

POSOUZENÍ PROVOZUSCHOPNOSTI OHYBU VT PAROVODU PROSTŘEDKY FFS

Jan Korouš, Ondřej Bielak, Jan Masák

BiSAFE, s.r.o., Malebná 1049, 149 00 Praha 4, e-mail: korous@bisafe.cz

V příspěvku je uveden příklad použití procedury FFS (Fitness-For-Service) pro posouzení provozuschopnosti ohybu VT parovodu, u kterého byla detekována nadměrná creepová deformace. Analýza zahrnovala rozbor napjatosti zahrnující nelineární chování materiálu, výpočet rozvoje creepového poškození a simulaci růstu trhliny v ohybu vlivem procesů tečení materiálu. Výpočet doby růstu byl proveden pravděpodobnostním způsobem. Výsledkem je pravděpodobnost dosažení kritických rozměrů trhliny v závislosti na čase.

Klíčová slova: FFS, creep, růst trhliny, ohyb

Úvod

K posuzování provozuschopnosti defektních komponent se v současnosti využívají postupy označované zkratkou FFS z anglického názvu „Fitness-For-Service“, což lze volně přeložit jako „použitelnost pro provoz“. Při posouzení se identifikují mechanismy poškození, stupeň degradace materiálu, provozní podmínky a další faktory ovlivňující životnost tak, aby bylo možno provést analýzu, jejíž výsledkem je predikce životnosti posuzovaného zařízení společně s doporučeními pro bezpečný provoz.

V současnosti existuje několik postupů FFS, které se používají v různých průmyslových odvětvích (např. [1,3,4,5]). Postup řešení lze rozdělit do několika etap:

- Záznam a vyhodnocení provozních podmínek zařízení
- Shromáždění podkladů o vlastnostech materiálu, z něhož je konstrukce vyrobena
- Provedení analýzy napjatosti
- Výpočet zbytkové životnosti, respektující dominantní poškozující mechanismy, které vedou k degradaci materiálu

Vypočtená zbytková životnost se porovná s nároky provozovatele zařízení a doporučí se opatření, která zajistí bezpečné dosažení požadované doby provozu. Opakované kontroly pak mohou zpřesnit predikovanou životnost a snížit míru neurčitosti, kterou je každý výpočet zatížen.

Příspěvek se zabývá praktickou ukázkou FFS postupu pro provozovanou komponentu. Jde o posudek životnosti ohybu VT parovodu, u něhož byla po cca 180 000 hodinách změřena vysoká creepová deformace. Projektovaná životnost ohybu byla 200 000 hodin a úkolem bylo prověřit zda bude moci být inkriminovaná komponenta provozována až k tomuto časovému horizontu.

Provedená měření

U inkriminovaného ohybu byla proměřena tloušťka stěny, změřena tvrdost a provedena defektoskopická kontrola. Z výsledků vyplynulo, že tloušťka stěny se po obvodu ohybu mění a dosahuje nejnižší hodnoty na vnějším vlákně ohybu. Měření tvrdosti vykázalo nízké hodnoty, kterým odpovídá pevnost při tečení a rychlost tečení v oblasti dolní meze užitných vlastností. Defektoskopická kontrola neprokázala přítomnost trhlin přesahující registrační úroveň 2 mm.

Provozní podmínky a materiálové vlastnosti

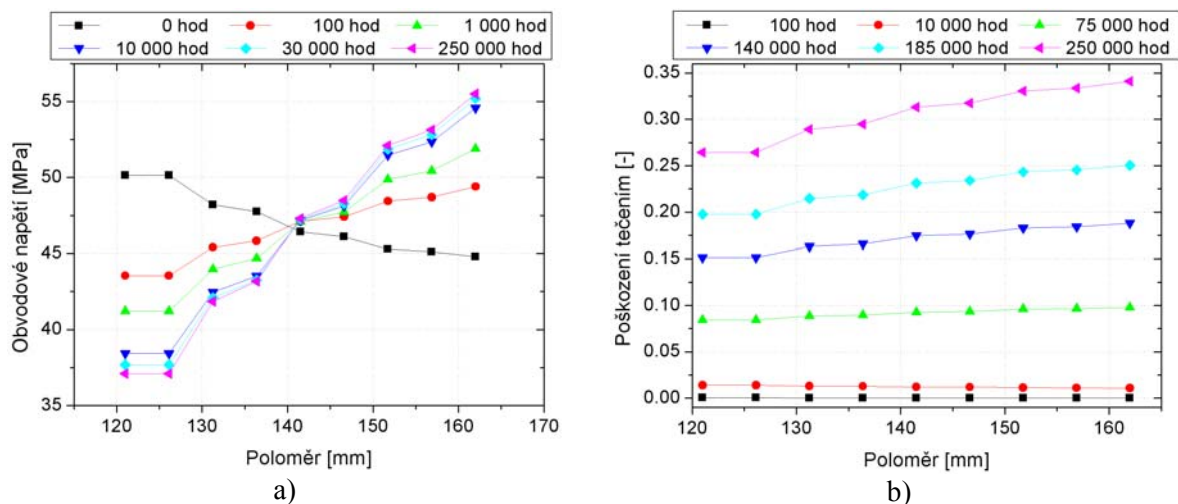
Provozní podmínky posuzovaného ohybu jsou charakterizovány efektivní teplotou a tlakem, pro které se provádí výpočet reziduální životnosti. Hodnoty těchto parametrů byly zjištěny

