

Hodnocení zbytkové životnosti trubkové oceli 15 128 pomocí zkoušek malých vzorků

Evaluation of Residual Life of Pipe Steel 15 128 by using Small Punch Tests

Dr. Ing. Zdeněk Kuboň; Ing. Jana Kosňovská

MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM, s.r.o., Pohraniční 31/639, Vítkovice, 703 00 Ostrava, Česká republika

Creepové zkoušky malých vzorků (SPC zkoušky) lze použít jak pro stanovení aktuálních materiálových vlastností, tak také pro odhad zbytkové životnosti v případech, kdy je k dispozici pouze omezené množství zkušebního materiálu, které neumožňuje provést konvenční creepové zkoušky. Třebaže se napětový stav u SPC zkoušek značně odlišuje od jednoosého tahu, který je obvyklý u creepových zkoušek, lze pomocí jednoduchého přepočítacího faktoru výsledky obou typů zkoušek navzájem porovnávat a sjednotit. V článku je popsán postup hodnocení materiálových vlastností a zbytkové životnosti kolena parovodu energetického kotle pracujícího při teplotě páry 490 °C, prováděného na malých vzorcích pomocí metody penetračních testů a SPC zkoušek. Na základě získaných výsledků penetračních a SPC zkoušek byl proveden odhad zbytkové životnosti, který se pohybuje v řádu statisíců hodin. Tomuto odhadu v zásadě vyhovuje i velmi dobrý stav struktury.

Klíčová slova: Creep; SPC; mez pevnosti při tečení; odhad zbytkové životnosti

Small punch creep test (SPC tests) can be used both to determine the actual material properties and to estimate the residual life in cases where only a limited amount of test material is available that does not allow to use conventional creep tests. Although the stress state of the SPC tests differs considerably from the usually used uniaxial creep and/or stress rupture tests, the results of these test types can be compared and unified by a simple conversion factor. This allows making an estimation of residual life based on the results of the SPC tests similarly to the conventional creep tests. The presented paper describes the process of evaluation of material properties and residual life of the steam pipe elbow of a steam boiler operating for more than 120 000 hours at the temperature of 490°C by using small samples. Analysis of chemical composition, metallographic analysis, penetration and SPC tests were performed, and from the obtained results, namely penetration and SPC tests, the residual life of the pipeline steam elbow was estimated. Two different estimation methods were exploited in order to calculate the residual lifetime of the elbow; the first based on time and temperature extrapolation of results of SPC tests by using Larson-Miller parametric equation, the second that extrapolated time to rupture from the measured secondary (stationary) deflection rate and its relation to the respective time to rupture according to Monkman-Grant equation. Both methods estimated time to rupture of the tested component in the order of hundreds of thousands of hours and such a long-term residual time to rupture is in good agreement with the results of other experimental methods that confirmed very good material condition from the point of view of structural degradation and also very high actual material strength.

Key words: Creep; SPC; creep rupture strength; residual life estimation

Materiály energetických zařízení, zejména jejich tlakových částí, jsou během dlouhodobého provozu vystaveny vlivům, které vedou k jejich degradaci, tedy změně fyzikálních a mechanických vlastností. Tyto změny představují míru poškození vlivem dlouhodobé expozice. Stanovení aktuálního stavu degradace mechanických vlastností, resp. zbytkové životnosti komponent energetických zařízení pomocí standardizovaných postupů však vyžaduje velké množství zkušebního materiálu i časově náročné odstávky spojené nejen s vlastním odběrem, ale i následnými opravami odběrového místa, a to hlavně zavařením, tepelným zpracováním i řadou nedestruktivních kontrol. Často se pak tato místa stávají místem vzniku následných trhlin, resp. poškození při dalším provozu.

Metoda penetračních testů, která toto nebezpečí do značné míry eliminuje při současném zachování odpovídající míry přesnosti a spolehlivosti, se stává stále více používanou metodou pro hodnocení degradace materiálových vlastností a stanovení aktuálních mechanických vlastností materiálů jednotlivých komponent energetických zařízení (mez kluzu, mez pevnosti, přechodová teplota FATT (Fracture Appearance Transition Temperature), lomová houževnatost, creepové charakteristiky).

Penetrační testy poskytují řadu výhod, díky kterým se stávají stále více rozšířenou a oblíbenou metodou hodnocení materiálových charakteristik ocelí. V Číně a Japonsku již existují národní normy nebo závazné pokyny [1 – 3]. V USA se připravuje příslušná norma [4].

V Evropě je v platnosti přednormativní dokument CEN Workshop Agreement (CWA) 15627 [5]. Návrh evropské normy "Metallic materials – Small punch test method" je v současné době formulován pod záštitou jedné z pracovních skupin Evropského výboru pro normy v oblasti železa a oceli (ECISS). Tento návrh normy pokrývá hodnocení mechanických vlastností tahovou zkouškou od kryogenních až do vysokých teplot a také se zabývá odhadem creepových charakteristik na základě výsledků zkoušek SPC.

Metoda zkoušení malých vzorků představuje velice progresivní způsob zjišťování materiálových charakteristik. Platí to zejména v případech, kdy není možné využít klasických zkušebních metod, a to z důvodu buď nedostatku zkušebního materiálu, nebo nemožnosti, technické obtížnosti či ekonomické nevýhodnosti jeho odběru, což nastává často v případě nutnosti získat zkušební materiál z komponent již provozovaných zařízení.

