

ODOLNOST KOMOR PŘEHŘÍVÁKŮ PÁRY VYSOKOTLAKÝCH KOTLŮ PROTI KŘEHKEMU LOMU PŘI TLAKOVÉ ZKOUŠCE

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

Komory přehříváků vysokotlakých parních kotlů jsou vyrobeny z žárupevných CrMoV ocelí. V průběhu dlouhodobého provozu dochází v materiálu ke strukturním změnám a degradaci užitečných vlastností materiálu. Degradace u lomových vlastností se projevuje posuvem přechodové teploty mezi tvárným a křehkým porušením k vyšším teplotám a poklesem lomové houževnatosti v oblasti provozních teplot. Z praxe jsou známé a v technické literatuře popsány případy náhlého porušení komor při tlakové zkoušce na plný zkušební tlak. Příspěvek je zaměřen na hodnocení odolnosti komor proti porušení křehkým lomem na bázi lineární lomové mechaniky, která posuzuje chování těles s ostrou trhlinou. Specifickým rysem trhlín, které rostou procesy tečení, je změna pole napětí před čelem trhlíny, která je způsobena rozvojem creepové deformace a redistribucí napětí. V příspěvku je proto též diskutován vliv těchto jevů na odolnost komor proti náhlému porušení při tlakových zkouškách.

***Klíčová slova:** Komory přehříváku, trhlíny, štěpný lom, tlakové zkoušky, creep*

1. Úvod

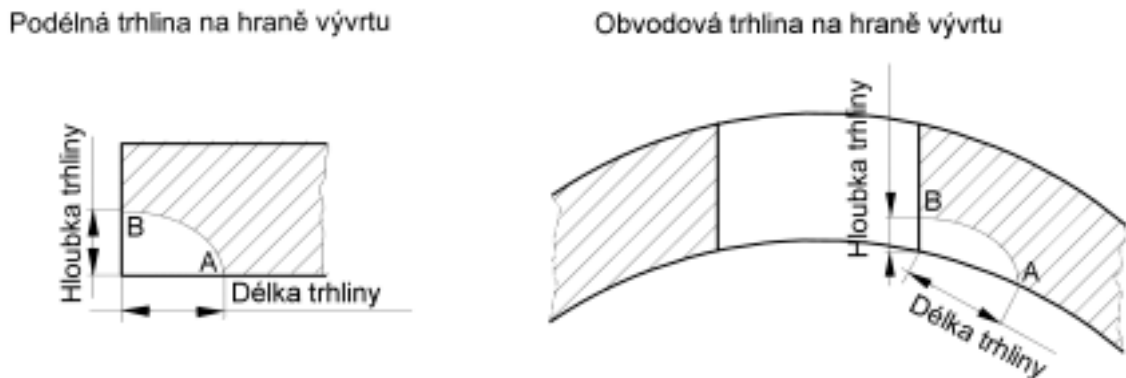
Komory přehříváků vysokotlakých elektrárenských kotlů jsou konstrukční uzly pracující za zvýšených teplot, kdy je hlavním faktorem ovlivňujícím jejich životnost creepové a únavové poškození. Creepové poškození je dáno jejich dlouhodobou expozicí ve vysokoteplotních podmínkách, únavové poškození je pak především svázáno s odstávkami a najížděním zařízení. K výrobě těchto komponent jsou používány zpravidla CrMoV oceli. V průběhu dlouhodobého provozu za vysokých teplot dochází ke strukturním změnám materiálu a degradaci užitečných vlastností. Změny ve struktuře materiálu, jako vylučování a hrubnutí karbidických částic na hranicích zrn, způsobují pokles lomové houževnatosti v oblasti provozních teplot a snížení creepové plasticity. Spolu s poklesem meze kluzu a meze pevnosti klesá lomové napětí a vlivem degradace materiálu dochází k posunu tranzitní teploty mezi štěpným a tvárným lomem k vyšším teplotám.

Uvedené změny výrazně ovlivní přípustnou velikost defektu typu trhlíny, který může být detekován při kontrole zařízení. Jelikož s klesající lomovou houževnatostí klesá velikost přípustného defektu, může být degradovaný materiál značně citlivý k přítomnosti trhlín. K destrukci zařízení pak může dojít při tlakové zkoušce, kdy je zařízení tlakováno na vyšší tlak než je provozní a protože je zkušební teplota nižší než provozní, hrozí kvůli posunu tranzitní teploty u degradovaného materiálu štěpný lom.

