

ROZVOJ CREEPOVÉ DEFORMACE A POŠKOZENÍ KOMORY PŘEHŘÍVÁKU Z CrMoV OCELI

Jan Masák, Jan Korouš
BiSAFE s.r.o., Malebná 1049, 149 00 Praha 4

Príspevek uvádí výsledky redistribuce napětí, rozvoje deformace a creepového poškození metodou konečných prvků. Ve výpočtu se uvažuje komplexní creepový model, který popisuje rozvoj deformace ve všech třech stádiích tečení. Kromě zatížení vnitřním přetlakem za konstantní teploty je brán v úvahu rovněž gradient teploty vyvolaný rozdílnou úrovní teplot v jednotlivých trubkách přehříváku.

Klíčová slova: creep, MKP, redistribuce napětí, ocel CrMoV

Úvod

Komory přehříváku jsou konstrukční prvky vystavené působení zvýšených teplot a tlakům a dochází v nich k poškození vlivem procesů tečení (creepu). Pevnost při tečení je samozřejmě vzata v úvahu při projekci zařízení. Je však nutno podotknout, že normalizované výpočty jsou značně zjednodušené a nejsou schopny detailně postihnout chování tělesa během provozu v exponovaných místech, jako jsou např. vývrtvy komor přehříváku.

Jak ukazují některé publikované práce (např. [1]) vznikají v komorách během provozu na hranách vývrtů a v můstcích mezi řadami vývrtů trhliny. Cílem následujícího příspěvku je studium vlivu lokální změny teploty v jedné řadě vývrtů na poškození procesy creepu u komory vyrobené z materiálu 0,5Cr0,5Mo0,3V. Pomocí numerických metod, jmenovitě metody konečných prvků, byla zjišťována úroveň napětí, rozsah creepové deformace a poškození v jednotlivých místech komory, přičemž byly vzaty v úvahu různé rozdíly teplot.

Výpočtový model a metoda řešení

Vzhledem k rozsahu úlohy byla modelována pouze část komory. Model komory byl tvořen 11926 20-uzlovými isoparametrickými elementy s 61534 uzly (viz obr. 1)

Křivky tečení materiálu (ocel 15 128.5) byly popsány komplexním modelem zahrnujícím efekt poškození materiálu. Tento přístup umožňuje věrnější postihu všech etap tečení v porovnání se zjednodušeným a často používaným Nortonovým modelem creepu. Zanedbání primární a terciální etapy tečení může někdy vést k velmi odlišným výsledkům (viz např. [2]).

Celková deformace ε_c při creepových procesech je dána jako funkce času t , napětí σ a teploty T výrazem [3]:

$$\varepsilon_c(t | \sigma, T) = \varepsilon_0 \left[\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_0} \right]^{g(\pi)}, \quad (1)$$

kde ε_0 je počáteční a ε_m mezní deformace. Parametr $g(\pi)$ je funkce poškození, která určuje tvar křivky tečení:

$$g(\pi) = \pi^N \left[\frac{1 + \exp(-2\pi^K)}{1 + \exp(-2)} \right]^M, \quad (2)$$

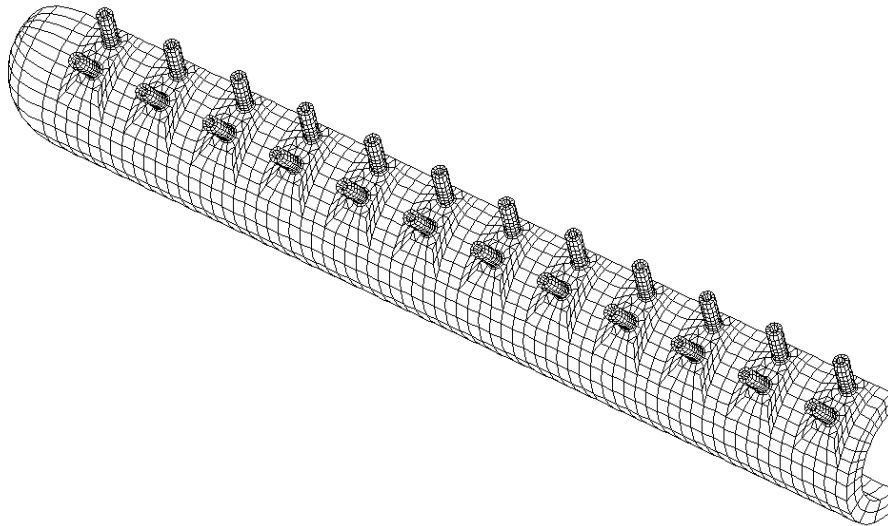
kde $\pi = t/t_r$ je creepové poškození a t_r je doba do lomu. Doba do lomu t_r a mezní deformace ε_m jsou rovněž funkcemi teploty a napětí:

$$\log(t_r) = A_1 + A_2 \log\left|\frac{1}{T} - \frac{1}{A_5}\right| + A_3 \log\left|\frac{1}{T} - \frac{1}{A_5}\right| \log[\sinh(A_6 \sigma T)] + A_4 \log[\sinh(A_6 \sigma T)] \quad (3)$$

$$\varepsilon_m = \exp\left[M_1 + M_2 \operatorname{tgh}\left[\frac{\ln(t_r) - M_3 - M_4 T}{T}\right]\right] + 100 \frac{\sigma}{E(T)}, \quad (4)$$

$E(T)$ je modul pružnosti při teplotě T .

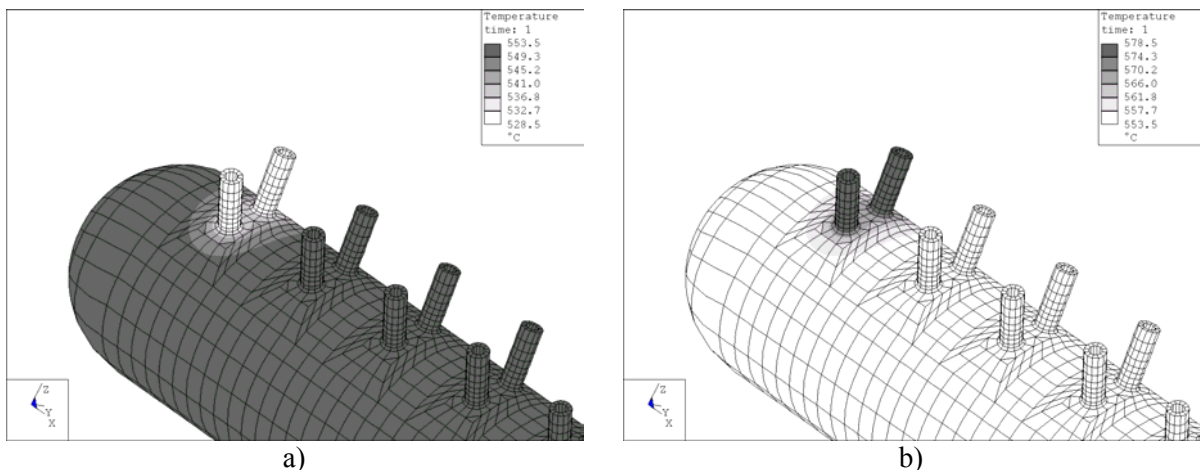
Pro výpočet byly použity křivky tečení na úrovni středních a minimálních hodnot. Tím bylo umožněno zahrnout také vliv rozptylu materiálových vlastností. Regresní parametry komplexního creepového modelu jsou uvedeny ve zprávě [5][6].