V článku je uveden příklad analýzy aktuálních materiálových vlastností a odhadu zbytkové životnosti ohybu parovodní trubky vyrobené z žárupevné oceli 15 128 a provozované v energetickém kotli o výkonu 110 MW při teplotě 490 – 500 °C po dobu více než 270 000 hodin.

1. Odběr zkušebního materiálu z ohybu parovodu

Zkušební materiál pro hodnocení aktuálních materiálových vlastností i odhadu zbytkové životnosti byl odebrán ve formě tří malých vzorků pomocí odběrového zařízení SSam. Místa odběru jsou ukázána na obr. 1. Po odběru vzorků byly okraje odběrových míst zahlazeny obroušením.



Obr. 1 Místo odběru malých vzorků z kolena parovodu
Fig. 1 Sampling place at the steam pipeline elbow

K dispozici tak byly cekem tři vzorky diskovitěho tvaru, na nichž bylo možné provést:

- kontrolní chemický rozbor, ověření jakosti materiálu,
- stanovení meze kluzu a meze pevnosti penetračními testy,
- změření tvrdosti HV,

- analýzu stupně degradace struktury (kavitační poškození, rozpad struktury) včetně jejího hodnocení podle VGB TW 507 [6],
- creepové zkoušky malých vzorků (SPCT) při pracovní teplotě a různých zatíženích včetně jejich vyhodnocení a výpočtu zbytkové životnosti pomocí Monkman-Grantova vztahu.

2. Výsledky analýzy chemického složení

Analýza chemického složení oceli z ohybu parovodu byla provedena na jednom z odebraných malých vzorků pomocí fluorescenční vlnově disperzní rentgenové spektrometrie, obsahy uhlíku, síry a dusíku pomocí spalovací metody na analyzátoru LECO. Výsledky jsou uvedeny v tab. 1 spolu s požadavky, které jsou pro jakost oceli 15 128 uvedeny v ČSN 41 5128 [7].

Tab. 1 Chemické složení vzorku z parovodního ohybu a normované chemické složení oceli (hm. %)

Tab. 1 Chemical composition of the sample from the pipeline elbow and chemical composition of steel according to standard (wt. %)

Prvek	C	S	Mn	Si	P	Cr	Mo	V
Vzorek	0.15	0.016	0.57	0.20	0.014	0.60	0.41	0.28
15 128	0.10- 0.18	max. 0.040	0.45- 0.70	0.15- 0.40	max. 0.040	0.50- 0.75	0.40- 0.60	0.22- 0.035
Prvek	Cu	Ti	Nb	As	Sb	Sn	N	
Vzorek	0.039	0.014	<0.003	0.002	<0.001	0.002	0.0120	

Je známo, že významný vliv na vlastnosti žárupevných ocelí má také úroveň metalurgické čistoty oceli. Tyto oceli dlouhodobě pracují za zvýšených teplot, kdy dochází k migraci atomů substitučních prvků na hranice zrn a snížení kohezní pevnosti těchto hranic, což má za následek zkřehnutí materiálu. Pro hodnocení metalurgické kvality oceli bylo proto stanoveno komplexní kritérium náchylnosti ke zkřehnutí při dlouhodobé provozní expozici, tzv. CEF (Creep Embrittlement Factor), formulovaný v závislosti na obsahu povrchově aktivních kovů [6, 7]:

$$CEF = P + 8,16(\%Sb) + 3,57(\%Sn) + 2,43(\%As). \quad (1)$$

Za velmi dobrou metalurgickou kvalitou z hlediska residuálních obsahů povrchově aktivních prvků lze označit ocel s hodnotami $CEF < 0,15$.

Skutečnost, že zejména fosfor a další povrchově aktivní prvky (S, Sn, Sb, As, Pb apod.) vedou k významnému snížení creepové tažnosti, se odráží také v tzv. Bruscattově faktoru X [8], který byl sice původně určen hlavně pro svarové spoje oceli 2,25%Cr-1%Mo, ale v principu jej lze použít i na jiné typy nízkolegovaných žárupevných ocelí.

$$X = 10P + 5Sb + 4Sn + As) \times 100, \text{ (ppm)} \quad (2)$$

případně i ve faktoru J, resp. J* [9]

$$J = (Mn + Si) \cdot (P + Sn) \times 10^4, \quad (3)$$

$$J^* = (Mn + Si) \cdot (P + Sn + Sb) \times 10^4. \quad (4)$$

Nízké hodnoty faktorů X, J, resp. J* charakterizují vysokou metalurgickou čistotu, garanci vysokých plastických vlastností, ale i zvýšené žárupevnosti. Z výsledků výpočtu jednotlivých faktorů uvedených v tab. 2 je patrné, že metalurgická kvalita materiálu kolena je i z pohledu dnešních požadavků na kvalitu a čistotu ocelí ($X < 15$, $J < 150$) vynikající, a lze proto předpokládat, že k rozvoji křehkosti po dlouhodobé vysokoteplotní expozici vůbec nemusí dojít.

