

HOMOGENITA STRUKTURY A VLASTNOSTÍ TLUSTOSTĚNNÝCH VÝROBKŮ Z OCELI P92

HOMOGENEITY OF THE STRUCTURE AND CPROPERTIES OF THICK-WALLED PRODUCTS MADE OF P92 STEEL

Zdeněk Kuboň a Ladislav Kander

MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., Ostrava

Abstrakt

Článek se zabývá strukturou a vlastnostmi trubky s tloušťkou stěny 90 mm vyrobené z oceli P92. Metalografická analýza odhalila četné řediny zejména u vnitřního povrchu trubky, které jsou zřejmě důsledkem nedostatečného protváření při válcování trubky. Srovnání lokálních materiálových vlastností u obou povrchů trubky bylo provedeno jednak pomocí metalografie, jednak tahovými zkouškami, zkouškami tvrdosti, zkouškami vrubové houževnatosti a penetračními zkouškami malých vzorků. Získané výsledky jsou porovnány s materiálovými požadavky na ocel P92 a doplněny úvahami o vlivu nehomogenity struktury a vlastností na dlouhodobou životnost trubky v podmínkách creepového namáhání.

Abstract

The paper deals with the microstructure and properties of a pipe with a wall thickness of 90 mm made of P92 steel. Metallographic analysis revealed numerous dilutions, especially close to the inner surface of the pipe, which developed probably due to insufficient deformation during pipe rolling. The local material properties of both pipe surfaces were compared by metallography, tensile tests, hardness tests, Charpy-V notch toughness tests as well as penetration tests of small samples. The obtained results are compared with the material requirements for P92 steel and an attempt is made to evaluate the possible influence of the inhomogeneity of the microstructure and properties on the long-term service life of the pipe under creep conditions.

Úvod

V polovině roku 2018 bylo v rámci programu THÉTA zahájeno řešení projektu TK01020160 „Komplexní postupy materiálového inženýrství k zajištění bezpečného provozu inovovaných bloků klasických elektráren“, kterého se účastní mimo MMV také ČEZ, a. s., ÚAM Brno, s.r.o., a UJP Praha, a.s. Jedním z hlavních cílů tohoto projektu je materiálový výzkum zaměřený na získání databáze vlastností nově nasazovaných či retrofitovaných materiálů se zvláštním zaměřením na creepové, únavové a křehkolomové vlastnosti ohybů kotlových trubek i parovodů, svarových spojů a dalších kritických komponent energetických kotlů. Znalost těchto materiálových dat spolu s odpovídajícím postupem jejich vyhodnocení umožní provozovatelům energetických zařízení lépe řídit spolehlivost a čerpání životnosti systémových zdrojů.

Jedním z těchto materiálů používaných zejména na parovody USC kotlů je i ocel P92 (X10CrWMoVNb 9-2). Je to jedna z komerčně nejúspěšnějších martenzitických žárupevných ocelí, která mezi nimi dosahuje zároveň i nejvyšší dlouhodobě ověřenou žárupevnost [1]. Avšak pro náročné pracovní parametry parovodů USC kotlů to znamená, že tloušťka stěny parovodní trubky se i u této oceli může blížit 100 mm. S ohledem na rozměry použitého výchozího polotovaru a stupeň jeho protváření tak může výsledné materiálové charakteristiky tlustostěnné trubky významně ovlivnit i nehomogenita struktury. Martenzitické žárupevné oceli jsou samokalitelné, což znamená, že rychlost ochlazování a volba ochlazovacího média nemá na vznik martenzitu a jeho výsledné vlastnosti až tak významný vliv. Na druhou stranu, v případě nedokonalé protvářené struktury se v ní mohou vyskytovat zbytky původní dendritické struktury včetně ředin, což může mít negativní vliv na užité vlastnosti oceli.

Experimentální materiál a provedené analýzy

V rámci řešení projektu TK01020160 dochází ke komplexnímu ověřování materiálových charakteristik parovodní trubky z oceli P92. Jedná se o trubku nominálních rozměrů ID = 350 mm s nominální tloušťkou stěny 80 mm, která byla dodána ve stavu po provozním tepelném zpracování. Její chemické složení včetně požadavku uvedeného v ČSN EN 10216-2 [2] je uvedeno v tab. 1.

