

Hodnocení creepových charakteristik ocelí - metody a úskalí

Evaluation of Creep Characteristics of Steels - Methods and Pitfalls

Dr. Ing. Zdeněk Kuboň

MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM, s.r.o., Regionální materiálově technologické výzkumné centrum,
Pohraniční 31/639, 703 00 Ostrava-Vítkovice, Česká republika

Creepové zkoušky jsou již svojí samotnou podstatou jak časově, tak i finančně velice náročné. Současná evropská norma pro výrobu kotlů (EN 12 952-2) vyžaduje u materiálů používaných v klasických elektrárnách potvrzení jejich odpovídající odolnosti proti tečení. To nutí producenty ověřovat žárupevnost svých výrobků, ovšem jak z časových, tak i finančních důvodů bývá rozsah prováděných experimentů všemožně omezován a neustále jsou také intenzivně hledány způsoby, jak omezit jejich rozsah a zkrátit dobu jejich trvání. Jednou z možných cest je použití některé z metod extrapolace výsledků krátkodobých testů tečení. V příspěvku jsou proto na příkladu nízkolegované CrMoV oceli porovnávány extrapolované hodnoty meze pevnosti při tečení, stanovené pomocí některých extrapolčních metod a je ukázáno, že nejen extrapolční metoda, ale také pečlivá volba zkušebních podmínek a dostatečně dlouhá doba do lomu při nejvyšší zkušební teplotě jsou nevyhnutelnými podmínkami pro získání spolehlivé extrapolace mezi pevnosti při tečení.

Klíčová slova: Creep; nízkolegovaná žárupevná ocel; extrapolční metody; mez pevnosti při tečení

Creep testing of heat resistant steels and alloys is by its very nature time-consuming and very expensive. However, nowadays the European standard EN 12 952-2 strictly requires the proof of creep resistance of materials that are to be built into the new power plants. Creep testing is extremely time-consuming and therefore several methods are for extrapolation of the results of short-time creep tests. Extrapolated creep rupture strengths were calculated for a heat of low alloy steel 0.5Cr-0.5Mo-0.3V by using the Larson-Miller parametric equation, Seifert parametric equation and equation developed in the company SVUM. The results of calculation were compared and showed that the difference between the file containing all the experimental data and the file with times to rupture restricted up to 5,000 hours reached 30 %. It was also shown that not only extrapolation method but also careful choice of testing conditions guaranteeing sufficiently long-term creep data at the highest testing temperature are inevitable in order to obtain reliable extrapolated results of creep rupture strength. In order to make the reliable extrapolation of creep testing results, there is also a requirement that the material is in the identical structural state within the entire temperature range tested, so that there is no dissolution and/or precipitation of a secondary phase at this interval. The typical example may be the Laves phase precipitation in the chromium modified steels. Laves phase is not usually present in the structure just after heat treatment but precipitates during high temperature exposure, lowers solid solution strengthening and makes the long-term predictions very difficult. Similarly, Z-phase also precipitates in chromium modified steels with a chromium content above 10 % during creep exposure, dissolves fine dispersion particles of the MX type, which also affects creep rupture strength.

Key words: Creep; low-alloy creep resistant steel; extrapolation methods; creep rupture strength

V souvislosti s vývojem nových typů a značek žárupevných ocelí a jejich instalací v nových, příp. modernizovaných superkritických nebo ultra-superkritických energetických bloků na fosilní paliva se opětovně dostávají do popředí otázky okolo hodnocení žárupevných vlastností ocelí. Jejich vývoj a zejména spolehlivé provozní nasazení je podmíněno dostatečně věrohodnými odhady dlouhodobé meze pevnosti při tečení, a to i v kontextu toho, že projektová životnost těchto bloků v současnosti činí 200 000, resp. 250 000 hodin, což činí při nepřetržitém provozu 23, resp. 28,5 let. K získání přesných údajů o takto dlouhodobé žárupevnosti není samozřejmě možné čekat takovou dlouhou dobu, a je proto nezbytné použít pro stanovení

meze pevnosti při tečení extrapolaci výsledků creepových zkoušek, a to metodami, které jsou dostatečně robustní a spolehlivé.