Tab. 2 Vypočtené hodnoty faktorů CEF, X, J a J*

Tab. 2 Calculated values of CEF, X, J and J* factors

Faktor	CEF	X (ppm)	J	J*
Vzorek	0.034	15.5	123	131

3. Výsledky tahové zkoušky prováděné penetračními testy a měření tvrdosti

Mechanické vlastnosti kolena parovodu byly ověřovány pomocí penetrační zkoušky malých vzorků při laboratorní teplotě. Pro tyto zkoušky byla vyrobená zkušební tělíska o průměru 8 mm a tloušťce 0,5 mm, která byla testována na zkušebním stroji INOVA 250. Výsledky jsou uvedeny v tab. 3 včetně pevnostních garancí specifikovaných v materiálovém listu pro obě strukturální varianty oceli 15 128.5 a 15 128.9, tedy po normalizačním žhání a následném popuštění, resp. po zrychleném ochlazování a popuštění.

Tab. 3 Mez kluzu a mez pevnosti při laboratorní teplotě stanovené z výsledků penetračních testů

Tab. 3 Yield and tensile strength at room temperature determined from penetration tests

	R_e	R_m	R_e/R_m
	(MPa)		
Vzorek 1	604	732	0,82
Vzorek 2	736	760	0,97
15 128.5	min. 365	490 – 690	-
15 128.9	min. 440	490 – 690	-

Na jednom z odebraných vzorků bylo provedeno také měření tvrdosti HV 10, a to vždy celkem 3 náhodně umístěnými vpichy. Výsledky měření tvrdosti jsou shrnuty v tab. 4 včetně průměrné hodnoty a velikosti statistické výběrové odchylky a opět spolu s informativní hodnotou (ta je ovšem uváděna v HB podle ČSN 41 5128).

Tab. 4 Výsledky měření tvrdosti HV 10

Tab. 4 Results of hardness measurement HV 10

Vtisk	1	2	3
HV 10	218	218	218
15 128 [10]	140 – 197 HB		

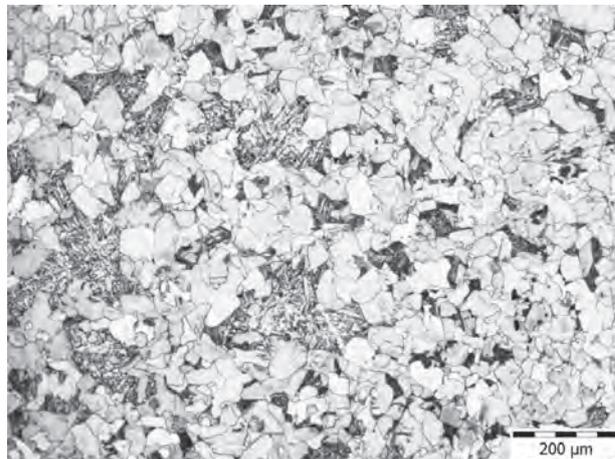
Je evidentní, že tvrdost odebraného vzorku se pohybuje nad horní hodnotou rozmezí tvrdosti podle materiálového standardu. Při použití přepočtu mezi hodnotami HB a HV, uvedený v [11], vychází tvrdost zkoušeného vzorku na úrovni 206 HB, tedy i tak zhruba o 5 % nad uvedeným informativním maximem. Ani tento údaj tedy nepotvrzuje

předpoklady nějaké vážnější degradace materiálu trubkového ohybu.

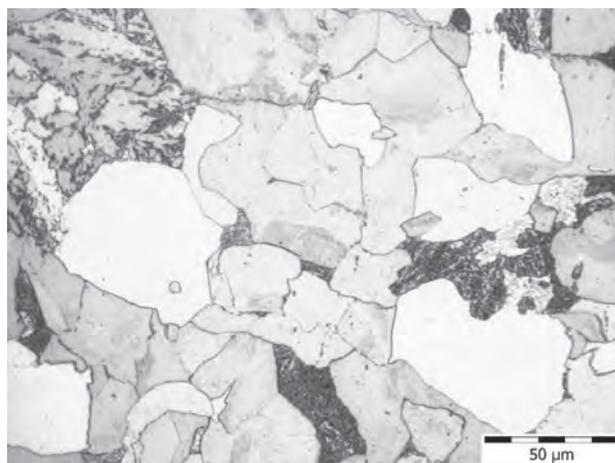
4. Výsledky metalografické analýzy materiálu

Pro metalografickou analýzu materiálu z ohybu parovodu byl na jednom z odebraných vzorků připraven metalografický výbrus rovnoběžný s rovinou odběru vzorku, a tedy i povrchem parovodního ohybu v místě extradosu. Na takto připraveném vzorku byla provedena analýza mikrostruktury, hodnocení strukturálních změn vlivem dlouhodobého působení vysokých teplot podle klasifikace uvedené v [12] a zejména analýza creepového kavitáčního poškození, včetně jeho hodnocení podle předpisu VGB TW 507 [13],

Mikrostrukturu tvořil ferit s jemným karbidickým precipitátem, bloky popuštěného bainitu a drobnější tmavé ostrůvky tvořené původně zřejmě perlitem (obr. 2). Podél hranic zrn byl pouze velmi ojediněle pozorován sekundárně vyloučený precipitát (obr. 3).