U komor přehříváků bývají detekovány defekty na hranách vývrtů, které představují koncentrátory napětí a místa s největším poškozením. Tento příspěvek se zabývá analýzou přípustnosti obvodových a podélných defektů v komoře přehříváku s ohledem na možnost porušení při tlakové zkoušce, jakož i eventuelní porušení při provozu. K tomu jsou použity postupy lineární lomové mechaniky a postup BEGL R6 [1].

2. Posouzení odolnosti komory

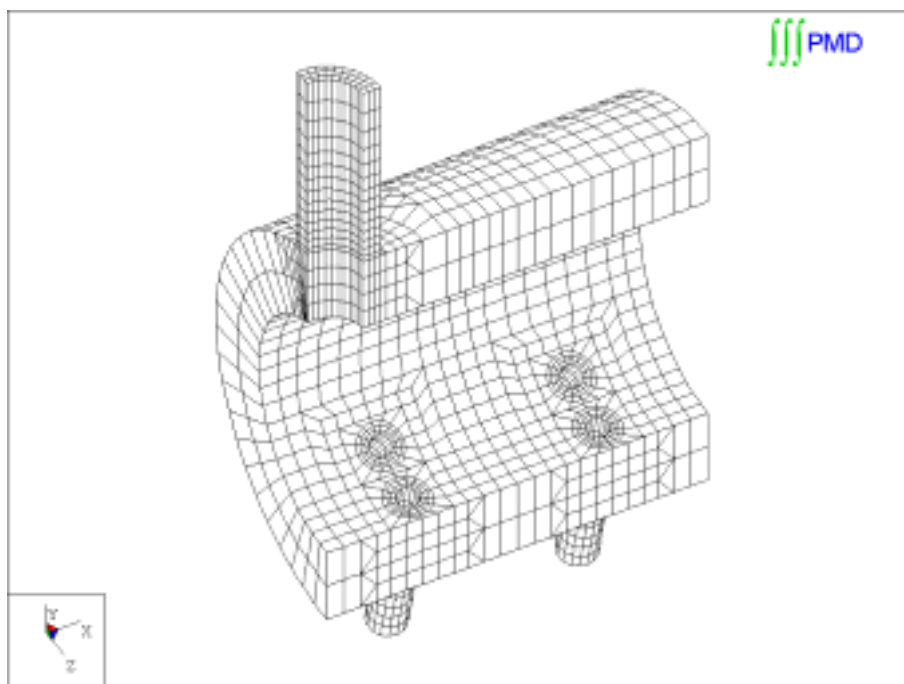
Posuzovány byly dva typy defektů, které vycházely z vnitřní hrany vývrtu odvězdušovacího nátrubku v tělese komory. Analyzována byla trhlina v obvodovém směru o hloubce 5 mm a délce 17mm a také trhlina ve směru podélném o hloubce 8 mm a délce 25 mm. Konfigurace trhlin je znázorněna schematicky na obr. 1.