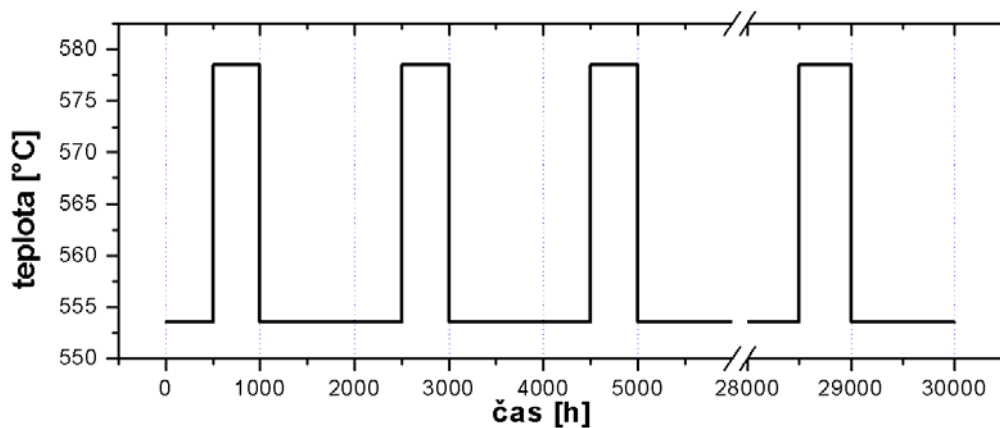
Obr. 1 - Výpočtový model

Jak již bylo zmíněno v úvodu, k vlastnímu výpočtu redistribuce napětí byla použita metoda konečných prvků, konkrétně systém PMD [4]. Jako zatížení byl uvažován vnitřní přetlak o velikosti 18,65 MPa. Komora byla analyzována pro různé případy teplotního zatížení:

1. V celé komoře byla teplota média 553,5 °C.
2. Teplota média v krajní řadě vývrtů komory byla snížena o 25 °C na 528,5 °C (viz obr. 2a).
3. Teplota média v krajní řadě vývrtů komory byla zvýšena o 25 °C na 578,5 °C (viz obr. 2b).
4. Řada vývrtů byla vystavena teplotnímu cyklu, kdy se teplota média měnila mezi 553,5 °C a 578,5 °C. Časový průběh je znázorněn na obr. 3.



Obr. 2 - Rozložení teplot při ohřevu krajní řady nátrubků na 528,5 a 578,5 °C

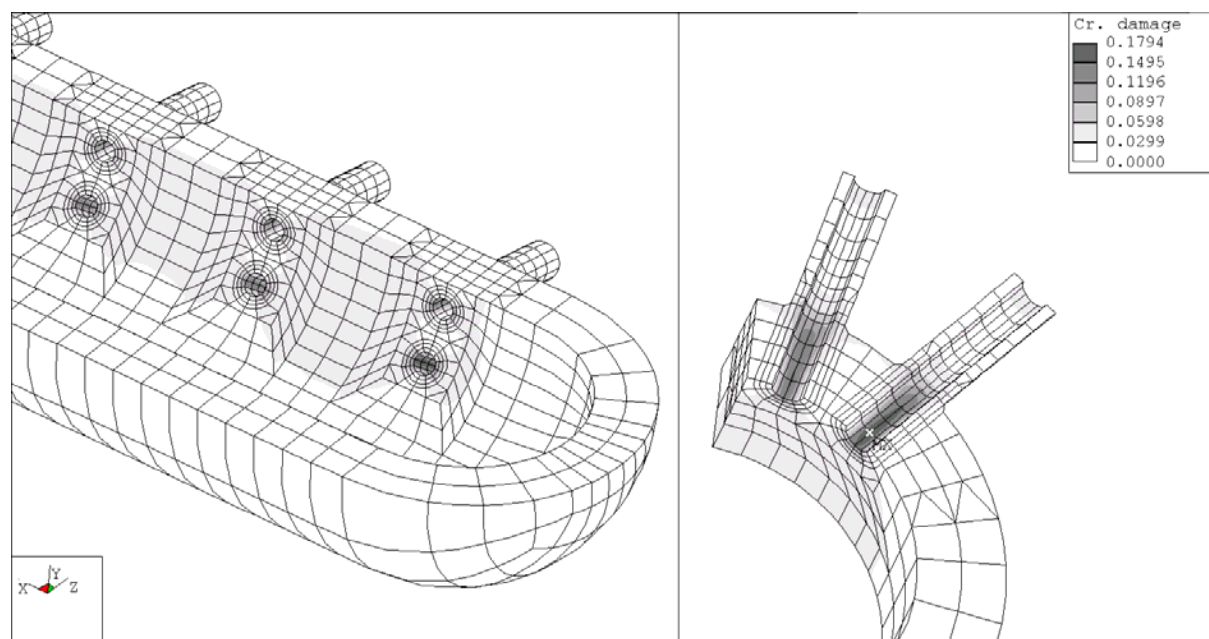


Obr. 3 - Časový průběh teploty v krajní řadě nátrubků

Výpočty pro případy 1 až 3 byly ukončeny v čase 250 000 hodin, pro teplotní cyklus v případě 4 pak v čase 30 000 hodin.