Obr. 2 Mikrostruktura ohybu parovodu
Fig. 2 Microstructure of steam pipeline elbow



Obr. 3 Detail struktury ohybu parovodu
Fig. 3 Detail of microstructure of steam pipeline elbow

Hodnocení stupně transformace feriticko-perlitické a feriticko-bainitické struktury lze provést použitím etalonů pro nízkolegované žárupevné oceli [12]. Podle výše

uvedené klasifikace lze hodnotit mikrostrukturu vzorku, odebraného ze základního materiálu ohybu parovodu, stupněm A-B, tedy stavem, kdy teprve začíná sferoidizace karbidických částic v bainitu nebo lamel perlitu a kdy se na hranicích zrn začínají vylučovat první karbidy.

Pro stanovení bezpečné životnosti nebo časové periody pro opakované hodnocení vlastností vysokoteplotních komponent se po celém světě používá mnoho metod založených na identifikaci a kvantifikaci poškození tečením nebo kavitačního poškození. Interpretace pozorovaného poškození jednoznačně vyžaduje hodnocení rozsahu poškození na unikátní a jasně definované a schválené stupnici poškození. V současné době je nejobsáhlejším a také nejdostupnějším etalonem německý předpis VGB-TW 507 [13], který poskytuje snímky referenčních mikrostruktur pro celý rozsah creepového poškození u nejběžnějších žárupevných ocelí. Směrnice VGB TW-507 neuvádí výslovně v detailu, jak je definována každá třída poškození, ale vztahuje se pouze k původnímu Neubaue-rově rozdělení tříd poškození [8], jak je uvedeno v tab. 5.

Tab. 5 Popis Neubauevých tříd poškození ve VGB TW-507 [13]
Tab. 5 Description of Neubaue damage classes in VGB TW-507 [13]

Třída poškození	Popis poškození
0	Nový materiál, bez expozice
1	Creepově exponovaný materiál, bez kavit
2a	Izolované kavity
2b	Četné kavity bez přednostní orientace
3a	Četné kavity s přednostní orientací
3b	Řetízky kavit nebo oddělené hranice zrn
4	Mikrotrhliny
5	Makrotrhliny

VGB TW-507 ukazuje také kompletní sadu kvalitních mikrosnímků nových materiálů a širokou škálu různých žárupevných ocelí poškozených tečením. Namísto zkoušené oceli 15 128 jsou však v tomto předpise uvedeny snímky creepového poškození oceli 14MoV6-3, jejíž chemické složení odpovídá evropské normě pro stejný typ oceli pracující za vysokých teplot. Hodnocení creepového kavitačního poškození vzorku odebraného z ohybu parovodu provedené podle klasifikace VGB-TW 507 odpovídá stupni 1 – creepově exponovaný materiál bez výskytu kavit.

5. Výsledky SPC zkoušek

Metoda creepových testů malých vzorků a jejich vyhodnocení je, podobně jako v případě penetračních testů, založena na jejich korelaci s výsledky konvenčních creepových zkoušek. Vzhledem ke složitosti napětíových stavů u SPC zkoušek se pro korelaci využívá rovnosti dob do lomu u konvenční creepové zkoušky a u SPC testu. Při rovnosti dob do lomu se navzájem koreluje zatížení SPC zkoušky (F) a napětí creepové zkoušky (σ) a pomocí této korelace je pak možné hodnotit creepovou odolnost materiálů pomocí SPC zkoušek. Ve zjednodušené podobě

a pro identickou tloušťku vzorku nabývá tato závislost tvaru:

$$\frac{F}{\sigma} = \Psi. \quad (5)$$

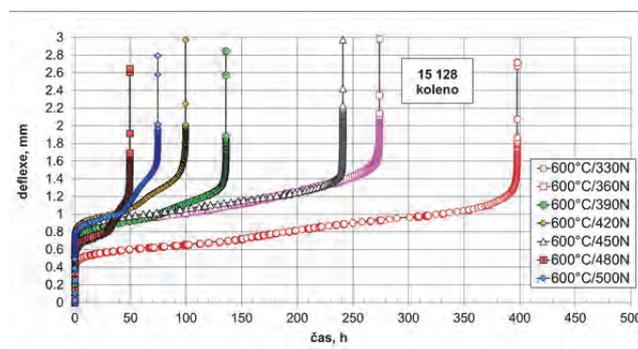
Hodnota konstanty Ψ v této rovnici se pro většinu ocelí pohybuje obvykle v rozmezí asi 1,2 až 2,5.

Při identickém uspořádání SPC experimentu a pro stejný materiál, resp. skupinu materiálů, lze použít stanovený přepočítací koeficient opakovaně u různých taveb v rámci jednoho materiálu, resp. skupiny materiálů.

V řešitelském pracovišti byl na materiálu, odebraném z vnějšího vlákna ohybu, realizován také program SPC zkoušek při teplotě 600 °C a při zatíženích 500, 480, 450, 420, 390, 360 a 330 N. Výsledky tohoto programu jsou shrnuty v tab. 6 a v grafické podobě na obr. 4.