Obr. 1 Základní charakteristiky analyzovaných trhlin

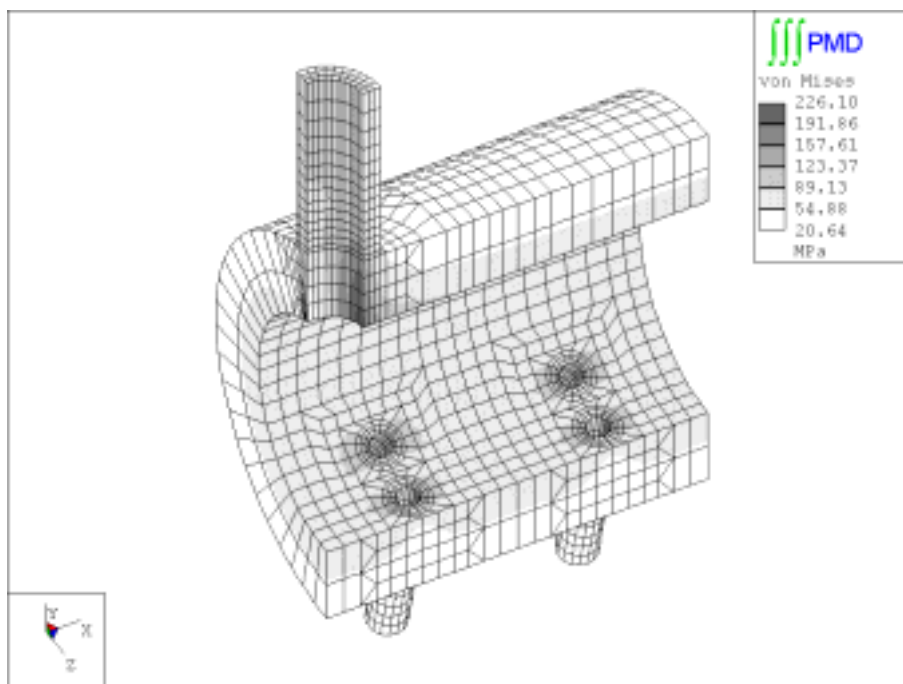
2.1 Analýza napětí v okolí vývrtu

Prvním krokem byl rozbor napjatosti v okolí vývrtu komory. K tomu byla použita metoda konečných prvků. Ve výpočetním systému PMD byl vytvořen prostorový model, který je znázorněn na obr. 2. Vývrt odvězdušovacího nátrubku se nachází v horní části vymodelovaného tělesa.



Obr.2 Síť prvků použitá při analýze napjatosti komory

Při výpočtu bylo uvažováno zatížení zkušební tlakem. Výsledkem pak byly hodnoty napětí v komoře. Na obr. 3 je znázorněno rozložení redukovaného napětí podle MMH po zatížení zkušební tlakem.



Obr.3 Rozložení redukovaného napětí HMH po zatížení zkušební tlakem

2.2 Odolnost komory proti náhlému lomu

Při posuzování odolnosti proti náhlému lomu při tlakové zkoušce byl proveden na základě lineární lomové mechaniky. Hodnota součinitele intenzity napětí K_I byla porovnána s lomovou houževnatostí K_{IC} pro daný materiál při teplotě 35°C, při níž měla být provedena tlaková zkouška. Byl také stanoven kritický rozměr trhliny.

Bohužel lomová houževnatost materiálu komory po 100 000 hodinách provozu nebyla známa, takže bylo nutno provést její konzervativní odhad. Stanovení lomové houževnatosti bylo provedeno pomocí amerického standardu ASME [2] a britské normy BSI [3]. V obou případech se vychází při stanovení závislosti hodnoty lomové houževnatosti na teplotě z hodnot vrubové houževnatosti KCV při různých teplotách, které byly známy pro poškozený materiál pracující v podobných podmínkách.

Výsledné hodnoty lomové houževnatosti stanovené podle ASME [2] a BSI [3] jsou uvedeny v tabulce 1. Je vidět, že rozdílné postupy dávají velmi blízké hodnoty.

Teplota [°C]	Lomová houževnatost [MPa m ^{1/2}]	
	Odhad dle ASME [2]	Odhad dle BSI [3]
-40	33,2	-
-20	35,7	-
0	40,0	-
10	43,2	-
20	47,3	-
35	55,9	55,3
50	68,6	67,2

Tab. 1 Hodnoty lomové houževnatosti odhadnuté z vrubové houževnatosti KCV

Určení součinitele intenzity napětí pro reálnou konfiguraci je obvykle značně obtížná úloha. Tak tomu bylo i v tomto případě. Hodnota součinitele napětí proto byla odhadnuta konzervativním způsobem. Eliptická trhlina, tak jak je naznačeno na obr. 1, byla „vložená“ do homogenního pole napětí v nekonečném tělese. Velikost napětí odpovídala extrému, který byl zjištěn numerickým

výpočtem metodou konečných prvků. Výsledky jsou shrnuty v tabulce 3, společně se skutečnými rozměry trhlin a_{sk} .