Tab. 1: Chemické složení trubky z oceli P92

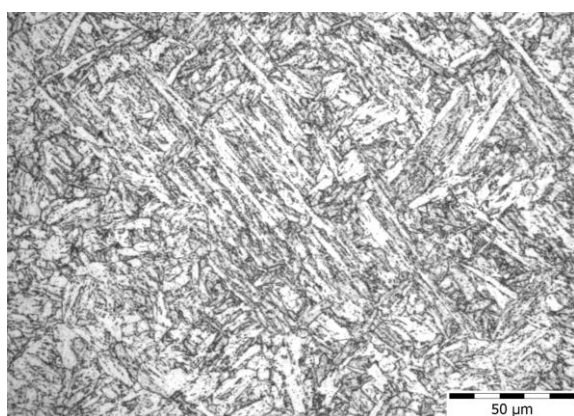
Prvek	C	Mn	Si	P	S	Cr	W	Mo	V	Nb	N	Al	B
Trubka	0,10	0,41	0,20	0,013	0,004	8,74	1,66	0,48	0,18	0,050	0,056	0,001	0,0020
ČSN EN	0,07- 0,13	0,30- 0,60	≤0,50	max. 0,020	max. 0,010	8,5- 9,5	1,5- 2,0	0,3- 0,6	0,15- 0,25	0,04- 0,09	0,003- 0,007	≤0,020	0,001- 0,006

Komplexní analýza materiálových vlastností této trubky zahrnovala ověření mechanické pevnosti za laboratorní i zvýšené teploty, provádění zkoušek vrubové houževnatosti a sestavení křivky přechodu křehký-houževnatý stav, proměření profilu tvrdosti přes tloušťku stěny, analýzu mikrostruktury a také provádění creepových zkoušek.

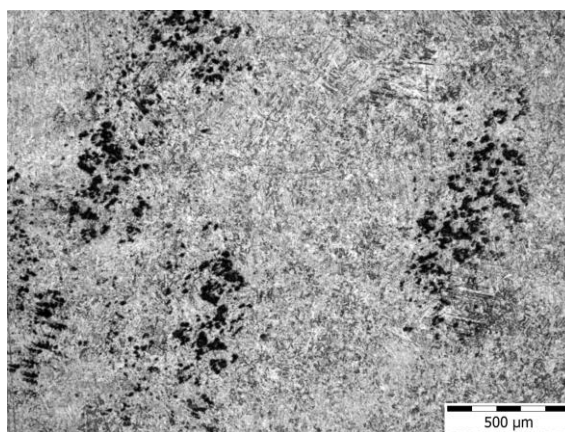
Mikrostruktura a mechanické vlastnosti

Metalografická analýza potvrdila popuštěnou martenzitickou strukturu trubky (obr. 1), odhalila však, že se prakticky v celém průřezu stěny trubky nacházejí shluky ředin. Jejich výskyt byl četnější u vnitřního povrchu trubky a, jak je vidět na obr. 2 a obr. 3, velikost těchto shluků se pohybovala v malých jednotkách milimetrů. Potvrzení skutečnosti, že se jedná skutečně o řediny přineslo zobrazení v topografickém kontrastu při pozorování na skenovacím elektronovém mikroskopu v režimu odražených elektronů, při kterém jsou uvnitř jednotlivých ředin velmi zřetelně patrné zaoblené útvary původních dendritů, obr. 4.

Výsledků metalografické analýzy bylo rozhodnuto rozšířit porovnávací zkoušky mechanických vlastností o tahovou zkoušku na zkušebních tělesech umístěných těsně pod vnějším a těsně pod vnitřním povrchem prováděnou při laboratorní teplotě a při teplotě 600 °C. Výsledky jsou shrnuty v tab. 2 spolu se srovnáním s požadavky, uvedenými v ČSN EN 10216-2.



