

Korelace creepových a SPCT zkoušek modifikované chromové oceli typu F

Correlation of Creep and SPC Tests of Type F Modified Chromium Steel

Dr. Ing. Zdeněk Kuboň¹; doc. RNDr. Josef Kasl, CSc.²

¹ MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM, s.r.o., Pohraniční 31/639, 703 00 Ostrava-Vítkovice, Česká republika

² Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Tylova 1581/46, 301 00 Plzeň, Česká republika

Creepové zkoušky malých vzorků (SPCT) jsou alternativní metodou, jak získat informace o materiálových vlastnostech ocelí a slitin v případě, kdy omezené množství zkušebního materiálu nedovoluje provést konvenční creepové zkoušky. S výhodou je tak lze použít i pro stanovení aktuální zbytkové životnosti kritických komponent energetických zařízení. Třebaže se napětový stav u SPCT značně odlišuje od jednoosého tahu, a navíc se v průběhu zkoušky mění, ukázalo se, že u SPCT platí stejné teplotně-napěťové závislosti i vztahy jako u zkoušek creepu. Pomocí jednoduchého přepočítacího faktoru, založeného na porovnání zatížení u SPCT a napětí u creepové zkoušky s identickou dobou do lomu, tak lze výsledky obou typů zkoušek navzájem porovnávat a sjednotit. Na příkladu modifikované chromové oceli typu F je uvedeno porovnání výsledků konvenčních creepových zkoušek a SPCT a jsou uvedeny hodnoty přepočítacích koeficientů, které umožňují vzájemnou porovnatelnost obou těchto metod.

Klíčová slova: Creep; SPCT; modifikovaná chromová ocel odolná creepu; extrapolační metody; mez pevnosti při tečení

Small punch creep test (SPCT) is an alternative method for obtaining information about the material properties of steels and alloys when only a limited amount of test material is available that does not make it possible to perform conventional creep and/or stress rupture tests. SPCT testing can also be used for determination of the residual life of critical components of a fossil fuelled power plant. SPCT method is a part of the CWA 15627 "Small Punch Test Method for Metallic Materials" published in 2007 and this method will be a part of a prepared proposal of a standard of Small Punch Testing. Similar activities are also within ASTM (ASTM WK47431 "New Practice for Small Punch Test Method for Metallic Materials"), and in Japan they have an approved SPCT test standard. Although the complex stress state of the SPCT tests differs considerably from the uniaxial tension in case of creep test and further changes during the test, it was shown that the same stress-temperature dependence and relationships are valid in SPCT tests as in creep tests, and by using a simple load-based conversion factor between the SPCT test and the creep test with the same time to rupture, the results of both test types can be integrated. This is demonstrated by an example of modified chromium steel of F-type where a comparison of creep and SPCT tests results was presented, as well as the conversion factor that allows comparison of these two methods.

Key words: Creep; SPCT; modified chromium creep resistant steel; extrapolation methods; creep rupture strength

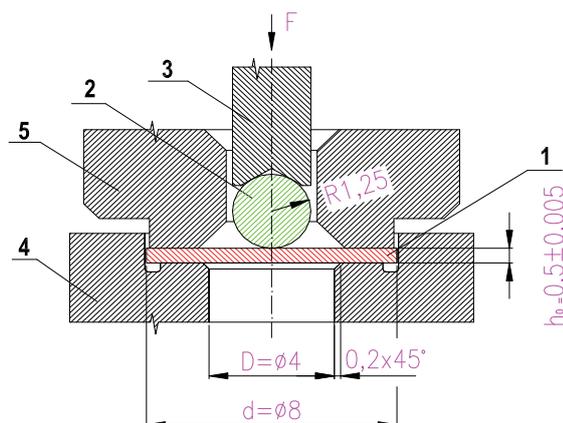
Metoda zkoušení malých vzorků představuje stále inovativní a velice perspektivní způsob zjišťování materiálových charakteristik. Uplatňuje se zejména v případech, kdy není možné využít klasických zkušebních metod, a to buď z důvodu nedostatku zkušebního materiálu, nebo nemožnosti, technické obtížnosti nebo ekonomické nevýhodnosti jeho odběru. Taková situace často nastává v případě nutnosti získat zkušební materiál z komponent již provozovaných zařízení. Metoda byla původně vyvinuta asi před třemi desetiletími jako způsob odběru vzorků a hodnocení degradace materiálů tlakových nádob a reaktorů jaderných elektráren, kde hraje velikost zkušební tělesa významnou roli i z hlediska radioaktivity. Metoda se rychle rozšířila do ostatních oblastí, zejména klasické energetiky, ale i těžké chemie a strojírenství, a je nyní považována za účinný nástroj pro hodnocení materiálových vlastností ocelí a slitin. Úspěšně se využívá ke stanovení mechanických vlastností (mez kluzu, mez pevnosti), vrubové houževnatosti (přechodové teploty