Tab. 6 Výsledky SPC zkoušek oceli z ohybu parovodu
Tab. 6 Results of SPC tests of steel from steam pipe elbow

Teplota (°C)	Zatížení (N)	Čas (h)	Deflexe (mm)	Rychlost deflexe (mm·s ⁻¹)
600	500	74,5	2,93	1,3·10 ⁻⁰⁶
600	480	49,2	2,65	1,0·10 ⁻⁰⁶
600	450	241,0	3,02	4,9·10 ⁻⁰⁷
600	420	99,5	3,03	8,5·10 ⁻⁰⁷
600	390	135,8	2,85	6,5·10 ⁻⁰⁷
600	360	273,8	3,09	4,9·10 ⁻⁰⁷
600	330	398,0	2,71	3,1·10 ⁻⁰⁷



Obr. 4 Výsledky SPC zkoušek materiálu ohybu parovodu
Fig. 4 Results of SPC tests of steam pipeline elbow

Výsledky SPC zkoušek byly matematicko-statisticky zpracovány regresní analýzou a byly stanoveny konstanty Nortonovy rovnice uváděné u SPC vzorků ve formě:

$$t_r = A_{SP} \cdot F^{-n_{SP}}, \quad (6)$$

resp. pro minimální rychlosti deformace $\dot{\delta}_s$:

$$\dot{\delta}_s = B_{SP} \cdot F^{m_{SP}}, \quad (7)$$

kde jsou A_{SP} , n_{SP} , B_{SP} a m_{SP} teplotně závislé konstanty, t_r je doba do lomu a F je silové namáhání SCP vzorku.

I v případě, že SPC zkoušky nejsou vedeny až do lomu, je možné porovnávat také další významnou creepovou charakteristiku, a to rychlost stacionárního (sekundárního)

creepu, tedy rychlost tečení v oblasti ustáleného creepu. Obecně platí, že čím je tato rychlost nižší, tím je delší doba do lomu, a tedy také odolnost vůči tečení je za daných podmínek vyšší. Kvantifikace tohoto vztahu je obsažena v Monkman-Grantově rovnici, která koreluje rychlost stacionárního creepu $\dot{\epsilon}_{min}$ a dobu do lomu t_r ve tvaru:

$$\dot{\epsilon}_{min} = C_1 \cdot t_r^{-p} \quad (8)$$

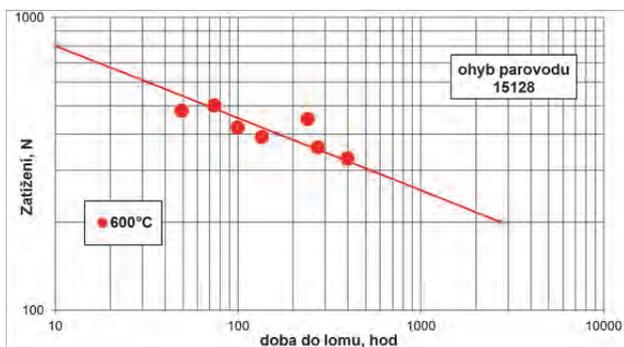
pro konvenční creepové zkoušky, resp. rychlost deflexe $\dot{\delta}_{min}$ pro SPC zkoušky:

$$\dot{\delta}_{min} = C_2 \cdot t_r^{-s}, \quad (9)$$

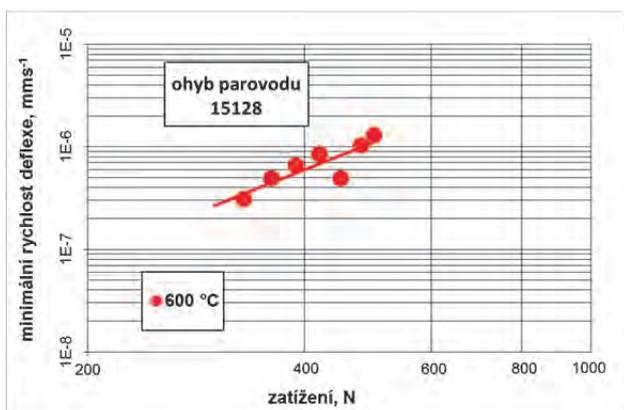
kde C_1 , C_2 , p a s jsou konstanty. V tab. 7 jsou uvedeny hodnoty příslušných koeficientů rov. (6), (7) a (9). Na obr. 5 jsou výsledky této kvantifikace pro materiál z ohybu parovodu znázorněny graficky ve tvaru bilogarithmické závislosti mezi dobou do lomu a aplikovaným zatížením. Obr. 6 ukazuje závislost rychlosti ustáleného tečení (deflexe) na aplikovaném zatížení a na obr. 7 je zobrazena závislost mezi dobou do lomu a rychlostí ustáleného tečení (deflexe), ve všech případech včetně uvedení regresní přímky příslušné závislosti.