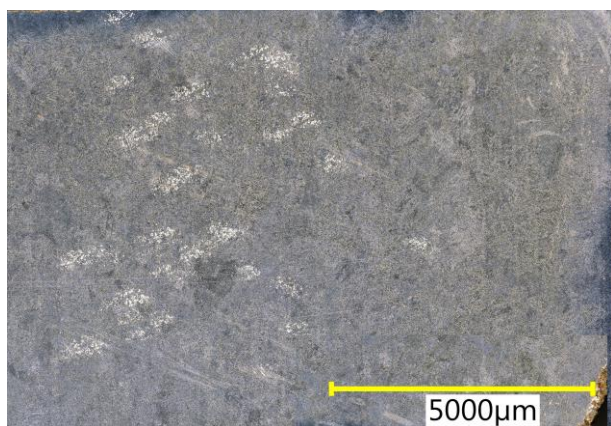
Obr. 1: Mikrostruktura trubky z oceli P92



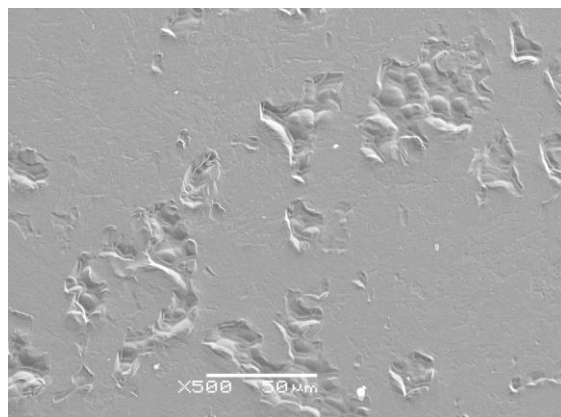
Obr. 2: Řediny u vnitřního povrchu trubky

Jak je zřejmé z výsledků uvedených v tab. 2, pohybuje se rozdíl mezi mechanickými vlastnostmi u obou povrchů trubky při laboratorní teplotě pouze v jednotkách megapascalů a ani při teplotě 600 °C nepřesáhne 5 %. Lze tedy říci, že mezi oběma povrchy neexistuje v mechanických vlastnostech prakticky žádný rozdíl. Při srovnání s požadavkem na mechanické vlastnosti oceli P92 se ukazuje, že daná trubka patří do skupiny trubek s relativně nízkou pevnostní úrovní,

kdy se hlavně meze pevnosti nacházejí velmi blízko spodní hranice požadavku na minimální pevnost v tahu.



Obr. 3: Shluk ředin

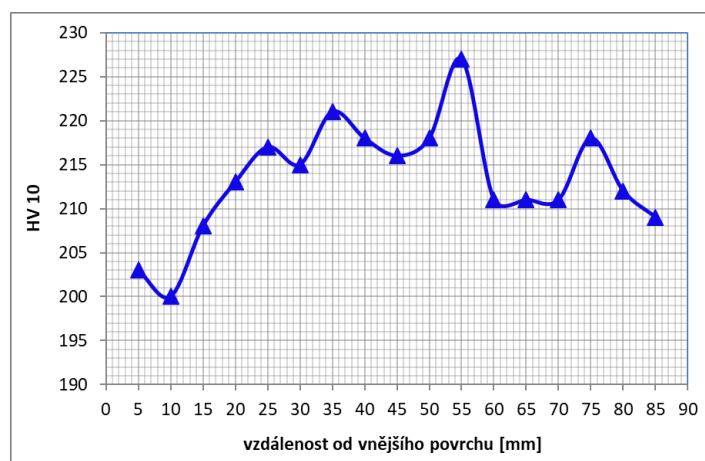


Obr. 4: Řediny, SEM, režim TOPO

Tab. 2: Mechanické vlastnosti u vnějšího a vnitřního povrchu trubky

Teplota	+20 °C				600 °C			
	R _{p0.2}	R _m	A ₅	Z	R _{p0.2}	R _m	A ₅	Z
Povrch trubky	[MPa]		[%]		[MPa]		[%]	
Vnitřní	481	651	27,4	69,6	280	294	22,1	89,5
Vnější	484	645	26,6	72,2	292	306	21,9	89,5
ČSN EN 10216-2	≥440	620-850	≥17,0	-	≥248	-	-	-

Podobně se ani tvrdost významněji nemění směrem od vnějšího k vnitřnímu povrchu, jak je patrné z obr. 5. Tvrdost je minimální blízko vnějšího povrchu trubky, v celé tloušťce stěny se mění pouze o necelých 30 HV a maxima dosahuje v hloubce asi 55 mm pod vnějším povrchem, odkud směrem k vnitřnímu povrchu opět klesá.

