

POSOUZENÍ PROVOZUSCHOPNOSTI SVAŘOVANÉHO Y-KUSU Z OCELI 2,25Cr1Mo POŠKOZENÉHO TRHLINAMI

Jan Korouš, Jan Masák

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

Při periodických kontrolách stavu parovodů se u svařovaných tvarovek objevují trhliny. Příspěvek se zabývá problematikou hodnocení provozuschopnosti svařovaného Y-kusu. Při kontrole po 197 000 hodinách provozu byly detekovány trhliny ve svaru mezi tělesem a odbočkou. Pro posouzení stavu zjištěných defektů a zhodnocení další provozuschopnosti Y-kusu byly provedeny: výpočet sil a momentů, kterými zatěžuje parovod Y-kus, výpočet redistribuce výchozí elastické napjatosti, rozvoj creepové deformace a poškození, výpočet napjatosti Y-kusu s vrubem (po odstranění materiálu poškozeného trhlínami), stanovení kritických rozměrů trhlín a výpočet etapy podkritického růstu trhlín při tečení.

Klíčová slova: Y-kus, tečení materiálu, CrMo ocel, iniciace trhlín, růst trhlín při tečení

1. Úvod

Dlouhodobá expozice ve vysokoteplotních podmínkách vede k postupné degradaci užitečných vlastností materiálu a po jisté době provozu dochází ke vzniku trhlín a porušení zařízení. Dominantním poškozujícím účinkem je creep, v některých případech se projevuje též interakce creepu a únavových procesů. Rozlišit lze několik etap:

1. Etapa iniciace trhlíny

V této etapě dochází ke strukturálním změnám materiálu a objevují se známky poškození materiálu – vznikají kavity. Pro popis rozvoje poškození se zpravidla používá postupů mechaniky poškozování kontinua (Continuum Damage Mechanics) [1, 5, 6].

2. Etapa podkritického růstu trhlíny

Po jisté době provozu vznikne dominantní trhlína, která dále během provozu roste. Rychlost růstu závisí na mnoha faktorech a k jejímu popisu se používá postupů lomové mechaniky [1, 5].

3. Lom konstrukce

Pokud trhlína dosáhne kritických rozměrů, dojde k nestabilnímu šíření trhlíny a porušení konstrukce, která se může projevit třeba jen lokální netěsností, ale též totální destrukcí s vážnými následky. Kritické rozměry trhlíny, popř. kritickou úroveň zatížení, lze stanovit metodami lomové mechaniky [1, 2].

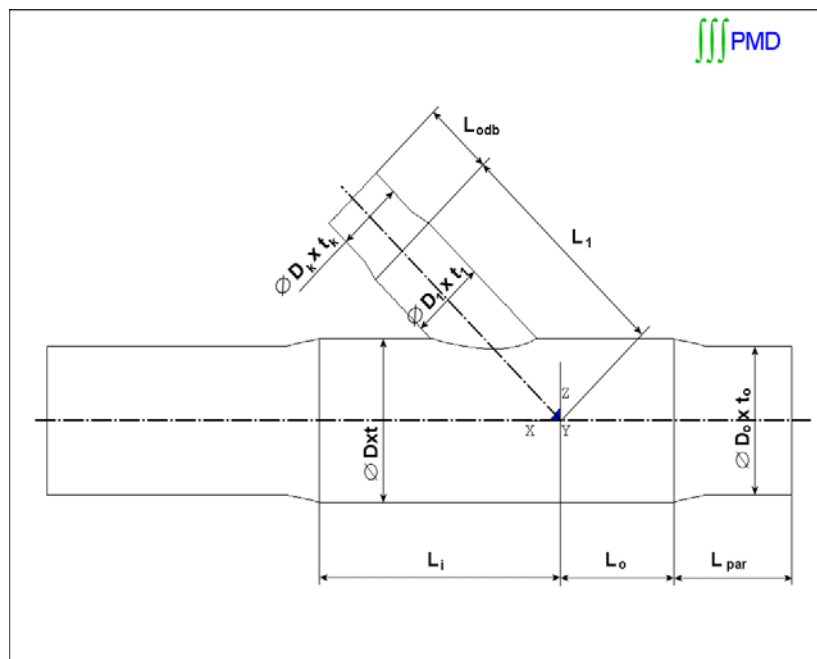
Základním předpokladem posouzení zbytkové životnosti konstrukce je ovšem znalost rozložení složek tenzoru napětí a deformace v posuzované konstrukci. Analýza napjatosti představuje dosti komplikovanou úlohu, zpravidla neřešitelnou analyticky metodami. Podílí se na tom jednak geometrie tělesa a jednak uvažování creepu materiálu, což způsobuje nelinearitu problému. Řešení je tedy nutno provést numerickými postupy, zpravidla metodou