FATT), lomové houževnatosti, nízkocyklové únavy a creepu [1 – 3]. Metoda hodnocení malých vzorků obvykle vyžaduje pouze malé množství materiálu, ale může poskytnout klíčové informace o vlastnostech, například pro úzce lokalizované oblasti, jako např. stanovení creepové odolnosti tepelně ovlivněné oblasti svarových spojů [4]. Nedávno byly creepové zkoušky malých vzorků oceněny díky svému jedinečnému potenciálu pro hodnocení nových materiálů pro letectví, kde není dostatek materiálu pro konvenční zkušební přístup [5].

Největší výhodou creepových zkoušek malých vzorků (Small Punch Creep Tests – SPCT) pak je to, že mohou být použity i pro hodnocení zbytkové životnosti dlouhodobě provozovaných komponent klasických elektráren, kde je možné odebrat zkušební materiál, a to i z kritických míst konstrukce, bez nutnosti jeho náhrady a bez nutnosti provádět na dotčených strojních dílech jakákoliv technická opatření po odběru vzorků.

1. Creepové zkoušky malých vzorků

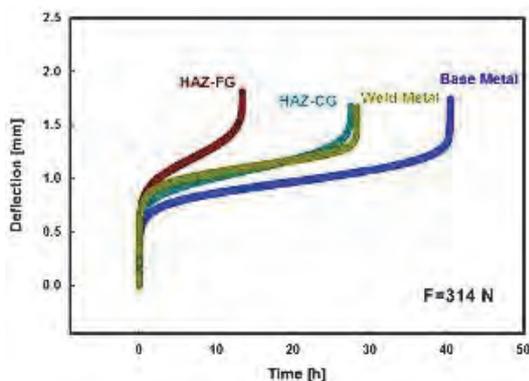
Metoda SPCT vychází z kuličkového penetračního testu. Při ní je vzorek umístěn mezi horní (přítlačnou) a spodní (opěrnou) matici a vložen do zkušební patry. Na obr. 1 je zobrazena tato sestava s keramickou kuličkou, která se pro vysoké teploty obvykle používá namísto kovového razníku. Zkušební patrona je umístěna do pece s ochrannou atmosférou argonu, která zabraňuje vysokoteplotní oxidaci vzorku. Působící konstantní zatížení je přenášeno rámem stroje, který tlačí na razník a kuličku proti zkušebnímu vzorku. V průběhu creepového penetračního testu se snímá závislost průhyb vzorku–čas (přímá obdoba creepové křivky) a po ukončení zkoušky se zaznamenává doba do porušení.



Legenda: 1 – vzorek; 2 – kulička; 3 – razník; 4 – spodní matrice; 5 – horní matrice

Obr. 1 Schéma SPCT
Fig. 1 Scheme of SPCT

V Evropě začal program komplexního hodnocení creepových vlastností pomocí SPCT v rámci projektu COPER-NICUS, který se uskutečnil počátkem devadesátých let 20. století a po jeho ukončení se této problematice věnuje v Evropě několik výzkumných týmů. Konkrétně byla prokázána aplikovatelnost SPCT při stanovení aktivační energie tečení, aplikaci Monkmanovy-Grantovy rovnice, která udává vztah mezi dobou do lomu a minimální rychlostí creepu. Dále byly vyvinuty, jednoduché empirické vztahy mezi parametry stanovenými pomocí SPCT a konvenčních creepových zkoušek [6].