1. Problematika garance žárupevnosti creepových ocelí

V materiálových normách zahrnujících oceli pro použití v creepové oblasti (např. ČSN EN 10028-2 pro plechy, ČSN EN 10216-2 pro bezešvé trubky nebo ČSN EN 10 222-2 pro výkovky) jsou střední hodnoty meze tečení a meze pevnosti při tečení uváděny v přílohách pouze jako informativní hodnoty, což je zřejmě dáno tím, že

producent těchto hutních výrobků není schopen v rámci přejímky doložit creepové charakteristiky výrobků z konkrétní tavby, jak je tomu u ostatních sledovaných materiálových vlastností.

Již v roce 2002 byla v ČR vydána národní mutace evropské normy EN 12 952-2 „Vodotrubné kotle a pomocná zařízení – Část 2: Materiály pro části kotlů a příslušenství namáhaných tlakem“ [1], v jejímž článku 4.2.5.6 se výslovně uvádí, že u materiálů určených pro použití při teplotách v oblasti tečení se musí stanovit průměrné hodnoty meze pevnosti při tečení v souladu s postupem uvedeným v normě ISO 6303 [2]. Navíc musí dodavatel materiálu poskytnout výrobcí kotle písemné prohlášení, že dodaný výrobek splňuje stanovené vlastnosti a že výrobní procesy jsou stejné jako u ocelí, na nichž byly získány výsledky požadovaných zkoušek včetně creepových charakteristik. Samotné ověřování creepových vlastností je však natolik finančně a zejména časově náročné, že nemůže být ze strany zákazníků u konkrétních výrobků (taveb) požadováno. První věrohodné výsledky creepových zkoušek jsou k dispozici až v době, kdy už je konkrétní výrobek z předmětné oceli/tavby dávno v provozu. Podle [2] musí dosáhnout doba do lomu u nejdelší creepové zkoušky alespoň jedné třetiny požadované projektové životnosti. Takže pokud je daná konstrukce projektovaná na 100 000 provozních hodin, musí nejdelší creepová zkouška dosáhnout aspoň 30 000 hodin, v případě požadované životnosti 200 000 hodin pak cca 65 000 hodin, tedy asi 4, resp. asi 9 let.

Povinností výrobce je ověřit žárupevnost každé značky jím vyráběné oceli, deklarované pro použití v creepové oblasti namáhání, a to nejméně na třech různých tavbách. Opakovat toto zkoušení a aktualizovat výsledky je výrobce rovněž povinen v případě jakékoliv významnější změny, která by mohla ovlivnit creepovou odolnost oceli (významná změna chemického složení oceli, a to i obsahu doprovodných a stopových prvků, změna technologie výroby jak oceli, tak i hutních výrobků, změna tepelného zpracování apod.).

V současné době je garance žárupevnosti opětovně požadována, a to i na základě špatných zkušeností z nedávné minulosti, kdy docházelo k předčasnému ukončení životnosti trubek a jejich svarových spojů v důsledku nedostatečného legování oceli, nevhodné kombinace obsahu legujících a doprovodných prvků či nedodržení doporučeného postupu tepelného zpracování. Při neznalosti nebo podcenění fyzikálně-metalurgické podstaty, na níž je creepová odolnost dané značky oceli postavena, je relativně snadné během výroby nebo tepelného zpracování dosáhnout stavu, kdy dlouhodobá žárupevnost zejména výšelegovaných ocelí nesplňuje ani povolenou minimální hodnotu meze pevnosti při tečení, která je definována jako 80 % příslušné střední hodnoty meze pevnosti při tečení.