konečných prvků. Použití těchto výpočetních postupů však vyžaduje patřičné vybavení a zkušenosti, které jsou nezbytné právě při řešení nelineárních úloh.

V následujícím textu je uveden příklad analýzy napjatosti svařované komponenty potrubního systému, který pracuje v podmínkách creepu. Dále je ukázáno, jak je možno tyto výsledky použít k dalším výpočtům růstu trhliny.

2. Popis problému

Při periodických kontrolách potrubního systému byly zhruba po 200 000 provozních hodinách nalezeny ve svařovaných Y-kusech trhliny. Defekty se nalézaly na vnější straně svarů mezi hlavní linií parovodu a odbočkami. Tvar a charakteristické rozměry komponenty jsou znázorněny na obr. 1.



Obr. 1 Geometrie svařovaného Y-kusu

Potrubní systém byl vyroben z materiálu, který odpovídá oceli 2,25Cr1Mo a byl vystaven účinku teploty cca 516°C. Úkolem bylo:

1. Stanovit složky napětí v místě svarového spoje, kde se nacházely trhliny.
2. Posoudit vliv sil a momentů, které působí na odbočné potrubí, na napjatost ve svarovém spoji.
3. Stanovit složky napětí v případě, kdy dojde k odbroušení trhliny a na svařovaném Y-kusu tak vznikne místo, které má charakter vrubu.

K řešení byla použita metoda konečných prvků, jmenovitě výpočetní systém PMD [3]. Síť prvků je znázorněna na obr. 2. Řešeno bylo několik variant, kdy se počet uzlů pohyboval od 14 703 do 22 691 a počet elementů od 2 886 do 4 496.

3. Matematický popis křivek tečení

Při výpočtu byl použit materiálový model, který komplexně popisoval creepové chování. Celkovou deformaci lze popsat vztahem:

$$\varepsilon_{tot}(t|\sigma, T) = \varepsilon_o \left[\frac{\varepsilon_m(\sigma, T)}{\varepsilon_o} \right]^{g[z(t)]}, \quad (1)$$

kde $\varepsilon_{tot}(t|\sigma, T)$ je celková deformace jako funkce času pro dané napětí σ a teplotu T , $\varepsilon_m(\sigma, T)$ je mezní creepová deformace, která je též funkcí napětí σ a teploty T , a ε_0 je počáteční deformace, která se stanoví z napětí pomocí Hookeova zákona. Funkce poškození $g[\pi(t)]$ je definována rovnicí:

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

$$K(T) = \exp(K_1 + K_2/T),$$

kde N , M , K_1 a K_2 jsou opět materiálové konstanty. Parametr π představuje creepové poškození definované jako poměr doby expozice v creepových podmínkách vůči době do lomu pro zadané napětí σ a teplotu T . Dobu do lomu, označovanou obvykle jako t_r , lze určit ze vztahu:

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

kde $A_1 - A_6$ jsou materiálové konstanty určené na základě zkoušek tečení. Zbývá ještě vyjádřit mezní deformaci z rovnice (1):

$$\varepsilon_m(\sigma, T) = \exp \left[M_1 + M_2 \cdot \tanh \left[\frac{\ln[t_c(\sigma, T)] - M_3 - M_4 T}{M_5} \right] \right] + \frac{\sigma}{E(T)} \cdot 100, \quad (4)$$

kde $M_1 - M_5$ jsou materiálové konstanty.