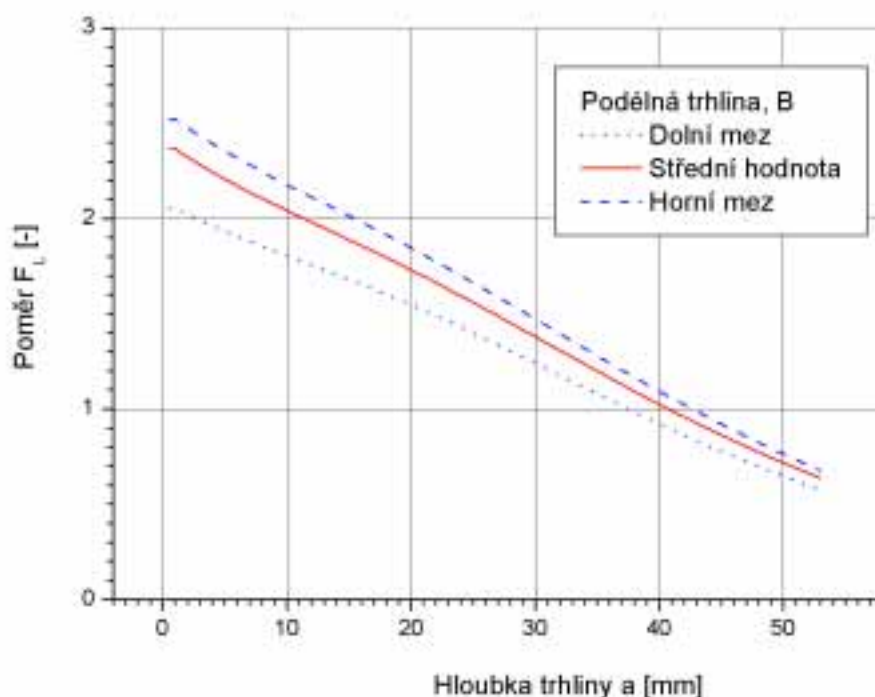
Trhlina	a_{sk} [mm]	K_I [MPa m ^{1/2}]	a_{cr} [mm]	K_{IC}/K_I [-]
Podélná, místo A	25	26,01	57,8	2,1
Podélná, místo B	8	26,62	17,6	2,1
Obvodová, místo A	17	9,19	314,4	6,1
Obvodová, místo B	5	8,31	113,2	6,7

Tab.2 Vypočtené hodnoty součinitele intenzity napětí K_I a kritického rozměru trhliny a_{cr}

2.3 Odolnost komory proti náhlému lomu za provozních podmínek

Dalším krokem analýzy bylo posouzení, zda nemůže dojít k náhlému lomu komory během následujícího provozu. K tomu byly použity prostředky elasticko-plastické lomové mechaniky, jmenovitě procedura BEGL R6 [1]. Odolnost konstrukce se v tomto postupu vyjadřuje pomocí parametru F_L . Je-li $F_L = 1$, pak jsou splněny podmínky iniciace lomu. Bezpečná konstrukce tedy musí splňovat podmínku $F_L > 1$.

Při řešení problému byl uvažován rozptyl materiálových vlastností a parametr F_L byl stanoven pro dolní, střední a horní úroveň materiálových vlastností. Obr. 4 znázorňuje průběh parametru F_L v závislosti na rozměru trhliny pro analyzovaný případ podélné trhliny.



Obr. 4 Závislost parametru F_L na hloubce podélné trhliny v místě B

Odolnost proti náhlému lomu byla vyjádřena pomocí parametru F_L pro obvodovou i podélnou trhlínu. Nejkritičtější se ukázalo místo B podélné trhliny, kde je kritický rozměr trhliny cca 40 mm, jak ukazuje obr. 4. U obvodové trhliny byla odolnost výrazně vyšší a pro místo B by teoreticky musela být hloubka nestabilní trhliny větší než tloušťka stěny t komory. Vypočtené kritické rozměry trhliny a_{cr} podle metodiky BEGL R6 [1] jsou názorně uvedeny v tabulce 3.

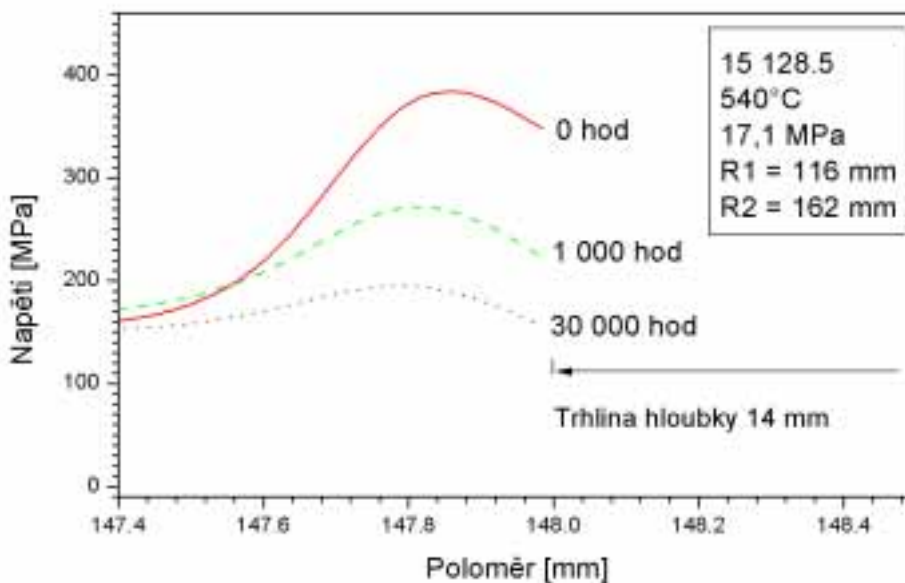
Trhlina	a_{cr} [mm]			a_{sk} [mm]	a_{cr}/a_{sk} [mm]		
	DM	SH	HM		DM	SH	HM
Podélná, místo A	123,0	133,5	138,0	25,0	4,92	5,34	5,52
Podélná, místo B	37,0	40,5	42,5	8,0	4,63	5,06	5,31
Obvodová, místo A	298,5	321,5	331,5	17,0	17,56	18,88	19,50
Obvodová, místo B	> t	> t	> t				