Obr. 2 SPCT křivky základního materiálu (BM), svarového kovu (WM) a tepelně ovlivněné oblasti (HAZ) oceli P91 [7]
Fig. 2 SPC curves of basic material (BM), weld metal (WM) and heat affected zone (HAZ) of steel P 91 [7]

Přestože na rozdíl od creepové zkoušky jednoosým tahem dochází u SPCT ke komplexní interakci mezi materiálem a razníkem (kuličkou), lze na grafickém záznamu deformace v čase nalézt taky tři typická stádia creepové křivky, tedy primární, sekundární i terciární stádium creepu (obr. 2).

Teoretické odvození vztahu mezi zatížením a jemu odpovídajícím napětím při SPCT je založeno na práci Chakrabartyho [8], který studoval průhyb tenké, pevně uchycené membrány vyvolaný pohybem razníku s půlkulatou hlavou. Při analýze SPCT se tak vychází ze vztahu pro závislost mezi napětím membrány σ a hloubkou průhybu (deformace) Δ jako funkce působící síly F a kontaktního úhlu θ mezi razníkem a membránou ve tvaru:

$$\frac{F}{\sigma} = 2\pi \cdot h \cdot r \cdot \sin^2 \theta_0, \quad (1)$$

který byl pro SPCT upraven na tvar

$$\frac{F}{\sigma} = 3.33 \cdot k_{SP} \cdot R^{-0.2} \cdot r^{1.2} h_0, \quad (2)$$

kde R je poloměr spodní matrice, do níž je vzorek vtlačován, r je poloměr indentoru nebo kuličky, h_0 je tloušťka vzorku a k_{SP} je konstanta charakterizující plasticitu materiálu.

Při praktickém hodnocení výsledků SPCT se častěji vychází z korelace využívající rovnosti dob do lomu u konvenčních jednoosých creepových zkoušek v tahu a SPCT. Při rovnosti dob do lomu se navzájem koreluje zatížení SPCT a napětí creepové zkoušky a pomocí této korelace je pak možné hodnotit creepovou odolnost materiálů i pomocí SPCT. Ve zjednodušené podobě a pro identickou tloušťku vzorku nabývá vztah (2) tvaru:

$$\frac{F}{\sigma} = \Psi, \quad (3)$$

Hodnota konstanty Ψ v této rovnici se pohybuje obvykle v rozmezí asi 1,2 až 2,5 pro většinu ocelí a naopak hodnota $\Psi < 1$ je typická pro kompozitní materiály s kovovou maticí vyztužené krátkými vlákny Al_2O_3 .

Některé výzkumy však ukazují, že tato jednoduchá závislost nemusí být pro všechny materiály teplotně ani časově nezávislá, a může tak být pro některé materiály uváděná i ve tvaru polynomu [9].

Podobně jako doba do lomu může být korelována i rychlost sekundárního tečení při creepové zkoušce s měřenou deformací a rychlost stacionárního tečení při SPCT.

V září roku 2004 inicioval Evropský výbor pro normalizaci (CEN) vznik dokumentu CWA 15627 (CEN Workshop Agreement) „Small Punch Test Method for Metallic Materials“, který byl vydán v roce 2007 [10]. CWA je technická dohoda v rámci CEN a vlastněná CEN jako publikace, která odráží konsenzus konkrétních expertů a organizací odpovědných za její obsah. CWA proto reprezentuje nižší úroveň konsenzu, než jakou