Model, popsaný výše uvedeným systémem rovnic, popisuje creep materiálu ve všech jeho fázích, tj. primární, sekundární i terciální fázi, a je implementován do výpočetního systému PMD.

4. Výsledky

Výpočty pro různé provozní podmínky, charakterizované jednak různými kombinacemi sil a momentů působících na odbočné potrubí a jednak hodnotami vnitřního přetlaku, ukázaly, že na napjatost v místě svarového spoje má dominantní vliv vnitřní přetlak a účinky od sil a momentů mohou být zanedbány.

Pro účely posouzení růstu trhliny creepovými procesy a stanovení kritického rozměru trhliny byly vypsány hodnoty napětí v exponovaném místě svarového spoje v místě, které je na obr. 2 označené jako L. Na obr. 3 a 4 jsou vykresleny grafy, které znázorňují průběh redukovaného napětí HMH skrz stěnu v místě L u původního Y-kusu (obr. 3) a u Y-kusu s vybroušenou trhlinou (obr. 4). Souřadnice s představuje bezrozměrnou tloušťku a na vnitřním povrchu nabývá nulové hodnoty, kdežto na vnějším povrchu platí $s = 1$. Z grafů je vidět, že na vnějším povrchu nabývá redukované napětí HMH vyšších hodnot, než na vnitřním povrchu. Navíc dochází k redistribuci napětí, kdy se průběh napětí mění v čase. Z obr. 3 a 4 je však patrné, pro čas větší než 30 000 hodin jsou již změny nevýrazné a k dalším změnám nedochází.

Pro posouzení chování trhliny je důležitá znalost složky napětí, která rozevívá trhlinu. V tomto případě se jedná o napětí ve směru osy z , tj. σ_{zz} . Obr. 5 a 6 znázorňují průběh této složky napětí opět v místě L. Na vnějším povrchu je opět napětí σ_{zz} vyšší než na vnitřním povrchu. Podstatné však je, že vlivem redistribuce napětí klesá špička napětí pouze u Y-kusu s odbroušenou trhlinou, kdy dochází k eliminaci vrubového účinku odbroušeného místa. U Y-kusu, kde není vada vybroušena, vede redistribuce k růstu napětí na vnějším povrchu, tedy v místě, kde byly detekovány trhliny. Porovnáním průběhů napětí v ustáleném stavu (tj. pro časy 30 000 a větší) zjistíme, že pro Y-kus bez a s odbroušeným svarem je dosaženo prakticky identické špičky napětí na vnějším povrchu, která dosahuje přibližně 120 MPa.

4. Využití výsledků MKP

Znalost průběhu napětí v exponovaném místě, kde byly detekovány trhliny, umožňuje posoudit zbytkovou životnost zařízení. Jelikož již byly v tělese objeveny trhliny konečných rozměrů, odpadá analýza iniciace trhliny a výpočet se může soustředit na podkritický růst defektu procesy tečení. Rychlost růstu trhliny lze popsat rovnicí podle :

$$\frac{da}{dt} = D_0 (C^*)^\phi, \quad (5)$$

kde D_0 a ϕ jsou materiálové konstanty a C^* je parametr lomové mechaniky, který závisí na rozměru trhliny a zatížení. Postup, jak stanovit C^* je popsán v [1].

Integrací rovnice (5) získáme závislost hloubky trhliny na čase. Pokud se analýza doplní kritériem pro posouzení kritických rozměrů trhliny, vypočteme též dobu do porušení studované komponenty. K porušení může dojít dvěma mechanismy:

1. Dosažení mezního creepového poškození ve zbytkovém průřezu před čelem trhliny.
2. Náhlý lom.

Poněvadž je integrace rovnice (5) řešena numericky, je v každém kroku kontrolováno splnění výše uvedených podmínek a v okamžiku, kdy je jedna z nich splněna, je stanoven čas do lomu komponenty.