zpracováním záznamu z řídicího systému zařízení. K dispozici byly údaje za několik měsíců provozu. Za sledované období byl zjištěn efektivní tlak $p_{ef} = 16,3$ MPa a efektivní teplota $T_{ef} = 545^{\circ}\text{C}$, která zahrnovala i korekci na nepřesnost měření.

Materiálové vlastnosti odpovídali oceli podle ČSN 41 5128. S ohledem na vyšší naměřené hodnoty creepové deformace bylo předpokládáno, že creepové vlastnosti odpovídají dolní mezi užitečných vlastností, jak již bylo naznačeno výše.

Analýza napjatosti

Za účelem zjištění průběhu složek napětí ve stěně posuzovaného ohybu byla provedena analýza napjatosti metodou konečných prvků. Úloha byla řešena pro výše uvedené efektivní hodnoty teploty a tlaku a bylo uvažováno nelineární chování materiálu vlivem creepu. Výpočtový model též zohledňoval skutečnou geometrii ohybu.



Obr. 1 Průběh obvodového napětí (a) a creepového poškození (b) skrz stěnu ohybu v různých časech (Vzdálenost měřena od osy ohybu)

Vypočtené obvodové napětí a creepové poškození ve stěně ohybu je znázorněno na obr.1. Vykreslené grafy znázorňují průběh obou veličin v místě s nejmenší tloušťkou stěny (vnější vlákno ohybu). Je patrné, že vlivem dlouhodobého provozu v podmínkách creepu dochází k redistribuci napětí. Maximum obvodového napětí, které se původně nacházelo na vnitřním povrchu ohybu, se postupně přemístilo na vnější povrch. Podstatné je, že v časech 10 000 hodin a delších se průběhy napětí již výrazně nemění. Rozvoj creepového poškození (viz obr. 1b) je zprvu rovnoměrný po celém průřezu, se vzrůstajícím časem však dochází k výraznějšímu rozvoji creepového poškození na vnějším povrchu ohybu.