2. Extrapolální metody pro hodnocení creepových vlastností ocelí

Při hodnocení nebo odhadu creepových vlastností ocelí se vychází z faktu, že charakteristiky žárupevnosti, ať už rychlost stacionárního tečení $\dot{\epsilon}_s$ nebo doba do lomu t_r závisí jak na aplikovaném napětí, tak i na teplotě. Vyjádřením tohoto vztahu je známá Norton-Bailleyho rovnice uváděná ve tvaru [3]:

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{d\epsilon}{dt} = B \cdot \sigma^{n_c} \exp\left(\frac{-Q_c}{RT}\right) \quad (1)$$

resp. její modifikace pro vztah závislosti doby do lomu:

$$t_r = C \cdot \left(\frac{\sigma}{E}\right)^{-n_r} \exp\left(\frac{Q_r}{RT}\right) \quad (2)$$

V těchto rovnicích je ϵ – creepová deformace [1], σ – napětí (MPa), T – absolutní teplota (K), Q_c , Q_r – zdánlivá aktivační energie creepu ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$), n_c , n_r – napěťové exponenty rychlosti stacionárního creepu, resp. doby do lomu, R – univerzální plynová konstanta, E – Youngův modul pružnosti (MPa), B , C – konstanty.

Jelikož při odhadu, resp. stanovení hodnot meze pevnosti při tečení se vychází většinou z časově omezených creepových zkoušek prováděných zpravidla při vyšší teplotě, byly vyvinuty parametrické rovnice, které parametrizují obě nezávisle proměnné v rov. (1) a (2), tj. napětí a teplotu, a tedy umožňují přepočet výsledků. Nejznámější parametrická rovnice je rovnice Larson-Millerova, nejčastěji uváděná ve tvaru [4]:

$$P_{LM} = T \cdot (C + \log t) = a_0 + a_1 \log \sigma \quad (3)$$

s identickým významem proměnných jako v rovnicích předchozích a s konstantou C , jejíž hodnota bývá buď zvolena, nejčastěji ve výši 20, nebo zjištěna výpočtem pomocí metody nejmenších čtverců.

Takto vyjádřena obsahuje Larson-Millerova rovnice lineární závislost na napětí. Jelikož ale v širším rozmezí napětí není závislost logaritmu doby do lomu na logaritmu napětí lineární, nelze tuto lineární závislost očekávat ani u Larson-Millerova parametru. Z tohoto důvodu se často používá polynomičká Larson-Millerova rovnice druhého nebo třetího řádu:

$$P_{LM} = T \cdot (C + \log t) = a_0 + a_1 \log \sigma + a_2 \log^2 \sigma + (a_3 \log^3 \sigma) \quad (4)$$

Parametrických rovnic je pochopitelně mnohem více. V našich podmínkách se ještě využívá rovnice Seifertova [5] vyjadřující aplikované napětí nebo mez pevnosti při tečení jako kvadratickou funkci teplotně-napěťového parametru ve tvaru:

$$\log \sigma = A_0 + A_1 P + A_2 P^2, \quad (P = T \cdot (C + \log t_r) \cdot 10^{-4}) \quad (5)$$

Často se využívá také rovnice SVÚM [6], jejíž parametry byly pro některé nejběžnější žárupevné oceli uvedeny i v materiálových listech. Tato rovnice

vyjadřuje závislost doby do lomu na aplikovaném napětí a teplotě těmito funkcemi:

$$\log(t) = A_1 + A_2 \cdot f(T) + A_3 \cdot f(T) \cdot g(\sigma) + A_4 \cdot g(\sigma) \quad (6)$$

$$f(T) = \log \left| \frac{1}{T} - \frac{1}{A_5} \right| \quad (7)$$

$$g(\sigma) = \log [\sinh(\sigma \cdot T \cdot A_6)] \quad (8)$$

Každá z těchto zde uvedených parametrických rovnic sice popisuje stejnou závislost, tedy nejčastěji závislost doby do lomu na aplikovaném napětí, avšak vzhledem k tomu, že jejich konstrukce i východiska jsou odlišná, mohou být rovněž odlišné získané výstupy, zejména pak schopnost extrapolovat naměřená data k požadovaným dlouhým dobám do lomu.