Tab. 7 Koeficienty rov. (6), (7) a (9) pro materiál z ohybu parovodu
Tab. 7 Coefficients of eqs. (6), (7) and (9) for material from steam pipeline elbow

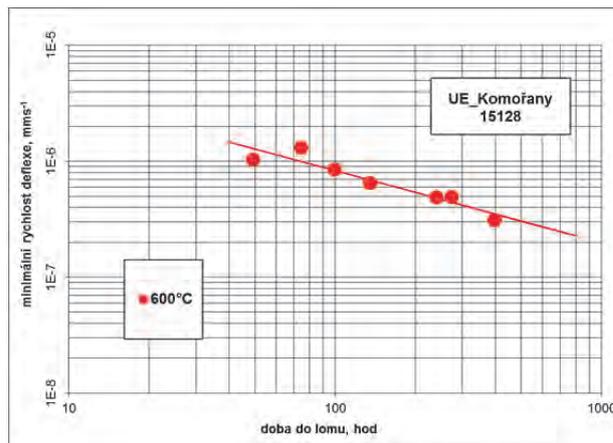
A_{SP}	n_{SP}	B_{SP}	m_{SP}	C_{SP}	s
9,85	2,96	-13,47	2,78	-4,84	0,62



Obr. 5 Korelační vztah mezi zatížením a dobou do lomu
Fig. 5 Correlation between loading and time to rupture



Obr. 6 Korelační vztah mezi zatížením a minimální rychlostí deflexe
Fig. 6 Correlation between loading and minimum deflection rate



Obr. 7 Korelační vztah mezi dobou do lomu a minimální rychlostí deflexe

Fig. 7 Correlation between time to rupture and minimum deflection rate

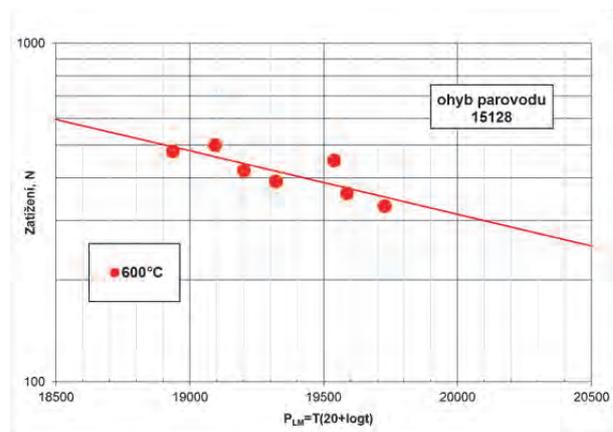
Jak vyplývá z údajů v tab. 7, odpovídají výsledky SPC zkoušek velice dobře předpokladům o podobnosti hodnot obou exponentů n_{SP} a m_{SP} v případech, kdy zkušební podmínky odpovídají uplatnění identických mechanismů creepu i existenci stejného strukturního stavu materiálu.

Hodnota exponentu p v původní Monkman-Grantově rov. (8) je větší nebo se rovná 1 pro naprostou většinu materiálů. Podobně by tomu mělo být i v případě SPC zkoušek, což se při experimentech nepotvrdilo a exponent dosahuje hodnoty pouze 0,62.

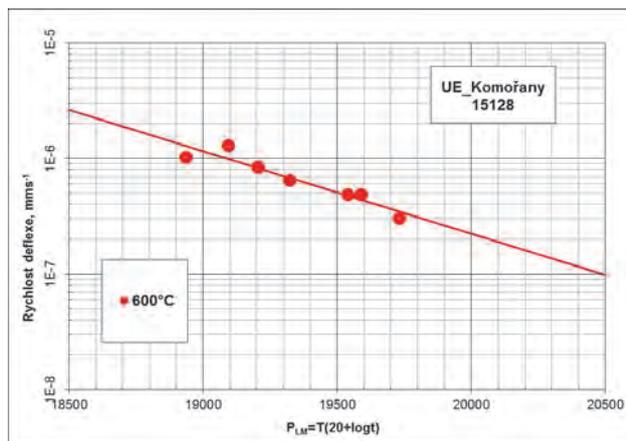
Pro účely extrapolace výsledků creepových, ale i SPC zkoušek se často používá Larson-Millerův parametr ve tvaru:

$$P_{LM} = T \cdot [C_{LM} + \log(t)], \quad (10)$$

kde T znamená teplotu (K), t je doba do lomu (h), C_{LM} je Larson-Millerova konstanta, v daném případě implicitně zvolena ve výši $C_{LM} = 20$. Tato parametrizace teploty a doby do lomu umožňuje dostat na jednu osu vliv obou těchto proměnných, a přímo tak srovnávat creepové zkoušky prováděné při různých teplotách. Ve sledovaném případě byly výsledky SPC zkoušek sestaveny do závislosti zatížení na Larson-Millerově parametru (obr. 8) a minimální rychlosti deflexe na Larson-Millerově parametru (obr. 9).



Obr. 8 Korelace mezi dobou do lomu a L-M parametrem
Fig. 8 Correlation between time to rupture and L-M parameter



Obr. 9 Korelace mezi minimální rychlostí deflexe a L-M parametrem
Fig. 9 Correlation between minimum deflection rate and L-M parameter

6. Aplikace výsledků pro odhad zbytkové životnosti

Vezmeme-li pro výpočet doby do lomu tangenciální napětí ve výši 142 MPa, které bylo určeno pro tento ohyb parovodu výpočtem s uvážením relaxace vlivem tečení, pak při použití koeficientu bezpečnosti $k = 1,25$ vychází limitní napětí 177,5 MPa. Této hodnotě napětí odpovídá při použití převodního koeficientu $\Psi = 2,1$, který byl na řešitelském pracovišti stanoven srovnáním výsledků konvenčních creepových a SPCT zkoušek a který platí pro tuto skupinu ocelí (Cr-Mo-V nízkolegované oceli), zatížení u SPC zkoušek ve výši 373 N.