Uvedený postup lze spojit s pravděpodobnostním posouzením konstrukce. Uváží-li se stochastický charakter vstupních veličin, zpravidla se jedná o rozptyl creepových vlastností a parametrů v rovnici (5), pak je výsledkem pravděpodobnost porušení jako funkce času. Příklad této závislosti pro studovaný Y-kus je zobrazen na obr. 7. Detaily o pravděpodobnostním výpočtu doby do porušení lze nalézt v [4].

5. Závěry

U svařovaného Y-kusu, který představuje odbočku z hlavní větve parního systému, byla provedena detailní analýza napjatosti metodou konečných prvků. Zjištěny byly složky napětí v místech, kde byly detekovány při inspekci trhliny. Z výsledků vyplývá, že složka napětí, která rozevívá trhlínu, vlivem redistribuce napětí v exponovaném místě neklesá, nýbrž roste. Pokud dojde k odbroušení části svarového spoje s nalezenou trhlínou, výpočty prokázaly, že tato operace nemá vliv na složku napětí, která rozevívá trhlínu a její hodnota se prakticky nemění. Z účinků, které na Y-kus působí má dominantní vliv vnitřní přetlak. Momenty a síly, které působí na odbočku výrazně napjatost ve svarovém spoji neovlivňují.

Na základě podrobného rozboru napjatosti lze provést posouzení růstu trhliny creepovými procesy a stanovení kritických rozměrů trhliny. Výsledkem je pak doba do porušení komponenty. Při výpočtu doby do poruchy lze uvážit i stochastický charakter některých veličin, převážně materiálových vlastností, stanovit pravděpodobnost poruchy jako funkci času. Znalost pravděpodobnosti poruchy umožňuje provozovateli provést analýzu rizik spojených s provozem posuzované konstrukce a naplánovat inspekci, opravu, popř. výměnu zařízení.

6. Literatura

- [1] British Energy Generation Ltd, *An Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures, Issue 3*, 2003
- [2] British Energy Generation Ltd., *Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, R6 - Revision 4*, 2001
- [3] Kolektiv autorů, *PMD verze Win NT 4.0, příručka uživatele*, VAMET Praha s.r.o., 2000
- [4] Hamata N. Le Mat, Korouš J., *Remaining Life Assessment of a Cracked Y-piece using Deterministic & Probabilistic Approaches*, Proceedings of HIDA 4 International

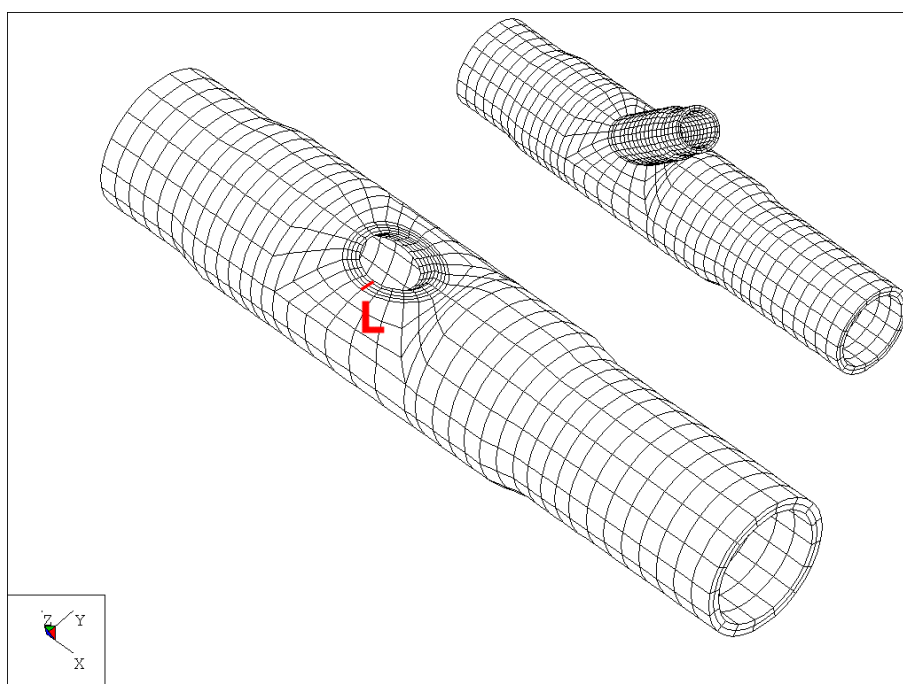
Conference on “Probabilistic Life/Crack Assessment and Preventive Maintenance in Industrial Plant”, 21–22 Sept 2004, Cambridge, UK