představuje evropská norma. CWA 15627 je rozdělen do dvou samostatných částí, z nichž ta první (Part A: A Code of Practice for Small Punch Creep Testing) se zabývá creepovými zkouškami malých vzorků a druhá (Part B: A Code of Practice for Small Punch Testing for Tensile and Fracture Behaviour) stanovením mechanických vlastností a houževnatosti. V roce 2016 pak byla iniciována v rámci European Committee for Iron and Steel Standardization (ECISS) a jejího technického výboru TC-101 pracovní skupina WG1, jejímž cílem je do konce roku 2018 podat návrh evropské normy pro zkoušky malých vzorků (Small Punch Test Method for Metallic Materials). Podobné aktivity se vyvíjejí také v rámci ASTM (ASTM WK47431 New Practice for Small Punch Test Method for Metallic Materials) a v Japonsku mají již od rok 2012 schválený standard pro SPCT [11]. Jak je z výše uvedeného výčtu patrné, jsou konečně zkoušky malých vzorků začleňovány do zkušebních standardů nejvyspělejších světových ekonomik a také do standardů mezinárodních.

2. SPCT modifikované chromové oceli typu F

Modifikovaná chromová ocel typu F (X14CrMoVNbN10-1) byla vyvinuta v rámci programu mezinárodní spolupráce ve vědě a výzkumu COST 501 „Advanced materials for power engineering components, High Efficiency, Low Emission Systems“ jako jedna z perspektivních ocelí pro rotory a turbíny pracující s ultrapřehřátou párou (USC kotle). Chemické složení oceli použité v práci je uvedeno v tab. 1. Tepelné zpracování oceli bylo provedeno v režimu 1050 °C/6 h + 1100 °C/6 h + 570 °C/12,5 h + 720 °C/24 h; výrobcem oceli byla firma SAARSCHMIEDE GmbH Freiformschmiede.

Tab. 1 Chemické složení oceli F (hm. %)

Tab. 1 Chemical composition of steel F (mass %)

| C | Mn | Si | P | S | Cr | Ni | Mo |
|------|-------|-------|--------|-------|-------|------|------|
| 0,11 | 0,56 | 0,06 | 0,005 | 0,003 | 10,36 | 0,64 | 1,46 |
| V | Nb | N | B | Al | | | |
| 0,20 | 0,059 | 0,022 | 0,0079 | 0,009 | | | |

Ve VZÚ Plzeň probíhá v rámci projektu Center kompetence TE01020068 „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ rozsáhlé testování žárupevnosti nových progresivních 9–12% Cr ocelí a jejich svarových spojů. V návaznosti na výsledky creepových vlastností získaných konvenčními creepovými zkouškami v jednoosém tahu a metodou tzv. zrychlených creepových zkoušek (Accelerated Creep Test) se provádělo měření žárupevnosti metodou SPCT na stejných materiálech, na kterých jsou k dispozici výsledky creepových zkoušek. Jednalo se o zkušební blok svařence zahrnujícího kořenovou oblast svarového spoje dvou progresivních modifikovaných chromových ocelí F a FB2 (obr. 3). Z oceli F byla vyrobena zkušební tělíska pro SPCT, jak je naznačeno na obr. 3 vpravo. Orientace osy zkušebních těles byla kolmá k povrchu zkušebnímu kusu.



Obr. 3 Svařenec s naznačením místa přípravy zkušebních tělísek z oceli F

Fig. 3 Weldment with testing specimen made of steel F

Pro SPCT byla z části základního materiálu oceli F neovlivněně svařováním vyrobena zkušební tělíska – disky $\varnothing 8 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$, které byly zkoušeny při dvou teplotách (625 a 650 °C), a to v rozmezí zatížení od 330 do 480 N. SPCT byly prováděny na zkušebním stroji SPUTT 500 konstrukce MMV v ochranné atmosféře argonu.