Za předpokladu platnosti Larson-Millerovy rovnice, sestavené z výsledků SPC zkoušek v celém uvažovaném teplotním intervalu, lze provést přepočtení výsledků získaných na teplotě 600 °C na teplotu pracovní, tedy 490 °C. Výsledky tohoto přepočtu jsou pro zatížení odpovídající výše uvedenému pracovnímu napětí uvedeny v tab. 8 spolu s výsledky výpočtu doby do lomu pomocí Larson-Millerovy rovnice sestavené pro rychlost deflexe, která tomuto zatížení odpovídá.

Tab. 8 Odhad doby do lomu (h) pomocí Larson-Millerovy rovnice
Tab. 8 Estimation of time to rupture (h) by using Larson-Miller equation

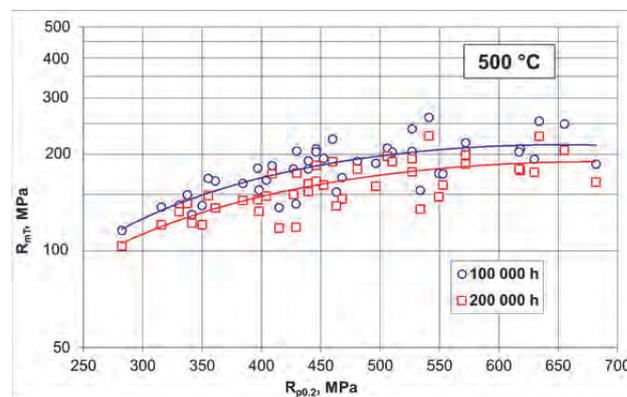
Zatížení (N)	Doba do lomu při teplotě	
	600 °C	490 °C
373	221	484 700
Rychlost deflexe (mm·s ⁻¹)	Doba do lomu při teplotě	
	600 °C	490 °C
$4,9 \cdot 10^{-07}$	232	394 700

Extrapolací stanovené doby do lomu jsou v obou případech velice vysoké. V zásadě však potvrzují výsledky ostatních rozborů, kdy jak pevnost, tak i mikrostruktura odpovídají v podstatě creepově neexponovanému materiálu. Může to být důsledek toho, že pracovní teplota parovodu je pro ocel 15 128 relativně nízká. Tato ocel má maximální teplotu použití až 580 °C a její nejběžnější

aplikace se pohybují okolo teploty 550 °C. Vezmeme-li do úvahy, že každým 30 °C teplotního rozdílu odpovídá zhruba řádový rozdíl v době do lomu, pak nejsou až tak vysoké očekávané doby do lomu velkým překvapením. Navíc i vzhledem k vysokým hodnotám meze kluzu i meze pevnosti lze větší creepovou odolnost očekávat také. Závislost meze pevnosti při tečení na velikosti meze kluzu byla u oceli 15 128 studována na mnoha tavných v širokém rozmezí pevnosti [14]. Na obr. 10 je ukázána tato závislost pro teplotu 500 °C a dobu do lomu 200 000 hodin a je možné z ní odečíst, že mezi kluzu na úrovni 600 MPa odpovídá mez pevnosti při tečení asi 200 MPa. Není tedy překvapivé, že výsledky SPC zkoušek predikují pro vypočtené napětí v daném uzlu 177,6 MPa dobu do lomu na úrovni 400 000 hodin. Chemické složení zkoušené oceli vyhovuje všem požadavkům specifikovaným v ČSN 41 5128 pro ocel 15 128.

Co je však překvapivé, je vzhled mikrostruktury oceli ve vztahu k její pevnosti. Ocel typu 0,5%Cr-0,5%Mo-0,3%V s mezí pevnosti pohybující se nad 700 MPa by měla vykazovat mikrostrukturu téměř bez feritu, což ale v hodnoceném případě neodpovídá. Mikrostruktura je tvořena převážně feritem v kombinaci s bainitem a perlittem (obr. 2 a 3).

Možností, jak dosáhnout vysoké meze pevnosti oceli s feriticko-perlitickou, či feriticko-bainitickou strukturou, je použití nízké teploty popouštění. Zjištěný stav mikrostruktury tuto možnost připouští, stejně tak jako ji implikuje i vysoký poměr meze kluzu k mezi pevnosti.



Obr. 10 Závislost meze pevnosti při tečení $R_{m500^\circ\text{C}/200000\text{ h}}$ na mezi kluzu pro ocel 15 128 [14]

Fig. 10 Dependence of creep strength $R_{m500^\circ\text{C}/200000\text{ h}}$ on yield stress for steel 15 128 [14]

7. Závěr

Metoda hodnocení malých vzorků včetně SPC zkoušek byla použita pro odhad zbytkové životnosti ohybu parovodní trubky po creepové expozici po dobu více než 270 000 hodin na teplotě 490 °C. Výsledek provedených analýz potvrdil nejen vysokou pevnost materiálu ohybu parovodu, ale i velmi malý stupeň rozpadu původní struktury a v souladu s tím i vysokou zbytkovou životnost dosahující statisíců hodin.