[5] Penny, R. K. and Marriott, D. L., *Design for Creep*, Chapman & Hall, 1995

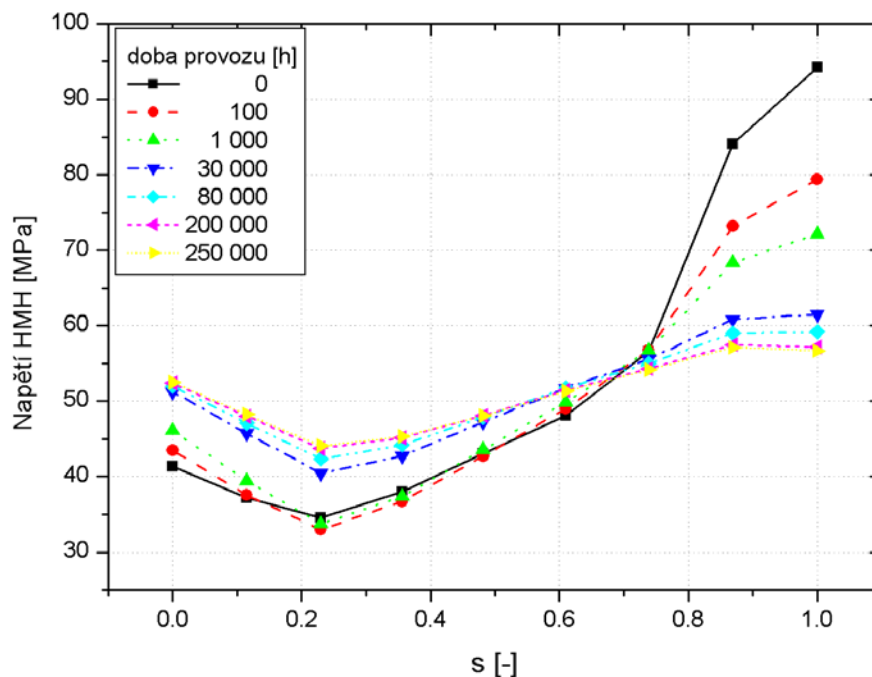
[6] Skrzypek, J. J., *Plasticity and Creep: Theory, Examples and Problems*, CRC Press, Inc., Boca Raton, 1993