Výsledky výpočtů

Jak je již patrné ze zadání úlohy, centrem zájmu byla krajní řada vývrtů vystavená simulovaným změnám teploty média. Z obr. 4 je patrné, že změna teploty v okolí vývrtů byla skutečně lokální a nedošlo k výraznému ovlivnění napjatosti vývrtů v sousední řadě. Výsledky výpočtů jsou analogické. Jako příklad je uveden obr. 4, který znázorňuje rozložení poškození creepovými procesy v okolí krajní řady vývrtů v čase 30 000 hodin. Použity byly materiálové vlastnosti na střední úrovni a teplota média v místě vývrtu byla zvýšena na hodnotu 578,5°C. Nejvyšší hodnoty poškození (17,94%) bylo dosaženo v krajním vývrtu ve vzdálenosti zhruba jedné čtvrtiny tloušťky stěny od vnitřního povrchu.



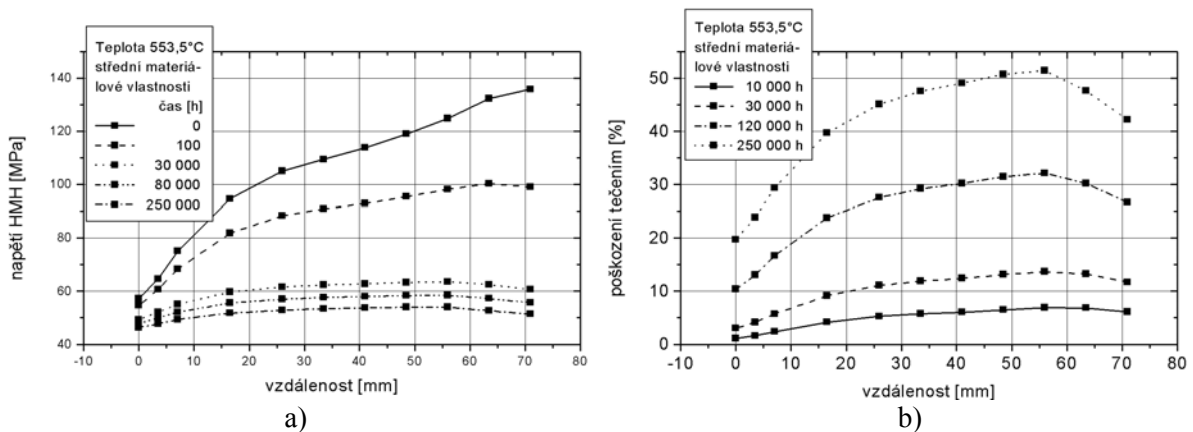
Obr. 4 - Rozložení poškození creepovými procesy v krajní řadě vývrtů; Čas 30 000 hodin, střední materiálové vlastnosti, teplota média ve vývrtu 578,5°C

O průběhu napětí, efektivní creepové deformace a poškození detailněji vypovídají grafy, které znázorňují průběh sledovaných veličin podél povrchu vývrtu od vnějšího k vnitřnímu povrchu komory.

Obr. 5 znázorňuje průběh redukovaného napětí HMH a poškození v nejvíce exponovaném místě pro nominální výpočtovou teplotu 553,5°C a střední materiálové vlastnosti. Zobrazeny jsou různé křivky odpovídající různým časovým okamžikům.

Z obr. 5a je vidět, že redukované napětí výrazně relaxuje a již po 30 000 hodinách provozu dosahuje hodnoty zhruba 60 MPa. Další pokles již není tak výrazný, v čase 250 000 hodin dosahuje redukované napětí v průměru 50 MPa.