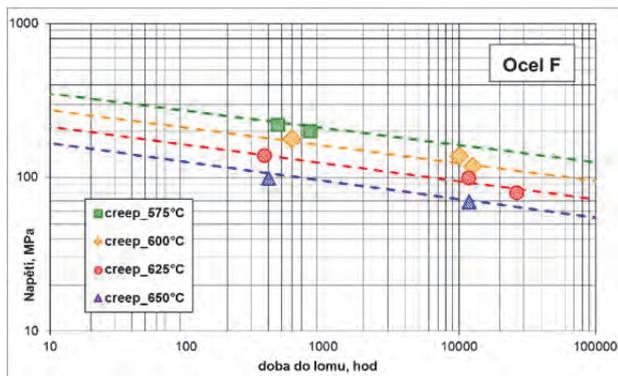
Metoda creepových testů malých vzorků a jejich vyhodnocení je, podobně jako v případě penetračních testů, založena na jejich korelaci s výsledky creepových zkoušek. Vzhledem ke složitosti napěťových stavů u SPCT se pro korelaci využívá rovnosti dob do lomu u konvenční creepové zkoušky a u SPCT. Při rovnosti dob do lomu se pak navzájem koreluje zatížení SPCT a napětí creepové zkoušky a pomocí této korelace je možné srovnávat creepovou odolnost materiálů. Výsledky celého programu jsou shrnuty v tab. 2.

Tab. 2 Výsledky SPCT oceli F

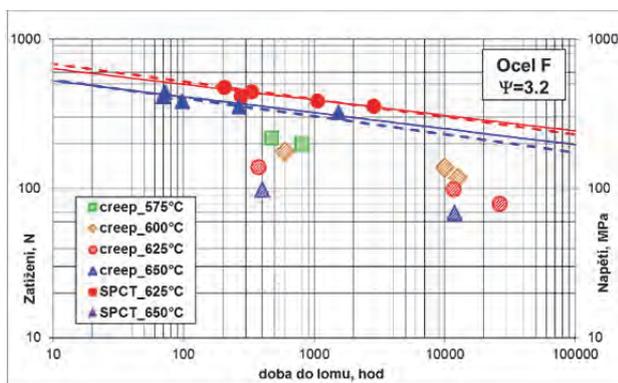
Tab. 2 Results of SPCT of steel F

| Zkouška | Teplota (°C) | Zatížení (N) | Čas (h) | Deflexe (mm) | Rychlost deflexe (mm·s ⁻¹) |
|---------|-----------------|-----------------|------------|-----------------|---|
| 625_480 | 625 | 480 | 203 | 2,69 | $4,8 \cdot 10^{-07}$ |
| 625_450 | 625 | 450 | 327,7 | 2,88 | $3,7 \cdot 10^{-07}$ |
| 625_420 | 625 | 420 | 273 | 2,92 | $3,9 \cdot 10^{-07}$ |
| 625_390 | 625 | 390 | 1044 | 2,86 | $1,5 \cdot 10^{-07}$ |
| 625_360 | 625 | 360 | 2833 | 2,80 | $3,0 \cdot 10^{-08}$ |
| 650_450 | 650 | 450 | 70,5 | 2,65 | $1,8 \cdot 10^{-06}$ |
| 650_420 | 650 | 420 | 68,4 | 2,76 | $1,8 \cdot 10^{-06}$ |
| 650_390 | 650 | 390 | 96,3 | 2,67 | $1,3 \cdot 10^{-06}$ |
| 650_360 | 650 | 360 | 261 | 2,63 | $4,6 \cdot 10^{-07}$ |
| 650_330 | 650 | 330 | 1503 | 2,50 | $9,7 \cdot 10^{-08}$ |

Praktická využitelnost výsledků SPCT spočívá v jejich aplikaci pro odhad životnosti nebo creepové odolnosti. Pro tyto případy je podle výše uvedeného rov. (3) nutné stanovit přepočítací faktor Ψ mezi napětím u konvenčních creepových zkoušek a zatížením u SPCT zkoušek. Jelikož kromě SPCT byl realizován i program zkoušek creepových, bylo možné oba tyto soubory porovnat a určit hodnotu přepočítacího faktoru. Teplotně-napěťová závislost doby do lomu creepových zkoušek je uvedena na obr. 4 a porovnání obou sérií výsledků pomocí přepočítacího faktoru Ψ ve výši 3,2 na obr. 5.