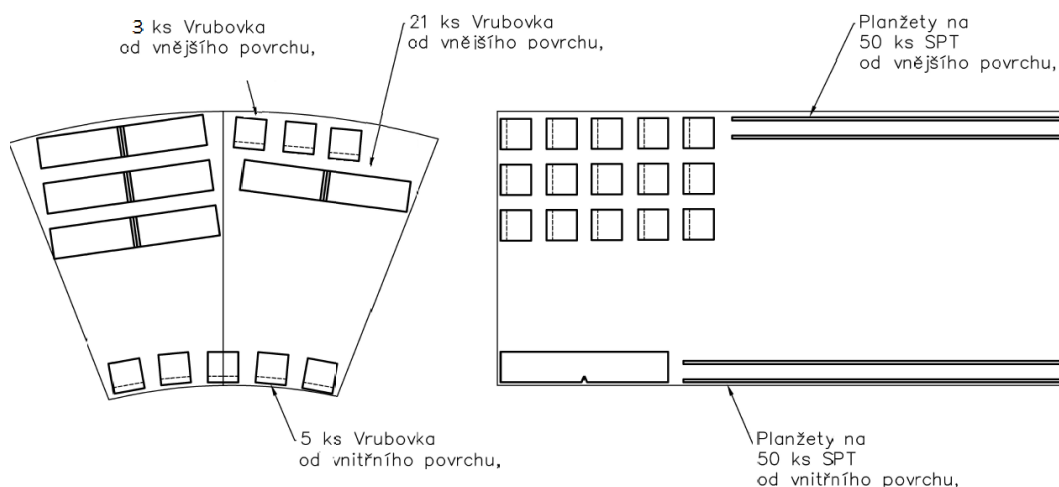


Obr. 5: Profil tvrdosti HV 10 přes tloušťku stěny trubky

Vrubová houževnatost

Zkoušky rázem v ohybu byly původně prováděny na zkušebních tělesech Charpy s V-vrubem v příčném směru, přičemž zkušební tělesa pro stanovení celé Vidalovy křivky přechodu křehký-houževnatý stav byla připravena z oblasti pod vnějším povrchem. Po zjištění defektů ve struktuře byla pro srovnání vlastností u obou povrchů vyrobena i další zkušební tělesa, jejichž orientace v podélném směru byla zvolena s ohledem na výsledky metalografické analýzy,

kdy rovina šíření trhliny odpovídá předpokládanému směru růstu defektu přes tloušťku stěny trubky (obr. 6).

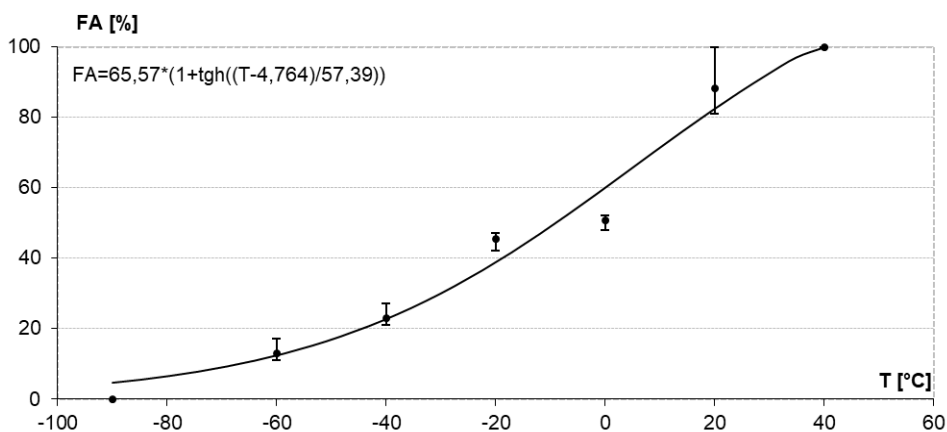


Obr. 6: Lokalizace zkušebních těles pro zkoušky vrubové houževnatosti

Výsledky zkoušek rázem v ohybu jednak ukázaly vysoké hodnoty nárazové práce trubky při laboratorní teplotě, jednak nepotvrdily rozdíl ve velikosti nárazové práce mezi vnějším a vnitřním povrchem, tabulka 3. Výsledná Vidalova křivka je ukázána na obr. 7 a odpovídající výše přechodové teploty křehký-houževnatý stav (FATT) uvedena v tab. 3.