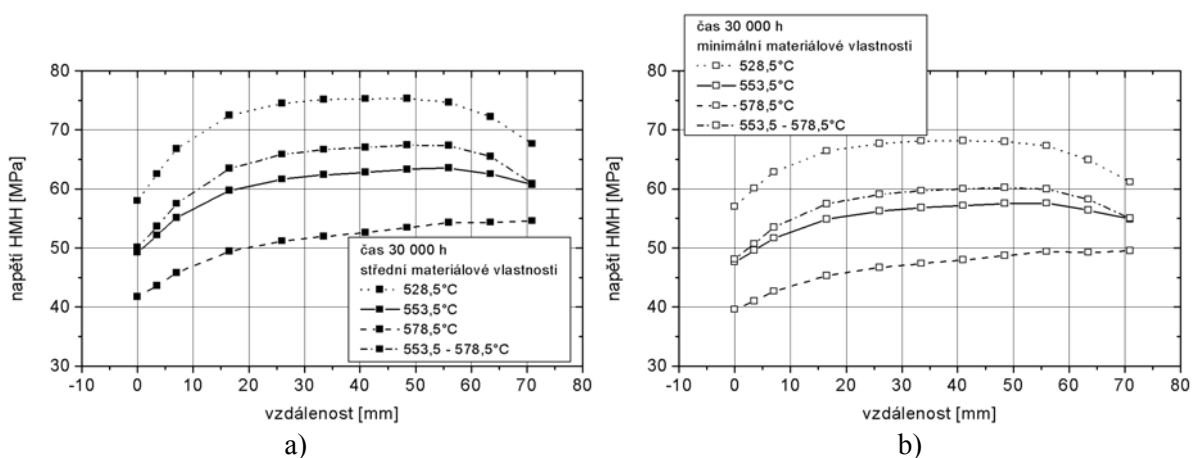
Poškození znázorněné na obr. 5b roste v průběhu provozu a dosahuje v 250 000 hodinách hodnot kolem 50%. Nejvíce exponované místo leží ve vzdálenosti zhruba 15 mm od vnitřního povrchu.



Obr. 5 - Rozvoj redukovaného napětí HMH a poškození tečením při teplotě 553,5°C pro střední hodnoty materiálových vlastností

Vliv zatěžovacího teplotního cyklu a různých materiálových vlastností je znázorněn na následujících obrázcích.

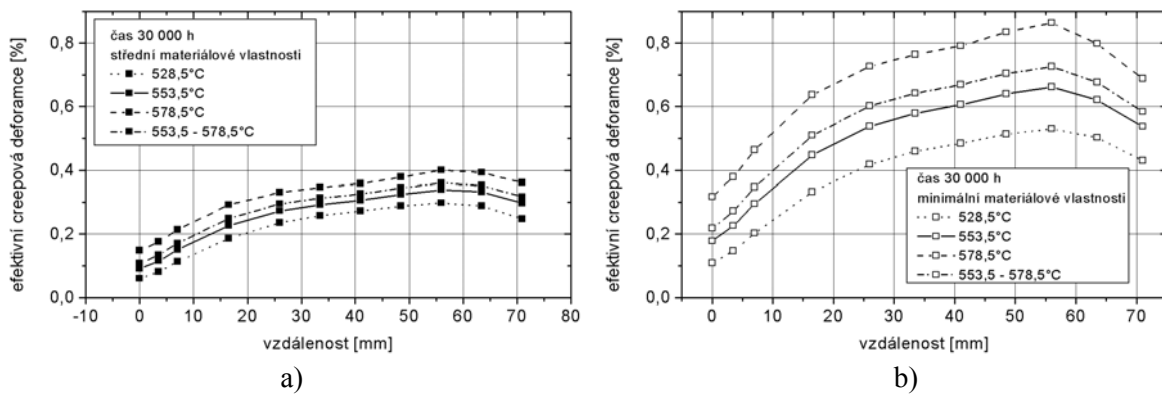
Obr. 6 dokumentuje rozdíly v relaxaci redukovaného napětí HMH pro různé teploty a materiálové vlastnosti na střední (obr. 6a), resp. dolní úrovni užitečných vlastností (obr. 6b). Grafy jsou vyneseny pro čas 30 000 hodin. Rychlost relaxace je závislá na teplotě, takže jak je na obr. 6 vidět, pro teplotu 528,5°C napětí relaxují výrazně pomaleji než pro teplotu 578,5°C. U minimálních materiálových vlastností je rychlost tečení vyšší, a proto je i relaxace napětí rychlejší. Zajímavý je vliv zatížení teplotním cyklem podle obr. 3. Zatímco vliv na relaxaci napětí v krajních místech vývrtnu (tj. na vnitřním a vnějším povrchu) je nevýrazný, ve střední části dochází ke zpomalení relaxace a hodnoty redukovaného napětí zůstávají nad úrovní případu, kdy jsou vývrty vystaveny nominální teplotě média 553,5°C.