Kontaktní adresa autora

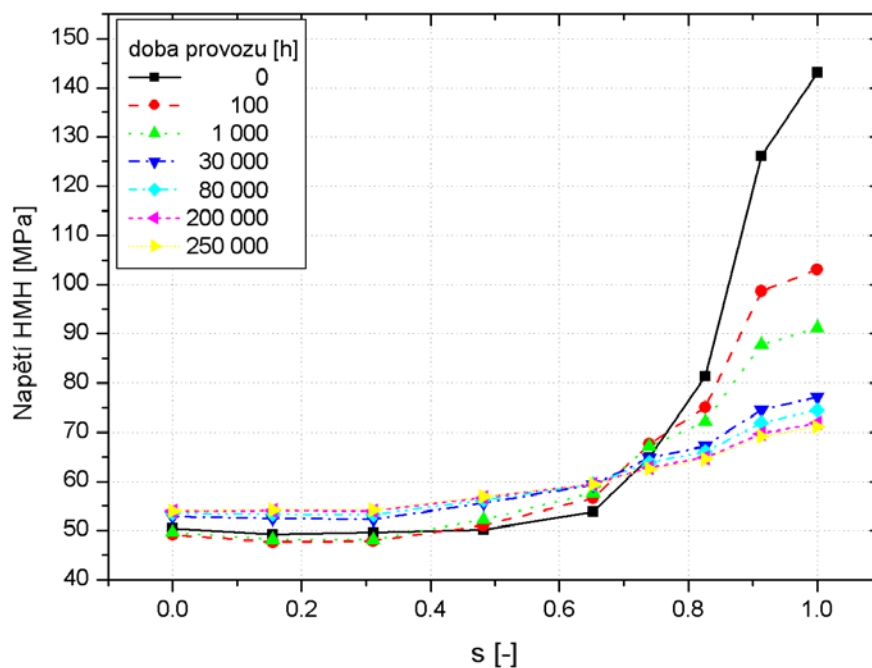
<i>Jméno</i>	Ing. Jan Korouš, Ph.D.
<i>Pracoviště</i>	BiSAFE, s.r.o.
<i>Adresa pro korespondenci:</i>	Malebná 2/1049, 149 00 Praha 4
<i>E-mail:</i>	korous@bisafe.cz
<i>Fax:</i>	267 913 334
<i>Telefon:</i>	267 913 337



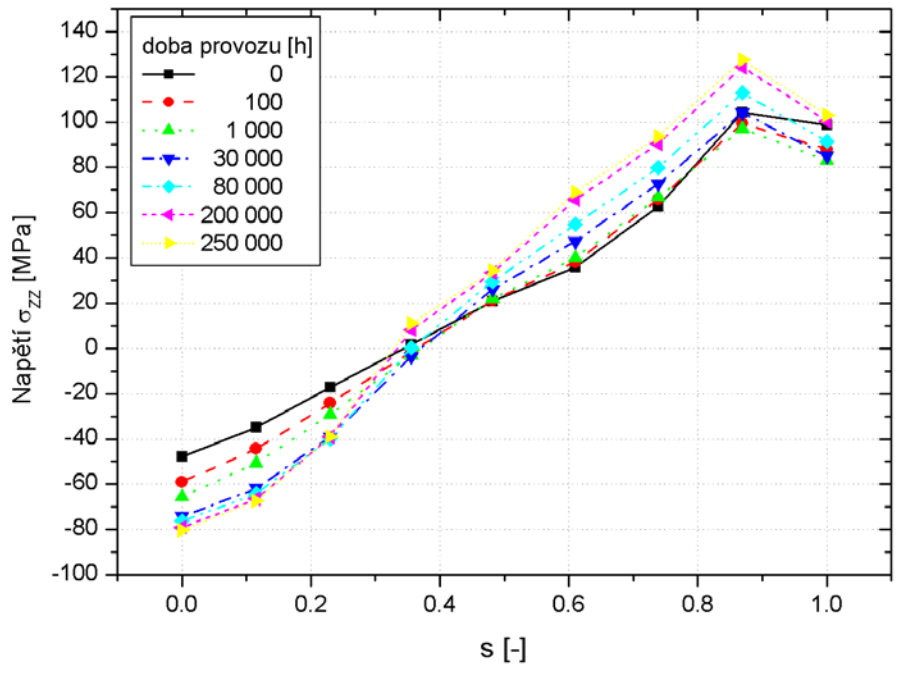
Obr. 2 Síť prvků pro analýzu napjatosti Y-kusu s vyznačením místa pro výpis napětí