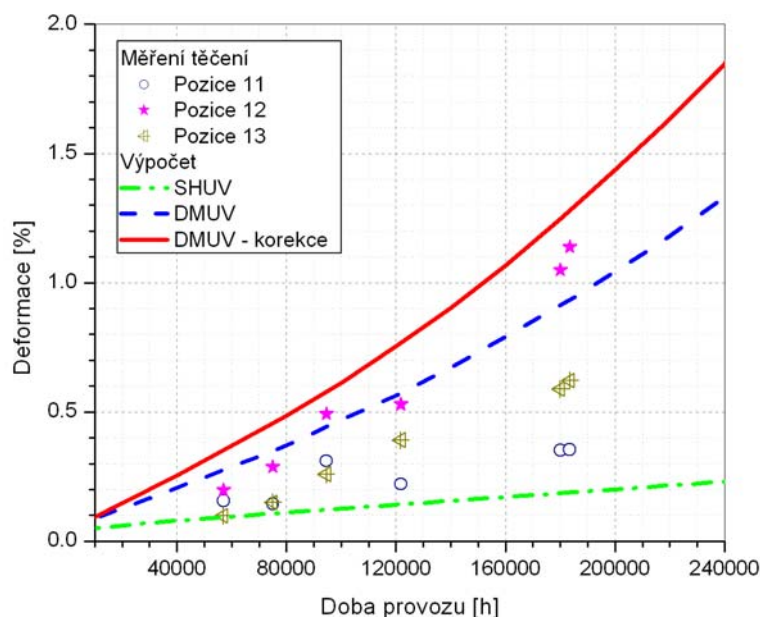
Porovnání měřené a vypočtené deformace

Po analýze napjatosti bylo možno provést porovnání vypočtené a měřené creepové deformace. Obr. 2 znázorňuje výsledky měření a výpočtů. Měření tečení byla provedena v několika řezech (pozice 11 až 13). Naměřené deformace pro pozice 11 a 13 leží v pásmu ohraničeném hodnotami pro střední hodnotu (SHUV) a dolní mez (DMUV) užitečných vlastností při teplotě 545°C . V pozici 12 (ve středové části ohybu) byly zjištěny deformace, které leží v okolí křivky vypočtené pro dolní mez užitečných vlastností. V grafu na obr. 2 je navíc vynesena závislost deformace na čase pro materiál na dolní mezi užitečných vlastností s uvažováním korekce na víceosý stav napjatosti (DMUV - korekce). Všechny naměřené hodnoty leží pod touto křivkou.

Simulace růstu trhliny

Za účelem posouzení doby, kterou potřebuje trhlina k tomu, aby dosáhla kritických rozměrů, byla provedena simulace růstu trhliny pomocí metod lomové mechaniky. V ohybu byla postulována trhlina, která se nachází na vnějším vlákne, v místě s nejmenší tloušťkou stěny. Předpokládáno bylo,

že trhlina roste z vnějšího povrchu směrem dovnitř (viz obr. 3). K tomuto předpokladu nás opravňují výše uvedené výsledky rozboru napjatosti a nálezy trhlin v ohybech, publikované v literatuře [6].



Obr. 2 Porovnání měřené a vypočtené deformace posuzovaného ohybu (SHUV – střední hodnota užitných vlastností, DMUV – dolní mez užitných vlastností)

Výpočet růstu trhliny vlivem procesů tečení byl proveden podle postupu BEGL R5 [1]. Rychlost růstu trhliny lze vyjádřit rovnicí:

$$\frac{da}{dt} = A_c (C^*)^{n_c}, \quad (1)$$

kde A_c , n_c jsou materiálové konstanty a C^* je parametr analogický k J -integrálu. Hodnoty A_c a n_c nejsou bohužel pro řadu materiálů k dispozici. Některé hodnoty lze nalézt v literatuře, např. [5], popř. lze konstanty A_c a n_c odhadnout. Hodnota n_c kolísá okolo 1 a podle BEGL R5 [1] lze použít odhad $n_c = 0,85$. Konstantu A_c lze pak odhadnout podle vztahu:

$$A_c = \frac{B}{\varepsilon_f}, \quad (2)$$

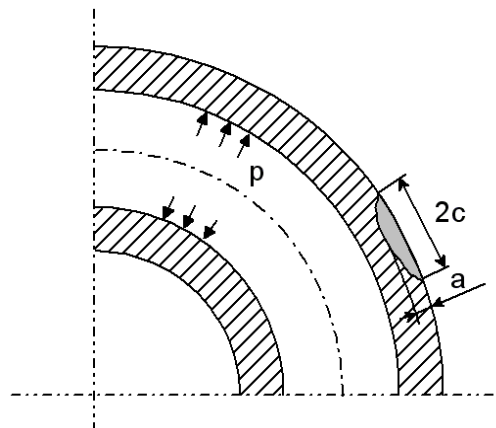
kde B je konstanta závislá na stavu napjatosti a ε_f je mezní creepová deformace. Pokud je rychlost růstu trhliny vyjádřena v m/hod, C^* je v MPa.m/hod a ε_f je bezrozměrná, pak BEGL R5 [1] doporučuje $B = 0,003$.