Obr. 6 - Hodnoty redukovaného napětí HMH v závislosti na teplotě pro střední a minimální hodnoty materiálových vlastností; čas 30 000 hodin

Rozvoj efektivní creepové deformace v exponovaném místě vývrtu je znázorněn na obr. 7. Rozdíl mezi různým zatížením teplotou se projeví ve vyšším nárůstu creepové deformace u teploty 578,5°C oproti nominální hodnotě, či teplotě snížené na 528,5°C.

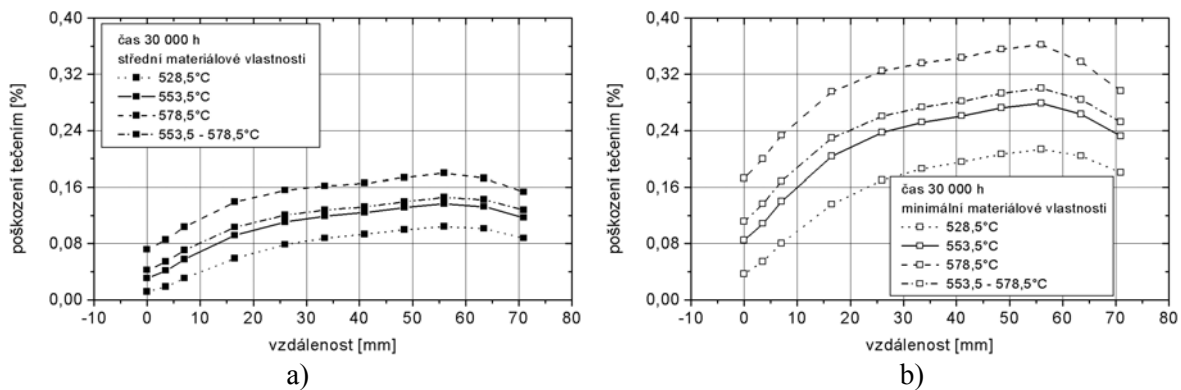
Výsledky v těchto případech plně korespondují s rozvojem redukováného napětí, přesněji řečeno jeho relaxací. Výraznější relaxace je spojena s rychlejším nárůstem creepové deformace, takže výrazná relaxace napětí pro teplotu 578,5°C je „vykoupena“ větší kumulací efektivní creepové deformace. Odlišné je v tomto kontextu chování tělesa při zatížení teplotním cyklem. Z obrázku 6 je patrné, že relaxace napětí je pomalejší a odpovídá by zdánlivě případu, kdy je řada vývrtů vystavena konstantní teplotě média v intervalu mezi 528,5°C - 553,5°C. Kdyby tomu tak ve skutečnosti bylo, pak by musela být výsledná efektivní creepová deformace nižší, než pro teplotu 553,5°C. Obr. 7 však ukazuje, že tomu tak není a efektivní creepová deformace by naopak odpovídala stavu konstantního zatížení teplotou v rozsahu 528,5°C - 553,5°C.



Obr. 7 - Hodnoty efektivní creepové deformace v závislosti na teplotě pro střední a minimální hodnoty materiálových vlastností; čas 30 000 hodin

Toto chování je způsobeno právě teplotním cyklem. Při každé změně teploty dojde ke vzniku teplotních pnutí. Ta vedou ke zvýšení napětí, jenž mají samozřejmě tendenci relaxovat. Než však odrelaxují zcela, dojde k další změně teploty a celý efekt se opakuje, takže výsledkem je pomalejší relaxace, jak je patrné z obr. 6. Odbourávání teplotních pnutí je však na úkor výraznějšího rozvoje creepové deformace, jak se projevilo v závislosti na obr. 7.