Obr. 4 Teplotně-napěťová závislost doby do lomu oceli F
Fig. 4 Stress-temperature dependence of time to rupture of steel F



Obr. 5 Korelace mezi creepovými zkouškami a SPCT oceli F
Fig. 5 Correlation of both series of creep and SPC tests of steel F

3. Shrnutí a diskuse dosažených výsledků

Výsledky SPCT byly matematicko-statisticky zpracovány regresní analýzou a byly stanoveny konstanty Nortonovy rovnice uváděné pro dobu do lomu ve tvaru:

$$t_r = A_{CR} \cdot \sigma^{-n_{CR}} \quad (4)$$

V případě využití SPCT vzorků pak lze tento vztah vyjádřit ve formě:

$$t_r = A_{SP} \cdot F^{-n_{SP}} \quad (5)$$

Napěťová závislost minimální rychlosti creepu $\dot{\epsilon}_s$ při creepové zkoušce a závislost minimální rychlosti deformace (deflexe) $\dot{\delta}_{min}$ na aplikovaném zatížení při creepové zkoušce malých vzorků může být popsána rovněž pomocí Nortonova zákona vztahy:

$$\dot{\epsilon}_s = B_{CR} \cdot \sigma^{m_{CR}} \quad (6)$$

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

I v případě, že SPCT 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. Tato charakteristika patří rovněž mezi sledované materiálové vlastnosti žárupevných ocelí. 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 Monkmanově-Grantově rovnici, která koreluje rychlost stacionárního creepu a dobu do lomu ve tvaru:

$$\dot{\epsilon}_{min} = C_{CR} \cdot t^{-P} \quad (8)$$

pro konvenční creepové zkoušky, resp. rychlost deflexe,

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

pro SPCT.

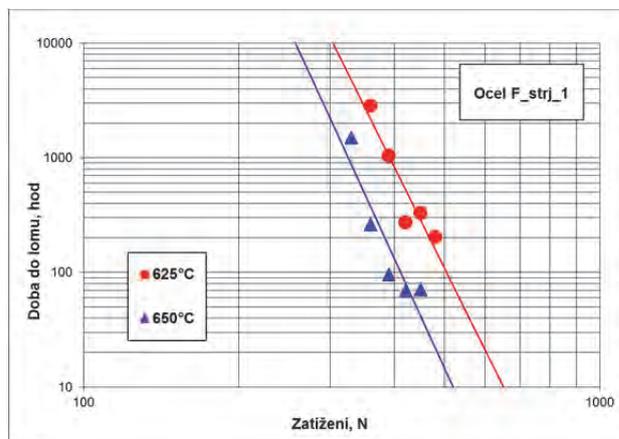
V rov. (4) – (9) jsou A_{CR} , A_{SP} , n_{CR} , n_{SP} , B_{CR} , B_{SP} , m_{CR} a m_{SP} teplotně závislé konstanty.

V tab. 3 jsou uvedeny hodnoty příslušných koeficientů rov. (4), (5) a (7) pro obě zkušební teploty 625 i 650 °C, pochopitelně s výjimkou konstant Monkmanova-Grantova vztahu, který je teplotně nezávislý. Na obr. 6 jsou výsledky tohoto zpracování pro SPCT oceli F ukázány graficky ve tvaru bilogarithmické závislosti doby do lomu na aplikovaném zatížení, obr. 7 ukazuje závislost rychlosti ustáleného tečení na aplikovaném zatížení F , v obou případech včetně uvedení regresní přímků příslušné závislosti.