Hodnotu C^* jako funkci hloubky trhliny lze určit přímým výpočtem z jeho definice (viz např. [2]) za použití numerického řešení metodou konečných prvků, popř. lze použít přibližný vztah [R5]:

$$C^* = \frac{K^2}{\sigma_{ref}} \frac{d\varepsilon_c}{dt}, \quad (3)$$

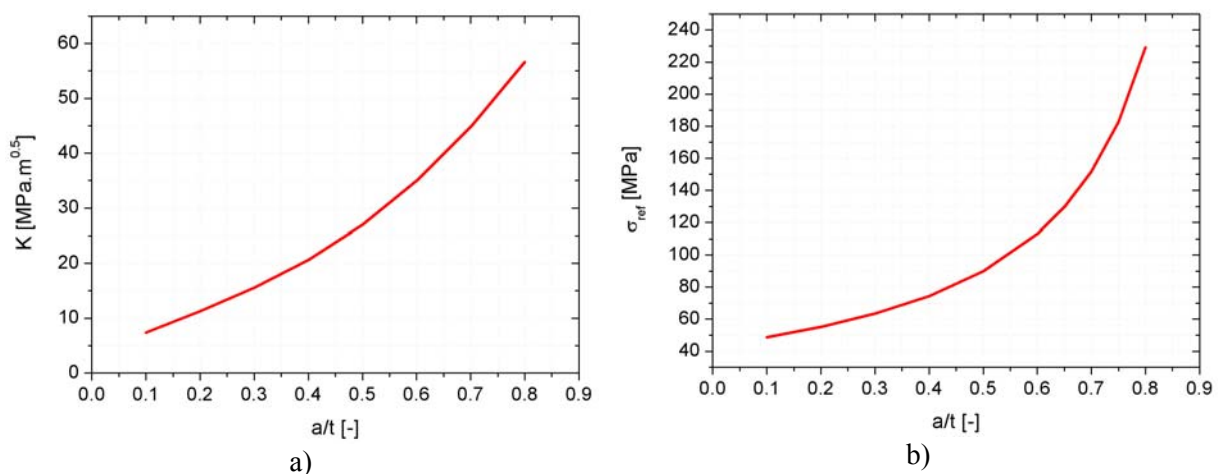
kde K je součinitel intenzity napětí, σ_{ref} je referenční napětí a $d\varepsilon_c/dt$ je rychlost creepové deformace. Veličiny K a σ_{ref} jsou parametry lomové mechaniky a pro řadu konfigurací trhlin je lze najít v kompendiích, které jsou např. součástí BEGL R6 [3], popř. API RP 579 [4]. Jelikož se nepodařilo

nalézt vztahy pro výpočet součinitele intenzity napětí K a referenčního napětí σ_{ref} , byly tyto parametry odhadnuty ze vztahů platných pro přímou trubku se stejnými rozměry.



Obr. 3 Schematické znázornění posuzovaného defektu v ohybu

Pro posuzovanou konfiguraci trhliny bylo předpokládáno, že délka trhliny (rozměr $2c$) je mnohem větší než hloubka trhliny a . Proto byl efekt délky trhliny zanedbán a byly použity vztahy pro nekonečně dlouhou trhlínu, u které je jediným charakteristickým rozměrem hloubka trhliny a . Na obr. 4 jsou znázorněny závislosti pro součinitel intenzity napětí K a referenční napětí σ_{ref} , které byly použity při výpočtu.



Obr. 4 Závislost součinitele intenzity napětí K (obr. a) a referenčního napětí σ_{ref} (obr. b) na relativní hloubce trhliny a/t (t je tloušťka stěny)

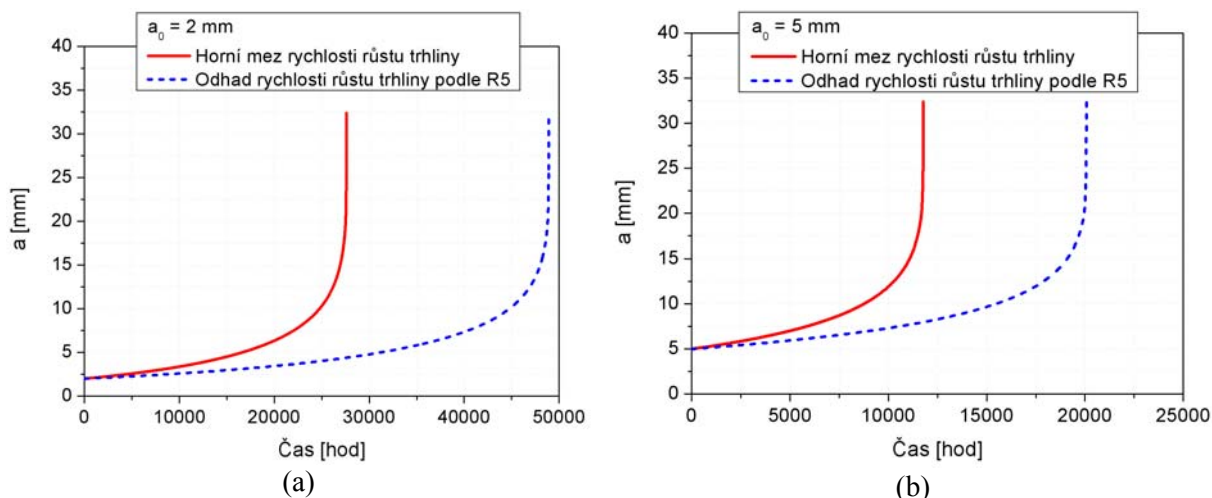
Výpočet hloubky trhliny a jako funkce času znamená integrovat rovnici (1). Analytické řešení této úlohy je prakticky nemožné, proto bylo nutno použít numerickou integraci. Pro řešení byla zvolena dopředná Eulerova metoda. Časový krok byl řízen na základě kontroly přírůstku hloubky trhliny, který nesměl překročit stanovenou mez. Navíc bylo v každém kroku kontrolováno, zda nedosáhla trhlina kritických rozměrů. Byla použita 2 kritéria:

- Posouzení stability trhliny pomocí FAD (Failure Assessment Diagram) přístupu
- Dosažení mezního creepového poškození ve zbytkovém průřezu před čelem trhliny, tj. splnění podmínky, že poškození je rovno 1.

Mezního stavu bylo dosaženo, pokud byla splněna alespoň jedna z výše uvedených podmínek.

Výsledky výpočtu růstu trhliny pro různé materiálové parametry A_c , n_c a pro různé počáteční hloubky trhliny a_0 jsou zobrazeny na obr. 5. Horní mez rychlosti růstu byla převzata z BS 7910 [5] a taktéž byl proveden odhad podle vztahu (2). Nejkonzervativnější výsledek byl dosažen pro kombinaci

horní meze rychlosti růstu trhliny a počáteční hloubky trhliny $a_0 = 5$ mm, jak je patrné z obr. 4b). Doba do poruchy je v tomto případě cca 11 700 hodin.



Obr. 5 Závislosti hloubky trhliny na čase pro různé rychlosti růstu trhliny a různé počáteční hloubky trhliny a_0

Z uvedených výsledků je patrné, že rychlost růstu trhliny je silně ovlivněna variabilitou vstupních dat. Proto byl proveden pravděpodobnostní výpočet, který umožňuje vzít v úvahu stochastický charakter jednotlivých veličin. Dominantní vliv mají především hodnoty konstant A_c a n_c ve vztahu (1). Experimenty prokázaly, že exponent n_c výrazný rozptyl nevykazuje, a proto ho lze považovat za deterministický parametr. Výrazný rozptyl naopak vykazuje parametr A_c .

Při výpočtu pravděpodobnosti poruchy bylo předpokládáno, že A_c má logaritmicke-normální rozdělení. Konstanty distribuční funkce pro tento typ rozdělení byly určeny na základě hodnot uvedených v [5], kde lze pro některé materiály nalézt hodnoty A_c pro střední úroveň rychlosti růstu trhliny a dále pak pro horní mez rychlosti růstu trhliny. Logaritmicke-normální rozdělení bylo omezeno hodnotami na dolní a horní mezi pro rychlost růstu trhliny, tj. šlo o tzv. useknuté rozdělení. Vlastní výpočet byl realizován numericky metodou Monte Carlo. Pomocí generátoru náhodných čísel byly generovány hodnoty A_c podle zadané distribuční funkce a pro každou takto vytvořenou hodnotu byl proveden výpočet doby do poruchy. Celý výpočet se mnohokrát opakoval a výsledkem byla množina hodnot dob do poruchy. Po zpracování metodami matematické statistiky jsme získali empirickou distribuční funkci dob do poruchy. Na obr. 5 jsou vykresleny průběhy pravděpodobnosti doby do poruchy pro počáteční hloubku $a_0 = 2$ mm a $a_0 = 5$ mm. V tab. 1. jsou vypsány doby do poruchy pro zadané pravděpodobnosti.