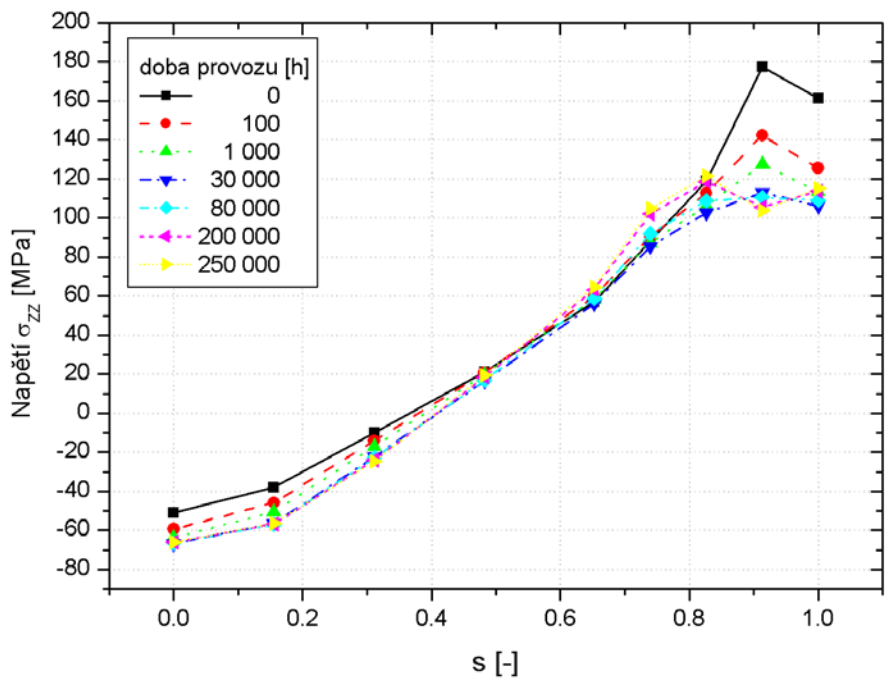
Obr. 3 Průběh redukovaného napětí HMH v místě L skrz stěnu svařovaného Y-kusu (Souřadnice $s = 0$ odpovídá vnitřnímu povrchu, $s = 1$ pak odpovídá vnějšímu povrchu)



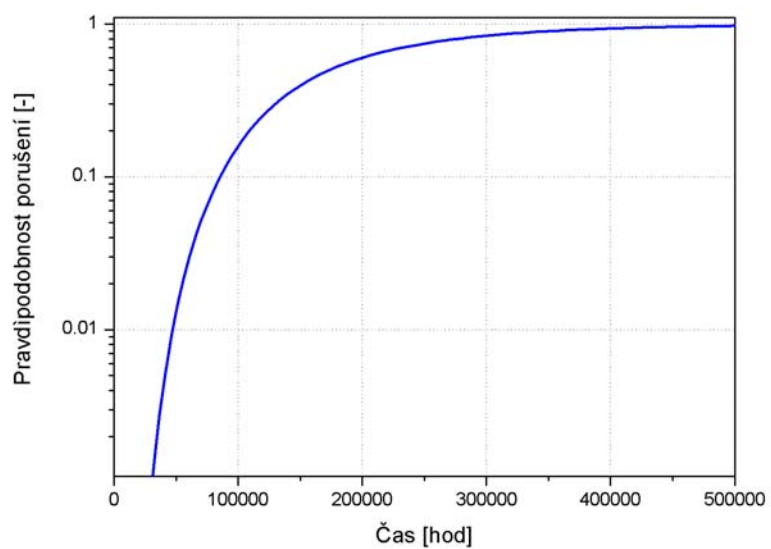
Obr. 4 Průběh redukovaného napětí HMH v místě L skrz stěnu svařovaného Y-kusu s vrubem po vybroušení trhliny (Souřadnice $s = 0$ odpovídá vnitřnímu povrchu, $s = 1$ pak odpovídá vnějšímu povrchu)



Obr. 5 Průběh napětí σ_{zz} v místě L skrz stěnu svařovaného Y-kusu (Souřadnice $s = 0$ odpovídá vnitřnímu povrchu, $s = 1$ pak odpovídá vnějšímu povrchu)



Obr. 6 Průběh napětí σ_{zz} v místě L skrz stěnu svařovaného Y-kusu s vrubem po vybroušení trhliny (Souřadnice $s = 0$ odpovídá vnitřnímu povrchu, $s = 1$ pak odpovídá vnějšímu povrchu)



Obr. 7 Závislost pravděpodobnosti porušení Y-kusu na čase