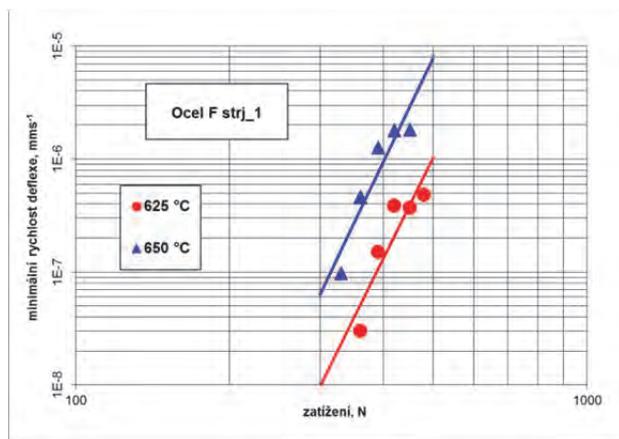
Tab. 3 Koeficienty Nortonových rov. (5) a (7) oceli F pro teplotu 625 a 650 °C

Tab. 3 Coefficients of Norton Eqs. (5) and (7) for steel F tested at 625 and 650 °C

| Teplota | $\log A_{SP}$ | n_{SP} | $\log B_{SP}$ | m_{SP} | $\log C_{SP}$ | s |
|---------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|------|
| 625 °C | 26,50 | 9,82 | -30,67 | 9,14 | -3,90 | 1,01 |
| 650 °C | 27,68 | 9,82 | -30,63 | 9,46 | | |

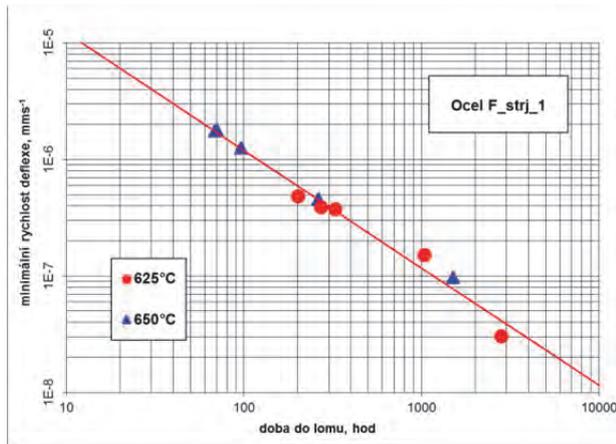


Obr. 6 Korelační vztah mezi zatížením a dobou do lomu, ocel F
Fig. 6 Correlation between loading and time to rupture, steel F



Obr. 7 Korelační vztah mezi zatížením a minimální rychlostí deflexe
Fig. 7 Correlation between loading and time to rupture, steel F

Jak vyplývá z údajů v tab. 3 a také jak zřetelně ukazují grafy, odpovídají výsledky SPCT 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, což v daném případě lze s vysokou pravděpodobností očekávat.



Obr. 8 Korelační vztah mezi dobou do lomu a minimální rychlostí deflexe

Fig. 8 Correlation between time to rupture and minimum deflection rate, steel F

Hodnota exponentu p v původní Monkmanově-Grantově rov. (8) je kladná a větší nebo se rovná 1 pro naprostou většinu materiálů. Koreluje-li se (v logaritmickeém měřítku) doba do lomu s rychlostí stacionárního creepu, nacházejí se všechna data bez ohledu na teplotu zkoušení na jedné přímce se směrnici matematicky vyjádřenou právě hodnotou exponentu p . Podobně by tomu mělo být i v případě SPCT, což se také experimentálně prokázalo a výsledky všech 10 zkoušek prakticky leží v jedné přímce (obr. 8).

Stěžejním problémem pro široké uplatnění SPCT pro hodnocení aktuálního stavu creepově exponovaných materiálů a zejména zbytkové životnosti komponent bloků klasické energetiky je ale nalezení vhodných korelačních vztahů mezi výsledky konvenčních creepových zkoušek a zkoušek prováděných pomocí malých vzorků. Pro korelaci mezi zatěžující silou F u SPCT a napětím σ u konvenční creepové zkoušky se využívá závislosti zatížení-doba do lomu a vychází se z rovnosti dob do lomu u obou typů zkoušek při stejné teplotě. Hodnota koeficientu $\Psi = 3,2$, která byla zjištěna pro ocel F, je mírně vyšší jak oproti faktoru dříve stanovenému na našem pracovišti na oceli P 92 ($\Psi = 2,6$) [12], tak i ve srovnání s výsledky získanými jinými autory u oceli P91, kdy byla stanovena hodnota tohoto koeficientu 2,85 [6].