Poděkování

Tato práce vznikla při řešení projektu č. LO1203 "Regionální materiálově technologické výzkumné centrum - program udržitelnosti" financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky,

Literatura

- [1] Standards Press of China (SPC), Small punch test methods of metallic materials for in-service pressure equipments – part 1: General requirements, 2012, GB/T 29459.1–012.
- [2] Standards Press of China (SPC), Small punch test methods of metallic materials for in-service pressure equipments – part 2: Method of test for tensile properties at room temperature, 2012, GB/T 29459.2–2012.
- [3] The Society of Materials Science, Standard for small punch creep test – estimation of residual life for high temperature component. Japan, 2012, ISBN 978-4-901381-38-3.
- [4] ASTM WK 61832, New practice for Small Punch test method for metallic materials. Dostupné na <https://www.astm.org/database.cart/workitems/wk61832.htm>, (cit. 15. 11. 2018).
- [5] European Committee for Standardization, Small punch test method for metallic materials, 2007, CEN Workshop Agreement, CWA 15627:2007 E.
- [6] BREAR, J. M., KING, B. L. An Assessment of the Embrittlement Effect of Certain Residual Elements in Two Nuclear Pressure Vessel Steels. *Philos. Trans. R. Soc.*, London, Vol. A 235, 1980, s. 285–291.
- [7] FUJIBAYASHI, S., ENDO, T. Creep Behavior at the Intercritical HAZ of a 1.25Cr-0.5Mo Steel. *ISIJ International*, 42 (2002) 1309–1317.
- [8] BRUSCATO, R. Temper Embrittlement and Creep Embrittlement of 21/4Cr-Mo Shield Metal Arc Deposits. *Welding Journal* 49 (4). Welding Research Council Supplement, April 1970, pp. 148–156.
- [9] JAFFE, R. I. In *High Temperature Materials for Power Engineering 1990*. Proc., Ed.: E. Bachelet et al., 1990, Liege, Kluwer Academic Publishers, 589 p.
- [10] ČSN 41 5128. Ocel 15 128 Cr-Mo-V. Úřad pro normalizaci a měření. 1984.
- [11] ČSN EN ISO 18265 (420379) Kovové materiály – Převod hodnot tvrdosti. Český normalizační institut. 2004.
- [12] NEEDHAM, N. G., CANE, B. J. In *Conf. Advances Life Prediction Methods*. Proc., ASME No. 65, Albany, N.Y., 1983, pp. 65–72.
- [13] VGB TW 507. Microstructure Rating Charts for Evaluating the Microstructure and Creep Damage of High-Temperature Steels for High-Pressure Piping and Boiler Components, 2nd Edition, VGB Powertech, 2005.
- [14] JAKOBOVÁ, A., FILIP, M. Nepublikované experimentální výsledky.

Národní centrum pro energetiku na VŠB-TUO

VŠB – Technická univerzita Ostrava od začátku roku 2019 řídí Národní centrum pro energetiku. Ve spolupráci s dalšími výzkumnými organizacemi a firmami z energetického průmyslu vzniknou nové, účinnější a bezpečnější technologie i pro využití alternativních paliv a zajištění energetické soběstačnosti České republiky. Projekt Národního centra pro energetiku (TN01000007) je řešen s finanční podporou Technologické agentury České republiky.

„Národní centrum pro energetiku získalo u Technologické agentury České republiky, která projekt finančně podporuje, vůbec nejvyšší hodnocení,“ říká profesor Stanislav Mišák, hlavní řešitel projektu. „Spolupracovat na vývoji nových technologií budeme s dalšími 23 subjekty, jako jsou například Centrum výzkumu Řež, ČEZ, Doosan Škoda Power nebo Veolia Energie ČR,“ dodává profesor Mišák.

Právě energetika, suroviny a v té souvislosti i ekologie jsou jednou z hlavních oblastí výzkumu VŠB – Technické univerzity Ostrava, o čemž svědčí existence několika výzkumných ústavů, které na univerzitě působí: Výzkumné energetické centrum, Institut environmentálních technologií nebo Centrum ENET (Energetické jednotky pro využití netradičních zdrojů energie). Vědci, ale i studenti se zde dlouhodobě věnují efektivnímu využívání energie, vývoji nových technologií nebo alternativním palivům.

Cílem Národního centra pro energetiku je dlouhodobá spolupráce mezi předními výzkumnými organizacemi a hlavními aplikačními subjekty na trhu v oboru energetiky. Vědci a firmy budou navzájem sdílet infrastrukturu a své know-how. Vzniknou nové technologie vedoucí ke zvýšení účinnosti, bezpečnosti a spolehlivosti stávajících energetických celků, využití alternativních paliv pro zajištění surovinové nezávislosti a energetické soběstačnosti ČR a zvýšení spolehlivosti a bezpečnosti energetických sítí.

Národní centrum pro energetiku je jedním z 13 Národních center kompetence, které podporuje Technologická agentura České republiky. Program Národního centra kompetence je zaměřený na podporu dlouhodobé spolupráce mezi výzkumnou a aplikační sférou a posílení aplikovaného výzkumu.