Tab 3. Kritické rozměry trhliny pro různé defekty a dolní mez (DM), střední hodnotu (SH) a horní mez užitečných vlastností materiálu (HM)

3. Vliv předchozího provozu na odolnost komory při tlakové zkoušce

Z tabulky 1 vyplývá, že lomová houževnatost může výrazně klesnout, pokud bude tlaková zkouška provedena při nižší teplotě, než je 35°C. V takových případech může výrazně vzrůst riziko náhlého lomu. V této souvislosti je třeba upozornit na efekt, který může naopak odolnost zvýšit.

Při creepu dochází k redistribuci napětí v tělese. Složky napětí se z výchozí elastického, popř. elasticko-plastického stavu, mění a po jistém čase dosáhnou, za předpokladu konstantního zatížení, stacionární hodnoty. Tento efekt je obzvláště významný před čelem trhliny. V práci [4] byl studován rozvoj zóny creepové deformace a redistribuce napětí v trubce, ve které je přítomna obvodová trhlina. Obr. 5 ukazuje průběh rozevírací složky napětí před čelem trhliny.



Obr. 5 Průběh rozevírací složky napětí před čelem trhliny v trubce pro různé časy expozice v podmínkách creepu

Je vidět, že napětí výrazně klesá z počáteční hodnoty v čase 0 hod. Současně se před čelem intenzivně rozvíjí zóna creepové deformace. Pokud dojde k odstavení zařízení po jisté době provozu, potom trvalá creepová deformace způsobí vznik tlakových napětí, která sevřou čelo trhliny. Jestliže dojde následnému zatížení při tlakové zkoušce, která neprobíhá v podmínkách creepu, pak výsledná složka rozevíracího napětí bude díky těmto tlakovým napětím nižší a odolnost konstrukce vůči náhlému lomu může vzrůst.

4. Závěry

Provedená analýza prokázala, že nehrozí náhlý lom komory při tlakové zkoušce ani během následného provozu.

Z hlediska porušení při tlakové zkoušce představuje podélná trhlina. Hodnota poměru K_{IC}/K_I je větší než 2. Tuto hodnotu lze považovat za odpovídající, zejména z toho důvodu, že hodnoty součinitele intenzity napětí K_I a lomové houževnatosti byly stanoveny K_{IC} byly stanoveny konzervativním odhadem. Dalším faktorem je, že skutečná úroveň napětí po 100 000 hodinách provozu je díky redistribuci napětí creepovými procesy nižší než v elastickém stavu, který byl uvažován při analýze.

5. Literatura

- [1] British Energy – Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, R6 – Revision 4. British Energy 2001.
- [2] ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section XI: Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components. ASME, New York
- [3] Guidance on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Welded Structures. BSI 1990.
- [4] Korouš, J., Masák J., Bielak O. : Analýza pole napětí a deformace v okolí trhlin u potrubních systémů namáhaných za podmínek tečení, Sborník konference „Kotle a kotelní zařízení 2000“, Brno 7. – 9. března 2000

Adresní údaje o autorech

<i>Plné jméno s tituly:</i>	Ing. Jan Korouš Ing. Jan Masák Ing. Ondřej Bielak, CSc.
<i>Pracoviště a jeho začlenění do instituce/firmy:</i>	BiSAFE, s. r. o.
<i>Adresa pro korespondenci:</i>	Malebná 1049, 149 00 Praha 4
<i>E-mail:</i>	bisafe@login.cz
<i>Fax:</i>	267 913 334
<i>Telefon:</i>	267 913 335