V souvislosti s požadavky odběratelů na garance creepových vlastností dodávaných výrobků tak v současné době vystoupila problematika spolehlivé extrapolace výsledků znovu do popředí. Dostatečně dlouhodobých creepových dat je k dispozici zpravidla málo a takových, která by splňovala podmínky uvedené v normě EN 12 952-2, ještě daleko méně. Ovšem povinnost deklarovat dosahování garantovaných hodnot meze pevnosti při tečení pro veškeré materiály pracující v oblasti převládající creepové deformace je normativně daná. Dodavatelé těchto materiálů pak vznášejí požadavky na provádění creepových zkoušek pouze krátkodobého charakteru s omezením třeba jen na 3000 hodin. Jak může takovýto přístup ovlivnit výsledky hodnocení creepových dat, je ukázáno na příkladu jedné tavby z oceli 15128.

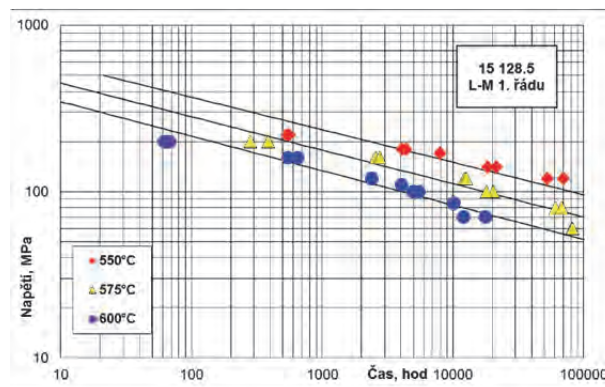
3. Příklady stanovení meze pevnosti při tečení z extrapolovaných creepových dat

Pro demonstraci toho, jak rozsah creepových dat a zejména maximální délka jejich trvání může ovlivnit predikci dlouhodobých creepových charakteristik, jsou v této kapitole zpracována creepová data jedné tavby oceli 15128.5 tím způsobem, že jsou z celého souboru, kde nejdelší doby do lomu přesahují dokonce i hodnotu 100 000 hodin, vybírána pouze ta data, u kterých nepřekročila doba do lomu 5000 hodin a jsou porovnány výsledky odhadů příslušných mezí pevnosti při tečení určených pomocí parametrických rovnic.

Na obr. 1 – 6 jsou uvedeny výsledky creepových zkoušek této tavby zpracované pomocí Larson-Millerovy parametrické rovnice 1. řádu, rovnice SVÚM a rovnice Seifertovy u souboru všech výsledků a také u souboru výsledků omezených maximální dobou do lomu pod 5000 hodin.

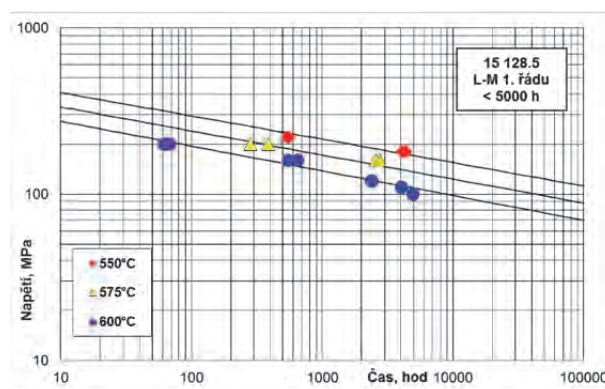
Uvedené výsledky názorně ukazují, jak je důležité i na souboru, který obsahuje dostatečně dlouhodobá creepová data, pečlivě volit použitou extrapolační metodu. Larson-Millerova rovnice 1. řádu zanedbává pokles koeficientu

napětíové závislosti doby do lomu s rostoucím časem, a má tak tendenci nadhodnocovat dlouhodobé výsledky. Naproti tomu rovnice SVÚM tento odklon spíše ještě více zvýrazní, třebaže v konkrétním případě jsou extrapolované hodnoty vyšší. Larson-Millerova rovnice vyšších řádů má tendenci se chovat jako polynom a odklání se velice brzy po opuštění posledního experimentálního bodu z pole pozorování.