V souladu s tímto poznatkem je i rozvoj poškození creepovými procesy, což je graficky znázorněno na obr. 8. Při zatížení konstantní teplotou je hodnota poškození creepovými procesy úměrná právě teplotě, takže nejvyšší úroveň poškození je dosaženo pro teplotu 578,5°C a minimální creepové vlastnosti. Poškození pro studovaný teplotní cyklus leží mezi výsledky získanými pro konstantní teplotu 553,5°C a 578,5°C.



Obr. 8 - Hodnoty poškození tečením v závislosti na teplotě pro střední a minimální hodnoty materiálových vlastností

Ze všech studovaných případů bylo největšího poškození dosaženo v případě, kdy teplota média v okolí vývrtů dosahovala 578,5°C po celou dobu provozu. V čase 250 000 hodin dosahovalo poškození pro střední materiálové vlastnosti již 91%, což je značná hodnota. V případě minimálních materiálových vlastností bylo dosaženo poškození 100% v čase 140 000 hodin. To by tedy znamenalo, že pro tyto materiálové vlastnosti dojde v čase 140 000 hodin v poruše. Je však třeba podotknout, že kombinace takového zatížení teplotou a materiálových vlastností představují extrémní případ.

Závěr

Byla provedena numerická analýza komory pro různá teplotní zatížení v jedné řadě vývrtů. Pro popis creepových vlastností byl použit komplexní model pro materiál na úrovni středních a minimálních užitných vlastností.

Ze výsledků vyplývá, že vliv změny teploty média v jedné řadě vývrtů je lokální a neovlivňuje napjatost a rozvoj creepových deformací a poškození v sousedních řadách vývrtů.

Lokální zvýšení teploty po celou dobu provozu vede k rychlejší relaxaci napětí a rychlejšímu růstu creepové deformace a poškození. Tento efekt je zesílen v případě minimálních creepových deformací.

Studovaný teplotní cyklus zpomalí relaxaci napětí, takže výsledná napjatost zůstává vyšší než pro nominální teplotní zatížení. Současně je oproti nominální teplotě výraznější nárůst creepové deformace a poškození.

Celkově lze tedy shrnout, že cyklické teplotní namáhání se může negativně projevit na životnosti komor. Významnou roli jistě bude hrát frekvence teplotních změn, což by mělo být jistě předmětem dalších analýz.

Literatura

- [1] Hernas, A., Kielbus, A., Dobrzanski, J., Nowak W.: Analysis of the Microstructure and Properties Degradation of Superheater Headers after Long-term Service, Proc. of the 10th joint International Conference on Creep & Fracture of Engineering Materials and Structures, Prague, Czech Republic, 2001
- [2] Korouš, J., Masák, J., Bielak, O.: Analýza pole napětí a deformace v okolí trhlin u potrubních systémů namáhaných za podmínek tečení, Kotle a kotelní zařízení, 2000
- [3] Bína, V., Hakl, J.: Probabilistic Approach to Description of the Creep Strain Characteristic and Prediction for long Life-time. Proc. Conf. Materials for Advanced Power Engineering, Belgium, 3.-6. Oct. 1994
- [4] PMD uživatelský manuál, Vamet s. r. o., Praha, 2001
- [5] Bína, V., Bielak, O.: Konstituční rovnice creepových pevnostních a deformačních charakteristik ocelí typu 0,5Cr0,5Mo0,3V v závislosti na mezi kluzu, zpráva BiSAFE, Z-98-082b, 1998
- [6] Bína, V., Bielak, O.: Konstituční rovnice creepových pevnostních a deformačních charakteristik ocelí typu 0,5Cr0,5Mo0,3V v závislosti na mezi pevnosti, zpráva BiSAFE, Z-98-082c, 1998

Adresní údaje o autorech

<i>Plné jméno s tituly:</i>	Ing. Jan Masák, Ing. Jan Korouš
<i>Pracoviště:</i>	BiSAFE s.r.o.
<i>Adresa pro korespondenci:</i>	Malebná 1049, Praha 4, 149 00
<i>E-mail:</i>	bisafe@login.cz
<i>Fax:</i>	02 / 6791 3334
<i>Telefon:</i>	02 / 6791 3335