Tab. 3: Nárazové práce při laboratorní teplotě a teplota FATT

Povrch trubky	Nárazová práce KV při +20 °C	FATT
	[J]	[°C]
Vnitřní	169, 166, 169	-9
Vnější	160, 166, 197	



Obr. 7: Vidalova křivka závislosti podílu houževnatého lomu na teplotě

Creepová odolnost

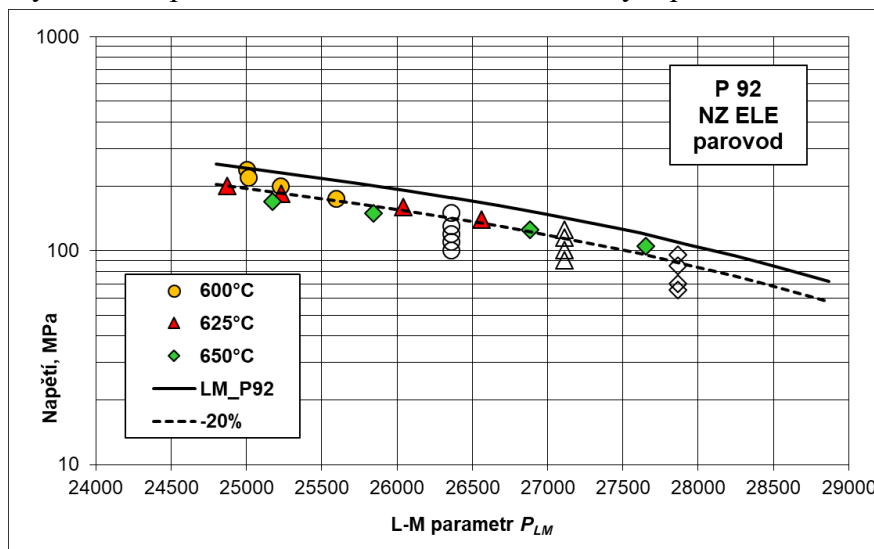
Svojí velikostí v řádu malých desítek mikrometrů odpovídají pozorované defekty propojeným kavitám až řetízkům kavit. Je proto velice zajímavé zjistit, zda, kdy a jak se přítomnost těchto apriorních strukturních vad projeví na creepové odolnosti trubky. Původní creepový program byl primárně zaměřen na ověření shody creepové odolnosti trubky s požadavkem udaným v materiálové normě a zkušební tělesa pro creepové zkoušky byla vyrobena z celého průřezu trubky a zkoušena při teplotách 600, 625 a 650 °C; pro posouzení creepových vlastností v blíz-

kosti obou povrchů byl proto tento program rozšířen o creepové zkoušky malých vzorků (SPCT) připravených z oblastí jak od vnějšího, tak i od vnitřního povrchu (viz planžety na obr. 6), které byly zkoušeny při teplotě 650 °C. Jelikož doby do lomu dosud ukončených creepových zkoušek jsou zatím jen velice krátké, byla pro grafické srovnání výsledků a jejich interpretaci použita metoda přepočtu experimentálních dat do Larson-Millerovy parametrické rovnice ve tvaru [3]

$$P = T \cdot (C + \log t), \quad (1)$$

kde T znamená teplotu v Kelvinech, t je doba do lomu v hodinách. Larson-Millerova konstanta C ($C = 26,8$) byla při tomto zpracování získána pomocí metody nejmenších čtverců přepočtem z výsledků uváděných pro ocel P92 ve standardu ČSN EN 10 216-2.

Závislost střední hodnoty meze pevnosti při tečení oceli P92 na tomto obrázku představuje plná čára, zatímco čárkovaná čára reprezentuje povolenou -20% odchylku od této střední hodnoty. Uvedené srovnání ukazuje, že reálné výsledky creepových zkoušek této parovodní trubky se nacházejí sice pod střední hodnotou, ale prakticky všechny ve spodním povoleném rozptylovém 20% pásmu okolo ní (čárkovaná čára), přičemž trendově se žárupevnost trubky s rostoucí teplotou a prodlužující se dobou do lomu přibližuje ke střední standardizované hodnotě. Prázdné symboly uvedené na obr. 8 představují lomem dosud neukončené zkoušky, a i ty naznačují vcelku dobrá východiska pro dlouhodobé nasazení této trubky v podmínkách 660 MW kotle.