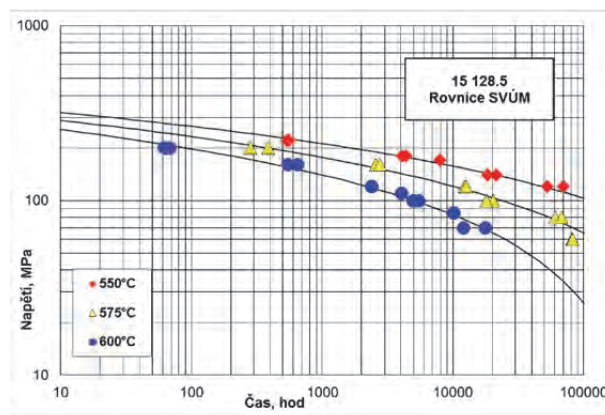
Obr. 1 Výsledky creepových zkoušek oceli 15128.5, celý soubor dat, zpracování pomocí L-M rovnice 1. řádu

Fig. 1 Results of stress rupture tests of steel 15128.5, all data, calculated by Larson-Miller equation of the 1st order



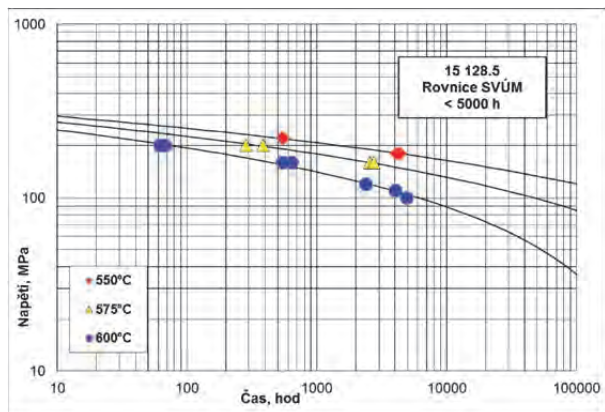
Obr. 2 Výsledky creepových zkoušek oceli 15128.5, časově omezená data, zpracování pomocí L-M rovnice 1. řádu

Fig. 2 Results of stress rupture tests of the steel 15128.5, time restricted data, calculated by Larson-Miller equation of the 1st order



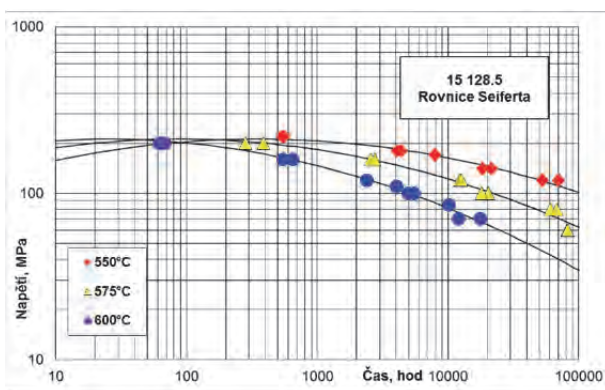
Obr. 3 Výsledky creepových zkoušek oceli 15128.5, celý soubor dat, zpracování pomocí rovnice SVÚM

Fig. 3 Results of stress rupture tests of the steel 15128.5, all data, calculated by using SVÚM equation



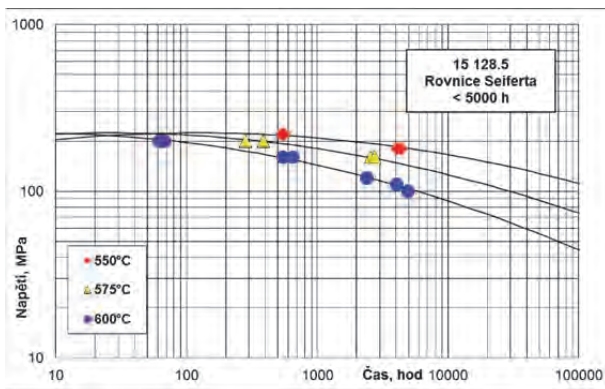
Obr. 4 Výsledky creepových zkoušek oceli 15128.5, časově omezená data, zpracování pomocí rovnice SVÚM