Tab. 1 Doby do poruchy pro zadané pravděpodobnosti

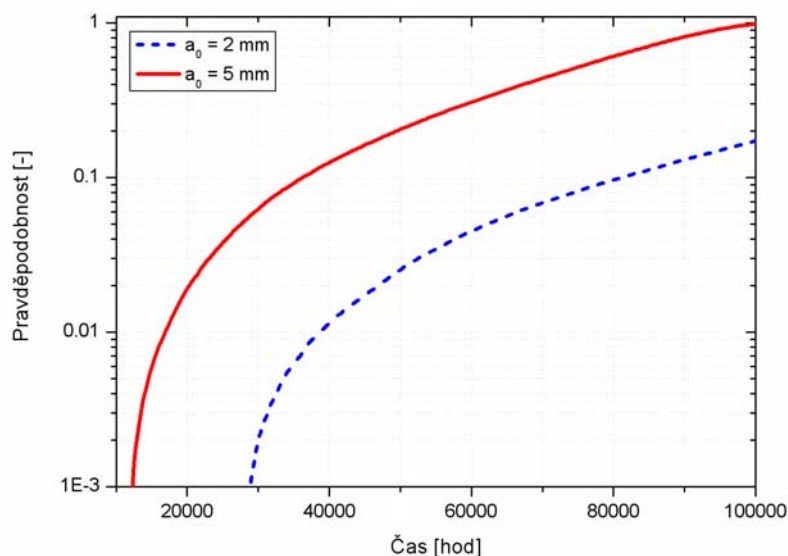
Pravděpodobnost	Počáteční hloubka trhliny	
	$a_0 = 2$ mm	$a_0 = 5$ mm
0,001	28 870	12 342
0,01	36 680	16 898

Závěr

Pro posuzovaný ohyb parovodu byla provedena analýza napjatosti, výpočet rozvoje creepové deformace a simulace růstu trhliny vlivem procesů tečení. Růst trhliny a posouzení mezního stavu bylo provedeno pravděpodobnostním způsobem. Z výsledků vyplývá, že pravděpodobnost dosažení mezního stavu, tj. vznik trhliny a její růst na kritické rozměry, je nízká. Jelikož defektoskopická kontrola nepotvrdila přítomnost trhlín přesahující registrační úroveň 2 mm, je možno považovat výpočet růstu trhliny o počáteční hloubce 2 mm za konzervativní. K dosažení návrhové životnosti 200 000 hodin zbývá cca 20 000 hodin. Z výpočtů růstu trhliny je evidentní, že doba růstu trhliny by měla být delší než doba požadovaná ke spolehlivému provozu, z čehož vyplývá, že ohyb by měl být provozuschopný. V době cca 200 000 hodin provozu by však měla být provedena další kontrola, která

by se měla soustředit na měření creepové deformace a detekci defektů. Naměřená deformace by měla být zanesena do grafu na obr. 2 a porovnána s vypočtenými hodnotami. Výsledky budoucí inspekce potom mohou posloužit jako podklad pro další posudek provozní spolehlivosti a provozovatel bude moci rozhodnout, zda bude eventuelně možné životnost ohybu prodloužit.

Uvedený příklad dokumentuje, jaké možnosti nabízí postupy FFS pro posouzení životnosti a provozuschopnosti energetických zařízení. Provedené predikce mohou výrazně zefektivnit provoz celého zařízení především z hlediska údržby a plánování výměny nejvíce poškozených komponent.



Obr. 6 Závislost pravděpodobnosti porušení ohybu jako funkce času pro různé počáteční hloubky trhliny a_0

Literatura

- [1] An Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures, R5 Issue 3, British Energy Generation Ltd. 2003
- [2] Anderson T.L.: Fracture Mechanics – Fundamentals and Application. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 1995
- [3] Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, R6 – Revision 4, British Energy Generation Ltd. 2001
- [4] Fitness-for-Service, API Recommended Practice 579, American Petroleum Institute, 2000
- [5] Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, BS 7910:2005, British Standards Institution, London, 2005
- [6] Trzeczczynsky J., Dobosiewicz J., Creep nad Creep-fatigue Failures of the Power Units Elements after Long Time Operation, pp 592-601, ECCC Creep Conference 12 – 14 September, London

Kontaktní adresa autora

<i>Jméno</i>	Ing. Jan Korouš, Ph.D., Ing. Ondrej Bielak, CSc., Ing. Jan Masák
<i>Pracoviště</i>	BiSAFE, s.r.o.
<i>Adresa pro korespondenci:</i>	Malebná 2/1049, 149 00 Praha 4
<i>E-mail:</i>	korous@bisafe.cz
<i>Fax:</i>	267 913 334
<i>Telefon:</i>	267 913 337