Obr. 8 Závislost napětí na Larson-Millerově parametru P_{LM}

Podobně jako u ostatních materiálových charakteristik, byl i pro srovnání creepových vlastností u obou povrchů trubek připraven program creepových zkoušek malých vzorků (SPC testy), jehož první výsledky budou uvedeny v prezentaci tohoto příspěvku na konferenci.

Diskuze výsledků

Přítomnost shluků ředin v tvářené tlustostěnné trubce rozhodně není obvyklá a v daném případě s největší pravděpodobností souvisí s nízkým stupněm protváření oceli při výrobě takto tlustostěnné trubky, ať už je výchozím polotovarem ingot nebo kontislitek. Výskyt ředin je obvyklý a akceptovatelný v případě odlitků, avšak ani u nich není obvyklé, aby se vyskytovaly v takto četných shlucích, ale jsou spíše náhodně rozloženy ve struktuře, což eliminuje jejich negativní vliv na užité vlastnosti oceli. Ve sledovaném případě nejenže byly četné řediny ve

stěně trubky zjištěny, ale lokálně bylo jejich nahromadění značné a rozměrově se tyto skupiny defektů již dostaly na úroveň mikrotrhlin.

Analýza mechanických, křehkolomových i krátkodobých creepových vlastností tlustostěnné trubky pak dosud neprokázala žádný vliv existence shluků ředin ve struktuře na některou z materiálových charakteristik. Zda vůbec a do jaké míry řediny představují reálné nebezpečí zejména pro pokles žárupevnosti trubky není prozatím možné určit, protože výsledky dosud ukončených creepových zkoušek dosahují pouze časů v řádu tisíce hodin, kdy hraje nejvýznamnější roli odpevnění struktury charakterizované v takto krátkých časech zejména poklesem hustoty dislokací a v menší míře nahrubnutím precipitátů. U krátkodobých creepových zkoušek rovněž převládají lomy transkrystalické, kdežto v případě dlouhých časů se charakter lomů mění na interkrystalický a creepové poškození se v celém objemu mění na kavitační a soustředí se na hranice zrn. Podobně i rostoucí creepová trhlinka zřejmě po dosažení takto poškozené oblasti skokově změni svoji délku o několik milimetrů a rychleji se tak přiblíží kritické velikosti pro vznik náhlého nestabilního lomu. Ve zrelaxované a odpevněné struktuře tak může podobný defekt významně urychlit čerpání životnosti a snížit míru bezpečnosti provozování daného uzlu.

Závěr

Zjištěné shluky ředin ve struktuře tlustostěnné trubky z oceli P92 mohou do budoucna představovat potenciálně závažné riziko pro bezpečnost i spolehlivost provozu kotle. Parovodu by proto měla být do budoucna věnována zvýšená diagnostická pozornost, zejména pak v období blížícího se konce projektované životnosti. V současnosti pak v rámci řešení zmíněného projektu probíhají i další práce zaměřené na stanovení lomové houževnatosti a podmínek růstu trhlin při dynamickém namáhání.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za finanční podpory Technologické agentury České republiky v rámci projektu THĚTA TK01020160 „Komplexní postupy materiálového inženýrství k zajištění bezpečného provozu inovovaných bloků klasických elektráren“.

Literatura

- [1] Kimura, K., Toda, Y., Kushima, H., Sawada, K. (2010): *Creep strength of high chromium steel with ferrite matrix*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 87, pp. 282-288. ISSN 0308-0161
- [2] ČNI (2008): *ČSN EN 10216-2+A2: Bezešvé ocelové trubky pro tlakové nádoby a zařízení – Technické dodací podmínky – Část 2: Trubky z nelegovaných a legovaných ocelí se zaručenými vlastnostmi při zvýšených teplotách*. Český normalizační institut, Praha.
- [3] Monkman, F. C., Grant, N. J. (1956): *An empirical relationship between rupture life and minimum creep rate in creep-rupture tests*. Proceedings-American Society for Testing and Materials, Vol. 56, pp. 593-620.