Fig. 4 Results of stress rupture tests of the steel 15128.5, time restricted data, calculated by using SVÚM equation



Obr. 5 Výsledky creepových zkoušek oceli 15128.5, celý soubor dat, zpracování pomocí rovnice Seiferta

Fig. 5 Results of stress rupture tests of the steel 15128.5, all data, calculated by using Seifert equation



Obr. 6 Výsledky creepových zkoušek oceli 15128.5, časově omezená data, zpracování pomocí rovnice Seiferta

Fig. 6 Results of stress rupture tests of the steel 15128.5, time restricted data, calculated by using Seifert equation

Rovnice Seiferta je v mnoha případech velice dobře použitelná, protože si poměrně dlouho udrží tendenci poklesu. Na druhou stranu ale často na straně krátkých časů konverguje do jednoho bodu, jak je vidět i na obr. 5 a 6.

Výsledky odhadu meze pevnosti při tečení pomocí jednotlivých extrapolčních metod ukazuje tab. 1 a 2.

Tab. 1 Srovnání extrapolovaných hodnot meze pevnosti při tečení, všechna data (MPa)

Tab. 1 Comparison of extrapolated values of creep rupture strength, all data (MPa)

Teplota	550 °C			600 °C		
Metoda	L-M 1.ř.	SVÚM	Seifert	L-M 1.ř.	SVÚM	Seifert
10 ⁴ h	150	158	163	83	83	82
10 ⁵ h	96	103	101	51	26	34
2·10 ⁵ h	84	87	84	44	12	25

Tab. 2 Srovnání extrapolovaných hodnot meze pevnosti při tečení, data do 5000 h (MPa)

Tab. 2 Comparison of extrapolated values of creep rupture strength, data up to 5000 h (MPa)

Teplota	550 °C			600 °C		
Metoda	L-M 1.ř.	SVÚM	Seifert	L-M 1.ř.	SVÚM	Seifert
10 ⁴ h	155	164	166	98	88	88
10 ⁵ h	113	121	112	70	39	44
2·10 ⁵ h	102	107	96	63	21	35

Ve sledovaném případě oceli 15128.5 bylo pozorováno jisté nadhodnocení extrapolovaných hodnot meze pevnosti při tečení, odvozené z creepových dat s maximální dobou do lomu do 5000 hodin. Jak ukazuje srovnání výsledků v tab. 1 a 2, toto nadhodnocení dosahuje i více než 30 %. Na druhou stranu je z výsledků rovněž patrné, že i při tak rozsáhlém souboru výsledků s velmi dlouhými časy do lomu je pro dosažení věrohodných extrapolací nezbytné mít k dispozici dostatečně dlouhodobý výsledek při nejvyšší zkušební teplotě. V tomto konkrétním případě se ukázalo, že doba do lomu na úrovni 20 000 hodin při teplotě 600 °C je pro spolehlivou extrapolaci výsledků naprosto nedostačující a obě nelineární parametrické rovnice významně dlouhodobou žárupevnost při této teplotě podhodnocují. Je proto třeba věnovat mimořádnou pozornost i vyváženosti souboru creepových zkoušek a dosáhnout pokud možno rovnoměrného rozložení dob do lomu při jednotlivých teplotách.

Neméně důležitý pro věrohodnou extrapolaci výsledků creepových zkoušek je také požadavek na to, aby se v celém sledovaném teplotním rozmezí materiál nacházel v identickém strukturním stavu, tedy aby v tomto intervalu nedocházelo k vylučování nebo naopak rozpouštění některé sekundární fáze. Příkladem může být Lavesova fáze u chromových modifikovaných ocelí, kdy její teplota rozpouštění leží blízko hodnoty 650 °C, a může tak nastat situace, kdy během provádění creepových zkoušek za vysoké teploty tato fáze nevzniká, a v tuhém roztoku se proto nachází vyšší koncentrace molybdenu, než odpovídá provozním podmínkám. Důsledkem je vyšší úroveň zpevnění tuhého roztoku a velké nebezpečí nadhodnocení creepové odolnosti těchto ocelí. Podobně působí, zejména u chromových modifikovaných ocelí s obsahem chromu nad 10 %, také precipitace Z-fáze, kterou doprovází rozpouštění jemných disperzních částic typu MX, které v oceli působí jako překážka pohybu dislokací a významně ovlivňují precipitační zpevnění oceli [7 – 11].