Závěr

Creepové zkoušky malých vzorků představují jednu z perspektivních experimentálních metod zejména pro

odhady zbytkové životnosti energetických zařízení, a to jak díky tomu, že vzhledem k malému množství zkušebního materiálu je možné jej opakovaně odebírat i z kritických míst konstrukce, tak i proto, že dosahované výsledky lze dobře korelovat s výsledky konvenčních creepových zkoušek. Ukazuje se, že i pro SPCT platí obvyklé závislosti, které se stanovují u creepových zkoušek včetně Monkmanovy-Grantovy rovnice, což umožňuje dále zpřesňovat výsledky odhadů zbytkové životnosti.

Poděkování

Autoři příspěvku děkují za podporu poskytnutou v rámci projektu TE01020068 „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“ řešeného a financovaného v rámci programu TAČR Centra kompetence.

Literatura

- [1] LUCAS, G. E. The Development of Small Specimen Mechanical Test Techniques. *Journal of Nuclear Materials*, 117 (1983) July, 327–339.
- [2] PETZOVÁ, J., BŘEZINA, M., KAPUSŇÁK, M., KUPČA, I. Application of Small Punch Testing Methods for Thermal Ageing Monitoring at Primary Circuit Components in Nuclear Power Plant. *ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference*, Vol. 1A: Codes and Standards, Paper No. PVP2015-45539, Boston, Massachusetts, USA, July 19–23, 2015. ISBN 978-0-7918-5692-5.
- [3] KUMAR, J. G., LAHA, K. Small Punch Creep Deformation and Rupture Behavior of 316L (N) Stainless Steel. *Materials Science and Engineering, A*, 641 (2015), 315–322.
- [4] LI, Y., STURM, R. Small Punch Test for Weld Heat Affected Zones. *Materials at High Temperatures*, 23 (2006) 3 and 4, 225–232.
- [5] HURST, R. C., LANCASTER, R. J., NORTON, G., BANIK, R., BACHE, M. R. A Renaissance in Small Punch Testing at Swansea University. *Baltica IX*, VTT Technology, Helsinki, 11-13 June 2013, pp. 538–552.
- [6] MILIČKA, K., DOBEŠ, F. Small Punch Testing of P91 Steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 83 (2006) 625–634.
- [7] ŠTURM, R., JENKO, M., ULE, B., SOLAR, M. Small-punch Testing of Smart Weld Materials, In *The 2nd Int. Conf. on Structural Integrity of High Temperature Welds*, IOM3 Communications, London, Nov. 2003, pp. 269–278.
- [8] CHAKRABARTY, J. A Theory of Stretch Forming over Hemispherical Punch Heads. *International Journal of Mechanical Sciences*, 12 (1970) 4, 315–325.
- [9] DOBEŠ, F., MILIČKA, K. Studium lokálních creepových vlastností kolena vysokotlakého parovodu po dlouhodobém provozu. In 9. mezinárodní konference metalurgie a materiálů *Metal 2000*, příspěvek 717, Ostrava: Tanger, květen 2000.
- [10] CEN WORKSHOP AGREEMENT (CWA) 15627. Code of Practice for Small Punch Test Method for Metallic Materials. 2007.
- [11] Standard for Small Punch Creep Test – Estimation of Residual Life for High Temperature Component, *The Society of Materials Science*, Japan (Ed.), 2012. ISBN 978-4-901381-38-3.
- [12] KUBOŇ, Z. Hodnocení creepových charakteristik oceli – metody a úskalí. *Hutnické listy*, 70 (2017) 6, 36–40, ISSN 0018-8069.