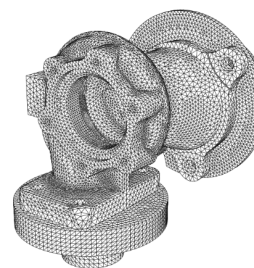
Koncepce paralelní sítě. Popis cyklické viskoplasticity v prostředí MKP programu Abaqus.



MKP analýza sestavy skříně turbodmychadla

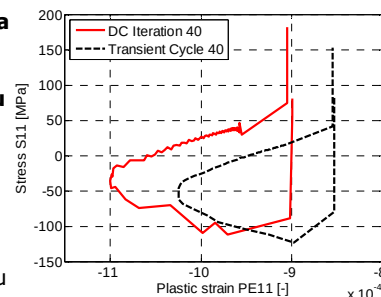
MKP model sestavy skříně turbodmychadla.

Teplotní, mechanická a únavová analýza.



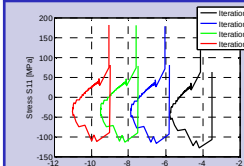
Teplotní zatížení. Průběh teploty v závislosti na čase ve volutě skříně turbodmychadla.

Procedura Direct Cyclic v programu Abaqus. Porovnání klasického řešení a odezvy získané procedurou Direct Cyclic



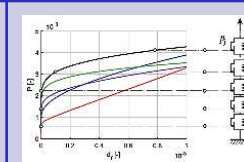
Víceosá nízkocyklová teplotně-mechanická únavu

Procedura Direct Cyclic v programu Abaqus

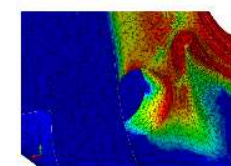


- Efektivní řešení pro cyklickou viskoplasticitu
- Časově efektivnější než klasický výpočet
- Stabilizovaná odezva získána iterativně
- Efektivní řešení pro rozsáhlé inženýrské problémy

DOA Metoda kritické roviny



- Kompromisní a inženýrský přístup
- Implementováno také pro viskoplastický model
- Poškození od creepu a únavy
- Výpočet elastoplastický a semi-analytické řešení relaxace (2016)
- Přidána metoda kritické roviny



ČVUT

ČZ, a.s.