Kimura et al. [12] ve své práci popisuje nebezpečí nadhodnocení creepové odolnosti právě na chromových modifikovaných ocelích s 12 % Cr (tab. 3 a obr. 7).

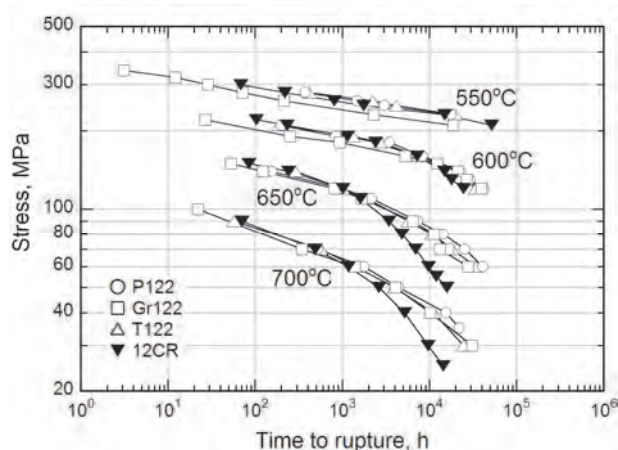
Tab. 3 Chemické složení studovaných ocelí (hm. %) [12]

Tab. 3 Chemical composition of the studied steels (wt. %) [12]

Ocel	C	Cr	Mo	Cu	W	V	Nb	Al	B	N
Gr 122	0,12	10,73	0,38	0,97	1,97	0,22	0,06	0,006	0,0039	0,072
12 CR	0,11	12,10	0,34	0,82	1,82	0,19	0,06	0,016	0,0030	0,066

Ocel Gr. 122 podle ASME byla zkoušena ve formě parovodní trubky (P 122), plechu (Gr. 122) a tenkostěnné trubky (T 122). Jak je patrné ze závislosti napětí-doba do lomu těchto ocelí zkoušených při 550, 600, 650 a 700 °C, dochází při teplotách 600, 650 a 700 °C a v oblasti nízkých napětí k odklonu těchto křivek k ose pořadnic, a tedy k výraznému poklesu creepové pevnosti s rostoucí dobou do lomu. K tomuto odklonu ovšem dochází např. při 600 °C až po zhruba 10 000 hodinách, a je tedy krátkodobými creepovými zkouškami prakticky nepostizitelný.

Největší odklon pak vykazuje ocel 12 CR, která obsahuje ve struktuře 5 % δ -feritu, a její doby do lomu jsou tak v oblasti nízkých napětí ještě výrazně kratší než u ostatních ocelí.



Obr. 7 Závislost napětí - doba do lomu pro 4 značky 12 %-ních Cr modifikovaných ocelí [12]

Fig. 7 Stress vs. time to rupture curves for 4 grades of 12 % Cr modified steels [12]

Závěr

Porovnání výsledků hodnot meze pevnosti při tečení stanovených pomocí několika parametrických rovnic používaných pro extrapolaci výsledků creepových zkoušek a zejména pak pro predikci creepové odolnosti žárupevných ocelí ukázalo, že použití pouze krátkodobých výsledků vede k nereálným výsledkům. Při použití Larson-Millerovy rovnice 1. řádu (případně i jiných lineárních rovnic) dochází k nadhodnocení extrapolovaných hodnot meze pevnosti při tečení. Při použití nelineárních metod mohou být příslušné extrapolované hodnoty naopak podhodnoceny. Zároveň se potvrdilo, že pro

dosažení maximální věrohodnosti prováděné extrapolace, a to i na rozsáhlém souboru creepových dat, který obsahuje i výsledky zkoušek s velmi dlouhými dobami do lomu, je nezbytné mít k dispozici i dostatečně dlouhodobé výsledky creepových zkoušek prováděných při nejvyšších teplotách. V uváděném konkrétním příkladu hodnocení jedné tavby z oceli 15128 se ukázalo, že doba do lomu na úrovni 20 000 hodin při teplotě 600 °C je pro spolehlivou extrapolaci výsledků naprosto nedostačující, protože zejména nelineární parametrické rovnice významně dlouhodobou žárupevnost při této teplotě podhodnotily. Je proto třeba věnovat mimořádnou pozornost nejen rozsahu, ale i vyváženosti souboru creepových zkoušek a dosáhnout pokud možno rovnoměrného rozložení dob do lomu při jednotlivých teplotách.

Poděkování

Autor příspěvku děkuje za institucionální podporu poskytnutou v rámci projektu č. LO 1203 „Regionální materiálové technologické výzkumné centrum - program udržitelnosti“ (RMTVC-PU) financovaného MŠMT České republiky.

Literatura

- [1] ČSN EN 12952-2 Vodotrubné kotle a pomocná zařízení - Část 2: Materiály pro části kotlů a příslušenství namáhaných tlakem, Praha: Český normalizační institut. 2002.
- [2] ISO 6303 Pressure vessel steels not included in ISO 2604, Parts 1 to 6 - Derivation of long-time stress rupture properties, 1981.
- [3] NORTON, F. H. *The Creep of Steel at High Temperature*. New York: McGraw Hill, 1929.
- [4] LARSON, F. R., MILLER, J. Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses. *J. Trans. ASME*, 74 (1952) 765–775.
- [5] SEIFERT, W. Statistische Kenngrößen aus der Auswertung von Zeitstandversuchen. In *Warmfeste metallische Werkstoffe*. Zittau: Kammer der Technik. 1987, s. 129.
- [6] PECH, R., KOUČKÝ, J., BÍNA, V., JAKOBOVÁ, A. Matematizace normovaných hodnot mezi pevnosti při tečení československých žárupevných ocelí. In *Zvyšování jakostních parametrů žárupevných ocelí pro náročná použití v energetických a chemických zařízeních*. Technické aktuality VÍTKOVICE, č. 1, 1983, 159–163.
- [7] HALD, J. Microstructure and Long-term Creep Properties of 9–12% Cr Steels. *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, 85 (2008) 30–37.
- [8] LEE, K. H., PARK, D. B., KWUN, S. I., HUH, J. Y., SUH, J. Y., SHIM, J. H., JUNG, W. S. Effect of Creep Deformation on the Microstructural Evolution of 11CrMoVNb Heat Resistant Steel. *Mater. Sci. Eng. A*, 536 (2012) 92–97.
- [9] YOSHIZAWA, M., IGARASHI, M., MORIGUCHI, K., ISEDA, A., ARMAKI, H. G., MARUYAMA, K. Effect of Precipitates on Long-term Creep Deformation Properties of P92 and P122 Type Advanced Ferritic Steels for USC Power Plants. *Mater. Sci. Eng. A*, 510-511 (2009) 162–168.
- [10] STRANG, A., VODÁREK, V. Z-phase Formation in Martensitic 12CrMoVNb Steel. *Mater. Sci. Technol.* 12 (1996) 552–556.
- [11] DANIELSEN, H. K., DI NUNZIO, P. E., HALD, J. Kinetics of Z-phase Precipitation in 9 to 12 pct Steels. *Metall. Mater. Trans. A*, 44 (2013) 2445–2452.
- [12] KIMURA, K., SAWADA, K., KUSHIMA, H., TODA, Y. Stress Dependence of Degradation and Creep Rupture Life of Creep Strength Enhanced Ferritic Steels. In *Fifth International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants*, Oct. 3-5, 2007, Marco Island, Florida, USA.